

高温合金/NiAl 封严涂层的电偶腐蚀行为研究

Galvanic Corrosion Behavior of Superalloy/
NiAl Seal Coating

孙 杰,赵 丹

(沈阳理工大学 环境与化工学院,沈阳 110159)

SUN Jie,ZHAO Dan

(School of Environmental and Chemical Engineering,Shenyang

Ligong University,Shenyang 110159,China)

摘要:采用空气等离子喷涂工艺在高温合金基体上制备了 NiAl 封严涂层。研究了 NiAl 涂层/高温合金在 5%(质量分数)NaCl 溶液中的电偶腐蚀行为,结合极化曲线、开路电位和 SEM 形貌检测,探讨封严涂层的腐蚀机理。结果表明,高温合金基体与 NiAl 涂层的电偶电流密度为 $2.1356\mu\text{A}/\text{cm}^2$,电位较负的 NiAl 涂层作为电偶对的阳极,腐蚀更严重,腐蚀产物疏松呈絮状覆盖在涂层表面。等离子喷涂的 NiAl 涂层含有较多的孔隙和氧化物,腐蚀容易在缺少氧化物覆盖的区域发生。NiAl 涂层边缘的氧化物也容易优先溶解,形成腐蚀产物膜,堵塞涂层微孔,抑制腐蚀的进行。随着腐蚀时间延长,NiAl 涂层的防护性能逐渐减弱。

关键词: NiAl 封严涂层;高温合金;电偶腐蚀

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.07.012

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)07-0061-05

Abstract: NiAl seal coating was prepared on the superalloy substrate by air plasma spraying method. The galvanic corrosion behavior in 5%(mass fraction) NaCl solution was investigated for the NiAl seal coating and superalloy substrate. The measurement methods, which consisted of scanning electron microscopy (SEM), polarization curve and open circuit potential, were used to character the morphology and the corrosion behavior of the coating. The results indicated that the galvanic current density was about $2.1356\mu\text{A}/\text{cm}^2$. The NiAl coating with more negative corrosion potential served as the couple's anode and it had seriously corrosion, loosen and floccus corrosion products covered on the coating's surface. In the as-sprayed NiAl seal coating, there existed many pores and oxides, and corrosion was easy to occur in the area lack of oxide coverage. While the oxides which on the edge of the coating were priority dissolved, and the corrosion products would block the pores and inhibit the corrosion process. The protection performance of the coating was weaken gradually with the extention of corrosion time.

Key words: NiAl seal coating;superalloy;galvanic corrosion

气路封严技术是影响航空发动机效率和性能的重要因素。研究发现,在比燃料消耗率下,叶片和密封面间的间隙降低,能导致推力改进 2.5%^[1]。目前采用热喷涂技术在涡轮机和压气机的机匣上制备封严涂层,与叶片叶尖形成一对可磨耗密封摩擦副,封闭气体通道,减小间隙,即可改善飞机燃气轮机中旋转和固定部件之间的密封性,从而提高热效率,显著增加发动机的性能^[2-6]。封严涂层等涂层系统已成为提高发动机工作效率、延长发动机服役寿命的最主要方法之一。

理想的封严涂层要求抗冲蚀性好、热稳定性强、摩擦因数小、抗氧化性强、结合强度高^[7-13]。这样将其用于叶尖与机匣之间封严时,才能保持它们之间最小间隙的同时有效阻止刮擦损伤,达到良好的封严效果。过去 10 多年间,对封严涂层在航空发动机关键零部件的高温防护等性能进行了大量研究,在新一代航空发动机中,封严涂层的使用温度不断升高^[14-16]。可磨耗封严涂层在苛刻的条件下使用,为了满足性能,大多数可磨耗封严涂层通常为混合金属材料,含有金属相、自

润滑的非金属相和一定数量的孔洞^[17],这就为腐蚀介质的渗透提供了通道。因此近年来,对封严涂层耐腐蚀性能方面又提出了新的要求,对其腐蚀行为的研究逐渐成为当前热点^[18-20]。目前,在镍基高温合金高温合金上使用较多的封严涂层材料为 NiAl 涂层,其制备工艺、使用性能等均较同类涂层具有一定的优势^[21]。

本工作采用等离子喷涂工艺在高温合金基体上制备了 NiAl 封严涂层,研究了高温合金与 NiAl 涂层之间的电偶腐蚀行为,并结合极化曲线、开路电位-时间曲线、SEM 形貌检测,分析了腐蚀现象。

表 1 高温合金化学成分

Table 1 Chemical composition of superalloy

Element	C	Cr	S	P	Al	Ti	Co	Mn	Nb	Mo	Ta	Ni	Si	Fe
Mass fraction/%	≤0.024	18.2-18.4	≤0.0005	≤0.006	≤0.5	0.95-1.0	0.3-0.4	≤0.05	5.1-5.35	2.5-2.97	≤0.02	50.0-52.0	≤0.1	Bal

表 2 等离子喷涂参数

Table 2 Technic parameters of plasma spraying

Main gas		Second gas		Current/A	Voltage/V
Pressure/MPa	Flow/(m ³ ·h ⁻¹)	Pressure/MPa	Flow/(m ³ ·h ⁻¹)		
0.68-0.89	3.26-4.11	0.12-0.32	0.48-0.62	500-550	65-85

1.2 电偶腐蚀实验

采用金刚石刀将制备的 NiAl 封严涂层从基体上剥离,用于电偶腐蚀测试。

电偶腐蚀测试采用 CS300UA 电化学测试系统。电解液为蒸馏水配制的 5%NaCl 溶液,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,被测试样为工作电极,环境温度为 15~25℃。

测试高温合金基体与剥离的 NiAl 涂层组成电偶对的电偶电流/电偶电位-时间曲线。测试前采用丙酮清洗试样表面,干燥后待用。实验前分别采用石蜡对偶对两平板试样进行封闭,保证暴露在电解液中的面积为 6cm²,偶对间距为 5mm。实验前分别测定两偶对材料在电解液中浸渍 0.5h 后的开路电位,判定电偶对的极性,确定电偶电流的方向。实验过程中记录电偶电位/电偶电流-时间曲线。实验后分别测量电偶对阴、阳极的开路电位和电偶电位。测试时间为 20h。

电偶腐蚀实验之后,采用 S-3400 型扫描电镜(SEM)及能谱仪(EDS)对试样表面形貌及成分进行检测。

1.3 极化曲线和开路电位测试

采用极化曲线和开路电位法评价材料的腐蚀趋势,用以辅助分析电偶腐蚀。采用上海辰华仪器公司的 CHI650B 电化学工作站,电解液为蒸馏水配制的

1 实验

1.1 实验材料及制备

基体材料为高温合金,规格为 40mm×20mm×2.5mm,其成分见表 1。NiAl 涂层所用粉料成分如下: Ni93%,Al4.1%,其他 1.0%,有机物≤2.5%。采用丙酮擦拭基体试样以清洁表面油污,然后采用 20~80 目白刚玉砂进行喷砂处理,以获得粗糙的表面,使涂层具有更好的附着力。采用等离子喷涂工艺制备 NiAl 封严涂层,喷涂厚度约为 0.1mm,喷涂参数详见表 2。

5%NaCl 溶液,采用三电极体系,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,铂电极为辅助电极,被测试样为工作电极。实验温度为 15~25℃。极化曲线测试的扫描速率为 2mV/s,开路电位的测试时间为 750min。

测试组成电偶对的高温合金基体和 NiAl 涂层电偶腐蚀前后的极化曲线,分析其腐蚀变化情况。测试原始的高温合金基体、NiAl 涂层的开路电位。

2 结果与讨论

2.1 高温合金基体/NiAl 涂层电偶腐蚀

图 1 及表 3 为实验测得的高温合金基体/NiAl 涂层组成电偶对的电偶电位/电偶电流-时间关系曲线及数据。高温合金基体与 NiAl 封严涂层在进行电偶腐蚀实验前开路电位差约 500mV,其中 NiAl 涂层的开路电位为-743mV,作为偶对中的阳极而加速腐蚀,高温合金的开路电位为-247mV,作为偶对中的阴极。在实验测试周期内,高温合金基体与 NiAl 封严涂层偶对的电偶电流值一直保持为正值,且波动比较小,基本维持在 100~150μA 范围内,这说明随着腐蚀时间增长,NiAl 涂层的腐蚀速率变化不大。实验后, NiAl 涂层的开路电位为-566mV,高温合金的开路电位为-328mV。实验测得的电偶电流密度值为 2.1356μA/cm²。

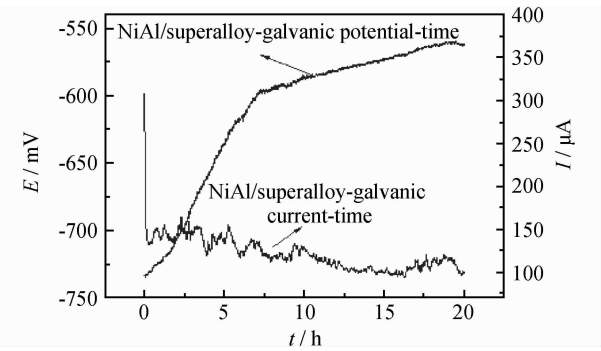


图 1 高温合金基体/NiAl 涂层电偶电位/电偶电流-时间曲线
Fig. 1 Curves of galvanic potential/galvanic current with time for the NiAl coating coupled/superalloy substrate

电偶电位差是影响电偶腐蚀的因素之一,由图 1 和表 3 结果可以得出,电偶电流的降低可能是由于电偶电位差降低引起的。在电偶腐蚀行为上,电偶电流-时间曲线出现反复振荡,这一方面是由于 NiAl 涂层中元素铝的电极电位低,在 NiAl 涂层表面容易优先发生腐蚀溶解,导致 NiAl 涂层表面状态不断变化,造成电偶电流波动;另一方面,在电偶电位的作用下,阳极 NiAl 涂层由于加速腐蚀,其表面很快形成很薄的腐蚀产物膜,堵塞涂层的部分孔隙,同时这层膜很容易被腐蚀介质中活性较强的 Cl^- 穿透,渗透到 NiAl 涂层的孔隙中,并在溶液中含有氧的情况下,在电偶电位的作用下,促进产生点蚀。同时由于 NiAl 涂层的不断

表 3 电偶腐蚀实验数据

Table 3 Experiment data of galvanic corrosion

Galvanic couple		Corrosion potential/mV				Galvanic current density/ density/ ($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Galvanic potential/mV	Corrosion grade
		Before test		After test				
Anode	Cathode	Anode	Cathode	Anode	Cathode			
NiAl	Superalloy	−743	−247	−566	−328	2.1356	−562	C

腐蚀而使表面腐蚀产物膜增厚,这层膜的溶解与形成一对相反过程,也会引起电偶电流的波动。

从图 1 的电偶电位-时间关系曲线可以看出,电偶电位随测试时间的延长逐渐增加,其变化范围为 $-740 \sim -560\text{mV}$ 。在 $0 \sim 7\text{h}$ 内,电偶电位从 -740mV 增加到 -500mV ,随时间变化的速率较快。在 8h 直至实验结束,电偶电位的增加幅度非常小,只有几十毫伏,

导致腐蚀电位上升缓慢的原因是,NiAl 涂层表面腐蚀产物膜厚度增加到一定程度,膜层电阻相对腐蚀之前更稳定,因此腐蚀电位变化甚微。

2.2 电偶腐蚀前后表面形貌

图 2 为高温合金基体/NiAl 涂层电偶腐蚀前后作为阳极的 NiAl 涂层的 SEM 形貌及 EDS 能谱。原始的热喷涂 NiAl 涂层组成元素分布不均匀,含有较多

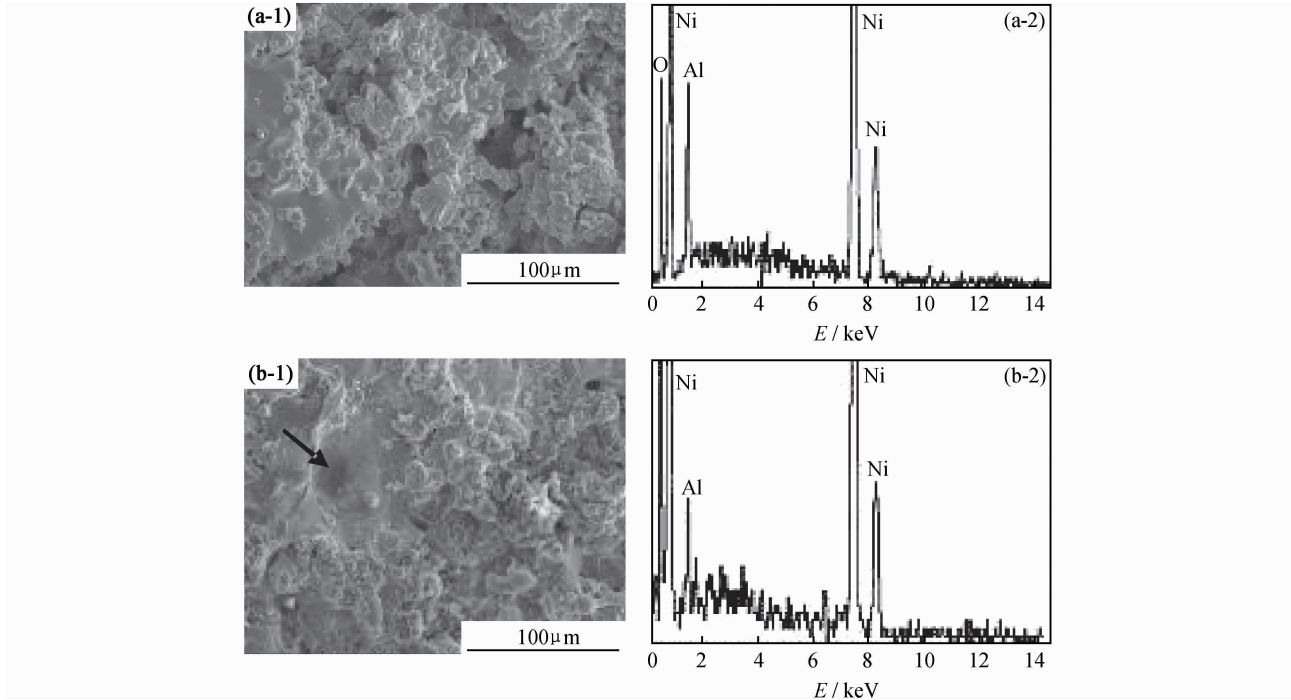


图 2 电偶腐蚀 20h 前后 NiAl 涂层的 SEM(1)及 EDS(2)分析 (a)腐蚀前;(b)腐蚀后

Fig. 2 SEM(1) and EDS analysis(2) of NiAl coating before and after 20h galvanic corrosion test (a) before corrosion;(b) after corrosion

孔洞和夹杂氧化物,它们对于涂层的腐蚀现象具有重要作用。电偶腐蚀后 NiAl 涂层表面有明显的腐蚀现象,如图 2(b-1)箭头所示的区域发生了严重的点蚀破坏,涂层表面腐蚀产物松散如絮状分布,其结合性较差。

2.3 封严涂层截面形貌

图 3 为高温合金基体上 NiAl 封严涂层的截面形貌以及不同区域的能谱图。从图 3 中可以清晰地看出其含有较多的孔隙和氧化物。氧化物是在等离子喷涂过程中,没有完全与空气隔绝,部分粉末颗粒与周围空

气接触形成的^[18]。

封严涂层本身所存在组织缺陷,如孔隙、氧化物等,这些缺陷产生于喷涂过程中或喷涂后。孔洞是封严涂层所特有的,用于提高封严涂层在使用过程中的可磨耗性和润滑性能。高孔隙率使得 NiAl 涂层与电解质溶液接触面积增大,并且成为腐蚀介质的渗透通道,在含有 Cl⁻ 的腐蚀性环境中,活性很强的 Cl⁻ 通过涂层中的孔隙进入到涂层内部,并且在溶解氧情况下,促进腐蚀的发生与发展。

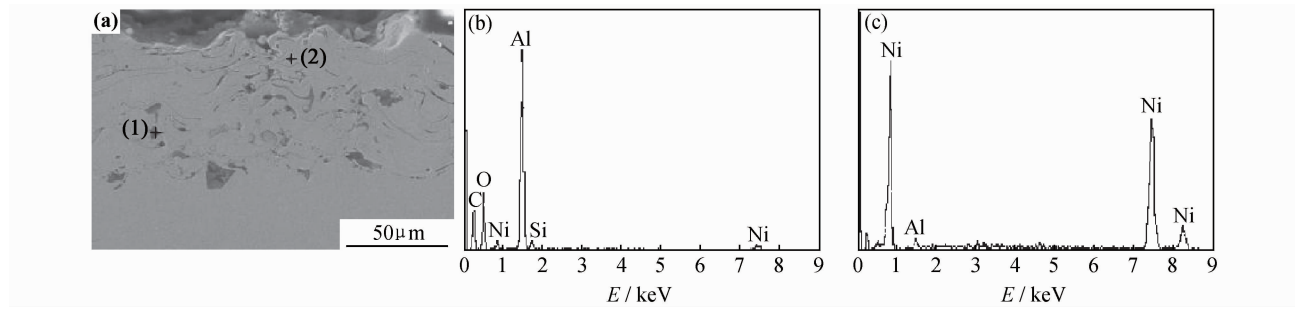


图 3 NiAl 涂层截面的 SEM 形貌及 EDS 能谱图
(a)截面形貌;(b)缺陷处(1)的 EDS 能谱;(c)涂层(2)的 EDS 能谱
Fig. 3 SEM and EDS of cross section for NiAl coating
(a)cross section morphology;(b)EDS of the coating defect(1);(c)EDS of the coating(2)

NiAl 涂层中氧化物分布不均匀,缺少氧化物覆盖的区域更容易受到腐蚀介质的破坏。腐蚀介质容易从涂层边缘渗入,因此 NiAl 涂层边缘的氧化物容易优先溶解,在涂层表面形成一个吸附层,堵塞涂层微孔,阻碍了腐蚀介质向涂层内部的迁移运动,在一定程度上具有抑制腐蚀的作用。随着腐蚀时间延长,NiAl 涂层的防护性能逐渐减弱。

2.4 开路电位-时间曲线和极化曲线

图 4 为高温合金基体和 NiAl 封严涂层的开路电位随时间变化关系曲线。由开路电位变化趋势可知,NiAl 涂层的开路电位始终低于高温合金基体。这也预言了二者组成电偶对时,NiAl 涂层作为阳极优先发生溶解,金属基体高温合金作为阴极,其腐蚀过程将受到抑制,电偶电流的流动方向是从 NiAl 涂层流向高温合金基体。随腐蚀时间的延长,NiAl 涂层开路电位起初呈现上升趋势,这与 NiAl 涂层表面活性的改变有关,电解液渗入涂层内部后,涂层表面发生腐蚀形成一层稳定的腐蚀产物膜,导致其开路电位逐渐增加,6.9h 后开路电位达到稳定状态。高温合金的开路电位波动较小,表明其表面状态十分稳定,耐蚀性很好。

极化曲线可以用来预测不同材料偶接后各自的腐蚀倾向。图 5 及表 4 为原始的高温合金基体和 NiAl 涂层的极化曲线测试结果。可以看出,高温合金的阳

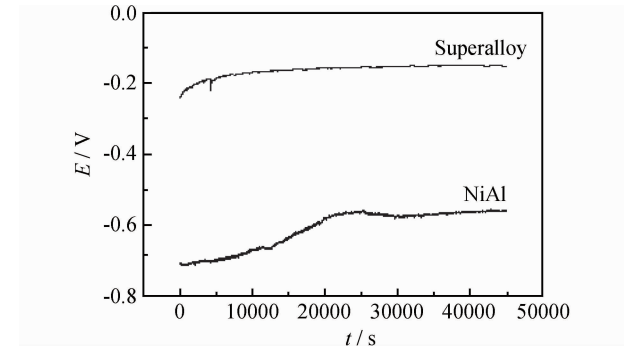


图 4 高温合金基体与 NiAl 涂层在 5%NaCl 溶液中的开路电位-时间曲线
Fig. 4 Open-circuit potential of superalloy substrate and NiAl coating in 5% NaCl solution

极区塔菲尔斜率很大,表明其在 NaCl 溶液中有很强的钝化能力。NiAl 涂层的自腐蚀电位低于高温合金基体,进一步验证了二者偶接发生电偶腐蚀时 NiAl 涂层作为阳极,对高温合金基体起到保护作用。

3 结论

(1)高温合金基体与 NiAl 涂层偶接时,NiAl 涂层作为电偶对的阳极优先发生腐蚀,电偶电流密度值为 2.1356 μ A/cm²。在电偶电位作用下,NiAl 涂层发生

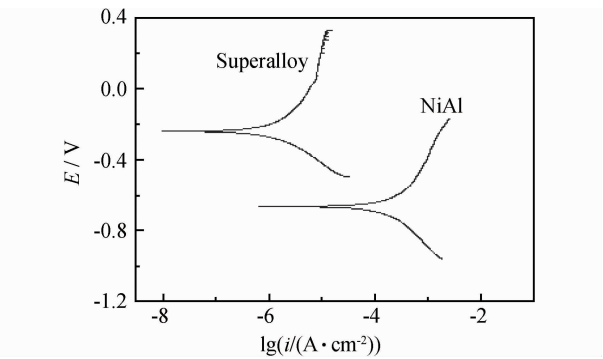


图5 高温合金基体及 NiAl 涂层的极化曲线
Fig.5 Polarization curves of superalloy substrate and NiAl coating

表 4 原始基体及相关封严涂层的电化学参数
Table 4 Electrochemical parameters for the original substrates and related seal coatings

Sample	Equilibrium potential E/V	Corrosion current i/A	Polarization resistance R/Ω
Superalloy	-0.240	1.108×10^{-6}	35475.7
NiAl	-0.685	1.718×10^{-4}	256.6

了严重的点蚀破坏,腐蚀产物松散如絮状分布在涂层表面。

(2)开路电位-时间曲线测试表明,NiAl 涂层开路电位始终低于高温合金基体。极化曲线测试表明,NiAl 涂层的耐蚀性低于高温合金基体。均证实了二者偶接时,NiAl 涂层作为阳极,对高温合金起到保护作用。

(3)NiAl 涂层含有较多的孔隙和氧化物。高孔隙率增大了 NiAl 涂层与电解质溶液的接触面积,并且成为腐蚀介质的渗透通道。在含有 Cl⁻ 的腐蚀性环境中,并且有溶解氧存在的情况下,促进腐蚀的发生与发展。

(4)NiAl 涂层中氧化物分布不均匀,电偶腐蚀过程中,涂层表面缺少氧化物覆盖的区域更容易受到腐蚀介质的攻击破坏。NiAl 涂层边缘的氧化物优先溶解,形成腐蚀产物膜,堵塞涂层微孔,抑制腐蚀的进行。随着腐蚀时间延长,NiAl 涂层的防护性能逐渐减弱。NiAl 涂层表面的腐蚀产物膜对腐蚀过程有很大影响。

参考文献

[1] WANG Hou-gong. Criteria for analysis of abradable coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 79(1-3): 71-75.
[2] 陈礼顺,王彦岭,卢建红,等. 航空发动机封严技术的研究和应用进展[J]. 航空制造技术, 2008,(8): 82-84.
CHEN Li-Shun, WANG Yan-ling, LU Jian-hong, et al. Development of study and application of aeroengine sealing technology

[J]. Aeronautic Manufacturing Technology, 2008,(8): 82-84.
[3] FARAOUN H I, GROSDIDIER T, SEICHEPINE J L, et al. Improvement of thermally sprayed abradable coating by micro-structure control[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 2303-2312.
[4] 朱佳,冀晓鹏,揭晓武,等. 封严涂层材料及应用[J]. 材料开发与应用, 2008, 23(4): 78-84.
ZHU Jia, JI Xiao-juan, JIE Xiao-wu, et al. Sealing coatings: materials and application [J]. Development and Application of Materials, 2008, 23(4): 78-84.
[5] 尹春雷,陈美英,占佳,等. 可磨耗封严涂层研究进展[J]. 航空制造技术, 2008,(20): 92-94. .
YIN Chun-lei, CHEN Mei-ying, ZHAN Jia, et al. Development progress of abradable seal coatings[J]. Aeronautic Manufacturing Technology, 2008,(20): 92-94.
[6] 朱利群,刘孟兰,王建华,等. 飞机发动机封严涂层的研究[J]. 航空学报, 2000, 21(增刊 1): 85-89.
ZHU Li-qun, LIU Meng-lan, WAN Jian-hua, et al. Study of the abradable seal coating used in aircraft engine [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica , 2000, 21(S1): 85-89.
[7] 易茂中,张先龙,郑济宏,等. 可磨耗封严涂层及其性能评价[J]. 航空工艺技术, 1998,(3): 3-5.
YI Mao-zhong, ZHANG Xian-long, ZHENG Ji-hong, et al. Development of abradable seal coating and their performance evaluation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1998,(3):3-5.
[8] MA Xiao, MATTHEWS A. Investigation of abradable seal coating performance using scratch testing [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202(4-7): 1214-1220.
[9] 侯伟鹭,沈婕,魏伟,等. 一种可磨耗封严涂层制备及性能研究[J]. 热喷涂技术, 2010, 2(2): 37-41.
HOU Wei-ao, SHEN Jie, WEI Wei, et al. Preparation and property study of flame sprayed an abradable sealing coating [J]. Thermal Spray Technology, 2010, 2(2): 37-41.
[10] 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:冶炼部分, 2006,(增刊 1): 96-99.
TIAN Ye, ZHANG Shu-ting, MA Jiang-hong, et al. Development and application of abradable sealing coating[J]. Nonferrous Metal (Smelt part), 2006,(S1): 96-99.
[11] 易茂中,张先龙,胡奈赛. 冲击刮削法评价封严涂层的可磨耗性[J]. 航空学报, 1999, 20(3): 249-253.
YI Mao-zhong, ZHANG Xian-long, HU Nai-sai. Abradability evaluation of seal coating by impactscrapping test machine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1999, 20(3): 249-253.
[12] MA Xiao, MATTHEWS A. Evaluation of abradable seal coating mechanical properties[J]. Wear, 2009, 267(9-10): 1501-1510.
[13] YI Mao-zhong, HE Jia-wen, HUANG Bai-yun, et al. Abradability evaluation and tribological behaviour of abradable seal coating[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(3): 459-467.
[14] SCHMID K, RANGASWAMY S. Abradable seal coatings from ambient to 1350℃ [A]. Proceedings of ITSC 95 [C]. Kobe: 1995.1023-1026.

- CAI Z B, GAO S S, HE L P, et al. Torsional fretting characteristics of ploy methyl methacrylate[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(1): 96-100.
- [6] 蔡振兵, 朱旻昊, 张强, 等. 钢-钢接触的扭动微动磨损氧化行为研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 86-90.
- CAI Z B, ZHU M H, ZHANG Q, et al. Oxidation behaviors of steel-to-steel contact under torsional fretting wear[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 86-90.
- [7] 蔡振兵. 扭动微动磨损机理研究[D]. 成都: 西南交通大学博士学位论文, 2009.
- [8] ZHU M H, ZHOU Z R. An investigation of molybdenum disulfide bonded solid lubricant coatings in fretting conditions [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 141(2-3): 240-245.
- [9] 朱旻昊, 徐进, 周仲荣. 抗微动损伤的表面工程设计[J]. 中国表面工程, 2007, 20(6): 5-10.
- ZHU M H, XU J, ZHOU Z R. Alleviating fretting damages through surface engineering design [J]. China Surface Engineering, 2007, 20(6): 5-10.
- [10] 徐桂珍, 刘家浚, 周仲荣. 表面改性技术在微动摩擦学领域中的应用[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(6): 185-190.
- XU G Z, LIU J J, ZHOU Z R. Application of surface modification technology in fretting tribology[J]. Tribology, 1998, 18(6): 185-190.
- [11] YUE W, GAO X C, LIU Y D, et al. Tribological properties of sulfurized-nitrided layer prepared by a two-step method [J]. Vacuum, 2011, 85: 1011-1016.
- [12] ZHANG N, ZHUANG D M, LIU J J. Tribological behaviors of steel surfaces treated with ion sulphurization duplex processes [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203: 3173-3177.
- [13] 江志华, 佟小军, 孙枫, 等. 复合化学热处理 13Cr4Mo4Ni4VA 钢摩擦磨损性能研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(4): 39-44.
- JIANG Zhi-hua, TONG Xiao-jun, SUN Feng, et al. Investigation of sliding wear characteristics of vacuum-carburized, duplex-hardened and plasma-sulfurized 13Cr4Mo4Ni4VA steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(4): 39-44.
- [14] 王海斗, 庄大明, 王昆林, 等. 低温离子渗硫层的干摩擦学性能对比研究[J]. 材料热处理学报, 2002, 23(4): 30-34.
- WANG H D, ZHUANG D M, WANG K L, et al. A comparative study on wear-resistance of ion sulfide layers of different steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2002, 23(4): 30-34.
- [15] 张宁, 庄大明, 王燕华, 等. 低温离子渗硫层的结构和减摩性能[J]. 材料研究学报, 2000, 14(1): 61-65.
- ZHANG N, ZHUANG D M, WANG Y H, et al. Structure and friction-reducing property of low temperature ion sulphurization layer [J]. Chinese Journal of Material Research, 2000, 14(1): 61-65.
- [16] 张宁, 庄大明, 王燕华, 等. 低温离子渗硫层的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(4): 348-353.
- ZHANG N, ZHUANG D M, WANG Y H, et al. A study on the tribological properties of sulfide layer produced by ion sulphurization[J]. Tribology, 1999, 19(4): 348-353.
- 基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51025519, 51005192); 长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1178)
- 收稿日期:**2012-04-14; **修订日期:**2012-12-26
- 作者简介:**顾和根(1986—), 男, 硕士, 现从事高速铁路材料摩擦学行为研究, 联系地址: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所(610031), E-mail: guhegen@126.com
- 通讯作者:**朱旻昊(1988—), 男, 教授, 博导, 主要从事表面工程及摩擦学研究, 联系地址: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所(610031), E-mail: zhuminhao@swjtu.cn
- *****
- (上接第 65 页)
- [15] 王薇, 张琦, 黄子勋. 发动机封严涂层的研究进展[J]. 航空制造工程, 1996, (11): 3-4.
- WANG Wei, ZHANG Qi, HUANG Zi-xun, Development progress of engine abradable seal coatings[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 1996, (11): 3-4.
- [16] 王磊, 马江虹, 史凤岭. 高温封严涂层的研究进展[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2008, (增刊 1): 10-12.
- WANG Lei, MA Jiang-hong, SHI Feng-ling, Research progresses of high-temperature seal coating [J]. Nonferrous Metal (Smelt part), 2008, (S1): 10-12.
- [17] 杨晓剑, 田晔, 黄新春, 等. 火焰喷涂镍/石墨可磨耗封严涂层的研究[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2008, (增刊 1): 92-94.
- YANG Xiao-jian, TIAN Ye, HUANG Xin-chun, et al. The study of Ni/C abradable seal coatings by flame spraying[J]. Nonferrous Metal Smelt part, 2008, (S1): 92-94.
- [18] XU Cun-guan, DU Ling-zhong, YANG Bin, et al. The effect of Al content on the galvanic corrosion behaviour of coupled Ni/graphite and Ni-Al coatings[J]. Corrosion Science, 2011, 53(6): 2066-2074.
- [19] 许存官, 杜令忠, 张伟刚 等. Ni/石墨封严涂层的盐雾腐蚀研究[J]. 航空材料学报, 2010, 30(4): 53-58.
- XU Cun-guan, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang, et al. Salt spray corrosion of Ni/Graphite abradable sealing coatings[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(4): 53-58.
- [20] 王璐. 热喷涂技术在先进航空发动机上的应用及前景展望[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2008, (增刊 1): 7-9.
- WANG Lu. Application and prospect of thermal spray technology in advanced aero engines[J]. Nonferrous Metal (Smelt part), 2008, (S1): 7-9.
- [21] GOWARD G W. Progress in coatings for gas turbine airfoils[J]. Surface and Coating Technology, 1998, 108-109: 73-79.
- 收稿日期:**2012-02-15; **修订日期:**2012-11-26
- 作者简介:**孙杰(1971—), 男, 教授, 博士, 从事腐蚀科学与防护新技术研究、耐热耐磨特种涂层研究等, 联系地址: 沈阳市浑南新区南屏中路 6 号, 沈阳理工大学环境与化工学院(110159), E-mail: jiersun2000@yahoo.com.cn