

# 真空绝热板的研究进展

朱万平<sup>1,2</sup> 段正才<sup>3</sup> 陈照峰<sup>1</sup> 周介明<sup>2</sup> 陈清<sup>1</sup>

(1 南京航空航天大学材料与科学学院,南京 210016)

(2 苏州维艾普新材料有限公司,苏州 215400)

(3 陕飞集团工程与技术部,西安 723214)

**文 摘** 综述了真空绝热板(VIP)的超高效绝热性能,介绍了VIP的选材和研究现状,提出了存在问题及对VIP的应用进行了展望。

**关键词** 真空绝热板(VIP),绝热性能,热导率

## Recent Research Progress of Vacuum Insulation Panel

Zhu Wanping<sup>1,2</sup> Duan Zhengcai<sup>3</sup> Chen Zhaofeng<sup>1</sup> Zhou Jieming<sup>2</sup> Chen Qing<sup>1</sup>

(1 College of Material Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

(2 Suzhou V. I. P. New Material Co., Ltd., Suzhou 215400)

(3 Department of Engineering and Technology, AVIC Shaanxi Aircraft Industry(group) Co., Ltd., Xi'an 723214)

**Abstract** The super-efficient insulation properties of the vacuum insulation panel VIP are reviewed. And also the material selection and research process of VIP, problems and prospect for the application of the VIP are introduced.

**Key words** Vacuum Insulation Panel(VIP), Heat insulation performance, Thermal conductivity

### 0 引言

真空绝热板(VIP)是近年来出现的一种新型超高效绝热板材,其主要由芯材、阻隔膜和吸气剂三部分组成(图1)<sup>[1-2]</sup>。具有极低的热导率 $[2 \sim 4 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ ,在其生产和应用过程中,不使用消耗臭氧层物质(ODS),热阻相当于普通绝热材料的10倍甚至更高<sup>[3]</sup>。

近年来,随着全球能源危机,对隔热保温材料提出了更加苛刻的要求。特别是,建筑墙体保温、冰柜、舰艇(船舶)等应用领域要求隔热保温材料不仅具有低的热导率还必须具备A1级不燃的特性。自德国和瑞士对VIP的研发与推广,VIP现已广泛用于冰箱、冰柜、冷藏箱、冷库、电热水器等保温设备<sup>[4]</sup>。同时,建筑能耗的增加与外墙外保温的市场需求量变大也为VIP的运用带来了新的生机。

VIP主要用于白色家电等冷藏冷冻及保温节能等行业中(图2)。

冰箱内使用VIP可节能10%~30%,且增加有效容积20%~30%。建筑外墙保温结构中采用VIP,可增大使用空间10%,电能消耗则可降低15%~25%<sup>[6]</sup>。

20世纪70年代,美国NASA提出并设计了VIP产品<sup>[4]</sup>;1979年和1983年,Pierre Pelloux-Gervais和Mitsuhiro Shimada将VIP概念转化为产品<sup>[7-8]</sup>;1997年,Lyman Bruce E将VIP的的边角设计成圆润角落,

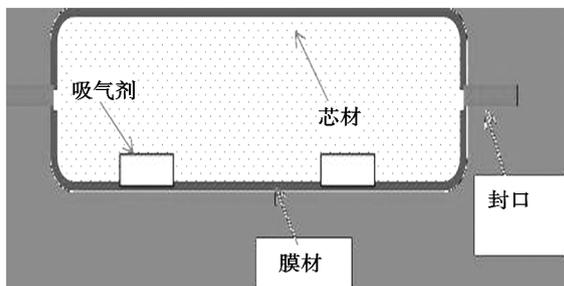


图1 VIP的结构

Fig.1 Structure of VIP

收稿日期:2012-10-15;修回日期:2013-04-17

作者简介:朱万平,1990年出生,硕士研究生,主要从事VIP的研究工作。E-mail:zwpseekeen@163.com

通讯作者:陈照峰,教授,博士生导师,主要研究方向为超性能纤维。E-mail:czf\_msc@nuaa.edu.cn

以消除或者减小由于抽真空过程中应力使角落区域产生的变形<sup>[9]</sup>。2007年, V. Sood 和 A. Feinerman<sup>[10]</sup>用丙烯酸和聚酰胺纤维制成 VIP 原型<sup>[11]</sup>。

本文主要综述了真空绝热板(VIP)的超高效绝热性能,介绍了VIP的选材和研究现状,提出了存在问题及对VIP的应用进行了展望。

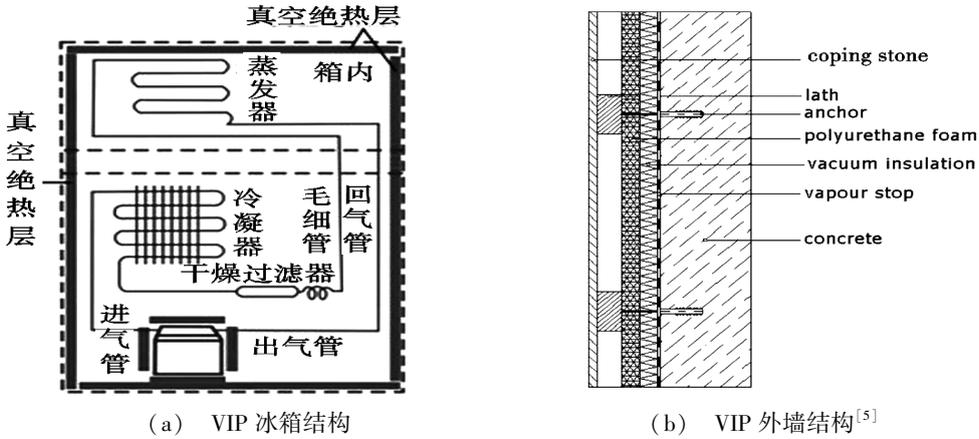


图2 VIP的应用领域

Fig. 2 Some applications of the VIP

### 1 VIP的隔热原理

任何绝热材料的绝热原理及方法都是阻止热量从一个点传到另外一个点,因而尽管形成所谓的“绝热空间”,但是热传导过程是一个“熵增”的过程,任何方法都无法避免,只能是尽量弱化与减小<sup>[12]</sup>。VIP内部玻璃纤维的换热方式是复合换热,包含热传导、热对流与热辐射。

4<sup>[14]</sup>。PET层、金属铝薄膜和PE层的热导率分别为0.15、273和1.05 W/(m·K)<sup>[15]</sup>。可见膜材中金属铝薄膜的热导率远远大于PE、PET层,如果金属铝薄膜的厚度过厚或者PE层厚度过薄导致热封时在封口处产生了两片金属铝薄膜互相接触的现象,则经过膜材热传导而传递的能量极度的增大,导致热导率急剧上升,发生热桥效应。因此生产时需要使金属铝薄膜层厚度变薄,PE层厚度变厚,削减边缘效应和热桥效应,使热量通过第二种方式传导。

如用导热形式的公式:  $\lambda = \lambda_{cv} + \lambda_{cd} + \lambda_{rad}$  计算热量,其热导率 $\lambda$ 实质上是有效热导率,可分为对流、导热和热辐射三部分记为 $\lambda_{cv}$ 、 $\lambda_{cd}$ 、 $\lambda_{rad}$ 。VIP有着极低的热导率的原因在于VIP在三种传热方式上分别对传热进行了阻碍。

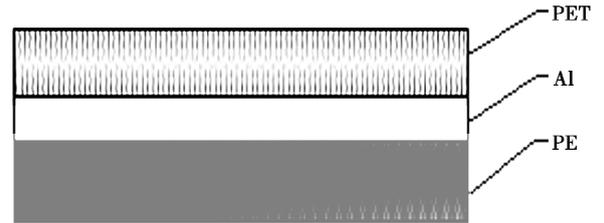


图4 膜材截面

Fig. 4 Section of the barrier film

#### 1.1 对流

工程中,一般情况下当VIP内真空度较大,内部压力 $<1$  Pa时,空气密度较低故其热对流作用可忽略不计<sup>[13]</sup>,故 $\lambda_{cv} = 0$ 。

关于芯材的两种增加热阻减小热导率的方法有:(1)降低单片芯材的厚度,出现较多的界面,减少热传导的通道,降低热导率;(2)芯材生产工艺的改进,使玻璃纤维的排布与热传导方向垂直,增加了热传导的途径,热阻增加,热导率上升<sup>[16]</sup>。

#### 1.2 导热

对于膜材的导热可分为两种:如图3所示,第一种是由于真空绝热芯材为非均匀材料,热量经封口处在膜材内部的传导,在VIP封边处形成热桥效应。

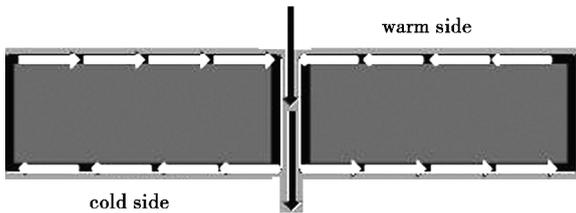


图3 热桥效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a cold bridge between two VIPs

第二种是热量从膜材传递到板内玻璃纤维和空气中,再由空气和玻璃纤维传递给VIP另一边的膜材中。VIP的膜材由三大功能层组成,分别是PET层、Al层、PE层。最简单的VIP膜材截面结构见图

#### 1.3 热辐射

辐射换热则可以不通过任何介质而发生。当辐射能量作用于物体时,可以被反射、穿透或吸收。如果能量被吸收于物体内部,则物体温度会升高。通常辐射能量会与空间内的物体发生热量交换,因而可以通过在板内填充多孔芯材的方法增加辐射障碍而减少辐射换热。采取一定措施尽量减弱以上热量的传递方式,可实现VIP板的优异绝热性能。

假定空气与纤维丝可看成连续灰体介质,具有光学厚性质,辐射物性均匀,外部界面的发射率比较大,

根据扩散模型,  $\lambda_{rad}$  可以写成<sup>[17]</sup>:

$$\lambda_{rad} = 16\sigma T^3 m / (3kp) \quad (1)$$

式中,  $k$  为玻璃纤维的衰减系数;  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数。但是由于 VIP 的膜材中的铝膜层可以反射大部分的光线即能量, 能够通过辐射传热的方法穿透 VIP 的能量极少, 可认为  $\lambda_{rad} = 0$ 。

## 2 VIP 的选材

### 2.1 芯材的选择

芯部的隔热材料一般为多孔材料, 是 VIP 的核心结构, 其首要作用是支撑作用, 避免在真空条件下外部的封闭薄膜收缩、塌瘪。作为支撑的芯材, 需要承受约 98 kPa 的压力。其次, 芯材可阻止热辐射, 并起到对红外热辐射进行吸收、散射的作用。除此之外, 芯材本身为多孔材料, 接触面小, 热传导低, 可用于限制残余在 VIP 中一些气体分子的运动空间, 从而阻止对流及气体传导两种传热<sup>[18]</sup>。

图 5 为目前几种典型芯材的 VIP 在不同板内真空度下的热导率。可以发现, 当真空度足够大及 VIP 内部压力  $\leq 10$  Pa 时, 由玻璃纤维作为芯材制成的 VIP 的隔热性能优于其他种类材料如挤塑泡沫、沉淀  $\text{SiO}_2$ 、气相  $\text{SiO}_2$ 、气凝胶作为芯材制得的 VIP。所以目前高性能 VIP 中, 玻璃纤维作为芯材的工艺成为了主流。

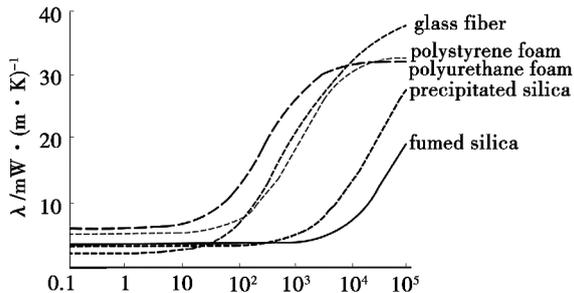


图 5 几种典型芯材的 VIP 在不同板内真空度下的热导率<sup>[19]</sup>

Fig. 5 Thermal conductivity of VIP of several typical core materials under different vacuum in the panels

芯材的选择除了必须满足支撑作用及本身具有低热导率、能够有效降低板内辐射换热的要求外, 作为 VIP 板芯材使用的材料来说, 还必须具备的特性为开孔结构, 以便于气体抽空, 同时微孔的排列应使材料中的结构接触点尽量少, 以减少固体热传导。

VIP 的热导率是由纤维直径、孔隙率、最大孔径等因素决定的。随着时间推移, VIP 内的真空压力会在一定程度上升高, 真空压力增高与热导率增幅的关系很大程度取决于 VIP 所用的芯材。板内多孔芯材的直径与气体分子平均自由程愈接近, 气体依靠分子互相碰撞的热传导就可得到有效的控制。对于 VIP, 这部分的传热量占总传热量的 60% 以上。因此, 芯材的孔径愈小, 分布愈均匀, 对于提高 VIP 的隔热性

能和延长其使用寿命越有利<sup>[21]</sup> (图 6)。据检测, 在一定玻璃微纤维直径范围内, 玻璃微纤维直径每减小约  $0.25 \mu\text{m}$ , 其热导率值可降低 2.3%。目前市场上的 VIP 芯材的纤维平均直径一般都小于  $5 \mu\text{m}$ 。高性能 VIP 的芯材往往是超细玻璃棉即高温熔化离心喷吹制得直径小于  $2 \mu\text{m}$  的玻璃纤维。对于 VIP 芯材而言, 重要的还有孔径分布和最大孔径: 玻璃纤维芯材最大的孔径可达  $20 \mu\text{m}$ , 比常温常压下的分子自由程  $70 \text{ nm}$  高出好几个数量级。孔径越是接近分子自由程时, 经过空气发生热传导的热量会急剧下降<sup>[22]</sup>。

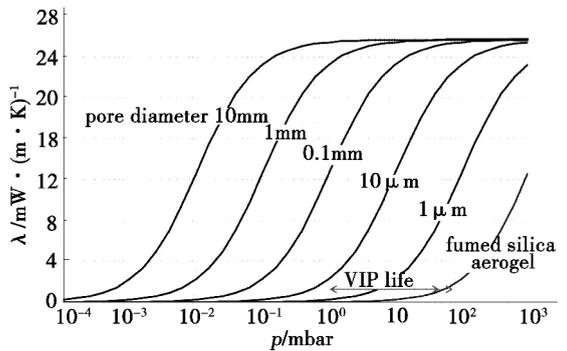


图 6 不同芯材直径的 VIP 随着真空度变化时的热导率<sup>[20]</sup>

Fig. 6 Thermal conductivity of VIPs of different core material diameter with the vacuum changes

### 2.2 膜材的选择

VIP 的性能及使用寿命, 主要取决于阻隔膜材料在其使用过程中对气体的抗渗透能力。VIP 内的真空度愈高, 则其隔热性能愈好。但是目前所有使用的阻隔膜都会在一定程度上渗透气体和水汽分子, 而且随时间延长这种现象逐渐加重。阻隔膜对气体分子的渗透性能主要取决于材料的性能、结构以及耐用性。单一的塑料隔膜材料往往仅对某种气体有较好的阻隔性能, 而对其他气体的抗渗透能力较差。因此, 采用几种不同塑料膜制成组合膜, 可以综合提高阻隔膜对环境各种气体的抗渗透能力。在选择阻隔膜材料时, 应该综合考虑薄膜材料的透气性、成本以及与阻隔膜相关的边界热效应等。真空状态下, 一般材料都会释放一些气体, 释放气体的种类、数量与材料的特性有密切的关系。气体的产生对其真空度的保持产生极大的影响, 在某些情况下, 以这种方式产生的气体甚至超过来自阻隔膜封口所泄漏进来的气体量<sup>[23]</sup>。因此, 在选择 VIP 芯材及阻隔膜的材质时, 应特别选用释放气体少的材质。

VIP 结构中, 芯材包覆于阻隔膜内并进行抽空后封装。无论芯材或阻隔层选用何种材料, 阻隔膜用于包覆芯材时会在其四周边缘形成热桥, 产生热桥效应。热桥效应的产生是不可避免的, 主要是由于板材与周围环境所形成的边缘热流通道使得部分热量流失, 导致板材整体热导率增加, 从而使其整体绝热性

能下降。对于金属化的复合膜而言,这种增长可忽略不计;而对于典型的金属基 VIP,这种增长可达 64% 甚至 380%,大大影响了 VIP 板材的整体使用效果。由此可见,对 VIP 边缘热桥效应进行分析与研究具有重要的意义<sup>[24]</sup>。

### 2.3 吸气剂的选择

干燥剂或吸气剂,为了防止芯材内部压力增大,作为组件或化学物质被放入到芯材中用来吸收水分或残余气体。干燥剂和吸气剂被称作为烘干机和吸收器,因为它们吸收了从大气中渗透的气体分子<sup>[25]</sup>。

由于吸气剂具有高度的选择性,因此,在选择吸气剂的类型时,应根据芯材及阻隔膜类型,对真空板内可能出现的气体进行较为准确的分析预测。同时,根据真空板内气体的可能数量及对真空板的预期使用寿命,确定吸气剂及干燥剂的合适用量。目前吸气剂一般采用钡锂合金吸收板内的氮气、氧气和二氧化碳,用氧化钴或活性炭吸收氢气<sup>[26-27]</sup>。

图 7 为 VIP 芯材内添加吸气剂前、后的压力变化曲线。实验所用的 VIP 均采用单一的聚合物膜材<sup>[28]</sup>。可以看到,随着时间的增加,未放置吸气剂的 VIP 内部压强值逐渐升高,可见吸气剂对降低板内压力是十分有效的。

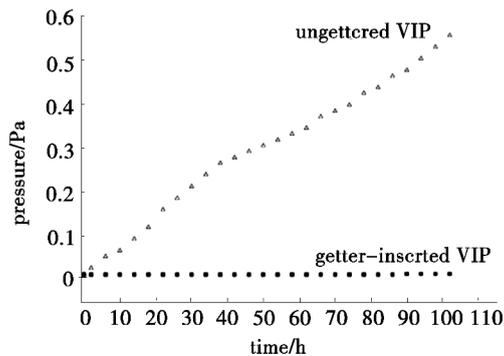


图 7 吸气剂对 VIP 内压力变化的影响

Fig. 7 Effect of getter material on pressure increase for VIP<sup>[28]</sup>

## 3 VIP 的最新研究现状

### 3.1 干法芯材

VIP 玻璃纤维芯材的制造分干法和湿法。湿法成型即采用传统的玻璃纤维纸生产技术。湿法芯材工艺浪费能源,对环境影响较大,采用湿法成型得到的 VIP 板材在成本上比干法 VIP 制品要高出近 40%;同时湿法 VIP 制品在导热性能上比干法制品略差。一般厚度为 1~2 mm 的湿法 VIP 芯材热导率为 2.1~2.3 mW/(m·K),而干法 VIP 芯材的热导率为 1.9 mW/(m·K)<sup>[29]</sup>。

VIP 玻璃纤维芯材干法制造技术主要流程为吹制玻璃纤维、集棉、压缩成型及裁切。首先按配比称重原料并混合,原料熔化后通过火焰法或离心法

生产出纤维,然后集棉形成一定厚度的玻璃棉,最后通过高温热压方式制成所需克重的 VIP 芯材。干法制造技术相对于湿法技术而言,关键技术点集中在纤维成形、集棉时的纤维排布以及增加了热压成型步骤<sup>[30-32]</sup>。生产工艺流程见图 8。

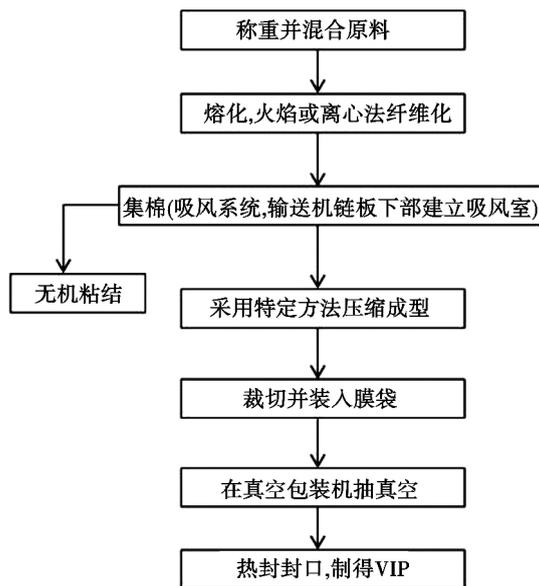


图 8 VIP 芯材干法制造流程

Fig. 8 Dry manufacturing process of VIP core material

### 3.2 异形结构 VIP

常见的 VIP 大多是将固化后的平板矩形芯材数层相叠加后放入真空封装阻隔带内在 0.1 MPa 下抽真空而成。然而由于某些特定领域的需要如环形管道保温、弧形屋面、高层外墙保温固定等,如何通过对芯材进行打孔、切片、压槽等结构设计,封装后形成带孔、弯曲的异形结构 VIP 已成为其技术核心。

#### 3.2.1 弧形 VIP

弧形 VIP 原理见图 9。

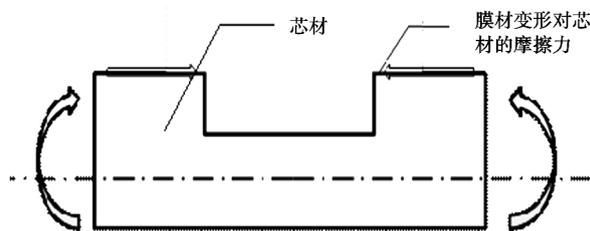
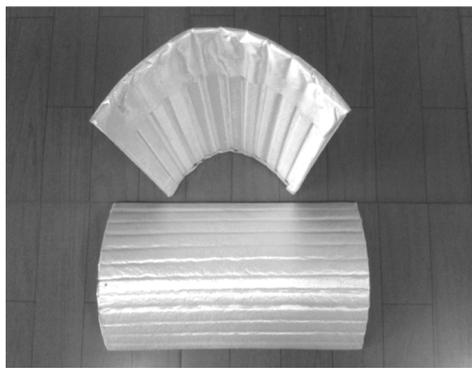


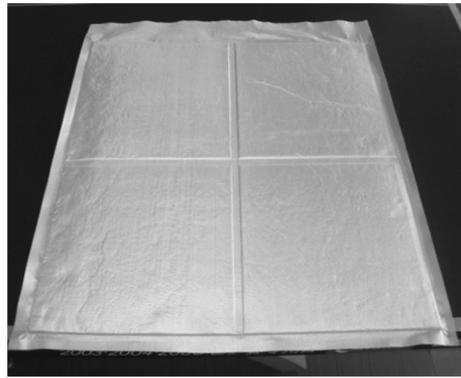
图 9 弧形 VIP 的制造原理

Fig. 9 Manufacturing principles of arc VIPs

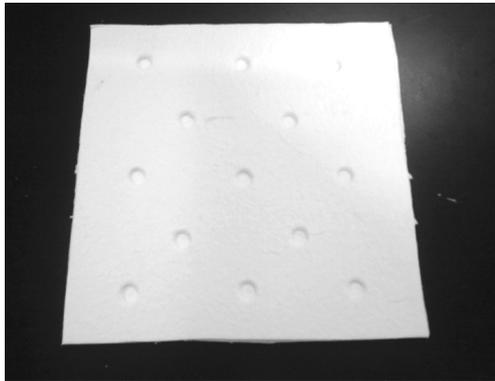
图 10 为多种异形结构 VIP。如图 10(a)所示,其绝热芯材为弧形且芯材内侧每间隔距离  $d$  开有槽道,将开槽后的芯板放入包装袋内,抽真空时由于开槽部位的包装膜被压入槽内,自动弯曲成圆弧形<sup>[33]</sup>。这种弧形绝热板能够用于不规则的设备内保温,特别是对于圆弧形和圆筒形的管道,扩大了 VIP 的使用范围。



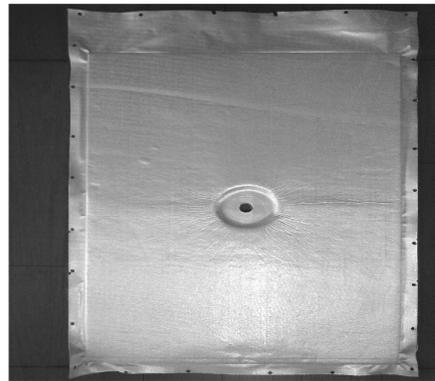
(a) 弧形 VIP



(b) 凹槽 VIP



(c) 开孔芯材 VIP



(d) 透气锚固 VIP

图 10 多种异形结构 VIP

Fig. 10 Different heterosexual structures of VIP

### 3.2.2 带槽道 VIP

实际应用中由于建筑用 VIP 上墙后难免会产生漏气膨胀的现象,因此在制备好的 VIP 表面上压制十字形凹槽。图 10(b) 中凹槽将整体绝热板分割为多块,降低了绝热板材膨胀变形的面积。

### 3.2.3 表面带凹坑 VIP

为了增大 VIP 上墙后与墙面间的摩擦力,提高结合强度,有意识地提升板的粗糙度,图 10(c) 为芯材上规律性的开些微小孔的示意图,抽真空后在板表面形成凹坑。这些凹坑与水泥砂浆结合后可看作为许多锚钉,使 VIP 在不依靠锚固件的情况下,也可与墙面紧密结合。

### 3.2.4 透气锚固 VIP

如图 10(d) 所示,在 VIP 热封边处与板中间打孔预留处都进行开孔,其中间孔用于锚固,封边孔用于透气。锚固孔解决了水管、燃气管、取暖设施以及电缆等的穿墙施工,透气孔则促进水汽蒸发,避免墙体内部出现发霉等现象,优化了建筑用 VIP 施工上墙后的综合应用效果。

## 4 结语

目前, VIP 已经成功应用到各个保温领域,但同时也存在着一些发展瓶颈,可以归纳为以下 3 个方面:湿法芯材工艺仍然占据主导,更为先进的干法芯材工艺尚未得到大力推广;阻隔膜和热封口的漏气率

关乎 VIP 的使用寿命;建筑用 VIP 在施工和使用过程中,较容易受到机械破坏和腐蚀破坏。所以,未来的 VIP 行业不仅仅要致力于推动隔热性能的进一步提高,如何更好、更广泛地将 VIP 应用到工程和生产生活中将会是一个重要的课题。

### 参考文献

- [1] 阚安康,邹复炳,韩厚德. 真空绝热板制作研究[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2005, 24: 4
- [2] 温永刚,王先荣,杨建斌,等. 真空绝热板(VIP)技术及其发展[J]. 低温工程, 2008, 166(6): 35-39
- [3] Phalguni M, Kumar K. Use of vacuum insulation panel in building envelope construction; advantages and challenges[C] //13<sup>th</sup> Canadian Conference on Building Science and Technology, Winnipeg Manitoba, 2011: 1-10
- [4] Markus E, Pauli A G. Vacuum Insulation-panel properties and building applications, (Subtask-A-B) hiPTI -high performance thermal insulation[J]. IEA/ECBCS Annex, 2005, 39
- [5] Binz A, Moosmann A, Steinke G, et al. Vacuum Insulation in the building sector systems and Applications (subtask B) [J]. Final Report for the IEA/ECBCS Annex, 2005: 39
- [6] Roland C, Hermann U. Quality control of vacuum insulation panels: Methods of measuring gas pressure. Science Direct [J]. Vacuum 82(2008): 691-699
- [7] Pelloux Gervais. Insulating material with low thermal conductivity, formed of a compacted granular structure [P]. US4159359A, US. 1979

[ 8 ] Shimada. Solar heat collector assembly [ P ]. US4409964A, US. 1983

[ 9 ] Lyman Bruce E, et al. Vacuum insulation panel [ P ]. US5664396A, US. 1997

[ 10 ] Pelloux G P, Goumy D. Insulating material with low thermal conductivity, formed of a compacted granular structure [ P ]. U. S. Patent, 1979; 4, 159, 359

[ 11 ] Sood V, Feinerman A. Design and development of high performance vacuum Insulation panels (VIP) with kevlar thread Support [ J ]. Journal of Undergraduate Research at the University of Illinois at Chicago, 2007, 1 ( 1 ) : 41-46

[ 12 ] Simmler H, Brunner S. Vacuum insulation panels for building application basic properties, aging mechanism and service life [ J ]. Energy and Building, 2005, 37 : 1122-1131

[ 13 ] 余其铮, 温宁, 杨立峰. 硅酸铝耐火纤维的绝热性能 [ J ]. 材料科学进展, 1989, 3 ( 3 ) : 249-254

[ 14 ] Chen Z, Chen Z F, Qiu J L, et al. Vacuum insulation panel for green building [ J ]. Applied Mechanics and Materials Vols, 2011 ( 71/78 ) : 607-611

[ 15 ] 郭靖华, 智欧. 表面隔膜对真空绝热板性能的影响 [ J ]. 保温材料与建筑节能, 1983 ( 6 )

[ 16 ] Bombey M, Klarsfeld S. Semi-empirical model of heat transfer in dry mineral fiber insulation [ J ]. Of thermal Insulation, 1983 ( 6 )

[ 17 ] 张辑洲, 朱宝娟, 余其铮. 超细玻璃纤维的有效热导率计算式 [ J ]. 哈尔滨工业大学学报, 1993, 25 ( 1 ) : 21-25

[ 18 ] Ghazi K, Bundi R. Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels [ J ]. Building Research & Information, 2004, 32 ( 4 ) : 293-299

[ 19 ] Simmler H, Brunner S, Heinemann U, et al. Vacuum insulation panels-study on VIP-components and panels for service life prediction of VIP in building applications [ C ] // ( Subtask A ) HiPTI -High Performance Thermal Insulation IEA/ECBCS Annex, 2005; 39

[ 20 ] Phalguni Mukhopadhyaya. High performance vacuum insulation panel-research update from canada [ J ]. Global Insulation Magazine, 2006 ( 10 ) : 9-15

[ 21 ] 张建华. 一种新型超绝热材料——真空绝热板 [ J ]. Science & Technology Information, 2007 ( 10 ) :

[ 22 ] Wu W P, Chen Z F, Zhou J M, et al. Effect of envelope films on thermal properties of vacuum insulation panels with glass fiber [ J ]. Advanced Materials Research, 2012 ( 415/417 ) : 859-864

[ 23 ] Yuan B. Heat insulation properties of silica aerogel/glass fiber composites fabricated by press forming [ J ]. Mater. Lett. , ( 2012 ) , doi:10. 1016/j. matlet, 2012 ( 1 ) : 114

[ 24 ] Fricke J. Vacuum insulation panels—from research to market [ J ]. Vacuum, 2008 ( 82 ) : 680-690

[ 25 ] Thomas Thorsell. Advances in thermal insulation vacuum insulation panels and thermal efficiency to reduce energy usage in buildings [ D ]. Doctoral Thesis

[ 26 ] 阚安康. 冷藏集装箱真空绝热板的设计制作及应用研究 [ D ]. 上海: 上海海事大学, 2006

[ 27 ] 张宁, 杨春光, 高霞等. 真空绝热板内部真空度的影响因素分析及改善措施 [ J ]. 真空, 2010 ( 1 ) : 19-22

[ 28 ] Kwon J S, Jang C H, Jung H, et al. Vacuum maintenance in vacuum insulation panels exemplified with a staggered beam VIP [ J ]. Energy and Buildings, 2010, 42 : 590-597

[ 29 ] 郑简, 郭晓蓓. VIP 芯材干法工艺技术探讨 [ J ]. 玻璃纤维, 2011 ( 6 ) : 1-5

[ 30 ] Chan Hsiang C, Hsin Chu H. Method for manufacturing vacuum-insulated panel [ P ]. US2003/OI59404A1. 2003-8-28

[ 31 ] John A B, Nashville. Vacuum insulated panel and method of forming a vacuum insulated panel [ P ]. US5252408, 1993-10-12

[ 32 ] Fricke J, Schwab H, Heinemann U. Vacuum insulation panels—exciting thermal properties and most challenging applications [ J ]. International Journal of Thermo Physics, 2006 ( 7 ) : 27

[ 33 ] Zhou J M. 一种异形真空绝热板及其制作方法 [ P ]. CN102147041A, 中国, 2011

(编辑 吴坚)

(上接第 35 页)

[ 23 ] Lee W B, Lee C Y, et al. Microstructures and wear property of friction stir welded AZ91 Mg/SiC particle reinforced composite [ J ]. Compos. Sci. Technol. , 2006, 66 ( 11 ) : 1513-1520

[ 24 ] 汪山山, 毛昌辉, 等. 旋转速度对 (WC+B4C)<sub>p</sub> / 6063Al 复合材料搅拌摩擦焊接接头力学性能和微观组织的影响 [ J ]. 稀有金属, 2012, 36 ( 1 ) : 167-170

[ 25 ] Prado R A, Murr L E, Soto K F, et al. Self-Optimization in Tool Wear for Friction Stir Welding of 6061Al + 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMC [ J ]. Materials Science and Engineering A, 2003, 349 : 156-165

[ 26 ] Zhang X P, Quan G F, Wei W. Preliminary Investigation on joining performance of SiC<sub>p</sub>-reinforced aluminum metal matrix composite (Al/SiC<sub>p</sub>-MMC) by vacuum brazing [ J ]. Composites A, 1999, 30 : 823-827

[ 27 ] 邹家生, 许如强, 赵其章. 用 Al<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Mg 钎料钎焊 SiC<sub>p</sub>/LY12 复合材料的接头强度及断裂 [ J ]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33 : 972-975

[ 28 ] 张洋, 闫久春. 高体积分数 SiC 颗粒增强铝基复合材料的超声波钎焊 [ J ]. 焊接, 2008 ( 8 ) : 29-31

[ 29 ] Richter Hans, Von Czarnecki Jürgen. Segregation processes in the resistance spot-welding of particle-reinforced aluminum [ J ]. Welding and Cutting, 1999, 51 ( 8 ) : 169-171

[ 30 ] Niu J T, Guo W, Zhai J F, et al. Diffusion welding parameters and interfacial behavior of aluminum matrix composite Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sub>p</sub>/6061Al [ C ]. Designing of interfacial structures in advanced materials and their joints. Japan. , 2002 : 536

[ 31 ] Guo Wei, Meng Qingchang, Niu Jitai, et al. Effect of welding parameters on joint property of aluminum matrix composite SiC<sub>p</sub>/Al in liquid-phase-impact diffusion welding [ J ]. Mater. Sci. Tech. , 2003, 19 ( 1 ) : 195

[ 32 ] Meng Hua, Wei Guo, Hang Wai Law. Half-transient liquid phase diffusion welding an approach for diffusion welding of SiC<sub>p</sub>A356 with Cu interlayer [ J ]. Int. J. Adv. Manuf. Technol. , 2008, 37 : 504-512

(编辑 任涛)