

1 种低红外发射率涂层耐热性能研究

肖圣荣,丁鹤雁,王智勇,张 桐,刘鹏瑞
(中航工业北京航空材料研究院,北京 100095)

摘要:为有效降低飞行器高温部位表面的红外发射率,以改性有机硅为黏结剂体系、金属铝粉为主要填料,制备了在8~14 μm波段具有较低红外发射率的涂层。在50~400℃温度范围内考察了涂层的耐热性能,并采用扫描电镜、TGA等手段对其进行表征,研究了涂层的红外发射率、光泽度和力学性能随温度的变化规律及影响机理。结果表明:制备的涂层在300℃以下具有良好的力学性能,可长期使用,在8~14 μm波段的红外发射率与温度成反比,光泽度与温度成正比;当环境温度高于300℃,涂层开始发生热降解现象,光泽度降低,涂层的力学性能降低。

关键词:涂层;低红外发射率;耐热性;改性有机硅;黏结剂;隐身

中图分类号:V259 **文献标识码:**A **doi:**10.13477/j.cnki.aeroengine.2014.02.004

Thermal Stability of a Low Infrared Emissivity Coating

XIAO Sheng-rong, DING He-yan, WANG Zhi-yong, ZHANG Tong, LIU Peng-rui
(AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to efficiently decrease infrared emissivity on surface of aircraft high temperature position, the low infrared emissivity coatings at 8~14μm were prepared by using modified silicone and Aluminum powder as binder and pigment, respectively. The thermal stability and infrared emissivity of the coatings was researched, and the influence of temperature on the gloss and mechanical properties of coatings was investigated with scanning electron microscopy and thermo gravimetric analysis. The results indicate that good mechanical properties of the coatings are reserved under 300 degrees, and the infrared emissivity is inversely related to the temperature, while the gloss is proportionate to the temperature. The thermal degradation happened and the gloss went down and the mechanical properties reduced when the environment temperature is higher than 300℃.

Key words: coatings; low infrared emissivity; thermal stability; modified silicone; binder; stealth

0 引言

目前,红外探测技术是战场侦测和武器制导所使用的重要手段,也是继雷达探测之后又一严重威胁各种军事目标的探测手段。据报道,在现代战争中约有80%的飞行器是被红外制导导弹击落的^[1]。因此,在如此严格苛刻的战场上,采用红外隐身技术来提高战机的生存率,成为有效对抗红外探测的关键技术,是否具备红外隐身性能也已成为现代先进战机的标志性特征之一^[2-3]。在飞行器使用过程中,除了发动机温度高以外,飞行器的蒙皮、尾喷管由于气动加热等原因,使这些部位具有较高温度,体现出明显的红外辐射特

征,从而被红外探测设备所发现^[4]。例如飞机在飞行中蒙皮表面的理论温度为250~320K,根据维恩定律可知,该红外辐射主要集中在8~14 μm大气窗口^[5],因此,通过在飞行器高温部位表面涂覆低红外发射率隐身涂层,能够有效降低红外辐射特征值,达到红外隐身的效果,这也是目前实现飞行器红外隐身效果最直接、最简单,最不影响飞机气动性能的手段。目前,国内较为成熟的低红外发射率隐身涂料均以有机树脂作为黏结剂。有机树脂黏结剂具有优秀的力学性能、施工性能等特点,在涂料中的使用非常成熟^[6-7]。但是,有机树脂的耐热性较差,在高温条件下会出现断

收稿日期:2013-07-03 基金项目:国家自然科学基金(51375032、51275024)资助
作者简介:肖圣荣(1989),男,在读硕士研究生,研究方向为隐身材料;E-mail: 442133914@qq.com。

引用格式:肖圣荣,丁鹤雁,张桐,等. 1种低红外发射率涂层耐热性能研究[J].航空发动机,2014,40(2):15-18. XIAO Shengrong, DING Heyan, ZHANG Tong, et al. Thermal stability of a low infrared emissivity coating[J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 15-18.

链和降解等现象^[8],这对于低红外发射率涂层的红外隐身性能来说是致命的。因为红外隐身涂层的表面状态直接影响发射率的变化,光亮平整的表面红外发射率才会较低^[9-10]。因此,通过选择具有良好耐高温性能的树脂体系,或对树脂体系进行一定的改性,就能制备出性能更为优异的低红外发射率隐身涂层^[11-15]。

本文采用具有良好耐高温性能的有机硅树脂作为红外隐身涂层的粘结剂体系,并配合复合金属粉、耐高温填料等制备出具有低红外发射率的红外隐身涂层,并在不同温度条件下对其耐热性进行了研究,分析发射率、光泽以及力学性能与温度之间的关系,为其在飞行器等武器装备上使用奠定基础。

1 试验

1.1 低红外发射率涂层的制备

将改性有机硅树脂、功能性填料按一定比例均匀混合,采用高速分散设备进行良好分散,待搅拌均匀后加入固化剂,熟化 15 ~ 20 min,采用压缩空气喷涂法将其喷涂在 80 mm × 50 mm × 2 mm 的铝板上,施工之前需对基板进行预处理:化学除油除锈→水洗→砂纸打磨→水洗→烘干待用;施工时喷涂压力控制在 0.4 ~ 0.8 MPa,厚度控制为 40 ~ 50 μm,室温固化 7 天后,分别在 50、100、150、200、250、300、320、350、400 °C 条件下处理 2 h,之后进行各项性能测试,并与常温固化条件下的涂层进行比较。

1.2 试样的测试与表征

采用 CIAS 型红外光谱辐射计和以色列 CI 公司制造的标准腔黑体测试涂层在 8 ~ 14 μm 波段的红外发射率;用英国 CamScan 3100 扫描电子显微镜对样品形貌进行表征;采用 TA Instruments 公司研制的 TGA2050 热失重分析仪分析涂层的热稳定性;采用雾影光泽度仪测试涂层的光泽度(60°/%) ;采用磁性测厚仪测量涂层厚度;采用万用拉力机测量涂层附着力;采用漆膜弯曲试验仪测量涂层柔韧性;采用漆膜冲击力实验仪测量涂层冲击力。

2 试验结果与讨论

2.1 热处理温度与涂层发射率的关系

本试验测试了不同温度下热处理后的涂层法向红外发射率,测试温度为 50 °C,测试波段为 8 ~ 14 μm,测试结果见表 1。从表中可见,常温固化的涂层的发射率最高,达到 0.25,而进行热处理后的涂层,随着热

表 1 不同热处理温度下涂层在 8 ~ 14 μm 波段的红外发射率

$t/^\circ\text{C}$	ε	$t/^\circ\text{C}$	ε	$t/^\circ\text{C}$	ε
常温	0.250	150	0.212	300	0.160
50	0.210	200	0.206	350	0.153
100	0.193	250	0.188	400	0.158

处理温度从 50 °C 升高到 400 °C,涂层的发射率逐渐降低,从 0.210 降到 0.158。这是因为随着热处理温度的不断升高,涂层固化程度逐渐提高,片状 Al 粉逐渐上浮覆盖到树脂表层,由于 Al 粉本身的红外发射率非常低,且密度小、加工方便;而树脂的红外发射率非常高,表层 Al 粉能起到遮盖作用,降低体系的发射率;温度的升高使得 Al 粉紧密排列,表层中树脂含量越来越少,起到黏结作用,涂层孔隙明显减少,加上铝粉的光滑片状结构,使得涂层的反射率不断增大,由基尔霍夫定律可知,涂层的发射率不断降低。光泽度和 SEM 测试结果均验证了此推论,涂层的光泽度测试结果如图 1 所示。从图中可见,在 300 °C 以下涂层的光泽度是不断提高的,随后开始降低。涂层的热重分析曲线如图 2 所示。从图中可见,SEM 结果显示随着热处理温度从 100 °C 提高到 300 °C,涂层的表面致密程度明显提高,在 300 °C 条件下只有很小的孔隙,使得涂层的光泽度提高。但是,当热处理温度升高到 400 °C 时(如图 2(d)所示),出现了比较明显的孔隙,因为在该热处理温度条件下,树脂

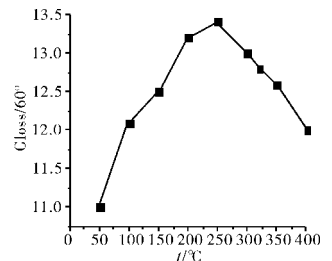


图 1 涂层光泽度与热处理温度之间的关系

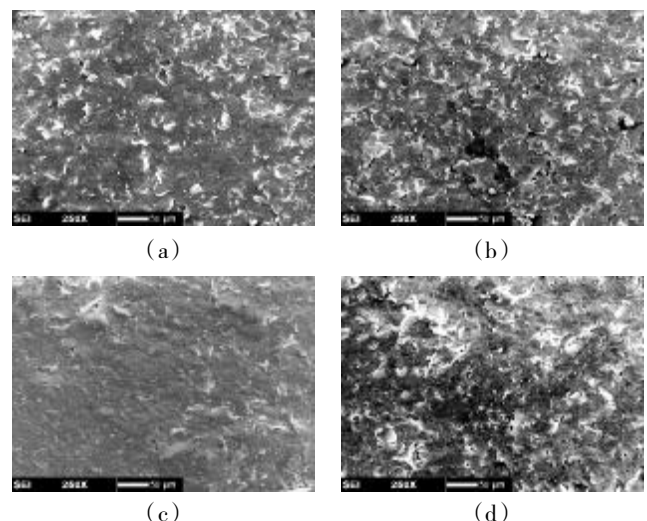


图 2 不同热处理条件下涂层的 SEM 测试结果

体系发生了热降解,部分主链发生了断裂,致密性开始下降,孔隙率增大,导致涂层的光泽度降低。

2.2 涂层的热稳定性

采用热重分析仪对涂层的耐热性能进行分析,升温速率为 10 °C/min,采用氮气保护。从图 3 TG 结果可知,温度从室温升高到 300 °C 左右的过程中,涂层质量发生小幅度的下降,这主要是由涂层中残留的溶剂挥发造成的,同时还伴随着较小基团或支链的分解。从 300 °C 开始,大部分的分子链段开始热降解,出现断裂、分解,黏结剂网络互穿结构被破坏等现象,这与 SEM 电镜结果是一致的。在 X_1 和 X_2 2 点分别作切线,相交于 X 点(298.69 °C),此时的降低的质量分数为 7.6%,由此可知该涂层的热分解温度是 298.69 °C,随着温度继续升高,涂层的质量持续减小直到测试停止。

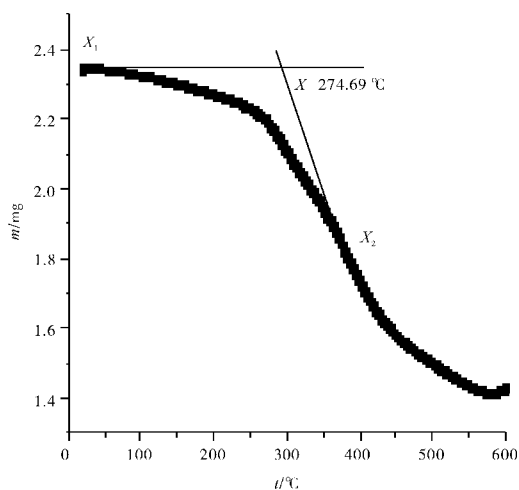


图3 涂层的热重分析曲线

2.3 热处理温度和涂层力学性能的关系

将热处理后的涂层分别按照 GB/T9286-1998、GB/T1732-93 和 GB/T1731-93 对附着力、冲击强度和柔韧性能进行测试,结果见表 2。—表示涂层发生起皮、脱落等现象,无法进行力学性能测试。

从表 2 中可见,常温固化的涂层具有较好的力学性能,能达到经热处理涂层的水平。在 300 °C 以下,涂层有较好的力学性能,涂层附着力均达到 0 级,耐冲击强度达到 50 cm,柔韧性变差。这是由于试验采用的树脂为有机硅树脂,其分子链中含有大量的 -Si-O- 键,其键能(446 kJ/mol)远远高于 -C-C- 键(356 kJ/mol),使其内聚能增加;而且有机硅树脂分子链上的羟基在受热氧化后生成 -Si-O-Si- 键的交联

网络结构,对主链结构的热降解起到阻碍作用。当温度在 300 °C 以上时,涂层发生开裂、脱落等现象,这是因为树脂基体发生热降解,小分子和链段开始分解断裂,导致填料和树脂之间无法良好结合,涂层开裂、脱落,失去了原有的柔韧性。这与涂层的热重分析曲线所得结论吻合。

表 2 不同温度热处理后涂层的外观及力学性能

t/°C	附着力	冲击强度/cm	柔韧性/mm
常温	0	45	2
50	0	50	2
100	0	50	3
150	0	50	3
200	0	50	3
250	0	50	4
300	1	30	5
350	—	—	—
400	—	—	—

3 结论

(1)以改性有机硅树脂为粘结剂体系,以复合金属粉为主要填料,能够制备出具有一定力学性能的红外低发射率涂层,该涂层在 8 ~ 14 μm 波段范围内的发射率约为 0.2。

(2)涂层的红外发射率随着温度的升高呈现降低趋势,光泽度则表现为先上升后降低。

(3)涂层的分解温度为 298.69 °C,低于该温度前,涂层具有较好的力学性能,高于该温度后开始出现热失重现象,粘结剂体系开始降解,涂层的力学性能变差,甚至脱落、剥离。

(4)经室温固化的涂层的发射率为 0.25,经 300 °C 以下热处理的涂层的最低发射率为 0.16,其红外隐身性能得到提高。

参考文献:

- [1] 乐洪宇. 红外隐身技术与隐身涂料的发展 [J]. 战术导弹技术, 2011(5): 121-126.
LE Hongyu. Development of infrared stealth technology and stealth coating [J]. Tactical Missile Technology, 2011(5): 121-126. (in Chinese)
- [2] 付伟. 红外隐身原理及其应用技术 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(1): 87-93.

- FU Wei. Principle and application technology of IR stealth[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(1):87-93. (in Chinese)
- [3] 张卫东,冯小云,孟秀兰. 国外隐身材料研究进展[J]. 宇航材料工艺,2000,30(3):1-10.
ZHANG Weidong, FENG Xiaoyun, MENG Xiulan. Status and development of foreign study on new stealthy materials [J]. Aerospace Materials and Technology, 2000, 30(3):1-10. (in Chinese)
- [4] 胡传昕. 隐身涂层技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 121-132.
HU Chuanxin. Stealth coating technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:121-132. (in Chinese)
- [5] Xie Guohua, Zhang Zuoguang, Wu Rui bin. Matching performance among visible and near infrared coating, low infrared emitting coating and microwave absorbing coating[J]. Journal of Wu Han University of Technology (Materials Science Edition), 2005(4):55-59.
- [6] 游敏聪,杜仕国,施冬梅. 红外隐身涂料黏合剂的应用与研究[J]. 现代涂料与涂装,2006(7):50-54.
YOU Mincong, DU Shiguo, SHI Dongmei. Application and research of infrared camouflage coatings[J]. Modern Paint Finishing, 2006(7):50-54. (in Chinese)
- [7] 王雅君,徐国跃,李九芬,等. 有机硅基低发射率复合涂层的热老化性能研究[J]. 红外技术,2010,32(8):449-451.
WANG Yajun, XU Guoyue, LI Jiufen, et al. Thermal aging properties of silicone based composite coatings with low infrared emissivity [J]. Infrared Technology, 2010, 32(8):449-451. (in Chinese)
- [8] 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[J]. 塑料工业,2009,37(9):64-79.
ZHANG Baohua, YE Jundan, CHEN Bin. Influence of curing temperature on performance of epoxy thermosets [J]. China Plastics Industry, 2009, 37(9):64-79. (in Chinese)
- [9] 王庭慰,程从亮,张其土. 8~14 波长低红外发射率涂料的研究[J]. 光学技术,2005,31(4):598-600.
WANG Tingwei, CHEN Congliang, ZHANG Qitu. Study on low infrared emissivity of coating in 8~14 um [J]. Optical Technique, 2005, 31(4):598-600. (in Chinese)
- [10] Yan Xiaoxing, Xu Guoyue. Corrosion and mechanical properties of polyurethane/Al composite coatings with low infrared emissivity [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 491(1):649-653.
- [11] Ananda K S, Sankara N T S N. Thermal properties of siliconized epoxy interpenetrating coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2002, 45(4):323-330.
- [12] Zueco J, Alhama F. Inverse estimation of temperature dependent emissivity of solid metals [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2006, 101(1):73-86.
- [13] 丁儒雅,徐国跃,张伟钢,等. 固化温度对低发射率涂层综合性能的影响[J]. 兵器材料科学与科学,2012,35(6):3-7.
DING Ruya, XU Guoyue, ZHANG Weigang, et al. Influence of curing temperature on comprehensive properties of low infrared emissivity coatings [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(6):3-7. (in Chinese)
- [14] 张凯,马艳,范敬辉,等. 低发射率红外隐身涂料研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料,2008,6(1):21-25.
ZHANG Kai, MA Yan, FAN Jinghui, et al. Research advances in low infrared emissivity camouflage coatings [J]. Chemical Propellants and Polymeric Materials, 2008, 6(1):21-25. (in Chinese)
- [15] Pine D J. Self-assembly of low emissivity materials [R]. AD-A-386035, 2000.
- (上接第9页)
- Engineering, 2012(1):92-97. (in Chinese)
- [10] 单勇,张靖周,邵万仁,等. 某型涡扇排气系统缩比模型红外辐射特性实验[J]. 航空动力学报,2009(10):21-23.
SHAN Yong, ZHANG Jingzhou, SHAO Wanren, et al. Experiments on infrared radiation characteristics of exhaust system for a turbofan engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2009(10):21-23. (in Chinese)
- [11] 杨胜男. 球面收敛二元喷管电磁散射特性数值模拟研究 [D]. 中国航空研究院, 2013.
YANG Shengnan. Numerical investigation on electromagnetic scattering characteristics for spherical converging flap nozzle[D]. China Aviation Academy, 2013. (in Chinese)
- [12] 邓洪伟,金文栋,叶流增,等. 二元矢量喷管内外流场数值计算与隐身性分析[J]. 航空科学技术,2012(1):45-48.
DENG Hongwei, JIN Wendong, YE Liuzeng, et al. Numerical simulation of two-dimensional nozzle and analysis of its stealth technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(1):45-48. (in Chinese)
- [13] 杨胜男,张志学,邵万仁,等. 带中心锥航空发动机腔体电磁散射特性数值研究 [J]. 航空发动机, 2014, 40(1): 48-53, 59.
YANG Shengnan, ZHANG Zhixue, SHAO Wanren, et al. Numerical investigation on electromagnetic scattering characteristics for engine cavity with centrocone [J]. Aeroengine, 2014, 40(1):48-53, 59. (in Chinese)