

Thermal conductivity property of metal based silicone resin coating composite

Ganqiang WANG^{1,2}, Jingfu WANG^{1,2*}, Xinxin ZHANG^{1,2}, Tao ZHANG³

1. Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
2. Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Municipality, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
3. Shengli Oilfield Victory Power Machinery Group Co., Ltd., Dongying, Shandong 257032, China

Abstract: The epoxy silicone resin was modified using zinc powder as heat conducting filler. Effect of zinc powder mass fraction on the thermal conductivity of modified epoxy organosilicon dry film coating was researched and the effect of coating thickness on the thermal conductivity of carbon steel was analyzed. The results showed that The thermal conductivity of silicone coating is around 0.19 W/(m·K), and heat-resistant temperature is above 200 °C. Thus, the coating can ensure the long-term coating work in the low temperature flue gas waste heat recovery heat exchanger surface without any thermal reaction. Addition of zinc powder can improve the thermal conductivity of modified epoxy organosilicon coating. As the zinc powder content is 25wt%, the thermal conductivity of the coating material can increase 84% to 0.35 W/(m·K). Generally, with the increase of coating thickness, the thermal conductivity of metal matrix composite silicone coating decreases. The thermal conductivity of uncoated carbon steel was 47.59 W/(m·K), and the thermal conductivity of the coated carbon steel decreased to 34.33 W/(m·K) when the coating thickness was 200 μm.

Key words: organosilicon resin; heat conduction; composites; coating thickness

金属基有机硅树脂涂层复合材料的导热性能

王赶强^{1,2}, 王景甫^{1,2*}, 张新欣^{1,2}, 张涛³

1. 北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100124
2. 北京工业大学传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100124
3. 胜利油田胜利动力机械集团有限公司, 山东 东营 257032

摘要: 以锌粉为导热填充剂对环氧有机硅树脂进行改性, 考察了改性环氧有机硅树脂涂层干膜中锌粉含量对涂层导热系数的影响, 分析了涂层厚度对碳钢基材导热性能的影响。结果表明, 环氧有机硅树脂涂层的导热系数约为 0.19 W/(m·K), 其耐温能力在 200 °C 以上, 可保证涂层在中低温烟气余热回收换热器表层长期工作而不发生任何热反应; 添加锌粉可改善环氧改性有机硅涂层的导热性能, 涂层干膜锌粉 25wt% 时, 涂层材料导热系数达 0.35 W/(m·K), 较未添加锌粉时增大了 84%。复合材料的导热系数随涂层厚度增加而下降, 无涂层的碳钢导热系数为 47.59 W/(m·K), 涂层厚度为 200 μm 时, 导热系数降至 34.33 W/(m·K)。

关键词: 有机硅树脂; 热传导; 复合材料; 涂层厚度

中图分类号: TK224.9+3

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)04-0785-07

收稿: 2017-09-21, 修回: 2017-12-22, 网络发表: 2018-04-26, Received: 2017-09-21, Revised: 2017-12-22, Published online: 2018-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51506001); 国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(编号: 2013CB228300)

作者简介: 王赶强(1991-), 男, 河北省任丘市人, 硕士研究生, 动力工程及工程热物理专业, Tel: 18811016732, E-mail: 18232592356@163.com; 王景甫, 通讯联系人, Tel: 13521900056, E-mail: jfwang@bjut.edu.cn.

引用格式: 王赶强, 王景甫, 张新欣, 等. 金属基有机硅树脂涂层复合材料的导热性能. 过程工程学报, 2018, 18(4): 785-791.

Wang G Q, Wang J F, Zhang X X, et al. Thermal conductivity of metal based silicone resin coating composite (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 785-791, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217341.

1 前言

回收电站的锅炉尾部烟气余热、降低锅炉烟气排放温度对节能减排及能源的高效利用有很大的促进作用。目前,限制锅炉尾部烟气温度降低的主要因素是烟气露点腐蚀。工业电厂的燃料主要是煤炭,主要成分为碳、氢、氧、氮、硫,劣质煤含硫量高于 2%^[1],硫经燃烧等化学反应生成硫酸蒸汽,其浓度增加会提高烟气露点温度。当锅炉尾部换热器的低温受热面温度低于烟气露点温度时,硫酸蒸汽在金属壁面凝结,凝结温度称为烟气的酸露点温度^[2],排烟温度持续降低使烟气中的水蒸汽凝结,硫酸蒸汽溶于水形成硫酸溶液,严重腐蚀碳钢换热器。为保护碳钢换热器,在其表面涂覆防腐涂层是常用的方法之一。

李旭日等^[3]研究了纳米锌粉改性环氧树脂防腐涂层的防腐性能,分析了腐蚀电化学行为、涂层附着力及耐腐蚀性能,发现加入纳米锌粉对涂层的防腐性能影响显著,随纳米锌粉含量增加,环氧富锌涂层的电化学性能明显提升,电阻增加 2~3 个数量级。纳米锌粉加入量为 20wt% 时,涂层的防腐性能最佳。刘广娟等^[4]和 Mathivanan 等^[5]采用有机硅改性环氧树脂为基料制备涂料,发现在环氧树脂中接枝有机硅保持了环氧树脂的耐腐蚀性,同时提高了耐热性,扩大了其使用范围。有机硅改性环氧树脂可由脂肪族环氧树脂与聚硅氧烷缩聚反应制得,其化学结构具有独特的物理性能,可作为耐久性基料用于防护涂料。改性环氧有机硅树脂涂层仅单层面漆就足以保护富锌底漆,可缩短施工时间、减少过度喷涂^[6]。丙烯酸树脂透明度高、光亮丰满、附着力强、耐腐蚀性优异,但由于耐温性、耐水性差限制了其进一步应用^[7]。有机硅单体及其聚合物表面能极低, Si-O 键键能很高,远大于 C-C 键和 C-O 键键能,键易旋转,玻璃化温度低,使其具有优秀的耐水性、耐温性、耐候性、耐冲击性和透气性^[8]。有机硅改性丙烯酸树脂兼备丙烯酸树脂和聚硅氧烷的优点^[9]。以氮化硼和氮化铝为导热填料的改性硅聚酯树脂涂层材料导热系数随导热填料的含量增加而增大^[10]。

保证优异耐腐蚀的前提下有效控制涂层厚度可增加烟气余热回收换热器的换热效率,石化标准 SH/T3540-2007 规定有机涂层厚度为 150±30 μm,下限厚度为 120 μm^[11]。余存烨^[12]曾对该标准提出质疑,认为涂层厚度应控制在 200±30 μm。国内一些施工标准对不同型号的应用介质涂料和涂层厚度要求不同,普通介质涂层厚度约为 180 μm,蒸汽介质涂层厚度提至约 250 μm。

塑料、陶瓷等特殊材料由于优异的耐腐蚀性能,常用于各种强腐蚀性介质的换热,但其导热性差,降低了余热回收效率。不锈钢、ND 钢、合金钢价格昂贵,不利于设备改造,性能优异价格低廉的材料尚处于研发阶段,将换热器整体采用耐腐蚀材料改用价格低廉的碳钢换热器,表面喷涂防腐性和导热性优异的涂层,是解决换热器低温腐蚀的有效途径。

目前,国内对耐腐蚀材料的研究大多集中在耐腐蚀性能上,对导热性报道较少。本工作主要对工业锅炉烟气余热回收换热器防腐涂层的耐温、导热性能进行测量与分析,在保证防腐涂层防腐性能的同时优化其导热性能,提高换热器的换热效率。

2 实验

2.1 样品制备

基体材料选用 Q235 正火碳钢(任丘市迪耐斯冷拔金属制品厂),喷涂前,表面用干砂纸、400#、600#砂纸反复打磨进行粗化处理,之后用去离子水清洗,丙酮擦洗吹干,置于 KH-25A 干燥器(广州市康恒仪器有限公司)中 60 min 备用。

锅炉排烟温度一般为 140℃ 以上^[13]。针对该温度的工业锅炉烟气余热回收换热器,本工作选用 2 种涂层:有机硅树脂耐高温底漆和有机硅树脂耐高温面漆,均选用北京紫禁城漆业有限公司生产的漆料,底漆由环氧改性有机硅树脂为基料配以耐高温填料、助剂、溶剂加工而成,面漆由丙烯酸改性有机硅树脂为基料配以耐高温填料、特种助剂、溶剂加工而成。

实验涂料按有机硅漆料:有机硅耐高温固化剂(北京紫禁城企业有限公司)质量比 10:1 混合,用搅拌器搅拌均匀,采用高压空气喷涂方法均匀喷涂普通碳钢板,压缩空气压力 0.5 MPa,喷涂距离 250 mm。涂层喷涂 3 遍,第 1 遍喷涂底漆,待底漆干燥 24 h 后喷涂面漆,面漆完全干燥后按需求选择是否继续喷涂面漆增加涂层厚度。

采用锌粉作为导热填料对有机硅环氧树脂涂层进行改性,以增加涂层的导热性。锌粉选用北京紫禁城企业有限公司提供的分析纯化学品,复合涂层涂料用改性环氧有机硅树脂涂层与锌粉按不同质量比掺杂,用 EMS-13 型磁力搅拌器(江苏益勇仪器设备有限公司)搅拌均匀。锌粉由于重力作用易发生沉淀,所以搅拌均匀的锌粉改性涂层应尽快喷涂于碳钢基材,并置于干燥箱中加速干燥固化。

激光导热实验用样品均为粉末状,选用喷涂均匀的样板,用工具刀轻轻刮下试样表层,置于 150℃ SG-GL1400K 型管式真空炉(中国科学院上海光机所)中

干燥 24 h, 取出后用 ST-02 多功能粉碎机(北京京创泰宁科技发展有限公司)粉碎。将热常数分析(Hot Disk)碳钢基材制成直径 55 mm、厚度 18 mm 的标准试件, 对碳钢试样涂覆有机硅涂层, 置于 100 °C 管式真空炉中加速干燥 24 h。

2.2 实验设备与分析仪器

用 XP 504 梅特勒电子天平(托利多国际贸易上海有限公司)称量样品质量, 测量精度 ± 0.001 mg; 用 MDY-1 电子密度/比重仪(上海方瑞仪器有限公司)分析样品密度; 用 LFA-457 激光导热仪(德国耐驰仪器制造有限公司)测量材料的热扩散系数, 红外检测器信号放大 127 倍, 氮气为保护气, 流速 50 mL/min, 激光电压 1826 V,

模型选用 CoWan+脉冲修正; 用电脑控制 YAW-300B 恒应力压力实验机(济南时代新科实验仪器有限公司)压块, 样品尺寸为 $\Phi 12.7$ mm \times (2~2.5) mm; 用 STA 449 F3 型热重-差热综合分析仪(TG-DSC, 德国耐驰仪器制造有限公司)进行热重分析; 用热常数分析仪(Hot Disk, 凯戈纳斯仪器商贸上海有限公司)分析圆柱形样品的导热系数, 选用可导电的双螺旋探头, 既用作热源也用作动态温度探头。图 1 为导热系数测定仪结构示意图, 主要由加热装置、温度传感器及数据采集系统组成, 探头可测量温度由超低温到 1000 K, 一般温度小于 200 °C 时选用聚亚酰胺探头, 高于 200 °C 时选用云母探头, 测量范围较广, 为 0.005~500 W/(m·K)^[14]。

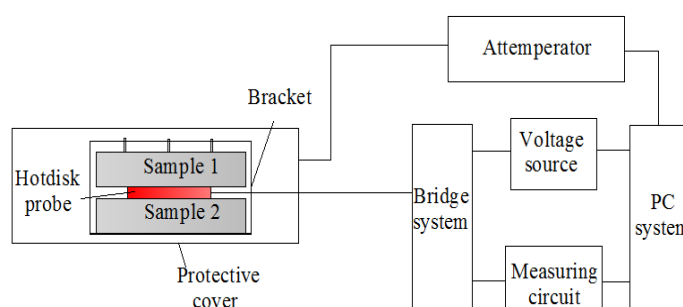


图 1 导热系数测定仪示意图

Fig.1 Schematic diagram of thermal constant analyzer

2.3 实验方法

2.3.1 涂层材料均匀性测量

机械法测量涂层厚度最便捷, 即用千分尺测量基材材料的厚度 h 、喷涂涂层后材料的厚度 S 、涂层厚度 $L=S-h$ 。但千分尺测量受基材材料表面粗糙度的影响, 使实际测量的涂层厚度偏薄。本实验采用测量精度较高的磁性测厚法测定金属基复合材料涂层的均匀性, 用 GT810F 果欧牌涂层测厚仪(精度为 0.1 μ m, 广州市果欧电子器件有限公司)测量材料表面分散的 10 个点, 取平均值以保证涂层厚度测量的准确性。

2.3.2 涂层材料耐热性分析

涂层材料的耐热性用 TG-DSC 分析。每次称取样品 6~10 mg, 置于铝坩埚中, 燃烧气氛为干燥合成空气, 流量 20 mL/min 的氮气保护, 温度 40~500 °C, 升温速率 10 °C/min。

2.3.3 涂层材料导热性分析

采用激光导热法分析涂层。恒温下, 由激光源在瞬间发射一束光脉冲, 均匀照射在样品下表面, 表层吸收光能后温度瞬时升高, 并作为热端将能量以一维热传导的方式向冷端(上表面)传播。用激光导热仪自带的红外检测器连续测量上表面中心部位的温度, 得温度与时间

的关系曲线。

结合耐热和导热测量数据分析得材料的热扩散系数 α (mm²/s)及比热容 C_p [J/(g·K)], 用下式计算材料的导热系数 λ [W/(m·K)]:

$$\lambda = \alpha \rho C_p, \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度(g/cm³)。

2.3.4 金属基有机硅涂层复合材料导热性分析

由于制备标准厚度的试样困难, 故选用基于瞬变平面热源法的 Hot Disk 直接测量不同涂层厚度的金属基涂层复合材料的导热系数。测试过程中, 电流通过金属薄片(镍)时产生热量, 热量会同时向探头两侧的被测试样扩散, 扩散速率由试样的热扩散系数及导热系数决定。根据数据采集系统得到的温度变化和探头的响应时间等数据, 可计算样品的导热系数。为延长瞬态记录时间提高测量精度, 样品的平面尺寸须大于 Hot Disk 探头的直径。

2.3.5 锌粉改性有机硅涂层导热性测量

采用 DSC 差示扫描量热法^[15]测定了锌粉改性环氧有机硅树脂涂层中的金属锌含量, 该法简单、快捷, 且不受其它金属元素和涂料树脂的影响, 提高了分析的精度^[16]。

根据热力学第一定律可知,任何物质在发生状态改变时会吸收或放出一定热量以保持其内能平衡.涂膜中的锌粉在升温过程中发生熔融相变,吸收一定的热量,与参比样品产生热能差,热重分析仪通过功率补偿 ΔQ (热量差)维持试样与参比试样的热能平衡, ΔQ 直接作为信号输出,在 DSC 曲线上表现为一吸热峰,峰面积即为系统补偿的能量,即涂膜中锌粉熔融产生的焓变,单位样品质量的焓变即为此样品中锌粉熔融产生的焓值.涂膜样品中锌含量 $C_{Zn}(\text{wt}\%)$ 为涂膜样品在锌熔点 419°C 吸热焓值 H_{sample} 与纯锌材料的吸热焓值 H_{pure} 的比值,即:

$$C_{Zn} = H_{\text{sample}} / H_{\text{pure}} \times 100\%. \quad (2)$$

3 结果与讨论

3.1 涂层材料表面均匀性

选用相同碳钢基材、相同涂层材料、采用相同的喷涂方式制备试样 1 和 2,表面均喷涂一遍有机硅涂层,随机测量试样 10 个分散点的厚度,结果如图 2 所示.结果表明,采用高压空气喷涂有机硅涂层,涂层厚度均匀,平均为 $15.13 \mu\text{m}$,误差范围在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 内.

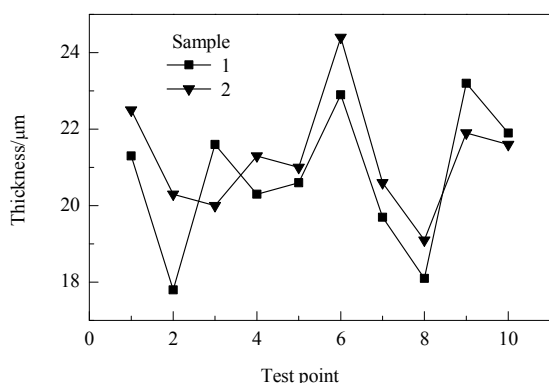


图 2 不同测试点涂层厚度

Fig.2 Coating thickness of different test points

3.2 有机硅涂层与特种塑料的耐热性能

图 3 为有机硅耐高温涂层的 TG 曲线,测试 3 次进行对比,发现 3 次测试的失重规律近似,低于 200°C 时基本无变化,表明热解反应发生在高于 200°C 时,初步证明该样品可长期工作于 200°C 下不发生变形.

有机硅涂层的 DSC 曲线如图 4 所示,可以看出 3 组曲线变化规律相同,在 $40\sim 500^\circ\text{C}$ 升温区间内有 2 个吸热峰和 1 个放热峰,峰值大小有一定差异,可能是电压不稳、信号波动、样品质量差异等因素所致.对峰值进行综合分析可知,第 1 个吸热峰温度起始点约在 250°C ,为涂膜中部分组分烧蚀挥发;第 2 个吸热峰初

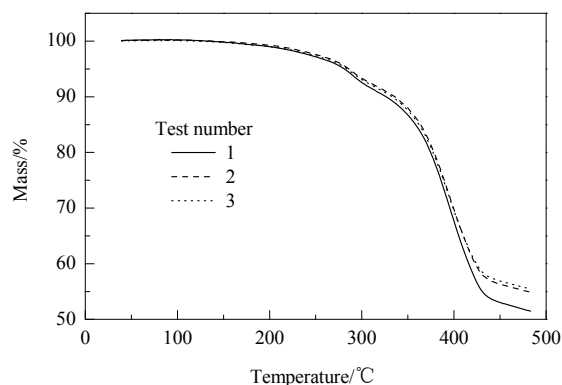


图 3 有机硅涂层的热重曲线

Fig.3 TG curves of silicone coating

始温度约在 340°C ,涂膜成分烧失量增大,涂膜中的有机物成分发生热解;约 415°C 有 1 个放热峰,推断为聚合物燃烧所致.

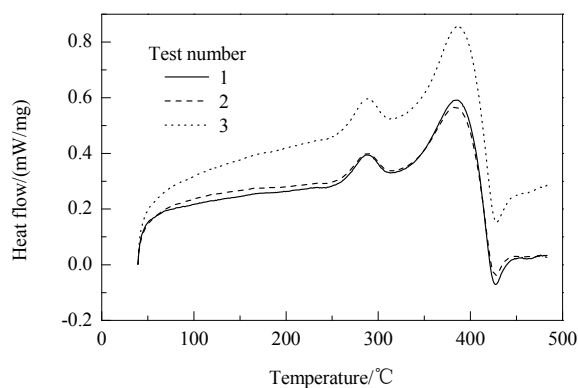


图 4 有机硅涂层的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curves of silicone coating

聚乙烯 (Polyethylene, PE)、聚偏氟乙烯 (Polyvinylidene fluoride, PBDF)、聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 在 $40\sim 500^\circ\text{C}$ 升温区间内的 TG-DSC 曲线如图 5 所示.由图 5(a)可以看出,温度低于 400°C 时,3 种塑料均没有失重,表明此时没有挥发分产生.由图 5(b)可以看出,聚乙烯塑料在 $120\sim 140^\circ\text{C}$ 内有 1 个吸热峰,表明聚乙烯在 120°C 开始熔融;聚偏氟乙烯分别在约 150 和 400°C 出现吸热峰,可能是熔融组分不同所致,表明添加氟成分提高了塑料的耐高温能力.聚四氟乙烯的吸热峰起始点和终止点分别在 315.1 与 328.8°C ,表明其耐热能力较聚偏氟乙烯增加.综上所述,温度低于 260°C 时氟塑料换热器中的聚四氟乙烯的耐热性能优于有机硅涂层及聚偏氟乙烯和聚乙烯,可长期于 150°C 下工作不发生任何反应,适合作为中低温烟气余热回收换热器涂层.

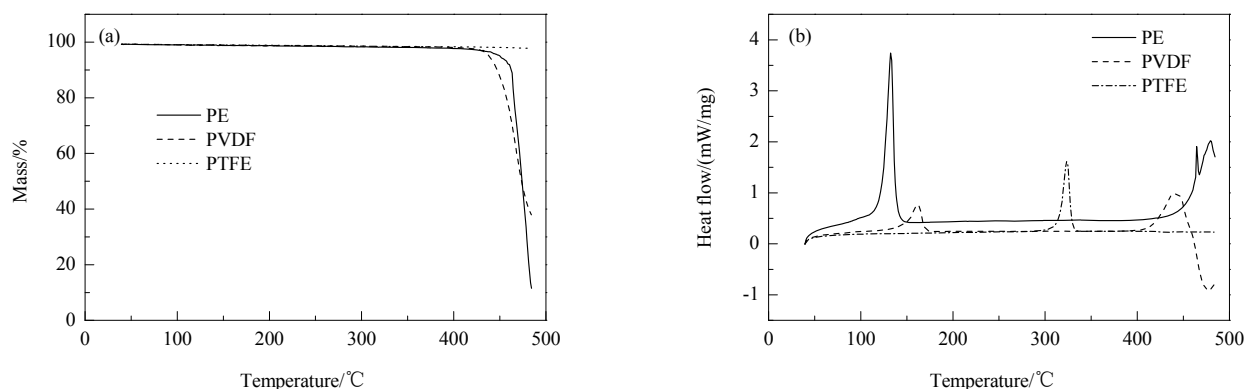


图5 特种塑料的热重-差热曲线
Fig.5 TG-DSC curves of special plastics

3.3 有机硅涂层导热性能

3.3.1 有机硅涂层的导热系数

一般锅炉的排烟温度均不高于 200 °C, 因此分析涂层的导热系数取 40, 50, 60, 80, 100, 150 和 200 °C 七个温度点. 有机硅涂层在室温 (25 °C) 下的密度为 1.156 g/cm³, 假设密度不随温度变化, 试样的热物性参数如图 6 所示. 可以看出, 有机硅涂层的比热容与热扩散系数随温度增加变化程度不同, 导热系数基本不随温度变化, 约为 0.19 W/(m·K). 工程上常将导热系数小于 0.2 W/(m·K) 的材料称为保温材料, 所以有机硅涂层导热性能较差. 随涂层厚度增加, 涂层对金属基材导热性能的影响增加.

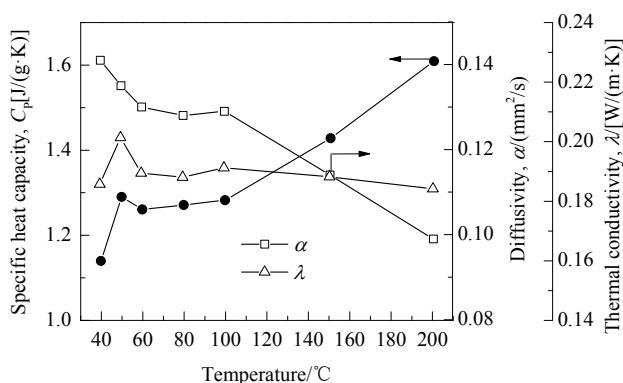


图6 有机硅涂层的导热系数
Fig.6 Thermal properties of silicone coating

3.3.2 有机硅涂层厚度对复合材料导热系数的影响

不同有机硅涂层厚度的复合材料的导热系数如图 7 所示. 可以看出, 随涂层厚度增加, 碳钢涂层复合材料的导热系数呈下降趋势, 未涂覆涂层的碳钢基材导热系数为 47.59 W/(m·K), 涂层厚度为 200 μ m 时材料导热系数下降至 34.33 W/(m·K), 可见涂层材料对金属换热器导热系数影响很大. 这是由于增加涂层厚度, 增大了复

合材料间的界面热阻, 降低了复合材料的热导率^[17]. 贾思洋等^[18]的研究结果表明, 随防腐涂层厚度增加, 换热体系的总传热系数降低, 但当涂层厚度增大到一定程度时, 厚度增加对温差变化的影响减弱.

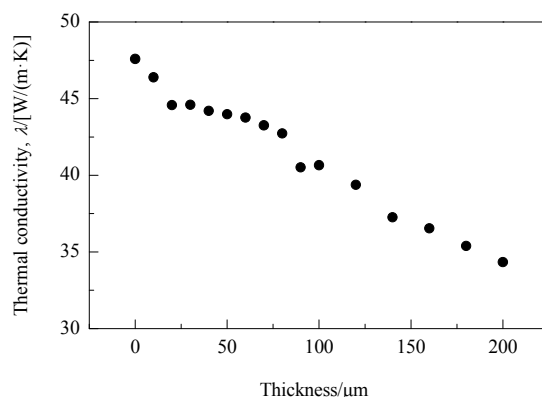


图7 不同涂层厚度的碳钢复合材料的导热系数
Fig.7 Thermal conductivity of carbon steel composites with different coating thickness

3.4 锌粉对有机硅涂层导热系数的影响

取 40, 50, 60, 80, 100, 150 和 200 °C 七个温度点为闪射点测量涂层的热扩散系数. 不同锌粉含量的涂层的热扩散系数及其随温度的变化如图 8 所示. 选取 50 °C (接近水露点), 80 °C (接近酸露点) 和 150 °C (接近锅炉排烟温度) 为参考温度研究了锌粉改性有机硅环氧树脂涂层的热扩散系数, 由图 8(a) 可以看出, 锌粉含量增加, 涂层的热扩散系数呈增长趋势. 由图 8(b) 可以看出, 锌粉改性涂层热扩散系数随温度升高呈下降趋势, 同一温度下, 锌粉在涂层 (干膜) 中的含量增加可有效提高涂层的热扩散系数.

图 9(a) 为不同锌粉含量的环氧改性有机硅涂层的比热容, 可以看出, 随锌粉含量增加, 涂层的比热容呈减小趋势, 未被锌粉改性的环氧有机硅树脂涂层的比热容

在 150~300 °C 时变化较明显, 表明涂层组分或状态发生了变化. 由图 9(b)可以看出, 随锌粉含量增加, 涂层的

导热性能明显提高, 添加 25wt% 锌粉比未添加时涂层的导热系数增大了 84%, 达 0.35 W/(m·K).

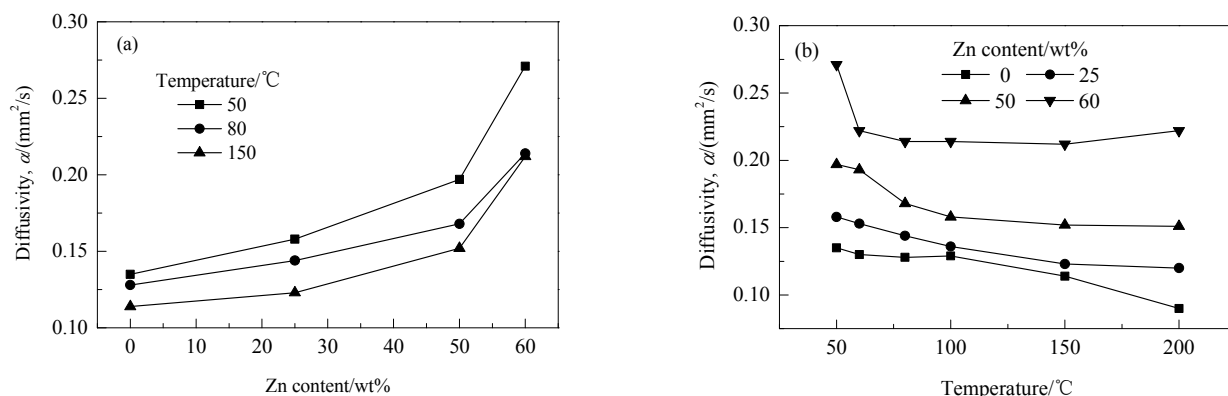


图 8 不同锌粉含量的涂层的热扩散系数及其随温度的变化

Fig.8 Diffusivity and its change with temperatures of coating under different Zn content

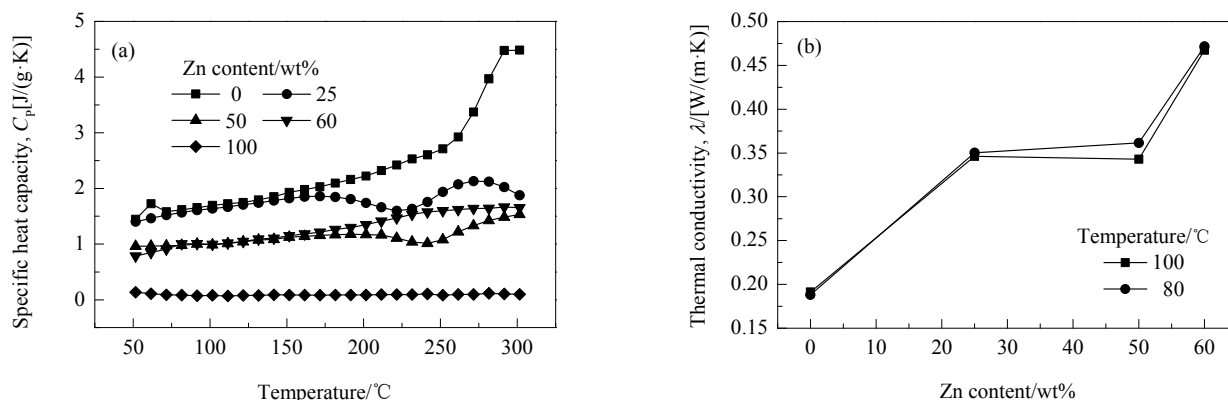


图 9 不同锌粉含量的涂层的比热容和导热系数

Fig.9 Specific heat capacity and thermal conductivity of coating with different zinc contents

4 结论

针对中低温余热回收换热器露点腐蚀问题, 选取耐腐蚀性能优异的环氧有机硅树脂涂层, 利用激光导热法、瞬变平面热源法分析了涂层对金属换热器导热性能的影响, 对比了环氧有机硅树脂涂层与含氟塑料的耐热性能, 分析了涂层的导热性能, 通过添加纳米锌粉改善了涂层的导热系数, 得到结果如下:

(1) 环氧有机硅树脂涂层可耐 200 °C 以上温度, 可保证涂层长期工作中在低温烟气余热回收换热器表层不发生任何热反应.

(2) 涂层材料对金属换热器导热系数影响较大, 环氧有机硅树脂涂层材料导热系数约为 0.19 W/(m·K), 导热系数随涂层厚度增加呈下降趋势, 未涂覆涂层的碳钢导热系数为 47.59 W/(m·K), 涂层厚度为 200 μm 时, 材料导热系数下降至 34.33 W/(m·K).

(3) 随环氧改性有机硅涂层干膜锌粉含量增加, 涂层导热性能明显提高, 添加 25wt% 锌粉比不添加时, 涂层导热系数增大了 84%, 达 0.35 W/(m·K).

参考文献

- [1] 车得福, 庄正宁, 李军, 等. 锅炉 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2010: 52-53.
Che D F, Zhuang Z N, Li J, et al. Boiler [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2010: 52-53.
- [2] 郑永新, 赵恒谊, 叶远璋, 等. 冷凝式燃气热水器换热器低温段防腐实验研究 [J]. 煤气与热力, 2006, 27(7): 35-41.
Zheng Y X, Zhao H Y, Ye Y Z, et al. Experimental study on corrosion resistance of heat exchanger in low temperature section of condensing gas water heater [J]. Gas and Heat, 2006, 27(7): 35-41.
- [3] 李旭日, 李瑞生. 锌粉对环氧树脂防腐涂层改性的研究 [J]. 辽宁化工, 2017, 41(9): 882-884.
Li X R, Li R S. Study on modification of epoxy anticorrosion coating with nano-sized zinc powder [J]. Liaoning Chemical Industry, 2017, 41(9): 882-884.
- [4] 刘广娟, 左禹, 赵景茂. 环氧改性有机硅涂料耐热耐蚀性研究

- [J]. 腐蚀与防腐, 2004, 25(6): 238–241.
- Liu G J, Zuo Y, Zhao J M. Heat resistance and corrosion resistance of epoxy-silicone based coating [J]. Corrosion and Protection, 2004, 25(6): 238–241.
- [5] Mathivanan L, Radhakrishna S. Heat-resistant anti-corrosive paint from epoxy-silicone vehicles [J]. Anti-Corros. Methods Mater., 1997, 44(6): 400–406.
- [6] 赵惠斌. 环氧改性有机硅树脂—防腐涂料的最佳解决方案 [J]. 上海涂料, 2013, 51(4): 53–55.
- Zhao H B. Epoxy modified silicone—the best solution for anticorrosion [J]. Shanghai Coatings, 2013, 51(4): 53–55.
- [7] 余锡宾, 王华林. 丙烯酸树脂与聚硅氧烷接枝改性的研究 [J]. 高分子材料科学与工程, 1998, 14(2): 129–131.
- Yu X B, Wang H L. Research on graft modification of acrylic resin and polysiloxane [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 1998, 14(2): 129–131.
- [8] He W X, Shi W K, Cai P, et al. Applications of acrylate-based polymer and silicone resin on LPFG-based devices [J]. Opt. Mater., 2003, 21(2): 507–510.
- [9] Hamid J N, Shadpour M, Neda K. Synthesis and characterization of silicone modified acrylic resin and its uses in the emulsion paints [J]. Iran. Polym. J., 2005, 14(3): 211–222.
- [10] Li J, Liang J, Liu Y M. High-thermal conductive coating used on metal heat exchanger [J]. Chin. J. Chem. Eng., 2014, 22(5): 596–601.
- [11] 陈跃, 冯显富, 黄鑫. 广东石化换热器有机涂层防腐技术应用策略 [J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(12): 40–43.
- Chen Y, Feng X F, Huang X. Application prospects of heat exchanger anticorrosive techniques using organic coatings for new expansion petroleum refining industry [J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(12): 40–43.
- [12] 余存焯. 对石化换热器涂镀层厚度过薄的质疑 [J]. 全面腐蚀控制, 2010, 1(3): 22–24.
- Yu C Y. Doubts about the thickness of coating thickness for petrochemical heat exchanger [J]. Total Corrosion Control, 2010, 1(3): 22–24.
- [13] 董黎明. 冷凝式锅炉热平衡计算方式初探 [J]. 工业锅炉, 2010, 1(4): 15–16.
- Dong L M. Preliminary investigation of heat balance calculation in condensing boilers [J]. Industrial Boiler, 2010, 1(4): 15–16.
- [14] 王哲, 王景甫, 郭莲莲. 烧结矿等效导热系数实验测量及分析 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(4): 879–882.
- Wang Z, Wang J F, Guo L L. Measurement and analysis of equivalent thermal conductivity of sinter [J]. Chin. J. Process Eng., 2017, 17(4): 879–882.
- [15] 陈瑞芳, 丁道宁, 穆颖, 等. 差示扫描量热法测定锌粉和富锌底漆中的锌含量 [J]. 上海涂料, 2010, 48(9): 43–45.
- Chen R F, Ding D N, Mu Y, et al. Differential scanning calorimetry determination of the zinc content in zinc powder and zinc rich primer [J]. Shanghai Coatings, 2010, 48(9): 43–45.
- [16] American Society for Testing and Materials. Standard test method for the determination of metallic zinc content in both zinc dust pigment and in cured films of zinc-rich coatings [S]: ASTM D 6580-2000. 2000–01–01.
- [17] Davia L C, Artz B E. Thermal conductivity of metal matrix composites [J]. J. Appl. Phys., 1995, 77(10): 4954–4960.
- [18] 贾思洋, 杨万国, 张波. 涂层厚度对传热系数的影响研究 [J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(1): 25–27.
- Jia S Y, Yang W G, Zhang B. Effect of coating thickness on heat transfer coefficient [J]. Modern Paint & Finishing, 2011, 14(1): 25–27.