

# SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热涂层隔热与耐高温性能研究

丁逸栋<sup>1</sup>, 刘朝辉<sup>1</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 杨宏波<sup>1</sup>, 舒心<sup>1</sup>

(1.解放军后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311; 2.94786 部队, 江西 樟树 331200)

**摘要:** **目的** 探究 SiO<sub>2</sub> 气凝胶在绝热涂层中的应用, 利用 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的低导热系数、低密度、高孔隙率及低折射率等优异性质, 提高涂层隔热性能和耐高温性能。**方法** 通过筛选不同类型的水性树脂和功能填料, 选择吸热较少的树脂和隔热性能优异的填料作为绝热涂层的原材料。采用自制隔热装置以及导热系数测量仪, 对添加不同质量分数 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的绝热涂层的隔热性能进行研究, 并采用 XRD、FT-IR 等多种分析手段, 研究涂层加热到 200、300、400 °C 时的物相结构和基团变化。**结果** 水性丙烯酸树脂含吸热基团较少, 在相同光照条件下, 平衡温度分别比聚氨酯树脂和环氧树脂低 0.8 °C 和 1.8 °C, 适宜作 SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热涂层的成膜物质。涂层隔热性能随 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数的增加呈先增强后减弱的趋势, 当 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数为 5% 时, 涂层的隔热性能最佳, 同未添加 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的涂层相比, 最大温差可达 12 °C。随 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数的增加, 涂层的耐高温性能提升, 当 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的质量分数为 7% 时, 涂层能在 400 °C 高温下保持良好的性能。**结论** SiO<sub>2</sub> 气凝胶对隔热涂层的隔热性能和耐高温性能有较大提升, 对 SiO<sub>2</sub> 气凝胶涂层的多领域应用奠定了一定基础。

**关键词:** SiO<sub>2</sub> 气凝胶; 绝热涂层; 导热系数; 耐高温; 性能

**中图分类号:** TG174.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)04-0197-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.04.032

## Thermal Insulation Performance and Heat Resistance of SiO<sub>2</sub> Aerogel Coating

DING Yi-dong<sup>1</sup>, LIU Zhao-hui<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, YANG Hong-bo<sup>1</sup>, SHU Xin<sup>1</sup>

(1.Department of Chemistry & Material Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;  
2.Unit 94786, Zhangshu 331200, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore application of SiO<sub>2</sub> aerogel in thermal-insulating coating, and improve thermal insulation performance and heat resistance by taking advantage of its low thermal conductivity, low density, high porosity and low refractive index. Resin of lower heat absorptivity and filler of excellent thermal insulation performance were selected as raw materials of thermal-insulating coating by screening different types of water-base resin and functional filler. Thermal insulation performance of thermal-insulating coatings with different mass fractions of SiO<sub>2</sub> aerogel was studied with homemade thermal insulation device and thermal conductivity measuring instrument. Phase structure and group change of the coatings heated to 200, 300 and 400 °C were studied in FT-IR and XRD methods. Water-based acrylic resin contained less endothermic groups, and its

收稿日期: 2016-12-21; 修订日期: 2017-01-27

Received: 2016-12-21; Revised: 2017-01-27

基金项目: 全军后勤科研计划项目 (BY115C007); 重庆市自然科学基金 (cstc2014jcyjA50026)

Fund: Supported by Logistical Scientific Research Projects of Army (BY115C007), National Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2014jcyjA50026)

作者简介: 丁逸栋 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为保温隔热材料。

Biography: DING Yi-dong (1990—), Male, Master graduate student, Research focus: thermal insulation material.

通讯作者: 刘朝辉 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为保温隔热技术。

Corresponding author: LIU Zhao-hui (1965—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: thermal insulation technology.

equilibrium temperature was 0.8 °C and 1.8 °C lower than that of polyurethane resin and epoxy resin respectively in same illumination conditions. It was more suitable to be used as film-forming materials of SiO<sub>2</sub> aerogel heat insulation coating. As mass fraction SiO<sub>2</sub> aerogel increased, heat insulation performance first improved and then reduced. The heat insulation performance was the best when the SiO<sub>2</sub> aerogel mass fraction was 5%, insulating performance and temperature might reduce by 12 °C. Meanwhile, the heat insulation performance improved as the SiO<sub>2</sub> aerogel increased. When the mass fraction of SiO<sub>2</sub> aerogel was 7%, the coating could maintain good properties at 400 °C. SiO<sub>2</sub> aerogel can improve the heat insulation performance and heat resistance of thermal-insulating coating significantly, laying the foundation of its multidisciplinary application.

**KEY WORDS:** SiO<sub>2</sub> aerogel; thermal-insulating coating; thermal conductivity; heat-resistant; performance

SiO<sub>2</sub> 气凝胶作为新型材料领域中研究的热点纳米材料,主要由 90%以上的空气和低于 10%的固体骨架组成,具有低密度、低导热系数、高孔隙率、低折射率等<sup>[1-4]</sup>优异特性,使其可广泛应用于航空航天、军工、石化、冶金、建筑等领域。SiO<sub>2</sub> 气凝胶作为高效隔热材料早已成为研究的热点,与现有的建筑保温材料相比,具有轻质、防火、防潮、隔音且环保等优势,对于发展新型建筑材料具有显著优势<sup>[5-7]</sup>。目前, SiO<sub>2</sub> 气凝胶应用于建筑保温隔热材料<sup>[8-9]</sup>的主要形式有 SiO<sub>2</sub> 气凝胶玻璃<sup>[10]</sup>、SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热毡<sup>[11]</sup>、SiO<sub>2</sub> 气凝胶混凝土<sup>[12]</sup>、砂浆<sup>[13]</sup>以及 SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热涂层<sup>[14]</sup>。

SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热涂层材料是由成膜物质、SiO<sub>2</sub> 气凝胶填料、助剂和水溶剂,通过配方设计混合、分散制备而成。其中,成膜物质和功能填料是决定涂层材料隔热性能的关键。成膜物质是隔热涂层材料的粘结剂,能使涂层具备基本的力学性能。SiO<sub>2</sub> 气凝胶用于涂料的功能填料时,是降低涂层导热系数、提高隔热效率的关键因素,能较大提高涂层的隔热效率以及耐高温等性能。本文对涂层成膜物质和功能填料进行了遴选,并研究涂层组分对涂层隔热和耐高温性能的影响。

1 试验

1.1 原材料与仪器

试验主要原材料和仪器设备如表 1—2 所示。

1.2 涂层制备

首先,将疏水型 SiO<sub>2</sub> 气凝胶颗粒与多级铝珠混合,调节高能球磨机转速为 500 r/min,研磨时间 5 min,循环次数为 1 次,将 SiO<sub>2</sub> 气凝胶颗粒磨制成纳米级粉体。然后,将润湿剂、分散剂和去离子水加入烧杯中,烧杯中放入一定量的铝珠,以 300~500 r/min 低速搅拌 3 min,待均匀后将部分消泡剂滴入烧杯,随后加入 SiO<sub>2</sub> 气凝胶粉体,调节转速至 1800 r/min,分散时间为 3 h。开始时为防止粉体挥飞,应将烧杯杯口密封。最后,将水性丙烯酸树脂、成膜助剂添加至烧杯,同时调低转速到 700 r/min,此过程中为消除涂层材料

表 1 试验所用原材料  
Tab.1 Main materials for experiments

序号	名称	生产厂商
1	疏水型SiO <sub>2</sub> 气凝胶	广东埃力生高新科技有限公司
2	有机硅表面活性剂 Silok 7117	广州市斯洛柯化学有限公司
3	烷基胺盐分散剂Silok 7195	广州市斯洛柯化学有限公司
4	水性丙烯酸树脂	珠海吉力化工有限公司
5	水性环氧树脂	珠海吉力化工有限公司
6	水性聚氨酯树脂	珠海吉力化工有限公司
7	成膜助剂(醇酯十二)	珠海吉力化工有限公司
8	钛白粉	美国HUNTSMAN公司
9	空心玻璃微珠	美国3M公司
10	远红外陶瓷粉	灵寿县旭航矿产品经销有限公司
11	环氧固化剂	珠海吉力化工有限公司
12	消泡剂681-F	法国罗地亚公司
13	去离子水	自制

表 2 主要实验仪器与设备  
Tab.2 Main experimental instruments and equipment

名称	型号	生产厂家
多功能分散机	SEM-L-I	上海铮康机电有限公司
电子天平	APTP457A	深圳安普特电子科技有限公司
分析天平	ATL-224-1	北京赛多利斯科学仪器有限公司
高能球磨机	Pulver isette4	德国Fritsch公司
X射线衍射仪	XRD-6100型	日本岛津公司
傅里叶变换红外光谱仪	Nicolet 6700	美国Thermo Fisher公司
扫描电镜	S-3700N	日本日立公司
热分析仪	SDTQ600	美国TA公司

中的气泡,在添加剩余消泡剂的同时,采用逐级降速的消泡方法。

### 1.3 性能测试与表征

试验依据 JG/T 402—2013《热反射金属屋面板》，并对标准中的装置进行针对性改进，采用厚度为 300 mm，导热系数为 0.025 W/(m·K) 的聚苯乙烯泡沫板，自制了测试涂层样板隔热性能的试验装置，如图 1 所示。采用傅里叶红外光谱仪 (FT-IR) 对成膜物质基团进行分析表征。采用导热系数测量仪 (Hot disk)、扫描电子显微镜 (SEM) 等，对添加不同质量分数 SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热涂层的隔热性能进行测试分析，并采用 X 射线衍射仪 (XRD) 以及傅里叶红外光谱仪 (FT-IR) 等，对经马弗炉加热至 200、300、400 °C 后涂层的耐高温性能进行分析测试。

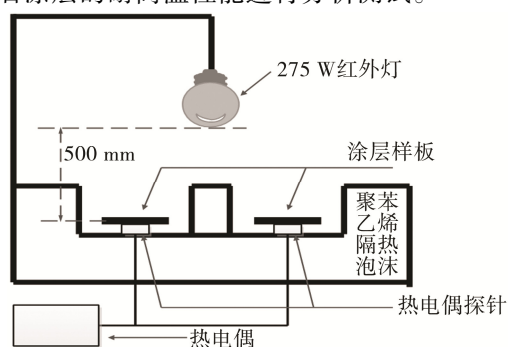


图1 隔热性能测试装置

Fig.1 Sketch map of heat-insulation performance testing

## 2 结果与分析

### 2.1 原材料的遴选

#### 2.1.1 成膜物质的选择

由太阳光谱可知，太阳辐射能中可见光和近红外区域 (0.4~2.5 μm) 的能量占总能量的 90% 以上，故绝热涂层材料中的成膜物质应尽量在可见光和近红外区域吸收率低，因此成膜物质在结构上应该尽量少含醚基 (C—O—C)、羟基 (—OH) 和羰基 (C=O) 等吸能基团。同时，成膜物质还必须具有较好的硬度、耐磨性、耐水性等力学性能以及耐热性能。

图 2—4 分别为水性丙烯酸树脂、水性聚氨酯树脂和水性环氧树脂的透过率红外谱图。从水性丙烯酸树脂的红外谱图中可知，2960、2875、1453 cm<sup>-1</sup> 分别属于甲基 (CH<sub>3</sub>) 的反对称伸缩振动、对称伸缩振动、不对称边吸收峰，1731 cm<sup>-1</sup> 属于羰基 (C=O) 的伸缩振动吸收峰，1065 cm<sup>-1</sup> 属于 C—N 的伸缩振动吸收峰，770 cm<sup>-1</sup> 和 705 cm<sup>-1</sup> 都属于 COO<sup>-</sup> 的变角振动吸收峰。从水性聚氨酯树脂的红外谱图中可知，1250 cm<sup>-1</sup> 和 1153 cm<sup>-1</sup> 分别为聚氨酯树脂中特征基团氨基基 C—O—C 的对称伸缩振动吸收峰，3339 cm<sup>-1</sup> 属于 NH<sub>2</sub> 对称伸缩吸收峰，2955 cm<sup>-1</sup> 和 1455 cm<sup>-1</sup> 分别属于 CH<sub>3</sub> 不对称边角和反对称伸缩吸收峰，1731 cm<sup>-1</sup> 属于羰基 (C=O) 的伸缩振动吸收峰，1547 cm<sup>-1</sup> 属

于仲酰胺 NH 面内弯曲吸收峰。从水性环氧树脂的红外谱图中可知，835 cm<sup>-1</sup> 为环氧树脂特征基团环氧基中 C—O—C 的振动吸收峰，2935 cm<sup>-1</sup> 和 760 cm<sup>-1</sup> 分别属于烷烃 CH<sub>2</sub> 反对称伸缩和振动吸收峰，1599 cm<sup>-1</sup> 属于芳族环中 C=C 振动吸收峰，1510 cm<sup>-1</sup> 属于芳香族 C—C 吸收峰，1040 cm<sup>-1</sup> 属于醚基 (C—O—C) 吸收峰。

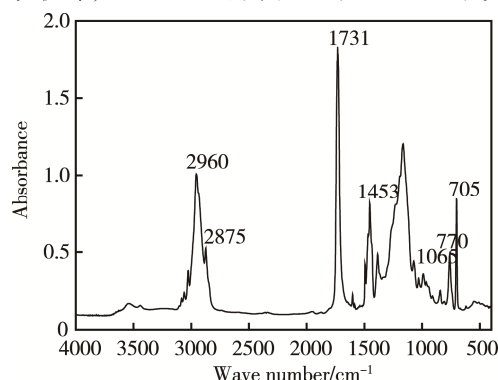


图2 水性丙烯酸树脂红外谱图

Fig.2 The infrared spectra of acrylic resin

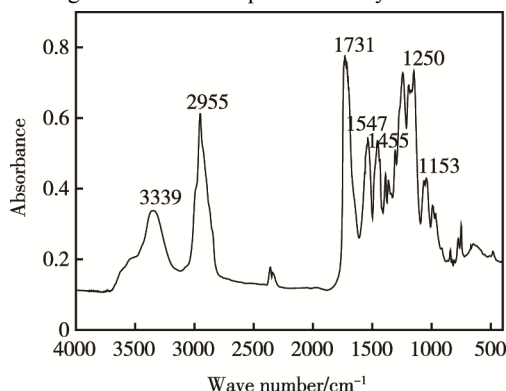


图3 水性聚氨酯树脂红外谱图

Fig.3 The infrared spectra of polyester resin

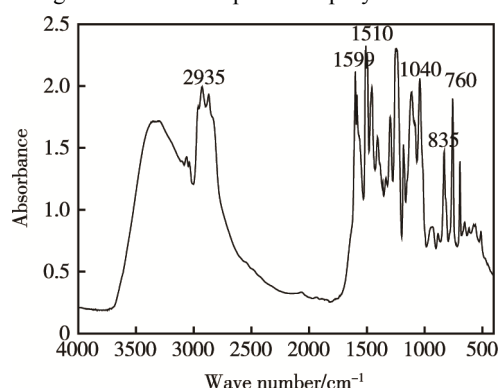


图4 水性环氧树脂红外谱图

Fig.4 The infrared spectra of epoxy resin

图 5 为水性丙烯酸树脂、水性聚氨酯树脂和水性环氧树脂三种纯树脂涂层样板背面的温度变化曲线。通过比较得出，三种样板背面温度差异并不十分显著，涂覆水性丙烯酸树脂的样板背面温度较聚氨酯树脂和环氧树脂分别低 0.8 °C 和 1.8 °C，说明在相同环境条件下，水性丙烯酸树脂吸收的热量要比水性聚氨酯树脂和水性环氧树脂都要少，故在制备绝热涂层材

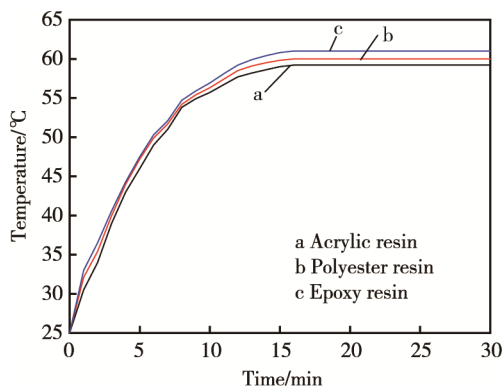


图 5 不同树脂涂层样板底面温度变化曲线

Fig.5 The change curve of temperature under the model in different resin coatings

料中优先选用水性丙烯酸树脂作为成膜物质,这更有利于提高涂层的隔热效果。

### 2.1.2 功能填料的选择

隔热涂层材料按其作用机理不同主要分为反射型隔热涂料、阻隔型隔热涂料和辐射型隔热涂料,这是添加到涂层材料中的功能填料性能不同所致。分别采用反射型填料钛白粉及空心玻璃微珠、阻隔型填料  $\text{SiO}_2$  气凝胶、辐射型填料远红外陶瓷粉等功能填料制备隔热涂层,并对隔热性能进行测试分析,结果如图 6 所示。通过对比发现,  $\text{SiO}_2$  气凝胶涂层样板的背面温度最低为 47.2 °C,平衡温度分别比钛白粉、空心玻璃微珠和远红外陶瓷粉隔热涂层低 6.2、4.2 和 5.8 °C,温度降幅明显,说明其隔热效果显著好于其他 3 种涂层。这是因为  $\text{SiO}_2$  气凝胶的纳米孔以及三维网状结构破坏了基质的热量传导路径,且其独特的

纳米孔结构限制了空气分子的自由流动,抑制了空气的对流传导,使其具有极低的导热系数,故选用  $\text{SiO}_2$  气凝胶作为绝热涂层的功能填料。

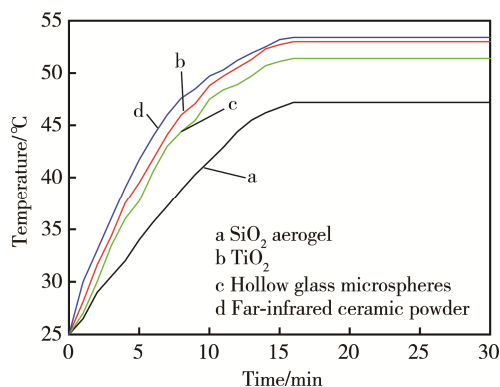


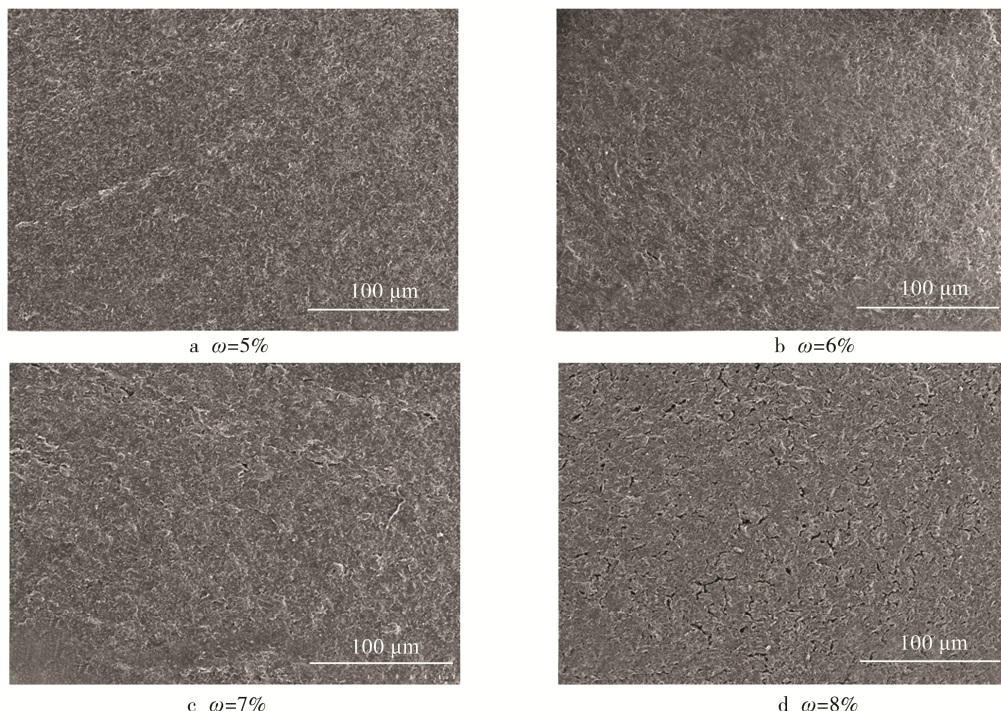
图 6 不同填料涂层样板底面温度变化曲线

Fig.6 The change curve of temperature under the model in different pigment coatings

## 2.2 $\text{SiO}_2$ 气凝胶绝热涂层隔热性能研究

### 2.2.1 微观形貌分析

图 7 为添加不同质量分数  $\text{SiO}_2$  气凝胶绝热涂层的扫描电镜图。从图中可知,当  $\text{SiO}_2$  气凝胶质量分数小于 7% 时,涂层的微观形貌致密且连续,随着  $\text{SiO}_2$  气凝胶质量分数的增加,涂层表面开始出现大小不一的孔洞;当质量分数达到 8% 时,涂层表面出现连续的裂纹。这可能是由于  $\text{SiO}_2$  气凝胶的密度小,比表面积大,当  $\text{SiO}_2$  气凝胶添加量超过一定程度时,其体积浓度超过临界体积浓度,涂层中  $\text{SiO}_2$  气凝胶粒子彼此分离,粒子之间的距离增大形成裂纹。

图 7 不同质量分数  $\text{SiO}_2$  气凝胶绝热涂料 SEM 照片Fig.7 SEM image of  $\text{SiO}_2$  aerogel thermal insulation coating with different mass fraction



## 2.2.2 不同质量分数 SiO<sub>2</sub> 气凝胶对隔热性能的影响

图 8 为不同质量分数 SiO<sub>2</sub> 气凝胶涂层样板底面的温度变化曲线。由图可知, 未涂覆 SiO<sub>2</sub> 气凝胶隔热涂层的样板底面平衡温度为 59.2 °C, 涂覆了 SiO<sub>2</sub> 气凝胶隔热涂层的样板底部平衡温度都有不同程度的降低。随着 SiO<sub>2</sub> 气凝胶添加量的增大, 样板底部的平衡温度呈现先降低后上升的趋势, 当 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的质量分数为 5% 时, 涂层的隔热效果最好, 此时样板的底部平衡温度为 47.2 °C, 与未涂覆隔热涂层的样板对比, 温度降低 12 °C。

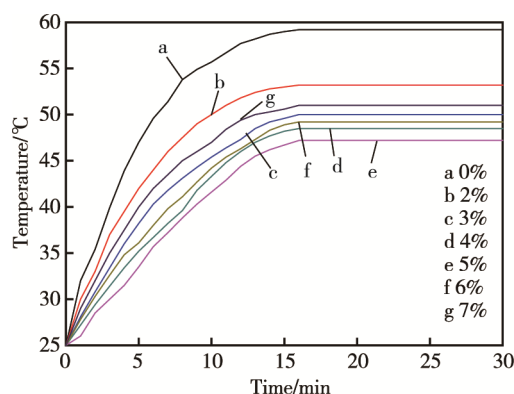


图 8 SiO<sub>2</sub> 气凝胶涂层样板温度变化曲线

Fig.8 The change curve of temperature under the model of SiO<sub>2</sub> aerogel coatings

图 9 为不同样板导热系数变化曲线。从图中可以看出, 当添加 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的质量分数小于 5% 时, 涂层的导热系数随 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的增加而降低, 质量分数等于 5% 时, 涂层的导热系数降到最低值为 0.08 W/(m·K)。当 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数超过 5% 时, 涂层的导热系数有较低幅度升高。综合图 7 分析, 这可能是随着 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数的增加, SiO<sub>2</sub> 气凝胶分散性能下降且涂层表面的裂纹破坏阻隔热量的连续性导致<sup>[15-16]</sup>。结果表明, SiO<sub>2</sub> 气凝胶涂层具有良好的隔热效果, 适量地添加 SiO<sub>2</sub> 气凝胶能较大幅度地降低涂层的导热系数, 起到较好的隔热效果。

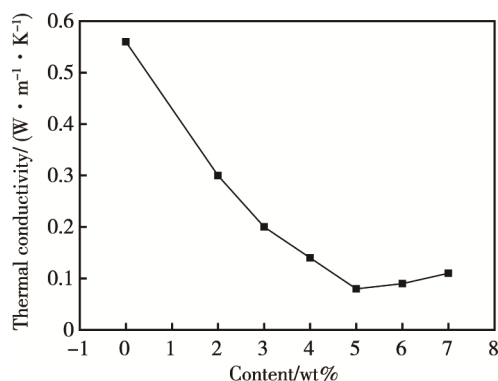


图 9 SiO<sub>2</sub> 气凝胶涂层样板导热系数

Fig.9 The change curve of thermal conductivity of SiO<sub>2</sub> aerogel coating

## 2.2.3 不同涂膜厚度对隔热性能的影响

选取隔热性能最佳时 SiO<sub>2</sub> 气凝胶添加量, 即添加 5% 的 SiO<sub>2</sub> 气凝胶, 采用涂布器方法制备湿膜厚度为 50、80、100、150、200 μm 的涂层, 常温固化后, 分别测试涂层样板的平衡温度和导热系数, 测试结果如图 10—11 所示。

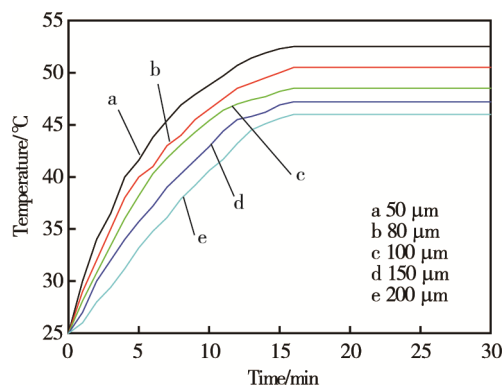


图 10 不同厚度涂层样板温度变化曲线

Fig.10 The change curve of temperature under the different thickness of coatings

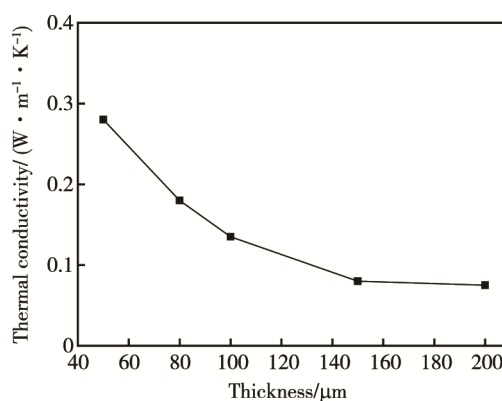


图 11 不同厚度涂层的导热系数

Fig.11 Thermal conductivity of different thickness of coatings

由图 10 可以看出, 随着涂层厚度的增加, 涂层样板的平衡温度逐渐降低, 说明涂层的隔热性能随着涂层厚度的增加而提高, 结合图 11 可知, 涂层厚度对涂层导热系数有较大影响, 导热系数数值从湿膜厚度为 50 μm 时的 0.28 W/(m·K) 降低到湿膜厚度为 200 μm 时的 0.075 W/(m·K), 说明涂层越厚, 导热系数越低。这是因为, 随着涂层厚度的增加, 单位面积内 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的含量提高, 使得 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的阻隔性能得到有效发挥, 涂层的隔热性能得到增强。湿膜厚度为 200 μm 时, 涂层样板的平衡温度为最低 46 °C, 比湿膜厚度为 50 μm 时要低 6.5 °C, 但其表面略微粗糙且柔韧性不佳。综合考虑, 选择涂覆厚度为 150 μm, 其涂层样板的平衡温度为 47.2 °C。

## 2.3 SiO<sub>2</sub>气凝胶绝热涂层耐高温性能研究

### 2.3.1 XRD 分析

图 12 为不同质量分数 SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热涂层经不同温度灼烧后的 XRD 谱图。从图 12 可以看出, 不同质量分数 SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热涂层经 200 °C 灼烧后, 其特征峰的位置几乎没有发生变化, 说明添加不同质量分数 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的绝热涂层, 在 200 °C 前后没有发生化学变化产生新物质, 各涂层都能耐 200 °C。涂层经 300 °C 灼烧后, SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数为 4% 和 5% 的涂层, 在 43°、50° 和 75° 附近出现了特征峰, 其原因可

能是随着温度的提高, 涂层出现裂纹, 导致 XRD 谱图中出现低碳钢基材物质的特征峰。SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数为 6% 和 7% 的涂层, 在相对应的位置并未出现特征峰, 说明这两种涂层经高温灼烧后没有发生开裂现象。对比可知, 随 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数的增加, 涂层的耐高温性能有所提升。从各涂层经 400 °C 灼烧后的 XRD 谱图可以明显看出, 原本在 22° 附近的较宽弥散峰消失了, 原因可能是经 400 °C 灼烧后, 各涂层中的 SiO<sub>2</sub> 结晶度提高所致, 且 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数为 7% 的涂层, 经 400 °C 灼烧后涂层并没有开裂, 说明在此条件下, 涂层的耐高温性能得到进一步加强。

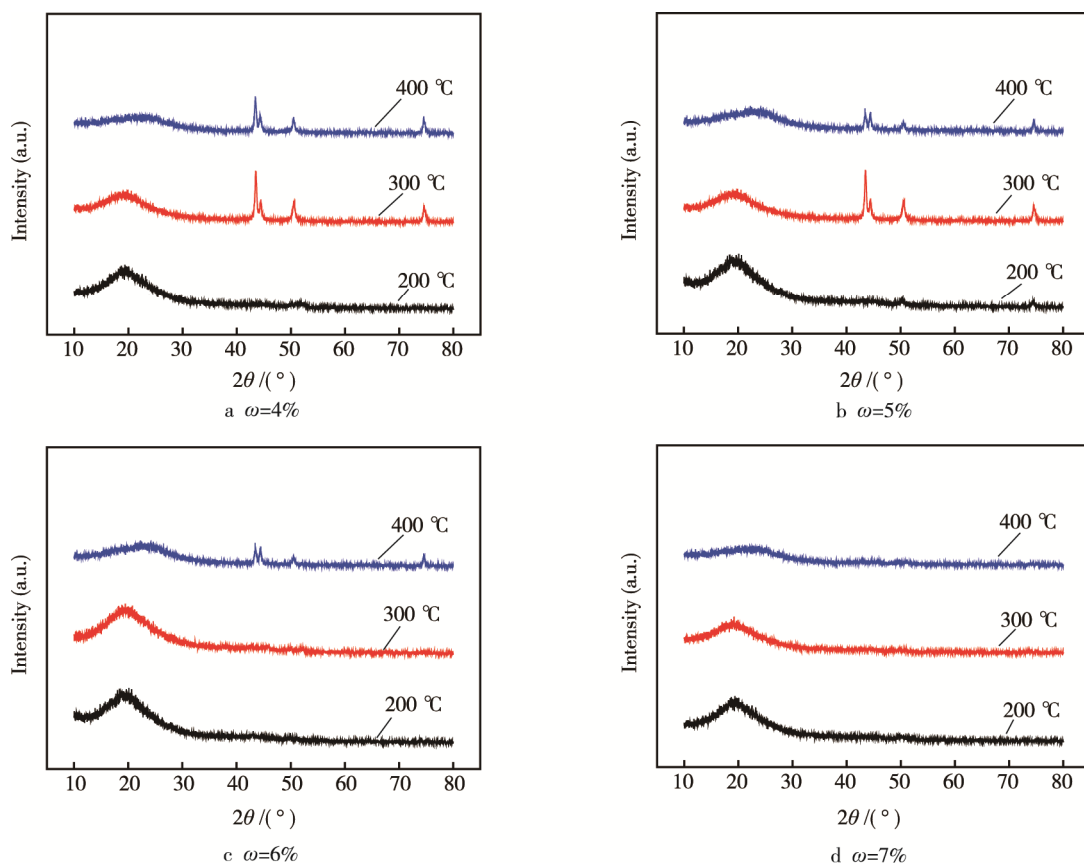


图 12 不同温度灼烧后各涂层的 XRD 谱图

Fig.12 XRD spectra of each coatings treated at different temperatures

### 2.3.2 FT-IR 分析

图 13 为不同质量分数 SiO<sub>2</sub> 气凝胶绝热涂层材料经不同温度灼烧后的 FT-IR 谱图, 可知 3300 cm<sup>-1</sup> 为烷基胺盐分散剂中仲酰胺—NH 的伸缩振动吸收峰, 2960、2875、1453 cm<sup>-1</sup> 分别属于甲基 (CH<sub>3</sub>) 的反对称伸缩振动、对称伸缩振动、不对称边角吸收峰, 1731 cm<sup>-1</sup> 属于羰基 (C=O) 的伸缩振动吸收峰, 1636 cm<sup>-1</sup> 为仲酰胺 C=O 的伸缩振动吸收峰。1095 cm<sup>-1</sup> 和 470 cm<sup>-1</sup> 分别为 Si—O—Si 的反对称伸缩振动吸收峰和弯曲振动吸收峰, 这两个吸收峰都是 SiO<sub>2</sub> 气凝胶的特征吸

收峰。通过比较可以得出, 涂层经 200 °C 灼烧后, 特征峰变化并不明显, 但随着温度的升高, 涂层的部分特征峰峰强得到提高。结合图 9 可知, 由于结晶度提高的缘故, Si—O—Si 的特征峰强度明显增强, 主要表现为 1095 cm<sup>-1</sup> 和 470 cm<sup>-1</sup> 处出现了较为尖锐的特征峰。此外, 通过谱图分析还可知, 200 °C 灼烧后对有机物的影响不大, 温度升至 300 °C 后, 各涂层中有机物的特征峰有所减少, 说明涂层中部分有机物发生分解; 当温度升至 400 °C 后, 涂层中有机物的特征峰几乎不存在, 而无机物的特征峰变得更加尖锐突出。

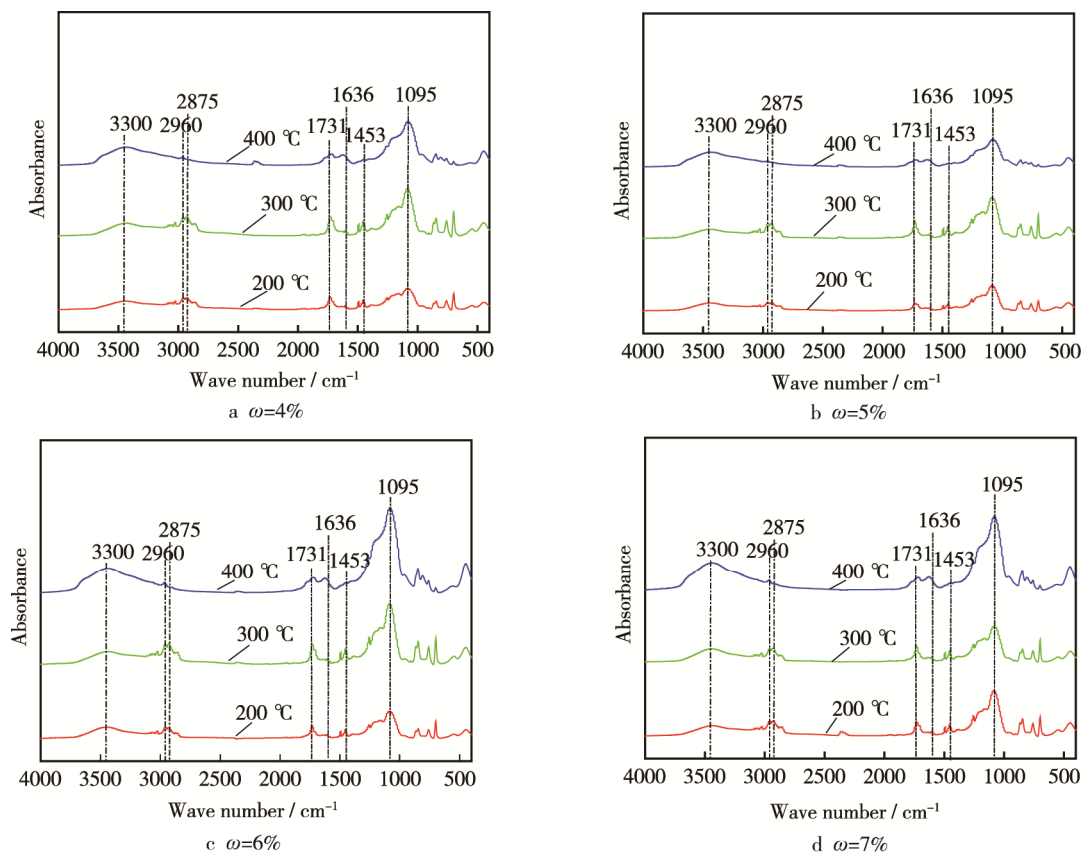


图 13 不同温度灼烧后各涂层的 FT-IR 谱图

Fig.13 FT-IR spectra of each coatings treated at different temperatures

### 3 结论

1) 在相同光照条件下, 丙烯酸树脂吸收的热量比聚氨酯树脂和环氧树脂都少, 且采用 SiO<sub>2</sub> 气凝胶作功能填料时, 其隔热性能明显优于钛白粉、空心玻璃微珠和远红外陶瓷粉涂层, 故选用丙烯酸树脂和 SiO<sub>2</sub> 气凝胶作为绝热涂层的成膜物质和功能填料。

2) 绝热涂层的隔热性能随 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数的增加呈先增强后减弱的趋势, 当 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数为 5%, 涂层湿膜厚度为 150 μm 时, 涂层隔热性能最佳, 同空白样板对比, 温度降低了 12 °C, 且力学性能满足使用要求。

3) 绝热涂层的耐高温性能随 SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数的增加逐渐提升, SiO<sub>2</sub> 气凝胶质量分数为 7% 时, 涂层最高能耐 400 °C。

#### 参考文献:

[1] KISTLER S S. Coherent Expanded Aerogels and Jellies [J]. *Nature*, 1931, 127: 741.  
[2] HAYASE G, KANAMORI K, ABE K, et al. Polymethylsilsesquioxane Cellulose Nanofiber Biocomposite Aerogels with High Thermal Insulation, Bendability, and Superhydrophobicity[J]. *ACS Applied Materials & In-*

*terfaces*, 2014, 6(12): 9466—9471.  
[3] NARDECCHIA S, CARRIAZO D, FERRER M L, et al. Three Dimensional Macroporous Architectures and Aerogels Built of Carbon Nanotubes and/or Graphene: Synthesis and Applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(2): 794—830.  
[4] KLENERT F, FRUHSTORFER J, ANEZIRIS C G, et al. Microstructure and Transmittance of Silica Gels for Application as Transparent Heat Insulation Materials[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2015, 75(3): 602—616.  
[5] HERRMANN G, IDEN R, MIELKE M, et al. On the Way to Commercial Production of Silica Aerogel[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1995, 186: 380—387.  
[6] FRICKE J, TILLOTSON T. Aerogels: Production, Characterization, and Applications[J]. *Thin Solid Films*, 1997, 297(1): 212—223.  
[7] TAO Y, KANO H, ABRAMS L, et al. Mesopore-modified Zeolites: Preparation, Characterization, and Applications[J]. *Chemical Reviews*, 2006, 106(3): 896—910.  
[8] RIFFAT S B, QIU G. A Review of State-of-the-art Aerogel Applications in Buildings[J]. *International Journal of Low-carbon Technologies*, 2013, 8(1): 1—6.  
[9] BAETENS R, JELLE B P, GUSTAVSEN A. Aerogel Insulation for Building Applications: A State-of-the-art Review[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(4): 761—

- 769.
- [10] SCHULTZ J M, JENSEN K I, KRISTIANSEN F H. Super Insulating Aerogel Glazing[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, 89(2): 275—285.
- [11] BARDY E R, MOLLENDORF J C, PENDERGAST D R. Thermal Conductivity and Compressive Strain of Aerogel Insulation Blankets under Applied Hydrostatic Pressure [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2007, 129(2): 232—235.
- [12] GAO T, JELLE B P, GUSTAVSEN A, et al. Aerogel-incorporated Concrete: An Experimental Study[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 52: 130—136.
- [13] LIU Z, DING Y, WANG F, et al. Thermal Insulation Material Based on SiO<sub>2</sub> Aerogel[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 122: 548—555.
- [14] KIM G S, HYUN S H. Synthesis of Window Glazing Coated with Silica Aerogel Films via Ambient Drying[J]. *Journal of Non-crystalline Solids*, 2003, 320(1): 125—132.
- [15] 孙吉梅. 超细微粒分散稳定性和表面改性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.  
SUN Ji-mei. Study on Dispersion Stability and the Surface Modification of Ultra-fine Particles[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007.
- [16] CINIVIZ M, HASIMOGLU C, SAHIN F, et al. Impact of Thermal Barrier Coating Application on the Performance and Emissions of a Turbocharged Diesel Engine[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2008, 222(12): 2447—2455.