



中华人民共和国国家标准

GB/T 39704—2020

真空绝热板有效导热系数的测定

Determination of effective thermal conductivity for vacuum insulation panels (VIP)

2020-12-14 发布

2021-11-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国建筑材料联合会提出。

本标准由全国绝热材料标准化技术委员会(SAC/TC 191)归口。

本标准起草单位:南京玻璃纤维研究设计院有限公司、福建赛特新材股份有限公司、长虹美菱股份有限公司、广州晖能环保材料有限公司、中车长江车辆有限公司、上海元廷冷链科技有限公司、江苏山由帝奥节能新材股份有限公司、滁州银兴新材料科技有限公司、青岛德旭新材料有限公司、中国石化国际事业有限公司、国家玻璃纤维产品质量监督检验中心。

本标准主要起草人:赵明、张剑红、王佳庆、刘强、谢振刚、魏邦福、江峰、袁江涛、王海成、胡海滨、何远新、朱生荣、胡树安、胡晓东、张亮亮、姜寅、吴乐于、孙美峰、包玉珍、胡鹏军、屈会力、侯鹏、魏善芝、丁晴、潘阳、阎慧峰、唐健、张帅恺。



真空绝热板有效导热系数的测定

1 范围

本标准规定了真空绝热板有效导热系数的测定方法。
本标准适用于真空绝热板。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 4132 绝热材料及相关术语
- GB/T 10294 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法
- GB/T 10295 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法
- GB/T 13475—2008 绝热 稳态传热性质的测定 标定和防护热箱法
- GB/T 22588 闪光法测量热扩散系数或导热系数
- GB/T 37608 真空绝热板

3 术语和定义

GB/T 4132 和 GB/T 37608 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

有效导热系数 **effective thermal conductivity**

考虑了阻气隔膜边缘影响的整块真空绝热板的表观导热系数。

4 原理

本标准给出三种真空绝热板有效导热系数的测定方法。方法 A 采用 GB/T 10294 防护热板法的原理,通过消除非计量区域的传热影响,测试与计量区域尺寸相同的真空绝热板的有效导热系数;方法 B 采用 GB/T 13475—2008 热箱法的原理,通过测量试件的传热系数,然后转化为真空绝热板的有效热阻值与有效导热系数;方法 C 通过先测量真空绝热板的中心区域导热系数,然后结合阻气隔膜相关信息,计算出真空绝热板的有效热阻与有效导热系数。

5 方法 A

5.1 仪器设备

5.1.1 导热系数测定仪

采用满足以下要求的导热系数测定仪进行测试:

- a) 满足 GB/T 10294 的规定;

- b) 具有消除非计量区域的空气对流和辐射传热影响的功能；
- c) 采用真空防护时,防辐射屏的反射率应大于或等于 0.95。

5.1.2 钢直尺

分度值小于或等于 1 mm。

5.1.3 H 型测厚仪

分度值小于或等于 0.1 mm。

5.2 试样

5.2.1 真空防护方式的试样要求

试样为正方形真空绝热板。试样尺寸应满足以下要求：

- a) 试样的边长应与 GB/T 10294 规定的设备的计量板的尺寸一致；
- b) 试样的对角线偏差应小于或等于 2 mm,翘曲应小于或等于 3 mm,四个角的折边厚度与非折边区的厚度差值应小于或等于 1 mm。

5.2.2 非真空防护方式的试样要求

5.2.2.1 试样尺寸

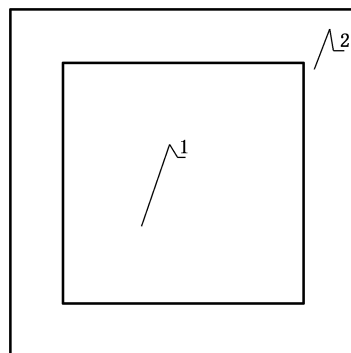
试样应满足 5.2.1 的要求。

5.2.2.2 试样制备

试样周围宜采用材质均匀、不透气、热性能稳定的回字形聚氨酯板填充,如图 1 所示。聚氨酯板应满足以下要求：

- a) 聚氨酯板的厚度应与真空绝热板试样的厚度一致,聚氨酯板的宽度应与 GB/T 10294 规定的防护板的宽度一致；
- b) 聚氨酯板在平均温度 25 ℃ 的导热系数应小于或等于 0.025 W/(m·K)。

聚氨酯板与试样之间的空隙应用发泡聚氨酯填充,待发泡材料干燥并完全硬化后方可测试。



说明：

1——真空绝热板试样；

2——回字形聚氨酯板填充材料。

图 1 方法 A 非真空防护的试样制备示意图

5.3 试验步骤

- 5.3.1 试样应在温度 $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $(50\pm 5)\%$ 的条件下进行不少于 72 h 的状态调节。
- 5.3.2 用钢直尺测量试样的长度 a_1 和宽度 b_1 ,用 H 型测厚仪测量试样的厚度 d 。
- 5.3.3 按照 5.2 的要求制备试样。
- 5.3.4 将试样的整体放入满足 5.1.1 要求的导热系数测定仪。
- 5.3.5 调整试样的位置,使真空绝热板的整体覆盖导热系数测定仪的计量区域。
- 5.3.6 若采用真空防护方式,应在试样四周以及防护板与冷却单元之间配置防辐射屏,再将设备的真空度抽至 10^{-3}Pa 以下,若采用非真空防护方式,应检查设备的防护板是否完全被回字形聚氨酯板覆盖。
- 5.3.7 设定热板与冷板的温差应大于或等于 20 K。
- 5.3.8 温度达到设定值并稳定后,按照 GB/T 10294 的原理计算试样的导热系数。按照以上要求测出的导热系数即为真空绝热板的有效导热系数。

5.4 试验误差

试验误差来源主要包含仪器仪表的测量误差(温度、电流、电压)、试样尺寸的偏差及防辐射屏反射系数的偏差等。

6 方法 B

6.1 仪器设备

6.1.1 标定热箱

设备应满足 GB/T 13475—2008 标定热箱法的规定。

6.1.2 钢直尺

分度值应小于或等于 1 mm。

6.1.3 H 型测厚仪

分度值应小于或等于 0.1 mm。

6.2 试样

6.2.1 试样尺寸

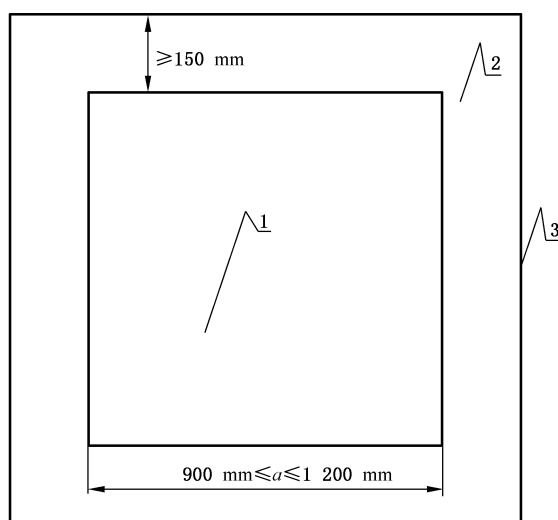
试样为正方形真空绝热板,试样尺寸应满足以下要求:

- 应大于或等于 900 mm \times 900 mm 且小于或等于 1 200 mm \times 1 200 mm;
- 试样的对角线偏差应小于或等于 5 mm,翘曲应小于或等于 3 mm,四个角的折边厚度与非折边区的厚度差值应小于或等于 1 mm;
- 试样周围的聚氨酯填充材料的宽度应大于或等于 150 mm;
- 由试样与聚氨酯构成的整体测试样的尺寸应覆盖设备的开口面积。

6.2.2 试样制备

试样周围应使用材质均匀、不透气、热性能稳定的聚氨酯板填充,如图 2 所示。聚氨酯板应满足以下要求:聚氨酯板在平均温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 的导热系数应小于或等于 0.025 W/(m \cdot K),聚氨酯板的导热系数应预先按照 GB/T 10294 或 GB/T 10295 测定,测试聚氨酯板的导热系数所选取的平均温度应为预设

热箱与冷箱环境温度的平均值。聚氨酯板与试样之间,聚氨酯板与安装架之间的空隙应用发泡聚氨酯填充,待发泡材料干燥并完全硬化后方可测试。



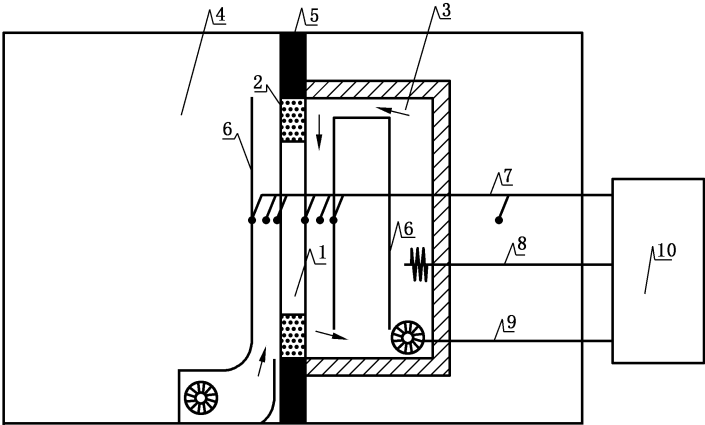
说明:

- 1——真空绝热板试样;
- 2——回字形聚氨酯板填充材料;
- 3——标定热箱法的样品安装架。

图 2 方法 B 的试样制备示意图

6.3 试验步骤

- 6.3.1 试样应在温度 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度 $(50 \pm 5)\%$ 的条件下进行不少于 72 h 的状态调节。
- 6.3.2 标定热箱在使用前应进行标定并确定标定系数。
- 6.3.3 用钢直尺测量试样的长度 a_1 和宽度 b_1 , 用 H 型测厚仪测量试样的厚度 d 。
- 6.3.4 按照 6.2.2 的要求制备试样, 用钢直尺测量聚氨酯板的厚度 d_1 。
- 6.3.5 依据 GB/T 13475—2008 规定的要求依次对试样进行安装, 布置温度传感器, 检查试样安装气密性, 如图 3 所示。



- 说明：
- 1 ——真空绝热板试样；
 - 2 ——回字形聚氨酯板填充材料；
 - 3 ——热箱；
 - 4 ——冷箱；
 - 5 ——安装架；
 - 6 ——导流屏；
 - 7 ——热电偶；
 - 8 ——加热器；
 - 9 ——风扇；
 - 10——电源及控制系统。

图 3 方法 B 测试真空绝热板有效导热系数的示意图

- 6.3.6 安装及气密性检查无误后,通过安装试样的尺寸计算真空绝热板的面积 S_1 和聚氨酯板的面积 S_2 。
- 6.3.7 关闭箱内照明设备,避免箱内照明设备长时间工作产生的热辐射的影响。
- 6.3.8 设定热箱和冷箱的环境温差大于或等于 20 K,箱内的相对湿度小于或等于 20%,冷箱应减少制冷设备的载荷并防止结露。
- 6.3.9 调节热箱壁内外的环境温度一致,减少热箱壁的漏热量,热箱漏热量的数量级应小于流经试样热量与流经聚氨酯板热量的数量级。
- 6.3.10 当箱内温度达到设定值后,每隔 3 h 测量一次冷热箱的环境温度、聚氨酯板的冷热面温度和热箱产生的热量,当连续两次的测量值偏差小于 1%,并且结果不是单方向变化,则表示系统已达到稳定状态。在系统达到稳定后,每隔 0.5 h 记录一次冷热箱的环境温度、聚氨酯板的冷热面温度和热箱产生的热量,3 h 共记录 6 次测量参数,取 6 次测量结果的平均值参与计算。
- 6.3.11 按照式(1)计算真空绝热板的传热系数：

$$U = \frac{Q_p - Q_1 - Q_2}{S_1 \times (T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (1)$$

SAC

式中：

U ——真空绝热板的传热系数,单位为瓦每平方米开尔文[$W/(m^2 \cdot K)$];

S_1 ——真空绝热板的面积,单位为平方米(m^2);

T_1 ——冷箱的环境温度,单位为开尔文(K);

T_2 ——热箱的环境温度,单位为开尔文(K);

Q_p ——热箱产生的热量,单位为瓦(W);

Q_1 ——热箱损失的热量,按照 GB/T 13475—2008 中 2.9.3 规定的方法确定,单位为瓦(W);

Q_2 ——通过已知导热系数的聚氨酯板的热量,单位为瓦(W)。

按照式(2)计算通过已知导热系数的聚氨酯板的热量:

$$Q_2 = \frac{\lambda \times (T_{s2} - T_{s1}) \times S_2}{d_1} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

λ ——聚氨酯板的导热系数,按照 GB/T 10294 或 GB/T 10295 规定的方法确定,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)];

T_{s2} ——聚氨酯板的热面温度,单位为开尔文(K);

T_{s1} ——聚氨酯板的冷面温度,单位为开尔文(K);

S_2 ——聚氨酯板的面积,单位为平方米(m²);

d_1 ——聚氨酯板的厚度,单位为米(m)。

按照式(3)计算真空绝热板的有效热阻:

$$R_{\text{eff}} = \frac{1}{U} - R_{\text{sur}} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

R_{eff} ——真空绝热板的有效热阻,单位为平方米开尔文每瓦[(m²·K)/W];

R_{sur} ——真空绝热板的表面热阻,按照 GB/T 13475—2008 附录 A 确定,单位为平方米开尔文每瓦[(m²·K)/W],当表面热阻无法确定时,取热面的表面热阻 0.13(m²·K)/W,冷面的表面热阻 0.04(m²·K)/W。

按照式(4)计算真空绝热板的有效导热系数:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{d}{R_{\text{eff}}} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

λ_{eff} ——真空绝热板的有效导热系数,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)];

d ——真空绝热板的厚度,单位为米(m)。

6.4 试验误差

试验误差来源主要包含仪器仪表的测量误差(温度、电流、电压)、试样尺寸的偏差、试样的安装及测温热电偶的布置引入的误差等。

7 方法 C

7.1 仪器设备

7.1.1 导热系数测定仪

设备应满足 GB/T 10294 或 GB/T 10295 的规定。

7.1.2 均质膜材料导热系数测定仪

设备应满足 GB/T 22588 的规定。

7.1.3 钢直尺

分度值小于或等于 1 mm。

7.1.4 H 型测厚仪

分度值小于或等于 0.1 mm。

7.1.5 膜厚测量仪

分度值小于或等于 0.001 mm。

7.2 试样

试样应为完整的真空绝热板。试样尺寸为样品原尺寸。

7.3 试验步骤

7.3.1 用钢直尺测量真空绝热板试样的长度 a_1 和宽度 b_1 ，用 H 型测厚仪测量真空绝热板的厚度 d 。

7.3.2 依据 GB/T 10294 或 GB/T 10295 测量真空绝热板的中心区域的导热系数 λ_c 。

7.3.3 用膜厚测量仪测量阻气隔膜的厚度 t_f 。

7.3.4 根据厂商提供的阻气隔膜的膜结构信息，按照 GB/T 22588 分别测试阻气隔膜第 i 层对应的均质膜的导热系数 λ_{fi} 。

7.3.5 按照式(5)计算平行于阻气隔膜方向的膜的导热系数 λ_f 或已知各层膜的导热系数和膜的厚度，按照有限元的方法数值模拟 λ_f ：

$$\lambda_f = \frac{\sum_{i=1}^n t_{fi} \times \lambda_{fi}}{t_f} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

λ_f ——平行于阻气隔膜方向的膜的导热系数，单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]；

t_f ——阻气隔膜的厚度，单位为米(m)；

t_{fi} ——阻气隔膜第 i 层的厚度，由厂商提供，单位为米(m)；

λ_{fi} ——阻气隔膜第 i 层均质膜的导热系数，单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]；

n ——阻气隔膜的总层数。

7.3.6 按照式(6)计算真空绝热板的线传热系数：

$$\phi_{\text{edge}} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_c}{\alpha_1 d} + \frac{\lambda_c}{\alpha_2 d}} \left[\frac{\alpha_1 (N_2^2 - B)}{d(N_1^2 N_2^2 - B^2) - K_1 \sqrt{N_1^2 N_2^2 - B^2} \left(\frac{2B}{\sqrt{D}} + 1 \right) - K_2 \sqrt{N_1^2 N_2^2 - B^2} \left(1 - \frac{2B}{\sqrt{D}} \right)} \right] \dots\dots\dots (6)$$

式中：

ϕ_{edge} ——真空绝热板的线传热系数，单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]；

λ_c ——真空绝热板中心区域导热系数，单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]；

α_1 ——7.8，真空绝热板热面对流换热系数，单位为瓦每平方米开尔文[W/(m²·K)]；

α_2 ——25，真空绝热板冷面对流换热系数，单位为瓦每平方米开尔文[W/(m²·K)]；

d ——真空绝热板的厚度，单位为米(m)；

N_1 ——过程参数 1，见式(7)，单位为每米(1/m)；

N_2 ——过程参数 2，见式(8)，单位为每米(1/m)；

B ——过程参数 3，见式(9)，单位为每平方米(1/m²)；

D ——过程参数 4，见式(10)，单位为每四次方米(1/m⁴)；

K_1 ——过程参数 5，见式(11)，单位为每米(1/m)；

K_2 ——过程参数 6, 见式(12), 单位为每米(1/m)。

$$N_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1}{t_f \lambda_f} + \frac{\lambda_c}{t_f \lambda_f d}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$N_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2}{t_f \lambda_f} + \frac{\lambda_c}{t_f \lambda_f d}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$B = \frac{\lambda_c}{t_f \lambda_f d} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$D = (N_1^2 - N_2^2)^2 + 4B^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$K_1 = -\sqrt{\frac{N_1^2 + N_2^2 - \sqrt{(N_1^2 - N_2^2)^2 + 4B^2}}{2}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$K_2 = -\sqrt{\frac{N_1^2 + N_2^2 + \sqrt{(N_1^2 - N_2^2)^2 + 4B^2}}{2}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

按照式(13)计算真空绝热板的传热系数:

$$U_{\text{eff}} = U_{\text{cop}} + \frac{l_p}{s_p} \phi_{\text{edge}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

U_{eff} ——真空绝热板的传热系数, 单位为瓦每平方米开尔文[W/(m² · K)];

U_{cop} ——真空绝热板中心区域的传热系数, 见式(14), 单位为瓦每平方米开尔文[W/(m² · K)];

l_p ——真空绝热板的周长, 单位为米(m);

s_p ——真空绝热板的面积, 单位为平方米(m²)。

$$U_{\text{cop}} = \left(\frac{d}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

按照式(15)计算真空绝热板的有效热阻 R_{eff} :

$$R_{\text{eff}} = \frac{1}{U_{\text{eff}}} - \frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

R_{eff} ——真空绝热板的有效热阻, 单位为平方米开尔文每瓦[(m² · K)/W]。

常见类型的真空绝热板的有效热阻如附录 A 所示。

按照式(16)计算真空绝热板的有效导热系数:

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{d}{R_{\text{eff}}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

λ_{eff} ——真空绝热板的有效导热系数, 单位为瓦每米开尔文[W/(m · K)]。

8 其他尺寸的真空绝热板有效导热系数的换算

与已知有效导热系数试样具有相同厚度、相同阻气隔膜、相同制造工艺和相同中心区域导热系数的其他尺寸的真空绝热板的有效导热系数 λ'_{eff} 可按式(17)换算:

$$\lambda'_{\text{eff}} = \lambda_{\text{cop}} + \frac{(a_2 + b_2)a_1 b_1}{(a_1 + b_1)a_2 b_2} (\lambda_{\text{eff}} - \lambda_{\text{cop}}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

λ'_{eff} ——其他尺寸的真空绝热板的有效导热系数, 单位为瓦每米开尔文[W/(m · K)];

λ_{cop} ——已知有效导热系数试样的中心区域导热系数, 单位为瓦每米开尔文[W/(m · K)];

- a_2 ——其他尺寸的真空绝热板的标称长度,单位为米(m);
- b_2 ——其他尺寸的真空绝热板的标称宽度,单位为米(m);
- a_1 ——已知有效导热系数试样的长度,单位为米(m);
- b_1 ——已知有效导热系数试样的宽度,单位为米(m);
- λ_{eff} ——已知有效导热系数试样的有效导热系数,单位为瓦每米开尔文[W/(m·K)]。

9 试验报告

试验报告应至少包括以下内容:

- a) 试样编号和试样名称;
- b) 所使用的标准(包括发布或出版年号);
- c) 试样尺寸;
- d) 试验方法和试验日期;
- e) 试验条件;
- f) 试验结果。

附录 A

(资料性附录)

常见类型的真空绝热板的有效热阻

A.1 常见类型的真空绝热板的有效热阻

根据方法 C 的计算,本附录提供了五种常见类型的真空绝热板的有效热阻 R_{eff} ,参见表 A.1~表 A.5。

表 A.1 常见类型的真空绝热板的有效热阻(300 mm×300 mm,阴阳膜)

中心区域 导热系数 $W/(m \cdot K)$	真空绝热板厚度 mm	真空绝热板的有效热阻 $m^2 \cdot K/W$	
		7 μm 铝箔膜/两层镀铝膜 (膜厚 85 μm)	7 μm 铝箔膜/三层镀铝膜 (膜厚 100 μm)
0.002	10	3.74	3.33
	20	7.26	6.33
	25	9.02	7.82
	30	10.77	9.30
	40	14.27	12.28
0.004	10	2.14	2.00
	20	4.21	3.87
	25	5.24	4.81
	30	6.27	5.74
	40	8.33	7.61
0.006	10	1.50	1.43
	20	2.96	2.79
	25	3.69	3.47
	30	4.42	4.15
	40	5.88	5.51
0.008	10	1.15	1.11
	20	2.28	2.18
	25	2.85	2.72
	30	3.41	3.25
	40	4.54	4.32
0.010	10	0.94	0.91
	20	1.86	1.79
	25	2.32	2.23
	30	2.78	2.67
	40	3.70	3.55
注: 铝箔膜的导热系数取 160 $W/(m \cdot K)$, 两层镀铝膜的导热系数取 0.39 $W/(m \cdot K)$, 三层镀铝膜的导热系数取 0.54 $W/(m \cdot K)$ 。			

表 A.2 常见类型的真空绝热板的有效热阻(300 mm×300 mm,双面镀铝膜)

中心区域 导热系数 W/(m·K)	真空绝热板厚度 mm	真空绝热板的有效热阻 m ² ·K/W	
		两层镀铝膜 (膜厚 85 μm)	三层镀铝膜 (膜厚 100 μm)
0.002	10	4.28	3.97
	20	8.39	7.69
	25	10.45	9.54
	30	12.50	11.38
	40	16.60	15.07
0.004	10	2.30	2.21
	20	4.56	4.35
	25	5.69	5.41
	30	6.82	6.47
	40	9.07	8.59
0.006	10	1.58	1.53
	20	3.13	3.03
	25	3.91	3.77
	30	4.69	4.52
	40	6.24	6.01
0.008	10	1.20	1.17
	20	2.39	2.32
	25	2.98	2.90
	30	3.57	3.47
	40	4.76	4.62
0.010	10	0.97	0.95
	20	1.93	1.89
	25	2.41	2.35
	30	2.88	2.82
	40	3.84	3.75
注：两层镀铝膜的导热系数取 0.39 W/(m·K)，三层镀铝膜的导热系数取 0.54 W/(m·K)。			

表 A.3 常见类型的真空绝热板的有效热阻(410 mm×360 mm, 阴阳膜)

中心区域 导热系数 $W/(m \cdot K)$	真空绝热板厚度 mm	真空绝热板的有效热阻 $m^2 \cdot K/W$	
		7 μm 铝箔膜/两层镀铝膜 (膜厚 85 μm)	7 μm 铝箔膜/三层镀铝膜 (膜厚 100 μm)
0.002	10	3.96	3.59
	20	7.72	6.88
	25	9.60	8.52
	30	11.47	10.15
	40	15.22	13.41
0.004	10	2.21	2.09
	20	4.36	4.08
	25	5.43	5.06
	30	6.50	6.05
	40	8.64	8.03
0.006	10	1.53	1.47
	20	3.04	2.90
	25	3.79	3.60
	30	4.54	4.31
	40	6.04	5.73
0.008	10	1.17	1.14
	20	2.33	2.25
	25	2.91	2.80
	30	3.48	3.35
	40	4.64	4.45
0.010	10	0.95	0.93
	20	1.89	1.83
	25	2.36	2.29
	30	2.83	2.74
	40	3.76	3.64
注: 铝箔膜的导热系数取 $160 W/(m \cdot K)$, 两层镀铝膜的导热系数取 $0.39 W/(m \cdot K)$, 三层镀铝膜的导热系数取 $0.54 W/(m \cdot K)$ 。			

表 A.4 常见类型的真空绝热板的有效热阻(600 mm×400 mm,双面铝箔膜)

中心区域 导热系数 W/(m·K)	真空绝热板厚度 mm	真空绝热板的有效热阻 m ² ·K/W					
		铝箔厚度					
		5 μm	6 μm	7 μm	8 μm	9 μm	10 μm
0.002	10	2.12	1.96	1.83	1.72	1.62	1.54
	20	3.41	3.09	2.84	2.63	2.45	2.30
	25	4.02	3.63	3.31	3.05	2.84	2.66
	30	4.63	4.15	3.77	3.47	3.21	3.00
	40	5.81	5.18	4.68	4.28	3.95	3.67
0.004	10	1.48	1.40	1.33	1.27	1.22	1.17
	20	2.54	2.36	2.21	2.08	1.97	1.87
	25	3.04	2.81	2.61	2.45	2.31	2.19
	30	3.53	3.25	3.01	2.81	2.64	2.50
	40	4.50	4.11	3.79	3.52	3.30	3.10
0.006	10	1.14	1.09	1.05	1.01	0.98	0.95
	20	2.02	1.91	1.80	1.72	1.64	1.57
	25	2.44	2.29	2.16	2.05	1.95	1.86
	30	2.86	2.67	2.51	2.37	2.24	2.14
	40	3.67	3.41	3.19	2.99	2.83	2.68
0.008	10	0.93	0.89	0.86	0.84	0.82	0.79
	20	1.68	1.60	1.53	1.46	1.41	1.36
	25	2.04	1.93	1.84	1.76	1.68	1.62
	30	2.40	2.26	2.15	2.04	1.95	1.87
	40	3.10	2.91	2.75	2.60	2.48	2.36
0.010	10	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68
	20	1.44	1.38	1.32	1.28	1.23	1.19
	25	1.75	1.67	1.60	1.54	1.48	1.43
	30	2.07	1.97	1.88	1.80	1.73	1.66
	40	2.68	2.54	2.41	2.30	2.20	2.11
注：铝箔膜的导热系数取 160 W/(m·K)。							

表 A.5 常见类型的真空绝热板的有效热阻(1 300 mm×500 mm, 双面镀铝膜)

中心区域 导热系数 $W/(m \cdot K)$	真空绝热板厚度 mm	真空绝热板的有效热阻 $m^2 \cdot K/W$	
		两层镀铝膜 (膜厚 85 μm)	三层镀铝膜 (膜厚 100 μm)
0.002	10	4.67	4.52
	20	9.27	8.89
	25	11.56	11.07
	30	13.85	13.25
	40	18.43	17.61
0.004	10	2.42	2.37
	20	4.81	4.71
	25	6.01	5.87
	30	7.20	7.04
	40	9.59	9.36
0.006	10	1.63	1.61
	20	3.25	3.20
	25	4.06	3.99
	30	4.87	4.79
	40	6.48	6.38
0.008	10	1.23	1.22
	20	2.45	2.42
	25	3.06	3.03
	30	3.67	3.63
	40	4.90	4.84
0.010	10	0.99	0.98
	20	1.97	1.95
	25	2.46	2.44
	30	2.95	2.92
	40	3.93	3.89
注：两层镀铝膜的导热系数取 0.39 $W/(m \cdot K)$ ，三层镀铝膜的导热系数取 0.54 $W/(m \cdot K)$ 。			

参 考 文 献

- [1] Schwab H, Stark C, Wachtel J, Ebert H P, Fricke J. Thermal Bridge in Vacuum-insulated Building Facades[J]. Journal of Thermal Env.&Bldg.Sci, 2005, 28(4):345-355.
- [2] Nyberg H. Thermal bridge at foundations[J]. Master's Thesis, 2011:146.
- [3] Tenpierik M, Cauberg H. Analytical Models for Calculating Thermal Bridge Effects Caused by Thin High Barrier Envelopes around Vacuum Insulation Panels[J]. Journal of Building Physics, 2007, 30(3): 185-215.
- [4] Wakili G.K., Bundi R, Binder B. Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels [J]. Building Research & Information, 2007, 32(4): 293-299.
- [5] Capozzoli, A, Fantucci S, Favoino F, Perino M. Vacuum Insulation Panels: Analysis of the Thermal Performance of Both Single Panel and Multilayer Boards [J]. Energies, 2015, 8, 2528-2547.
-