

气凝胶纸蜂窝夹层板的隔热性能

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2021.04.005

孙 薇^{1,2} 王冬梅¹
柏子游¹ 朱 宏¹

1. 深圳职业技术学院
传播工程学院
广东 深圳 518055

2. 西安理工大学
印刷包装与数字媒体学院
陕西 西安 710048

摘 要: 为改善气凝胶复合材料的承压能力,设计了一种纸蜂窝作为夹层,两侧复合气凝胶复合材料的夹层板,并探究该夹层板能否取代聚氨酯泡沫,应用于冷库墙体保温夹层。利用导热系数仪测得的试验数据,对纸蜂窝、气凝胶复合材料、气凝胶纸蜂窝夹层板的隔热性能进行了分析,讨论材料厚度对气凝胶纸蜂窝夹层板导热性能的影响。结果表明:纸蜂窝的厚度较小时,气凝胶纸蜂窝夹层板的导热系数均低于聚氨酯泡沫板;当纸蜂窝厚度为10 mm、孔径为6 mm,气凝胶复合材料厚度为10 mm或15 mm时,气凝胶纸蜂窝夹层板的导热系数低于0.03 W/(m·K),满足我国保温隔热行业材料的使用要求。

关键词: 气凝胶;纸蜂窝;导热系数;隔热性能

中图分类号: TB484; TQ427.2⁺6 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2021)04-0032-06

引文格式: 孙 薇,王冬梅,柏子游,等.气凝胶纸蜂窝夹层板的隔热性能[J].包装学报,2021,13(4):32-37.

1 研究背景

气凝胶作为一种多孔功能性材料,其孔隙大小为1~100 nm,孔隙率、比表面积分别高达99.8%和1000 m²/g,密度低至0.03 g/cm³。气凝胶孔隙中充斥大量气体介质,因而具有优良的保温隔热性能^[1-3]。

气凝胶保温隔热性能优异,且在高温下性能稳定;但纯气凝胶具有强度低、易脆、不易成型等缺点。为了解决其力学性能差的问题,国内外许多学者采用加入增强纤维和遮光剂等方法,对其进行改良。Yang F.等^[4]利用静电纺丝和冷冻干燥技术,制备了超疏水可压缩纳米纤维复合气凝胶,该气凝胶在室

温下导热系数为0.031 W/(m·K),即使在100%湿度、80℃的高温高湿环境中,仍显现出0.048 6 W/(m·K)的低导热系数。Hung W. C.等^[5]选择玻璃纤维和碳纤维作为增强性材料,通过溶胶-凝胶法制备了由3层纤维组合的气凝胶复合材料,该复合材料的导热系数为0.031 W/(m·K),同时具有较高(2.846 MPa)的抗弯强度。徐凇等^[6]利用硅酸铝纤维、Al₂O₃纤维、莫来石纤维作为增强性骨架,制备了3种纤维增强气凝胶隔热复合材料,即使在1100℃的高温下,其导热系数也只有0.065 W/(m·K)。

目前冷库、建筑墙体的保温层主要使用聚氨酯泡沫板。由于配方与加工工艺的不同,聚氨酯泡沫板的

收稿日期:2021-03-12

基金项目:深圳市科技计划国际合作基金资助项目(GJHZ20180928161004981);广东省普通高校创新团队基金资助项目(219GKCXTD02)

作者简介:孙 薇(1996-),女,江苏徐州人,深圳职业技术学院、西安理工大学硕士生,主要研究方向为运输包装, E-mail:1253158235@qq.com

通信作者:王冬梅(1976-),女,河北献县人,深圳职业技术学院教授,博士,主要从事包装结构和运输包装研究, E-mail:szybz202202@163.com

保温隔热效果有差异但都不理想;而且聚氨酯泡沫等无法降解的材料在生产、使用和废弃后都会对环境造成严重污染。

气凝胶复合材料虽然具有导热系数低、孔隙率高等优点,但是不具备良好的承压性能。纸蜂窝的质量轻,可回收处理,是作为一种环保型材料,在隔音、隔热、自重、承压等方面都具有明显优势^[7-10]。因此,本课题组本文设计出以纸蜂窝作为夹层,两侧复合气凝胶复合材料的夹层板,并对其性能进行研究,以期得到一种可用于大型建筑墙体的具有较好保温、隔热、承压效果的材料。

2 实验

2.1 材料与仪器

1) 材料

气凝胶毡(玻璃纤维气凝胶复合材料),AG-F300,厚度分别为10,15,20 mm,深圳中凝科技有限公司;

聚氨酯泡沫(B1级聚氨酯泡沫),密度为40 kg/m³,河北鑫源保温建材公司;

纸蜂窝(由面纸和芯纸组成),具体参数如表1所示,惠州锦旺包装环保包装材料有限公司。

表1 纸蜂窝基本参数

Table 1 Basic parameters of honeycomb paperboard

蜂窝厚度 / mm	面纸克重 / (g·m ⁻²)	芯纸克重 / (g·m ⁻²)	蜂窝孔径 / mm
10	230	110	6
20	230	110	8
30	230	110	10
40	230	110	12

2) 仪器

恒温恒湿箱, LB-CB80, 深圳蓝博仪器检测有限公司;

导热系数测试仪, DRPL-III, 湘潭湘仪仪器有限公司。

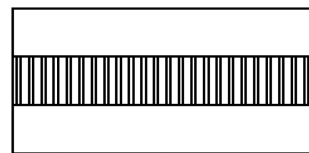
2.2 实验方法

2.2.1 试样制作

以纸蜂窝做夹层,上下各附着一层气凝胶复合材料制作成复合结构的气凝胶纸蜂窝夹层板,如图1所示。再将气凝胶复合材料、具有不同参数的纸蜂窝和气凝胶复合材料作成的夹层板、聚氨酯泡沫都裁剪成尺寸为200 mm×200 mm的试样。



a) 实物图



b) 结构示意图

图1 气凝胶纸蜂窝夹层板

Fig. 1 Aerogel paper honeycomb sandwich panel

注:阴影部分为纸蜂窝层,空白部分为气凝胶复合材料层。

2.2.2 导热系数测定

在不同环境中,材料的导热性能和力学性能不同。在潮湿环境下,夹层复合材料吸湿严重,导热性能会受严重影响,力学性能也会大幅度降低^[11-12]。因此,在测定导热系数前必须对试样进行预处理,具体操作步骤如下:

1) 将所有待测试样放置于恒温恒湿箱中,在23℃、80%湿度下处理24 h。

2) 采用导热系数测试仪测量试样的导热系数。冷板设置为10℃,热板设置为35℃,由仪器自带数据处理系统计算并显示所测试样的导热系数。

3 实验结果与分析

许多文献研究了SiO₂气凝胶复合材料的制备和隔热保温性能,其中王教方等^[13]对多层复合材料导热系数测定方法的研究表明,若多层复合材料的导热系数分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$,厚度分别为 h_1, h_2, \dots, h_n ,其总厚度为 H ,等效导热系数为 λ ,则根据热阻理论的定义得

$$\lambda = H / (h_1 / \lambda_1 + h_2 / \lambda_2 + \dots + h_n / \lambda_n) \quad (1)$$

从理论上说,气凝胶纸蜂窝复合材料的隔热性能,可分别测试气凝胶复合材料与纸蜂窝的导热系数,按照导热系数变化规律,选择最低的导热系数代入公式(1)即可获得两种材料复合的夹层板最低导热系数。下面分别研究纸蜂窝与气凝胶复合材料的导热系数。

3.1 纸蜂窝导热系数

在预实验时,发现纸蜂窝的参数,即厚度和孔径不同,其导热系数相差较大,因此分别以纸蜂窝厚度与孔径为变量进行单因素试验。

3.1.1 厚度对纸蜂窝导热系数的影响

为研究纸蜂窝厚度对导热系数的影响,在保证面纸克重与芯纸克重不变的情况下,对不同厚度的纸蜂窝导热性能进行对比。对取自恒温恒湿箱 23 ℃、80% 湿度环境中,孔径为 10 mm,厚度分别为 10, 20, 30, 40 mm 的纸蜂窝进行测试,测试结果如图 2 所示。

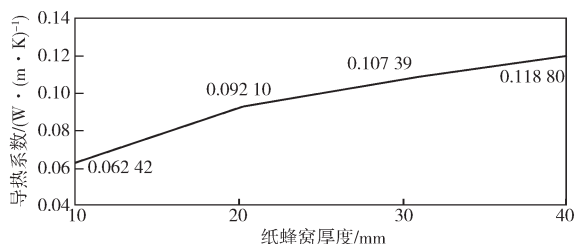


图 2 纸蜂窝的导热系数与厚度关系曲线

Fig. 2 The relationship curve between the thermal conductivity of paper honeycomb and its thickness

由图 2 可知,纸蜂窝的导热系数随厚度的增加而增大,即纸蜂窝的厚度越小,纸蜂窝的隔热性能越好。

3.1.2 孔径对纸蜂窝导热系数的影响

同样,为研究纸蜂窝蜂窝孔径对导热系数的影响时,在保证面纸克重与芯纸克重不变的情况下,对不同孔径大小的纸蜂窝导热性能进行对比。对取自恒温恒湿箱 23 ℃、80% 湿度环境中,蜂窝厚度为 10 mm,蜂窝孔径为 6, 8, 10, 12 mm 的纸蜂窝进行测试,测试结果如图 3 所示。

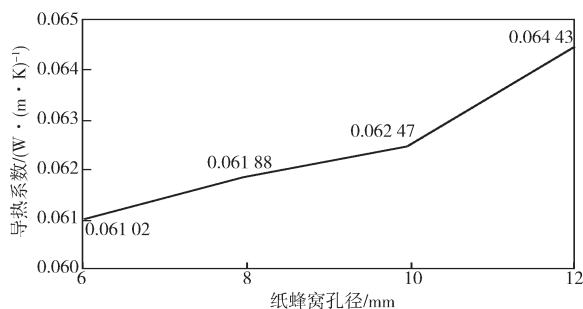


图 3 纸蜂窝的导热系数与孔径关系曲线

Fig. 3 The relationship curve between the thermal conductivity of paper honeycomb and the aperture size

由图 3 可知,纸蜂窝导热系数随其孔径增大而增

大,即纸蜂窝的孔径越小,纸蜂窝的隔热性能越好。相比于实心纸板,纸蜂窝内部存在大量干燥气体,干燥气体的导热系数远低于固体,因此蜂窝结构具有一定的隔热优势。

由图 2 和图 3 可以看出,纸蜂窝的导热规律与一般均匀材料的导热变化规律相反。主要是因为当蜂窝板的孔径较小时,其蜂窝孔径内部不会产生热对流或对流传热极小,故蜂窝孔径内的对流传热几乎可以忽略。此时,纸蜂窝的传热过程主要由材料的热传导和蜂窝孔之间的辐射传热组成。因此,蜂窝孔径越小,纸蜂窝导热系数越小^[14]。

综上,在复合纸蜂窝与气凝胶复合材料时,应优先选择厚度薄、孔径小的纸蜂窝。

3.2 气凝胶复合材料导热系数

在气凝胶复合材料的热传导过程中,气体传热与固体传热占主导地位,根据傅里叶方程^[15-17],得到气凝胶复合材料的导热系数公式为

$$\lambda = -\frac{Q \cdot h}{S \cdot \Delta T}, \quad (2)$$

式中: Q 为温度差导致的热量变化;

S 为面积;

ΔT 为温差;

h 为厚度。

由式(2)可知,在面积、冷热板温差等条件相同的情况下,材料的厚度是影响导热系数的重要因素。因此,本文选择厚度作为变量,测试气凝胶复合材料的导热系数,寻求气凝胶复合材料的最佳厚度,使其与纸蜂窝的复合夹层板隔热性能最优。测试结果如图 4 所示。

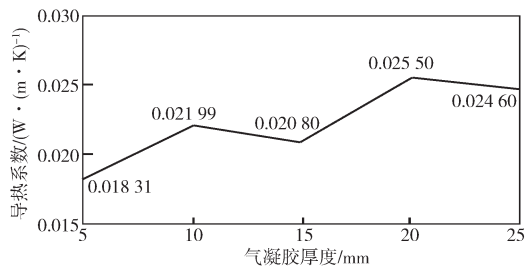


图 4 气凝胶复合材料的导热系数与厚度关系曲线

Fig. 4 The relationship curve between the thermal conductivity of aerogel composite and its thickness

从图 4 可以看出,随着气凝胶复合材料厚度的增加,导热系数整体呈波浪式增大的变化趋势,导热系数与厚度没有呈现明显的线性关系,无法确定其最佳

厚度。

3.3 气凝胶纸蜂窝夹层板导热系数

由 3.1 和 3.2 节中的测试结果可知: 纸蜂窝导热系数的变化规律是, 厚度、孔径越小, 导热系数越小。而气凝胶复合材料的导热过程涉及到热传导、热对流和热辐射 3 种传热方式, 不能直接测得导热系数的变化规律, 无法选择气凝胶复合材料的最低导热系数并应用于公式 (1), 因此在气凝胶纸蜂窝夹层板的隔热性能探究中, 需对该夹层板进行导热系数测试。此时, 纸蜂窝的参数不再作为变量, 直接选择导热系数最小的厚度为 10 mm、蜂窝孔径为 6 mm 的纸蜂窝作为夹层, 仅改变气凝胶复合材料厚度进行测试试验。

考虑到在实际应用中, 冷库保温层使用的聚氨酯泡沫每层厚度大约为 25~38 mm, 因此只测定 10 mm+10 mm、15 mm+10 mm、20 mm+10 mm 这 3 种组合结构, 即纸蜂窝厚度为 10 mm 不变, 气凝胶复合材料的厚度分别为 10, 15, 20 mm。测试结果如图 5 所示。

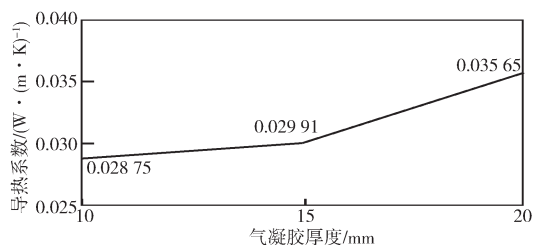


图 5 气凝胶纸蜂窝夹层板的导热系数与气凝胶厚度关系曲线

Fig. 5 The relationship curve between the thermal conductivity of aerogel paper honeycomb sandwich panel and thickness of the aerogel

从图 5 可以看出, 气凝胶纸蜂窝夹层板的导热系数大体上随气凝胶复合材料厚度的增加而增大, 当气凝胶厚度为 10 mm 和 15 mm 时, 夹层板的导热系数低于 0.03 W/(m·K), 满足我国冷库保温材料使用标准的要求。

3.4 气凝胶纸蜂窝夹层板与聚氨酯的导热性能比较

聚氨酯泡沫材料导热系数的理论值为 0.021 W/(m·K), 但作为一种多孔发泡型材料, 聚氨酯的导热系数与其材料配比、发泡温度有直接关系^[18], 而且在冷库等湿度较大的环境中, 其导热系数会因吸水而增大。

在施工过程中, 每层聚氨酯泡沫喷涂厚度控制为 25~38 mm, 通常聚氨酯泡沫的计算导热系数取

0.031 W/(m·K)。

为比较气凝胶纸蜂窝夹层板与聚氨酯泡沫板的导热性能, 对厚度分别为 20 mm 和 30 mm 两种材料的导热系数进行测定, 结果如图 6 所示。

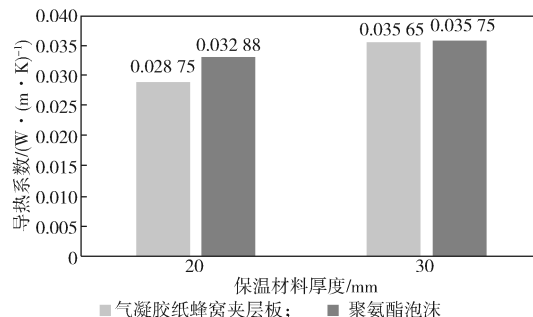


图 6 气凝胶纸蜂窝夹层板与聚氨酯泡沫板导热系数对比
Fig. 6 Comparison of thermal conductivity between aerogel paper honeycomb sandwich panel and polyurethane foam panel

由图 6 可知, 无论厚度是 20 mm 还是 30 mm 的两种保温隔热板, 气凝胶纸蜂窝夹层板的导热系数均低于聚氨酯泡沫板的。换言之, 在同等隔热性能下, 聚氨酯泡沫保温层厚度要更大, 因此气凝胶蜂窝夹层板复合材料相较聚氨酯泡沫还可增加冷库库容, 节省建筑面积。

4 结论

本文对气凝胶纸蜂窝夹层板的隔热性能进行了研究, 可得如下结论:

1) 玻璃纤维气凝胶复合材料的导热系数约为 0.022 W/(m·K), 纸蜂窝的导热系数约为 0.060~0.110 W/(m·K), 聚氨酯的导热系数约为 0.035 W/(m·K)。

2) 在厚度为 10 mm、孔径为 6 mm 的纸蜂窝上下两侧, 附着厚度为 10~15 mm 玻璃纤维气凝胶复合材料所制得的气凝胶纸蜂窝夹层板, 其导热系数为 0.028~0.030 W/(m·K), 符合我国冷库墙体保温层材料的使用要求。因此, 在保温隔热领域, 完全可以选择由气凝胶纸蜂窝夹层板来替代现有的聚氨酯泡沫保温层。

参考文献:

- [1] 李明明, 王坤杰, 张晓虎. 纤维增强 SiO₂ 气凝胶复合材料研究进展 [J]. 化工新型材料, 2017, 45(3): 19-21.

- LI Mingming, WANG Kunjie, ZHANG Xiaohu. Research Progress on Fiber Reinforced Silica Aerogel Composites[J]. *New Chemical Materials*, 2017, 45(3): 19-21.
- [2] 张 明. 增强改性 SiO₂ 气凝胶复合材料的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(11): 2674-2683.
ZHANG Ming. Research Progress of Reinforced SiO₂ Aerogel Composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(11): 2674-2683.
- [3] 张 明. SiO₂ 气凝胶的疏水改性及性能研究进展[J]. *现代化工*, 2020, 40(1): 58-62.
ZHANG Ming. Research Progress in Hydrophobic Modification and Properties of SiO₂ Aerogels[J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(1): 58-62.
- [4] YANG F, ZHAO X Y, XUE T T, et al. Superhydrophobic Polyvinylidene Fluoride/Polyimide Nanofiber Composite Aerogels for Thermal Insulation Under Extremely Humid and Hot Environment[J]. *Science China Materials*, 2020, 64: 1267-1277.
- [5] HUNG W C, HORNG R S, SHIA R E. Investigation of Thermal Insulation Performance of Glass/Carbon Fiber-Reinforced Silica Aerogel Composites[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2020, 97: 414-424.
- [6] 徐 凇, 姜勇刚, 冯军宗, 等. 纤维增强 Al₂O₃-SiO₂ 气凝胶隔热复合材料的制备和耐温隔热性能[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(4): 461-466.
XU Lin, JIANG Yonggang, FENG Junzong, et al. Preparation and Heat-Resisting and Insulating Properties of Fiber-Reinforced Al₂O₃-SiO₂ Aerogels Insulation Composites[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2020, 42(4): 461-466.
- [7] BIRMAN V, KARDOMATEAS G A. Review of Current Trends in Research and Applications of Sandwich Structures[J]. *Composites Part B*, 2018, 142: 221-240.
- [8] 潘 丹, 郭彦峰, 付云岗, 等. 纸夹芯和泡沫复合层状结构的静态缓冲吸能特性研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(2): 249-256.
PAN Dan, GUO Yanfeng, FU Yungang, et al. Static Cushioning and Energy Absorption of Composite Layered Structures with Paper Sandwich Core and Plastic Foam[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(2): 249-256.
- [9] 胡亚洲. 美的蜂窝材料研究与应用[J]. *上海包装*, 2017(6): 13-15.
HU Yazhou. Research and Application of Midea's Honeycomb Materials[J]. *Shanghai Packaging*, 2017(6): 13-15.
- [10] 梁 宁, 王冬梅, 郭彦峰, 等. 蜂窝纸板振动传递特性研究进展[J]. *包装学报*, 2018, 10(4): 43-49.
LIANG Ning, WANG Dongmei, GUO Yanfeng, et al. Research Progress on Vibration Transmissibility of Honeycomb Paperboard[J]. *Packaging Journal*, 2018, 10(4): 43-49.
- [11] 杨朝坤, 朱建勋, 温卫东. 纤维材料结构参数对模塑渗透性能的影响[C]//第十四届全国复合材料学术会议论文集. 宜昌: 中国力学学会, 2006: 142-146.
YANG Chaokun, ZHU Jianxun, WEN Weidong. Effect of Structural Parameters on Permeability of Fiber Reinforcement in Molding[C]//Proceedings of the 14th National Conference on Composite Materials. Yichang: Chinese Society of Mechanics, 2006: 142-146.
- [12] CISE D, LAKES R S. Moisture Ingression in Honeycomb Core Sandwich Panels[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1997, 6(6): 732-736.
- [13] 王教方, 岳贤军, 宋淑珍, 等. 多层复合材料导热系数测定方法的研究[J]. *山东建材学院学报*, 2000, 14(3): 258-260.
WANG Jiaofang, YUE Xianjun, SONG Shuzhen, et al. The Research of Determine Method for the Thermal Conductivity of Many Multiple Materials[J]. *Journal of Shandong Institute of Building Materials*, 2000, 14(3): 258-260.
- [14] 周祝林, 王亚熊, 姚 辉, 等. 玻璃钢蜂窝夹层结构板热导率研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2006(2): 18-22, 13.
ZHOU Zhulin, WANG Yaxiong, YAO Hui, et al. Study of Thermal Conductivity of GFRP Sandwich Structure Panels with Honeycomb Core[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2006(2): 18-22, 13.
- [15] 赵 红. SiO₂ 气凝胶/纤维复合隔热包装材料的制备及隔热机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
ZHAO Hong. Study on the Fabrication of SiO₂ Aerogel/Fiber Composite Insulation Packing Material and Insulation Mechanism[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [16] FOURIER J B J. *The Analytical Theory of Heat*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 2-10.
- [17] KREITH F. *Principles of Heat Transfer*[M]. New York: Intext Educational, 1973: 484-610.
- [18] 席荣增, 吴启龙. 聚氨酯泡沫塑料在冷库隔热工程中的应用[C]//全国暖通空调制冷 1996 年学术年会论文集. 昆明: 中国建筑学会, 1996: 44-48.

XI Rongzeng, WU Qilong. Application of Polyurethane Foam Plastics in the Thermal Insulation Engineering of Cold Storage[C]//Proceedings of the 1996 National HVAC Refrigeration Annual Conference. Kunming:

Architectural Society of China, 1996: 44-48.

(责任编辑: 邓光辉)

Thermal Insulation Performance of Aerogel Paper Honeycomb Sandwich Panel

SUN You^{1,2}, WANG Dongmei¹, BAI Ziyou¹, ZHU Hong¹

(1. School of Communication, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen Guangdong 518055, China; 2. Faculty of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To improve the pressure bearing capacity of aerogel composites, a paper honeycomb was designed as a sandwich, and a sandwich panel composed of aerogel composite materials on both sides was designed to explore whether the sandwich panel could replace polyurethane foam and be applied to the insulation sandwich of the refrigeration house wall. The thermal insulation performance of paper honeycomb, aerogel composite and aerogel paper honeycomb sandwich panel was analyzed by the test data measured by the thermal conductivity meter, and the influence of material thickness on the thermal conductivity of aerogel honeycomb sandwich panel was discussed. The results found that when the thickness of the paper honeycomb was thin, the thermal conductivity of the aerogel paper honeycomb sandwich panel was lower than that of the polyurethane foam board. When the thickness of the paper honeycomb was 10 mm, the aperture size was 6 mm, and the thickness of the aerogel composite material was 10 mm or 15 mm, the thermal conductivity was lower than 0.03 W/(m·K), meeting the material requirements of thermal insulation industry in China.

Keywords: fiber aerogel; paper honeycomb; thermal conductivity; insulation performance