

三种可磨耗封严涂层的抗腐蚀性能

潘峤¹, 张骐¹, 王璐², 张兴华¹, 刘明¹, 孙志华¹, 高蒙¹, 高建¹

(1.中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095;
2.中国航发黎明发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110043)

摘要: 目的 研究 AHB, CuAl/NiC 和 NiCrAl/NiC 三种可磨耗涂层的抗腐蚀性能。方法 对三种涂层试样进行盐雾试验、湿热试验和浸泡试验, 并结合电化学测试分析不同涂层试样的抗腐蚀性能。结果 545 h 的盐雾试验后, AHB 涂层的表面出现了一处微裂纹, CuAl/NiC 涂层表面出现了涂层剥落现象, NiCrAl/NiC 涂层的表面状况相对最好; 三种涂层试样经过 10 个循环的湿热试验后均未见明显的腐蚀现象; 经过 15 d 的浸泡试验后, NiCrAl/NiC 涂层的表面状况相对较好, 而 AHB 涂层和 CuAl/NiC 涂层的表面状况相对较差; 电化学测试结果也表明 NiCrAl/NiC 涂层的防护性能相对最好。结论 NiCrAl/NiC 涂层的抗腐蚀性能相对较高, 而 AHB 涂层和 CuAl/NiC 涂层的抗腐蚀性能相对较低。

关键词: 可磨耗涂层; 抗腐蚀; 盐雾; 湿热;

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2017.06.018

中图分类号: TJ04; TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)06-0093-04

Corrosion Resistance of Three Kinds of Abradable Seal Coatings

PAN Qiao¹, ZHANG Qi¹, WANG Lu², ZHANG Xing-hua¹, LIU Ming¹, SUN Zhi-hua¹, GAO Meng¹, GAO Jian¹

(1.Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;
2.AECC Liming Aero-engine Corporation, Shenyang 110043, China)

ABSTRACT: Objective To research the corrosion resistance of three kinds of abradable seal coatings, including AHB, CuAl/NiC and NiCrAl/NiC. **Methods** The corrosion resistance of the three kinds of coatings was analyzed by salt spray test, thermal-humidity test and immersion test, in combination with electrochemical testing. **Results** After salt spray test of 545 hours, NiCrAl/NiC coating revealed a relatively better property compared to that of AHB and CuAl/NiC since a macro crack was found on AHB coating and coating pill-off happened on CuAl/NiC; no obvious change was found during 10 days' thermal-humidity test; while after 15 days' immersion test, NiCrAl/NiC coating still showed a more stable situation than the other two coatings; the electrochemical results also provided a reliable evidence that NiCrAl/NiC had the best corrosion resistance among those three kinds. **Conclusion** The NiCrAl/NiC coating has relatively better corrosion resistance compared to that of AHB and CuAl/NiC coatings.

KEY WORDS: abradable seal coating; corrosion resistance; salt spray; thermal-humidity

现役发动机广泛采用钛合金进行结构减重, 同时使用高温合金提高发动机的工作温度, 进而实现大推重比能力^[1-4]。风扇和压气机部位的材料主要为钛合

金和一些特殊钢材, 在冲刷等工况条件以及环境因素的作用下, 易发生磨损和腐蚀等失效^[5-6]。随着舰载机的发展, 航空发动机的服役环境愈加严酷, 将同时

面临高温、高湿、盐雾、凝露等的作用,而风扇和压气机是发动机气路中最先接触海洋气氛的部位,受海洋腐蚀的影响也最大,因此这些部位的耐蚀性能在一定程度上决定了发动机在海洋环境中的使用寿命和可靠性^[7-8]。可磨耗封严涂层的应用,将有助于减小发动机转子与静子的径向间隙,从而达到预防失效及提高使用寿命的目的^[9]。目前,国内外一些研究人员针对可磨耗封严涂层的环境适应性开展了一些研究工作,部分研究取得了一定的成效^[10-12]。

1 实验

1.1 材料

在铝合金基体材料上分别喷涂 AHB(俄罗斯牌号)、CuAl/NiC 和 NiCrAl/NiC 三种不同的可磨耗涂层,实验室加速试验用试样大小为 100 mm×50 mm,使用绝缘胶进行封边处理。

1.2 方法

按照相应标准的要求,对三种涂层试样分别进行了盐雾试验、湿热试验和浸泡试验。参照标准分别为:GJB 150.11—1986, GJB 150.9—1986 和 ASTM G31-72 (2004)。

使用单反相机对试验前后的试样拍摄高清宏观照片,获得试样在该环境下的表面腐蚀状况。

电化学阻抗测试系统采用三电极体系,以饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,铂电极为辅助电极。测试面积为 1 cm²,测试前试样在 3.5% NaCl 溶液中浸泡至电位稳定后开始测量。测试频率为 0.01~100 000 Hz,测试点数为 30 个。

2 结果与讨论

2.1 盐雾试验结果

经历 545 h 盐雾试验前后的 AHB, CuAl/NiC、NiCrAl/NiC 涂层试样的宏观形貌照片如图 1 所示。可以发现,初始 AHB 试样表面较为平整,各处颜色均匀,呈浅灰色,无法直接观测到裂纹;经过 545 h 后,涂层颜色发生较大改变,呈亮灰色,并出现了裂纹。试样表面颜色的变化主要是由于部分 NaCl 晶体的附着导致。初始 CuAl/NiC 试样表面较为平整,各处颜色均匀,呈米黄色,无法直接观测到裂纹;经过 545 h 后,试样表面有较为明显的涂层剥落现象,并且有较大面积的浅绿色反应产物。由于涂层中含有铜元素,因此可推测出现的大面积浅绿色反应产物为铜的氯化物。初始 NiCrAl/NiC 试样表面较为平整,各处颜色均匀,呈浅灰色,无法直接观测到裂纹;545 h

后,试样下方的封边处出现了浅绿色流痕。由上述分析可知,三种涂层经过 545 h 的盐雾试验后,CuAl/NiC 涂层已经产生较为严重的腐蚀,AHB 涂层表面观察到了裂纹,而 NiCrAl/NiC 涂层的表面状况相对较好。

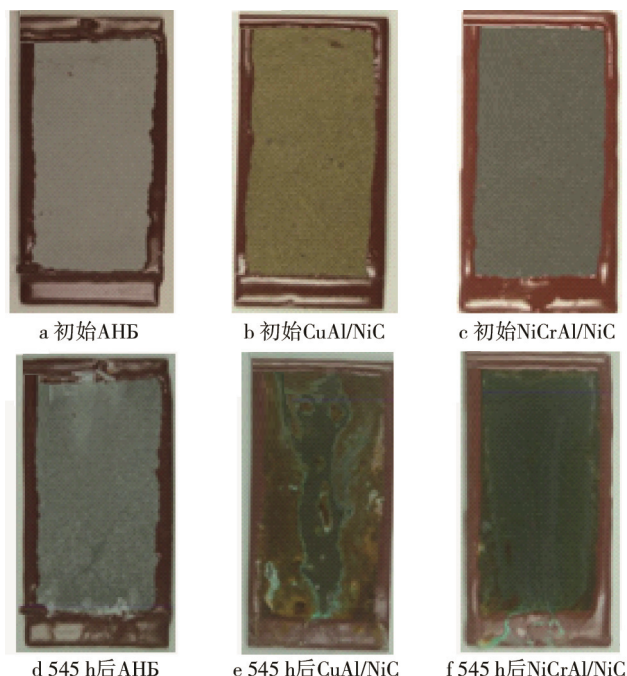


图 1 三种涂层试样经历盐雾试验前后宏观形貌照片

2.2 湿热试验结果

经历不同循环次数湿热试验后,三种涂层试样的宏观形貌照片如图 2 所示。由图 2 可知,与初始试样

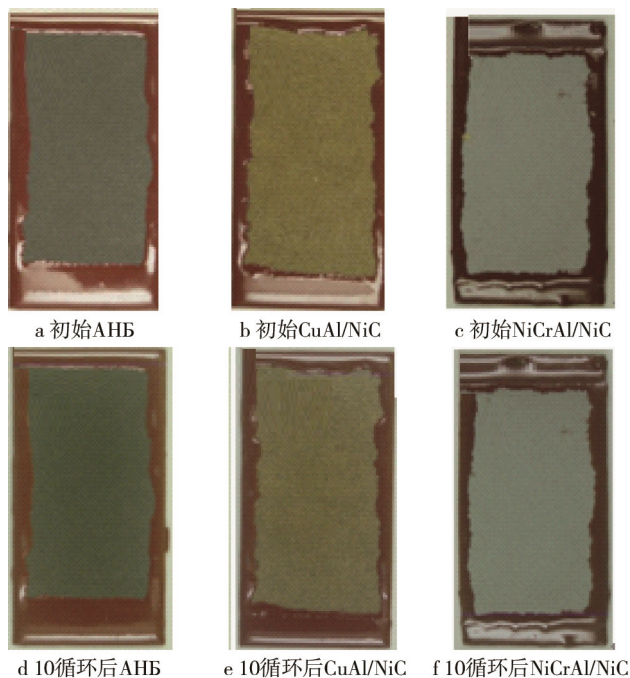


图 2 三种涂层试样经历湿热试验前后的宏观形貌照片

相比, 经过 10 个循环的湿热试验后, 三种涂层试样表面均较为平整, 没有腐蚀产物出现, 仅颜色稍有加深。因此, 经过 10 个循环的湿热试验后, 三种涂层试样均保持较好的表面状况。

2.3 浸泡试验结果

经历 15 d 浸泡试验前后三种涂层试样的宏观形貌照片如图 3 所示。由图 3 可知, 经过 15 d 浸泡试验后, AHB 涂层试样表面有较明显的晶体附着; CuAl/NiC 涂层试样表面出现浅绿色的反应产物, 推断生成了铜的氯化物; NiCrAl/NiC 涂层试样表面的部分区域有晶体附着, 但没有观察到明显的涂层反应产物。三种涂层试样经过 15 d 的浸泡试验后均未观察到明显的基体腐蚀现象。

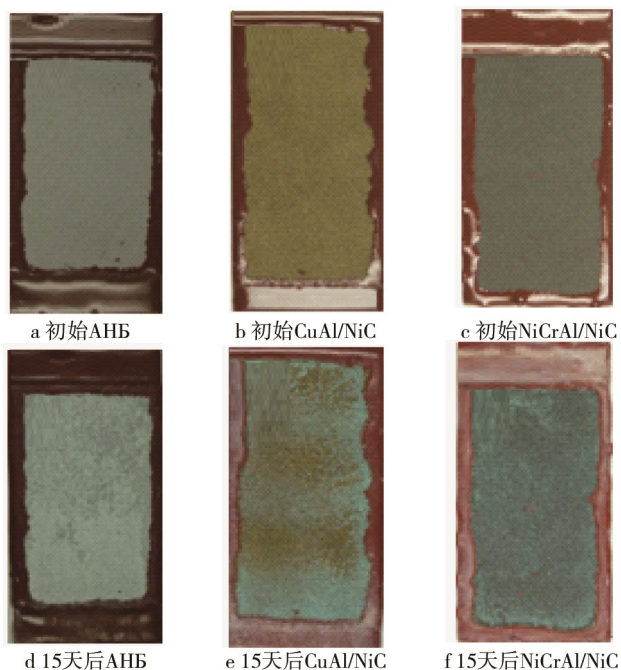


图 3 三种涂层试样经历浸泡试验前后宏观形貌照片

2.4 电化学测试结果

图 4 为经历不同时间的浸泡试验后 AHB 涂层试样的 Nyquist 阻抗谱图。由图 4 可知, 当交流电频率较高时, 经过不同浸泡天数的 AHB 涂层试样阻抗变化不明显, 在曲线初始阶段几乎重合, 而且阻抗值很低。这是由于高频交流电更容易通过涂层表面与浸泡液之间形成的双电层结构, 同时忽略了一部分极化电阻的影响。当交流电的频率降低到中频段时, 经过不同浸泡天数的涂层试样的阻抗值开始显现出不同, 表现在 Nyquist 曲线在中间段出现分离。到低频段后, 曲线间的离散度更为明显。

在浸泡 1 d 后, 涂层试样表面状况开始发生变化, 表现为阻抗值的下降, 中频的容抗弧以及低频扩散尾的形成。浸泡 3 d 后, 涂层的性能下降明显, 中频段

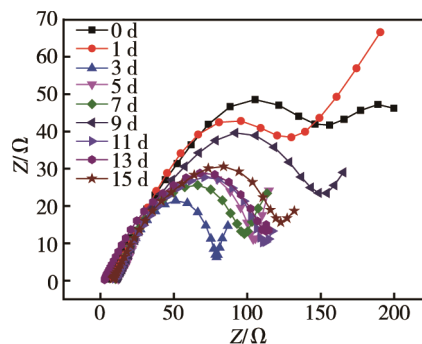


图 4 AHB 涂层的 Nyquist 图

阻抗降低到相对最低值。这可能是由于在浸泡初期, AHB 涂层表面存在电位紊乱的局部区域, 在外界条件的作用下, 局部区域易形成微小的点蚀坑, 从而形成电流的局部通路, 使得阻抗显著下降。浸泡 5 d 后的试样所对应的测试结果显示, 涂层的阻隔性能有所恢复。这可能是涂层与浸泡液中的 Cl^- 反应后形成的反应产物堵塞了浸泡初期形成的微孔, 从而使得局部的电流通道被阻断, 进而使得阻抗值回升。

随着浸泡时间的进一步延长, 各个阶段试样对应的 Nyquist 曲线所呈现的规律性不强。产生这种情况的原因可能是由于随着浸泡时间的延长, 一方面浸泡液中的 Cl^- 对涂层的破坏程度在逐渐加深, 使得阻抗趋于减小; 另一方面涂层与浸泡液的反应产物又不断生成, 并堵塞一部分损伤区域, 使得阻抗趋于回升, 两方面的共同作用导致了此试验结果。

图 5 为经历不同时间的浸泡试验后 CuAl/NiC 涂层试样的 Nyquist 阻抗谱图。由图 5 可知, 当交流电频率较高时, 经过不同浸泡天数的 CuAl/NiC 涂层试样阻抗变化不明显, 在曲线初始阶段几乎重合, 而且阻抗实部、虚部数值均很低, 接近于 0。当交流电频率降低到接近中频段时, 所有经过浸泡的试样所对应的 Nyquist 曲线即与初始试样的曲线逐渐分离, 并且阻抗值降低, 但相互之间仍然保持了较高的重合度。这说明 CuAl/NiC 涂层在经过 1 d 的浸泡试验后就已经被破坏, 后续的浸泡试验虽然使得试样表面的反应产物进一步增多, 但是并未起到堵塞微孔的作用。从而也说明了经过更长时间浸泡试验的涂层试样对应

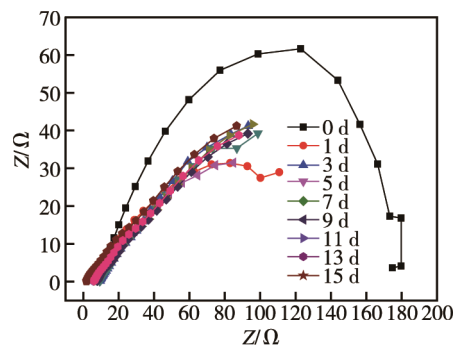


图 5 CuAl/NiC 涂层的 Nyquist 图

的 Nyquist 曲线没有明显波动的原因。因此,可推断 CuAl/NiC 涂层表现出的抗腐蚀性能相对较弱。

图 6 为经历不同时间的浸泡试验后 NiCrAl/NiC 涂层试样的 Nyquist 阻抗谱图。由图 6 可知,当交流电频率较高时,经过不同浸泡天数的 NiCrAl/NiC 涂层试样阻抗变化不明显,在曲线初始阶段几乎重合,而且阻抗实部、虚部数值均很低,接近于 0。当交流电频率较低到中频段后,经过不同浸泡天数的涂层试样的阻抗值开始显现出不同,表现为 Nyquist 曲线在中间段出现分离。到低频段后,曲线间的分离程度更为明显。

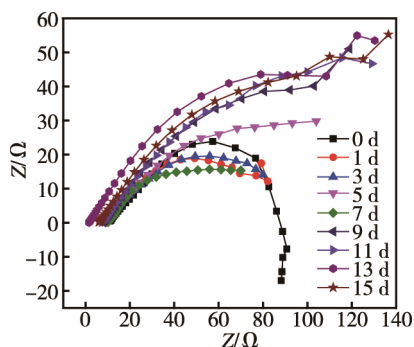


图 6 NiCrAl/NiC 涂层 Nyquist 图

与 AHB 涂层试样的测试结果不同,经过不同浸泡天数的 NiCrAl/NiC 涂层试样所对应的 Nyquist 曲线呈现了规律性的变化,而且随着浸泡时间的延长,阻抗值逐渐增大。这种反向的规律可能是由于涂层与浸泡液中的 Cl⁻ 反应后生成的反应产物起到了堵塞微孔的作用,进而减小了形成电子通路的有效面积。随着浸泡时间的延长,反应产物逐渐在表面累积,使得不导电层的厚度持续增加,从而导致阻抗的上升。这种结果也与浸泡试验的宏观照片信息相一致。因此,可推断 NiCrAl/NiC 涂层表现出了相对较好的抗腐蚀性能。

3 结论

1) 545 h 的盐雾试验后, NiCrAl/NiC 涂层的表面状况相对较好,而 AHB 涂层和 CuAl/NiC 涂层的表面状况相对较差。

2) 三种涂层试样经过 10 个循环的湿热试验后均未见明显的腐蚀现象。

3) 经过 15 d 的浸泡试验后, NiCrAl/NiC 涂层的防护效果相对较好,而 AHB 涂层和 CuAl/NiC 涂层的防护效果相对较差。

4) 电化学阻抗测试结果表明, NiCrAl/NiC 涂层的抗腐蚀性能相对较高,而 AHB 涂层和 CuAl/NiC 涂层的抗腐蚀性能相对较低。

参考文献:

- [1] 田晔, 张淑婷, 马江虹, 等. 可磨耗封严涂层发展及应用[J]. 有色金属, 2006(s1): 96—99.
- [2] 尹春雷, 贾贤赏, 杨成斌, 等. 可磨耗封严涂层评述[J]. 有色金属, 2007(s1): 44—46.
- [3] 章德铭, 任先京, 腾佰秋, 等. 可磨耗封严涂层性能评价技术研究进展[C]// 全国热喷涂技术经验交流论文集. 南昌, 2009.
- [4] 运广涛, 李其连, 程旭东. NiCrAlYSi/h-BN 高温可磨耗封严涂层摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2016(2): 103—108.
- [5] BOBZIN K, LUGSCHEIDER E, ZWIEK J, et al. Microstructure and Properties of New Abradable Seal Coatings for Compressor Applications[C]// Proceedings of the 2006 International Thermal Spray Conference. 2006.
- [6] ZHU J, LIU M, WANG J, et al. Study of the Abradable Seal Coating Used in Aircraft Engines[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2000, 24(2): 75—80.
- [7] GAO Jun-guo, FENG L, Guo Meng-qiu, et al. Research Status and Development of Abradable Seal Coatings[J]. Thermal Spray Technology, 2012, 22(3): 55—60.
- [8] ZHU L, LIU M, LI X Y, et al. The Study of the Gradient Abradable Seal Coatings Used in Aeroengine[J]. Journal of Materials Engineering, 2001(2): 34—35.
- [9] 张峰, 黄传兵, 兰昊, 等. TiAl/BN 复合封严涂层的耐腐蚀性能研究[J]. 热喷涂技术, 2014, 6(4): 24—27.
- [10] KARBASI M, GHAVIDEL Z, NEKAHI A. Corrosion Behavior Of HVOF Sprayed Coatings Of Ni-TiC And Ni-(Ti,W)C SHS Produced Composite Powders And Ni+TiC Mixed Powder[J]. Materials & Corrosion, 2014, 65(5): 485—492.
- [11] LEI B, LI M, ZHAO Z, et al. Corrosion Mechanism Of An Al-BN Abradable Seal Coating System In Chloride Solution[J]. Corrosion Science, 2014, 79(3): 198—205.
- [12] ZHANG Feng, LAN Hao, HUANG Chuan-bing, et al. Corrosion Resistance of Ti3Al/BN Abradable Seal Coating[J]. Acta Metall, 2014, 27(6): 1114—1121.