

建筑用真空绝热板芯材研究进展

吕 忠, 周 飞, 李松鹏

(安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘 要: 真空绝热板(VIP)是一种 A 级不燃超高效保温绝热材料, 导热系数可达到 $1\sim 3\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 保温效果是传统保温材料的 $5\sim 10$ 倍, 常应用于建筑、家电、船舶等领域。芯材是 VIP 的核心骨架, 决定着 VIP 保温性能、整体强度以及服役寿命。通过对比分析, 分类阐述了 4 类常见芯材: 泡沫类、纤维类、粉体类以及纤维-粉体复合类芯材的发展状况以及各自的优缺点, 特别是芯材对 VIP 板的导热系数、生产工艺和价格方面的影响; 总结了施工应用和研究过程中建筑用真空绝热板芯材所存在的问题, 展望了其发展趋势。

关键词: 真空绝热板(VIP); 芯材; 保温性能; 导热系数; 建筑节能

中图分类号: TU55⁺1.39 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2019)02-0155-06

Core Materials of Vacuum Insulation Panel in Building Wall: A Short Review

LV Zhong, ZHOU Fei, LI Songpeng

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma' anshan 243032, China)

Abstract: Vacuum insulation panel (VIP), a kind of ultra-efficient insulation materials with Class A fire rating, is widely employed in the field of building wall, home appliances and ships, because the thermal conductivity of VIP is lower than $1\sim 3\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ and the insulation efficiency is $5\sim 10$ times higher than the traditional insulation material. Core material composes the core skeleton of the VIP and partially determines the insulation performance, overall strength and service life of VIP. In this paper, by comparative analysis, four types of common core materials are classified; the development of foam, fiber, powder, and fiber-powder mixed core materials, including their advantages and disadvantages, especially the influence of core material on the thermal conductivity, production technology and cost. Some issues of the core materials of vacuum insulation panel in practical application and academic research are given and the development trend is proposed.

Key words: vacuum insulation panel (VIP); core material; insulation performance; thermal conductivity; building energy saving

1 前 言

随着中国经济的快速发展和人民生活水平的提高, 我国城镇化率已超过 47.5%, 既有建筑总面积达 440 亿 m^2 , 每年新增面积 20 亿 m^2 , 约占全世界建筑面积的一半^[1]。人们对建筑需求越来越高的同时, 建筑行业高能耗问题日趋凸显。2010 年建筑能耗占全社会总能耗的 28%, 且这一数据仍在攀升, 其中建筑制冷制热能耗约占据建筑总能耗的 65%, 而制冷制热能耗高的主要产生原因是建筑物保温效果差, 因此提高建筑物保温

节能效率迫在眉睫^[2]。真空绝热板作为一种新型建筑保温隔热材料, 非常适合现代建筑绿色、节能的发展要求。

真空绝热板(vacuum insulation panel, VIP)是指导热系数低于 $11.5\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的超级绝热保温材料, 主要由芯材、包裹芯材的膜材以及吸气剂 3 部分组成。其中, 芯材是为了保证真空绝热板有一定的强度; 膜材是为了维持真空绝热板内部的真空度; 吸气剂是为了吸除真空绝热板真空封装时的参与气体以及由于长期使用渗入的气体^[3-5], 如图 1 所示^[6]。VIP 之所以具有绝佳的保温隔热性能, 是因为其在真空绝热原理的基础上采用低导热率芯材以降低固体热传导, 同时尽可能地提高板内真空度并辅以吸气剂和干燥剂来吸附芯材中的水汽和气体以减少气体热传导, 再辅以提高性能膜材来降低热辐射, 从而达到高效保温节能的目的。在同等厚度条件下, VIP

收稿日期: 2017-12-18 修回日期: 2018-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408002); 安徽省自然科学基金项目(16808085QE111)

第一作者: 吕 忠, 男, 1982 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: zhonglv1982@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2019.02.10

具有 10 倍于传统材料的绝热性能^[7, 8], 是目前热导率最低的高效保温材料, 被称为超级绝热材料。但由于 VIP 成本价格较高等原因, VIP 在房屋建筑保温领域尚未大面积推广应用。

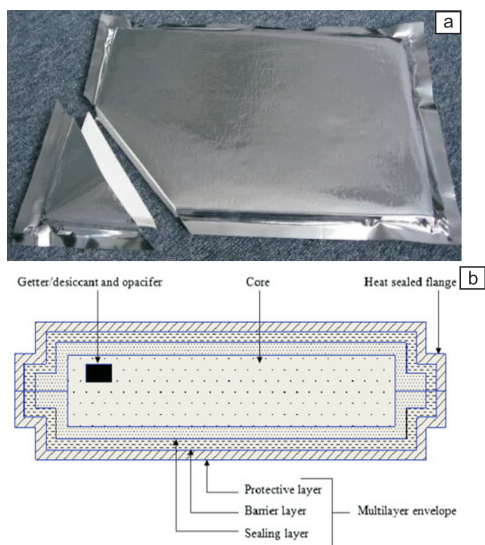


图 1 真空绝热板结构^[6]: (a) VIP 实物照片, (b) VIP 板截面图

Fig. 1 The structure of vacuum insulation panel^[6]: (a) image of VIP, (b) schematic sketch of cross section

VIP 与常见保温材料相比最大的优点在于其极低的热导系数。研究数据表明^[9, 10]: VIP 导热系数是常规聚苯板的 1/5、发泡聚氨酯的 1/4、保温砂浆和发泡水泥的 1/10~1/5。一般来说, 真空绝热板芯材采用轻质多孔材料进行隔热, 目的是尽可能地减小固体导热所占的导热量。且其采用真空封装的方法, 将残留在材料体系内的气体尽可能清除, 从而使得因气体对流导致的传热途径被消除或者被限制。且在相同热阻条件下, VIP 比其他保温材料具有更薄的厚度, 用 1~2 cm 厚的 VIP 就能达到 65% 的节能要求。住宅楼建筑使用 VIP 作为建筑外墙保温材料, 可以增加 1%~3% 的得房率, 较大幅度地增加建筑使用面积。近年来, VIP 不管是从原材料入手的试验制备研究, 还是传热机理分析, 都取得了长足进步, 为 VIP 板的大规模应用提供了保障^[11-14]。

然而, VIP 在建筑保温上的应用和研究还处于初级阶段, 尚有很多理论和实际应用问题需要解决, 如 VIP 的力学性能不足、表面易破损、实际服役寿命有待提高以及材料和制作成本较高等方面^[3, 15, 16]。芯材是建筑用 VIP 的核心骨架, 起着支撑作用, 决定着 VIP 的保温性能、整体强度以及服役寿命。目前国内还缺少对于建筑用真空绝热板芯材的分类与比较研究, 特别是导热系数、制备工艺和性价比方面的比较研究。

2 真空绝热板芯材

由于真空绝热板芯材主要用于支撑结构和阻止热传递(气体、对流以及辐射传热), 所以芯材要有较低的热导系数、一定的强度和一定的开孔率以便于抽真空。通常所采用的芯材多为微纳米级别材料且具有微孔隙结构和较高的开孔率, 这样在真空绝热板制备过程中可以最大程度排除板内气体并限制微孔隙内部剩余气体分子的运动, 使板内能达到一定真空度, 从而使 VIP 具有良好保温绝热性能。芯材不同, 所需抽真空的压力也不同^[17]。芯材主要分为以下 4 类: 泡沫类、纤维类、粉体类以及粉体-纤维复合类。总体来说, 不同类型芯材在制备工艺、导热系数、价格成本等方面各有其优势和不足。图 2 显示了不同类型芯材的 VIP 的导热系数^[18]。

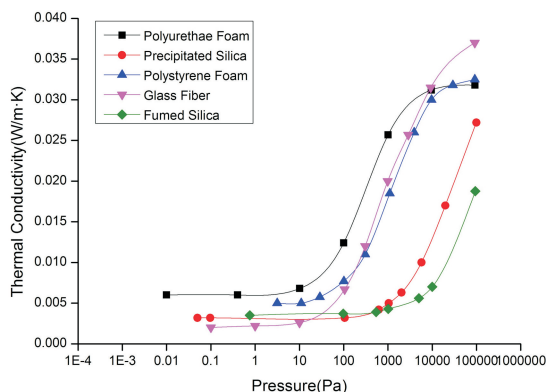


图 2 不同内部压力下不同芯材真空绝热板的导热系数(外部压力 10^5 Pa, 温度 20°C)^[18]

Fig. 2 Thermal conductivity of VIPs with different core materials under different pressures (air pressure = 10^5 Pa, $T = 20^\circ\text{C}$)^[18]

2.1 泡沫类芯材

发泡类聚合物芯材具有轻质、绝热、吸声以及低价等优点。20 世纪初泡沫类芯材就被提出用于制备 VIP, 主要包括发泡聚氨酯泡沫和发泡聚苯乙烯(PS)泡沫。聚氨酯泡沫按孔隙结构可分为开孔和闭孔聚氨酯, 其中高开孔率的聚氨酯泡沫作为芯材被广泛用于制备 VIP。

在泡沫类芯材早期研究过程中, Kodama 等^[19]发现开孔率为 98% 的聚氨酯泡沫在使用一段时间后导热系数上升会 50% 左右。De Vos 等^[20]采用开孔聚氨酯作为芯材制备 VIP, 在抽真空封装后, 当板内部真空度为 13.3 Pa 时, VIP 导热系数为 $7\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。De Vos 还使用不同孔径大小的聚氨酯制备 VIP, 研究发现聚氨酯孔径越小, 制备出的 VIP 板导热系数越小, 且服役寿命越长。随后, Manini^[21]也对发泡聚氨酯泡沫作为芯材制备的真空绝热

板进行了相关性能研究,实验结果表明,针对VIP的性能来说,发泡聚氨酯泡沫的芯材、封装所用的膜材与吸气剂(干燥剂)三者具有同等重要性。这是因为制备的VIP在服役期间会有气体不断渗透,从而导致VIP内部真空度消失,保温性能越来越差。2001年,Stroobants等^[22]采用硬质开孔泡沫作为芯材制备VIP,并对所制备VIP板表面出现的褶皱进行工艺处理,其方法主要是对制备出的VIP板进行再压缩来消除褶皱,试验过程压缩率控制在40%~90%之间,当压缩的VIP板密度达到 90.5 kg/m^3 时,VIP板导热系数为 $4.1\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。但是该研究存在两个较为严重的问题:一是再压缩后会导致板材容重增大,且在其服役寿命期间很可能会出现比较大的回弹现象,致使VIP板内芯材塌陷毁坏;二是板材再压缩有可能会使得封装膜材产生裂纹,影响VIP板的后期使用,严重的话有可能直接报废处理。

国内方面,Wong等^[23]以 CO_2 和 N_2 作为发泡剂制备PS泡沫并制备VIP板,发现PS芯材的开孔率越高,所制备的VIP板导热系数越低。实验数据表明,使用开孔率分别为50%(PS-1)、70%(PS-2)、90%(PS-3)和98%(PS-4)的发泡PS泡沫,制备出的VIP在一定真空度下导热系数分别为27、20、10和 $6.5\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$,且以 CO_2 和 N_2 为发泡剂制备PS泡沫在孔径、容重以及孔隙结构均有差别。从图3a可以看出,对于PS-1、PS-2和PS-3,采用 CO_2 作为发泡剂制备的PS孔径均大于由 N_2 作为发泡剂制备的PS;而对于PS-4而言,结论与之相反。图3b显示出以 CO_2 作为发泡剂制备的PS容重均高于 N_2 类。泡沫类材料作为芯材制备VIP具有成本低、保温性能良好等优点,但同时也存在如下缺陷:①真空度要求高;②采用的发泡剂对环境保护不利;③泡沫的燃烧等级为B级,不满足建筑防火A级要求。

2.2 纤维类芯材

纤维种类有很多,常见有玻璃纤维、聚丙烯纤维和矿物纤维等,其中玻璃纤维以其优异的保温绝热性、化学稳定性、低容重以及非易燃等特点常被用来作为芯材制备VIP板。玻璃纤维生产工艺分为两种:离心喷吹法和火焰喷射法。研究表明,采用纤维作为芯材制备的VIP板导热系数在 $32\sim 40\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间,其中纤维的种类、直径和长度是主要技术参数^[24, 25]。

Stanley等^[26]采用矿物棉作为芯材制备VIP板,其矿物棉纤维的表面喷涂了比表面积为 $150\text{ m}^2/\text{g}$ 的硅粉。因为在制备VIP芯板的生产工艺上通常不可以使用胶凝材料来提高芯板的整体性,而添加硅粉的方法可以有效增强纤维之间的粘聚力,同时板材在服役期间可以有效吸收渗透的水蒸气,进而延长使用寿命。当板内真空度在 $1.33\times 10^2\sim 1.33\times 10^3\text{ Pa}$ 之间时,该类VIP的导热系数居

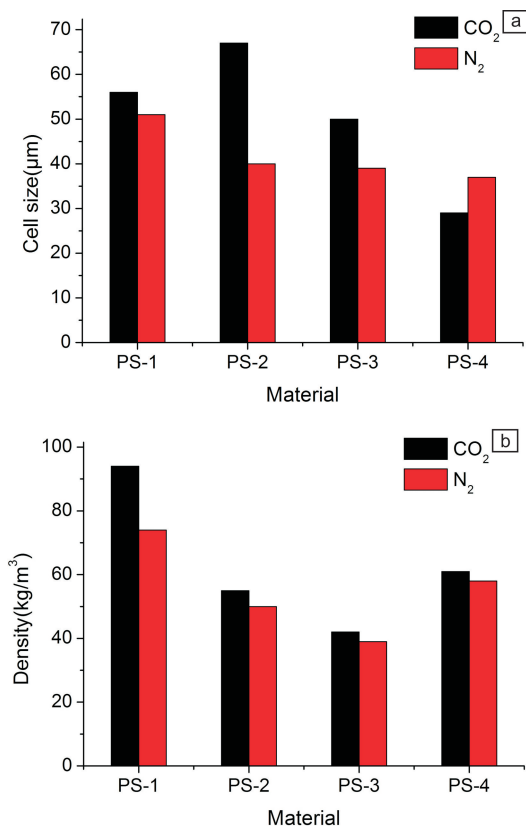
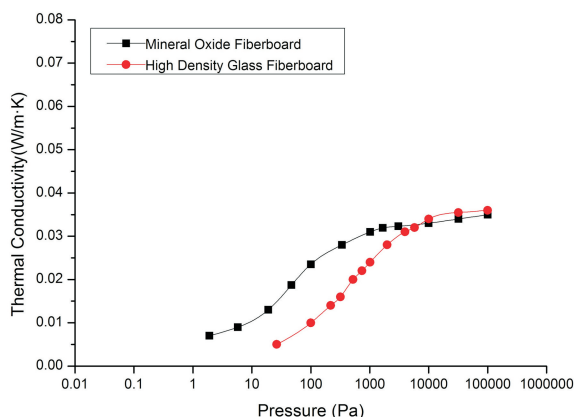


图3 以 CO_2 和 N_2 作为发泡剂制备的PS的孔径与容重^[23]: (a) 孔径, (b) 容重

Fig. 3 The cell size and density of PS prepared with CO_2 and N_2 as a foaming agent^[23]: (a) pore size, (b) bulk density

于 $9.6\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右。Mukhopadhyaya等^[27]采用不同种类纤维作为芯材来制备VIP,发现使用矿物氧化物纤维(mineral oxide fiber, MOF)作为芯材时,低压条件下导热系数处于 $7\sim 8\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 范围,但当压力高于10 Pa,该VIP导热系数开始呈现指数增长且高于 $10\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$;使用高密度玻璃纤维(high density glass fiber, HDGF)作为芯材制备VIP时,在板内压力处于20~30 Pa时,VIP的导热系数维持在 $4\sim 5\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间,具有非常理想的保温绝热性能,详见图4。

国内一些学者也进行了关于使用纤维作为芯材制备VIP的研究。周介明^[28]开发了一种湿法超细玻璃纤维棉真空绝热板,制备的VIP板具有轻质、耐腐蚀性好、稳定性好、保温隔热性能好等优点,且该VIP板厚度只有8~30 mm,使用温度范围在 $-50\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时导热系数为 $1.8\sim 2.8\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。2013年,Di等^[29]发现用短切丝玻璃纤维制备的VIP保温性能较好。当压力不超过10 Pa时,该真空绝热板导热系数低于 $1.5\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$;当压力上升到60 Pa左右时,该板的导热系数增加到 $4.9\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。2015年,Chen等^[30]

图 4 不同种类纤维制备 VIP 导热性能对比^[27]Fig. 4 Thermal conductivity of fibrous insulation materials^[27]

采用离心喷丝吹拉法制备了具有超分层玻璃纤维作为芯材的 VIP。由于超分层玻璃纤维芯材的纤维取向集中在与传热方向垂直的 $x-z$ 平面上, 该法制备出的 VIP 初始导热系数仅为 $1.25 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 与传统湿法制备出的芯材相比, 导热系数仅为其一半。当压力达到 1000 Pa 时, 其导热系数上升到 $13.03 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

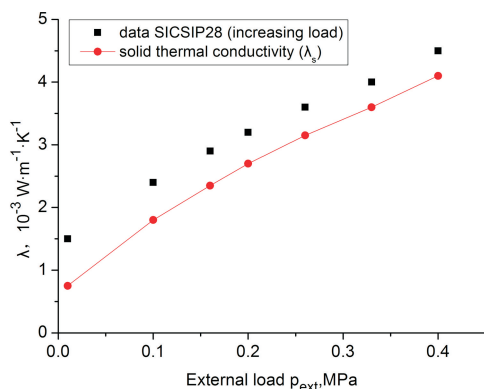
虽然以纤维类作为芯材制备 VIP 具有良好保温绝热性能, 但是纤维类型芯材 VIP 板也存在一些难以克服的缺陷, 如: ① 采用纤维类材料作为芯材制备 VIP 板, 真空封装会产生较大的压缩率, VIP 板的芯板在服役期间有可能会较大回弹, 造成墙体出现鼓包开裂等不良现象; ② 纤维板对真空度要求较高, 当板内真空度高于几十帕时, VIP 板保温性能基本丧失; ③ 纤维对人体健康不利, 会产生刺痒等不良反应。

2.3 粉末类芯材

通常用于制备 VIP 的粉体芯材多为无机非金属材料, 常见有: 气相二氧化硅、沉淀二氧化硅、硅灰、膨胀珍珠岩、轻质浮石与蛭石等。粉体类芯材制备的 VIP, 其导热系数一般在 $3 \sim 10 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间^[31]。

二氧化硅类芯材常用于制备 VIP, 常用的有气相二氧化硅、沉淀二氧化硅以及气凝胶。该类材料多为纳米级粉体材料, 在降低气体热传导方面效果明显。Kistler 等^[32]最先提出使用二氧化硅气凝胶来制备 VIP, 所制备出的 VIP 容重小、气孔间距在 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 之间, 且在 5000 Pa 压力下导热系数不超过 $4 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。但是由于二氧化硅气凝胶价格昂贵, 制备出的 VIP 价格相对其它芯材来说偏高很多, 限制了此类 VIP 的生产应用。后来, Cap 等^[33]采用不同配合比的膨胀珍珠岩、气相二氧化硅、沉淀二氧化硅以及防辐射粉末作为芯材制备 VIP。

在真空封装后, 上下表面附加玻璃盖板, 导热系数可以达到 $3 \sim 7 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。该实验还发现随着外部荷载的增加, VIP 板导热系数也在增加, 详见图 5。Cap 等^[33]研究了不同压力下膨胀珍珠岩的导热系数, 指出其在 0.2 MPa 下固体传热导热系数为 $4 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 但是膨胀珍珠岩的极限压力为 $p_{1/2} = 500 \text{ Pa}$ 。尽管膨胀珍珠岩因其良好的保温绝热性能以及低价被广泛作为芯材制备 VIP 板, 但是如果采用单一粉体芯材, 在模压成型工艺上较为困难, 且成型后的板材脆性较大、易开裂。2016 年, Chang 等^[34]分别采用硅藻土与玻化微珠部分替代气相二氧化硅制备 VIP。研究结果表明, 在压力低于 100 Pa 时, 掺加质量分数 50%、60% 以及 70% 硅藻土或玻化微珠组别相较于纯气相二氧化硅组别制备的 VIP 导热系数更低, 最低可达到 $8 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 但当压力开始呈现指数上升时, 掺加了硅藻土或玻化微珠组别导热系数均高于纯气相二氧化硅组; 在压力达到 0.1 MPa 时, 掺加了不同配比玻化微珠组别与纯气相二氧化硅组别导热系数近似, 处于 $29 \sim 31 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间。最近, Zhuang 等^[35]研究采用膨胀软木屑部分替代气相二氧化硅制备 VIP。利用两者孔隙结构上的差异性, 采用真空注入法使气相二氧化硅填充于膨胀软木屑孔隙内, 使整体结构更加致密, 从而可以有效降低导热系数。其中掺加了 50% 膨胀软木屑的组别综合表现最佳, 在压力低于 100 Pa 时, 该组导热系数达到 $6.3 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

图 5 掺加质量分数 20% 碳化硅的沉淀二氧化硅的导热系数与外部荷载关系^[33]Fig. 5 Thermal conductivity of precipitated SiO_2 added 20% SiC as a function of external load^[33]

可见, 粉体作为芯材具有如下优缺点: ① 粉体芯材多为纳米级, 对真空度敏感度不高, 可有效延长 VIP 服役寿命; ② 粉体芯材多为无机非金属材料, 建筑防火等级为 A 级; ③ 粉体芯材导热系数较低, 制备出的 VIP 能更好地满足保温绝热要求; ④ 有些粉体芯材具有难成型等缺陷, 同时粉体芯材吸入人体会对呼吸道有伤害。

2.4 粉体-纤维复合类

由于采用单一粉体作为芯材制备 VIP 普遍存在价格偏高以及脆性大易开裂等情形，科研机构及企业开始尝试采用粉体与纤维复合(适当配合比)作为芯材制备 VIP。粉体与纤维复合体系既可以填充粉体材料之间的孔隙，降低芯板内气体对流热传导，保证 VIP 具有良好保温隔热性能，又可以降低 VIP 成本，使之能更好投入生产供社会需求。粉体纤维复合材料模型详见图 6。

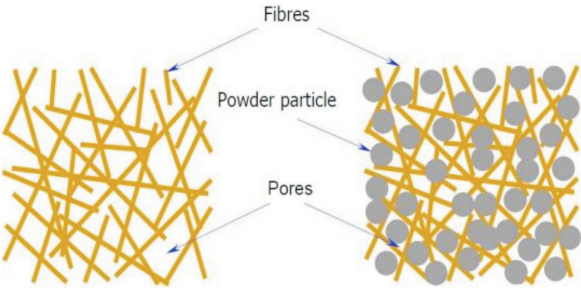


图 6 粉体纤维材料复合模型
Fig. 6 The mixing model of powder-fiber core material

2008 年，加拿大国家科学研究员会-土木工程研究院(NRC-IRC)员采用浮石与玻璃纤维板多层复合模压成型作为芯板制备 VIP，结果表明，其导热系数与采用气凝胶作为芯材制备 VIP 的导热系数大小相似，保温隔热表现均很优异^[27]。2014 年 Alam 等^[36]采用不同配比膨胀珍珠岩替代气相二氧化硅作为芯材制备 VIP，发现当用 50%(质量分数，下同)气相二氧化硅(FS)、30%膨胀珍珠岩(EP)、12%碳化硅(SiC)以及 8%聚酯纤维(PP)混合制备出的 VIP 板的综合表现最佳，该组芯板导热系数为 28 mW/(m·K)，并在成本方面可相对降低 20%左右，如图 7 所示。经真空封装后，在 50 Pa 压力下，该配比下 VIP 板导热系数约为 7.6 mW/(m·K)。2006 年，王东宁等^[37]采用二氧化硅气凝胶和纤维以一定的配合比进行混合作为芯材制备真空绝热板，制备后的板材硬度大，加工和使用方便且保温性能好，但是成本较高。2012 年，司坤等^[38]通过使用膨胀珍珠岩部分代替气相二氧化硅制备 VIP(其中掺加适量聚丙烯纤维)，得出以 50%膨胀珍珠岩替代气相二氧化硅制备出的 VIP，其导热系数为 9 mW/(m·K)，对比以纯气相二氧化硅制备的 VIP，容重大小基本没变化，导热系数增加了 25.6%，但是成本节约了 30%。该团队还研究了掺入不同种类纤维进行对比试验(短切玻璃纤维与聚丙烯纤维)。控制纤维掺量、搅拌速度以及搅拌时间相同，在相同成型工艺条件下，掺入短切玻璃纤维制备出的芯板表面存在明显束状褶皱，而聚丙烯纤维则没有，造成该现象的主要原因是玻璃纤维在搅拌过程中很难做到完全分散开，极易与粉体芯材

互裹成团成束，使芯板极易出现开裂损坏。2016 年，Li 等^[39]研究采用气相二氧化硅、中空玻化微珠以及短切聚酯纤维混合材料作为芯材制备 VIP，玻化微珠的添加能使复合芯材的孔隙率达到 80%~90%，平均孔径在 19~181 nm 之间。当玻化微珠掺量质量分数低于 26%时，制备出的 VIP 导热系数能够达到 7.2 mW/(m·K)。Li 还指出，采用 6%质量分数玻化微珠制备的 VIP 适合用于冰箱保温行业；掺加 26%质量分数玻化微珠制备的 VIP 适合于建筑保温行业。最近，研究人员使用二氧化硅、稻壳灰、炭黑、二氧化钛和聚酯短切纤维制备出了新型纤维-粉体芯材，该芯材制备的 VIP 不仅导热系数较低、具有较长的服役寿命，且降低了制备成本价格，具有较好的综合性能^[40]。

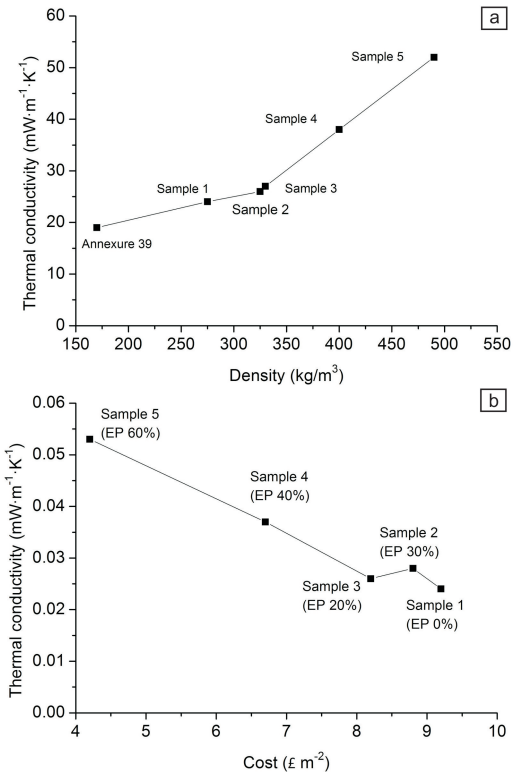


图 7 不同配比膨胀珍珠岩替代气相二氧化硅制备的芯板比较^[36]：(a) 导热系数及容重，(b) 成本
Fig. 7 Comparison of core panel with different ratio of expanded perlite instead of fumed silica^[36]：(a) thermal conductivity and bulk density, (b) cost

综上所述，粉体-纤维复合类芯材具有如下优缺点：① 复合体系的芯材结构减小了芯材的内部孔径，降低了气体热传导，可以降低芯板的导热系数；② 使得粉体和纤维两者不同组份之间的优势性能互补，可以解决单一粉体材料带来的成本高、难成型和强度低等问题；③ 主要缺陷是纤维在搅拌过程中可能会与粉体材料互相包裹而出现成团现象，造成芯板鼓包、开裂，降低成品率。

3 结 语

当今世界能源危机加剧,提高建筑物能源节约效率势在必行,其中,发展高性能外围护结构的保温隔热材料是建筑节能的重要组成部分。真空绝热板以其优异的保温性能受到广泛的关注,其中芯材是真空绝热板研究和应用的核心。芯材研究主要分为泡沫类、纤维类、粉体类和粉体-纤维复合类。泡沫类芯材由于发泡剂对环境不利以及泡沫的燃烧等级为 B 级而受到限制;纤维类虽然导热系数低,但是纤维对于真空度要求高且纤维类芯板在服役期间可能会出现回弹而失去保温效果;粉体类芯材具有优异的保温绝热性能,但是粉体类芯材制备的芯板强度极差且价格偏高(如气凝胶、气相二氧化硅等);粉体-纤维复合类芯材可以有效解决部分问题,如成本高、芯板强度低、保温性不良等,同时也会带来新的技术问题,如纤维与粉材互裹成团难分散、容重偏高、板材服役寿命预测和老化行为研究等。常见综合性能较为优异的复合类芯材有气相二氧化硅和聚丙烯纤维复合体系、气相二氧化硅和稻壳灰复合体系等。另外,某些特定的建筑施工领域还需要开发异形结构的 VIP 板,如表面带压槽类、带孔洞类以及曲面类等。异形 VIP 的出现同样是大势所趋,不仅大幅度提高了 VIP 板的使用灵活性,更是拓宽了 VIP 的目标市场,促进了 VIP 产业化发展。

参考文献 References

- [1] Gong Ren(宫 仁). *Builders' Monthly*(建筑工人)[J], 2012(7): 50.
- [2] Li Huiqiang(李会强). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [3] Chen Zhaofeng(陈照峰), Li Chengdong(李承东), Chen Qing(陈清), et al. *Science & Technology Review*(科技导报)[J], 2014, 32(9): 59–62.
- [4] Caps R, Beyrichen H, Kraus D, et al. *Vacuum*[J], 2008, 82(7): 691–699.
- [5] Di X B, Gao Y M, Bao C G, et al. *Energy & Buildings*[J], 2014, 73: 176–183.
- [6] Alam M, Singh H, Limbachiya M C. *Applied Energy*[J], 2011, 88(11): 3592–3602.
- [7] Li C D, Chen Z F, Boafu F E, et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(3): 539–543.
- [8] Li C D, Duan Z C, Chen Q, et al. *Materials & Design*[J], 2013, 50: 1030–1037.
- [9] Papadopoulos A M. *Energy & Buildings*[J], 2005, 37(1): 77–86.
- [10] Yang Chunguang(杨春光), Du Ping(都 萍), Zhang Li(张 丽). *New Buildings Materials*(新型建筑材料)[J], 2012, 39(8): 11–18.
- [11] Wang Y, Chen Z F, Yu S J, et al. *Materials and Design*[J], 2016, 99: 369–377.

- [12] Alotaibi S S, Riffat S. *International Journal of Energy Research*[J], 2014, 38: 1–19.
- [13] Kalnaes S E, Jelle B P. *Applied Energy*[J], 2014, 116: 355–375.
- [14] Aditya L, Mahlia T M I, Rismanchi B, et al. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*[J], 2017, 73: 1352–1365.
- [15] Jiang Liang(蒋 亮), Bao Yiwang(包亦望), Liu Xiaogen(刘小根), et al. *New Buildings Materials*(新型建筑材料)[J], 2013(6): 85–88.
- [16] Meng C, Kan A, Guo Z, et al. *Vacuum*[J], 2017, 54: 67–73.
- [17] Chen Zhaofeng(陈照峰), Zhang Junxiong(张俊雄), Wang Weiwei(王伟伟), et al. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*(南京航空航天大学学报)[J], 2017, 49(1): 1–16.
- [18] Garnier G, Yrieix B, Brechet Y, et al. *Journal of Applied Polymer Science*[J], 2010, 115(5): 3110–3119.
- [19] Kodama K, Yuge K, Masuda Y, et al. *Journal of Cellular Plastics*[J], 1995, 31(1): 24–37.
- [20] De Vos R, Rosbotham D, Deschaght J. *Journal of Cellular Plastics*[J], 1996, 32(5): 470–484.
- [21] Manini P. *Journal of Cellular Plastics*[J], 1999, 35(5): 403–420.
- [22] Stroobants J M. United States, US6322743B1[P]. 1999–01–18.
- [23] Wong C M, Hung M L. *Journal of Cellular Plastics*[J], 2008, 44(3): 239–259.
- [24] Jelle B P, Gustavsen A, Baetens R. *Journal of Building Physics*[J], 2010, 34(2): 99–123.
- [25] Nemanic V, Zumer M. *Energy & Buildings*[J], 2015, 90: 137–141.
- [26] Rusek S J. Canada, EP0675988[P]. 1994–07–19.
- [27] Mukhopadhyaya P, Kumaran K, Normandin N, et al. *Journal of Cold Regions Engineering*[J], 2008, 22(4): 103–123.
- [28] Zhou Jieming(周介明). China, CN201866468U[P]. 2011–06–15.
- [29] Di X B, Gao Y M, Bao C G, et al. *Vacuum*[J], 2013, 97(11): 55–59.
- [30] Chen Z, Chen Z F, Yang Z G, et al. *Energy*[J], 2015, 93: 945–954.
- [31] Kwon J S, Jung H, Yeo I S, et al. *Vacuum*[J], 2011, 85(8): 839–846.
- [32] Kistler S S, Caldwell A G. *Industrial & Engineering Chemistry*[J], 1934, 26(6): 658–662.
- [33] Caps R, Fricke J. *International Journal of Thermophysics*[J], 2000, 21(2): 445–452.
- [34] Chang B, Zhong L, Akinc M. *Vacuum*[J]. 2016, 131: 120–126.
- [35] Zhuang J D, Ghaffar S H, Fan M Z. *Composites Part B: Engineering*[J], 2017, 127: 215–221.
- [36] Alam M, Singh H, Brunner S, et al. *Energy & Buildings*[J], 2014, 69: 442–450.
- [37] Wang Dongni(王东宁), Li Xiaofeng(李晓峰), Pu Xiankai(蒲显开). China, CN2828520Y[P]. 2006–10–18.
- [38] Si Kun(司 坤). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [39] Li C D, Li B B, Chen Z F, et al. *Energy & Buildings*[J], 2016, 125: 298–309.
- [40] Li C D, Saeed M, Pan N, et al. *Materials and Design*[J], 2016, 107: 440–449.