

TCVN

TIÊU CHUẨN QUỐC GIA

TCVN xxxxx:2024

ISO 8301:1991

WITH AMENDMENT 1:2010

Xuất bản lần 1

**CÁCH NHIỆT – XÁC ĐỊNH NHIỆT TRỞ
Ở TRẠNG THÁI ỔN ĐỊNH VÀ CÁC ĐẶC TÍNH LIÊN QUAN
– THIẾT BỊ ĐO DÒNG NHIỆT**

*Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties
— Heat flow meter apparatus*

HÀ NỘI - 2024

Mục lục

Trang

Lời nói đầu	4
Lời giới thiệu	5
0.1 Phân chia tài liệu	5
0.2 Truyền nhiệt và các đặc tính đo	5
0.3 Yêu cầu chung	6
0.4 Thiết kế, kích thước và tiêu chuẩn quốc gia	6
0.5 Hướng dẫn cung cấp	6
1 Yêu cầu chung	7
1.1 Phạm vi áp dụng	7
1.2 Tài liệu viện dẫn	7
1.3 Thuật ngữ, định nghĩa	8
1.4. Ký hiệu và đơn vị	10
1.5. Ý nghĩa	12
1.6 Nguyên tắc thử	14
1.7 Hạn chế do thiết bị	15
1.8 Hạn chế do mẫu thử	16
2 Thiết bị và hiệu chuẩn	18
2.1 Quy định chung	18
2.2 Thiết bị	18
2.3 Hướng dẫn thiết kế thiết bị	26
2.4 Hiệu chuẩn	28
2.5 Kiểm tra hiệu năng	31
3 Quy trình thử nghiệm	32
3.1 Yêu cầu chung	32
3.2 Mẫu thử	33
3.3 Phương pháp thử nghiệm	36
3.4. Quy trình yêu cầu nhiều phép đo	38
3.5 Tính toán	40
Phụ lục A	44
Phụ lục B	47
Phụ lục C	49
Phụ lục D	50
Phụ lục E	52
Thư mục tài liệu tham khảo	52

Lời nói đầu

TCVN xxxx: 2024 hoàn toàn tương đương ISO 8301:1991 và Sửa đổi Amd.1:2010

TCVN xxxx:2024 do Viện Vật liệu xây dựng - Bộ Xây dựng biên soạn, Bộ Xây dựng đề nghị, Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng thẩm định, Bộ Khoa học và Công nghệ công bố.

Lời giới thiệu

0.1 Phân chia tài liệu

Tiêu chuẩn này được chia thành ba phần bao gồm đầy đủ các thông tin cần thiết để sử dụng thiết bị đo dòng nhiệt:

Phần 1: Yêu cầu chung

Phần 2: Thiết bị và hiệu chuẩn

Phần 3: Quy trình thử nghiệm

Để thu được kết quả có độ chính xác cao, cần phải kết hợp thông tin trong cả ba phần. Phải đặc biệt thông thạo về các yêu cầu chung. Phần 2 hướng dẫn để xây dựng thiết bị, tuy nhiên để có thể xây dựng tốt thì cũng phải am hiểu các phần khác.

0.2 Truyền nhiệt và các đặc tính đo

Hầu hết các thử nghiệm được thực hiện trên các vật liệu xốp có tỷ trọng nhẹ. Trong những trường hợp như vậy, sự truyền nhiệt thực tế bên trong mẫu thử là sự kết hợp phức tạp của các quá trình:

- Bức xạ nhiệt;
- Dẫn nhiệt cả trong pha rắn và pha khí;
- Đối lưu nhiệt (trong một số điều kiện vận hành);

Ngoài ra, còn có sự tương tác bên trong của vật liệu cùng với sự chuyển khối, đặc biệt là trong các loại vật liệu ẩm. Do đó, đặc tính truyền nhiệt, thường được gọi một cách không chính xác là "độ dẫn nhiệt", được tính toán từ một công thức xác định và là kết quả đo của tốc độ truyền nhiệt, chênh lệch nhiệt độ và kích thước đối với mẫu thử có thể không phải là đặc tính nội tại của chính vật liệu đó. Do đó, đặc tính này nên được gọi là "Hệ số truyền – Transfer factor" (theo TCVN 13556 (ISO 9288), vì nó có thể phụ thuộc vào các điều kiện thử nghiệm (hệ số truyền có thể được gọi là hệ số dẫn nhiệt biểu kiến). Hệ số truyền có thể phụ thuộc đáng kể vào độ dày của mẫu thử và/hoặc chênh lệch nhiệt độ đối với cùng một nhiệt độ thử nghiệm trung bình.

Truyền nhiệt bằng bức xạ là yếu tố đầu tiên biểu hiện sự phụ thuộc của hệ số truyền vào độ dày của mẫu thử. Do đó, không chỉ các tính chất vật liệu mà cả các đặc tính bức xạ của các bề mặt bao quanh mẫu thử cũng ảnh hưởng đến kết quả. Do vậy, nhiệt trở là thuộc tính mô tả chính xác hơn đặc tính nhiệt của mẫu thử, miễn là được kèm theo thông tin về các bề mặt biên.

Nếu xảy ra sự đối lưu bên trong mẫu thử (ví dụ: trong bông khoáng nhẹ ở nhiệt độ thấp), hướng của thiết bị, độ dày và chênh lệch nhiệt độ có thể ảnh hưởng đến cả hệ số truyền và nhiệt trở. Trong những trường hợp như vậy, ít nhất cần phải chỉ định đầy đủ các yêu cầu về hình dạng và các điều kiện biên của mẫu được thử nghiệm, ngay cả khi thông tin được cung cấp trong các quy trình thử nghiệm không

TCVN xxxxx:2024

đề cập chi tiết đến các điều kiện thử nghiệm này. Ngoài ra sẽ cần có kiến thức đáng kể để đánh giá phép đo, đặc biệt là khi áp dụng các giá trị đo được trong thực tế.

Ảnh hưởng của độ ẩm bên trong mẫu thử đối với sự truyền nhiệt trong quá trình đo cũng là một vấn đề rất phức tạp. Do đó, chỉ các mẫu đã được làm khô mới được thử nghiệm theo quy trình tiêu chuẩn. Các phép đo trên vật liệu ẩm cần có các biện pháp phòng ngừa bổ sung, nhưng biện pháp này không được đề cập chi tiết trong tiêu chuẩn này.

Những hiểu biết về các nguyên lý vật lý cũng rất quan trọng khi xác định tính chất truyền nhiệt bằng phương pháp thử nghiệm này, và để dự đoán đặc tính nhiệt của một vật liệu cụ thể trong ứng dụng thực tế, mặc dù có các yếu tố khác như kỹ thuật thực hiện cũng có thể ảnh hưởng đến các đặc tính nhiệt này.

0.3 Yêu cầu chung

Việc thiết kế, sau đó vận hành chính xác thiết bị đo dòng nhiệt (HFM) (xem 1.6.1 và 2.2.2) để thu được kết quả chính xác và việc giải thích kết quả thí nghiệm là một chủ đề phức tạp đòi hỏi phải được xem xét cẩn thận. Người thiết kế, người vận hành và người sử dụng kết quả đo được từ thiết bị HFM nên có kiến thức nền tảng sâu rộng về cơ chế truyền nhiệt trong các vật liệu, sản phẩm và hệ thống được đánh giá, cùng với kinh nghiệm đo điện và nhiệt đặc biệt ở mức tín hiệu thấp. Cũng cần duy trì việc thực hành tốt phòng thí nghiệm theo các quy trình kiểm tra chung.

0.4 Thiết kế, kích thước và tiêu chuẩn quốc gia

Hiện nay, có nhiều thiết kế khác nhau của thiết bị đo dòng nhiệt trên toàn thế giới để phù hợp với các tiêu chuẩn hiện hành của từng quốc gia. Các vấn đề nghiên cứu để cải tiến thiết bị và kỹ thuật đo được thực hiện liên tục. Do đó, việc bắt buộc một thiết kế hoặc kích thước cụ thể của thiết bị là không thực tế, đặc biệt là khi yêu cầu tổng thể có thể thay đổi rất nhiều.

0.5 Hướng dẫn cung cấp

Nhà thiết kế của các thiết bị mới có nhiều tự do cả về phạm vi nhiệt độ và hình học của thiết bị, vì nhiều hình dạng đã được chứng minh có thể đưa ra các kết quả tương đương. Đề xuất những người thiết kế thiết bị mới nên đọc kỹ các tài liệu được trích dẫn trong phụ lục E. Sau khi hoàn thành thiết bị mới, đề xuất nên kiểm tra bằng cách thực hiện các thử nghiệm trên một hoặc nhiều vật liệu tham chiếu với các cấp nhiệt trở khác nhau hiện có. Tiêu chuẩn này chỉ định các yêu cầu bắt buộc cần thiết để thiết kế và vận hành thiết bị đo dòng nhiệt để đạt được kết quả chính xác. Một bảng tóm tắt các giá trị giới hạn cho hiệu suất thiết bị và điều kiện thử nghiệm được nêu trong phụ lục A của tiêu chuẩn này. Bảng này cũng bao gồm các thủ tục, qui trình cùng với kích thước mẫu được đề xuất. Những yếu tố này sẽ nâng cao mức độ đo lường chung, hỗ trợ cải thiện so sánh giữa các phòng thí nghiệm và các chương trình thử nghiệm liên phòng.

Cách nhiệt - Xác định nhiệt trở ở trạng thái ổn định và các đặc tính liên quan - Thiết bị đo dòng nhiệt

Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus

1 Yêu cầu chung

1.1 Phạm vi áp dụng

1.1.1 Tiêu chuẩn này xác định việc sử dụng phương pháp đo dòng nhiệt (xem 2.2.2) để đo quá trình truyền nhiệt ở trạng thái ổn định qua các mẫu thử nghiệm dạng tấm phẳng và tính toán các đặc tính truyền nhiệt của mẫu thử.

Đây là phương pháp đo gián tiếp hoặc phương pháp đo tương đối thông qua tỷ lệ giữa nhiệt trở của mẫu thử so với nhiệt trở của mẫu chuẩn được sử dụng trong quá trình đo.

Phương pháp thử tiêu chuẩn này phù hợp với các mẫu thử có nhiệt trở lớn hơn $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{KW}$ với điều kiện là độ dày mẫu thử không vượt quá các giới hạn đưa ra trong 1.7.2.

1.1.2 Nếu các mẫu đáp ứng các yêu cầu được nêu trong 1.8.1, thì các đặc tính thu được sẽ được mô tả là độ dẫn nhiệt và nhiệt trở của mẫu.

1.1.3 Nếu các mẫu đáp ứng các yêu cầu của 1.8.2, các đặc tính thu được sẽ được mô tả là độ dẫn nhiệt trung bình của mẫu được đánh giá.

1.1.4 Nếu mẫu thử đáp ứng các yêu cầu của 1.8.3, đặc tính thu được có thể được mô tả là độ dẫn nhiệt hoặc độ truyền nhiệt của vật liệu được đánh giá.

1.2 Tài liệu viện dẫn

Các tài liệu viện dẫn sau là cần thiết khi áp dụng tiêu chuẩn này. Đối với các tài liệu viện dẫn có ghi năm công bố áp dụng thì áp dụng bản được nêu. Đối với các tài liệu viện dẫn không ghi năm công bố thì áp dụng phiên bản mới nhất, bao gồm cả bản sửa đổi, bổ sung (nếu có).

TCVN 9312 (ISO 9251) Cách nhiệt - Điều kiện truyền nhiệt và các đặc tính của vật liệu - Từ vựng.

TCVN 9313 (ISO 7345) Cách nhiệt - Các đại lượng vật lý và định nghĩa.

TCVN 13556 (ISO 9288) Cách nhiệt - Truyền nhiệt bằng bức xạ - các đại lượng vật lý và định nghĩa.

TCVN xxxxx (ISO 8302), Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus (Cách nhiệt - Xác định nhiệt trở và các tính chất liên quan ở trạng thái ổn định - Thiết bị tấm nóng được bảo vệ).

TCVN xxxxx:2024

ISO 9229 Thermal insulation - Materials, products and systems - Vocabulary (Cách nhiệt - Vật liệu, sản phẩm và hệ thống - Thuật ngữ)

ISO 9346 Hygrothermal performance of buildings and building materials - Physical quantities for mass transfer - Vocabulary (Hiệu suất nhiệt ẩm của vật liệu và công trình xây dựng – Các đại lượng vật lý về truyền khối – Từ vựng).

1.3 Thuật ngữ, định nghĩa

Đối với mục đích của tiêu chuẩn này, các định nghĩa sau được áp dụng.

Các đại lượng sau được định nghĩa trong TCVN 9313 (ISO 7345) hoặc TCVN 9312 (ISO 9251):

Đại lượng	Ký hiệu	Đơn vị
Lưu lượng dòng nhiệt	Φ	W
Cường độ dòng nhiệt	q	W/m ²
Nhiệt trở ¹⁾	R	m ² .K/W
Độ truyền nhiệt	A	W/m ² .K
Hệ số dẫn nhiệt ²⁾	λ	W/m.K
Nhiệt trở suất	r	m.K/W
Độ xốp	ξ	
Độ xốp cục bộ	ξ_p	

CHÚ THÍCH:

1) Trong một số trường hợp, có thể cần xem xét chênh lệch nhiệt độ chia cho lưu lượng dòng nhiệt; không có ký hiệu đặc biệt nào được gán cho đại lượng này, đôi khi còn được gọi là trở kháng.

2) Trong trường hợp tổng quát nhất \vec{q} và grad T không cùng hướng ($\vec{\lambda}$ không được xác định thông qua một hằng số λ đơn lẻ mà thông qua một ma trận các hằng số); hơn nữa khả năng dẫn nhiệt thay đổi khi vị trí bên trong hệ thống thay đổi, hoặc khi thay đổi nhiệt độ và thay đổi theo thời gian.

Các định nghĩa sau liên quan đến đặc tính vật liệu được nêu trong TCVN 9312 (ISO 9251):

Môi trường xốp

Môi trường đồng nhất

Môi trường xốp đồng nhất

Môi trường không đồng nhất

Môi trường đẳng hướng

Môi trường dị hướng

Môi trường ổn định

Các thuật ngữ khác không được định nghĩa trong TCVN 9313 (ISO 7345) hoặc TCVN 9312 (ISO 9251):

1.3.1

Môi trường nhiệt đồng nhất (thermally homogeneous medium)

Môi trường trong đó hệ số dẫn nhiệt [$\vec{\lambda}$] không phải là một hàm của vị trí bên trong môi trường mà có thể là một hàm của hướng, thời gian và nhiệt độ.

1.3.2**Môi trường nhiệt đẳng hướng** (thermally isotropic medium)

Môi trường trong đó hệ số dẫn nhiệt $[\vec{\lambda}]$ không phải là hàm của hướng mà có thể là hàm của vị trí, thời gian và nhiệt độ ($[\vec{\lambda}]$ được xác định thông qua giá trị đơn λ tại mỗi điểm).

1.3.3**Môi trường nhiệt ổn định** (thermally stable medium)

Môi trường trong đó hệ số dẫn nhiệt λ hoặc $[\vec{\lambda}]$ không phải là hàm của thời gian, mà có thể là hàm của vị trí, nhiệt độ và hướng (khi áp dụng)

1.3.4**Hệ số dẫn nhiệt trung bình của mẫu thử** (mean thermal conductivity of a specimen)

Đặc tính được xác định trong các điều kiện trạng thái ổn định trong vật thể có dạng một tấm được giới hạn bởi hai mặt phẳng đẳng nhiệt, song song và bởi các mép đoạn nhiệt vuông góc với các mặt, được làm từ vật liệu nhiệt đồng nhất, đẳng hướng (hoặc dị hướng với trục đối xứng vuông góc với các mặt). Đại lượng này chỉ ổn định trong phạm vi độ chính xác của phép đo, thời gian cần thiết để thực hiện phép đo, và với hệ số dẫn nhiệt λ hoặc hằng số $[\vec{\lambda}]$ hoặc một hàm tuyến tính của nhiệt độ.

1.3.5**Hệ số truyền của mẫu thử** (transfer factor of a specimen)

Được xác định bởi

$$J = \frac{qd}{\Delta T} = \frac{d}{R} (W/(m.K))$$

Hệ số truyền phụ thuộc vào các điều kiện thí nghiệm và đặc tính của mẫu thử liên quan đến sự truyền nhiệt kết hợp giữa dẫn nhiệt và bức xạ nhiệt. Trong một số trường hợp, hệ số này tương đương với hệ số dẫn nhiệt biểu kiến của mẫu thử.

1.3.6**Độ truyền nhiệt của vật liệu** (thermally transmissivity of a material)

Được xác định bởi

$$\lambda_t = \frac{\Delta d}{\Delta R} (W/(m.K))$$

trong đó $\Delta d/\Delta R$ không phụ thuộc vào độ dày d . Nó không phụ thuộc vào các điều kiện thí nghiệm và đặc tính của vật liệu cách nhiệt liên quan đến sự truyền nhiệt kết hợp giữa dẫn nhiệt và bức xạ nhiệt. Độ truyền nhiệt có thể được coi là giới hạn đạt được bởi hệ số truyền trong các lớp độ dày diễn ra quá trình truyền nhiệt kết hợp giữa dẫn nhiệt và bức xạ nhiệt. Trong một số trường hợp, thông số này thường được gọi là độ dẫn nhiệt biểu kiến hoặc hiệu dụng.

1.3.7**Đặc tính truyền nhiệt ở trạng thái ổn định** (steady-state heat transfer property)

Thuật ngữ chung để xác định một trong các đặc tính sau: nhiệt trở, hệ số truyền, hệ số dẫn nhiệt, nhiệt trở suất, độ truyền nhiệt, độ dẫn nhiệt, hệ số dẫn nhiệt trung bình.

TCVN xxxxx:2024

1.3.8

Nhiệt độ phòng (room temperature)

Thuật ngữ chung để xác định nhiệt độ thử nghiệm trung bình của phép đo sao cho người vận hành trong phòng cảm thấy thoải mái trong phòng tại nhiệt độ đó.

1.3.9

Nhiệt độ môi trường xung quanh (ambient temperature)

Thuật ngữ chung để xác định nhiệt độ ở vùng lân cận mép của mẫu thử hoặc vùng lân cận của toàn bộ thiết bị đo. Nhiệt độ này là nhiệt độ bên trong khoang hoặc trong phòng làm việc nơi đặt toàn bộ thiết bị đo.

1.3.10

Người vận hành (operator)

Người chịu trách nhiệm thực hiện phép thử trên thiết bị đo dòng nhiệt và trình bày báo cáo thông qua các kết quả đo được.

1.3.11

Người sử dụng dữ liệu (data user)

Người liên quan đến việc áp dụng và diễn giải các kết quả đo được để đánh giá hiệu suất của vật liệu hoặc hệ thống.

1.3.12

Người thiết kế (designer)

Người phát triển các chi tiết thiết kế của thiết bị để đáp ứng được các giới hạn tính năng cho trước của thiết bị và lên quy trình thử nghiệm để xác minh ước lượng độ chính xác của thiết bị.

1.4. Ký hiệu và đơn vị

Ký hiệu	Đại lượng	Đơn vị
A	Diện tích được đo trên bề mặt đẳng nhiệt đã chọn hoặc vùng đo	m^2
c_s	Nhiệt dung riêng	$J/(Kg.K)$
d	Độ dày của mẫu thử được đo dọc theo đường vuông góc với các bề mặt đẳng nhiệt	m
d, d''	Độ dày cho từng mẫu trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	m
d_m	Độ dày trung bình của một cặp hai mẫu thử	m
$d_1, d_2... d_5$	Độ dày của các mẫu được định danh s_1, s_2, \dots, s_5	m
D_t	Khoảng cách tối đa cho phép giữa các tấm nóng và lạnh trong quá trình thử nghiệm	m
e	Đầu ra của đồng hồ đo dòng nhiệt	mV
f	Hệ số hiệu chuẩn của đồng hồ đo dòng nhiệt	$W/(mV.m^2)$
L	Chiều dài mỗi cạnh của đồng hồ đo dòng nhiệt	m
L_m	Chiều dài mỗi cạnh của khu vực đo đồng hồ đo dòng nhiệt	m
m_c	Sự thay đổi khối lượng tương đối sau khi ổn định mẫu thử	-
m_d	Sự thay đổi khối lượng tương đối do ổn định mẫu sau khi sấy	-

Ký hiệu	Đại lượng	Đơn vị
m_r	Sự thay đổi khối lượng tương đối sau khi sấy khô	-
m_w	Sự thay đổi khối lượng tương đối của mẫu trong quá trình thử	-
M_1	Khối lượng trong điều kiện nhận mẫu	kg
M_2	Khối lượng sau khi sấy	kg
M_3	Khối lượng sau khi ổn định	kg
M_4	Khối lượng sau khi thử	kg
M_5	Khối lượng của vật liệu đã sấy khô hoặc đã được ổn định, ngay trước khi thử nghiệm	kg
q	Mật độ dòng nhiệt	W/m ²
q', q''	Mật độ dòng nhiệt đối với từng mẫu trong thiết bị HFM có cấu hình hai mẫu thử	W/m ²
r	Nhiệt trở suất	m.K/W
r_{avg}	Nhiệt trở suất trung bình trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	m.K/W
R	Nhiệt trở	m ² .K/W
R_s	Nhiệt trở của mẫu chuẩn	m ² .K/W
R_u	Nhiệt trở của mẫu chưa biết	m ² .K/W
R_t	Tổng nhiệt trở của hai mẫu thử trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	m ² .K/W
$s_1, s_2... s_5$	Bộ mẫu thử có độ dày khác nhau	-
J	Hệ số truyền của mẫu thử	W/(m.K)
$T_m = (T_1 + T_2)/2$	Nhiệt độ trung bình	K
T'_1, T''_1	Nhiệt độ mặt nóng của từng mẫu trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	K
T'_2, T''_2	Nhiệt độ mặt lạnh của từng mẫu trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	K
T'_m	Nhiệt độ trung bình của mẫu thử (') trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	K
T''_m	Nhiệt độ trung bình của mẫu thử (") trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	K
V	Thể tích	m ³
Δd	Chênh lệch độ dày	m
$\delta d = (d' - d'')/2$	Chênh lệch độ dày trung bình của mẫu thử (') và (") trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	m
$\delta \lambda$	Độ lệch của hệ số dẫn nhiệt ở nhiệt độ trung bình T_m của mẫu thử (') và (")	W/(m.K)
$\delta T_m = (T'_m - T''_m)/2$	Độ lệch trung bình giữa nhiệt độ trung bình của mẫu (') và (")	K
$\delta T = (\Delta T' - \Delta T'')/2$	Độ lệch trung bình giữa chênh lệch nhiệt độ của mẫu (') và (")	K

Ký hiệu	Đại lượng	Đơn vị
ΔR	Chênh lệch nhiệt trở	$m^2.K/W$
$\Delta T=(T_1-T_2)$	Chênh lệch nhiệt độ	K
$\Delta T', \Delta T''$	Chênh lệch nhiệt độ đối với từng mẫu thử (') và (") trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	K
$\frac{\Delta e}{\Delta q}$	Hệ số độ nhạy của thiết bị HFM	mV/Wm^2
Φ	Lưu lượng dòng nhiệt	W
Φ_u	Lưu lượng dòng nhiệt của mẫu thử chưa biết	W
Φ_s	Lưu lượng dòng nhiệt của mẫu chuẩn hoặc mẫu thử tham chiếu	W
λ	Hệ số dẫn nhiệt	$W/(m.K)$
λ', λ''	Hệ số dẫn nhiệt của mẫu thử (') và (") trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	$W/(m.K)$
$\dot{\lambda}(T)$	Đạo hàm bậc 1 của hàm $\lambda(T)$	$W/(m.K^2)$
$\ddot{\lambda}(T)$	Đạo hàm bậc 2 của hàm $\lambda(T)$	$W/(m.K^3)$
λ_{avg}	Hệ số dẫn nhiệt trung bình trong thiết bị HFM cấu hình hai mẫu thử	$W/(m.K)$
λ_m	Hệ số dẫn nhiệt trung bình tại nhiệt độ T_m	$W/(m.K)$
λ_M	Hệ số dẫn nhiệt trung bình của mẫu thử (') và (") khi được đo trong thiết bị tẩm nóng được bảo vệ	$W/(m.K)$
λ_t	Hệ số dẫn nhiệt của vật liệu	$W/(m.K)$
Λ	Độ truyền nhiệt	$W/(m^2.K)$
ρ_d	Khối lượng riêng của vật liệu khô thử nghiệm	kg/m^3
ρ_s	Khối lượng riêng của vật liệu sau khi ổn định	kg/m^3
$\rho.c_s$	Tích số khối lượng riêng và nhiệt dung riêng của mẫu thử	$J/(m^3.K)$
ξ	Độ rỗng	-
ξ_p	Độ rỗng cục bộ	-
('), (")	Ký hiệu mẫu thử thứ nhất và thứ hai trong cấu hình thiết bị HFM hai mẫu thử	-

1.5. Ý nghĩa

1.5.1 Các yếu tố ảnh hưởng đến đặc tính nhiệt

Các đặc tính truyền nhiệt của một mẫu thử có thể

- Thay đổi do sự thay đổi thành phần của vật liệu hoặc mẫu thử;
- Bị ảnh hưởng bởi độ ẩm hoặc các yếu tố khác;
- Thay đổi theo thời gian;
- Thay đổi theo nhiệt độ trung bình:
- Phụ thuộc vào lịch sử nhiệt trước đó.

Do đó, phải thừa nhận rằng việc lựa chọn giá trị điển hình của các đặc tính truyền nhiệt đại diện cho vật liệu, trong một ứng dụng cụ thể, phải dựa trên việc xem xét các yếu tố này và sẽ không nhất thiết áp dụng mà không cần sửa đổi với tất cả các điều kiện sử dụng.

Ví dụ, phương pháp này cho biết các đặc tính truyền nhiệt sẽ thu được trên các mẫu đã sấy khô, mặc dù các mẫu có thể không cần làm khô trong điều kiện sử dụng thực tế. Ngoài ra, các đặc tính truyền nhiệt cũng có mối quan hệ phụ thuộc vào các biến như nhiệt độ trung bình và chênh lệch nhiệt độ. Vì vậy, nên thực hiện phép đo các đặc tính truyền nhiệt của vật liệu trong các điều kiện sử dụng điển hình.

1.5.2 Lấy mẫu

Các đặc tính truyền nhiệt cần có thông tin đầy đủ để được coi là đại diện cho vật liệu. Đặc tính truyền nhiệt của vật liệu chỉ có thể được xác định bằng một phép đo nếu mẫu là đại diện cho vật liệu và miếng mẫu thử là đại diện cho sản phẩm thử.

Quy trình chọn mẫu thử thường phải được chỉ định trong thông số kỹ thuật của vật liệu. Việc lựa chọn mẫu thử từ sản phẩm thử có thể được quy định một phần trong đặc tính kỹ thuật của vật liệu.

Tiêu chuẩn này không quy định về quy cách khi lấy mẫu thử. Do đó, nếu trong trường hợp quy trình lấy mẫu không được ghi cụ thể trong thông số kỹ thuật của vật liệu thử thì phải xem xét và sử dụng phương pháp lấy mẫu khác phù hợp.

1.5.3 Độ chính xác và độ tái lập

Việc đánh giá độ chính xác của phương pháp rất phức tạp và phụ thuộc vào thiết kế thiết bị, các bộ phận liên quan và loại mẫu được thử nghiệm. Độ chính xác và việc hiệu chuẩn phải được thực hiện với vật liệu tham chiếu.

1.5.3.1 Độ tái lập của các phép đo thực hiện trên mẫu thử cần phải được thực hiện duy trì điều kiện thử và thường phải nhỏ hơn 1%. Phép đo được thực hiện trên cùng mẫu chuẩn trong thời gian khác nhau thường phải nhỏ hơn $\pm 1\%$. Con số lớn hơn có thể do những thay đổi nhỏ trong điều kiện thử nghiệm, chẳng hạn như áp suất của các tấm và đồng hồ đo dòng nhiệt trên mẫu (ảnh hưởng đến điện trở tiếp xúc) và độ ẩm tương đối của không khí xung quanh mẫu (ảnh hưởng đến độ ẩm mẫu). Các mức độ tái lập này được yêu cầu để xác định sai số trong phương pháp và trong ứng dụng kiểm soát chất lượng.

1.5.3.2 Độ chính xác của việc hiệu chuẩn thiết bị đo dòng nhiệt thường nằm trong khoảng $\pm 2\%$ khi nhiệt độ trung bình của phép thử gần với nhiệt độ phòng.

Độ chính xác của việc hiệu chuẩn được kiểm tra bằng độ chính xác khi thực hiện đo mẫu chuẩn bằng thiết bị tấm nóng được bảo vệ.

1.5.3.3 Do đó, phương pháp này có khả năng xác định các đặc tính truyền nhiệt trong khoảng $\pm 3\%$ khi nhiệt độ trung bình của phép thử gần với nhiệt độ phòng.

CHÚ THÍCH: Các thử nghiệm đối chứng theo quy trình đưa ra bởi European Key Mark đã chỉ ra rằng có thể đạt được độ tái lập 1,5% bằng cách hiệu chuẩn thiết bị và tuân thủ quy trình vận hành cẩn thận.

1.5.4 Quy trình hiệu chuẩn

Tuân theo một trong các điều kiện sau đây:

1.5.4.1 Thiết bị của phòng thử nghiệm phải được hiệu chuẩn (xem 2.4) trong vòng 24 h trước hoặc sau khi thử nghiệm bằng cách sử dụng các tiêu chuẩn hiệu chuẩn do phòng thí nghiệm tiêu chuẩn được công nhận ban hành. Độ ổn định của tiêu chuẩn hiệu chuẩn phụ thuộc vào loại vật liệu; một số tiêu chuẩn hiệu chuẩn

TCVN xxxxx:2024

đã được sử dụng hiệu quả trong hơn 20 năm nhưng nên kiểm tra chúng ít nhất 5 năm một lần. Báo cáo và hiệu chuẩn thiết bị phải được thực hiện với khoảng chênh lệch giữa nhiệt độ tắm nóng và nhiệt độ tắm lạnh gần với nhiệt độ được sử dụng trong các tiêu chuẩn hiệu chuẩn thiết bị đã được ban hành.

1.5.4.2 Khi cả độ ổn định ngắn hạn và dài hạn của đồng hồ đo dòng nhiệt đã được chứng minh là nhỏ hơn $\pm 1\%$ giá trị đọc, thiết bị đo dòng nhiệt có thể được hiệu chuẩn trong khoảng thời gian dài hơn, ví dụ từ 15 ngày đến 30 ngày. Các mẫu thử nghiệm chỉ được báo cáo kết quả sau khi đã hiệu chuẩn thiết bị và chênh lệch kết quả hiệu chuẩn so với lần hiệu chuẩn trước đó là nhỏ hơn 1%.

Giá trị trung bình của hai lần hiệu chuẩn sẽ được sử dụng làm hệ số hiệu chuẩn và các mẫu được thử nghiệm với giá trị này. Khi sự thay đổi về hiệu chuẩn lớn hơn $\pm 1\%$, kết quả thử nghiệm từ khoảng thời gian này sẽ bị coi là vô hiệu và các thử nghiệm được lặp lại theo 1.5.4.1 và 2.5.4

1.6 Nguyên tắc thử

1.6.1 Thiết bị đo dòng nhiệt có xu hướng thiết lập mật độ lưu lượng dòng nhiệt đồng nhất theo một hướng đồng thời đi qua khu vực đo trung tâm của một (hoặc hai) đồng hồ đo dòng nhiệt và khu vực này gần như giống hệt nhau. Các mẫu thử ở dạng tấm khi được thử nghiệm trong các điều kiện trạng thái ổn định với nhiệt độ trung bình không đổi và chênh lệch nhiệt độ không đổi giữa bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát bao quanh kết cấu mẫu thử và đồng hồ đo dòng nhiệt.

1.6.2 Đây là phương pháp đo gián tiếp hoặc phương pháp đo tương đối, vì kết quả đo được là tỷ lệ nhiệt trở của các mẫu thử so với các mẫu tiêu chuẩn. Nhiệt trở của mẫu tiêu chuẩn phải được xác định riêng theo như mô tả trong TCVN xxxxx (ISO 8302) trên thiết bị tắm nóng được bảo vệ.

1.6.3 Không thể đạt được điều kiện lý tưởng về mật độ một chiều của lưu lượng dòng nhiệt trong toàn bộ diện tích của mẫu thử và đồng hồ đo dòng nhiệt. Do đó, cần phải xem xét kỹ các yếu tố sau:

- Vấn đề tổn thất nhiệt do các cạnh của mẫu thử và đồng hồ đo dòng nhiệt;
- Sự khác biệt giữa kích thước (độ dày) và đặc tính nhiệt của mẫu chuẩn và của mẫu được đo;
- Sự khác biệt về điều kiện nhiệt độ biên (nếu có) giữa việc xác định nhiệt trở của mẫu chuẩn trong thiết bị tắm nóng được bảo vệ và quy trình hiệu chuẩn thiết bị đo dòng nhiệt bằng mẫu chuẩn.

1.6.4 Từ phép đo lưu lượng dòng nhiệt Φ_s với mẫu chuẩn và Φ_u với mẫu chưa biết, giả sử lưu lượng dòng nhiệt không đổi và giả sử độ chênh lệch nhiệt độ ΔT là ổn định và nhiệt độ trung bình T_m cho tỷ số giữa nhiệt trở R_s của mẫu chuẩn và R_u của mẫu chưa biết như sau:

$$\frac{R_u}{R_s} = \frac{\Phi_s}{\Phi_u}$$

Từ đó có thể tính toán được R_u .

1.6.5 Độ dẫn nhiệt của mẫu thử cũng có thể được tính toán nếu các điều kiện của định nghĩa được đáp ứng và độ dày d của mẫu đã biết.

1.6.6 Việc áp dụng phương pháp bị giới hạn bởi khả năng của thiết bị tạo ra mật độ dòng nhiệt không đổi theo một hướng trong các mẫu thử và bởi độ chính xác trong phép đo nhiệt độ, độ dày, e_{mr} do đồng hồ đo dòng nhiệt tạo ra, v.v.

1.6.7 Các giới hạn khác là do các mẫu thử không có độ đồng đều về độ dày (trong trường hợp cấu hình thiết bị hai mẫu thử); cũng như bề mặt lớn hơn không bao giờ bằng phẳng hoàn toàn hoặc song song hoàn hảo.

1.7 Hạn chế do thiết bị

Việc sử dụng thiết bị phải được giới hạn trong một số yếu tố liên quan đến việc hiệu chuẩn và giới hạn về độ dày của mẫu.

1.7.1 Các hạn chế liên quan đến hiệu chuẩn

Không được sử dụng thiết bị ở nhiệt độ khác với nhiệt độ được áp dụng trong quá trình hiệu chuẩn. Nếu một đường chuẩn đã được thiết lập trong một dải nhiệt độ thì không được phép ngoại suy.

Khi sử dụng thiết bị trong quá trình đo mẫu, nên sử dụng mật độ lưu lượng dòng nhiệt tương đương với mật độ lưu lượng dòng nhiệt trong quá trình hiệu chuẩn với mẫu chuẩn.

1.7.2 Hạn chế liên quan đến độ dày của mẫu thử

1.7.2.1 Yêu cầu chung

Độ dày kết hợp của các mẫu thử, đồng hồ đo dòng nhiệt và bất kỳ vật liệu giảm chấn nào, độ dày tổng phải bằng khoảng cách giữa các tấm làm mát và tấm gia nhiệt, phải được hạn chế để giảm thiểu ảnh hưởng của tổn thất nhiệt qua cạnh đối với phép đo tốc độ dòng nhiệt. Kích thước giới hạn (xem 1.7.2.2) phải được chọn tương ứng với kích thước giới hạn của mẫu thử được sử dụng trong thiết bị tấm nóng được bảo vệ, trong đó tổn thất cạnh đã được ước tính (ví dụ: việc sử dụng tính toán phần tử hữu hạn ba chiều để đánh giá ảnh hưởng của tổn thất cạnh). Tổn thất cạnh bị ảnh hưởng bởi cách nhiệt cạnh và nhiệt độ của môi trường xung quanh cạnh mẫu thử.

1.7.2.2 Khoảng cách tối đa giữa các tấm nóng và và tấm lạnh

Khoảng cách tối đa cho phép giữa các tấm nóng và lạnh trong quá trình thử nghiệm (D_i) có liên quan đến chiều dài của cạnh đồng hồ đo dòng nhiệt (L) và chiều dài của cạnh khu vực đồng hồ đo dòng nhiệt (L_m) chiều rộng của vùng không đo ($L-L_m$), cấu trúc của đồng hồ đo dòng nhiệt, và các đặc tính của mẫu thử. Không có phân tích lý thuyết phù hợp để dự đoán độ dày tối đa cho phép của mẫu thử. Cần sử dụng các kết quả phân tích cho thiết bị tấm nóng được bảo vệ để làm hướng dẫn.

Tài liệu tham khảo [19] và [23] về phân tích thiết bị tấm nóng được bảo vệ và phụ lục C có thể cung cấp một số thông tin cho ước tính này.

Trong cấu hình một mẫu thử đối xứng (xem 2.1 và hình 1), giá trị tối đa của độ dày mẫu được tăng 50 % so với giá trị tương ứng trong cấu hình hai mẫu thử đối xứng.

Nếu độ dày của mẫu vượt quá giới hạn của thiết bị, thì các thử nghiệm phải được thực hiện bằng thiết bị có tấm lớn hơn hoặc thiết bị tấm nóng được bảo vệ.

1.7.2.3 Độ dày tối thiểu

Độ dày tối thiểu của mẫu thử được xác định bằng nhiệt trở tiếp xúc như trong 1.7.3. Khi yêu cầu độ dẫn nhiệt hoặc nhiệt trở, độ dày tối thiểu của mẫu thử cũng bị giới hạn bởi độ chính xác của thiết bị đo độ dày.

1.7.3 Hạn chế do nhiệt trở tiếp xúc

Khi thử nghiệm các mẫu thử cứng, tức là các mẫu thử làm bằng vật liệu quá cứng và không chịu uốn để có thể bị thay đổi đáng kể về hình dạng do áp suất của các bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát, ngay cả những điểm không đồng nhất nhỏ trên bề mặt của cả mẫu thử và thiết bị (bề mặt không hoàn toàn bằng phẳng) sẽ gây ra nhiệt trở tiếp xúc không được phân bố đồng đều giữa các mẫu thử và các bề mặt làm việc của các bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát cũng như các đồng hồ đo dòng nhiệt.

Những điều này sẽ gây ra sự phân bố tốc độ dòng nhiệt không đồng đều và biến dạng trường nhiệt trong mẫu thử; hơn nữa, chúng sẽ làm cho các phép đo nhiệt độ bề mặt chính xác khó thực hiện nếu không có sự trợ giúp của các kỹ thuật đặc biệt.

1.8 Hạn chế do mẫu thử

1.8.1 Nhiệt trở, hệ số dẫn nhiệt hoặc hệ số truyền

1.8.1.1 Tính đồng nhất của mẫu

Khi thực hiện các phép đo nhiệt trở hoặc độ dẫn nhiệt của các mẫu không đồng nhất, mật độ của lưu lượng dòng nhiệt cả bên trong mẫu và trên các bề mặt của khu vực đo có thể không đơn hướng hoặc không đổi. Biến dạng trường nhiệt sẽ xuất hiện trong mẫu thử và có thể gây ra các lỗi nghiêm trọng. Khu vực trong mẫu tiếp giáp với khu vực đo và đặc biệt là gần các cạnh của khu vực này là quan trọng nhất. Rất khó để đưa ra các hướng dẫn đáng tin cậy về khả năng áp dụng của phương pháp trong những trường hợp như vậy. Các sai số thường là do lỗi tổn thất nhiệt ở cạnh, lỗi do phân bố nhiệt độ không đồng đều trong đồng hồ đo dòng nhiệt, v.v., Các sai số này hiện không thể đoán trước do sự không đồng nhất ở các vị trí tương đối khác nhau trong mẫu thử. Kết quả là tất cả các kiểm tra được đề xuất trong 3.4 có thể bị ảnh hưởng bởi các lỗi hệ thống.

Trong một số mẫu thử, sự thay đổi cấu trúc có thể xảy ra trong khoảng cách nhỏ. Điều này đúng với nhiều vật liệu cách nhiệt.

Trong các mẫu thử khác, có thể tồn tại mạch đo nhiệt trực tiếp giữa các bề mặt của mẫu thử tiếp xúc với các bộ phận và các đồng hồ đo dòng nhiệt. Hiệu ứng lớn nhất xảy ra khi các phần vật liệu dẫn nhiệt (với diện tích bề mặt mở rộng ở mỗi bên của mẫu thử) dễ dàng được kết nối với nhau thông qua một đường dẫn có nhiệt trở thấp so với các đường khác.

1.8.1.2 Ảnh hưởng của chênh lệch nhiệt độ

Nhiệt trở hoặc độ dẫn nhiệt có thể là một hàm của chênh lệch nhiệt độ giữa các mẫu thử. Trong báo cáo, phạm vi chênh lệch nhiệt độ áp dụng cho các giá trị báo cáo của hai đặc tính phải được xác định hoặc phải nêu rõ rằng giá trị được báo cáo được xác định ở một chênh lệch nhiệt độ duy nhất.

1.8.2 Độ dẫn nhiệt trung bình của mẫu thử

Để xác định độ dẫn nhiệt hoặc nhiệt trở trung bình của mẫu thử (xem 1.3.4), phải đáp ứng các tiêu chí trong 1.8.1. Mẫu thử phải đồng nhất về nhiệt hoặc đồng nhất về khả năng hút ẩm như được định nghĩa trong TCVN 9312 (ISO 9251). Các mẫu thử có độ hút ẩm đồng nhất phải đảm bảo rằng mọi kích thước không đồng nhất nhỏ hơn 1/10 độ dày của mẫu thử. Ngoài ra, ở bất kỳ nhiệt độ trung bình nào, nhiệt trở cũng phải không phụ thuộc vào sự chênh lệch nhiệt độ được thiết lập qua mẫu thử.

Nhiệt trở của vật liệu phụ thuộc vào cường độ tương đối của các quá trình truyền nhiệt liên quan. Dẫn nhiệt, bức xạ nhiệt và đối lưu nhiệt là các cơ chế chính. Tuy nhiên, các cơ chế này có thể kết hợp để tạo ra các hiệu ứng phi tuyến tính khó phân tích hoặc đo lường ngay cả khi các cơ chế cơ bản đã được nghiên cứu và hiểu rõ.

Độ lớn của tất cả các quá trình truyền nhiệt phụ thuộc vào chênh lệch nhiệt độ được thiết lập trên mẫu thử. Đối với nhiều vật liệu, sản phẩm và hệ thống, sự phụ thuộc phức tạp sẽ xảy ra ở chênh lệch nhiệt độ điển hình trong quá trình sử dụng. Trong những trường hợp này, tốt hơn nên sử dụng một giá trị như vậy và xác định mối quan hệ gần đúng cho một phạm vi chênh lệch nhiệt độ. Sự phụ thuộc có thể là tuyến tính cho một phạm vi rộng chênh lệch nhiệt độ.

Một số mẫu thử, mặc dù đáp ứng các tiêu chí về tính đồng nhất, nhưng lại có tính dị hướng ở chỗ thành phần độ dẫn nhiệt được đo theo hướng song song với các bề mặt khác với thành phần được đo theo hướng vuông góc với các bề mặt. Đối với những mẫu thử như vậy, điều này có thể dẫn đến các lỗi mất cân bằng lớn và tổn thất nhiệt ở cạnh.

1.8.3 Hệ số dẫn nhiệt, nhiệt trở suất hoặc độ truyền nhiệt của vật liệu

1.8.3.1 Yêu cầu chung

Để xác định độ dẫn nhiệt hoặc nhiệt trở suất của vật liệu, phải đáp ứng các tiêu chí trong 1.8.2. Ngoài ra, việc lấy mẫu phải tuân thủ chặt chẽ các quy định về lấy mẫu để đảm bảo mẫu thử là đồng nhất và có tính chất đại diện cho toàn bộ vật liệu, sản phẩm hoặc hệ thống. Độ dày của mẫu thử phải được lựa chọn sao cho hệ số truyền của vật liệu, sản phẩm, hệ thống không thay đổi quá 2% khi độ dày tăng thêm.

1.8.3.2 Sự phụ thuộc vào độ dày mẫu thử

Trong số các quá trình liên quan, chỉ có dẫn nhiệt tạo ra nhiệt trở là tỷ lệ thuận với độ dày của mẫu thử. Các quá trình khác dẫn đến mối quan hệ phức tạp hơn. Vật liệu càng mỏng và càng ít đậm đặc thì nhiệt trở của vật liệu phụ thuộc nhiều vào quá trình khác hơn là quá trình dẫn nhiệt. Kết quả là một điều kiện không thỏa mãn yêu cầu của các định nghĩa về độ dẫn nhiệt và nhiệt trở suất, cả hai đều xác định các đặc tính nội tại, vì các hệ số truyền cho thấy sự phụ thuộc vào độ dày của mẫu thử. Đối với những vật liệu như vậy, có thể mong muốn xác định nhiệt trở ở các điều kiện áp dụng cho việc sử dụng chúng. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng có một độ dày giới hạn thấp hơn đối với tất cả các vật liệu dưới đó xảy ra sự phụ thuộc như vậy. Dưới độ dày này, mẫu thử có thể có các đặc tính truyền nhiệt duy nhất, nhưng không phải là của vật liệu. Do đó, phải thiết lập độ dày tối thiểu của các vật liệu này bằng các phép đo.

1.8.3.3 Xác định chiều dày tối thiểu để có thể xác định đặc tính truyền nhiệt của vật liệu

Nếu không biết độ dày tối thiểu mà hệ số truyền nhiệt có thể được xác định, thì cần phải ước tính độ dày này. Không có yêu cầu cụ thể, quy trình cơ bản được nêu trong 3.4.2 có thể được sử dụng để xác định độ dày và giới hạn đo theo phạm vi độ dày cho phép.

Điều quan trọng là phải phân biệt giữa nhiệt trở bổ sung trong các phép đo gây ra bởi việc đặt các cặp nhiệt điện bên dưới bề mặt của các tấm hoặc đồng hồ đo dòng nhiệt, điện trở bổ sung do bề mặt mẫu kém chất lượng và nhiệt trở bổ sung gây ra bởi sự kết hợp dẫn nhiệt và bức xạ nhiệt. Cả ba đều có thể ảnh hưởng đến các phép đo theo cùng một cách và thường cả ba có thể bổ sung cho nhau.

2 Thiết bị và hiệu chuẩn

2.1 Quy định chung

Người sử dụng phương pháp thử nghiệm này phải hiểu đầy đủ các hướng dẫn xây dựng được đưa ra trong phần này. Khi xây dựng thiết bị cần phải tuân thủ đầy đủ các thông tin trong hướng dẫn, người sử dụng cũng nên xác nhận thiết bị được xây dựng theo đúng quy định. Việc bỏ qua điều này có thể dẫn đến các lỗi đo lường nghiêm trọng.

Như đã nêu trong mục 1.6, các đặc điểm chung của thiết bị đo dòng nhiệt với một hoặc nhiều mẫu thử được thể hiện trong hình 1; thiết bị phải bao gồm một bộ gia nhiệt, một hoặc hai đồng hồ đo dòng nhiệt, một hoặc hai mẫu thử và một bộ làm mát.

Cấu hình a) trong hình 1 được gọi là “cấu hình mẫu đơn không đối xứng”; đồng hồ đo dòng nhiệt có thể được đặt trên một trong hai thiết bị. Cấu hình b) được gọi là “cấu hình mẫu đơn đối xứng”. Cấu hình c) được gọi là “cấu hình hai mẫu thử đối xứng”; trong trường hợp này, các mẫu thử về cơ bản phải giống hệt nhau và được cắt từ cùng một mẫu vật liệu.

Mỗi cấu hình sẽ mang lại kết quả tương đương nếu được sử dụng trong giới hạn đã nêu trong phương pháp này. Trong thực tế, mỗi cấu hình đều có những lợi thế riêng. Một số thông tin được bổ sung trong Phụ lục B. Khi muốn có nhiều hơn một thiết bị đo dòng nhiệt, có thể xây dựng thiết bị kép bằng cách sử dụng phía bên kia của bộ phận gia nhiệt và thêm một đồng hồ đo dòng nhiệt khác và bộ phận làm mát. Các ví dụ về cả thiết bị đơn và thiết bị kép được mô tả trong các tài liệu tham khảo [2] đến [7] và [16]; xem thêm hình 1d) và hình 1e).

2.2 Thiết bị

Các bề mặt làm việc của bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát và (các) đồng hồ đo dòng nhiệt (tức là các bề mặt tiếp xúc với mẫu thử) phải được sơn hoặc xử lý theo cách phù hợp để có tổng phát xạ bán cầu lớn hơn 0,8 ở nhiệt độ vận hành.

2.2.1 Bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát

2.2.1.1 Yêu cầu chung

Các bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát phải được chế tạo sao cho có được các bề mặt làm việc đẳng nhiệt. Điều này có thể đạt được bằng cách đặt một cuộn dây điện có công suất riêng giống nhau giữa hai tấm kim loại hoặc bằng cách luân chuyển chất lỏng có nhiệt độ không đổi giữa các tấm hoặc bằng cách kết hợp cả hai phương pháp đã nêu hoặc bằng các dụng cụ thích hợp khác; (xem tài liệu [2]). Các tấm kim loại được làm nóng bằng chất lỏng cần được chú ý đặc biệt trong khi thiết kế. Khả năng chịu tải tối đa phải được xác định đầu tiên, sau đó phải dự kiến được tốc độ dòng chất lỏng. Ngoài ra, độ chênh lệch nhiệt độ giữa đầu vào ra đầu ra của các tấm phải được kiểm tra để xác nhận tốc độ dòng chất lỏng có phù hợp hay không. Đối với hầu hết cách bố trí đường dẫn chất lỏng, chênh lệch nhiệt độ này lớn hơn bất kỳ sự không đồng đều nhiệt độ nào của tấm. Kết quả tốt nhất thu được khi các đường dẫn được bố trí ngược dòng xoắn ốc với chất lỏng (xem hình 2). Tuy nhiên, trong trường hợp này, nhiệt trở giữa chất lỏng và tấm kim loại phải đủ cao, nếu không thì sự không đồng đều về nhiệt độ của tấm kim loại có thể còn lớn hơn chênh lệch nhiệt độ giữa đầu vào và đầu ra của chất lỏng. Để biết thông tin về thiết kế chính xác của tấm kim loại làm

mát bằng chất lỏng hoặc gia nhiệt bằng chất lỏng, xem tài liệu [9] và [14]. Tính đồng nhất về nhiệt độ của các bề mặt làm việc của bộ phận gia nhiệt hoặc bộ phận làm mát trong thiết bị đo dòng nhiệt có thể còn quan trọng hơn trong thiết bị tẩm nóng được bảo vệ, vì một số đồng hồ đo dòng nhiệt có thể rất nhạy với sự chênh lệch nhiệt độ dọc theo bề mặt chính của chúng: (xem 2.2.2.3).

Bề mặt làm việc của các bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát phải bao gồm kim loại có độ dẫn nhiệt cao và phải được hoàn thiện nhẵn để phù hợp với mặt phẳng thực trong khoảng sai số là 0,025 %.

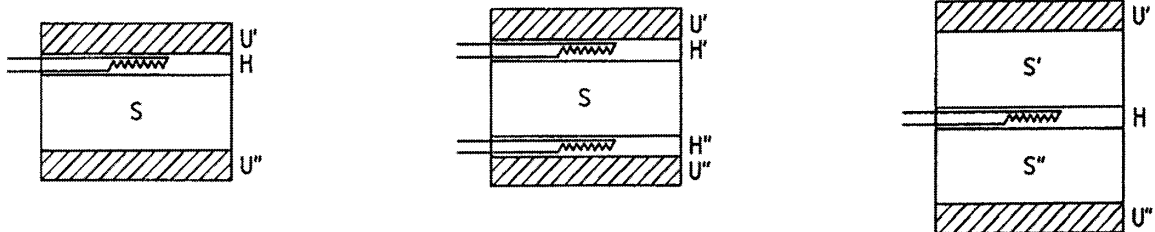
Bộ phận làm mát phải được kết cấu sao cho có được bề mặt làm việc đẳng nhiệt với kích thước bề mặt ít nhất lớn bằng kích thước bề mặt làm việc của bộ phận gia nhiệt.

Các bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát có thể giống hệt nhau.

2.2.1.2 Yêu cầu về nhiệt độ

Độ đồng đều nhiệt độ trên mỗi bề mặt làm việc sẽ lớn hơn 1% chênh lệch nhiệt độ giữa (các) mẫu thử.

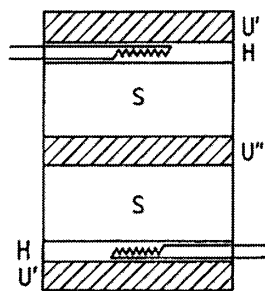
Ngoài ra, nếu đồng hồ đo dòng nhiệt được đặt tiếp xúc với bề mặt làm việc của bộ phận gia nhiệt hoặc bộ phận làm mát và nhạy với sự khác biệt nhiệt độ dọc theo bề mặt này, thì sự khác biệt này phải nhỏ nhất cần thiết để duy trì sai số khi đo tốc độ dòng nhiệt dưới 0,5 %.



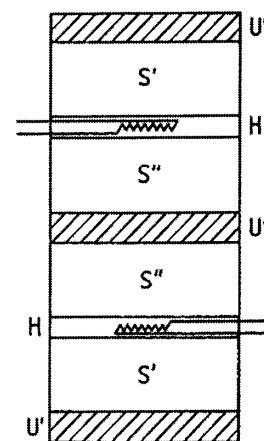
a) Cấu hình mẫu đơn không đối xứng

b) Cấu hình mẫu đơn đối xứng

c) Cấu hình hai mẫu thử đối xứng



d) Thiết bị kẹp



e) Thiết bị kẹp

CHÚ DẪN:

U', U'' Bộ phận làm mát và bộ phận gia nhiệt

H, H', H'' Đồng hồ đo dòng nhiệt

Hình 1 – Cấu tạo cơ bản của các cấu hình thiết bị đo dòng nhiệt

Nhiệt độ bề mặt làm việc trong thời gian thử nghiệm không được dao động hoặc thay đổi quá 0,5 % chênh lệch nhiệt độ giữa các mẫu thử.

2.2.2 Đồng hồ đo dòng nhiệt

2.2.2.1 Mục đích

Đồng hồ đo dòng nhiệt là một tổ hợp đo mật độ dòng nhiệt đi qua mẫu thử bởi việc chênh lệch nhiệt độ được tạo ra bởi mật độ dòng nhiệt đi qua mẫu thử và đi qua đồng hồ đo dòng nhiệt. Một số loại đồng hồ đo dòng nhiệt được mô tả trong 2.2.2.6.

Thông thường nhất, bộ phận này bao gồm một lõi đồng nhất, một đầu dò chênh lệch nhiệt độ bề mặt và một đầu dò nhiệt độ bề mặt. Vùng đo là vùng đặt đầu dò phát hiện chênh lệch nhiệt độ. Ngoài ra, bộ phận này cũng bao gồm cả các tấm phủ để bảo vệ và giảm nhiệt. Các tấm hoặc lá kim loại cân bằng nhiệt độ đôi khi được sử dụng để cải thiện hoặc đơn giản hóa các phép đo, nhưng các tấm này phải được đặt ở vị trí sao cho không xảy ra sự chênh lệch nhiệt độ phụ thuộc vào các đặc tính nhiệt của mẫu thử.

2.2.2.2 Bộ phận lõi

Lõi phải được chế tạo từ vật liệu không hút ẩm phù hợp, phải có tính chất đồng nhất và đẳng hướng, đồng thời phải có các mặt đủ song song để đảm bảo dòng nhiệt đồng đều vuông góc với các mặt. Vật liệu lõi phải là vật liệu ổn định trong điều kiện nhiệt độ và độ ẩm thông thường trong quá trình sử dụng và bảo quản thiết bị. Vật liệu phải cứng, khả năng chịu nén tốt. Một số vật liệu có thể được sử dụng làm lõi cho đồng hồ đo dòng nhiệt: composít gỗ xốp, cao su-nhựa cứng, gốm và tấm nhựa phenolic, vải cốt sợi thủy tinh nền epoxy hoặc silicon.

2.2.2.3 Pin nhiệt điện

Chênh lệch nhiệt độ giữa vật liệu lõi phải được đo bằng đầu dò nhiệt độ ổn định và có độ nhạy cao (xem Phụ lục B, B.1 và B.2). Pin nhiệt điện đa điểm nối đang được sử dụng phổ biến. Một số loại điển hình được thể hiện trong hình 3. Các mối nối được đặt trên bề mặt của vật liệu lõi của đồng hồ đo dòng nhiệt để đo chênh lệch nhiệt độ qua lõi.

Kết quả ảnh hưởng sự có mặt của cặp nhiệt điện trong lõi là e đầu ra của cặp nhiệt điện có liên quan đến mật độ của dòng nhiệt q , thông qua một tham số f được gọi là hệ số hiệu chuẩn, như sau:

$$q = f e$$

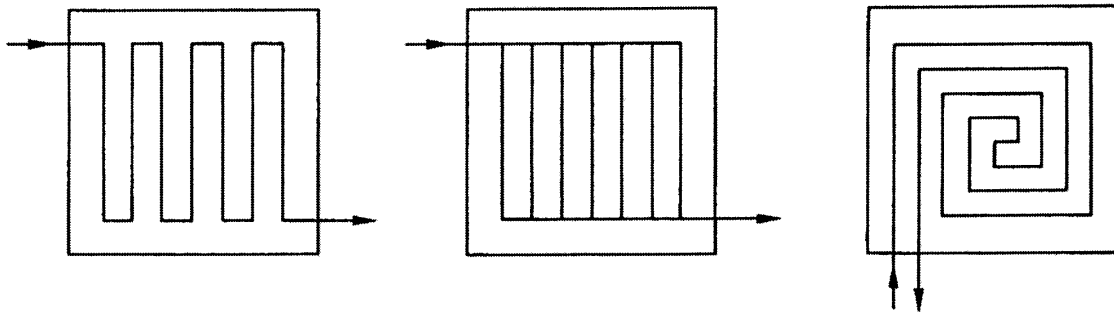
Tham số f không hoàn toàn là một hằng số mà phụ thuộc vào nhiệt độ và mật độ của tốc độ dòng nhiệt.

Để tránh ảnh hưởng của sự dẫn nhiệt dọc theo phần tử truyền từ mặt này sang mặt kia, diện tích mặt cắt ngang của dây dẫn trong cặp nhiệt điện phải nhỏ hơn 0,2mm.

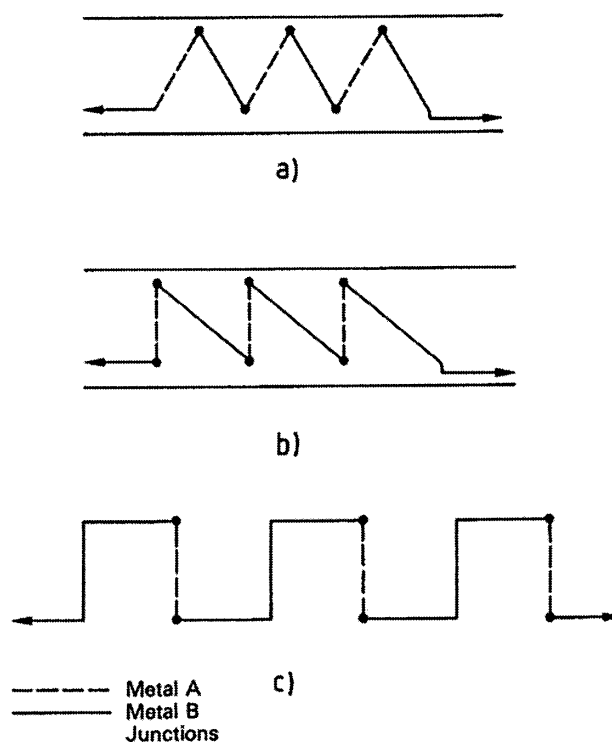
Nên sử dụng các phần tử nhiệt tạo đầu ra e_{mf} cao và có độ dẫn nhiệt thấp. Cả cặp nhiệt điện dài và cặp nhiệt điện loại bọc kim loại đã được chứng minh là có nhiều ưu điểm trong một số thiết kế. Ngoài ra, các kỹ thuật phun kim loại hóa và quang khắc cũng đã được sử dụng thành công; xem tài liệu [16], [24] và [25].

Các bề mặt của đồng hồ đo dòng nhiệt chính được giả định là đẳng nhiệt, sao cho mật độ của dòng nhiệt vuông góc với các bề mặt của đồng hồ đo dòng nhiệt chính. Nếu giả thuyết không đúng, thì sẽ có một thành phần mật độ của dòng nhiệt sẽ song song với các bề mặt của đồng hồ đo dòng nhiệt chính. Độ nhạy đối với thành phần này phụ thuộc vào cách bố trí các mối nối của cặp nhiệt điện: các mối nối của hình 3b) và hình 3c) không nhạy với sự chênh lệch nhiệt độ dọc theo các bề mặt chính, trong khi các mối nối của hình 3a) rất nhạy với sự chênh lệch nhiệt độ dọc theo cả hai hướng vuông góc và song song với các bề

mặt của đồng hồ đo dòng nhiệt chính; do đó nếu có thể thì nên tránh những thiết kế như vậy. Phải hạn chế tối đa ảnh hưởng của dòng nhiệt đi qua dây dẫn đến đầu ra của đầu dò phát hiện chênh lệch nhiệt độ.



Hình 2 – Ví dụ về sơ đồ thiết kế của các bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát trong trường hợp sử dụng chất lỏng được cung cấp từ bên ngoài



Hình 3 – Ví dụ về sơ đồ thiết kế của pin nhiệt điện

Khi đầu ra của đồng hồ đo dòng nhiệt nhỏ hơn 0,0002 V, phải sử dụng các kỹ thuật đặc biệt để ngăn chặn các e_{mf} nhiệt ngoại lai trong dây dẫn, mạch đo và chính đồng hồ đo dòng nhiệt. Phải kiểm tra đồng hồ đo dòng nhiệt ở một số tốc độ dòng nhiệt theo các hướng khác nhau để kiểm tra và chắc chắn rằng giao điểm của các đường nối bằng 0.

Để đảm bảo nhiệt trở đồng đều trong đồng hồ đo dòng nhiệt, đầu báo chênh lệch nhiệt độ phải:

- Được phân bố đồng đều trong khu vực đo của đồng hồ đo dòng nhiệt - diện tích không lớn hơn 40 % và không nhỏ hơn 10 % toàn bộ diện tích bề mặt; hoặc
- Được tập trung ở những khu vực không ít hơn 10 % của toàn bộ diện tích bề mặt; các khu vực này phải nằm trong 40% trung tâm nhất của đồng hồ.

2.2.2.4 Các tấm bề mặt

TCVN xxxxx:2024

Để tránh hư hỏng cho đầu dò phát hiện chênh lệch nhiệt độ sẽ ảnh hưởng đến việc hiệu chuẩn của bộ phận này, cả hai bề mặt phải được phủ một lớp vật liệu mỏng tương thích với khả năng bảo vệ khỏi sự chuyển hướng dòng nhiệt của các dây cảm biến chênh lệch nhiệt độ. Đồng hồ đo dòng nhiệt được thiết kế phù hợp phải có độ nhạy không phụ thuộc vào độ dẫn nhiệt của mẫu thử đối với phạm vi dẫn nhiệt lớn. Tấm bề mặt cũng được sử dụng để giảm bớt sự dao động nhiệt độ nếu có. Tấm bề mặt phải tương tự như vật liệu lõi và phải được liên kết chặt chẽ với lõi bằng phương pháp phù hợp như màng dính hoặc vật liệu để nóng chảy hoặc công nghệ thích hợp khác. Vùng đo của đồng hồ đo dòng nhiệt phải được hoàn thiện trơn tru để phù hợp với mặt phẳng trong khoảng 0,025 %.

2.2.2.5 Cảm biến nhiệt độ bề mặt

Phải sử dụng một thiết bị phù hợp để đo nhiệt độ trung bình trên bề mặt mẫu thử của đồng hồ đo dòng nhiệt.

Sử dụng một miếng lá đồng dày 80 μm , dính vào tấm bề mặt để lấy trung bình nhiệt độ bề mặt của đồng hồ đo dòng nhiệt trên khu vực đặt các điểm nối của cặp nhiệt điện. Miếng lá đồng này phải mở rộng ra ngoài khu vực một khoảng xấp xỉ bằng độ dày của đồng hồ đo dòng nhiệt. Miếng lá đồng có thể được sử dụng như một phần của mạch cặp nhiệt điện hợp kim đồng - constantan hoặc có thể được trang bị cảm biến điện trở bạch kim. Khi cặp nhiệt điện được sử dụng cho mục đích này, dây đồng và dây constantan có đường kính 0,2 mm hoặc nhỏ hơn được xuyên qua tấm bề mặt trước khi được gắn vào lõi. Dây constantan được hàn vào tâm của lá đồng trong khi dây dẫn dương được hàn gần một trong các cạnh. Loại bỏ các mối hàn dư thừa. Tấm bề mặt được tra nhám để làm nhẵn bề mặt. Khu vực bề mặt của đồng hồ đo dòng nhiệt không được bao phủ bởi lá kim loại thì sẽ được che phủ bởi một tấm phi kim loại, có độ dày 80 μm , để đảm bảo bề mặt nhẵn. Dây của cặp nhiệt điện phải phù hợp với 2.2.3.1.3.

2.2.2.6 Các loại đồng hồ đo dòng nhiệt

Có một số loại đồng hồ đo dòng nhiệt. Loại đồng hồ đo dòng nhiệt được mô tả trong phương pháp thử nghiệm này được gọi là loại gradient. Bộ phận này bao gồm một tấm vật liệu mà độ giảm nhiệt độ được đo bằng một cặp nhiệt điện.

Các loại đồng hồ này thường được sử dụng cho các phép đo ở trạng thái ổn định hoặc gần ổn định. Từ đó các phương trình gần đúng đã được rút ra (xem tài liệu [13] và [20]).

Có hai loại đồng hồ đo dòng nhiệt kiểu gradient được sử dụng trong thực tế. Một loại máy đo dòng nhiệt có nhiệt trở cao và một loại đo nhiệt trở thấp.

Loại có nhiệt trở cao bao gồm một tấm vật liệu có nhiệt trở cao (chẳng hạn như gỗ bần) với một dây nhiệt điện nhỏ quấn quanh nó để đo chênh lệch nhiệt độ. Một vật liệu ốp được đặt trên mỗi bề mặt và một cảm biến hoặc một bộ cảm biến và một tấm cân bằng nhiệt độ được đặt trên mỗi bề mặt và hai bề mặt của cụm được phủ một lớp màng có độ thấm nhiệt thấp. Các đặc điểm của đồng hồ đo dòng nhiệt này là giảm nhiệt độ trong khoảng rộng, độ nhạy phù hợp với một cặp nhiệt điện nhỏ, dễ sản xuất và giá trị độ nhạy thấp và thường phụ thuộc vào các đặc tính của mẫu thử nghiệm.

Loại có nhiệt trở thấp bao gồm một tấm mỏng làm bằng vật liệu có nhiệt trở tương đối thấp (chẳng hạn như vải cốt sợi thủy tinh nền epoxy hoặc silicone) với một cặp nhiệt điện rất nhạy quấn quanh nó để đo chênh lệch nhiệt độ trong khoảng nhỏ. Vật liệu ốp cũng được đặt trên mỗi bề mặt. Thông thường, vật liệu này chỉ

đơn giản là một tấm phim cách nhiệt và một tấm kim loại. Các đặc điểm của đồng hồ đo dòng nhiệt này là khoảng nhiệt độ giảm nhỏ, độ nhạy cao hoặc đủ; Loại đồng hồ đo dòng nhiệt kiểu này đòi hỏi phải thiết kế và sản xuất đặc biệt (xem tài liệu [24] và [25]),

2.2.3 Các thiết bị đo khác

2.2.3.1 Nhiệt độ

2.2.3.1.1 Thiết bị đo nhiệt độ

Bất kỳ phương pháp nào đã được chứng minh cho phép đo chênh lệch nhiệt độ giữa các bề mặt làm việc của bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát (hoặc đồng hồ đo dòng nhiệt nếu cần thiết) khi tiếp xúc với mẫu thử với độ chính xác 1 % đều có thể được sử dụng để đo nhiệt độ trong thiết bị. Để xác định nhiệt độ bề mặt của đồng hồ đo dòng nhiệt, xem 2.2.2.5.

Nhiệt độ của các bề mặt làm việc của các bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát thường được đo bằng các cảm biến nhiệt độ được gắn cố định như cặp nhiệt điện được đặt trong các rãnh hoặc ngay dưới các bề mặt làm việc. Khi cấu hình c) trong hình 1 được chọn (xem 2.1), các cảm biến đặt trên bề mặt làm việc của bộ phận làm mát và bộ phận gia nhiệt đôi khi được kết nối khác nhau. Đối với cặp nhiệt điện, điều này là bình thường. Trong những trường hợp như vậy, các cảm biến này phải được cách điện khỏi các tấm, các tấm kim loại phải được nối đất và nên sử dụng điện trở lớn hơn 1 M Ω . Số lượng cặp nhiệt điện ở mỗi bên không được ít hơn $10\sqrt{A}$ hoặc 2, tùy theo giá trị nào lớn hơn, trong đó A là phần diện tích đo tính bằng mét vuông. Một cặp nhiệt điện trên mỗi bề mặt đã được tìm thấy là đủ trên các tấm có diện tích bề mặt nhỏ hơn 0,04 m², với điều kiện là cặp nhiệt điện được thay đổi thường xuyên hoặc hiệu chuẩn cặp nhiệt điện được thực hiện thường xuyên. Cần tối thiểu hai cặp nhiệt điện cho tất cả các thiết bị mới với các điều kiện sau:

Số lượng cặp nhiệt điện như vậy ở mỗi bên không được ít hơn $10\sqrt{A}$ hoặc 2, tùy theo giá trị nào lớn hơn, trong đó A là diện tích đo tính bằng mét vuông. Một cặp nhiệt điện trên mỗi bề mặt đã được chứng minh là phù hợp khi thử nghiệm các mẫu có nhiệt trở cao sử dụng cặp nhiệt điện dạng tấm mà không có tấm tiếp xúc.

Đối với một số loại vật liệu, quy trình này có thể dẫn đến sai số trong phép đo do nhiệt trở giữa cảm biến và bề mặt của mẫu thử (xem [10]).

Trong trường hợp này, xem 2.2.3.1.2.

2.2.3.1.2 Chênh lệch nhiệt độ qua mẫu thử

2.2.3.1.2.1 Đối với các mẫu thử không phải là vật liệu cứng (xem 1.7.3) có bề mặt đủ nhẵn và tiếp xúc tốt với bề mặt phẳng của tấm và có nhiệt trở lớn hơn 0,5 m²K/W, chênh lệch nhiệt độ qua các mẫu thử này thường được đo bởi các cảm biến cố định được gắn trên bề mặt làm việc của các thiết bị đo hoặc đồng hồ đo dòng nhiệt tiếp xúc trực tiếp với các mẫu thử.

2.2.3.1.2.2 Trong một số trường hợp, sẽ có ảnh hưởng của điện trở tiếp xúc giữa mẫu thử và bề mặt làm việc của thiết bị: trường hợp này cần có một số phương pháp đặc biệt để xác định chênh lệch nhiệt độ qua các mẫu thử. Lỗi trong một số phương pháp được mô tả trong tài liệu [10], tuy nhiên trong một số trường hợp, việc lựa chọn phương pháp nào là do người vận hành quyết định. Đối với các mẫu

TCVN xxxxx:2024

thử cứng (xem 1.7.3), có thể hạn chế ảnh hưởng này bằng cách đặt các tấm lót mỏng làm bằng vật liệu đồng nhất phù hợp giữa (các) mẫu thử và từng bề mặt làm việc của các bộ phận đo có liên quan.

Sau đó, chênh lệch nhiệt độ qua mẫu thử được xác định bằng các cặp nhiệt điện riêng biệt được gắn ngang hoặc bên trong bề mặt của mẫu thử. Kỹ thuật này cũng có thể được sử dụng cùng với các tấm lót làm bằng vật liệu có nhiệt trở thấp xen kẽ giữa mẫu thử và bề mặt làm việc của thiết bị đo.

2.2.3.1.3 Cảm biến nhiệt độ

Khi sử dụng cặp nhiệt điện, dây dẫn được sử dụng để gắn trên bề mặt của thiết bị phải được làm bằng dây có đường kính không lớn hơn 0,6 mm - và tốt nhất là đường kính không lớn hơn 0,2 mm đối với thiết bị có kích thước nhỏ.

Khi sử dụng các kỹ thuật đo khác, ví dụ như cặp nhiệt điện được nối với các tấm mỏng thì cần phải đặc biệt chú ý tới các biện pháp phù hợp để giảm tối đa sai số trong quá trình đo, đặc biệt là trong quá trình thử nghiệm đối với các loại vật liệu có nhiệt trở thấp.

Cặp nhiệt điện được gắn vào bề mặt của mẫu thử phải được làm bằng dây có đường kính không lớn hơn 0,2 mm.

Đối với các mẫu thử có nhiệt trở thấp, nên đặt các cặp nhiệt điện trong bề mặt mẫu bất cứ khi nào có thể. Nếu không thì phải sử dụng cặp nhiệt điện có đường kính mỏng hơn. Các cặp nhiệt điện được sử dụng để đo nhiệt độ bề mặt của mẫu thử như đã chỉ ra ở trên phải được sản xuất từ dây nhiệt kế đã được hiệu chuẩn hoặc từ dây dẫn đã được nhà cung cấp chứng nhận là nằm trong giới hạn sai số đặc biệt được đưa ra trong bảng D trong Phụ lục D. Các cảm biến hoặc thiết bị phát hiện nhiệt độ khác, chẳng hạn như cảm biến điện trở bạch kim phải có độ chính xác, độ nhạy và độ ổn định tương đương hoặc lớn hơn.

2.2.3.2 Hệ thống đo điện

2.2.3.2.1 Tính năng chung

Thiết kế của hệ thống đo sẽ phụ thuộc vào loại cảm biến nhiệt độ được sử dụng và độ nhạy của pin nhiệt hoặc mạch cảm biến chênh lệch nhiệt độ. Phạm vi của các đầu ra từ những bộ phận này sẽ thay đổi tùy theo phạm vi hoạt động của thiết bị và thay đổi theo thứ tự độ lớn. Do đó, các dụng cụ đo được sử dụng phải có tuyến tính cao, phạm vi rộng hoặc ít tuyến tính hơn, đa phạm vi. Việc lựa chọn thiết bị đo phù hợp sẽ tùy thuộc vào kinh nghiệm của người vận hành. Khả năng của thiết bị đo dòng nhiệt để thực hiện các phép đo nhanh được sử dụng tốt nhất khi hệ thống đo tính toán và hiển thị các thông số như nhiệt trở, hoặc độ dẫn nhiệt. Tuy nhiên, hệ thống đo lường phải có chức năng để theo dõi từng cảm biến nhiệt độ riêng lẻ. Mạch điện toán có thể là kỹ thuật số hoặc tương tự. Trong trường hợp mạch kỹ thuật số thì không cần phải xem xét thêm bất kỳ lỗi hoặc hạn chế đáng kể nào. Trong trường hợp tương tự, thì có thể làm giảm độ ổn định, tuyến tính và độ chính xác trong ngắn hạn và dài hạn, đồng thời làm giảm độ nhạy trong quá trình đo. Phần mềm máy tính phải được coi là một phần của hệ thống đo lường trong thử nghiệm chứng nhận và đáp ứng các yêu cầu trong 2.2.3.2.2 đối với toàn bộ hệ thống. Độ ổn định lâu dài duy trì các vấn đề đối với mạch kỹ thuật số. Tất cả các yếu tố được trích dẫn trong 2.2.2 cần được xem xét cẩn thận nếu muốn thu được kết quả đáng tin cậy.

2.2.3.2.2 Yêu cầu hệ thống đo và báo cáo kết quả đối với các thử nghiệm có hiệu suất cao

Hệ thống đo phải có các khả năng sau, bất kể hệ thống đo dải rộng hay đa dải được sử dụng:

- a) độ nhạy, tuyến tính, độ chính xác và trở kháng đầu vào đủ để đo chênh lệch nhiệt độ giữa các mẫu thử trong khoảng $\pm 0,5\%$ và đầu ra từ cặp nhiệt điện trong khoảng $\pm 0,6\%$.
- b) độ nhạy tốt hơn $0,15\%$ ở đầu ra tối thiểu từ đầu dò chênh lệch nhiệt độ.
- c) đủ độ tuyến tính sao cho nó đóng góp ít hơn $0,1\%$ vào sai số ở tất cả các đầu ra dự kiến của đầu dò chênh lệch nhiệt độ.
- d) đủ trở kháng đầu vào sao cho nó không gây ra sai số lớn hơn $0,1\%$ số đọc trong mọi điều kiện có thể (1 M Ω đã được chứng minh là đủ cho nhiều thiết bị).
- e) độ ổn định sao cho sai số nhỏ hơn $0,2\%$ đối với bất kỳ giá trị đọc được nào trong khoảng thời gian bình thường là 12 lần hiệu chuẩn, hoặc 30 ngày, chọn giá trị nào lớn hơn.

2.2.3.3 Phép đo độ dày

Các thông tin phải được cung cấp để đo độ dày của mẫu trong phạm vi $0,5\%$. Do trong quá trình thử nghiệm, độ dày của mẫu thử có thể bị thay đổi bởi quá trình tăng nhiệt độ hoặc do nén bởi các tấm đệm... Vì vậy, nên đo độ dày của mẫu thử trong điều kiện nhiệt độ thử nghiệm hoặc điều kiện nén tương đương với khi mẫu được đặt trong thiết bị đo. Thông thường, các điểm đo được lựa chọn là các điểm ở bốn góc ngoài của các tấm hoặc dọc theo trục vuông góc với các tấm ở tâm của chúng. Độ dày mẫu cuối cùng được xác định bằng giá trị trung bình giữa các điểm đo khi mẫu được đặt trong thiết bị đo và khi mẫu không được đặt trong thiết bị đo nhưng sử dụng cùng một lực tác dụng để ấn các tấm vào nhau. Trong trường hợp sử dụng bộ chuyển đổi điện, phải cung cấp phương tiện để kiểm tra tính tuyến tính và mạch điện tử của nó. Việc kiểm tra tính tuyến tính này phải được thực hiện trong vòng một năm.

2.2.4 Các thiết bị cơ khí

2.2.4.1 Khung

Cần chế tạo một khung để giữ thiết bị theo một hoặc nhiều hướng.

2.2.4.2 Lực kẹp

Phải cung cấp các phương tiện phù hợp để tạo ra một lực kẹp không đổi để tăng khả năng tiếp xúc nhiệt hoặc để duy trì khoảng cách chính xác giữa các tấm, bất kể hướng nào. Cần một lực ổn định để giữ các bộ phận gần nhau. Lực này có thể tạo ra bằng lò xo hoặc hệ thống đòn bẩy và trọng lượng cố định hoặc một phương pháp tương đương. Không cần thiết phải yêu cầu áp suất lớn hơn $2,5\text{ kPa}$ lên mẫu thử. Khi thử nghiệm các mẫu chịu nén, các điểm dừng có diện tích mặt cắt ngang nhỏ và độ dẫn nhiệt thấp giữa các góc của bộ phận làm mát và bộ phận gia nhiệt để hạn chế việc mẫu thử bị nén. Các công cụ phù hợp có thể được sử dụng để cố định khoảng cách giữa các bề mặt làm việc; không cần bố trí áp suất không đổi đối với các phép thử như vậy.

2.2.5 Cách nhiệt cạnh và tổn thất nhiệt ở cạnh

2.2.5.1 Yêu cầu chung

Tổn thất nhiệt từ các cạnh bên ngoài của thiết bị đo dòng nhiệt phải được hạn chế bằng cách nhiệt cạnh hoặc bằng cách kiểm soát nhiệt độ không khí xung quanh hoặc bằng cả hai phương pháp. Mô

TCVN xxxxx:2024

phòng phần tử hữu hạn ba chiều sẽ được thực hiện để đảm bảo dòng nhiệt một chiều trong khu vực đo.

Phải cung cấp tủ hoặc vỏ bọc xung quanh cho cụm đồng hồ đo dòng nhiệt để duy trì nhiệt độ môi trường ở nhiệt độ trung bình của mẫu thử, đặc biệt khi tiến hành các thử nghiệm ở nhiệt độ trung bình khác đáng kể so với nhiệt độ không khí trong phòng thí nghiệm.

Bộ tản nhiệt lạnh thường được sử dụng như là một phần của hệ thống kiểm soát nhiệt độ trong vỏ bọc. Bộ phận này sẽ cung cấp nhiệt độ điểm sương thấp hơn ít nhất 2K so với nhiệt độ của bộ phận làm mát và do đó sẽ ngăn ngừa hiện tượng mẫu thử bị ngưng tụ và hấp thụ ẩm bên ngoài môi trường.

CHÚ THÍCH: Đối với các mẫu thử có mao dẫn hoặc lỗ xốp nhỏ, có thể cần tới 5K.

2.2.5.2 Ảnh hưởng đến loại cấu hình thử nghiệm

Ba kiểu cấu hình khác nhau (xem 2.1) về đặc tính liên quan đến tổn thất nhiệt ở cạnh và do đó yêu cầu các giải pháp khác nhau để giảm thiểu các tổn thất này.

2.2.5.2.1 Cấu hình đơn mẫu không đối xứng tương tự như thiết bị tẩm nóng được bảo vệ liên quan đến tổn thất nhiệt ở cạnh qua mẫu thử. Tổn thất nhiệt ở cạnh trong thiết bị đo dòng nhiệt quan trọng hơn so với trong thiết bị tẩm nóng được bảo vệ vì chúng có thể gây ra sai số bổ sung do nhiệt độ không đồng đều ở phía tiếp xúc với mẫu thử.

2.2.5.2.2 Cấu hình hai mẫu thử đối xứng rất nhạy với tổn thất nhiệt ở cạnh trên đồng hồ đo dòng nhiệt do nhiệt truyền qua các cạnh sau đó qua mẫu thử thay vì trực tiếp từ các bộ phận bằng kim loại nặng. Do bề mặt làm việc của các bộ phận này gần như đẳng nhiệt nên nhiệt độ bề mặt có thể không còn đồng đều. Nếu đồng hồ đo dòng nhiệt nhạy cảm với sự chênh lệch nhiệt độ dọc theo các bề mặt chính của nó, thì hiện tại tổn thất nhiệt ở các cạnh có thể tạo ra các sai số lớn. Để ngăn chặn các loại tổn thất này, bắt buộc phải duy trì vỏ bọc theo yêu cầu như được mô tả trong 2.2.5.1 ở nhiệt độ thử nghiệm trung bình. Liên quan đến tổn thất nhiệt cạnh bên trong mẫu thử, chúng tương tự như tổn thất nhiệt trong tẩm gia nhiệt được bảo vệ khi nhiệt độ xung quanh là nhiệt độ của các bộ phận làm nóng và làm mát.

2.2.5.2.3 Cấu hình mẫu đơn đối xứng ít nhạy cảm nhất với các điều kiện cạnh nếu giá trị trung bình của số đọc của hai đồng hồ đo dòng nhiệt được giả sử là tốc độ dòng nhiệt đo được qua mẫu thử. Ngoài ra, cấu hình này sẽ giúp việc đánh giá tổn thất nhiệt ở cạnh dễ dàng hơn nếu hai đồng hồ đo dòng nhiệt giống hệt nhau và nếu đạt được sự đồng nhất về nhiệt độ của các bề mặt làm việc.

2.3 Hướng dẫn thiết kế thiết bị

2.3.1 Hiệu suất yêu cầu

Việc thiết kế một thiết bị đo dòng nhiệt sẽ phụ thuộc vào những thông tin sơ bộ về các thông số sau:

- độ dày tối thiểu và tối đa của mẫu được thử nghiệm trong thiết bị;
- nhiệt trở tối thiểu và tối đa của mẫu thử;
- chênh lệch nhiệt độ tối thiểu và tối đa giữa các mẫu thử;
- nhiệt độ tối thiểu của bộ phận làm mát;
- nhiệt độ tối đa của bộ phận gia nhiệt;

- độ chính xác và khả năng tái lập tổng thể của thiết bị là sai số tối đa có thể chấp nhận được đối với đặc tính đo được trong điều kiện trường hợp xấu nhất đã xác định;
- môi trường xung quanh;
- loại cấu hình thiết bị đo dòng nhiệt;
- hệ số độ nhạy của đồng hồ đo dòng nhiệt, $\frac{\Delta e}{\Delta q}$ tính bằng milivôn trên watt mét vuông.

2.3.2 Lựa chọn kích thước thiết bị dự kiến

Trong thử nghiệm đầu tiên (giả sử mặt bên) (L_m) của vùng đo của đồng hồ đo dòng nhiệt gấp bốn lần độ dày tối đa của mẫu thử và mặt bên ngoài (L) gấp tám lần độ dày tối đa của mẫu thử.

2.3.3 Bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát

Tính tốc độ dòng nhiệt lớn nhất đi qua mẫu thử khi nhiệt trở của nó là nhỏ nhất và chênh lệch nhiệt độ giữa các mẫu là lớn nhất. Thêm tốc độ dòng nhiệt do tổn thất nhiệt ở cạnh và tốc độ dòng nhiệt trao đổi từ các thiết bị ra môi trường. Xác định bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát, độ dày tấm kim loại bề mặt làm việc và tốc độ dòng chảy, khối lượng của chất lỏng làm mát (nếu thích hợp) để đạt được nhiệt độ đồng nhất nêu trong 2.2.1.2.

2.3.4 Bộ phận đo dòng nhiệt

Thiết kế phải đảm bảo nhiệt độ đồng nhất ở bề mặt HFM tiếp giáp với mẫu thử sao cho tổn thất nhiệt ở cạnh lớn hơn khi tăng chiều dày mẫu thử sẽ không tạo ra nhiệt độ bề mặt xung quanh nhỏ hơn trên HFM và do đó tránh được sự biến dạng bổ sung của các đường truyền nhiệt. Đặc biệt, không được tạo ra tốc độ dòng nhiệt ngang trong lõi của HFM. Nếu tốc độ dòng nhiệt bên xảy ra trong lõi, đầu ra của pin nhiệt điện sẽ không tỷ lệ với tốc độ dòng nhiệt đi vào mẫu thử (xem tài liệu [21]). Mô phỏng phần tử hữu hạn ba chiều có thể được thực hiện để đảm bảo dòng nhiệt một chiều trong khu vực đo

2.3.5 Thiết kế chi tiết

Các giá trị thỏa mãn về kích thước của thiết bị trước tiên phải được xác định từ các thông số sau:

- Xác định dung sai bề mặt theo độ dày tối thiểu của mẫu thử;
- Chọn lớp hoàn thiện bề mặt để đạt độ phát xạ từ 0,8 trở lên (ở nhiệt độ phòng, các bề mặt kim loại bị oxy hóa và nhiều loại sơn đáp ứng yêu cầu này);
- Xác định tất cả các chi tiết của thiết bị như vị trí và cách lắp đặt phần tử cảm biến nhiệt độ, cách bố trí bộ gia nhiệt, hệ thống dây điện, kết nối cơ học, thiết bị đo độ dày, v.v.:
- Chọn hệ bộ phận mát và bộ phận gia nhiệt theo nhiệt độ của thiết bị làm mát tối thiểu và nhiệt độ tối đa của bộ phận gia nhiệt;
- Lựa chọn hệ thống điều khiển nhiệt độ tự động theo độ lệch và dao động nhiệt độ tối thiểu có thể chấp nhận được đối với thiết bị;
- Lựa chọn một phương pháp ổn định phù hợp theo yêu cầu của môi trường xung quanh và theo nhu cầu về độ ổn định và độ trôi của nó để giữ sai số tổn thất nhiệt biên trong các giá trị đã nêu;
- Chọn loại đồng hồ đo dòng nhiệt và các đặc tính của các thiết bị đo (xem phụ lục B).

2.4 Hiệu chuẩn

Hiệu chuẩn thiết bị đo dòng nhiệt là một hoạt động rất quan trọng. Do tổn thất nhiệt hoặc sự tăng nhiệt theo chiều ngang không được kiểm soát tự động mà chỉ được “đảm bảo” bởi kích thước của khu vực bảo vệ và lớp cách nhiệt cạnh, nên không có gì đảm bảo rằng tổn thất nhiệt hoặc sự tăng nhiệt được giảm thiểu trong mọi điều kiện thử nghiệm. Để đảm bảo thiết bị hoạt động tốt với các mẫu có nhiệt trở khác nhau, thiết bị phải được hiệu chuẩn bằng vật liệu có đặc tính truyền nhiệt tương tự như vật liệu được đánh giá; nên tránh sử dụng phương pháp ngoại suy trong hiệu chuẩn thiết bị.

Các tài liệu tham khảo này phải được đánh giá thông qua một phương pháp kiểm tra tuyệt đối chẳng hạn như phương pháp tẩm nóng được bảo vệ.

2.4.1 Yêu cầu chung

Việc hiệu chuẩn thiết bị đo dòng nhiệt phải được thực hiện bằng cách sử dụng một cặp mẫu chuẩn (mẫu chuẩn này đã được thử nghiệm kiểm chứng bằng phương pháp đo tẩm nóng được bảo vệ). Để hiểu đúng quy trình hiệu chuẩn, cần tham khảo tài liệu [20]) và thực hiện phép đo mẫu chuẩn sử dụng đồng thời thiết bị tẩm nóng được bảo vệ và thiết bị đo dòng nhiệt. Các tính toán tương tự có thể được thực hiện cho thiết bị tẩm nóng được bảo vệ cấu hình mẫu đơn. Trước hết, giả định như trong 1.8.2 rằng các mẫu chuẩn sẽ đồng nhất (như được quy định trong TCVN 9312 (ISO 9251) và 1.3.1) và các đặc tính truyền nhiệt ở trạng thái ổn định sẽ không phụ thuộc vào độ dày và độ dốc nhiệt độ, do đó tham chiếu đến độ dẫn nhiệt hoặc độ truyền nhiệt sẽ chính xác.

Chỉ số (') được sử dụng để chỉ các thuộc tính của mẫu thứ nhất, trong khi chỉ số (") chỉ các thuộc tính của mẫu thứ hai. Đối với mỗi mẫu được thử nghiệm trong thiết bị tẩm nóng được bảo vệ, độ dày d' hoặc d'' , độ dẫn nhiệt, λ' hoặc λ'' , nhiệt độ bên nóng T'_1 hoặc T''_1 , nhiệt độ bên lạnh T'_2 , hoặc T''_2 được xem xét. Độ dày trung bình $d_m = 0,5(d' + d'')$ và độ chênh lệch độ dày $\delta d = 0,5(d' - d'')$ được xác định sao cho $d' = d_m + \delta d$ và $d'' = d_m - \delta d$.

Theo cách tương tự, nhiệt độ trung bình và chênh lệch nhiệt độ sau đây được xác định.

$$T'_m = \frac{T'_1 + T'_2}{2}$$

$$\Delta T' = (T'_1 - T'_2)$$

$$T''_m = \frac{T''_1 + T''_2}{2}$$

$$\Delta T'' = (T''_1 - T''_2)$$

$$T_m = \frac{T'_m + T''_m}{2}$$

$$\delta T_m = \frac{T'_m - T''_m}{2}$$

$$\Delta T = \frac{\Delta T' + \Delta T''}{2}$$

$$\delta T = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{2}$$

$$\delta_+ = \delta T_m + \frac{\delta T}{2}$$

$$\delta_- = \delta T_m - \frac{\delta T}{2}$$

$$T'_1 = T_m + \frac{\Delta T}{2} + \delta_+$$

$$T'_2 = T_m - \frac{\Delta T}{2} + \delta_-$$

$$T''_1 = T_m + \frac{\Delta T}{2} - \delta_+$$

$$T''_2 = T_m - \frac{\Delta T}{2} - \delta_-$$

Như được nêu trong 1.4

T_m là nhiệt độ trung bình;

ΔT là độ chênh lệch nhiệt độ trung bình.

và δ_+ , và δ_- là độ lệch trong từng mẫu thử tại nhiệt độ trung bình T_m và độ chênh lệch nhiệt độ trung bình ΔT . Đối với thiết bị tấm nóng được bảo vệ, trường hợp lý tưởng thì $\delta_+ = \delta_- = 0$.

Giả sử rằng tại nhiệt độ trung bình T_m , cả hai mẫu thử có độ dẫn nhiệt tương ứng lần lượt là $\lambda'_m = \lambda_m + \delta\lambda$ và $\lambda''_m = \lambda_m - \delta\lambda$, và hàm biểu diễn sự phụ thuộc của hệ số dẫn nhiệt theo nhiệt độ là $\lambda(T)$ và $\lambda(T)$ tại nhiệt độ T_m của hai mẫu thử bằng nhau và được biết trước [$\lambda(T)$ và các đạo hàm bậc cao được bỏ qua]; bỏ qua cách tính của δ_T , δT_m và các lũy thừa của chúng, khai triển dãy số sẽ tính được mật độ dòng nhiệt q' và q'' thông qua từng mẫu trong số hai mẫu thử.

Từ giá trị trung bình của $q = 0,5(q' + q'')$ giá trị trung bình của độ dẫn nhiệt, λ_M trong thiết bị tấm nóng được bảo vệ là:

$$\lambda_M = q \frac{d_m}{\Delta T}$$

Khi tỉ lệ $\lambda_m/\lambda(T)$ lớn hơn nhiều so với độ chênh lệch nhiệt độ và ΔT được giới hạn trong khoản từ 20 K đến 40 K thì:

$$\lambda_M = \frac{\lambda_m}{1 - \left(\frac{\delta d}{d_m}\right)^2} \left[1 - \frac{\delta\lambda}{\lambda_m} \left(\frac{\delta d}{d_m} - \frac{2\delta T}{\Delta T} \right) - \frac{\delta d}{d_m} \times \frac{2\delta T}{\Delta T} + \frac{\ddot{\lambda}(T)}{3! \lambda_m} \left(\frac{\Delta T}{2} \right)^2 \right] \dots (2.1)$$

Nếu $\delta d = 0$

$$\lambda_M = \lambda_m \left[1 + \frac{2\delta T}{\Delta T} \times \frac{\delta\lambda}{\lambda_m} + \frac{\ddot{\lambda}(T)}{3! \lambda_m} \left(\frac{\Delta T}{2} \right)^2 \right] \dots (2.2)$$

Trong trường hợp không biết rõ, khi hiệu chuẩn thì tỷ lệ $\delta\lambda/\lambda_m$ được giả sử là bằng 0,02 và giá trị λ_M phải khác giá trị λ_m ít nhất 0,2 %.

2.4.2 Cấu hình mẫu đơn không đối xứng

Mẫu thử đầu tiên được gắn vào thiết bị HFM và được đo các giá trị e' , T'_1 , và T'_2 . Sau đó, mẫu thử thứ 2 được gắn vào và các giá trị e'' , T''_1 , và T''_2 được đo. Giá trị e' và e'' là các giá đầu ra của HFM. Và d' , d'' nên được biết trước. Các giá trị T'_m , T''_m , T_m , $\Delta T'$, $\Delta T''$ và δT_m được trình bày ở trên và do đó:

$$\begin{aligned} T'_1 &= T_m + \delta T_m + \frac{\Delta T'}{2} & T'_2 &= T_m + \delta T_m - \frac{\Delta T'}{2} \\ T''_1 &= T_m - \delta T_m + \frac{\Delta T''}{2} & T''_2 &= T_m - \delta T_m - \frac{\Delta T''}{2} \end{aligned}$$

Trong đó

T_m là nhiệt độ trung bình của cả hai lần thử nghiệm;

$\Delta T'$ và $\Delta T''$ độ chênh lệch nhiệt độ trong hai lần thử nghiệm;

δT_m là độ chênh lệch giữa nhiệt độ trung bình trong mỗi lần thử và T_m

Nếu cả hai lần thử được thực hiện trong điều kiện lý tưởng thì $\delta T_m = 0$ và $\Delta T' = \Delta T''$.

Nếu

$$\Lambda' = \frac{\lambda_m}{d'}$$

$$\Lambda'' = \frac{\lambda_m}{d''}$$

$$\lambda'_m = \lambda_m + \delta\lambda$$

$$\lambda''_m = \lambda_m - \delta\lambda$$

Sử dụng lại các số hạng đầu tiên trong quá trình khai triển lũy thừa của mật độ dòng nhiệt trong hai lần thử nghiệm tương ứng là $q' = e'f$ và $q'' = e''f$, hệ số hiệu chuẩn f được suy ra bằng cách tính toán $q = 0,5(q' + q'')$, công thức như sau:

$$f = \frac{2}{\frac{e'}{A'\Delta T'} + \frac{e''}{A''\Delta T''}} \times \left[1 + \frac{2\ddot{\lambda}(T)}{3! \lambda_m} (\Delta T'^2 + \Delta T''^2) \right] \dots (2.3)$$

Điều quan trọng là nhận thấy rằng Λ' và Λ'' không phải là hệ số dẫn nhiệt thực tế của hai mẫu thử và thường không được biết trước mà được xác định qua các thông số d', d'' và λ_m

Việc hiệu chuẩn phải được tiến hành sao cho số hạng trong ngoặc sẽ khác 1 nhỏ hơn 0,2 %.

2.4.3 Cấu hình mẫu đơn đối xứng

Hiệu chuẩn máy HFM trong cấu hình mẫu đơn đối xứng chính xác như hiệu chuẩn HFM trong cấu hình mẫu đơn không đối xứng, với hai phương trình tương tự như phương trình (2.3), trong đó trong mỗi trường hợp f, e', e'' tương ứng với đồng hồ đo dòng nhiệt được coi là nhiệt độ trung bình của chính nó.

2.4.4 Cấu hình hai mẫu thử đối xứng

Áp dụng lại phương trình (2.3) cho cấu hình mẫu đơn đối xứng, với điều kiện là cả e' và e'' đều được thay thế bằng đầu ra e của đồng hồ đo dòng nhiệt cần tính toán.

Bây giờ chúng ta có $q' = q'' = ef$ và δT_m , gần bằng với $\Delta T'/2$ và $\Delta T''/2$

CHÚ THÍCH 1: Điều này giả định khả năng vận hành trong trường hợp 2.4.2 và 2.4.3 với mẫu thử bao gồm một cặp mẫu thử được đo trong thiết bị tẩm nóng được bảo vệ bằng cách sử dụng phương trình (2.3) như ở đây.

2.4.5 Đường cong hiệu chuẩn

Hầu hết các đồng hồ đo dòng nhiệt đều rất nhạy với nhiệt độ trung bình và hệ số hiệu chuẩn sẽ thay đổi theo nhiệt độ trung bình T_m . Vì vậy, các phép đo trên phải được lặp lại ở các nhiệt độ trung bình khác nhau để bao trùm phạm vi nhiệt độ hoạt động của thiết bị đo dòng nhiệt. Phải chuẩn bị một đường cong hoặc phương trình hiệu chuẩn (hệ số hiệu chuẩn so với nhiệt độ trung bình của cụm thiết bị đo dòng nhiệt).

Mẫu thử có thể được đặt giữa tấm nóng và đồng hồ đo dòng nhiệt nếu mục đích xác định các đặc tính truyền nhiệt ở nhiệt độ cao hơn giới hạn nhiệt độ an toàn của đồng hồ đo dòng nhiệt.

Việc hiệu chuẩn phải được thực hiện với ít nhất hai mẫu và tốt nhất là ba mẫu, có nhiệt trở rất khác nhau để kiểm tra tính tuyến tính của (các) đồng hồ đo dòng nhiệt e_{mf} đáp ứng so với q (xem tài liệu [16]). Nếu đường cong $q = F(e)$ không tuyến tính (độ dốc bằng f). f sẽ thay đổi theo q và thực tế này sẽ được tính đến sau khi kiểm tra các nguyên nhân có thể gây ra sự phi tuyến tính đó (ví dụ: tổn thất nhiệt quá mức ở mép cạnh).

Có thể thử kiểm tra sơ bộ về độ nhạy và độ tuyến tính của HFM được gắn trong thiết bị HFM trong thiết bị tắm nóng được bảo vệ (tốt nhất là một cấu hình mẫu đơn), kẹp HFM với các mẫu tham chiếu.

2.5 Kiểm tra hiệu năng

2.5.1 Hình học

Có thể kiểm tra độ phẳng của các bề mặt làm việc bằng thước thép, có kích thước phù hợp, được giữ trên mỗi bề mặt và quan sát bằng đèn phía sau thước. Có thể dễ dàng nhìn thấy các khoảng cách nhỏ tới 25 μm và các khoảng cách lớn hơn có thể được đo bằng dưỡng đo hoặc giấy mỏng.

2.5.2 Mạch tính toán

Khi thiết bị đọc trực tiếp được cung cấp, phải cung cấp đầy đủ thiết bị để hiệu chuẩn mạch điện tử tương tự, độc lập với phần còn lại của thiết bị. Các nguồn điện áp riêng biệt có đầu ra đã hiệu chuẩn hoặc tương đương sẽ được thay thế cho cặp nhiệt điện, cảm biến nhiệt độ và bộ chuyển đổi độ dày bằng cách sử dụng các loại công tắc có chất lượng tốt để điều chỉnh. Hai mạch thử nghiệm phải được cung cấp để kiểm tra hiệu chuẩn ở giữa 0 % và 10 % của dải, và một mạch ở giữa 90 % và 100 % của dải. Thiết bị đọc trực tiếp phải được kiểm tra ngay trước và sau khi kiểm tra báo cáo. Kết quả sẽ được báo cáo như đã nêu trong phần 3.

2.5.3 Đồng hồ đo dòng nhiệt

2.5.3.1 Thử nghiệm sơ bộ

Bất kỳ đồng hồ đo dòng nhiệt nào mới hoặc đã được sửa đổi đều phải được kiểm tra các đặc điểm sau:

2.5.3.1.1 Bù điểm không

Nếu có một đầu ra khác không từ pin nhiệt điện khi không có dòng nhiệt truyền vào, điều này có thể là do:

- a) Kết nối điện kém của cảm biến nhiệt nhạy có đầu ra thấp: cải thiện kết nối để loại bỏ vấn đề này vì sai lệch này phụ thuộc vào nhiệt độ;
- b) Độ nhạy với sự không đồng đều của nhiệt độ tắm nóng hoặc tắm lạnh: kiểm tra sự không đồng đều của nhiệt độ; trong tất cả các điều kiện vận hành, nó phải nằm trong giới hạn quy định trong tiêu chuẩn này.

Trong cả hai trường hợp, không được phép sửa đổi.

2.5.3.1.2 Độ trôi của đồng hồ đo dòng nhiệt

Điều này có thể là do lão hóa vật liệu hoặc tách lớp.

2.5.3.1.3 Hệ số nhiệt độ của yếu tố hiệu chuẩn

Điều này phụ thuộc vào loại đầu dò nhiệt độ được sử dụng trong bộ phận dò chênh lệch nhiệt độ (vật liệu cặp nhiệt điện được sử dụng trong pin nhiệt điện) và loại vật liệu được sử dụng cho tấm đo.

2.5.3.1.4 Ảnh hưởng của áp suất tải đến hệ số hiệu chuẩn

Xem phụ lục B, B.1.

2.5.3.2 Hiệu chỉnh

Trong mọi trường hợp, việc hiệu chỉnh phải được thực hiện khi xảy ra thay đổi lớn hơn 1 % trong phạm vi hoạt động; các hiệu chỉnh được khuyến nghị đối với các thay đổi 0,3 % trong phạm vi hoạt động.

2.5.4 Độ lệch hiệu chuẩn

Khi thiết bị đo dòng nhiệt mới được chế tạo, phải thực hiện hiệu chuẩn ít nhất một lần một tuần. Có thể giảm tần suất hiệu chuẩn khi nhiều lần kiểm tra thiết bị đạt yêu cầu.

Lưu giữ hồ sơ hiệu chuẩn thiết bị trong từng lần hiệu chuẩn cụ thể. Tài liệu này sẽ cho biết độ tái lập của thiết bị đo dòng nhiệt theo thời gian. Nếu kết quả cho thấy sự khác biệt trong phép đo nhiệt trở của các mẫu chuẩn lớn hơn +1%, phải kiểm tra bộ điều khiển của thiết bị, nhiệt độ của thiết bị. Nếu cần, hãy xác định đường cong hoặc phương trình hệ số hiệu chuẩn mới. Hình dạng đường cong có thể không thay đổi. Đường cong có thể được dịch chuyển sang một vị trí mới.

Khi thiết bị này được sử dụng để kiểm soát chất lượng hàng ngày của một loại sản phẩm cách nhiệt nhất định ở nhiệt độ trung bình không đổi, thì kết quả có độ tin cậy tốt nhất đạt được bằng cách bổ sung kiểm tra hiệu chuẩn hàng ngày với các mẫu chuẩn thứ cấp được lấy từ cùng một sản phẩm theo quy trình trên.

Trong mọi trường hợp, bất kỳ giá trị độ lệch tăng dần nào của hiệu chuẩn phải được kiểm tra cẩn thận để phát hiện nguyên nhân dẫn đến độ lệch này và tìm cách khắc phục.

2.5.5 Kiểm tra hiệu suất tổng thể

Các kết quả thử nghiệm thu được bằng phương pháp này chỉ có thể được đảm bảo nếu biết được các giới hạn của thiết bị. Để thiết lập các giới hạn này, phải xác định được hiệu suất làm việc của thiết bị bằng cách so sánh kết quả đo của mẫu thử có đặc tính truyền nhiệt tương tự với các mẫu thử được sử dụng trong quá trình đánh giá.

2.5.5.1 Nếu chỉ sử dụng một điểm tham chiếu duy nhất có thể dẫn đến các lỗi nghiêm trọng. Vì vậy, nên chọn một dải vật liệu có đặc tính truyền nhiệt bao trùm dải giá trị cần thử nghiệm (xem 2.4).

2.5.5.2 Khi thiết bị được sử dụng ở độ dày lớn hơn độ dày của vật liệu chuẩn, một loạt phép đo phải được thực hiện để đảm bảo rằng thiết bị không gây ra sai số bổ sung do tổn thất hoặc do bảo vệ không đủ. Một kỹ thuật đơn giản là sử dụng các vách ngăn bức xạ chèn vào giữa các lớp cách nhiệt, mỗi lớp được thử nghiệm bằng kỹ thuật tham chiếu chính. Nếu không có lỗi nào được phát hiện và không có bức xạ hồng ngoại nào phát lại, thì giá trị nhiệt trở trung bình đo được phải bằng giá trị nhiệt trở trung bình thu được đối với mẫu cách nhiệt riêng biệt (xem tài liệu [18]).

3 Quy trình thử nghiệm

3.1 Yêu cầu chung

Việc đánh giá đặc tính truyền nhiệt của mẫu thử vật liệu cách nhiệt có độ dẫn nhiệt thấp có thể được xác định tuân thủ theo các thông số được nêu trong Điều 1 và Điều 2. Giả định rằng người vận hành nắm rõ các nguyên tắc cơ bản về truyền nhiệt và các nguyên tắc thiết kế và vận hành thiết bị đo dòng nhiệt. Đồng thời người vận hành có thể thảo luận về các tác động ảnh hưởng đến việc đo lường với người gửi mẫu cụ thể hoặc mẫu để kiểm tra hoặc cần thông tin cụ thể về các đặc tính truyền nhiệt của một vật liệu, sản phẩm hay hệ thống.

Do đó, trước khi thực hiện đo lường, cần phải đưa ra một số quyết định liên quan đến đặc tính cụ thể mong muốn hoặc cần thiết của bất kỳ phép đo trực tiếp nào (ví dụ như hệ số dẫn nhiệt hoặc nhiệt trở), hoặc liên quan đến bất kỳ mối tương quan mong muốn hoặc cần thiết của các đặc tính được đo (ví dụ hệ số dẫn nhiệt là một hàm của nhiệt độ hoặc hệ số dẫn nhiệt là một hàm của khối lượng riêng tại một nhiệt độ nhất định).

Cụ thể, các quyết định này sẽ bị ảnh hưởng bởi:

a) Kích thước và hình dạng của thiết bị sẵn có hoặc cần thiết. Một thiết bị cụ thể có kích cỡ nhất định có thể không đủ để thực hiện các phép đo đối với tất cả các mẫu có độ dày khác nhau để xác định được các đặc tính truyền nhiệt cần thiết bằng phương pháp đo trực tiếp hoặc phép tính nội suy từ kết quả đo của các mẫu có độ dày phù hợp với thiết bị đo. (xem điều 3.4.2). Tương tự, phạm vi nhiệt độ và điều kiện môi trường có sẵn hoặc cần thiết có thể không đủ để thu được kết quả trực tiếp hoặc nội suy từ các phép đo trong phạm vi có sẵn của thiết bị.

b) Kích thước, số lượng và hình thức mẫu thử là được cung cấp hoặc cần thiết. Điều này phụ thuộc vào các yêu cầu cuối cùng của một mẫu hoặc vật liệu cụ thể, nếu vật liệu, sản phẩm hay hệ thống có tính dị hướng cao, cần phải xác định xem các phép đo này có thể thực hiện được trong các thiết bị đo dòng nhiệt hay không (xem điều 3.4.1).

c) Nhu cầu hoặc mong muốn đặt các tấm mỏng có nhiệt trở thấp giữa mẫu và thiết bị và nhu cầu hoặc mong muốn gắn vào mẫu bộ cảm biến nhiệt độ hoặc cặp nhiệt điện (xem điều 2.2.3.1.2.2). Các kỹ thuật này được triển khai để đo chính xác mức chênh nhiệt độ của mẫu có nhiệt trở thấp và/hoặc vật liệu cứng bằng cách loại bỏ những tác động có thể có của nhiệt trở tiếp xúc.

d) Nhu cầu hoặc mong muốn bọc mẫu trong túi hơi nước kín. Kỹ thuật này giúp ngăn hấp thụ độ ẩm sau khi sấy khô hoặc thay đổi lượng ẩm của mẫu thử sau khi được ổn định.

e) Sự cần thiết phải áp độ dày của mẫu thử nghiệm hay áp lực lên mẫu thử nghiệm.

Người vận hành cũng phải biết được độ chênh lệch giữa phép đo mà mục tiêu của nó là xác định một trong những đặc tính truyền nhiệt ở trạng thái ổn định được đưa ra trong Điều 1, và các phép đo được yêu cầu bởi thông số kỹ thuật của vật liệu. Phép đo về thông số kỹ thuật của vật liệu có thể cũng được yêu cầu bởi kế hoạch lấy mẫu đối với các mẫu không tuân thủ theo các yêu cầu được nêu ra trong Tiêu chuẩn này. Trường hợp điển hình là các mẫu thử không đủ phẳng nên không thể đáp ứng việc tiếp xúc tốt với thiết bị, hoặc không song song, như yêu cầu trong điều 3.2.2, hoặc được kiểm thử ở một độ dày khác xa với mục đích sử dụng cuối cùng. Vì thế, các kết quả số của các thử nghiệm này được coi là công cụ hỗ trợ để chấp nhận hoặc từ chối nhiều vật liệu cụ thể, nhưng không nhất thiết được coi là một đặc tính truyền nhiệt của vật liệu.

3.2 Mẫu thử

3.2.1. Lựa chọn và kích thước

Mỗi mẫu sẽ chọn một hoặc hai mảnh để thử nghiệm tùy theo loại thiết bị được sử dụng (xem Điều 1.6.1 và điều 2.1). Trong trường hợp cần hai mảnh của một mẫu thì hai mảnh này phải giống nhau nhất có thể và có độ dày chênh lệch nhau không quá 2%.

TCVN xxxxx:2024

Các mảnh mẫu thử phải có kích thước đủ lớn để che phủ toàn bộ diện tích bề mặt làm việc của các bộ phận gia nhiệt, bộ phận làm mát và đồng hồ đo dòng nhiệt, và phải sử dụng một trong hai độ dày thực tế hoặc độ dày trung bình chuẩn của vật liệu được thử nghiệm (xem 3.4.2). Chúng cũng phải đáp ứng các yêu cầu được đưa ra trong Điều 1.7 và 1.8. Độ dày của các mảnh mẫu thử nghiệm được sử dụng sẽ phải tuân thủ theo 1.7.2.

3.2.2. Chuẩn bị và ổn định mẫu thử

3.2.2.1. Yêu cầu chung

Việc chuẩn bị và ổn định mẫu phải phù hợp với thông số kỹ thuật của vật liệu được thử nghiệm. Các hướng dẫn được sử dụng khi không có sẵn các thông số.

3.2.2.2 Hướng dẫn đối với tất cả vật liệu (ngoại trừ vật liệu độn)

3.2.2.2.1 Chuẩn bị

Các bề mặt của các mẫu thử nghiệm phải được làm phẳng bằng các công cụ phù hợp (thường là giấy nhám, cắt mặt bằng máy tiện và máy mài), để đảm bảo các mẫu thử tiếp xúc khít với các bề mặt làm việc. Đối với các vật liệu cứng, các bề mặt mẫu phải được làm phẳng như bề mặt làm việc tiếp xúc với chúng (xem 2.2.1.1 và 2.2.2.2) và phải đặt song song so với tổng diện tích bề mặt trong phạm vi 2% của độ dày mẫu.

Khi mẫu thử là vật liệu cứng và/hoặc có nhiệt trở nhỏ hơn $0.1 \text{ m}^2\text{K/W}$, sử dụng các tấm mỏng hoặc cảm biến nhiệt được gắn lên mẫu thử để xác định độ chênh nhiệt độ của mẫu thử như đã nêu trong 2.2.3.1.2.

Nhiệt trở của các tấm mỏng được chèn vào sẽ không lớn hơn $1/10$ nhiệt trở của mẫu thử. Nhiệt trở của vật liệu composit xen kẽ (tấm/mẫu cứng/tấm) khi đó sẽ được xác định bằng cách sử dụng độ giảm nhiệt độ ở cặp nhiệt điện cố định trên các bề mặt làm việc nóng và lạnh. Cần tối thiểu một cặp nhiệt điện cho mỗi bề mặt đo. Nếu sử dụng các cặp nhiệt điện riêng biệt, thì độ dày phù hợp của mẫu là khoảng cách trung bình, vuông góc với bề mặt của mẫu tại vị trí giữa các tâm của cặp nhiệt ở hai bên. Loại và vị trí của cặp nhiệt điện, xem 2.2.3.1.

3.2.2.2.2 Ổn định mẫu

Sau khi xác định được khối lượng của các mảnh mẫu thử, chúng cần được ổn định ở khối lượng không đổi trong bình hút ẩm hoặc trong tủ sấy thông gió tại nhiệt độ phù hợp đối với vật liệu hoặc ở nhiệt độ quy định theo thông số kỹ thuật của vật liệu. Không để các vật liệu nhạy cảm với nhiệt độ tiếp xúc với mức nhiệt độ làm thay đổi mẫu thử nghiệm. Khi các mẫu thử nghiệm được sử dụng ở một khoảng nhiệt độ nhất định, chúng cần phải được ổn định đến khối lượng không đổi ở giới hạn trên phạm vi nhiệt độ này, trong môi trường không đọng nước và được kiểm soát. Có thể sử dụng hệ kín nếu sử dụng chất hấp thụ hoặc chất hấp phụ trong quá trình ổn định mẫu. Ví dụ sử dụng bình hút ẩm kín ở 330 K đến 335 K với không khí chuyển động để ổn định một số loại nhựa xốp.

Khối lượng hao hụt tương đối được tính từ khối lượng được xác định trước và sau khi sấy khô. Khi thời gian cần để đo các đặc tính truyền nhiệt ngắn hơn so với thời gian các mẫu thử nghiệm cần để hấp thụ khối lượng ẩm lớn từ không khí trong phòng thí nghiệm (ví dụ các mẫu thử bê tông), thì đề xuất nhanh chóng để các mẫu thử nghiệm vào thiết bị vào cuối giai đoạn sấy khô để tránh hấp thụ ẩm.

Trong tình huống ngược lại (ví dụ khi các mẫu thử nghiệm của các vật liệu dạng sợi có khối lượng riêng thấp hoặc dạng bột nhựa), thì đề xuất tiếp tục ổn định, lấy mẫu thử trong phòng với môi trường thí nghiệm tiêu chuẩn [nhiệt độ (296 ± 1) K; độ ẩm tương đối (50 ± 10) %] để đạt trạng thái cân bằng với không khí trong phòng (khối lượng không đổi). Đối với các trường hợp trung gian (ví dụ với các vật liệu dạng sợi có khối lượng riêng cao), việc đánh giá quy trình ổn định phải được thực hiện bởi người vận hành có kinh nghiệm.

Sau khi ổn định đến khối lượng không đổi, các mảnh mẫu thử sẽ được làm mát và lưu trữ trong bình hút ẩm kín hoặc trong túi polyethylene kín, được hút chân không một phần. Các mảnh mẫu thử nghiệm sau đó sẽ được lấy đi, cân và đặt trên thiết bị ngay trước khi thực hiện thử nghiệm. Để giảm thời gian thử nghiệm, các mẫu thử có thể được bình ổn đến nhiệt độ trung bình phù hợp ngay trước khi được đặt trong thiết bị.

Để tránh độ ẩm di cư đến hoặc từ mẫu thử trong quá trình thử nghiệm, bản thân các mẫu thử có thể được bọc kín trong túi kín hơi, túi này có vai trò tương tự như trường hợp sử dụng các tấm mỏng để thử nghiệm các mẫu thử cứng, như mô tả trong mục 2.2.3.1.2.2.

3.2.2.3 Hướng dẫn đối với các vật liệu độn

Khi thử nghiệm các vật liệu độn, thì độ dày mẫu thử tối thiểu phải gấp 10 lần – và nếu được thì 20 lần so với kích thước trung bình của các hạt, mảnh, v.v... của vật liệu độn. Khi các yêu cầu thử nghiệm không được đáp ứng, thì phương pháp đo thay thế có thể được sử dụng là phương pháp đĩa nóng hoặc phương pháp hộp nóng. Số lượng các mảnh mẫu thử được chuẩn bị cần phải nhiều hơn lượng mảnh mẫu thử cần thử nghiệm và được xác định khối lượng trước và sau khi ổn định đến khối lượng không đổi, như yêu cầu trong mục 3.2.2.2.2, nếu có thể.

Từ những khối lượng này sẽ tính toán được phần trăm tổn thất khối lượng. Lượng vật liệu được ổn định được cân sao đủ để tạo ra một (hoặc hai) mẫu thử có khối lượng riêng mong muốn bằng cách sử dụng quy trình được mô tả trong thông số kỹ thuật của vật liệu hoặc nếu không có thông số kỹ thuật, thì chọn phương pháp A hoặc B dưới đây.

Khi biết khối lượng cuối cùng của mẫu thử, thì có thể xác định được khối lượng yêu cầu. Các mẫu thử khi đó được nhanh chóng đặt vào thiết bị hoặc lấy đi để đạt được trạng thái cân bằng trong môi trường phòng thí nghiệm tiêu chuẩn theo hướng dẫn được đưa ra trước đó.

Khi áp dụng phương pháp A, hoặc B, với nắp đậy có nhiệt trở không đáng kể, thì nhiệt độ bề mặt mẫu thử phải được lấy bằng với mức nhiệt độ của bề tấm đĩa nóng và tấm lạnh và đồng hồ đo dòng nhiệt khi tiếp xúc với mẫu thử.

3.2.2.3.1. Phương pháp A

Phương pháp này được đề xuất khi vận hành thiết bị theo phương thẳng đứng. Cài đặt thiết bị đo dòng nhiệt với các khoảng cách giữa hai (hoặc bốn) bề mặt đo lường theo quy định. Những khoảng cách có diện tích mặt cắt ngang nhỏ này phải được làm bằng vật liệu dẫn nhiệt thấp.

Đặt một lớp mỏng vật liệu có độ dẫn điện thấp phù hợp để giữ mẫu xung quanh mép ngoài của đồng hồ đo dòng nhiệt và các tấm sao cho nó tạo thành một (hai) vật chứa (mỗi vật chứa) hở bên trên cùng. Chia vật liệu đã cân, đã được ổn định thành bốn (tám) phần bằng nhau (bốn cho mỗi mẫu thử nghiệm).

TCVN xxxxx:2024

Đặt từng phần vào (mỗi) hai không gian chứa mẫu thử, lắ, đóng i hoặc nén từng phần vào vị trí đến khi nó chiếm một phần tư thể tích phù hợp trong không gian, và cẩn thận tạo ra các mẫu thử có khối lượng riêng đồng đều.

3.2.2.3.2 Phương pháp B

Phương pháp này được đề xuất khi vận hành thiết bị theo phương ngang. Sử dụng một (hai) vật chứa nông bằng vật liệu có độ dẫn điện thấp, mỏng, có kích thước ngoài giống như các thiết bị gia nhiệt. Các mép của vật chứa sẽ có chiều rộng sao cho độ sâu của vật chứa bằng với độ dày của mẫu đã được thử nghiệm. Đặt các miếng đệm có diện tích mặt cắt ngang nhỏ, làm từ vật liệu có độ dẫn điện thấp, với độ dày bằng với độ dày thử nghiệm trong các góc của vật chứa hoặc các vật chứa để đảm bảo rằng không gian giữa các nắp của khung bằng với độ dày thử nghiệm.

Đậy nắp cho các mặt hở của vật chứa sử dụng vật liệu nhựa dạng tấm mỏng với độ dày không quá 50 μm , hoặc các tấm chịu nhiệt và không phản chiếu (giấy amiăng hoặc vật liệu tấm đồng nhất phù hợp khác). Trong từng trường hợp, chúng phải được dán hoặc buộc chặt vào các cạnh của vật chứa. Tổng phát xạ dạng bán cầu của các bề mặt nhìn thấy từ mẫu thử nghiệm phải trên 0.8 hoặc lớn hơn nhiệt độ vận hành. Nếu các nắp đậy nhiệt trở đáng kể thì có thể sử dụng phương pháp xác định độ dẫn nhiệt thực của mẫu thử nghiệm trình bày trong 3.2.2.2 đối với các mẫu thử nghiệm cứng. (Chia vật liệu đã cân và đã được ổn định thành hai phần bằng nhau, mỗi phần cho mỗi mẫu thử nghiệm). Có một nắp, và có vật chứa nằm ngang trên bề mặt phẳng, đặt một phần trong mỗi vật chứa, cẩn thận tạo ra một (hai) mẫu thử nghiệm có khối lượng riêng (bằng nhau) và đồng nhất. Sau đó đặt các nắp còn lại để các mẫu kín có để được đặt vào các vị trí trong thiết bị đo dòng nhiệt.

Làm tơi các vật liệu có thể nén được trong quá trình đặt sao cho các nắp hơi phồng lên mà tiếp xúc tốt với các bề mặt của thiết bị ở mật độ mong muốn.

Đối với một số vật liệu, việc hao hụt vật liệu trong quá trình chuẩn bị mẫu thử nghiệm có thể phải được cân lại trước khi thử nghiệm, và trong trường hợp này, xác định tổng khối lượng của vật chứa và nắp sau khi thử nghiệm để tính toán mật độ của vật liệu như đã thử nghiệm.

3.3 Phương pháp thử nghiệm

3.3.1 Khối lượng

Trước khi đặt mẫu vào thiết bị, xác định khối lượng với độ chính xác trên 0.5%.

3.3.2 Độ dày và khối lượng riêng

Độ dày thử nghiệm và thể tích thử nghiệm (xem chú thích 2 dưới đây) là độ dày được ấn định bằng cách định vị các thiết bị và đồng hồ đo dòng nhiệt hoặc độ dày của các mẫu thử được đo khi bắt đầu thử nghiệm. Độ dày các mẫu có thể được đo như trong 2.2.3.3 hoặc ngoài thiết bị với công cụ tái tạo áp lực lên mẫu thử trong suốt quá trình thử nghiệm. Từ các dữ liệu này và khối lượng mẫu được ổn định được xác định trong mục 3.3.1, ta tính toán được khối lượng riêng thử nghiệm.

Các vật liệu dạng chần hoặc mềm thường được thử nghiệm ở độ dày xác định; các thông số kỹ thuật của vật liệu xác định độ dày này cho nhiều vật liệu nhưng đôi khi kết quả đo lường chỉ là kết quả thông thường, như được chỉ trong mục 3.1. Với một vài vật liệu (ví dụ vật liệu dạng sợi có khối lượng riêng

nhẹ), có thể sẽ chính xác hơn khi đo khối lượng riêng của phần mẫu được giới hạn bởi diện tích đo chứ không phải khối lượng riêng của toàn bộ mảnh mẫu thử nghiệm; điều này đạt được mối tương quan chính xác hơn giữa khối lượng riêng và các đặc tính truyền nhiệt được đo. Độ dày cần được giám sát trong quá trình kiểm tra. Khi sử dụng quy trình trong 2.2.3.1.2.2, độ dày được áp dụng để đánh giá các đặc tính truyền nhiệt sẽ được điều chỉnh sao cho có dung sai phù hợp cho vị trí của cặp nhiệt điện.

CHÚ THÍCH 2. Để tính toán thể tích thử nghiệm, sử dụng các số liệu thu được cho kích thước một chiều của mẫu bằng phương pháp kiểm tra kích thước một chiều được mô tả trong thông số kỹ thuật của vật liệu hoặc phương pháp phù hợp cho ra độ chính xác giống như đối với phép đo độ dày.

3.3.3. Lựa chọn khoảng chênh lệch nhiệt độ

Lựa chọn khoảng chênh lệch nhiệt độ phù hợp với một trong các điều kiện sau:

- Yêu cầu của sản phẩm vật liệu hoặc các thông số kỹ thuật hệ thống.
- Các điều kiện sử dụng đối với mảnh mẫu thử nghiệm cụ thể hoặc mẫu thử được đánh giá. Nếu cho ra khoảng chênh lệch nhiệt độ rất thấp, thì độ chính xác yêu cầu để đánh giá số lượng có thể bị giảm. Nếu sự chênh lệch nhiệt độ lớn, thì không thể dự đoán được sai số, vì các đánh giá theo lý thuyết cho rằng các mẫu có tính dẫn nhiệt không phụ thuộc vào nhiệt độ.
- Ở mức thấp nhất, ví dụ tối thiểu từ 5 K -10 K khi xác định mối quan hệ không rõ ràng giữa nhiệt độ và các đặc tính truyền nhiệt.
- Chênh lệch nhiệt độ thấp nhất so với tính chính xác yêu cầu cho việc đo lường số lượng này, khi truyền đổi khối lượng trong mẫu thử nghiệm giảm đến mức tối thiểu, điều này có thể ám chỉ việc không tuân thủ Tiêu chuẩn này và phải được ghi chú trong báo cáo (xem 3.6.19).

3.3.4 Các điều kiện môi trường

Theo loại thiết bị và nhiệt độ kiểm tra, áp dụng cách điện các cạnh và/hoặc các điều kiện quy định về môi trường xung quanh theo yêu cầu trong 2.2.5,

3.3.5. Đo tốc độ lưu lượng nhiệt và nhiệt độ (Thời gian và các phép đo ổn định)

3.3.5.1 Quan sát nhiệt độ trung bình và đầu ra e_{mf} của đồng hồ lưu lượng nhiệt, nhiệt độ trung bình và nhiệt độ giảm trên các mẫu để kiểm tra xem mẫu thử đã được ổn định chưa.

3.3.5.2. Hệ số $\rho c_s d R$ của mẫu đóng vai trò chính trong việc xác định thời gian cần thiết đối với đầu ra của đồng hồ đo để đạt được trạng thái cân bằng, như trong cấu tạo của thiết bị (xem tài liệu [8]). Khoảng thời gian giữa các lần đọc có thể chỉ cần 1/10 khoảng thời gian quy định ở trên đối với nhiều phép thử. Khuyến nghị các mối tương quan thực nghiệm (xem phụ lục B). Khi không có ước chừng hoặc kinh nghiệm với các mẫu tương tự trong thiết bị tương tự, nguyên tắc trên sẽ được sử dụng. Quan sát ở các khoảng cách bằng với giá trị $\rho c_s d R$ của mẫu thử hoặc 300s, bất kể cái nào lớn hơn, cho đến khi 5 lần quan sát liên tục đạt được giá trị nhiệt trở trong phạm vi 1% mà không thay đổi đơn điệu theo một hướng. d là độ dày mẫu thử nghiệm tính bằng mét và ρc_s là tích của khối lượng riêng của mẫu thử nghiệm và nhiệt dung riêng của mẫu thử, tính bằng joules mét khối Kelvin. Sản phẩm này được ước tính thông qua kiến thức về vật liệu.

TCVN xxxxx:2024

3.3.5.3 Việc theo dõi sự thay đổi của hàm dầu ra của đồng hồ đo dòng nhiệt có thể hữu ích để kiểm tra tính ổn định của trạng thái cân bằng, cụ thể với loại vật liệu không rõ hoặc khi có nghi ngờ về rủi ro tính nhạy cảm đối với độ ẩm môi trường của vật liệu được kiểm tra.

Nếu đầu ra này thay đổi quá 1,5% so với giá trị trung bình, người vận hành cần kiểm tra để tìm nguyên nhân.

3.3.5.4 Sau khi đạt trạng thái cân bằng và sử dụng quy trình trong mục 2.2.3.1.2.2, xác định nhiệt độ hiển thị trên cặp nhiệt điện đặt trong các mặt của mẫu.

3.3.6. Khối lượng cuối cùng và phép đo độ dày

Khi hoàn thành việc quan sát trong mục 3.3.5, ngay lập tức đo khối lượng mẫu thử nghiệm. Trong trường hợp độ dày của mẫu thử nghiệm không được ấn định, thì cần đo như ở thời điểm bắt đầu thử nghiệm. Báo cáo khi có bất kỳ thay đổi nào về thể tích mẫu thử nghiệm.

3.4. Quy trình yêu cầu nhiều phép đo

3.4.1 Quy trình đánh giá tính đồng nhất của mẫu thử

Cách để thử ước lượng sai số do tính không đồng nhất là so sánh kết quả của hai mảnh mẫu thử được chọn từ cùng một mẫu để chúng cho ra kết cấu khác nhau nhiều nhất có thể gần các cạnh của diện tích đo lường. Nếu không thể xác định được hai điểm cực trị, có thể phải thử nghiệm một vài mẫu.

Khi sự thay đổi về cấu trúc xảy ra trong khoảng cách nhỏ, có thể sử dụng các mảnh mẫu đơn lẻ được cắt ra có kích thước lớn hơn kích thước bên của các tấm nóng và tấm lạnh và (các) đồng hồ đo dòng nhiệt.

Mỗi mẫu được thử nghiệm hai lần, mỗi lần thử nghiệm cần đặt mẫu cẩn thận sao cho các cạnh của vùng thử nghiệm tiếp xúc với hai điểm cực của kết cấu. So sánh hai kết quả thử nghiệm này và sai khác được xem là biến dạng.

Trong hai lần thử nghiệm này, phần mẫu nhô ra khỏi thiết bị phải được cách nhiệt tốt. Điều này sẽ làm giảm khả năng phần tiếp xúc gây tổn thất cạnh.

Kích thước và độ dày của mẫu thử có ảnh hưởng đến kích thước các thay đổi trong kết cấu hơn là mức nó có thể chứa được. Diện tích thử nghiệm càng lớn thì ảnh hưởng đến kết quả càng nhỏ. Tác động của sự biến dạng có thể tăng hoặc giảm theo độ dày của mẫu thử.

Khi ngắn mạch nhiệt trực tiếp tồn tại giữa các bề mặt mẫu thử, cách tốt nhất để nhận diện hiệu ứng là phá vỡ các đường dẫn nhiệt, đặc biệt là khi các bề mặt kết nối có thể bị ngắt khỏi phần còn lại của đường dẫn.

Các tấm vật liệu cách nhiệt có thể được sử dụng tại các bề mặt chính để tạo ra sự phá vỡ đó.

Các tấm làm bằng gỗ bần nghiền mịn, hoặc vật liệu tương tự có độ dày từ 0,002 m trở lên, hoạt động tốt. Bề mặt phải được mài phẳng như bề mặt tấm (xem 2.2.1.1).

Rất khó để đánh giá độ chính xác cho các điều kiện thử nghiệm này. Thực tế, không thể đánh giá tính đồng nhất đến mức tương đương với độ chính xác của phương pháp; sự khác biệt được phát hiện sẽ có ý nghĩa vật lý và không chỉ là sai số đo lường.

Do đoạn mạch nhiệt, nên có thể xác định được sự thay đổi rỗng về điện trở nhiệt của mẫu. Nếu lớn hơn 1%, phải thực hiện phép đo khác với các tấm dày hơn.

Cũng có thể đánh giá tác động của biến dạng trường nhiệt thông qua việc sử dụng các phân tích và tính toán. Nên tham chiếu một phương pháp cụ thể hoặc các phương pháp được sử dụng để xác định các tác động này trong báo cáo. Sai số khi đo các đặc tính truyền nhiệt nhỏ hơn 2% có thể được coi là không đáng kể đối với mục đích của tiêu chuẩn này.

3.4.2. Quy trình xác định độ dày tối thiểu để nhận diện tính chất nhiệt của vật liệu

Chọn một mẫu đồng nhất về khối lượng riêng và phân chia mật độ, có chiều dày d_5 bằng chiều dày lớn nhất của vật liệu cần đặc trưng hoặc bằng chiều dày lớn nhất cho phép đối với thiết bị thử nghiệm. Cắt năm bộ mẫu thử từ phạm vi mẫu có độ dày từ bộ nhỏ nhất có khả năng sử dụng trong thực tế theo các bước xấp xỉ bằng nhau. Bộ mẫu thử được ký hiệu từ s_1 đến s_5 theo chiều dày tương ứng là d_1 đến d_5 .

Đối với các vật liệu có khối lượng riêng rất thấp, có thể tồn tại các gradient mật độ do khối lượng của bản thân mẫu thử; kiểm tra tính đồng nhất cũng tham chiếu đến tham số này.

Đối với các vật liệu có khối lượng riêng thấp mà nhiệt được truyền theo cơ chế bức xạ và dẫn nhiệt và khi không có đối lưu đã được xác minh, thì độ dốc của đồ thị nhiệt trở so với độ dày thường giảm từ 1cm đến 2cm và sau đó sẽ không đổi khi độ dày tăng lên. Nghịch đảo của độ dốc không đổi này là độ truyền nhiệt được chỉ định cho các mẫu có độ dày cao.

Đo độ dày và nhiệt trở của s_1 , s_3 , s_5 ở cùng nhiệt độ trung bình và với cùng mức chênh lệch nhiệt độ giữa các mẫu thử. Vẽ sơ đồ nhiệt trở so với độ dày. Nếu ba giá trị này nhỏ hơn $\pm 1\%$ khác với mối tương quan đường thẳng, thì hệ số góc của đường thẳng sẽ được tính toán. Nếu ba giá trị khác hơn 1%, sẽ thực hiện các phép đo tương tự trên s_2 và s_4 để kiểm tra xem có độ dày nào mà ở đó nhiệt trở không chênh lệch quá 1% so với đường thẳng hay không.

Nếu độ dày này tồn tại, thì hệ số góc của đường thẳng sẽ được xác định để tính độ truyền nhiệt $\lambda_t = \Delta d / \Delta R$, là tỷ lệ giữa số gia của độ dày Δd và số gia của nhiệt trở ΔR .

Độ dày xảy ra trong trường hợp này sẽ thay đổi tùy theo mật độ, loại và hình thức của các vật liệu, sản phẩm và hệ thống khác nhau với nhiệt độ trung bình khác nhau.

Sau đó, độ truyền nhiệt sẽ đặc trưng cho vật liệu, sản phẩm hoặc hệ thống có độ dày mà trên đó hệ số truyền nhiệt khác nhau dưới 2% so với λ_t

Cho phép sai số thử nghiệm trong phần giải thích kết quả. Điều chỉnh đường cong bình phương nhỏ nhất của R với d cũng có thể hữu ích. Có thể sử dụng số lượng mẫu thử lớn hơn khi cần độ rõ nét hơn.

Sự phụ thuộc vào độ dày có thể là một hàm của chênh lệch nhiệt độ giữa các mẫu thử. Đối với mục đích của phương pháp này, các thử nghiệm trên, nếu được thực hiện ở các chênh lệch về nhiệt độ vận hành điển hình, phải đủ để chỉ ra mức độ phụ thuộc vào độ dày.

Quy trình xác định sự phụ thuộc vào chênh lệch nhiệt độ

Nếu không biết sự phụ thuộc vào chênh lệch nhiệt độ của các đặc tính truyền nhiệt của vật liệu, thì cần thực hiện tối thiểu ba phép đo. Chúng được tạo ra với sự chênh lệch nhiệt độ rất khác nhau. Phụ thuộc bậc hai có thể được xác định thông qua các phép đo này. Khi một mối quan hệ tuyến tính đơn giản xảy ra, chỉ cần thực hiện hai phép đo, trong đó, một phép đo bổ sung. Điều này thiết lập sự phụ thuộc tuyến tính cho mẫu cụ thể đó.

3.5 Tính toán

3.5.1 Thay đổi khối lượng riêng và khối lượng

3.5.1.1 Khối lượng riêng

Tính khối lượng riêng ρ_d và/hoặc ρ_s của mẫu có điều kiện như đã thử nghiệm như sau:

$$\rho_d = M_2/V$$

$$\rho_s = M_3/V$$

Trong đó:

- ρ_d là khối lượng riêng của vật liệu khô khi thử nghiệm, tính bằng kilôgam trên mét khối;
- ρ_s là khối lượng riêng của vật liệu sau một quy trình điều hòa phức tạp hơn (thường đạt đến trạng thái cân bằng với môi trường tiêu chuẩn trong phòng thí nghiệm), tính bằng kilôgam trên mét khối;
- M_2 là khối lượng vật liệu sau khi sấy, tính bằng kilôgam;
- M_3 là khối lượng của vật liệu sau quy trình ổn định phức tạp hơn, tính bằng kilôgam;
- V là thể tích chiếm chỗ của vật liệu sau khi sấy khô hoặc sau khi ổn định, tính bằng mét khối.

3.5.1.2 Sự thay đổi khối lượng

Tính toán sự thay đổi khối lượng tương đối của vật liệu nhận được sau khi sấy khô (m_r) hoặc sau quá trình điều chỉnh nhiệt độ phức tạp (m_c).

$$m_r = (M_1 - M_2)/M_2$$

$$m_c = (M_1 - M_3)/M_3$$

Trong đó

- M_1 là khối lượng của vật liệu ở điều kiện khi nhận, tính bằng kilôgam
- M_2 và M_3 được định nghĩa trong 3.5.1.1.

Nếu được yêu cầu bởi tiêu chuẩn kỹ thuật hoặc được xem là hữu ích để đánh giá các điều kiện thử nghiệm một cách chính xác, cộng thay đổi khối lượng tương đối (m_d) sau vào m_c do được ổn định sau khi sấy khô:

$$m_d = (M_3 - M_2)/M_2$$

Tính toán độ tăng khối lượng tương đối, m_w , của các mẫu trong quá trình thử nghiệm theo công thức:

$$m_w = (M_4 - M_5)/M_5$$

Trong đó

- M_4 là khối lượng của vật liệu trong mẫu ngay sau khi thử nghiệm, tính bằng kilôgam
- M_5 là khối lượng của vật liệu đã được làm khô hoặc được làm khô trong mẫu ngay trước khi thử nghiệm, tính bằng kilôgam.

3.5.2. Đặc tính truyền nhiệt

Để thực hiện tất cả các phép tính, sử dụng các giá trị trung bình của dữ liệu trạng thái ổn định được quan sát. Năm phép đo được mô tả trong mục 3.3.5 sẽ được sử dụng làm dữ liệu trong các tính toán này. Có thể sử dụng các phép đo bổ sung miễn là chúng không sai khác quá 1% so với bất kỳ phép đo nào trong số năm phép đo còn lại.

3.5.2.1. Cấu hình mẫu thử đơn

3.5.2.1.1. Cấu hình đồng hồ đo dòng nhiệt đơn

Tính toán nhiệt trở R của mẫu thử bằng công thức sau:

$$R = \frac{\Delta T}{f e}$$

Trong đó

- f Là hệ số tính toán của đồng hồ đo dòng nhiệt, tính bằng oát trên milivôn trên mét vuông
- e Giá trị đầu ra của đồng hồ đo dòng nhiệt, tính bằng milivôn

Nếu có thể áp dụng (xem 1.8.2 và 1.8.3), tính toán độ dẫn nhiệt λ hoặc nhiệt trở suất r từ phương trình sau:

$$\lambda = \frac{1}{r} = f e \frac{d}{\Delta T}$$

Trong đó: d là độ dày trung bình của mẫu thử

3.5.2.1.2. Cấu hình đồng hồ đo dòng nhiệt sử dụng hai mẫu thử

Tất cả các yêu cầu trong 3.5.2.1.1 đều có thể áp dụng cho cấu hình này, với $f e$ được thay thế bằng $0,5(f_1 e_1 + f_2 e_2)$ trong đó các chỉ số 1 và 2 lần lượt là đồng hồ đo dòng nhiệt một và đồng hồ đo dòng nhiệt hai (trong đó nhiệt độ bề mặt tương ứng là T_1 và T_2).

3.5.2.2. Cấu hình mẫu thử đôi

Tính nhiệt trở tổng R_t bằng công thức sau:

$$R_t = \frac{1}{f e} (\Delta T' + \Delta T'')$$

Và, nếu áp dụng như trong 3.5.2.1, độ dẫn nhiệt trung bình λ_{avg} hoặc nhiệt trở suất r_{avg} được tính như sau:

$$\lambda_{avg} = \frac{1}{r_{avg}} = \frac{f e}{2} \left(\frac{d'}{\Delta T'} + \frac{d''}{\Delta T''} \right)$$

trong đó các thông số giống như trên và các chỉ số dưới đề cập đến hai mẫu thử (' đại diện cho mẫu thử thứ nhất và " đại diện cho mẫu thử thứ hai).

3.6 Báo cáo kết quả thử nghiệm

Nếu kết quả được báo cáo là thu được bằng phương pháp này thì phải đáp ứng tất cả các yêu cầu thích hợp. Khi không đáp ứng được các điều kiện đó, cần bổ sung thông tin là báo cáo tuân thủ theo yêu cầu trong 3.6.19.

Báo cáo kết quả của mỗi lần thử nghiệm phải bao gồm các nội dung sau (các giá trị số phải thể hiện giá trị trung bình đối với hai mẫu được khi thử nghiệm hoặc giá trị của một mẫu thử đối với thiết bị mẫu thử đơn).

3.6.1. Tên và bất kỳ nhận dạng thích hợp nào khác của vật liệu, bao gồm cả mô tả vật lý do nhà sản xuất cung cấp.

3.6.2. Mô tả mẫu thử và mối tương quan với mẫu, do người vận hành cung cấp. Sự phù hợp với một đặc điểm kỹ thuật vật liệu nếu có. Phương pháp chuẩn bị mẫu thử cho vật liệu rời với chỉ dẫn về nhiệt trở đo được của vật liệu che phủ sử dụng cho vật chứa.

TCVN xxxxx:2024

3.6.3. Độ dày của (các) mẫu thử nghiệm được biểu thị bằng mét (m). Trong cấu hình mẫu thử đôi, đây sẽ là tổng độ dày của hai mẫu. Chỉ rõ độ dày được chỉ định hay đo được. Tiêu chí để xác định độ dày chỉ định.

3.6.4. Phương pháp và nhiệt độ ổn định mẫu

3.6.5. Khối lượng riêng (các) mẫu thử được ổn định khi thử nghiệm

3.6.6. Khối lượng tương đối thay đổi trong quá trình làm khô và/hoặc ổn định (xem mục 3.5.1.2)

3.6.7. Thay đổi khối lượng tương đối trong quá trình thử nghiệm (xem mục 3.5.1.2). Quan sát thay đổi về độ dày và thể tích trong quá trình thử nghiệm (xem mục 3.3.6).

3.6.8. Chênh lệch nhiệt độ trung bình giữa (các) mẫu trong quá trình thử nghiệm được tính toán từ nhiệt độ của bề mặt nóng và bề mặt lạnh và các quy trình để xác định (xem mục 3.3.5).

3.6.9. Nhiệt độ trung bình của thử nghiệm, kelvins hoặc độ C.

3.6.10. Mật độ tốc độ dòng nhiệt qua mẫu ở trạng thái cân bằng, tính bằng watt (w) trên mét vuông (m^2) (xem mục 3.3.5).

3.6.11. Nhiệt trở của (các) mẫu thử, được tính bằng mét vuông kelvin trên watt. Nếu có, điện trở suất, tính bằng mét kelvin trên watt, độ dẫn nhiệt, tính bằng watt trên mét kelvin và phạm vi độ dày mà các giá trị này đã được đo hoặc được biết để áp dụng.

3.6.12. Loại thiết bị đo dòng nhiệt được sử dụng, với một hoặc hai mẫu. Phương pháp giảm tổn thất nhiệt ở cạnh và nhiệt độ môi trường xung quanh các tấm trong quá trình thử nghiệm. Số lượng và vị trí của (các) đồng hồ đo dòng nhiệt.

3.6.13. Hướng của thiết bị: dọc, ngang hoặc hướng khác. Đối với thiết bị mẫu thử đơn, vị trí mặt nóng của mẫu thử khi không theo phương thẳng đứng gồm: trên, dưới hoặc hướng khác.

3.6.14. Đối với các thử nghiệm sử dụng vật liệu dạng tấm xen kẽ giữa mẫu thử và bề mặt thiết bị hoặc đối với các thử nghiệm sử dụng túi kín hơi nước, cần cung cấp thông tin về bản chất và độ dày của vật liệu dạng tấm hoặc của dạng túi. Nếu sử dụng các cảm biến nhiệt độ để xác định chênh lệch nhiệt độ trong mẫu thử, cần cung cấp thông tin về giải pháp được thông qua.

3.6.15. Ngày thử nghiệm, ngày hiệu chuẩn đồng hồ đo nhiệt lần cuối và loại hoặc các loại vật liệu được sử dụng

3.6.16. Thời gian cho một phép thử đầy đủ và cho phần trạng thái ổn định của phép thử nếu thông tin này có thể giúp giải thích kết quả.

3.6.17. Các mẫu thử được sử dụng trong hiệu chuẩn phải được xác định về loại, độ bền nhiệt, ngày chứng nhận mẫu, nguồn chứng nhận, ngày hiệu chuẩn hết hạn và số giấy chứng nhận thử nghiệm.

3.6.18. Ước tính sai số: khuyến nghị cần có một bản thuyết minh về dự kiến sai số tối đa của đặc tính được đo trong báo cáo; khi một hoặc nhiều yêu cầu trong tiêu chuẩn này không được đáp ứng (xem mục 3.6.19), nên đưa vào một báo cáo hoàn chỉnh về ước lượng sai số hoặc sai số của đặc tính được đo.

3.6.19. Thuyết minh tuân thủ: trong trường hợp hoặc các yêu cầu ngăn cản việc tuân thủ hoàn toàn quy trình thử nghiệm như mô tả trong tiêu chuẩn này, có thể đưa ra các trường hợp ngoại lệ đã được thống nhất nhưng phải được giải thích cụ thể trong các báo cáo. Đề xuất sử dụng câu như sau: "Thử

nghiệm này đáp ứng toàn bộ yêu cầu về Phương pháp thử nghiệm tiêu chuẩn – TCVN xxxx (ISO 8301), ngoại trừ... (đính kèm một danh sách đầy đủ các ngoại lệ).”

Đối với thiết bị đọc trực tiếp, phải bao gồm kết quả hiệu chuẩn mạch điện tử và thiết bị hoặc thuyết minh tuân thủ gồm ngày, tháng và một thuyết minh tuân thủ các yêu cầu về tuyến tính.

Phụ lục A

(Quy định)

Các giá trị giới hạn đối với hiệu suất thiết bị và điều kiện thử nghiệm

Điều	Mô tả	Giá trị
1.1.1	Nhiệt trở tối thiểu có thể đo được trong thiết bị đo dòng nhiệt (HFM)	0,1 m ² .K/W
1.5.3.1	Độ tái lập dự kiến với mẫu được thử trong thiết bị	Nhỏ hơn 1%
1.5.3.1	Khả năng lặp lại dự kiến với mẫu được tháo ra và đo lại sau khoảng thời gian dài	Nhỏ hơn ±1%
1.5.3.2	Độ chính xác dự kiến của việc hiệu chuẩn phương pháp HFM (khi nhiệt độ trung bình của phép thử gần với nhiệt độ phòng)	±2%
1.5.3.3	Độ chính xác dự kiến của phương pháp HFM (khi nhiệt độ trung bình của phép thử gần với nhiệt độ phòng)	±3%
1.5.4.1	Đề xuất thời hạn kiểm tra độ ổn định của chuẩn hiệu chuẩn	5 năm
1.5.4.2	Khoảng thời gian hiệu chuẩn được đề xuất cho phương pháp HFM	Trước 24h hoặc sau khi kiểm tra
1.5.4.2	Khoảng thời gian hiệu chuẩn nếu độ ổn định ngắn hạn và dài hạn của HFM đã được chứng minh là lớn hơn ± 1 %	15 đến 30 ngày
1.5.4.2	Giới hạn trên chấp nhận được về độ ổn định hiệu chuẩn	± 1%
1.8.2	Giới hạn kích thước trên có thể chấp nhận được của bất kỳ sự không đồng nhất nào của mẫu thử	$\frac{1}{10}d$
1.8.3.1	Giới hạn trên có thể chấp nhận đối với hệ số truyền nhiệt thay đổi theo độ dày để ấn định độ dẫn nhiệt hoặc độ truyền nhiệt cho vật liệu	2%
2.2; 2.3.5	Phát xạ bán cầu nhiệt tối thiểu cho bất kỳ bề mặt nào tiếp xúc với mẫu thử	0,8
2.2.1.1	Khoảng cách tối đa từ một mặt phẳng của bề mặt làm việc của tấm nóng và tấm lạnh	0,025%
2.2.1.2	Độ đồng đều nhiệt độ cần thiết của bộ gia nhiệt liên quan đến chênh lệch nhiệt độ trên mẫu thử	1%
2.2.1.2	Sai số tối đa về tốc độ dòng nhiệt đo được khi HFM được đặt tiếp xúc với bề mặt làm việc của bộ phận gia nhiệt hoặc bộ phận làm mát	0,5%
2.2.1.2	Sự ổn định cần thiết của nhiệt độ bề mặt làm việc của các bộ phận làm mát và bộ phận gia nhiệt trong suốt thời gian thử nghiệm, liên quan đến sự chênh lệch nhiệt độ giữa các mẫu thử	0,5%
2.2.1.2	Độ ổn định cần thiết của bề mặt HFM tiếp xúc với mẫu liên quan đến chênh lệch nhiệt độ trên mẫu	Nhỏ hơn 0,5%
2.2.1.2	Dao động tối đa điện đầu ra cho phép của HFM liên quan đến dao	2%

	động nhiệt độ trên bề mặt của HFM	
2.2.2.3	Đường kính tối đa được đề xuất cho diện tích mặt cắt ngang của dây dẫn trong pin nhiệt điện	0,2mm
2.2.2.3	Đầu ra HFM tối thiểu mà không cần sử dụng các kỹ thuật đặc biệt để ngăn e_{mfs} nhiệt ngoại lai trong dây dẫn, mạch đo và trong HFM	0,0002V
2.2.2.3	Tỷ lệ cần thiết giữa diện tích đo và tổng diện tích bề mặt của HFM	$10\% \leq A \leq 40\%$
2.2.2.4	Khoảng cách tối đa từ mặt phẳng của khu vực đo của HFM	0,025%
2.2.2.5	Độ dày gợi ý của lá kim loại hoặc phi kim loại được sử dụng để bao phủ khu vực đo	80 μ m
2.2.2.5	Đường kính đề xuất cho cặp nhiệt điện được sử dụng làm cảm biến nhiệt độ bề mặt của HFM	0,2mm
2.2.3.1.1	Độ chính xác cần thiết trong phép đo chênh lệch nhiệt độ giữa các bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát khi tiếp xúc với mẫu thử	1%
2.2.3.1.1	Số lượng cảm biến nhiệt độ tối thiểu ở mỗi bên của bề mặt làm việc của bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát	1
2.2.3.1.1	Điện trở tối thiểu của lớp cách điện giữa cặp nhiệt điện và tấm kim loại của thiết bị	1M Ω
2.2.3.1.2.1	Khả năng chịu nhiệt tối thiểu đối với các mẫu không cứng để sử dụng các cảm biến nhiệt độ được gắn cố định trên bề mặt làm việc của các bộ phận làm mát và bộ phận gia nhiệt	0,5 m ² .K/W
2.2.3.1.3	Đường kính cặp nhiệt điện tối đa khi được gắn trên bề mặt của các tấm để đo chênh lệch nhiệt độ giữa các bộ phận gia nhiệt và bộ phận làm mát	0,6mm
2.2.3.1.3	Đường kính cặp nhiệt điện tối đa được đề xuất khi được gắn như trên trên bề mặt của thiết bị kích thước nhỏ	0,2mm
2.2.3.1.3	Đường kính cặp nhiệt điện tối đa được đề xuất khi đặt trên hoặc đặt vào bề mặt của mẫu thử	0,2mm
2.2.3.1.3	Sai số kết quả tối đa trong các phép đo chênh lệch nhiệt độ do biến dạng của tốc độ dòng nhiệt xung quanh cảm biến, hoặc do độ lệch của cảm biến, v.v.	Nhỏ hơn 1%
2.2.3.2.2	Độ chính xác cần thiết của các phép đo điện về chênh lệch nhiệt độ giữa (các) mẫu thử	$\pm 0,5\%$
2.2.3.2.2	Độ chính xác cần thiết của các phép đo điện của đầu ra từ HFM	$\pm 0,6\%$
2.2.3.3	Độ chính xác cần thiết trong phép đo độ dày mẫu thử	0,5%
2.2.4.2	Áp suất thiết bị đề xuất tối đa trên mẫu đối với hầu hết các vật liệu cách nhiệt	2,5kPa
2.2.5.1	Chênh lệch yêu cầu tối thiểu giữa điểm đọng sương của không khí và nhiệt độ thiết bị làm mát	2K

TCVN xxxxx:2024

3.2.1	Chênh lệch độ dày tối đa cho hai mẫu thử được sử dụng trong thiết bị đa mẫu	2%
3.2.2.2.1	Độ lệch tối đa của các mặt phẳng song song đối với bề mặt mẫu thử, liên quan đến độ dày của mẫu	2%
3.2.2.2.1	Nhiệt trở tối đa đối với các mẫu cứng để đo chênh lệch nhiệt độ giữa các mẫu với tấm mỏng hoặc cảm biến nhiệt độ gắn trên mẫu	0,1m ² K/W
3.2.2.2.1	Nhiệt trở tối đa của các tấm xen kẽ đối với nhiệt trở của mẫu thử	0,1
3.2.2.2.1	Số lượng cặp nhiệt điện tối thiểu trên mỗi mặt của mẫu thử (tùy theo tiêu chí nào lớn hơn trong hai tiêu chí).	10√A hoặc 2
3.2.2.3	Tỷ lệ đề xuất tối thiểu giữa độ dày mẫu thử và kích thước trung bình của hạt, mảnh, v.v.	10
3.2.2.3.2	Độ dày tối đa cho tấm nhựa trong phương pháp B đối với vật liệu độn	50μm
3.2.2.3.2	Tổng phát xạ bán cầu của các bề mặt nhìn thấy từ mẫu thử ở nhiệt độ thử nghiệm	0,8 hoặc lớn hơn
3.3.1	Độ chính xác cần thiết trong việc xác định khối lượng mẫu thử	0,5%
3.3.3	Giới hạn dưới đối với chênh lệch nhiệt độ trên mẫu thử khi xác định mối quan hệ chưa biết giữa nhiệt độ và đặc tính truyền nhiệt	5K
3.3.3	Giới hạn trên được khuyến nghị đối với chênh lệch nhiệt độ giữa các mẫu thử như trên	10K
3.3.5.2	Thay đổi nhiệt trở tối đa trong năm lần quan sát liên tiếp để đạt được trạng thái ổn định	1%
3.3.5.3	Hàm biến thiên thời gian trên có thể chấp nhận được của đầu ra HFM đối với giá trị trung bình của nó	1,5%
3.4.1	Thay đổi nhiệt trở trong các mẫu có ngăn mạch yêu cầu đo bằng các tấm dày hơn	1%
3.4.1	Chênh lệch tối thiểu về các đặc tính đo được để coi mẫu thử là không đồng nhất	2%
3.4.2	Chênh lệch tối đa có thể chấp nhận được từ mối quan hệ tuyến tính giữa độ dày và nhiệt trở để tính toán độ dốc của đường nội suy	1%
3.4.2	Chênh lệch tối đa đối với hệ số chuyển đổi ở các độ dày khác nhau được coi là hệ số truyền nhiệt	2%

Phụ lục B

(Tham khảo)

Bộ phận đo dòng nhiệt

B.1 Phương trình đo dòng nhiệt (xem tài liệu [20])

Hầu hết các máy đo dòng nhiệt kiểu gradient sử dụng một pin nhiệt điện để đo chênh lệch nhiệt độ trên vật liệu lõi.

Bắt đầu từ nhiệt độ trung bình được ấn định T_0 , cả độ dẫn nhiệt $\lambda_t(T_0)$ của vật liệu lõi và công suất nhiệt điện $e(T)$ của pin nhiệt điện đều có thể được biểu thị thông qua phép khai triển chuỗi công suất.

Sau khi tính toán, hệ số hiệu chuẩn $f(T)$ có thể được biểu thị thông qua khai triển chuỗi lũy thừa dư thừa dạng hàm đạo hàm nhiệt độ của độ dẫn nhiệt của vật liệu lõi và đầu ra e_{mf} . Cũng có tính đến việc nén cơ học của đồng hồ đo dòng nhiệt, cuối cùng chúng ta có thể viết.

$$f(T) = \frac{\lambda_{fu}(T_0)}{d_u e n} x \left\{ 1 + (1 + \alpha) \frac{p}{E} + \left[\frac{\ddot{\lambda}_f(T)}{\lambda_f(T_0)} - \frac{\ddot{e}}{e} \right] \frac{\Delta\theta^2}{3!} + \dots \right\}$$

Trong đó

$\lambda_{fu}(T_0)$	là số hạng đầu tiên của dãy biểu thị độ dẫn nhiệt của vật liệu lõi không tải;
$\ddot{\lambda}_f(T)$	là đạo hàm bậc hai của nhiệt độ được sử dụng trong cùng một chuỗi;
e và \ddot{e}	là các đạo hàm bậc một và bậc hai nhiệt độ được sử dụng trong chuỗi các điện áp đầu ra điểm nối của pin nhiệt điện
d_u	là độ dày của đồng hồ đo dòng nhiệt không tải;
n	
$\Delta\theta$	là số mối nối của pin nhiệt điện;
p	là sự khác biệt giữa nhiệt độ của một đường giao nhau và nhiệt trung bình
E	lưu lượng kế nhiệt độ;
α	là áp suất khi đồng hồ đo dòng nhiệt được tải:

p/E Thường có thể được coi là bằng 0 trong điều kiện hoạt động bình thường nếu vật liệu lõi là vật liệu cứng.

Biểu thức của f vừa được giới thiệu cùng với kiến thức về giá trị thực tế của tất cả các tham số có thể hỗ trợ thiết kế đồng hồ đo dòng nhiệt mới và xác định phạm vi hoạt động của nó trong phạm vi sai số đã nêu. Giá trị của $\ddot{e}\Delta\theta^2/e3!$ thường nhỏ hơn 0,001 và thường nhỏ hơn 0,0001, ngay cả khi $\Delta\theta^2$ lớn tới 5 K (chênh lệch nhiệt độ giữa các pin nhiệt điện là 10 K).

Số hạng $\ddot{\lambda}_f(T)\Delta\theta^2/3!\lambda_f(T_0)$ thường nhỏ hơn 0,01 và nhỏ hơn 0,001 khi với $\Delta\theta$ lớn bằng 10 K. Hầu hết của các thuật ngữ trong biểu thức của f phụ thuộc vào nhiệt độ. Trong hiệu chuẩn thiết bị đo dòng nhiệt khi nhiệt độ trung bình của các phép đo sẽ bị thay đổi, điều này có thể dẫn đến sự thay đổi của hệ số f nhưng nó có thể được sử dụng trên một khoảng tốc độ dòng nhiệt, nghĩa là chênh lệch nhiệt độ

rất khác nhau mà không cần thiết hiệu chuẩn chống chênh lệch nhiệt độ. Tuy nhiên, tốt nhất là nên xác định điểm mà tại đó chênh lệch nhiệt độ ảnh hưởng đến kết quả (xem 2.4.5 và 2.5.3).

B.2 Đáp ứng của đồng hồ đo dòng nhiệt

Đồng hồ đo dòng nhiệt kiểu gradient có khả năng chịu nhiệt cao phù hợp với cấu hình đơn mẫu. Có hoặc không có tấm giảm chấn, điều này sẽ duy trì tương đối gần với nhiệt độ của thiết bị liền kề. Khi các mẫu thử được ổn định ở nhiệt độ thử nghiệm trung bình, khi nhiệt độ của các thiết bị được kiểm soát và khi các thiết bị có khả năng làm nóng và làm mát mẫu thử, tín hiệu sẽ được đáp ứng nhanh chóng.

Độ giảm nhiệt độ trên máy đo nhiệt trở cao có thể lớn hơn mong muốn, nghĩa là 1 % tổng số, khi được sử dụng trong cấu hình hai mẫu thử.

Đồng hồ đo dòng nhiệt loại gradient, nhiệt trở thấp phù hợp hơn với cấu hình hai mẫu. Nhiệt độ giảm trên máy đo nhiệt trở thấp đủ nhỏ để hai mẫu có thể được coi là một nửa của một mẫu. Khi các mẫu thử lần đầu tiên được ổn định ở nhiệt độ trung bình của phép thử và khi các mẫu giống hệt nhau, thì tín hiệu đáp ứng nhanh ở mức hợp lý, đủ nhanh để sử dụng cho công việc kiểm soát chất lượng; xem[2]. Khi có thể sử dụng độ dày bằng một nửa mẫu bình thường, tín hiệu thu được có thể nhanh như thiết bị thử mẫu đơn. Việc sử dụng máy đo nhiệt trở thấp trong cấu hình một mẫu là lý tưởng nếu thiết bị U' [hình1a)] có thể cung cấp cả nhiệt làm nóng và làm mát, nhưng trừ khi nhiệt độ của U' được kiểm soát cực kỳ tốt, lớp giảm chấn sẽ được cần thiết giữa HFM và tấm thử. HFM có thể được gắn cố định trong cấu hình này.

Trong cùng hình 1a), nếu thiết bị U' chỉ được cung cấp một thiết bị gia nhiệt như trong thiết bị kép, điều này sẽ dẫn đến tín hiệu kém hơn nhiều, đặc biệt khi mẫu thử lần đầu tiên được ổn định ở nhiệt độ cao hơn nhiệt độ cuối cùng của bộ phận gia nhiệt.

Đối với một đồng hồ đo dòng nhiệt cụ thể, cấu hình thử nghiệm có đáp ứng nhanh nhất, thời gian ổn định ngắn nhất, được xác định tốt nhất bằng thực nghiệm. Một số mẫu thử được lấy từ các loại vật liệu cách nhiệt rất khác nhau - chẳng hạn như nhựa xốp có độ dẫn nhiệt thấp, cao su xốp, bông khoáng có mật độ khác nhau, bột cách nhiệt siêu mịn, v.v. để đáp ứng nhiều khả năng chịu nhiệt khác nhau, mỗi mẫu đều được điều chỉnh ở nhiệt độ thử nghiệm trung bình - nên được thử nghiệm trong từng cấu hình. Do đó, có thể xác định số lượng tương đương thời gian cài đặt khác nhau cho mỗi cấu hình. Việc nghiên cứu những nội dung này sẽ cho phép lựa chọn cấu hình phù hợp cho từng loại vật liệu hoặc lựa chọn cấu hình hợp lý cho tất cả các loại vật liệu.

Để dự đoán thời gian ổn định cho tất cả các loại mẫu thử, từng mẫu trong số các mẫu trên phải được kiểm tra lại sau khi được ổn định ở nhiệt độ thấp hơn và cao hơn nhiệt độ trung bình của phép thử và kết quả tương quan với hệ số được mô tả trong 3.3.5.

Phụ lục C

(Tham khảo)

Hướng dẫn ước tính độ dày tối đa của mẫu thử trong thiết bị đo dòng nhiệt

Vì hiện tại không có phân tích nào có thể áp dụng cho tất cả các thiết bị đo dòng nhiệt, nên khi cấu trúc chung của đồng hồ đo dòng nhiệt tương tự như cấu trúc của thiết bị tẩm nóng được bảo vệ (ví dụ với các mặt kim loại ở hai phần, phần giữa và phần bảo vệ), sử dụng Phụ lục C, trong TCVN xxxxx (ISO 8302), để đánh giá độ dày tối đa của (các) mẫu thử.

Phụ lục D

(Tham khảo)

Cặp nhiệt điện

D.1 Các loại cặp nhiệt điện như sau:

- Loại B: platinum-30 % rhodium (+) so với platinum-6 % rhodium (-)
- Loại E: niken-10% crôm (+) so với hợp kim constantan (-)
- Loại J: Sắt (+)so với hợp kim constantan (-)
- Loại K: niken-10 % crom (+) so với niken-5 % (nhôm, silic) (-) (Chú thích 1 trong Bảng D1)
- Loại R: bạch kim-13 % rhodium (+) so với bạch kim (-)
- Loại S: platinum-10 % rhodium (+) so với platinum (-)
- Loại T: đồng (+) so với hợp kim constantan (-)

D.2 Giới hạn sai số đối với cặp nhiệt điện được nêu trong bảng D.1.

Giới hạn sai số áp dụng cho dây cặp nhiệt điện mới, thông thường có kích thước trong khoảng đường kính từ 0,25 mm đến 3 mm (Kích cỡ Awg số 30 đến số 8) và được sử dụng ở nhiệt độ không vượt quá giới hạn đưa ra trong bảng D.2. Nếu được sử dụng ở nhiệt độ cao hơn, các giới hạn sai số này có thể không áp dụng.

Các giới hạn sai số áp dụng cho các dây mới khi được giao cho người dùng và không cho phép sai lệch hiệu chuẩn trong quá trình sử dụng. Mức độ của những thay đổi đó phụ thuộc vào các yếu tố như kích thước dây, nhiệt độ, thời gian tiếp xúc và môi trường.

Khi giới hạn sai số được đưa ra theo tỷ lệ phần trăm, tỷ lệ phần trăm áp dụng cho nhiệt độ được đo khi được biểu thị bằng độ C.

D.3 Các giới hạn nhiệt độ trên khuyến nghị đối với các cặp nhiệt điện và cỡ dây khác nhau được nêu trong bảng D.2. Các giới hạn này áp dụng cho cặp nhiệt điện được bảo vệ, nghĩa là cặp nhiệt điện trong ống bảo vệ đầu kín thông thường. Các giới hạn này không áp dụng cho cặp nhiệt điện có vỏ bọc cách điện oxit khoáng được nén chặt. Có thể sử dụng cặp nhiệt điện có vỏ bọc được thiết kế và ứng dụng phù hợp ở nhiệt độ trên nhiệt độ nêu trong bảng D.1 và bảng D.2.

Bảng D.1 – Giới hạn sai số của cảm biến nhiệt độ

Kiểu cảm biến nhiệt độ	Khoảng nhiệt độ °C	Giới hạn sai số - tham chiếu 0°C	
		Tiêu chuẩn (lựa chọn giá trị lớn hơn)	Đặc biệt (lựa chọn giá trị lớn hơn)
T	0 đến 350	± 1°C hoặc ± 0,75%	± 0,5°C hoặc ± 0,4%
J	0 đến 750	± 2,2°C hoặc ± 0,75%	± 1,1°C hoặc ± 0,4%
E	0 đến 900	± 1,7°C hoặc ± 0,5%	± 1°C hoặc ± 0,4%
K	0 đến 1250	± 2,2°C hoặc ± 0,75%	± 1,1°C hoặc ± 0,4%
R hoặc S	0 đến 1450	± 1,5°C hoặc ± 0,25%	± 0,6°C hoặc ± 0,1%
B	800 đến 1700	± 0,5%	-
T ¹⁾	-200 đến 0	± 1°C hoặc ± 1,5%	-
E ¹⁾	-200 đến 0	± 1,7°C hoặc ± 1%	-
K ¹⁾	-200 đến 0	± 2,2°C hoặc ± 2%	-

1) Cặp nhiệt điện và vật liệu của cặp nhiệt điện thường được thay thế để đáp ứng các giới hạn sai số được chỉ định trong bảng đối với nhiệt độ trên 0°C. Tuy nhiên, các vật liệu tương tự có thể không nằm trong giới hạn sai số dưới 0 được đưa ra trong phần thứ hai của bảng. Nếu vật liệu được yêu cầu phải đáp ứng các giới hạn dưới 0, phải ghi rõ thông tin. Lựa chọn vật liệu thường sẽ được yêu cầu.

Có rất ít thông tin cho việc thiết lập các giới hạn sai số đặc biệt đối với nhiệt độ dưới 0 độ. Các giới hạn sau đối với cặp nhiệt điện loại E và T:

- Kiểu E: - 200°C đến 0°C: ±1°C hoặc ±0,5 % (chọn giá trị lớn hơn)

- Kiểu T: - 200°C đến 0°C: ± 0,5°C hoặc ±0,8 % (chọn giá trị lớn hơn)

Các giới hạn này chỉ được đưa ra như một hướng dẫn để thảo luận giữa người mua và nhà cung cấp.

Do các đặc tính của vật liệu, giới hạn sai số dưới 0 đối với cặp nhiệt điện loại J và giới hạn dưới 0 đặc biệt đối với cặp nhiệt điện loại K không được liệt kê.

Bảng D.2 - Giới hạn nhiệt độ trên được đề xuất cho cặp nhiệt điện được bảo vệ

Kiểu cảm biến	Giới hạn nhiệt độ lớn nhất đối với các loại dây có kích thước khác nhau					
	3,25mm	1,63mm	0,81mm	0,51mm	0,33mm	0,25mm
T		370	260	200	200	150
J	760	590	480	370	370	320
E	870	650	540	430	430	370
K	1260	1090	980	870	870	760
R hoặc S				1480		
B				1700		

Phụ lục E
(Tham khảo)

Thư mục tài liệu tham khảo

- [1] GILBO, CF., Conductimeters, Their Construction and Use, ASTM Bulletin No. 212, February 1956, (TP56) p. 68.
- [2] LANG, D.L., A Quick Thermal Conductivity Test on Insulating Materials, ASTM Bulletin No. 216, September 1956.
- [S] PELANNE, C.M. and BRADLEY, C.B., A Rapid Heat Meter Thermal-Conductivity Apparatus, Materials Research and Standards, Vol. 2, No. 7, July 1962, p. 549.
- [4] ZABAWSKY, Z., Construction and Calibration of a Heat Flow Meter for Thermal Conductivity Measurements, Paper No. 68-520, ISA.
- [5] FOURNIER, D., ANDRE, G. and KLARSFELD, S., Études récentes sur la conductivité thermique des isolants fibreux effectuées à l'aide d'un appareil de mesure rapide de la conductivité thermique en régime permanent, Commission 2 de l'I.I.F., Supplément au Bulletin de l'Institut International du Froid, Annexe 1966-2, pp. 163-174.
- [6] HOLLINGSWORTH, M., Jr., An Apparatus for Thermal Conductivity at Cryogenic Temperatures Using a Heat Flow Meter, Symposium on Thermal Conductivity Measurements of Insulating Materials at Cryogenic Temperatures, ASTM STP 411, 1967, p. 43.
- [7] KINZER, G.R. and PELANNE, CM., A Cryogenic Heat-Flow-Meter Apparatus, *ibid.* p. 1 10.
- [8] SHIRTLIFFE, C.J., Establishing Steady-State Thermal Conditions in Flat Slab Specimens, Heat Transmission Measurement in Thermal Insulations, ASTM STP 544, 1974, p 13.
- [9] DE PONTE, F. and DI FILIPPO, P., Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus, Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544, 1974, p 97.
- [10] MARÉCHAL, J.C., Métrologie et Conductivité Thermique, Matériaux et Constructions, Janvier-Février 1974, No. 37, pp. 61-65.
- [11] CLULOW, A. and REES, W.H., The Transmission of Heat through Textile Fabrics, Part III, A New Thermal Transmission Apparatus, Journal of the Textile Institute, 1968, pp. 286-294.
- [12] TYE, R.P., Thermal Conductivity, Vols. I and II, Academic Press, London and N. Y., 1969.
- [13] BAINES, D.J., A Comparative Theoretical Evaluation of Five Commonly Used Types of Unsteady Heat Flux Sensor, Report HSA (prior to 1970), Dept. of Supply, Australian Defence Scientific Service, Weapons Research Establishment, Box 1424H, G.P.O., Adelaide, South Australia.
- [14] DE PONTE, F. and DI FILIPPO, P., Some Remarks on the Design of Isothermal Plates, IIR Bulletin, Annex 1973-4, pp. 145-155.
- [15] What Properly Do We Measure? Heat Transmission Measurements in Thermal Insulations, ASTM STP 544, 1974, p. 5.
- [16] DEGENNE, KLARSFELD, S. and BARTHE, Measurement Thermal Resistance of Thick Low Density Mineral Fiber Insulation, ASTM STP 660, 1978, pp. 130-144.

- [17] PELANNE, C.M., Does the Insulation Have a Thermal Conductivity? The Revised ASTM Test Standards Require an Answer. ASTM STP 660, 1978, pp. 60-70.
- [18] PELANEIE, CM., Discussion on Experiments to Separate the "Effect of Thickness" from Systematic Equipment Errors in Thermal Transmission Measurements, ASTM STP 718, 1980.
- [19] BODE, K.M.. Wärmeleitfähigkeitsmessungen mit dem Plattengerät: Einfluß der Schutzringbreite auf die Meßunsicherheit, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. '23, pp. 961-970, 1980.
- [20] DE PONTE, F. and MACCATO, W., The Calibration of Heat Flow Meters, Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718, 1980, pp. 231-254.
- [21] BOMBERG, M. and SOLVASON, K.P., Comments on Calibration and Design of Heat Flow Meter Apparatus, ASTM STP 879, 1985.
- [22] TROUSSART, L.R., Three-dimensional Finite Element Analysis of the Guarded Hot Plate Apparatus and its Computer Implementation, Journal of Thermal Insulation, Vol. 4, April 1981, pp. 225-254.
- [23] Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology, ASTM STP 879, 1985.
- 38
- [24] Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM STP 885, 1985.
- [25] THUREAU, P. Fluxmètres thermiques, Techniques de l'Ingénieur 1-1988, R 2900, 8 pages.
-