

固化温度对有机硅基低发射率涂层耐腐蚀性能的影响*

王雅君 徐国跃 陈慧敏 李九芬

(南京航空航天大学材料科学与技术学院 南京 211100)

摘要 将环氧改性有机硅 (EA) 与 Al 粉按质量比 (3:2) 形成 EA/40%Al 低红外发射率复合涂层, 研究了固化温度对 EA/40%Al 复合涂层耐腐蚀性能的影响及其机理。利用扫描电镜观察涂层的形貌, 并通过动电位极化技术及耐腐蚀实验对涂层的耐腐蚀性能进行了表征。结果表明, 在保证低发射率前提下, 固化温度为 200 °C 时, 涂层的耐盐雾、耐人工加速老化和耐湿热腐蚀性能时间均能达到 2000 h, 基本满足工程应用要求。固化温度为 200 °C 时, 涂层的固化度最合适, 涂层交联最佳, 使得树脂基体与颜填料结合紧密, 涂层致密, 耐腐蚀性能最佳。

关键词 功能材料, 涂层, 固化, 环氧改性有机硅, 红外发射率, 耐腐蚀性能

分类号 TQ324.2, TQ323.5

文章编号 1005-3093(2010)06-0603-07

Influence of Curing Temperature on Anti-corrosion Properties of Silicone Based Composite Coatings with Low Infrared Emissivity

WANG YaJun XU Guoyue** CHEN Huimin LI Jiufen

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

* Supported by National Nature Science Foundation of China No.90505008.

Manuscript received April 26, 2010; in revised form July 9, 2010.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(025)84892903, E-mail:xuguo@nuaa.edu.cn

ABSTRACT The low infrared emissivity coatings were prepared by using epoxy modified silicone (EA) and Al powder (mass ratio 3:2) as organic adhesive and pigment respectively. The influence of the curing temperature on anti-corrosion properties of the coatings was researched. The chemical composition and the surface structure of EA/40% Al coating were characterized, and the corrosion behavior was investigated by the electrochemical method and anti-corrosion tests. The results show that the coatings cured at 200 °C exhibit the excellent salt spray resistance, anti ultraviolet ageing performance and hot-wet resistance, which can reach the requirements of engineering applications.

KEY WORDS functional material, coatings, curing, epoxy modified silicone, infrared emissivity, anti-corrosion properties

飞机、导弹等由于热动力和气动加热会在 8-14 μm 红外窗口波段产生强红外辐射特征而被高灵敏度红外探测设备和红外制导武器发现并摧毁, 严重威胁到军事目标安全。因此, 红外隐身技术受到各国军方的广泛关注^[1-5]。其中红外隐身涂料由于具有制造和施工方便, 成本低, 应用不受几何形状限制等特点, 在热红外隐身技术研究中占有重要的地位^[6-9]。

红外低发射率涂料的研制是红外隐身涂料发展

的重点。国内已报道了在 8-14 μm 波段具有较低红外发射率的涂料^[10], 认为此涂料将提供良好的红外隐身效果。然而与传统防护涂层相比, 低红外发射率涂层在耐腐蚀性能方面遇到新的瓶颈, 在腐蚀过程中涂层的发射率会随腐蚀介质作用而升高, 红外低发射率性能恶化甚至失效。因此, 在保证红外发射率低的前提下, 如何实现红外涂层的优良耐腐蚀性能, 将是今后的研究重点。

涂层力学、耐腐蚀性能很大程度上受树脂的固化度的影响。固化反应属于化学反应, 固化温度的高低直接影响着固化物的性能, 因此确定固化温度从而提高固化度必然有利于涂层性能的提高。目前, 对于

* 国家自然科学基金 90505008 资助项目。

2010 年 4 月 26 日收到初稿; 2010 年 7 月 9 日收到修改稿。

本文联系人: 徐国跃, 教授

固化温度对涂层物理性能影响较多^[11-13],但是固化温度对低红外发射率涂层耐腐蚀性能的影响却鲜有报道。

环氧改性有机硅(EA)因含有能形成网络互穿结构的环氧基团以及耐热性能良好的硅氧键,具备较好的耐腐蚀性能和耐温性能而被广泛应用。本文选择自制的EA/40%Al低红外发射率复合涂层,研究了不同固化温度对涂层耐腐蚀性能的影响,并探讨了固化温度对低发射率涂层性能产生影响的作用机理。

1 实验方法

实验用主要原料包括:自制的环氧改性有机硅(EA),自制的Al粉,乙酸丁酯(分析纯)和分散剂。

EA/Al涂层的制备首先进行基板(马口铁板12 cm×12 cm,厚度0.3 mm)预处理:砂纸打磨→水洗→超声清洗→水洗→烘干→刮涂上一层环氧树脂底漆(厚度约为20 μm)。然后选用环氧改性有机硅为树脂基体,加入颜填料铝粉、助剂分散剂,混合搅拌,超声波震荡提高分散度,加入乙酸丁酯溶剂调节其粘度。涂层的低红外发射率是通过调节填料百分含量制得^[14-15]。最后采用喷涂法将涂料涂覆于经过预处理的基板上,涂层厚度约为40 μm,室温固化1 d,之后分别置于80 °C下12 h、200 °C下8 h、300 °C下5 h、400 °C下2 h,测试涂层红外发射率保持在0.10。

采用中科院上海技术物理研究所研制的IR-2双波段发射率测量仪测量涂层在8-14 μm波段的红外发射率。通过动电位极化技术快速测试涂层的耐腐蚀性能,即将样品置于3.5%NaCl水溶液中在CHI660C电化学工作站上测定。样品制备所用基板为普通低碳钢薄钢板(4 cm×3 cm,厚度0.5 mm),基板预处理和样品制备同上,然后将松香和石蜡按质量比1:1混合溶化对样品进行封边处理,留1 cm×1 cm面积暴露于盐水中。测试前将样品置于3.5% NaCl水溶液中浸泡5 h,测试采用三电极系统,饱和甘汞电极为参比电极,铂电极为辅助电极,自制涂层为工作电极,扫描速度为0.01 V/s,扫描范围为-0.8~0.1 V,频率为10 mHz~100 kHz。采用盐雾箱测试涂层耐盐雾性能,实验前样品用松香石蜡混合物封边,盐雾箱箱体温度为35 °C,NaCl溶液浓度为3.5%,规定时间后观察样板表面状况,并测其发射率。采用ZN-P型紫外老化试验箱测试涂层耐人工加速老化性能,实验条件:辐射度290~320 nm,辐照度0.68 W/m²,间隔光照和凝露,光照温度60 °C,冷凝温度50 °C,试验循环周期8 h,光照时间4 h,冷凝时间4 h。规定时间后观察样板表面状况,并测其发射率。采用恒温恒湿箱测试涂层耐湿热性能,按照GB 1735即将样板放入恒温恒湿箱中,控制温度为47±1 °C,相对湿度96±2%。

一定时间后,观察样板外观破坏程度并进行发射率测试。由于低红外发射率涂层的发射率功能性要求,认为涂层发射率高于0.4即为失效。

2 结果与讨论

2.1 不同固化温度下涂层腐蚀前的红外图谱

根据不同固化温度下EA/Al低红外发射率复合涂层耐腐蚀前后的FT-IR图(图1)可见,在1000~1130 cm⁻¹处的宽而强的峰是Si-O-Si的振动吸收峰,这是有机硅树脂的特征峰,2950 cm⁻¹和740~870 cm⁻¹处是Si-CH₃振动吸收峰,1605 cm⁻¹处是苯环的振动吸收峰,都是有机基团的一些特征吸收峰。且可以看出,随着固化温度的升高吸收峰逐渐减弱。当固化温度为80 °C时(如图1a),吸收峰最强;而涂层经200 °C和300 °C固化后(图1b和图1c),峰的数目减少,强度减小,因此红外吸收降低,根据吸收率等于发射率的基尔霍夫定律可知,发射率逐渐降低;而当固化温度继续升高,经400 °C固化后(图1d),光谱中只剩下明显的Si-O吸收峰,有机基团的吸收峰基本消失。从图中可以看出,从Si-O-Si在1000~1130 cm⁻¹处的吸收情况看,羟基的减少与Si-O-Si的增加是完全相符的。

相关文献报道^[16-17]因为当固化温度较低为80 °C时,大部分羟基以缔合状态存在,缔合羟基间易于脱水交联,形成Si-O-Si键,随着缔合羟基间的不断脱水交联,缔合羟基的数量越来越少,形成的Si-O-Si键相互交联也越来越强,链段的热运动受阻,导致剩余羟基难于相遇而交联。但当固化温度稍高一点为200 °C,一方面由于链段的热运动能力增强,另一方面羟基的反应活性也增强,羟基相遇而脱水的机

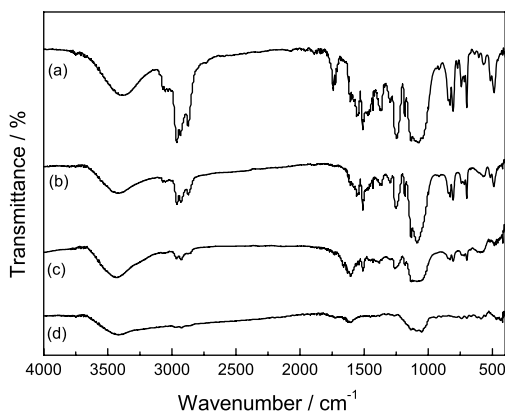


图1 不同固化温度下涂层腐蚀前的FT-IR红外透射光谱图

Fig.1 FTIR spectra of the coatings cured at different temperatures (a) 80 °C, (b) 200 °C, (c) 300 °C and (d) 400 °C

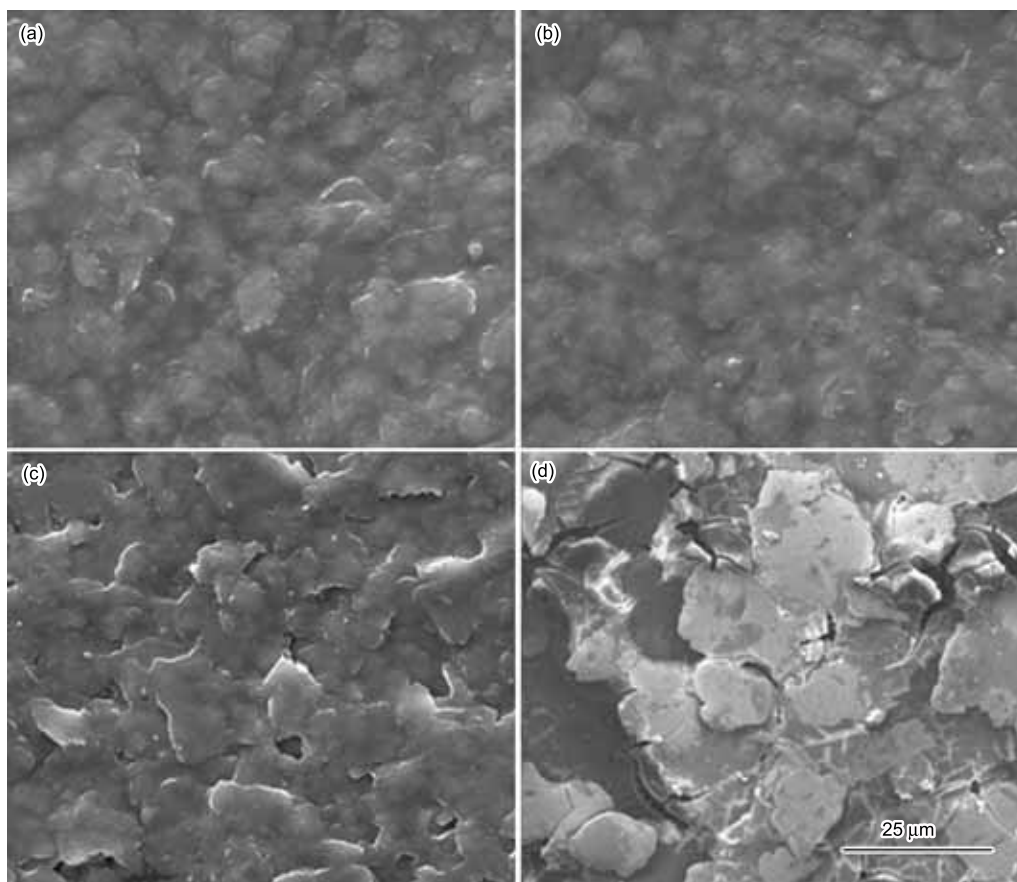


图2 不同固化温度环氧改性有机硅涂层的 SEM 图

Fig.2 SEM of EA/Al coatings cured at different temperatures (a) 80 °C, (b) 200 °C, (c) 300 °C and (d) 400 °C

会增大,所以在较高的温度下,羟基的平衡浓度较低, Si-O-Si 的平衡浓度较高,而所剩的缩合羟基数量变得更少,羟基在 3400 cm^{-1} 处吸收峰随着反应温度升高和时间延长向高波数方向移动可以进一步证明缩合羟基数量在减少,羟基固化较完全。而当固化温度继续升高至 400 °C 时,聚硅氧烷在高温下热氧化降解,主链 Si 原子上有机基团的氧化,以及由此引起的聚硅氧烷分子结构的改变^[18]。有机基团发生了高温下的热氧化降解,挥发,导致 Al 粉颗粒暴露在外,易氧化,而使得涂层的耐腐蚀性能明显降低。

2.2 不同固化温度下涂层的 SEM 图谱

图 2 是不同热处理温度下环氧改性有机硅低红外发射率涂层的 SEM 图。由图 2a 可知,当固化温度 80 °C 时,涂层中颜填料粒子分布不均匀,树脂基体与颜填料结合交联的不紧密;而当涂层在 200 °C 下固化时(图 2b)涂层中颜填料粒子与粒子之间,颜填料粒子与树脂基体之间结合紧密,表面状况良好,涂层最致密;但是当温度继续升高至 300 °C 时(图 2c),颜填料粒子与粒子的结合不够紧密,树脂基体明显减少,与颜填料的交联度减弱,涂层表面有很多缝隙;而固化温度为 400 °C 时(图 2d),且涂层表面凹凸不平,并有裂纹产生。这是由于随热处理温度

升高,涂层中环氧改性有机硅逐渐进行交联固化反应,使得涂层中填料粒子结合紧密,涂层交联固化度增加,促使形成的涂层更加致密牢固,但当超过一定温度后,树脂基体主链 Si 原子上有机基团发生裂解,如羟基、苯环等在高温下分解成气体,导致涂层的表面状态变差。

一般涂层的腐蚀主要发生在两处,一是涂层表面处的腐蚀。涂层表面孔隙越多,腐蚀因子透过孔隙进入涂层内部的机会越多,反之涂层的致密度越高,其耐腐蚀介质的渗透性越好^[19];二是涂层表面的颜填料的氧化腐蚀,因为铝粉等金属粉体本身的抗腐蚀性能较差,且涂层表面聚集较多的填料,由于低红外发射率涂料用填料本身存在许多的晶体缺陷而使涂层在腐蚀介质中被腐蚀。从图 2 中可以看出固化温度为 200 °C 时涂层的表面最为致密,且颜填料也和树脂基体之间结合的也非常紧密,使得颜填料未暴露在表面,因而该涂层无论从涂层的表界面处还是从颜填料的表面,其耐腐蚀性能都是最好,因此其耐腐蚀性能应是最好。

2.3 不同固化温度下涂层的电化学分析

由于大多数的腐蚀作用都是电化学反应过程,为了快速判断涂层的耐腐蚀性能,进行了电化学测试。

测试结果在 CHI660C 软件上进行分析。不同固化温度下固化的涂层在 3.5% NaCl 水溶液中所测得的电极化曲线图(图 3)表明,不同固化温度下涂层的耐腐蚀性能明显不同。从塔菲尔极化曲线中得到的电化学腐蚀参数列于表 1。可以看出固化温度为 80 °C、200 °C 以及 300 °C 时,具有较正的腐蚀电位 (E_{corr}) 和较小的腐蚀电流 (I_{corr}),其中固化温度为 200 °C 时,涂层的 E_{corr} 最正,同时 I_{corr} 比较小;而固化温度为 400 °C 时, E_{corr} 向负方向移动,最负,同时 I_{corr} 最大。 E_{corr} 最正、且 I_{corr} 减小说明涂层在 NaCl 水溶液中受到的侵蚀作用减弱,因此固化温度为 200 °C 时,涂层的耐腐蚀性能最好。

从交流阻抗测试结果(图 4a)中可以明显的看出固化温度为 200 °C 时,前半部分涂层阻抗半圆最大,固化温度为 300 °C 的涂层次之,而固化温度为 400 °C 的涂层阻抗半圆最小,后半部分为与涂层腐蚀过程的相关的阻抗,也可以明显的看出,固化温度为 200 °C 的涂层最晚出现半圆,阻抗最大。图 4b 为涂层的腐蚀过程的等效电路图 ($R_s(C_d R_t(QR_{01})(QR_{02}))$),利用上述交流阻抗数据,采用美国 PRAC 公司的软件 ZSimpWin 进行拟合,得到较好的拟合效果,表明该等效电路较好表征该过程。其中 R_s 表示参比电极与工作电极间的溶液电阻, C_d 表示涂层中双层电容, R_t 表示涂层反应电阻, R_{01} 和 R_{02} 分别表示涂层腐蚀过程中涂层中分散剂电阻和空隙电阻。

表 1 不通固化温度下涂层的电化学腐蚀参数

Table 1 Corrosion parameters in 3.5% NaCl

curing temperature	E_{corr}/V	R_p/Ω	$I_{\text{corr}}(A/cm^2)$
80 °C	-0.365	1.12×10^8	3.903×10^{-10}
200 °C	-0.217	4.62×10^7	6.826×10^{-10}
300 °C	-0.337	4.26×10^7	9.935×10^{-10}
400 °C	-0.428	1.62×10^5	2.835×10^{-7}

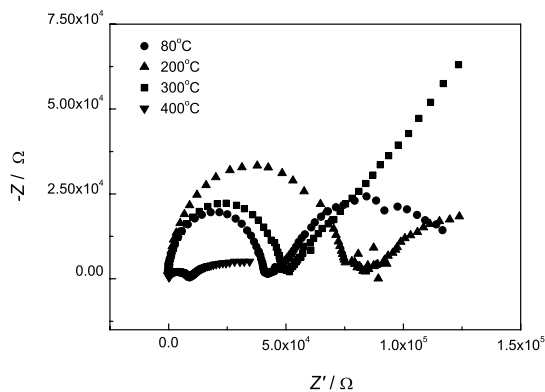


图 4a 不同固化温度环氧改性有机硅涂层的交流阻抗谱

Fig.4a EIS of the coatings in 3.5% NaCl solution at different temperatures

结合图 3 和图 4 得知固化温度为 200 °C 时涂层的耐腐蚀性能最好,固化温度为 300 °C 时涂层次之,这是由于涂层的 200 °C 下固化后,其树脂基体交联固化最佳,与颜填料粒子的结合最紧密,且树脂基体对填料粒子包裹后表面最为平滑所致。

2.4 不同固化温度下涂层耐腐蚀性能测试

传统涂层耐腐蚀程度的评定方法有很多种, Tafel 曲线、电化学交流阻抗技术都是获取腐蚀性离子在涂层中传输行为的有效手段。但对于红外低发射率涂层却需要重点考虑腐蚀过程中红外发射率的变化,即

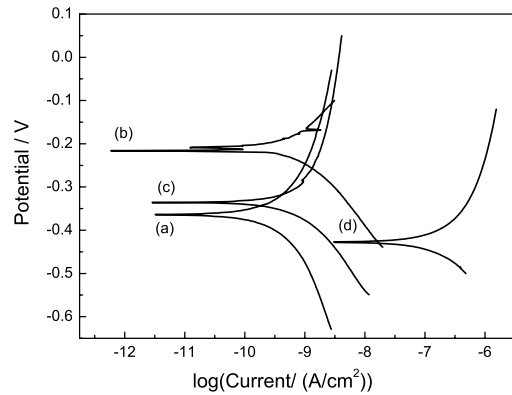


图 3 不同固化温度环氧改性有机硅涂层的电极化曲线

Fig.3 Potentiodynamic polarization curves of the coatings in 3.5% NaCl solution at different temperatures (a) 80 °C, (b) 200 °C, (c) 300 °C, (d) 400 °C

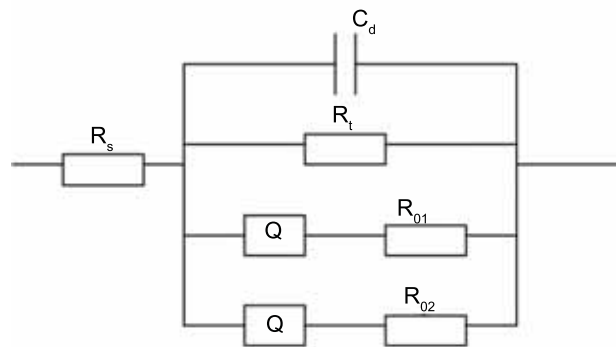


图 4b 等效电路图

Fig.4b Equivalent circuit diagram

红外低发射率在外界环境恶劣变化时也能保持原有的低发射率。

因此取在不同固化温度下固化的 EA/Al 复合涂层的样品, 放置于不同的耐腐蚀仪器中, 一定时间后分别观察涂层的表面状况并测其红外发射率, 结果如图 5 所示。可以看出在不同固化温度下固化的复合涂层其红外发射率在腐蚀之前基本相同, 均比较低^[20]。随着腐蚀的进行, 腐蚀时间的延长, 涂层的红外发射率均有所升高(图 5a、5b), 但是从图中可以看出, 当固化温度为 200 °C 时, 其发射率的增长的趋势明显比其他固化温度下的涂层的增长趋势缓慢得多。

有机涂层的固化度是决定涂层中介质传输行为的重要因素, 对其影响十分复杂。一方面, 固化度增加, 涂层中自由基团减少, 进入涂层的介质分子与涂层聚合物间的相互作用小, 扩散系数增大; 另一方面由于极性基团减少, 介质在涂层中的溶解度下降, 溶解系数减小。而总渗透系数为溶解系数和扩散系数之乘积^[21]。固化温度升高到 200 °C 时, 涂层的固化度增高, 未反应的活性基团(侧羟基和环氧基)减少, 一方面使介质在涂层中的溶解度降低; 另一方面, 由于固化度增高, 涂层的交联结构越致密, 自由体积减小, 会阻碍介质在涂层中的扩散, 扩散系数降低。因此, 总的结果是: 涂层的固化度越高, 涂层中的介质传输阻力越大, 耐腐蚀性能越好。温度继续升高, 涂层固化度继续增高, 未反应的活性基团(侧羟基和环氧基)减少, 还会使得介质与活性基团的相互作用(水分子与侧羟基形成氢键结合等)减小, 有利于介质的扩散, 此时渗透主要由扩散决定, 所以涂层固化越高, 介质扩散越快, 耐盐雾腐蚀和湿热腐蚀性性能越差。因此, 涂层在 200 °C 的固化温度下, 固化度最适合, 粒子与粒子之间, 离子与树脂基体之间结合最为致密(如图 2b), 使得涂层的总渗透系数最小, 因此其耐腐蚀性能明显优于其他三者。

但是随着腐蚀的进行, 腐蚀产物不断堆积, 自由基团与腐蚀介质的相互作用增大, 可能使涂层的孔率增多, 孔径增大, 同时, 由于腐蚀产物形成, 阻塞涂层中的微孔, 降低了介质的扩散通道, 因此, 涂层的腐蚀不仅受涂层本身的影响, 同时还受到腐蚀产物的制约。到腐蚀后期, 腐蚀产物不断通过微孔向外生长, 形成涂层和腐蚀产物的结合体, 介质在该结合体内的分布更不均匀。这就是腐蚀一定时间后发射率都有升高的原因。

而对于耐人工加速老化性能, 其趋势与前两者类似, 且其能耐腐蚀的时间比前两者更长, 其原因是, 前期紫外光对于涂层起到光固化作用^[22], 其中环氧基团为光固化反应基团, 而环氧基的开环反应属于阳离子聚合机理, 正常情况下具有难终止的特点, 所以前

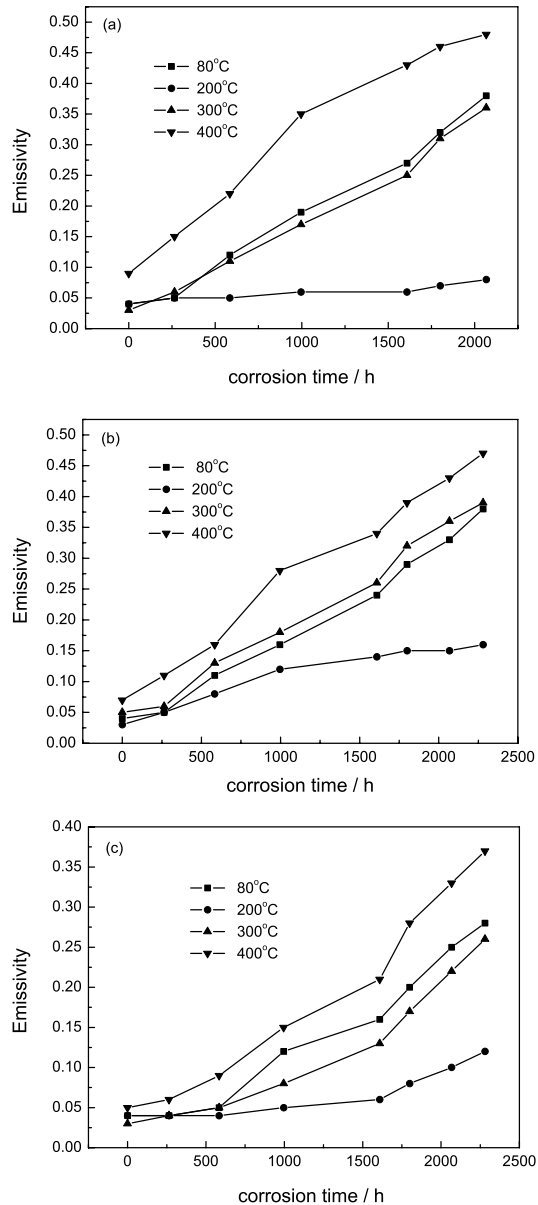


图 5 不同固化温度下涂层发射率随 (a) 盐雾腐蚀时间, (b) 湿热腐蚀时间, (c) 紫外加速老化时间的关系

Fig.5 Relationship between the emissivity of the coatings and corrosion time during (a) neutral salt spray test, (b) hot-wet resistance test, (c) anti ultraviolet ageing performance test at different temperatures

期, 随着紫外光照时间的延长, 光固化产物的凝胶转化率增加, 这使得涂层形成交联密度更大的三维网络聚合物, 所以前期发射率基本不变, 如图 5c 所示。

随着紫外光照时间的延长, 涂层的发射率均有所上升, 这是因为紫外光对有机涂层产生老化降解作用(图 6), 紫外老化 2000 h 后, 所有吸收峰明显减弱, 基本全部消失。这表明有机硅树脂发生降解, 化学键被破坏。且随着紫外光照时间的延长, 涂层电阻减小, 从而使涂层的孔隙率随光照时间而增加, 表明紫外光照

参考文献

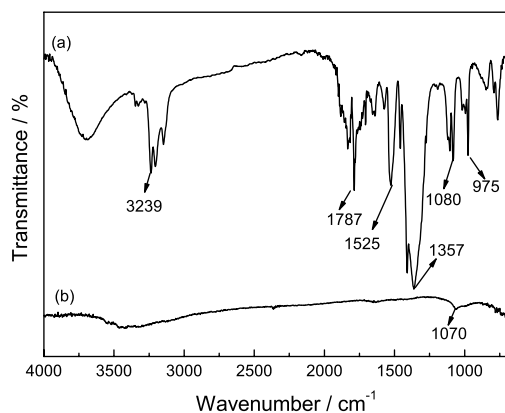


图6 固化温度为 200 ℃ 的涂层耐紫外老化前后的 FT-IR 红外透过光谱图

Fig.6 FTIR spectra of the coating before (a) and after (b) anti ultraviolet ageing performance test

使得涂层结构破坏,形成了向涂层内部延伸的裂缝或孔洞^[23],水等腐蚀介质进入涂层中使得涂层进一步腐蚀。这就是紫外光照到一定时间后发射率都有升高的原因。但是从图中可以看出 200 ℃ 下固化的涂层,发射率明显低于 80 ℃、300 ℃ 和 400 ℃ 下固化的涂层,且上升的趋势也缓慢得多,说明 200 ℃ 下固化的涂层耐人工加速老化腐蚀性能优于其他三者。这是由于,200 ℃ 下固化的涂层交联固化度最适宜,形成的网状结构使涂层致密度最好,化学键最牢固,紫外光降解有机树脂的过程比较缓慢,因此涂层生成向内部延伸的裂缝或孔洞速度较其他固化温度下固化的涂层也比较缓慢,使得涂层耐紫外光人工加速老化的性能较好。

3 结 论

1. 固化温度对低红外发射率涂层固化度有很大影响,使涂层耐盐雾腐蚀、耐湿热腐蚀和耐紫外光人工加速老化性能均随固化温度的升高呈现先变好后变差的趋势,即在固化温度为一个合适值时,涂层各耐腐蚀性能最佳。

2. 固化温度为 200 ℃ 时,涂层耐各种腐蚀性能最好。即在保证低发射率前提下,涂层的耐盐雾、耐人工加速老化和耐湿热腐蚀性能时间均能达到 2000 h,基本可以达到工程应用要求。

3. 固化温度为 200 ℃ 时,涂层的固化度适宜,涂层中分子间的交联稳定,有机硅树脂基体与颜填料 Al 粉之间结合良好,形成的涂层致密牢固,从而使涂层的耐腐蚀性能达到最佳。

- 1 YOU Yucong, DU Shiguo, SHI Dongmei, Application and research of the infrared camouflage coatings, *Modern Paint and Finishing*, **16**(7), 50(2006)
(游毓聪, 杜仕国, 施冬梅, 红外隐身涂料黏合剂的应用与研究, 特种涂料与涂装特刊, **16**(7), 50(2006))
- 2 Zuoco J, Alhama F, Inverse estimation of temperature dependent emissivity of solid metals, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **101**(1), 73(2006)
- 3 ZHANG Weidong, FENG Xiaoyun, MENG Xiulan, Status and development of foreign study on new stealthy materials, *Aerospace Materials & Technology*, **30**(3), 1(2000)
(张卫东, 冯小云, 孟秀兰, 国外隐身材料研究进展, 宇航材料工艺, **30**(3), 1(2000))
- 4 ARONSON J R, Modeling the infrared reflectance and emittance of paints and coating, AD-A110824, (1982)
- 5 XU Wenlan, LUO Ningsheng, ZHANG Min, Thermal radiation of inhomogeneous coating, *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **9**(5), 384(1982)
(徐文兰, 罗宁胜, 张珉, 非均匀涂层的热辐射, 红外与毫米波学报, **9**(5), 384(1982))
- 6 XIE Guohua, ZHANG Zuoguang, WU Ruibin, Matching performance among visible and near infrared coating, low infrared emitting coating and microwave absorbing coating, *Journal of Wu Han University of Technology, Materials Science*, **20**(4), 55(2005)
- 7 WANG Bo, SUN Xiaoquan, WANG Zirong, Study on stealth effect evaluation of infrared coating, *Chinese Journal of Quantum Electronics*, **21**(4), 538(2004)
(王博, 孙晓泉, 王自荣, 涂层光电隐身效果评估方法研究, 量子电子学报, **21**(4), 538(2004))
- 8 WANG Tingwei, CHENG Congliang, ZHANG Qitu, Study on low infrared emissivity of coating in 8~14 μm, *Optical Technique*, **31**(4), 598(2005)
(王庭慰, 程从亮, 张其土, 8~14 μm 波长低红外发射率涂料的研究, 光学技术, **31**(4), 598(2005))
- 9 J Jones, HONG Qi, WEI Haibin, *Stealth Technology-The Art of Black Magic*, (Beijing, Aviation Industry Press, 1991) p.52
(琼斯 J, 洪旗, 魏海滨, 译, 隐身技术 (北京, 航空工业出版社, 1991) p.52)
- 10 YU Huijuan, XU Guoyue, SHAO Chunming, Study on low infrared emissivity coatings with EPDM adhesive at spectral range of 8~14 μm, *Infrared Technology*, **30**(3), 154(2008)
(余慧娟, 徐国跃, 邵春明. EPDM 基涂层在 8~14 μm 波段红外低发射率的研究, 红外技术, **30**(3), 154(2008))
- 11 CUI Zhiming, YANG Yajiang, Effect of solidification degree of epoxy resin on properties of powder coating, *China Plastics Industry*, **29**(3), 37(2001)
(崔志明, 杨亚江, 环氧树脂固化度对粉末涂层性能的影响, 塑料工业, **29**(3), 37(2001))
- 12 ZHANG Baohua, YE Jundan, CHEN Bin, Influence of curing temperature on performance of epoxy thermosets, *China Plastics Industry*, **37**(9), 64(2009)
(张宝华, 叶俊丹, 陈斌, 固化温度对环氧树脂固化物性能的影响, 塑料工业, **37**(9), 64(2009))

- 13 HONG Xuhui, LI Yafeng, Study on the thermal properties of cyanate ester modified epoxy resin, *Thermosetting Resin*, **24**(5), 14 (2009)
(洪旭辉, 李亚锋, 氰酸酯改性环氧树脂耐热性研究, *热固性树脂*, **24**(5), 14(2009))
- 14 SHAO Chunming, XU Guoyue, YU Huijuan, Modified EPDM used as infrared stealthy coating, *Aerospace Materials & Technology*, (3), 62(2008)
(邵春明, 徐国跃, 余慧娟, 改性三元乙丙橡胶用于红外隐身涂层的研究, *宇航材料工艺*, (3), 62(2008))
- 15 YU Huijuan, XU Guoyue, SHEN Xuan, Study on preparation and optimization of low infrared emission coating in 8~14 μm , *Ordnance Material Science and Engineering*, **31**(6), 49(2008)
(余慧娟, 徐国跃, 沈 轩, 8~14 μm 波段低发射率涂料的制备与优化研究, *兵器材料科学与工程*, **31**(6), 49(2008))
- 16 K.H.Wu, C.M.Chao, T.F.Yeh, Thermal stability and corrosion resistance of polysiloxane coatings on 2024-T3 and 6061-T6 aluminum alloy, *Surface & Coatings Technology*, **201**(12), 5782(2007)
- 17 Fu-Sheng Chuang, Hung-Yi Tsi, Jing-Dong Chow, Wen-Chin Tsen, Yao-Chi Shu, Shin-Cheng Jang, Thermal degradation of poly(siloxane-urethane) copolymers, *Polymer Degradation and Stability*, **10**(93), 1753(2008)
- 18 Jwlwna D J, Milutin N G, The thermogravimetric analysis of some polysiloxanes, *Polymer Degradation and Stability*, **61**, 87(1998)
- 19 YANG Lixia, ZHANG Sanping, LiN An, A study on water vapor permeating rate of organic coating and corrosion of coating-metal interace, *Materials Protection*, **34**(10), 28(2001)
(杨丽霞, 张三平, 林 安, 有机涂层渗水率及金属界面腐蚀的研究进展, *材料保护*, **34**(10), 28(2001))
- 20 YU Huijuan, XU Guoyue, SHEN Xingmei, YAN Xiaoxing, HUANG Rong, LI Fenglei, Preparation of leafing Cu and its application in low infrared emissivity coatings, *Journal of Alloys and Compounds*, **484**(1), 395(2009)
- 21 LUO Suzhen, ZHENG Yugui, LI Jin, Characteristics of electrochemical impedance spectroscopy of medium permeation in fusion bonded epoxy powder coatings, *Corrosion Science and Technology Protection*, **13**(4), 199(2001)
(骆素珍, 郑玉贵, 李 劲, 环氧粉末涂层中介质传输的交流阻抗谱特征, *腐蚀科学与防护技术*, **13**(4), 199(2001))
- 22 YANG Guang, HUANG Pengcheng, UV treatment of blended epoxy resin and its surface chemical reaction, *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, **34**(6), 618(2008)
(杨 光, 黄鹏程, 环氧共混树脂的光固化及其表面化学反应, *北京航空航天大学学报*, **34**(6), 618(2008))
- 23 XU Yongxiang, YAN Chuanwei, DING Jie, UV photo-degradation of coatings, *Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection*, **24**(3), 168(2004)
(徐永祥, 严川伟, 丁 杰, 紫外光对涂层的老化作用, *中国腐蚀与防护学报*, **24**(3), 168(2004))