

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.01.008

一种环氧有机硅耐热漆层在飞机发动机 尾气相连接零件上的应用

李涛*, 李博

(中航飞机起落架有限责任公司, 陕西 汉中 723200)

摘要: 介绍了一种 H61-1 铝粉环氧有机硅耐热面漆和配套的 H61-83 环氧有机硅耐热底漆在与飞机发动机尾气相连接的某零件上的应用。通过加热法、划格法以及冲击法对该漆层进行了耐热性、结合力和冲击强度的测试。结果表明, 这种漆层具有良好的耐热性、结合力和耐冲击性能。将这种漆层应用于与飞机发动机尾气相连接的零件上, 零件可长时间承受发动机尾气对漆层的影响, 避免漆层的老化、脱落, 使零件的防腐能力和使用寿命得到提高。

关键词: 有机硅耐热漆; 飞机发动机尾气; 耐热性; 结合力; 冲击强度; 固化; 防腐
中图分类号: TQ637.6 **文献标识码:** A

Application of an epoxy silicone heat resistant paint coating on aircraft engine exhaust connecting parts

Li Tao*, Li Bo

(AVIC Landing Gear Advanced Manufacturing Co., Ltd., Hanzhong 723200, China)

Abstract: The application of a kind of H61-1 aluminum epoxy silicone heat resistant topcoat and a matching H61-83 epoxy silicone heat resistant primer on the part connected with the tail gas of aircraft engine was introduced in this paper. The heat resistance, bonding force and impact strength of the coatings were tested by heating method, grid method and impact method. The results show that the coating system has good heat resistance, bonding force and impact resistance. Applying this coating system to parts connected with the exhaust of the aircraft engine can withstand the impact of engine exhaust on the paint layer for a long time, avoiding aging and peeling of the paint layer, and improving the anticorrosion ability and service life of the parts.

Keywords: silicone heat-resistant paint; aircraft engine exhaust; heat resistance; binding force; impact strength; curing; anticorrosion

与飞机发动机尾气相连接的某零件表面要求涂覆H06-2环氧树脂底漆和W61-31铝色有机硅耐热漆^[1], 但在长期使用过程中, 零件经常会出现漆层起皮脱落的现象, 经过原因分析和故障复现发现,

导致漆层脱落的原因除了涂漆前零件表面清洗不干净之外, 在长期工作过程中, 飞机发动机产生的高温(高达280℃)尾气也会对环氧树脂漆层产生影响, 使漆层老化, 从而脱落。因此, 本文围绕一种

收稿日期: 2023-07-19

修回日期: 2024-03-29

通信作者: 李涛(1981—), 男, 本科, 高级工程师, 二级技术专家, 研究方向为表面工程技术, email: litaolamc@sina.com

由H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆^[2-7]与H61-83环氧有机硅耐热底漆^[8]组合而成的重防腐^[9-10]涂层开展了研究,通过对技术条件的对比和工艺实验测试,对该漆层在耐热性、结合力和冲击强度等性能方面的表现进行了分析,探讨了其在与飞机发动机尾气相连接的高温零件表面上的应用前景。

1 工艺实验

1.1 试样

结合力试样,材料2024-T3,规格150 mm×100 mm×1 mm,表面粗糙度 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$,数量4件,表面状态硫酸阳极化,试样编号J1、J2、J3、J4;冲击强度试样,材料2024-T3,规格50 mm×120 mm×(0.2~0.3) mm,表面粗糙度 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$,数量4件,表面状态硫酸阳极化,编号C1、C2、C3、C4;耐热性试样,材料为马口铁,规格50 mm×120 mm×(0.2~0.3) mm,表面粗糙度 $R_a \leq 0.8 \mu\text{m}$,数量8件,无需表面处理,

试样编号N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7、N8。

1.2 辅助用料

H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆;H61-83环氧有机硅耐热底漆;X-7环氧稀释剂;丁酮;180目或更细的砂纸;棉本色布。

1.3 实验设备

喷枪,压缩空气装置(0.3~0.4 MPa),电子天平(精度0.000 1 g),1 000 mL烧杯,玻璃棒,秒表,计时器(0~60 s),100目的铜丝网,涂-4粘度计,鼓风恒温烘箱(温度范围50~350 °C),DUALSCOPERMP40测厚仪(精度0.01 μm),放大镜(4倍),六个切割刀的多刃切割刀具,冲击试验器以及高温炉。

1.4 实验过程

1.4.1 H61-83 环氧有机硅耐热底漆涂覆

H61-83环氧有机硅耐热底漆喷涂的工艺试样方案如表1所示。

表1 H61-83 环氧有机硅耐热底漆喷涂工艺试验方案

Tab.1 Process test plan for spraying H61-83 epoxy silicone heatresistant primer

试样编号	试样类型	漆层	漆层厚度/μm
J1、J2	结合力	H61-83 环氧有机硅耐热底漆	20~26
C1、C2	冲击强度	H61-83 环氧有机硅耐热底漆	20~26
N1、N2、N3、N4	耐热性	H61-83 环氧有机硅耐热底漆	20~26

H61-83环氧有机硅耐热底漆的配制、喷涂和固化要求为:(1)该底漆为双组份漆层,组份一(改性有机硅色浆):组份二(聚酰胺树脂)=100:20,使用电子天平按照重量比称取所需的组份一和组份二在烧杯中进行混合,并使用玻璃棒进行充分的搅拌。(2)在室温下静置1 h进行熟化。(3)使用X-7稀释剂调节粘度,用涂-4粘度计对粘度进行测试并用秒表进行计时,确保粘度为14~16 s。(4)使用100目的铜丝网对配制好的漆料进行过滤,配制好的漆料使用的有效期为8 h。(5)使用蘸有丁酮的棉本色布对要喷涂的试样表面进行擦拭,确保试样表面没有任何油污和附着物,并用洁净的压缩空气对试样表面进行吹干。(6)按照表1要求对试样进行喷涂,喷涂时的环境温度15~35 °C,相对湿度30%~75%。(7)喷漆的工艺参数:喷涂压力0.3~0.5 MPa,喷嘴离喷涂表面的距离150~300 mm。(8)对于喷涂后的试样,先在室温下30 min,然后再(120±5) °C温度下固化4 h。(9)对固化后的试样使用DUALSCOPERMP40测厚仪测量厚度,确保

厚度满足表1要求。

H61-83环氧有机硅耐热底漆喷涂后的如图1所示。可以看到,喷涂后漆层表面光滑平整,无流挂、起皮、固体颗粒、划伤、针孔、流淌、缩孔、过喷等缺陷。



图1 喷涂底漆后的试样外观

Fig.1 Appearance of the sample after spraying primer

1.4.2 H61-1 铝粉环氧有机硅耐热面漆涂覆

H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆喷涂的工艺试样方案如表2所示。

表2 H61-1 铝粉有机硅耐热面漆喷涂工艺试验方案

Tab.2 Process test plan for spraying H61-1 aluminum powder silicone heatresistant topcoat

试样编号	试样类型	漆层	漆层厚度/ μm
J3、J4	结合力	H61-83 环氧有机硅耐热底漆 + H61-1 铝粉环氧有机硅耐热面漆	40~52
C3、C4	冲击强度	H61-83 环氧有机硅耐热底漆 + H61-1 铝粉环氧有机硅耐热面漆	40~52
N5、N6、 N7、N8	耐热性	H61-83 环氧有机硅耐热底漆 + H61-1 铝粉环氧有机硅耐热面漆	40~52

H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆的配制、喷涂和固化要求为：(1)该面漆为三组份漆层，组份一（环氧改性有机硅树脂）：组份二（聚酰胺树脂）：组份三（铝粉浆）=100：30：20，使用电子天平按照重量比称取所需的组份一和组份二在烧杯中进行混合，并使用玻璃棒进行充分的搅拌。(2)在室温下静置1 h进行熟化。(3)使用时加入组份三铝粉浆，混合均匀后用X-7稀释剂调节粘度，用涂-4粘度计对粘度进行测试并用秒表进行计时，确保粘度为14~16 s。(4)使用100目的铜丝网对配制好的漆料进行过滤。(5)配制好的漆料使用的有效期为8 h。(6)先对所有试样喷涂H61-83环氧有机硅耐热底漆并完全固化，在喷涂H61-1铝粉有机硅耐热面漆前，使用180目或更细的砂纸对表面进行轻微打磨活化，不要影响底漆层的厚度。(7)使用蘸有丁酮的棉本色布对要喷涂的试样表面进行擦拭，确保试样表面没有任何油污和附着物，并用洁净的压缩空气对试样表面进行吹干。(8)按照表1要求对试样进行喷涂，喷涂时的环境温度15~35℃、相对湿度30%~75%。(9)喷漆的工艺参数：喷涂压力0.3~0.5 MPa，喷嘴离喷涂表面的距离150~300 mm。(10)对于喷涂后的试样，先在室温下静置30 min，然后在(120±5)℃温度下固化4 h。(11)对固化后的试样使用DUALSCOPERMP40测厚仪测量厚度，确保厚度满足表1要求。

H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆喷涂后的试样外观如图2所示，喷涂后漆层表面光滑平整，无流挂、起皮、固体颗粒、划伤、针孔、流淌、缩孔、过喷等缺陷。

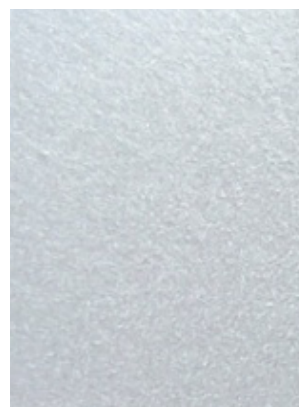


图2 喷涂面漆后的试样外观

Fig.2 Appearance of the sample after coating

1.4.3 结合力试验

按照GB/T 9286—2021色漆和清漆划格试验中规定的网格法进行结合力测试。刀具间隔1 mm，使用经过鉴定的250# 3M胶带进行测试，要求结果不大于1级。

1.4.4 冲击强度试验

按GB/T 1732—2020漆膜耐冲击测定法进行50 cm冲击强度测试，将涂漆试板漆膜朝上平放在铁砧上，试板受冲击部分距边缘不少于10 mm，每个冲击点的边缘相距不得少于10 mm。重锤借控制装置固定在滑筒的某一高度（其高度由产品标准规定或商定），按压控制钮，重锤即自由地落于冲头上。提起重锤，取出试板。用4倍放大镜观察，判断漆膜有无裂纹、皱纹及剥落等现象。

1.4.5 耐热性试验

按GB/T 1735中规定的方法进行耐热性测试，漆层完全固化后的4件试样中的3件放置于(300±5)℃的鼓风恒温烘箱保持至少16 h，另1件涂漆样板留作比较。之后，将热烘后的试样取出并冷至室温，与未热烘的涂漆试样进行对比，检查其有无起层、龟裂、鼓泡、开裂等现象，允许失光和变色。

1.4.6 耐热性试验+冲击强度试验

对按照GB/T 1735标准进行过耐热性实验的试件,再按照GB/T 1732—2020标准进行漆膜的冲击强度实验,实验后判断漆膜有无裂纹、皱纹及剥落等现象。

2 实验结果与分析

2.1 性能测试结果

2.1.1 结合力试验

喷涂H61-83环氧有机硅耐热底漆的试样结合力测试后外观见图3,测试后无漆层脱落。喷涂H61-83环氧有机硅耐热底漆和H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆的试样结合力测试后的外观见图4,测试后无漆层脱落。

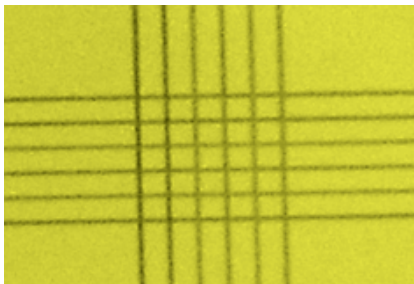


图3 喷涂 H61-83 底漆的试样结合力测试后外观

Fig.3 Appearance of samples sprayed with H61-83 primer after binding force test

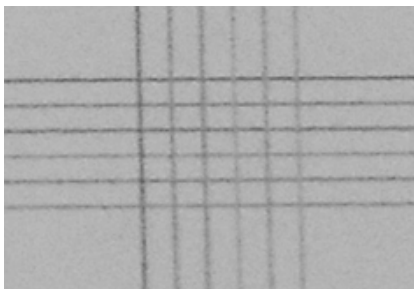


图4 喷涂 H61-83 底漆和 H61-1 面漆的试样结合力测试后外观

Fig.4 Appearance of samples sprayed with H61-83 primer and H61-1 topcoat after binding force test

2.1.2 冲击强度试验

喷涂H61-83环氧有机硅耐热底漆的试样冲击强度测试后外观见图5,喷涂H61-83环氧有机硅耐热底漆和H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆的试样冲击强度测试后外观见图6。由图5和图6可以看出冲击实验后无裂纹、皱纹以及漆层脱落。

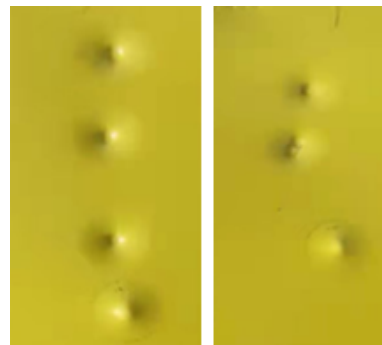


图5 喷涂 H61-83 底漆的试样冲击强度测试后外观

Fig.5 Appearance of samples sprayed with H61-83 primer after impact strength test

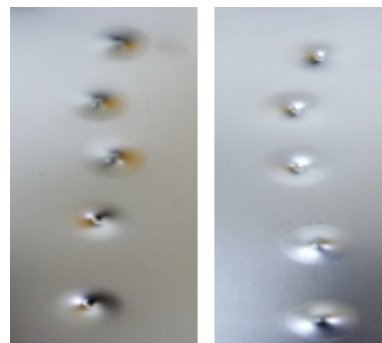


图6 喷涂 H61-83 底漆和 H61-1 面漆的试样冲击强度测试后外观

Fig.6 Appearance of samples sprayed with H61-83 primer and H61-1 top coat after impact strength test

2.1.3 耐热性试验

喷涂H61-83环氧有机硅耐热底漆的试样耐热性测试后外观见图7,喷涂H61-83环氧有机硅耐热底漆和H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆的试样耐热性测试后外观见图8。由图7和图8可以看出,在进行耐热性实验后,虽然漆层的颜色和实验前有一定的差异,但这种差异是允许的,并且漆层表面无起层、皱皮、鼓泡、开裂等现象。

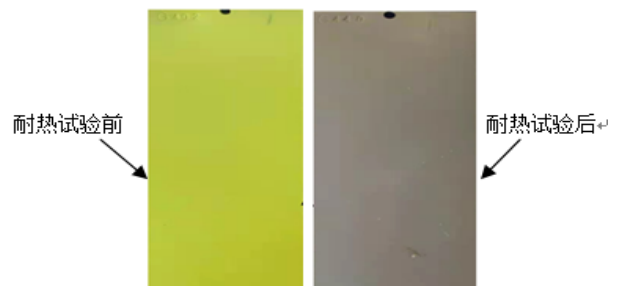


图7 喷涂 H61-83 底漆的试样耐热性测试前后外观

Fig.7 Appearance of samples sprayed with H61-83 primer before and after heat resistance test

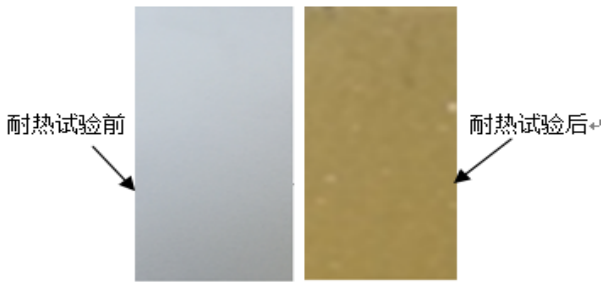


图8 喷涂 H61-83 底漆和 H61-1 面漆的试样耐热性测试前后外观

Fig.8 Appearance of samples sprayed with H61-83 primer and H61-1 top coat before and after heat resistance test

2.1.4 耐热性试验和冲击强度试验

对喷涂H61-83铝粉有机硅耐热底漆和H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆并进行耐热性试验的试样按照1.4.4节规定的方法进行冲击强度测试，测试后的外观如图9所示。由图9可以看出，进行过耐热性实验的试样在进行冲击强度实验后，漆层表面无裂

纹、皱纹及剥落等现象。

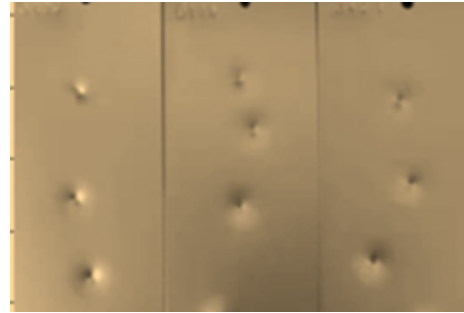


图9 喷涂 H61-83 底漆和 H61-1 面漆的试样耐热性测试+冲击强度测试后外观

Fig.9 Appearance of samples sprayed with H61-83 primer and H61-1 top coat after heat resistance test and impact strength test

2.2 结果分析

H61-83环氧有机硅耐热底漆以及H61-1铝粉环氧有机硅耐热面漆的测试结果统计如表3和表4所示。

表3 H61-83 环氧有机硅耐热底漆测试结果

Tab.3 Test result of H61-83 epoxy silicone heatresistant primer

试样编号	漆层类型	干膜厚度/ μm	测试项目	测试方法	判定标准	测试结果
J1	H61-83	23.5	结合力	GB/T 9286	≤ 1 级	合格
J2	H61-83	24.2	结合力	GB/T 9286	≤ 1 级	合格
C1	H61-83	23.8	冲击强度	GB/T 1732	50CM 无裂纹、皱纹及剥落	合格
C2	H61-83	24.6	冲击强度	GB/T 1732	50CM 无裂纹、皱纹及剥落	合格
N1	H61-83	23.4	对比试样	—	—	—
N2	H61-83	22.1	耐热性	GB/T 1735	漆膜应无起层、结皮、鼓泡、开裂等现象，允许失光和变色	合格
N3	H61-83	21.9	耐热性	GB/T 1735	漆膜应无起层、结皮、鼓泡、开裂等现象，允许失光和变色	合格
N4	H61-83	22.5	耐热性	GB/T 1735	漆膜应无起层、结皮、鼓泡、开裂等现象，允许失光和变色	合格

从H61-83环氧有机硅耐热底漆喷涂后的表面外观及表3的测试结果可以看出，喷涂H61-83环氧有机硅耐热底漆后，漆层外观颜色均匀一致、平整、光洁细腻、无明显流挂皱皮、无固体颗粒、划伤、针孔、流淌、缩孔、过喷等缺陷；用DUALSCOPER MP40测厚仪测量时厚度满足要求；结合力测试、冲击强度测试和耐热性测试结果均合格，满足试验要求。

从H61-83环氧有机硅耐热底漆+H61-1铝粉环

氧有机硅耐热面漆喷涂后的表面外观及表4的测试结果看，喷涂H61-1铝粉有机硅耐热漆后，漆层外观颜色均匀一致、平整、光洁细腻、无明显流挂皱皮、无固体颗粒、划伤、针孔、流淌、缩孔、过喷等缺陷；用DUALSCOPERMP40测厚仪测量时厚度满足要求；结合力测试、冲击强度测试、耐热性测试以及耐热性后冲击强度测试，结果均合格，满足试验要求。

表4 H61-1 铝粉环氧有机硅耐热面漆测试结果

Tab.4 Test result of H61-1 aluminum powder silicone heat-resistant top coat

试样编号	漆层类型	干膜厚度/ μm	测试项目	测试方法	判定标准	测试结果
J3	H61-83 + H61-1	44.8	结合力	GB/T 9286	≤ 1 级	合格
J4	H61-83 + H61-1	47.3	结合力	GB/T 9286	≤ 1 级	合格
C3	H61-83 + H61-1	45.5	冲击强度	GB/T 1732	50CM 无裂纹、皱纹及剥落	合格
C4	H61-83 + H61-1	49.2	冲击强度	GB/T 1732	50CM 无裂纹、皱纹及剥落	合格
N5	H61-83 + H61-1	42.1	对比试样	—	—	—
N6	H61-83 + H61-1	43.6	耐热性	GB/T 1735	漆膜应无起层、龟皮、鼓泡、开裂等现象, 允许失光和变色	合格
			冲击强度	GB/T 1732	50CM 无裂纹、皱纹及剥落	合格
N7	H61-83 + H61-1	47.5	耐热性	GB/T 1735	漆膜应无起层、龟皮、鼓泡、开裂等现象, 允许失光和变色	合格
			冲击强度	GB/T 1732	50CM 无裂纹、皱纹及剥落	合格
N8	H61-83 + H61-1	49.4	耐热性	GB/T 1735	漆膜应无起层、龟皮、鼓泡、开裂等现象, 允许失光和变色	合格
			冲击强度	GB/T 1732	50CM 无裂纹、皱纹及剥落	合格

3 结论

(1) 通过实验表明, H61-83和H61-1铝粉环氧有机硅耐热漆层可操作性强, 固化后的漆层具有良好的外观; 使用划痕法进行漆层的结合力测试时不会发生漆层脱落和起皮等现象, 漆层结合力良好; 使用冲击法进行冲击强度测试时也未发生漆层的起落和脱落。

(2) 在模拟高温条件下进行了耐热性测试, H61-1和H61-83环氧有机硅耐热漆层可以经受 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温未造成漆层的起层、龟皮、鼓泡和开裂等现象, 耐热性能良好。

(3) H61-1和H61-83环氧有机硅耐热漆层可以用于和飞机发动机尾气相连接的高温零件表面以起到良好的防护作用。

参考文献

[1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M].

北京: 中国标准出版社, 2002: 118-121.

- [2] 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]. 腐蚀与防护, 2004, 25(6): 238-241.
- [3] 孙振红, 王天祥, 周晓红, 等. 锆黄环氧有机硅耐热漆生产中假稠的探讨[J]. 上海涂料, 2011, 49(7): 23-24.
- [4] 李花, 左禹. 耐热和耐蚀的环氧有机硅涂料的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2006, 33(6): 57-60, 92.
- [5] 张斌, 刘伟区. 有机硅改性环氧树脂[J]. 化工新型材料, 2001, 29(8): 12-16.
- [6] 王宁, 郑德亮, 王婧, 等. 耐黄变环氧改性有机硅耐高温涂料的研制[J]. 中国涂料, 2015, 30(5): 34-38.
- [7] 方健君, 靳美亮, 马胜军, 等. 酚醛环氧耐高温涂料的研制及性能研究[J]. 涂料工业, 2015, 45(8): 14-20.
- [8] 石璞, 向贤伟, 王正祥, 等. 常温快干环氧树脂金属底漆的研究[J]. 现代涂料与涂装, 2007, 10(1): 1-3.
- [9] 李国荣. 重防腐涂料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 204-205.
- [10] 郭清泉, 陈焕钦. 重防腐涂料的发展展望[J]. 化工进展, 2003, 22(9): 947-950.