

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.01.006

高温下阻气膜对真空绝热板使用寿命的影响

孟 闯 阚安康 齐丹丹 徐志峰

(上海海事大学商船学院,上海,201306)

摘要:为进一步提高真空绝热板保温隔热性能、延长使用寿命、完善制作工艺,在介绍真空绝热板基本构成的基础上,对其使用寿命进行了界定;从隔气结构出发提出影响真空绝热板使用寿命的理论依据,建立了相应的数学模型,并通过高温老化实验进行验证。实验结果与理论分析基本拟合,结果表明真空绝热板在高温环境(50/70 °C)中应用会加快其阻气膜的老化速度。

关键词:真空绝热板;阻气膜;使用寿命;导热系数

中图分类号:TK121

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2017)01-0040-05

Influence of Gas Barrier Film on Service Life of VIP Under High Temperature

MENG Chuang, KAN Ankang, QI Dandan, XU Zhifeng

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai, 201306, China)

Abstract: Vacuum insulation panel (VIP) is fully developed in recent years as a new type of heat insulation material. In order to further improve the thermal insulation performance, prolong the service life and optimize the manufacture method of VIP, its service life is defined based on the introduction of constituents. And, the analysis model of service life is set up with the verification of ageing test under high temperature. The experimental results fit in with theoretical analysis, and it is found that the application of VIP under high temperature (50/70 °C) will speed up the aging rate of the barrier (PET/NY/Al/PE), which can provide the reference for the study of service life and practical application of VIP.

Key words: vacuum insulation panel; gas barrier film; service life; thermal conductivity

随着环境问题的日益突出和能源危机的不断加剧,资源短缺与环境污染所带来的挑战前所未有,节能减排已是当务之急。作为一种优良的保温隔热材料,真空绝热板(Vacuum insulation panel, VIP)应运而生。VIP的导热系数可达到 $3 \sim 4 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$,其热阻相当于同等厚度传统绝热材料的10倍左右,具有节能和环保的双重优点^[1]。因此,VIP技术的研究与应用将会是环境问题行之有效的解决方法。

VIP主要由芯材,阻气膜和吸气剂3部分组成。

阻气膜作为真空绝热板的一部分,主要是起到隔绝内部芯材与外界大气的作用,保证VIP内部较高的真空度,以维持其良好的保温绝热性能。但是,阻气膜并非绝对密不透气,空气和水蒸气可以通过阻气膜表面和热封边缘缓慢地进入VIP内部。这会对VIP极小的导热系数产生重要影响。目前国内对阻气膜的研究主要有热封工艺,焊接工艺及其对VIP导热性能影响^[2-5],国外也有学者针对不同阻气膜和芯材对VIP导热性能进行了相关研究^[6-10]。本文从阻气膜对VIP导热性能影响的

基金项目:上海市自然科学基金(15ZR1419900)资助项目;上海海事大学研究生创新基金(YXR2016083)资助项目。

收稿日期:2016-11-06;**修订日期:**2016-12-21

通信作者:阚安康,男,高级工程师,硕士生导师,E-mail:ankang0537@126.com。

引用格式:孟闯,阚安康,齐丹丹,等.高温下阻气膜对真空绝热板使用寿命的影响[J].南京航空航天大学学报,2017,49(1):40-44. MENG Chuang, KAN Ankang, QI Dandan, et al. Influence of gas barrier film on service life of VIP under high temperature[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1): 40-44.

角度出发,基于理论分析建立数学模型,并通过高温老化实验验证相应结论。

1 真空绝热板及其使用寿命的界定

VIP 主要由芯材、阻气膜和吸气剂或干燥剂 3 部分组成^[1],其结构组成如图 1 所示。



图 1 真空绝热板示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VIP

阻气膜作为 VIP 的外包装结构,要求其具有良好的阻气性能与隔热性能。同时具有一定的机械强度,保证不易被损坏以持续地维持 VIP 内部较高的真空度。但由于气体及水蒸气会不断透过阻气膜缓慢地渗入到 VIP 内部,随着时间的推移, VIP 导热系数将会不断增加。导热系数增加到某一值时,即被定义为失效,据 ASTM C1484-0 规定,该极限值为 $0.0115 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

通过阻气膜进入板内的气体渗透量由两部分组成,分别用干空气渗透率(Dry air permeability, DAP)和水蒸气渗透率(Water vapor permeability, WVP)表示,分别指在标准大气环境下,单位时间内通过单位面积阻气膜渗透到 VIP 内部的干空气和水蒸气的量。渗透量的大小与阻气膜本身的材质种类以及所处的环境条件有关,会随着 VIP 应用环境的变化而有所差异,需要具体测量。

2 使用寿命数学模型

气体通过阻气膜的渗透会影响 VIP 的使用寿命,本文将此模型简化分析。假设水蒸气含量的增加和气体压力变化对 VIP 热导率的影响相互独立,并且不考虑芯材产生的气体对 VIP 导热系数的影响。因此可对其导热系数采用并列叠加的计算方法,即

$$\lambda(\tau) = \lambda_0 + \lambda_v(\tau) + \lambda_g(\tau) \quad (1)$$

式中: λ_0 为 VIP 的初始导热系数; $\lambda(\tau)$ 为 VIP 的瞬时导热系数; $\lambda_v(\tau)$ 为水蒸气渗透引起 VIP 导热系数的增加值; $\lambda_g(\tau)$ 为干空气渗透引起 VIP 导热系数的增加值。

2.1 水蒸气渗透引起 VIP 导热系数的增加值

VIP 水蒸气的渗透量主要受 VIP 内部芯材的吸湿性能、环境温度和相对湿度等多种因素影响。在特定环境状况下,可通过测量一定时间内 VIP 中水蒸气增加的质量 m_v , 得到其水蒸气增加速率为

$$\frac{dm_v}{d\tau} = WVP_A \times A_{VIP} + WVP_C \times C_{VIP} = \Delta p_v \times Q_v \quad (2)$$

式中: Q_v 为单位压差下水蒸气渗透量; WVP_A 为 VIP 表面的水蒸气渗透率; A_{VIP} 为 VIP 表面的面积; WVP_C 为阻气膜封口处水蒸气渗透率; C_{VIP} 为 VIP 阻气膜热封边缘周长; Δp_v 为 VIP 内外的水蒸气分压力差。

VIP 内外水蒸气压力差可表示为

$$\Delta p_v = (\phi_o - \phi_i) p_{v,T} \quad (3)$$

式中: $p_{v,T}$ 为 VIP 内温度为 T 时,水蒸气的分压力, Pa; ϕ_i 和 ϕ_o 分别为 VIP 内外水蒸气的相对湿度。设 I 为吸附系数,代表芯材吸附水蒸气的能力,它与相对湿度存在如下关系

$$x_v = \frac{m_v}{m_{VIP,dry}} = I\phi_i \quad (4)$$

式中: x_v 为 VIP 中水蒸气的渗透量占干燥的 VIP 的质量百分数; $m_{VIP,dry}$ 为干燥 VIP 的质量。由式(3,4)整理可得 x_v 随时间变化的关系式为

$$x_v(\tau) = I\phi_o \left(1 - e^{-\frac{(WVP_A \cdot A_{VIP} + WVP_C \cdot C_{VIP}) P_{v,T} \tau}{K \cdot m_{VIP,dry}}}\right) \quad (5)$$

由水蒸气渗透导致 VIP 导热系数的增加值 $\lambda_{v(\tau)}$ 与 x_v 的关系,可得

$$\lambda_{v(\tau)} = \omega x_v(\tau) = I\phi_o \omega \left(1 - e^{-\frac{(WVP_A \cdot A_{VIP} + WVP_C \cdot C_{VIP}) P_{v,T} \tau}{K \cdot m_{VIP,dry}}}\right) \quad (6)$$

式中 ω 为已知参数,由实验测得,可取 $0.045 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2.2 干空气渗透引起 VIP 导热系数的增加值

干气体渗透引起的 VIP 导热系数增加值为^[12]

$$\lambda_g = \frac{\lambda_{g,0}}{1 + 2\beta K_n} \quad (7)$$

式中: $\lambda_{g,0}$ 为在标准大气压下静止空气的导热系数,本文取 $0.024 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; β 为常数,本文取 1.7; K_n 为克努曾数,它是该压力下气体分子平均自由程 l 与孔隙特征尺寸 δ 的比值,表达式为

$$K_n = \frac{l}{\delta} \quad (8)$$

$$l = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \tau d_g^2 p_g} \quad (9)$$

式中: k_B 为玻尔兹曼常数,其值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$; d_g 为空气分子直径,其值为 $3.72 \times 10^{-10} \text{ m}$; p_g 为板内气体压力值; τ 表示时间。

VIP 内气体压力与阻气膜的干空气渗透率 DAP 有关,即

$$\frac{dp_g}{d\tau} = \frac{DAP_{tot}}{V_e} \frac{T}{T_o} (p_o - p_i) \quad (10)$$

式中: p_o 环境压力; T_o 为环境温度; V_e 为 VIP 芯

材气孔体积之和。

氧气和氮气占空气的大部分,因此计算空气渗透率时只考虑这两种气体即可,又因氮气渗透率为氧气的 $1/5^{[13-14]}$,可由氧气渗透率算得DAP的值为

$$\begin{aligned} \text{DAP}_{\text{tot}} &= \text{DAP}_A A_{\text{VIP}} + \text{DAP}_C C_{\text{VIP}} = \\ & \left(\text{OP}_A + \frac{\text{OP}_A}{5} \right) A_{\text{VIP}} + \left(\text{OP}_C + \frac{\text{OP}_C}{5} \right) C_{\text{VIP}} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: OP_A 为VIP表面氧气渗透率; A_{VIP} 为VIP表面积; OP_C 为VIP封口处氧气渗透率; C_{VIP} 为VIP热封边缘周长。

对式(10)进行积分计算可得

$$p_g(\tau) = p_o - (p_o - p_i) e^{-\frac{T \cdot \text{DAP}_{\text{tot}} (p_o - p_i)}{T_o V_\epsilon} \tau} \quad (12)$$

结合式(7~9,12)可得,气体渗透引起的导热系数增加值为

$$\lambda_g(\tau) = \frac{\lambda_{g,0}}{1 + \frac{\sqrt{2} \beta k_B T}{\pi d_g^2 \delta [p_o - (p_o - p_i) e^{-\frac{T \cdot \text{DAP}_{\text{tot}} (p_o - p_i)}{T_o V_\epsilon} \tau}]}} \quad (13)$$

2.3 VIP导热系数的数学模型

结合式(1,6,13)可以得到VIP的导热系数随时间变化规律为

$$\lambda(\tau) = \lambda_0 + \frac{\lambda_{g,0}}{1 + \frac{\sqrt{2} \beta k_B T}{\pi d_g^2 \delta [p_o - (p_o - p_i) e^{-\frac{T \cdot \text{DAP}_{\text{tot}} (p_o - p_i)}{T_o V_\epsilon} \tau}]}} +$$

$$I \omega \psi_o \left(1 - e^{-\frac{(WVP_A \cdot A_{\text{VIP}} + WVP_C \cdot C_{\text{VIP}}) P_{v,T}}{I m_{\text{VIP,dry}}} \tau} \right) \quad (14)$$

由VIP的导热系数方程可知,VIP导热系数与其内部芯材、外部阻气膜的相关性能参数有关,还与其本身所处的环境温湿度有关。表1给出了影响 $\lambda_{(\tau)}$ 的主要参数及优化VIP导热性能的方法。通过式(14)可对VIP使用寿命进行预测。根据ASTMC1484-01规定,环境温度为 24°C ,标准大气压下,相对湿度为50%。当VIP的导热系数 $\lambda_{(\tau)} \geq 0.0115 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,此时对应的时间就是其使用寿命。下面本文将对3种阻气膜的老化进行模拟计算分析。

表1 影响 $\lambda_{(\tau)}$ 的主要参数

影响 $\lambda_{(\tau)}$ 的主要参数	ψ_o	I	WVP	DAP	V_ϵ	C	T
减小 $\lambda_{(\tau)}$ 的方法	减小	减小	减小	减小	增大	减小	减小

3 老化实验

本文老化实验所用的3种VIP,其芯材均为玻璃纤维,尺寸大小为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 8.5 \text{ mm}$ 。芯材具体参数见表2,阻气膜渗透率及其组分参数见表3,4。

表2 玻璃纤维芯材参数

芯材参数	参数值
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	218
孔隙率/%	92
纤维直径 $d/\mu\text{m}$	7
吸附能力 I	0.000 8

表3 阻气膜渗透率和导热系数

Tab.3 Permeability and thermal conductivity of gas barrier films

性能	A膜	B膜	C膜	测试标准
表面水蒸气渗透率/ $(\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$	0.020	0.030	0.012	ASTMF1249-90
封口处水蒸气渗透率/ $(\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$	0.012	0.020	0.008	ASTMF1249-90
表面氧气渗透率/ $(\text{cm}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$	0.006 4	0.005 0	0.030 0	ASTMD3985
封口处氧气渗透率/ $(\text{cm}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$	0.002	0.003	0.020 0	ASTMD3985
VIP阻气膜导热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	0.071	0.040	0.068	GB/T10294—2008

表4 阻气膜组分参数

Tab.4 Composition about gas barrier films

种类	材质结构	厚度/ μm	剥离强度/ $(\text{N} \cdot (\text{15 mm})^{-1})$	导热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$
A膜	PET12/NY15/AL7/PE50	93	大于7.8	0.071
B膜	NY15/PET12/AL7/PE50	100	大于8.5	0.040
C膜	NY15/HBVEPET12/AL7/PE50	95	大于4.5	0.068

本实验用高温恒温箱对以上 3 种 VIP 进行了为期一个月的高温老化。实验用 VIP 及芯材如图 2 所示。VIP 阻气膜使用温度区间为 $\pm 70\text{ }^\circ\text{C}$ 。本文共进行了 2 组实验,分别将这 3 种 VIP 放置在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温箱中,相对湿度为恒温箱设定的老化实验温度相对应环境空气的相对湿度。每隔 7 天测试 VIP 的导热系数变化值。本实验测量 VIP 导热系数的方法是防护热板法,恒温箱型号为 FCD-3000 Serial 101-3A,导热系数测试仪型号为 IMDRY3001-II。测试标准为 GB/T10294—2008。



图 2 VIP 及其芯材

Fig. 2 VIP and its core material

VIP 经过为期 1 个月的老化实验后,其外观并没有出现褶皱、破损等损伤情况。阻气膜热封处也没有出现分离现象,因此实验用 VIP 符合测试要求,实验结果见图 3~5。

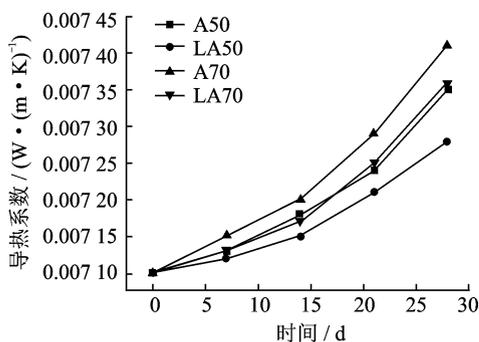


图 3 A 膜 VIP 的导热系数与老化时间的关系

Fig. 3 Relationship between thermal conductivity of VIP with film A and aging time

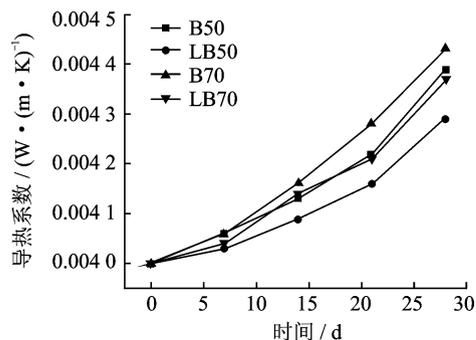


图 4 B 膜 VIP 的导热系数与老化时间的关系

Fig. 4 Relationship between thermal conductivity of VIP with film B and aging time

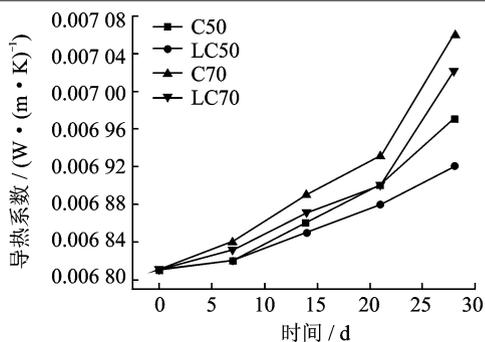


图 5 C 膜 VIP 的导热系数与老化时间的关系

Fig. 5 Relationship between thermal conductivity of VIP with film C and aging time

图 3 中分别用 A50 和 A70 表示 A 膜 VIP 在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温箱中 VIP 导热系数随时间变化的曲线;用 A50L 和 A70L 分别表示 A 膜 VIP 由式(14)理论计算得出的理想化值。B 膜和 C 膜的表达方式与 A 膜类似。从图 3~5 可看出,每种膜所对应 VIP 的导热系数会随老化实验时间的增加有增加趋势,其增加率会因其本身的渗透性的不同而有所差异。每种膜的 VIP 在不同温度环境下,导热系数增加量的大小也不相同,图中由 3 种阻气膜制成的 VIP 在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时导热系数增加率都比在 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 老化时的增加率小。证明 VIP 应用的环境温度越高,导热系数增加率就会越大,相应的其使用年限就越短。并且从图中可看出,VIP 在相同温度老化时,其理想的老化导热系数大部分都比实验测出的值要小。这主要因为 VIP 在老化实验过程中会因测试时造成不同程度的机械损伤所致。芯材本身在高温环境中也会产生微量气体。同时实验过程中阻气膜和芯材也会有一定程度老化,这都会导致 VIP 导热系数的增加。而且,本实验虽然在恒温箱中进行老化,但不能保证实验环境为恒定湿度,箱内的湿度会根据当时环境湿度不同而改变,因此也会对本次实验结果造成一定的影响。

4 结束语

本文采用理论分析和实验验证相结合的方法,得出了真空绝热板阻气膜对其使用寿命的影响的数学模型。通过高温老化试验可以得出,理论模型与实验结果基本拟合。实验结果表明在高温环境 ($50/70\text{ }^\circ\text{C}$) 下,PET/NY/Al/PE 型 VIP 阻气膜导热系数随时间呈明显上升趋势,并且温度越高增长越明显。阻气膜作为 VIP 重要的组成部分,其导热系数的大小会因热桥效应对 VIP 整体的导热性能产生很大的影响,从而进一步影响 VIP 的使用寿命。

参考文献:

- [1] 温永刚, 王先荣, 董亮, 等. 真空绝热板(VIP)应用技术研究[J]. 低温工程, 2010(6):29-32.
WEN Yonggang, WANG Xianrong, DONG Liang, et al. Study on application technology of vacuum insulation panel[J]. Cryogenics, 2010(6):29-32.
- [2] 金莎莎. 真空绝热板阻隔膜焊接工艺及其微观组织结构研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
JIN Shasha. Vacuum insulation panel blocking membrane welding process and its microstructures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [3] 金莎莎, 陈照峰, 徐滕州, 等. 真空绝热板阻隔膜 PA/VMPET/Al/PE 热封工艺[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(4):60-63.
JIN Shasha, CHEN Zhaofeng, XU Tengzhou, et al. Heat-sealing process of PA/VMPET/Al/PE film of vacuum insulation panel[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(4):60-63.
- [4] 郭靖华, 智欧. 表面隔膜对真空绝热板性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2003(7):30-32.
GUO Jinghua, ZHI Ou. Influence of surface membrane on properties of vacuum insulating board[J]. New Building Materials, 2003(7):30-32.
- [5] DI X, GAO Y, BAO C, et al. Optimization of glass fiber based core materials for vacuum insulation panels with laminated aluminum foils as envelopes[J]. Vacuum, 2013, 97(11):55-59.
- [6] ARAKI K, KAMOTO D, MATSUOKA S I. Optimization about multilayer laminated film and getter device materials of vacuum insulation panel for using at high temperature[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(1):271-282.
- [7] ALAM M, SINGH H, LIMBACHIYA M C. Vacuum insulation panels (VIPs) for building construction industry—A review of the contemporary developments and future directions[J]. Journal of Vegetation Science, 2016, 88(3):3592-3602.
- [8] MAROUANI S. Investigation of the resistance welding of multilayer aluminum-coated polymer complexes used as envelopes of vacuum insulation panels [J]. Materials & Design, 2012, 36:546-556.
- [9] BRUNNER S, GASSER P, SIMMLER H, et al. Investigation of multilayered aluminium-coated polymer laminates by focused ion beam (FIB) etching[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200 (20/21): 5908-5914.
- [10] GARNIER G, MAROUANI S, YRIEIX B, et al. Interest and durability of multilayer: From model films to complex films[J]. Polym Advanced Technologies, 2011, 22(6):847-856.
- [11] 陈照峰, 李承东, 陈清, 等. 真空绝热板芯材研究进展[J]. 科技导报, 2014, 32(9):59-62.
CHEN Zhaofeng, LI Chengdong, CHEN Qing, et al. Research progress of vacuum insulation panel core materials[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(9):59-62.
- [12] SIMMLER H, BRUNNER S. Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life [J]. Energy and Buildings, 2005, 37(11): 1122-1131.
- [13] 阚安康, 康利云, 曹丹. 真空绝热板使用寿命数值分析及预测[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(7):665-671.
KAN Ankang, KANG Liyun, CAO Dan. Theoretical and experimental studies of service life of vacuum insulation panels[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(7):665-671.
- [14] SCHWAB H, HEINEMANN U, WACHTEL J, et al. Predictions for the increase in pressure and water content of vacuum insulation panels (VIPs) integrated into building constructions using model calculations[J]. Journal of Building Physics, 2005, 28(4): 327-344.

