

网络出版时间:2019-04-01 15:19 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.10.004
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190401.1518.008.html

木纤维/气相 SiO₂ 复合真空绝热板的制备与表征

王保文¹,李志慧¹,戚兴来¹,饶久平¹,Fan Mizi^{1,2},戴达松¹

(1 福建农林大学 材料工程学院,福建 福州 350002;

2 布鲁奈尔大学 工程设计学院 土木工程系,伦敦 UB8 3PH)

【摘要】【目的】分析木纤维用量对木纤维/气相 SiO₂ 复合真空绝热板(vacuum insulation panel, VIP)性能的影响,为复合 VIP 的制备提供支持。【方法】采用中密度纤维板生产过程中所使用的木纤维与气相 SiO₂ 进行复合,通过模压成型法制成木纤维/气相 SiO₂ 多尺度结构复合芯材,并将其真空封装制备木纤维/气相 SiO₂ 复合真空绝热板(VIP)。通过场发射扫描电子显微镜(SEM)、压汞仪和傅里叶红外光谱分析仪(FTIR),研究不同木纤维用量对复合 VIP 芯材的微观形貌、孔隙结构和辐射导热的影响,并利用热流法导热仪测试了复合 VIP 在不同环境温度下的导热系数。【结果】大部分的木纤维空隙、纹孔内都填充了气相 SiO₂ 纳米级粉末,并且搭建起由木纤维和 SiO₂ 构建的三维空间结构网络;当木纤维质量分数为 40%时, VIP 的总孔体积为 4.61 cm³/g,孔隙率为 60.6%,平均孔径为 0.13 μm;当环境温度为 25 °C 时, VIP 辐射导热系数为 0.60 mW/(m·K),总导热系数为 6.58 mW/(m·K),而当环境温度升至 55 °C 时,总导热系数为 7.21 mW/(m·K),相比于未添加木纤维的气相 SiO₂ 芯材,综合性能成本降低了 28.7%。【结论】利用木纤维替代部分气相 SiO₂ 制备复合 VIP 能够大大降低芯材成本,并且还能保持良好的隔热性能,具有十分广泛的应用前景。

【关键词】 木纤维;气相 SiO₂;真空绝热板;孔隙结构;导热系数

【中图分类号】 S784;TS635

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)10-0027-07

Preparation and characterization of wood fiber/fumed silica vacuum insulation panel

WANG Baowen¹, LI Zhihui¹, QI Xinglai¹, RAO Jiuping¹, FAN Mizi^{1,2}, DAI Dasong¹

(1 School of Material Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2 Civil Engineering Department, School of Engineering and Design, Brunel University, London, UB8 3PH, UK)

Abstract: 【Objective】 The effect of wood fiber content on properties of wood fiber/fumed silica composite vacuum insulation panel (VIP) was analyzed to provide support for the preparation of composite VIP. 【Method】 The effects of different wood fiber content on microstructure, pore structure and radiative conductivity of composite VIP core were investigated by SEM, mercury porosimetry and FTIR. The thermal conductivity of composite VIP at different ambient temperatures was tested by the heat flow meter. 【Result】 Most of the wood fiber voids and pits were filled with fumed silica nanoscale powder, and the three-dimensional spatial structure network constructed by wood fiber and fumed silica was built. When the

【收稿日期】 2018-08-10

【基金项目】 福建省产业技术联合创新项目“纳米重组木纤维真空绝热板的研发与产业化”(119k-6015001A);福建省科技计划(区域发展)项目“高强度轻质纤维板产业化开发”(2017N3009);福建农林大学科技创新专项基金项目“木纤维基保温材料制备及其性能研究”(KFA17554A)

【作者简介】 王保文(1992-),男,福建宁德人,在读硕士,主要从事生物质材料研究。E-mail:2480311373@qq.com

【通信作者】 戴达松(1980-),男,福建漳州人,讲师,硕士生导师,主要从事生物质材料及纳米材料研究。
E-mail:2544360@163.com

mass fraction of wood fiber was 40%, the total pore volume, porosity and average pore size of the VIP were $4.61 \text{ cm}^3/\text{g}$, 60.6% and $0.13 \text{ }\mu\text{m}$, respectively. When the ambient temperature was $25 \text{ }^\circ\text{C}$ the radiative thermal conductivity of vacuum insulation panel was $0.60 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ and the total thermal conductivity was $6.58 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. When the environment temperature was $55 \text{ }^\circ\text{C}$, the total thermal conductivity was $7.21 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Compared with the fumed silica core material without wood fiber, the comprehensive performance cost was reduced by 28.7%. **【Conclusion】** The use of wood fiber instead of partial fumed silica to prepare composite VIP can greatly reduce the cost of core material while maintain good insulation performance, which has very wide application prospect.

Key words: wood fiber; fumed silica; vacuum insulation panel; pore structure; thermal conductivity

近年来,随着能源危机的出现,我国开始大力倡导发展绝热节能材料,以期满足绿色、环保、低碳、循环经济的中长期发展需要。真空绝热板(vacuum insulation panel, VIP)是一种高效轻质保温材料,隔热性能优异,保温效果是传统保温材料的 3~8 倍,所以只需很小的厚度(10~40 mm)就可以达到相同的保温技术要求,使其在实际应用过程中能够大大提高空间利用率^[1-4]。

VIP 主要由隔热芯材、气体阻隔袋和吸气剂构成,其中芯材不仅影响着 VIP 的固体导热、气体导热和辐射导热,还是影响其稳定性和耐热性的关键因素之一^[5-7]。为了减小各项导热, VIP 芯材通常由多孔材料构成^[8-9]。阚安康等^[10]研究表明,开孔率大于 95%,孔径为 140~220 μm ,体积质量为 45~60 kg/m^3 的聚氨酯适合作为 VIP 的芯材; Di 等^[11]研究发现,短切玻璃纤维 VIP 的隔热性能和使用寿命取决于芯材、气体阻隔袋、几何尺寸、温度和相对湿度等,并认为 VIP 的最佳厚度为 10~25 mm。泡沫类和纤维类芯材虽然隔热性能好且成本低,但是都存在孔径较大(一般高于 10 μm)的缺点,这使其对 VIP 板内真空度要求较高,一旦板内气压高于 100 Pa 气体导热系数将快速升高,致使 VIP 隔热性能大大降低,严重影响其使用寿命。粉末类芯材主要是气相 SiO_2 ,具有保温性能好、质轻、孔径小、耐高温等优点,是一种较理想的 VIP 芯材原料,但是其价格昂贵,生产过程也易被人体吸入而危害人体健康,并且属于化工原料,不可再生,产品废弃后不易降解,这些缺点都大大限制了粉末类芯材的广泛应用^[12]。因此,为了推动 VIP 的广泛使用,寻找价格低廉、绿色环保的芯材原料作为替代物成为当前的研究热点。2017 年, Tetlow 等^[13]采用纳米纤维素晶体作为芯材制备 VIP,研究了芯材体积质量和遮光剂用量对 VIP 隔热性能的影响; Zhuang 等^[14]通过微波处理对软木进行结构重整,并与气相 SiO_2

真空复合制备 VIP,结果表明当软木质量分数为 50%时, VIP 导热系数为 $6.00 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。木纤维是一种绿色环保的天然保温材料,轻质、无毒、可降解、来源广泛、价格低廉,与粉体材料混合后易形成三维网状结构,可提高系统的稳定性、强度和均匀度^[15-17]。

本研究将木纤维作为气相 SiO_2 替代物制备复合 VIP,通过优化木纤维在芯材中的比例,采用模压成型工艺制备一种价格低廉、高效环保的 VIP 复合芯材,通过测试木纤维/气相 SiO_2 复合 VIP 的孔隙率、孔径、导热系数和微观形貌等,分析不同木纤维添加量对 VIP 芯材微观形貌、孔隙结构和隔热性能的影响,旨在为高性能、低成本 VIP 的开发和应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

采用的试验材料有:木纤维,长度为 450~1 550 μm ,直径为 11~46 μm ,福人木业(福州)有限公司;气相 SiO_2 ,白色粉末,粒径 10~20 nm,比表面积 $(200\pm 25) \text{ m}^2/\text{g}$,倍墨粉体化工有限公司;炭黑,黑色粉末,比表面积 $(80\pm 10) \text{ m}^2/\text{g}$,上海井宏化工科技有限公司;尼龙网袋,200 目(孔径 0.074 mm),台州路桥银帆筛网厂;气体阻隔袋,福建赛特新材股份有限公司。

1.2 木纤维/气相 SiO_2 复合 VIP 的制备

1.2.1 木纤维/气相 SiO_2 复合芯材的制备 称取不同质量分数的气相 SiO_2 ,依次加入不同质量分数木纤维和质量分数为 5% 的炭黑,迅速混合均匀后装入尼龙网袋中,放入 200 mm \times 200 mm \times 10 mm 的模具中,设定压力为 1 MPa,冷压 5 min,控制芯材体积质量为 200~220 kg/m^3 ,然后在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥至恒质量,即得不同的木纤维/气相 SiO_2 复合芯材。表 1 为不同复合 VIP 芯材中各组分的质量分数。

表 1 不同复合 VIP 芯材中各组分的质量分数

Table 1 Mass fractions of components in different composite VIP cores

样品编号 Sample number	气相 SiO ₂ Fumed silica	木纤维 Wood fiber	炭黑 Carbon black	样品编号 Sample number	气相 SiO ₂ Fumed silica	木纤维 Wood fiber	炭黑 Carbon black
1	95	0	5	4	65	30	5
2	85	10	5	5	55	40	5
3	75	20	5	6	45	50	5

1.2.2 木纤维/气相 SiO₂ 复合 VIP 的制备 将上述所得芯材放入气体阻隔袋中进行真空封装,热封温度为 150 ℃,VIP 板内真空度为 0.1 Pa。

1.3 芯材 SEM 表征

采用日立 SU8010 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察复合芯材的微观形貌。在上述制备所得复合芯材上截取尺寸约为 10 mm×10 mm×5 mm 的样品,利用导电胶将其固定于样品台上,在真空条件下进行喷金处理,采用二次电子成像模式进行检测,最大加速电压为 3 kV。

1.4 VIP 导热系数测试

采用德国耐驰 HFM436 热流法导热分析仪测定 VIP 的导热系数。将 200 mm×200 mm×10 mm 的 VIP 试样置于导热分析仪内,设定环境平均温度分别为 15,25,35,45 和 55 ℃,热板与冷板温差为 20 ℃,标准差为 2%。

1.5 VIP 芯材综合性能成本计算

VIP 芯材成本的计算方法如果仅考虑原料成本是远远不够的,为此笔者通过综合原料成本、芯材质量和 VIP 的导热系数 3 方面因素计算 VIP 芯材综合性能成本。VIP 芯材综合性能成本 (C_p) 计算公式为:

$$C_p = R \cdot M \cdot k_i \quad (1)$$

式中: R 为原料成本, M 为芯材质量, k_i 为常温下 VIP 的导热系数。

1.6 芯材压汞仪测试

采用美国 Autopore III 9420 型全自动压汞仪测定复合芯材的孔隙率、孔径、总孔体积,称取约 0.06 g 复合芯材,装入固体膨胀计内,密封后将其放入低压站内进行分析,然后再进行高压分析;设定排气压力为 6.7 Pa,排气时间 5 min,汞填充压力 3.7 kPa,平衡稳定时间 5 s。

1.7 导热分析

1.7.1 气体导热 气体在 VIP 内部形成的热传递主要是气体导热和对流导热,其大小主要取决于气体分子的平均自由程和芯材孔径。常温条件下气体导热系数 (k_G) 的计算公式为^[18]:

$$k_G = \frac{k_0}{1 + (0.032/P\Phi)} \quad (2)$$

式中: k_0 为静止空气在常温下的导热系数 ($k_0 = 25.00 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$), P 为 VIP 板内气压, Φ 为孔径。

1.7.2 辐射导热 采用美国热电公司的 Nicolet380 傅里叶红外光谱分析仪 (FTIR) 测定复合芯材的透射率。称取 0.2 g 溴化钾粉末与 0.002 g 样品混合研磨均匀,随后在压片机内压制直径为 13 mm 的薄片,进行红外光谱测试。光谱仪的分辨率为 1 cm^{-1} ,扫描波数范围为 $1\,250 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$,扫描次数 32。

比消光系数 (e^*) 的计算公式为^[19]:

$$e^* = -\frac{\ln(\tau)}{L\rho} \quad (3)$$

式中: τ 为透射率, L 为薄片等效厚度, ρ 为样品密度。

Rosseland 平均消光系数的计算公式为^[20]:

$$E(T) = e^* \rho \quad (4)$$

辐射导热系数的计算公式为^[21]:

$$k_R = \frac{16n^2\sigma T^3}{3E(T)} \quad (5)$$

式中: n 为折射率, σ 为玻尔兹曼常数 ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$), T 为平均温度。

1.7.3 固体导热 VIP 的导热系数可近似表示为固体导热、气体导热和辐射导热之和^[22],而在真空条件下,气体导热近乎为 0,此时固体导热的值可近似通过下式计算:

$$k_S = k_{\text{tot}} - k_R \quad (6)$$

式中: k_S 为固体导热系数, k_{tot} 为总导热系数, k_R 为辐射导热系数。

2 结果与分析

2.1 木纤维/气相 SiO₂ 复合芯材的微观形貌表征

图 1 为木纤维/气相 SiO₂ 复合芯材的扫描电镜图,其中展现了复合芯材多组分和多尺度的三维空间结构特征,既有纳米级的气相 SiO₂,也有微米级的木纤维和炭黑,每种材料都有其特有的功能:气相

SiO₂ 不仅是 VIP 的主要支撑成分,还是其阻挡热量传递的关键所在;木纤维能够增强 VIP 的机械强度,防止芯材结构坍塌,提高尺寸稳定性,并且具有优良的保温、隔热性能;炭黑能够有效降低 VIP 的辐射导热^[23]。由图 1-(a)可以看出,卷曲的木纤维在复合芯材内部纵横交错,气相 SiO₂ 紧密地聚集在

纤维之间,炭黑则随机分散于芯材之中,所有材料共同形成一个完整连续的多尺度三维空间结构网络。从图 1-(b)、(c)可以看到,部分气相 SiO₂ 聚集于纤维纹孔中,这使芯材整体更加致密,机械强度得到提高,并且使得芯材孔径减小。

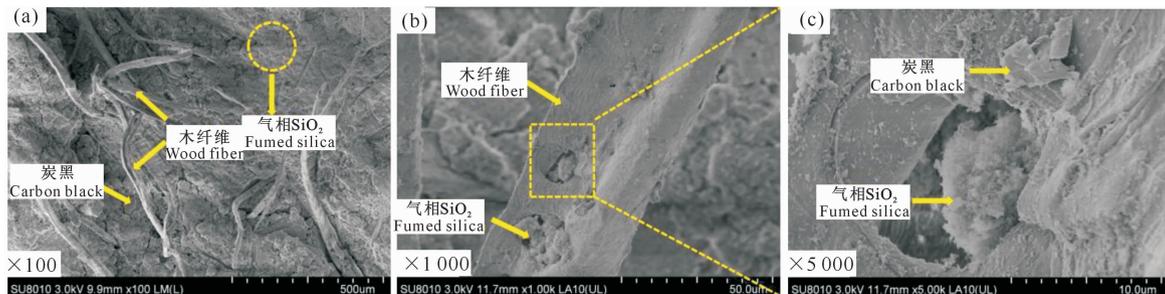


图 1 木纤维/气相 SiO₂ 复合芯材的扫描电镜观察结果

Fig. 1 SEM observation of wood fiber/fumed silica composite core

2.2 木纤维/气相 SiO₂ 复合 VIP 的导热性能

2.2.1 木纤维/气相 SiO₂ 复合 VIP 的导热系数和成本 图 2 为不同木纤维用量对木纤维/气相 SiO₂ 复合 VIP 导热系数和芯材综合性能成本的影响。由图 2 可知,在常温下,木纤维质量分数从 0 提高到 40%时,导热系数逐渐升高,从 5.45 mW/(m·K) 逐渐升高至 6.58 mW/(m·K),随后慢慢趋于平缓,但是当木纤维质量分数从 40%上升到 50%时,导热系数有一个较大升高,从 6.58 mW/(m·K) 上升到 8.10 mW/(m·K),升高了 1.52 mW/(m·K)。VIP

芯材的综合性能成本综合考虑原料的价格、芯材质量和 VIP 导热系数而确定^[22]。从图 2 可以看出,木纤维质量分数在 0~40%时,VIP 芯材的综合性能成本逐渐减小,当木纤维质量分数为 40%时达到最小值,相比于未添加木纤维的气相 SiO₂ 芯材,综合性能成本降低了 28.7%;但是当木纤维质量分数继续增加至 50%时,由于 VIP 导热系数上升较大,芯材综合性能成本反而增加。综合分析可推测,木纤维/气相 SiO₂ 复合 VIP 较合适的木纤维质量分数为 40%。

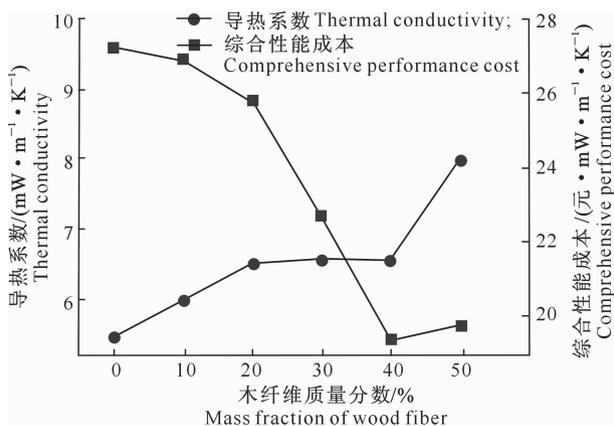


图 2 不同木纤维质量分数对木纤维/气相 SiO₂ 复合 VIP 导热系数和综合性能成本的影响

Fig. 2 Effect of different wood fiber contents on thermal conductivity and comprehensive performance cost of composite VIP

2.2.2 环境温度对木纤维/气相 SiO₂ 复合 VIP 导热系数的影响 VIP 对环境温度的适应性是评价其耐候性的重要指标之一。由图 3 可以看出,当环境

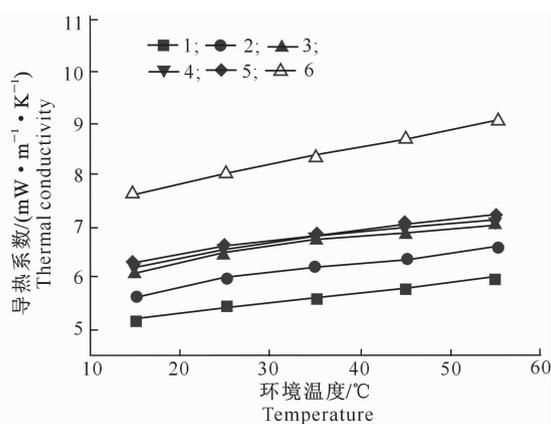


图 3 环境温度对不同木纤维/气相 SiO₂ 复合 VIP 导热系数的影响

Fig. 3 Effect of different ambient temperatures on thermal conductivity of different composite VIP

温度从 15 °C 升高到 55 °C 时,6 个样品的导热系数都呈现上升趋势,这是因为随着环境温度的升高,VIP 辐射导热增强,导热系数也随之上升。由图 3

可知,当木纤维质量分数为 0~40%,环境温度从 15 °C 上升到 55 °C 时,VIP 导热系数随温度上升曲线相对平缓,说明在该范围内木纤维的添加对 VIP 的辐射导热无明显影响;在木纤维质量分数为 40% 时,环境温度从 15 °C 上升到 55 °C,导热系数从 6.27 mW/(m·K) 上升到 7.21 mW/(m·K),增加了 0.94 mW/(m·K),而当木纤维质量分数为 50% 时,环境温度从 15 °C 上升到 55 °C,导热系数从 7.61 mW/(m·K) 上升到 9.03 mW/(m·K),增加了 1.42 mW/(m·K),这可能是由于复合芯材中只添加了少量的炭黑作为遮光剂降低辐射导热,而过量的木纤维逐渐抵消了炭黑的作用,致使导热系数随温度升高而增加较大。

2.3 木纤维/气相 SiO₂ 复合芯材的孔隙结构

多孔材料的孔隙结构通常由总孔体积、孔隙率和平均孔径构成,表 2 为样品编号 1,5 和 6 的 3 种木纤维/气相 SiO₂ 复合芯材通过压汞法测定的孔隙结构参数。由表 2 可知,在木纤维/气相 SiO₂ 复合芯材中木纤维的质量分数从 0 增大到 50% 时,总孔体积从 4.29 cm³/g 升高到 4.71 cm³/g,孔隙率从 53.1% 增加到了 62.1%,这可能是由于压汞法测试的范围通常为大孔和介孔,不包括微孔,而添加一定量木纤维能够提高芯材大孔和介孔的数量。同时可以看到样品 5 的平均孔径为 0.13 μm,而样品 1 的平均孔径为 0.18 μm,这可能是因为单纯的纳米级气相 SiO₂ 粒子在空间排列过程中相对分散,添加一定量木纤维后,气相 SiO₂ 粒子在其空隙、孔道、纹孔内聚集,经过模压成型后使得颗粒间排列更加紧凑,大孔减小,而当木纤维质量分数过大时,纤维本身以及纤维间交织存在的孔径较大,使得平均孔径开始增大。

表 2 不同木纤维/气相 SiO₂ 复合芯材孔隙结构参数的变化

Table 2 Changes of pore structure parameters of different wood fiber/fumed silica composite core

样品编号 Sample number	总孔体积/ (cm ³ ·g ⁻¹) Total pore volume	平均孔径/μm Average pore size	孔隙率/% Porosity
1	4.29	0.18	53.1
5	4.61	0.13	60.6
6	4.71	0.29	62.1

图 4 为样品编号 1,5 和 6 的 3 个复合芯材的差异入侵值分布曲线^[24],其能够较好地反映材料中大小不同的毛孔数量。图 4 的横坐标主要分为 3 个部分,分别为微孔(孔径<0.002 μm)、介孔(孔径为 0.002~0.050 μm)和大孔(孔径>0.050 μm)。由

图 4 可知,样品 1,5 和 6 在毛孔孔径为 0.01~0.03 μm 时都出现 1 个峰值,右边大于 0.03 μm 和左边小于 0.01 μm 范围内的差异入侵值都相对较低,即 3 个样品的孔径主要分布在介孔范围内,微孔和大孔相对较少。从图 4 还可以看出,样品 5 在毛孔孔径为 0.01~0.03 μm 时出现的峰值最高,这说明在该范围内其毛孔数量相对较多。

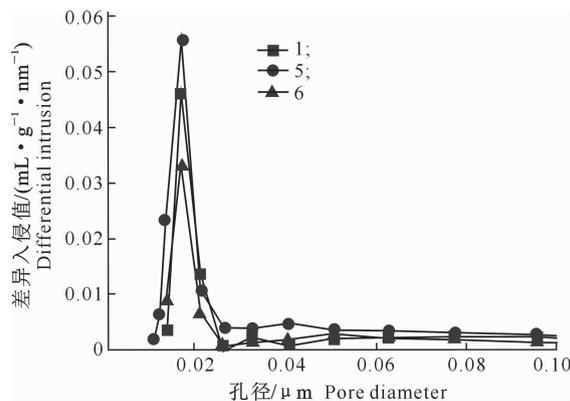


图 4 不同木纤维/气相 SiO₂ 复合芯材的差异入侵值分布曲线

Fig. 4 Distribution of differential intrusion of different wood fiber/fumed silica composite cores

2.4 木纤维/气相 SiO₂ 复合 VIP 的导热分析

2.4.1 气体导热 图 5 为样品 1,5 和 6 采用压汞法所得平均孔径,通过式(2)计算后所得不同板内气压下木纤维/气相 SiO₂ VIP 板的气体导热系数。从图 5 可以看出,当板内气压低于 1 000 Pa 时,气体导热系数基本可以忽略不计,但在实际应用过程中,由于外界气体的不断渗透和芯材本身也会释放气体,VIP 板内的气压会随着使用时间的增加而不断升高,使得 VIP 气体导热系数也会随之提高,所以芯材孔径在一定程度上决定了 VIP 的使用寿命^[25]。当气压为 1 000 Pa 时,样品 1,5 和 6 的气体导热系数分别为 0.1,0.1 和 0.2 mW/(m·K);而当气压上升至 100 000 Pa,即大气压下时,3 个样品的气体导热系数分别升至 8.9,7.1 和 11.9 mW/(m·K)。综上分析可知,样品 5 的气体导热系数随气压升高而增加最为缓慢,使用寿命相对较长。

2.4.2 辐射导热 在真空状态下,VIP 芯材的气体导热几乎可以忽略不计,所以辐射导热是影响其隔热性能的重要因素之一^[26]。图 6 为通过 FTIR 测试结果,利用公式(3)、(4)和(5)计算所得常温 25 °C 下不同样品在 2.5~7.5 μm 波长范围内的辐射导热系数变化曲线^[27]。从图 6 可以看出,常温下,1,5 和 6 3 个样品的辐射导热系数总体相对较小,都低

于 $1.00 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$;随着木纤维质量分数增加,辐射导热系数总体呈现上升趋势。通过计算可知,

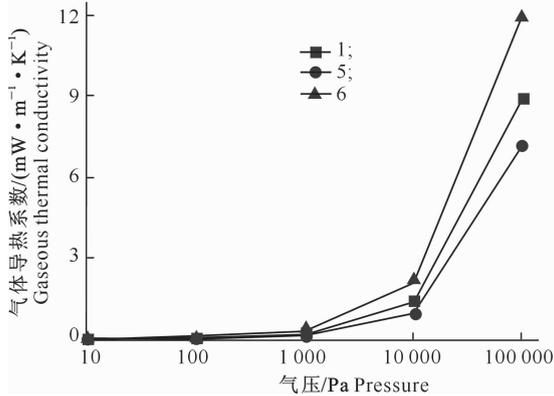


图 5 不同木纤维/气相 SiO_2 复合芯材的气体导热系数与气压和孔径的关系

Fig. 5 Relationship between gas thermal conductivity and air pressure and pore size of different wood fiber/fumed silica composite cores

2.4.3 固体导热 由图 3 可知,样品 1,5 和 6 在常温条件下的总导热系数分别为 $5.45, 6.58$ 和 $8.00 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$,通过式(6)计算可知样品 1,5 和 6 的固体导热系数分别为 $4.94, 5.98$ 和 $7.26 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$,分别占各自总导热系数的 90.64% , 90.88% 和 90.75% ,由此可知常温条件下,固体导热在 VIP 传热过程中起到决定性作用。此外,当木纤维质量分数从 0 提高至 40% 时,固体导热系数只增加了 $1.04 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$;而当木纤维质量分数从 40% 提高至 50% 时,固体导热系数增加了 $1.28 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$,经综合分析可知,木纤维/气相 SiO_2 复合 VIP 较合适的木纤维质量分数为 40% 。

3 结论

1) 将木纤维与气相 SiO_2 复合,通过模压成型和真空封装后可制备出一种低成本高性能真空绝热板,具有十分广阔的应用前景。

2) 木纤维/气相 SiO_2 复合真空绝热板最佳配比:木纤维质量分数为 40% ,气相 SiO_2 质量分数为 55% ,炭黑质量分数为 5% ,所制备复合芯材的总孔体积为 $4.61 \text{ cm}^3/\text{g}$,平均孔径为 $0.13 \mu\text{m}$,孔隙率为 60.6% ,气体导热系数随 VIP 板内气压升高而缓慢增加,使用寿命相对较长。

3) 在最佳配比条件下制得的木纤维/气相 SiO_2 复合真空绝热板,在环境温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时辐射导热系数为 $0.60 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$,固体导热系数为 $5.98 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$,总导热系数为 $6.58 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

样品 1,5 和 6 的平均辐射导热系数分别为 $0.51, 0.60$ 和 $0.74 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

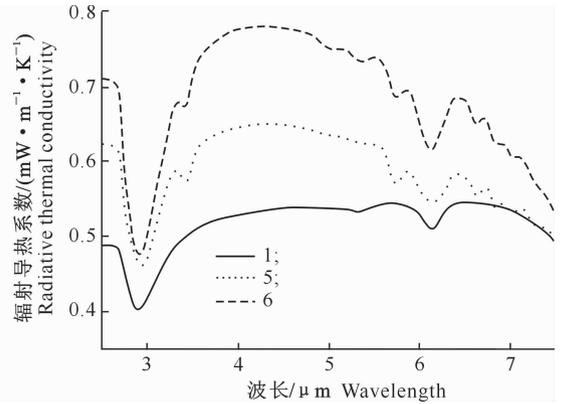


图 6 常温条件下不同木纤维/ SiO_2 复合芯材辐射导热系数的变化曲线

Fig. 6 Variation of radiative thermal conductivity at room temperature for different composite core

而当环境温度升至 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,总导热系数为 $7.21 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$,相比于未添加木纤维的 SiO_2 芯材,综合性能成本降低了 28.7% 。

[参考文献]

- [1] Li C D, Chen Z F, Wu W P, et al. Core materials of vacuum insulation panels: a review and beyond [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 174-177: 1437-1440.
- [2] Baetens R, Jelle B P, Thue J V, et al. Vacuum insulation panels for building applications: a review and beyond [J]. Energy and Buildings, 2014, 42(2): 147-172.
- [3] Alam M, Singh H, Suresh S, et al. Energy and economic analysis of vacuum insulation panels (VIPs) used in non-domestic buildings [J]. Applied Energy, 2017, 188: 1-8.
- [4] Kalnaes S E, Jelle B P. Vacuum insulation panel products: a state-of-the-art review and future research pathways [J]. Applied Energy, 2014, 116(3): 355-375.
- [5] Caps R, Fricke J. Thermal conductivity of opacified powder filler materials for vacuum insulations 1 [J]. International Journal of Thermophysics, 2000, 21(2): 445-452.
- [6] Zhao J J, Duan Y Y, Wang X D, et al. Optical and radiative properties of infrared opacifier particles loaded in silica aerogels for high temperature thermal insulation [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 70(8): 54-64.
- [7] 司 坤. 真空绝热保温墙板的制备技术与性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [8] Si K. Preparation and performance of vacuum insulation wall panel [D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [8] 陈照峰, 张俊雄, 王伟伟, 等. 真空绝热板技术的研究现状及发展趋势 [J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(1): 1-16.
- [8] Chen Z F, Zhang J X, Wang W W, et al. Review of vacuum in-

- sulation panel technology and its development [J]. Transactions Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(1):1-16.
- [9] Fricke J, Schwab H, Heinemann U. Vacuum insulation panels-exciting thermal properties and most challenging applications [J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(4): 1123-1139.
- [10] 阚安康, 韩厚德, 纪 珺, 等. 开孔聚氨酯真空绝热板芯材的研究 [J]. 绝缘材料, 2008, 22(2): 45-48.
Que A K, Han H D, Ji J, et al. Research on open-cell rigid polyurethane foam for vacuum insulated panel core [J]. Insulating Materials, 2008, 22(2): 45-48.
- [11] Di X B, Gao Y M, Bao C G, et al. Thermal insulation property and service life of vacuum insulation panels with glass fiber chopped strand as core materials [J]. Energy and Buildings, 2014, 73(2): 176-183.
- [12] Davraz M, Bayrakci H C, Yusufoglu Y. The effect of fiber, opacifier ratios and compression pressure on the thermal conductivity of fumed silica based vacuum insulation panels [J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2016, 41(11): 4263-4272.
- [13] Tetlow D, Simon L D, Liew S Y, et al. Cellulosic-crystals as a fumed-silica substitute in vacuum insulated panel technology used in building construction and retrofit applications [J]. Energy & Buildings, 2017, 156(2): 187-196.
- [14] Zhuang J D, Ghaffar S H, Fan M Z, et al. Restructure of expanded cork with fumed silica as novel core materials for vacuum insulation panels [J]. Composites Part B Engineering, 2017, 127(2): 215-221.
- [15] 董 旭, 戴达松, 范砂仔, 等. 竹纤维真空绝热板芯材的结构和性能研究 [J]. 中国造纸, 2017(12): 45-50.
Dong X, Dai D S, Fan M Z, et al. Structure and property of the vacuum core material of insulation panel made of the bamboo fibers [J]. China Pulp & Paper, 2017(12): 45-50.
- [16] 马玉峰, 耿 祥, 王春鹏, 等. 桉木纤维预处理对酚醛泡沫复合材料性能的影响 [J]. 林业工程学报, 2018, 3(1): 97-102.
Ma Y F, Geng X, Wang C P, et al. Effect of pretreatment of eucalyptus fiber on properties of composite phenolic foams [J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(1): 97-102.
- [17] Campbell M D, Coutts R S P. Wood fibre-reinforced cement composites [J]. Journal of Materials Science, 1980, 15(8): 1962-1970.
- [18] Kwon J S, Jang C H, Jung H, et al. Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2009, 52(23): 5525-5532.
- [19] Modest M F. Radiative heat transfer [M]. Massachusetts: American Academic Press, 1993.
- [20] Singh H, Geisler M, Menzel F. Experimental investigations into thermal transport phenomena in vacuum insulation panels (VIPs) using fumed silica cores [J]. Energy & Buildings, 2015, 107(1): 76-83.
- [21] Kuhn J, Gleissner T, Arduini-Schuster M C, et al. Integration of mineral powders into SiO₂ aerogels [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995, 186(2): 291-295.
- [22] Li C D, Saeed M U, Pan N, et al. Fabrication and characterization of low-cost and green vacuum insulation panels with fumed silica/rice husk ash hybrid core material [J]. Materials & Design, 2016, 107: 440-449.
- [23] Kow K W, Yusoff R, Abdul Aziz A R, et al. Thermal insulative performance of bamboo leaf aerogel opacified using activated carbon compared with carbon black [J]. Advanced Materials Research, 2014, 941-944: 2482-2485.
- [24] Kan A, Kang L, Dan C, et al. Impact of barrier laminate on effective thermal conductivity and service-life of vacuum insulation panel [J]. Chinese Journal of Vacuum Science & Technology, 2015, 35(5): 538-543.
- [25] Simmler H, Heinemann U, Kumaran K, et al. Vacuum insulation panels study on VIP components and panels for service life prediction of VIP in building applications (Subtask A) [C]// Paris: International Energy Agency, 2005.
- [26] Brunner S, Wakili K G, Stahl T, et al. Vacuum insulation panels for building applications: continuous challenges and developments [J]. Energy & Buildings, 2014, 85: 592-596.
- [27] Alam M, Singh H, Brunner S, et al. Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite/fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core [J]. Energy and Buildings, 2014, 69(69): 442-450.