

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.01.008

铝箔气泡复合材料的制备及隔热性能研究

管胜男¹ 陈照峰¹ 马昊² 马汝军² 张翼飞¹ 张鑫扬¹ 陈立鹤¹

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院绝热与节能材料国际实验室, 南京, 211106;

2. 苏州市君悦新材料科技股份有限公司, 苏州, 215164)

摘要:通过干法复合工艺及流延复合工艺制备了一种隔热性能优良、性价比高且具有三明治夹心结构的新型保温材料——铝箔气泡复合材料,并研究了气泡层数、气泡直径、反射层结构及熟化温度对铝箔气泡复合材料隔热性能的影响。结果表明,铝箔气泡复合材料的热导率随气泡层数的增加而增大,随气泡直径的增大而减小,铝箔在反射层结构中的位置对材料热导率有影响,40~100 °C×24 h 熟化,热导率下降,隔热性能提高。

关键词:铝箔气泡复合材料;反射层;热导率;隔热性能

中图分类号:TB333

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2018)01-0053-08

Preparation of Aluminum Foil/Bubble Composite and Its Property on Thermal Insulation

GUAN Shengnan¹, CHEN Zhaofeng¹, MA Hao², MA Rujun², ZHANG Yifei¹,
ZHANG Xinyang¹, CHEN Lihe¹

(1. International Laboratory for Insulation and Energy Efficiency Materials,

College of Materials Science and Technology, Nanjing University of
Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China;

2. Suzhou Junyue New Material Technology Co., Ltd., Suzhou, 215164, China)

Abstract: A novel thermal insulation composite material is fabricated by dry laminating technology and flow-casting laminating process. The sandwich structure has perfect performance of thermal insulation and high cost effective. Moreover, the effects of different parameters such as bubble layers, bubble diameters, reflective layers and aging treatment temperature on the thermal conductivity are investigated. Test results indicate that the thermal conductivity of the composite increases with the number of bubble layers increasing, while decreases with the increase of the bubble diameter. The reflective layer affected the thermal insulation of the material. The thermal conductivity of the composite decreases after 40—100 °C×24 h aging, but its thermal insulation is promoted.

Key words: aluminum foil/bubble composite; reflective layer; thermal conductivity; thermal insulation

随着经济的飞速发展,全球对能源需求日益增大,据美国国家标准与技术研究院推测,到 2040 年,全球能源需求将增长 40%^[1]。低碳经济、绿色

环保日益成为社会发展的主旋律,世界各国在致力于开发绿色新能源的同时,节能减排也成为重点关注的问题之一。其中,尤其在建筑领域和热力管道

基金项目:江苏高校优势学科建设工程(PAPD)资助项目;姑苏人才计划(ZXL2001605)资助项目。

收稿日期:2016-11-29;**修订日期:**2016-12-26

通信作者:陈照峰,男,教授,博士生导师,E-mail:zhaofeng_chen@163.com。

引用格式:管胜男,陈照峰,马汝军,等:铝箔气泡复合材料的制备及隔热性能研究[J].南京航空航天大学学报,2018,50(1):53-60. GUAN Shengnan, CHEN Zhaofeng, MA Hao, et al. Preparation of aluminum foil/bubble composite and its property on thermal insulation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(1): 53-60.

领域存在巨大的节能潜力。

一方面,根据中国住房和城乡建设部的统计,建筑能耗占中国社会总能耗的 28% 以上^[2]。在中国既有的约 400 亿平方米建筑中,近 99% 属于高耗能建筑,与国外建筑相比,外墙传热系数为其 3.5~4.5 倍,外窗为 2~3 倍,屋面为 3~6 倍,单位建筑面积的能源利用率仅为 28%,相比欧美平均近 50%、日本 57% 的效率差距很大^[3]。图 1 是中国近 20 年来,每年建筑能耗及其占社会总能耗比例示意图。从图中可见,中国建筑能耗逐年攀升,而近几年在社会总能耗中的占比更是激增。按照国际经验和中国目前建筑用能水平发展预测,到 2020 年,中国建筑能耗占全社会总能耗的比例将达到 35% 左右^[4],超越工业用能,成为用能的第一领域。由此可见,建筑节能已成为中国经济发展过程中亟待解决的问题。

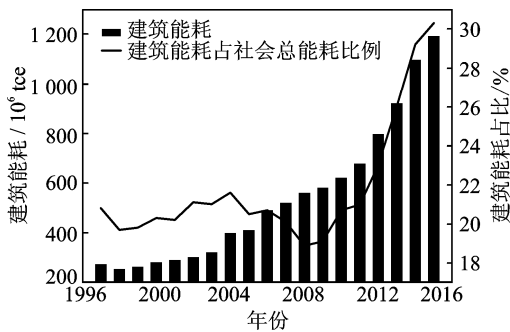


图 1 近 20 年建筑能耗及占社会总能耗比例

Fig. 1 Building energy consumption and its percentage in social total energy consumption in past 20 years of China

另一方面,中国供热地区非常大,热力管道能耗也是不容忽视的一个重要环节^[5-6]。为防止管道和设备与周围环境进行热交换,造成热损失,保温隔热工程已成为生产建设过程中不可缺少的项目。现今在热电行业领域,国家大力推动热电联产、集中供热项目,长距离热网输送成为发展趋势。其中若管道保温不利,不仅会造成大量散热损失,降低供电能耗,还会降低设备运行的安全可靠,导致热网管道寿命降低^[7]。因此,研究管道保温对于节能、环境保护及经济发展都具有重要意义。

中国建筑高能耗及管道高热损失,已严重威胁社会的可持续发展。在面临世界能源危机的今天,积极寻求和开发隔热性能好,且适于市场推广应用的新型保温材料,是提高热能利用率、节约能源的有效途径。

目前,国内外市场上常见的保温材料主要有:聚苯乙烯泡沫板(PS)、酚醛泡沫(PF)聚氨酯

(PU)、岩棉、玻璃棉、泡沫玻璃、真空绝热板及气凝胶毡等^[8-13]。从隔热机理看,这些材料多属于多孔材料,通过控制微孔尺寸降低孔内气体分子的运动空间,降低气体的对流热传导,同时利用孔隙内空气或惰性气体的低热导率来降低热传导,从而达到保温隔热的目的。

事实上,热辐射也对热量的传递具有重要影响。铝箔和不锈钢箔具有很小的辐射系数和良好的反辐射能力,能有效降低热辐射,早在 20 世纪 50 年代,美国等国家就将其作为建筑及工业用保温材料使用。反射型保温材料主要是铝箔反射保温材料,国外常将带空气间层的铝箔反射材料用于核电站的设备和管道保温。随着中国核电工业的发展,铝箔反射保温材料在电力建设中应用也越来越广泛。此外,柳娟^[14]还将铝箔与聚氨酯复合,制备了一种聚氨酯铝箔复合风管,应用于中央空调管道,结果表明聚氨酯铝箔复合风管起到了很好的隔音隔热效果。王洲等人^[15]对铝箔防水卷材热工性能进行理论分析,发现铝箔面防水卷材是一种很好的保温隔热建筑材料,其热工性能比普通防水卷材更好。苏高辉等人^[16]研究了铝箔对管道保温层隔热性能的影响,结果表明,当铝箔亮面朝外进行包裹时,散热量减少了约 9%。

铝箔作为一种廉价、制备简单的高反射材料,常与其他材料复合制备铝箔反射保温材料。与多孔材料相比,目前国内外对反射型保温材料的研究相对较少,尚未形成成熟的研究体系。本文将铝箔反射材料与带空气间层的聚乙烯气泡膜相复合,制备出一种反射型保温材料——铝箔气泡复合隔热材料,研究了材料气泡层数、气泡直径、反射层结构及熟化温度对材料隔热性能的影响。

1 材料的制备与表征

1.1 铝箔反射层的制备

本文采用 RHGF-1000A 型干式复合机制备铝箔反射层,具体过程如下。

(1)配胶:先将双组份溶剂型聚氨酯胶水的主剂倒入配胶桶,再倒入 1/3 乙酸乙酯溶剂进行稀释,搅拌均匀后,再加入固化剂,边加边搅拌,均匀后将剩余溶剂全部加入,其中主剂:固化剂:溶剂浓度配比为 1:0.2:1.6;胶水搅拌均匀后,再向其中加入五氧化二锡阻燃剂,搅拌均匀,五氧化二锡与胶水的比例为 0.01~0.06:1。

(2)基材放卷:将待复合基材分别放在放卷部上,根据基材的性能、品种和厚度等确定各个放卷部的张力,使基材稳定平整地放出。

(3)涂胶:调节复合机摆臂气压、刮刀气压及涂胶辊气压为 0.1~0.4 MPa,使涂胶装置中的网纹辊将胶水均匀连续涂覆在第一基材表面。

(4)烘干:控制辊轮线速度为 60~120 m/min,使涂覆胶水的第一基材缓慢经过烘道,烘道三段的温度分别控制在 50~60 °C,65~75 °C,75~85 °C 三个梯度之间。

(5)复合:将复合气压调节为 0.4~0.7 MPa,复合辊温度调节为 60~80 °C,使两基材在加热加压条件下进行热贴合,从而得复合膜。

(6)冷却收卷:复合膜室温下经冷却辊冷却后,调整收卷张力,使收卷张力略大于放卷张力,进行收卷。

(7)熟化:复合好的膜卷在熟化室内进行熟化,熟化温度为 45~55 °C,熟化时间为 24~48 h。

图 2 为干式复合法制备铝箔反射层的基本工艺流程,控制基材的种类和放卷顺序,可以得到不同结构的铝箔反射层。实验过程中选用了 4 种基材,分别是铝箔(Al)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、氯化聚乙烯(CPE)以及编织布,利用这 4 种

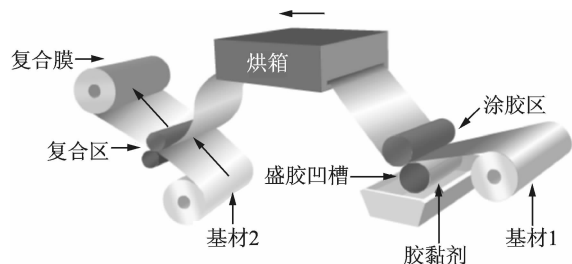


图 2 干式复合法制备铝箔反射层基本工艺流程图
Fig. 2 Preparation process of Al reflective layer using dry laminating technology

基材,选择性地组合,制备了 3 种不同结构的铝箔反射层,如图 3 所示。

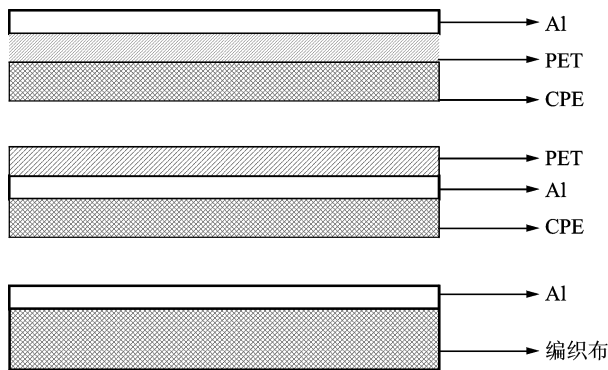


图 3 3种铝箔反射层的结构示意图

Fig. 3 Structure of Al reflective layer

1.2 铝箔气泡复合材料的制备

在塑料薄膜挤塑成型机的拌料系统中,将低密度聚乙烯(LDPE)和五氧化二锡按照 0.08~0.3:1 的比例混合熔融,其中加料段温度控制在 130~150 °C,塑化段温度控制在 170~190 °C,均化段温度控制在 200~220 °C。熔融料经挤出机平模成型后,于真空辊处吸塑成气泡膜,制备出聚乙烯气泡层。其中,真空辊的温度为 160~180 °C,真空度在 0.04 MPa 左右。气泡层制备后,在牵引复合辊的作用下,在线将气泡层与铝箔反射层热压复合,最终制得铝箔气泡复合材料,其制备工艺流程如图 4 所示。

1.3 测试表征

铝箔气泡复合材料的微观形貌采用 FEI Quanta FEG 250 场发射环境扫描电子显微镜进行观察分析。铝箔气泡复合材料的隔热性能用热导率

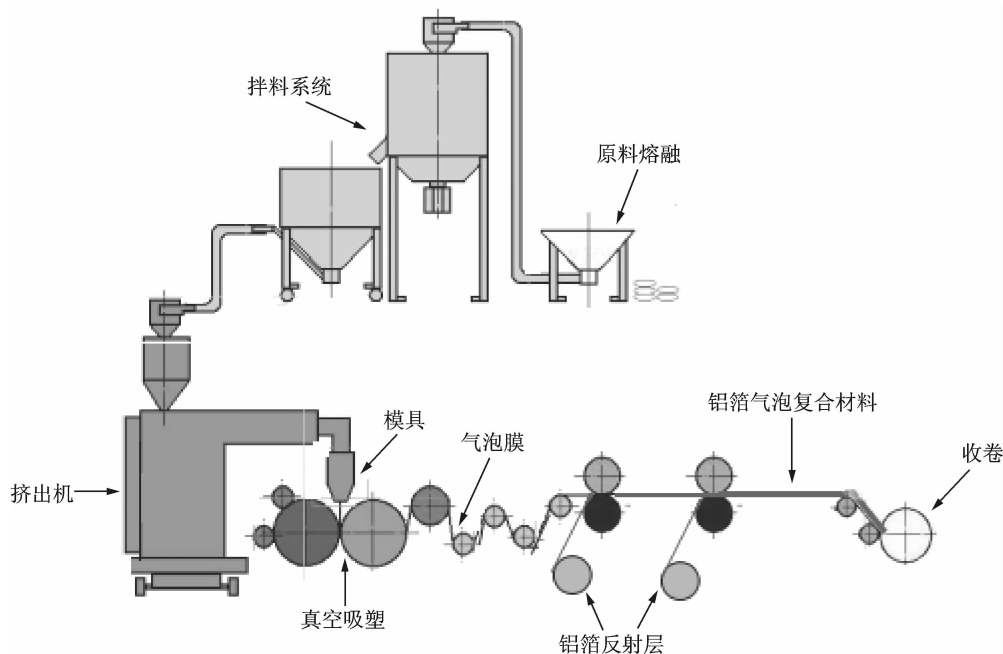


图 4 铝箔气泡复合材料制备工艺

Fig. 4 Preparation process of aluminum foil/bubble composite

进行表征。热导率也称导热系数,其值越小表明材料隔热性能越好。本文依据 ASTM C518-2010 用热流计法测定稳态热流通量的方法,采用 NETZSCH HFM436 导热分析仪对材料的热导率进行测试,该导热分析仪可同时测得材料的热阻值及厚度,热导率的测试误差范围为 $\pm(1\sim3)\%$ 。实验样品尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times h$,其中厚度 h 根据实验要求进行变化。

2 结果与讨论

2.1 铝箔气泡复合材料的组织结构

铝箔气泡复合材料为三明治夹心结构,两侧表面为铝箔反射层,中间为聚乙烯气泡层。其中间气泡层可以设置多层聚乙烯气泡,层内气泡整齐排列,本文制备的气泡直径为 $10\sim 20\text{ mm}$,高度为 $4\sim 8\text{ mm}$,气泡内为空气,铝箔气泡复合材料的结构示意图如图 5 所示,实物图如图 6 所示。

不同反射层结构的截面扫描电子显微镜(Scan-

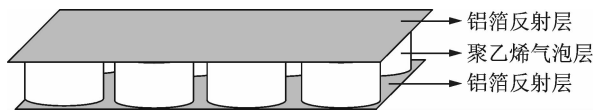
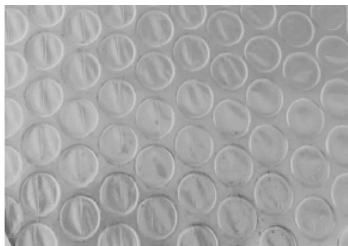
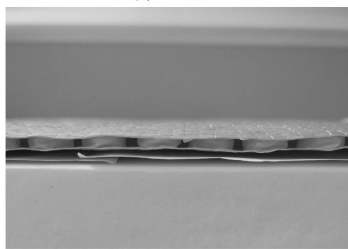


图 5 单层铝箔气泡复合材料的结构示意图

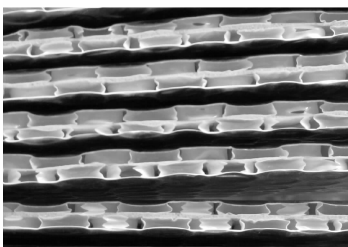
Fig. 5 Structure of single-layer aluminum foil/bubble composite



(a) Surface



(b) Cross-section of single-layer

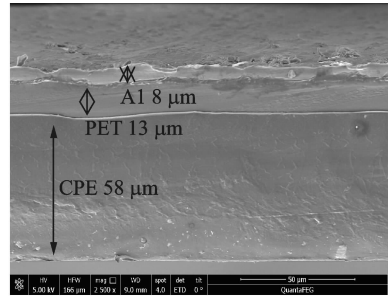


(c) Cross-section of double-layer

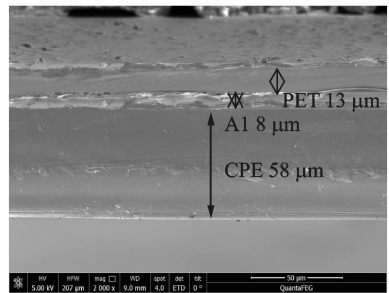
图 6 铝箔气泡复合材料实物图

Fig. 6 Pictures of aluminum foil/bubble composite

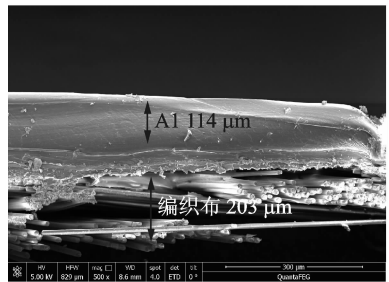
ning electron microscope, SEM) 图如图 7 所示。从图 7 可见,反射层中各层间有明显分层现象,结构为 Al/PET/CPE 和 PET/Al/CPE 的反射层厚度相同,铝箔的厚度均为 $8\text{ }\mu\text{m}$,PET 膜的厚度均为 $13\text{ }\mu\text{m}$,CPE 膜的厚度均为 $58\text{ }\mu\text{m}$;而结构为 Al/编织布,其铝箔厚度为 $114\text{ }\mu\text{m}$,编织布的厚度为 $203\text{ }\mu\text{m}$ 。



(a) Al/PET/CPE



(b) PET/Al/CPE



(c) Al/woven cloth

图 7 3 种反射层结构的截面 SEM 图

Fig. 7 Cross-section SEM micrograph of three kinds reflective layers

2.2 气泡层数对铝箔气泡复合材料隔热性能的影响

实验过程中,控制铝箔气泡复合材料的气泡直径为 10 mm 、气泡高度为 4 mm 、反射层结构为 Al/PET/CPE,研究气泡层数对材料隔热性能的影响。图 8 为不同气泡层数的铝箔气泡复合材料在室温下测得的热导率结果,从图 8 可见,单层铝箔气泡复合材料的热导率为 $0.039\text{ 6 W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,随着气泡层数的增加,铝箔气泡复合材料的热导率也随之增加,至气泡层数达 4 层,其热导率已达 $0.054\text{ 7 W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。可以从两方面尝试解释这一现象:

(1) 气泡层数增加,气泡层的传热发生了变化。气泡层的传热包含 3 部分:一部分通过气体传

热;一部分通过骨架,即气泡壁进行固体传热;还有一部分通过气体对流传热。气泡层数增加,气体导热热阻增大,材料热导率降低。但同时气体的对流传热及气泡壁的固体传热也得到加强,材料热导率上升,且这两者对气泡层传热的加强作用要大于气体导热对传热的阻碍作用。最终呈现材料的隔热性能下降,热导率的上升。

(2) 材料热导率 λ 与厚度 h 、热阻 R 之间存在有如下关系: $\lambda=h/R$ 。图 9 为气泡层数对材料厚度及热阻的影响结果,从图 9 可见,随着气泡层数的增加,材料厚度的增幅要大于热阻的增幅,从而导致热导率增大。这主要是因为铝箔气泡复合材料不是由单一组分构成的,厚度与热阻之间呈现了非线性变化。

2.3 气泡直径对铝箔气泡复合材料隔热性能的影响

控制铝箔气泡复合材料气泡层数为单层,且气泡高度为 4 mm、反射层结构为 Al/PET/CPE,研究气泡直径大小对隔热性能的影响。图 10 为不同气泡直径的铝箔气泡复合材料在室温下测得的热导率结果。从图中可见,随着气泡直径从 10 mm 逐步增大到 20 mm,铝箔气泡复合材料的热导率也从 0.039 6 W/(m · K) 缓慢减小到 0.034 9 W/(m · K),且直径在 15~20 mm 阶段的热导率下降速率要大于 10~15 mm 阶段的热导率下降速率。气泡直径增大,材料热导率降低,可

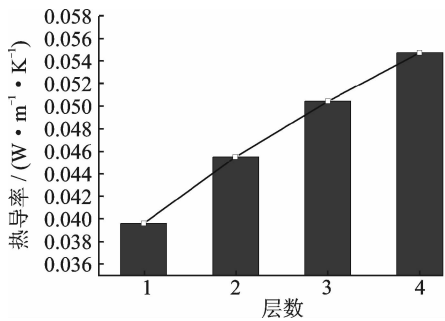


图 8 气泡层数对热导率的影响

Fig. 8 Effect of bubble layers on thermal conductivity

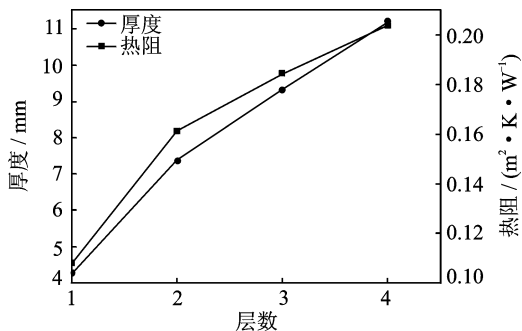


图 9 气泡层数对铝箔气泡复合材料厚度及热阻的影响

Fig. 9 Effect of bubble layers on thickness and thermal resistance

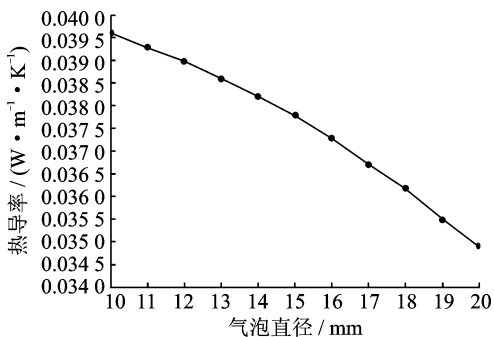


图 10 气泡直径对铝箔气泡复合材料热导率的影响

Fig. 10 Effect of bubble diameter on thermal conductivity of the composite

以从两方面解释这一现象:

(1) 从热阻角度看,铝箔气泡复合材料的总热阻可以看作气泡层热阻与铝箔反射层热阻之和,显然增大气泡直径对反射层热阻无影响,但会导致材料单位体积内气体含量增大,气泡层导热热阻增大,材料总热阻增大。材料的热导率与热阻成反比关系,热阻增大,则材料的热导率降低。

(2) 从传热角度看,气泡直径增大,单位体积内气泡壁数量减少,气泡层固体传热减小。而增大气泡直径,对密闭气泡内气体的对流传热影响甚微。因而增大气泡直径,在固体导热减小、气体热阻增大的共同作用下,材料隔热性能提高,热导率降低。

值得注意的是,聚乙烯气泡形成了空气间层,提高了复合材料的热阻,且增大气泡体积能有效提高空气间层的热阻作用,降低材料的热导率。但是聚乙烯气泡层作为铝箔气泡复合材料的中间夹层结构,一定程度上对两边的铝箔反射层起到了支撑作用,所以整个气泡层应当具有一定的力学性能。同时考虑到材料整体的力学性能及使用性能,在实际生产过程中不能一味追求材料的低热导率而盲目增大气泡体积。

2.4 反射层结构对铝箔气泡复合材料隔热性能的影响

保持单层铝箔气泡复合材料的气泡直径为 10 mm,气泡高度为 4 mm,本节研究了反射层结构对材料隔热性能的影响。表 1 为反射层结构对铝箔气泡复合材料室温下热导率的影响结果。比较 R1 和 R2 号样品可以发现,当铝箔同在反射层

表 1 反射层结构对铝箔气泡复合材料热导率的影响

Tab. 1 Effect of reflective layer structure on thermal conductivity of the composite

编号	气泡层数	样品厚度/mm	气泡直径/mm	反射层结构	热导率 / (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
R1	单层	4	10	Al/PET/CPE	0.039 6
R2	单层	4	10	Al/编织布	0.039 8
R3	单层	4	10	PET/Al/ CPE	0.040 7

的外层时,两者热导率相差不大。R1 和 R2 号样品区别在于两者的依托材料不同,R1 依托材料为 PET 与 CPE 的复合薄膜,R2 依托材料为编织布。反射层主要是对热辐射起阻碍作用,铝箔的反射率极高,其反射特性与铝箔厚度无关。热辐射对铝箔膜的穿透能力很弱,约 $1.5 \mu\text{m}$ 厚的铝箔便可将热辐射全部反射和吸收。从目前铝箔的加工工艺看,铝箔的最小厚度为 $5 \mu\text{m}$ 。因而,当铝箔膜位于反射层外层时,铝箔有能力将热辐射几乎全部阻挡。故依托材料的变化,对铝箔阻碍热辐射的能力影响不大,R1 和 R2 的热导率相近。

比较 R1 和 R3 号样品可以发现,铝箔膜在反射层中的位置对材料的热导率有影响。当铝箔从反射层外层变化到中间时,材料热导率上升,增幅约为 2.8%。因为依托材料的变化,对铝箔反射率的影响较小,则 R3 号样品相当于在 R1 号样品的铝箔膜外部涂覆了一层 PET 保护膜。铝箔的表面涂层会影响其表面发射率,光亮洁净的铝箔表面发射率约为 0.08,对其进行表面涂层后,铝箔发射率增加 1.5~6.6 倍。材料发射率增大会导致其反射率下降。具体地,PET 保护膜作为透明涂层,其在短波范围内有较高的透光率,对铝箔反射率影响不大;但在长波范围内 PET 保护膜对热辐射有较高的吸收性,会影响铝箔反射长波热辐射的能力。材料处于外界环境中时,除了接受来自太阳的短波辐射外,还有许多来自其他热源的长波辐射。因此,当 PET 膜作为铝箔的外护层时,铝箔阻碍热辐射的能力受影响,材料热导率上升。

2.5 熟化处理对铝箔气泡复合材料隔热性能的影响

材料在制备成功后,常会对其进行后处理,以改善材料的综合性能。本文将制备好的铝箔气泡复合材料在 GDW 程式恒温恒湿试验箱内进行熟化处理,研究熟化温度对材料隔热性能的影响。熟化过程中,控制试验箱内相对湿度为 50%,熟化时间为 24 h,熟化温度分别为 40,60,80 和 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。熟化结束后,取出测试样品,于温度为 $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$,湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 的环境中静置 24 h 后,测试样品的热导率。熟化过程中所用铝箔气泡复合材料的参数如表 2 所示。

表 2 熟化处理用铝箔气泡复合材料的相关参数

Tab. 2 Parameters of aluminum foil/bubble composites for aging treatment

编号	剖面结构	反射层结构	样品厚度/ mm	气泡直径/ mm
T1	单层	Al/PET/CPE	4	10
T2	单层	PET/Al/CPE	4	10
T3	双层	PET/Al/CPE	7	10
T4	单层	Al/编织布	7	15
T5	单层	Al/编织布	4	10

材料经不同温度熟化处理后的热导率变化如图 11 所示。可以看到,熟化处理对材料的隔热性能起到了优化作用,样品 T1~T5 热导率在熟化处理后均有明显降低。样品 T1~T3 随着熟化温度的升高,热导率基本维持下降趋势。熟化温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,熟化结束后 T1, T2, T3 号样的热导率降幅分别为 6.91%, 11.36%, 15.26%, 双层结构的 T3 号样热导率下降尤为明显。T4 号样,熟化温度小于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,热导率随温度升高而下降;熟化温度大于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 后,热导率随温度升高而缓慢增大;熟化温度取 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,热导率降幅最大,为 14.35%。T5 号样热导率随熟化温度的升高,呈起伏式变化,但与常温状态下的热导率相比较,熟化后的热导率均有下降;熟化温度取 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,热导率降幅最大,为 4.08%。

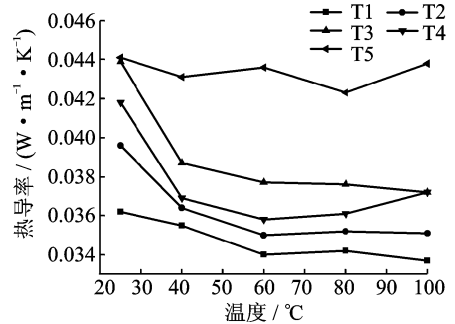
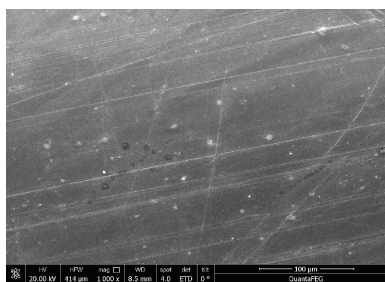


图 11 熟化处理温度对铝箔气泡复合材料热导率的影响
Fig. 11 Effect of aging temperature on thermal conductivity

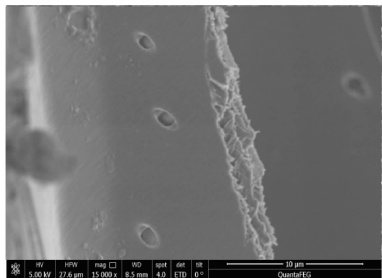
温度和水分对材料的隔热性能具有交互影响作用,在熟化处理过程中,试验箱中的相对湿度与热导率测试环境的相对湿度一致,因而主要是温度处理引起了材料热导率的降低。可能原因有两方面,一方面材料在制备过程中会产生微孔、龟裂等缺陷,尤其是铝箔表面极易产生划痕、针孔等损伤。图 12 为 T1 样品未熟化时反射层表面及气泡膜表面的 SEM 图,从图可见,反射层表面有明显的划痕、白点等损伤,而气泡膜表面存在微孔、龟裂等缺陷。材料中的这些缺陷和损伤会对环境中的水蒸气进行物理吸附。对材料进行熟化处理时,材料中吸附的水分子会随着熟化温度的升高以及熟化时间的延长而发生脱附,材料含湿率下降,水的热导率是空气的 20 多倍,含湿率下降,能有效降低材料的热导率。另一方面,从微观角度看,熟化处理后,可能发生 LDPE 大分子链崩坏现象,从而生成杂链,大分子链规整度下降,分子受到的散射增加,材料热导率降低。

2.6 铝箔气泡复合材料的隔热机理

宏观上,在不做功的前提下,热量从高温物体



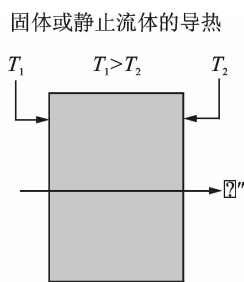
(a) Surface of reflective layer



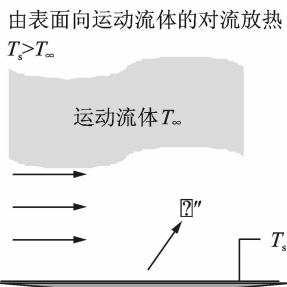
(b) Surface of bubble film

图 12 未熟化的 T1 样品反射层及气泡膜表面 SEM 图

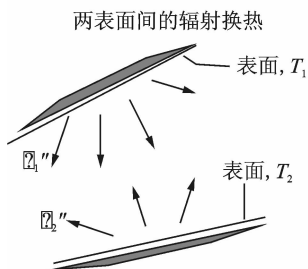
Fig. 12 Surface SEM micrograph of untreated T1 sample
 迁移到低温物体的过程,称为热传递。阻止热传递的过程即为隔热。热传递有 3 种基本方式:热传导,热对流,热辐射。图 13 为 3 种热传递方式的示意图。



(a) Thermal conduction



(b) Thermal convection



(c) Thermal radiation

图 13 3 种传热方式的示意图

Fig. 13 Three types of heat transfer

热传导在铝箔气泡复合材料中主要表现在 3 方面,即反射层固体传导、气泡壁固体传导以及气泡内气体传导。从热阻方面分析,铝箔气泡复合材料的热阻可以视为气泡壁导热热阻与气体导热热阻的并联,而后与反射层导热热阻的串联。其中,气体导热的热阻要远大于气泡壁及反射层的导热热阻。铝箔气泡复合材料中的热对流为气体的自由对流,气泡壁将气体封闭在相对静止空间内,而封闭空间内静止气体的对流传热相对较小。此外,铝箔气泡复合材料的表面反射层能将 90% 以上的热源反射至周围环境中,可有效降低热辐射的传热作用。

实际工程应用中,热源向铝箔气泡复合材料进行热量传递时,以热辐射形式传递的热量被反射层有效阻截,反射至环境中。以热传导形式传递的热量经反射层部分吸收后,传至气泡层,一部分沿气泡壁进行固体导热,传热路径变长,热量传递速度减缓;剩余部分以气泡内气体导热和对流两种形式进行传热。气体导热热阻大,有效阻碍了热量在气体中的传导,且密闭空腔中,气体的对流传热也较小,气泡层内气体导热和对流传热都相对较小。铝箔气泡复合材料在对热辐射有高反射作用的同时,对热传导及热对流传热也有阻碍作用,因而具有较好的隔热性能,材料热导率较小。

3 结 论

本文介绍了铝箔气泡复合材料的制备工艺及其结构,并对其隔热性能进行了测试研究,研究了气泡层数、气泡直径、反射层结构及熟化温度对铝箔气泡复合材料热导率的影响,分析了该材料的隔热机理。可得下述结论:

- (1)随着气泡层数的增加,铝箔气泡复合材料的热导率有所增加,主要是气泡层内气体对流传热及气泡壁固体导热作用加强所致;
- (2)随着气泡直径的增大,铝箔气泡复合材料的热导率有所降低,主要是材料单位体积内气体含量增大,气泡壁数量减小,在增大了气体导热热阻的同时又降低了固体热传导所致;
- (3)铝箔在反射层结构中的位置对材料热导率有影响,当铝箔表面有外护涂层时,会使其反射率下降,从而导致材料热导率上升;
- (4)铝箔气泡复合材料经 40~100 °C × 24 h 熟化,材料热导率有所降低,隔热性能得到优化。

铝箔气泡复合材料室温下平均热导率为 0.037 W/(m · K),0.08 mm 的铝箔反射层透湿

率为 $0.012 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot \text{kPa})^{[17]}$,因而材料具有优异的隔热、防水防潮性能,且生产成本较低,能应用于建筑、热力管道等保温节能领域,适于推广使用。

参考文献:

- [1] USEI Administration. Annual Energy outlook 2013 with projections to 2040[R]. [S. l.]:Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2013.
- [2] 吕悦. 用智能化实现建筑“绿”目标[J]. 智能建筑与城市信息, 2014(7):6.
LÜ Yue. Realize the goal of green building by intelligent[J]. Intelligent Building & City Information, 2014(7):6.
- [3] 刘长城. 基于 BIM 理论的建筑能耗评估和分析[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2013.
LIU Changcheng. BIM-based building energy evaluation and analysis[D]. Hefei:Anhui Jianzhu University, 2013.
- [4] 李键灵. 真空玻璃:让被动式低能耗建筑更节能[J]. 建材发展导向, 2014(10):96-97.
LI Jianling. Vacuum glass: Makes passive energy-efficient buildings save more energy[J]. Development Guide to Building Materials, 2014(10):96-97.
- [5] 李艳杰. 供热管道保温问题的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2005.
LI Yanjie. The research of insulation pipelines[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2005.
- [6] 王慧. 管道保温结构的模拟与优化[D]. 广州:华南理工大学, 2001.
WANG Hui. The simulation and optimization of heat insulation structure[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2001.
- [7] 韩伟康. 二氧化硅气凝胶棉毡保温性能研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2011.
HAN Weikang. The research of thermal conductivity coefficient of silica aerogel felt[D]. Qingdao:Qingdao Technological University, 2011.
- [8] 权向科, 包军. 建筑外保温材料消防安全探讨研究与应用[J]. 四川建材, 2014(1):247-248.
QUAN Xiangke, BAO Jun. The research of building exterior insulation materials on fire safety and its application[J]. Sichuan Building Materials, 2014(1): 247-248.
- [9] BUDAIWI I, ABDOU A, AL-HOMOUD M. Variations of thermal conductivity of insulation materials under different operating temperatures: Impact on envelope-induced cooling load[J]. Journal of Architectural Engineering, 2002, 8(4):1085-1092.
- [10] 刘柱平. 建筑墙体保温材料的研究现状与发展趋势[J]. 广东化工, 2010, 37(7):91-92.
LI Zhuping. Research status and development trend of building wall insulation material[J]. Guangdong Chemical Engineering, 2010, 37(7):91-92.
- [11] SHUNMUGASAMY V C, PINISETTY D, GUPTA N. Thermal expansion behavior of hollow glass particle/vinyl ester composites[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(47):5596-5604.
- [12] NJUGUNA J, MICHALOWSKI S, PIELICHOWSKI K, et al. Fabrication, characterization and low-velocity impact testing of hybrid sandwich composites with polyurethane/layered silicate foam cores [J]. Polymer Composites, 2011, 32(32):6-13.
- [13] JELLE B P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions— Properties, requirements and possibilities[J]. Energy & Buildings, 2011, 43(10):2549-2563.
- [14] 柳娟. 聚氨酯铝箔复合风管的特点及制安工艺[J]. 安装, 2011(3): 32-34.
LIU Juan. The characteristic and its installation technology of polyurethane/Al foil composite[J]. Installation, 2011(3): 32-34.
- [15] 王洲, 吴佳霖, 郭燕. 屋顶铝箔防水卷材保温性能研究[J]. 山西建筑, 2010(5):188-190.
WANG Zhou, WU Jialin, GUO Yan. On the research of the thermal insulation properties of roof aluminum waterproof coiled material[J]. Shanxi Architecture, 2010(5):188-190.
- [16] 苏高辉, 杨自春, 孙丰瑞. 铝箔对绝热层绝热性能影响的实验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(9):18-20.
SU Gaohui, YAN Zichun, SUN Fengrui. Experimental research of the aluminum foil influence on the insulation performance[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(9):18-20.
- [17] 邹宁宁. 绝热材料应用技术[M]. 北京:中国石化出版社, 2005:199-204.
ZHOU Ningning. Applied technology of thermal insulation materials[M]. Beijing:China Petrochemical Press, 2005:199-204.

(编辑:夏道家)