

Al 涂层修复对 DD5 合金性能的影响

蔡妍, 李建平, 汤智慧, 牟仁德

(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)

摘要: **目的** 研究 Al 涂层修复对 DD5 合金性能的影响。**方法** 采用化学气相沉积技术 (CVD) 在二代单晶镍基高温合金 DD5 上制备了 Al 涂层, 通过化学方法完全退除基体上的涂层, 采用 HB 5258 进行 1100 °C 热冲击试验, 通过试验过程中试样质量变化来评价涂层的热态结合力, 并且通过高温持久、高温瞬时拉伸等力学实验来评价涂层退除再涂覆后对基体合金的力学性能的影响, 通过扫描电镜 (SEM) 分析涂层退除前后表面形貌。**结果** DD5 合金试样和 Al 涂层试样在退除溶液中退除 60 min 后, 涂层/合金界面微观组织形貌、成分基本不变; 退除再涂覆后 Al 涂层在“空冷”条件下进行 1100 °C 试验, 热冲击次数大于 2000 次, 涂层试样表面没有出现明显的涂层剥落; 涂层退除再涂覆对合金的力学性能不造成明显影响。**结论** Al 涂层修复对 Al 涂层和 DD5 合金性能基本无影响。

关键词: Al 涂层; CVD; DD5 合金; 退除工艺; 化学法

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.11.017

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)11-0108-06

Effect of Al Coating Repair on Properties of DD5 Alloy

CAI Yan, LI Jian-ping, TANG Zhi-hui, MU Ren-de

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, Beijing Institute of Aeronautical Materials, AECC, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: The work aims to observe the effect of Al coating repair on properties of DD5 alloy. Al coatings were deposited on the DD5 single crystal alloy substrate by CVD. The coatings on the substrate were fully removed via chemical methods. The high temperature thermal shock test was carried out at 1100 °C through HB 5258. The thermal adhesion of coatings was assessed through mass change during test. Through mechanical experiments such as high-temperature durability and high-temperature instantaneous tension, the influence of coating removal and recoating on the mechanical properties of substrate alloy was evaluated. The coatings before and after removal were characterized by scanning electron microscopy. The microstructure and elements at Al coating/DD5 alloy interface did not change after removal for 60 min in removing solution. The Al coatings after removal and recoating were tested at 1100 °C under the condition of “air cooling”, and when the thermal shock times were more than 2000, there was no obvious coating spalling on the surface of the coating sample. Coating removal and recoating had no obvious influence on the mechanical properties of the alloy. Al coating repair apparently has no effect on properties of DD5 alloy.

收稿日期: 2020-05-12; 修订日期: 2020-06-24

Received: 2020-05-12; Revised: 2020-06-24

基金项目: 财政部稳定支持基础研究项目 (KZ0C190540)

Fund: Basic Research Projects Supported by the Ministry of Finance (KZ0C190540)

作者简介: 蔡妍 (1979—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高温防护涂层制备及评价。

Biography: CAI Yan (1979—), Female, Doctor, Senior engineer, Research focus: preparation and evaluation of high temperature protective coatings.

KEY WORDS: Al coating; CVD; DD5 alloy; removing and recoating; chemical method

涡轮叶片(转子叶片和静止叶片)是航空发动机、地面燃机的关键热端部件,为满足先进发动机对高推重比/高功重比、长寿命的需求,目前世界上先进的发动机涡轮叶片材料,主要为高温抗蠕变、抗氧化抗热腐蚀性能优异的单晶高温合金^[1-2]。DD5 合金为我国自行研制的二代单晶高温合金,作为单晶合金消除了晶界,腐蚀气氛无法沿着晶界进入合金内部,从而延长了使用寿命,加上其本身具有不含稀贵元素、密度小成本低的特点,DD5 合金广泛应用于航空发动机和地面燃机的涡轮叶片(转子叶片和静止叶片)^[3-5]。随着现代燃气轮机发动机涡轮技术的不断发展,要求涡轮部件材料能够在更高的温度下工作,且兼具抗高温氧化和抗热腐蚀性能,为了使 DD5 合金用于涡轮叶片具有更好的综合性能,采用高性能防护涂层是合金在恶劣环境下工作安全可靠的保证^[6-13]。Al 涂层具有很好的抗高温氧化、抗热腐蚀性能,作为航空发动机和地面燃机的涡轮叶片的高温防护涂层,起着非常重要的作用。某航改燃地面燃机叶片采用 DD5 合金,叶片内外表面采用 Al 涂层,该叶片在热腐蚀工作环境下可稳定运行数万甚至上十万小时,装备于某动力装置上,根据设备维护要求,800 h 目检,4000 和 8000 h 内窥镜检查,25 000 h 拆卸大修检查,50000 h 必须更换叶片,叶片上的涂层亟需返修。因此,DD5 单晶合金上 Al 涂层的修复技术在实际应用中,显得至关重要^[14-20]。

本项目采用化学气相沉积工艺(CVD)在 DD5 高温合金上沉积 Al 涂层,采用化学法退除 Al 涂层后采用 CVD 再沉积 Al 涂层,研究 Al 涂层的修复对 Al 涂层防护性能和基体合金 DD5 的力学性能影响,以满足涡轮叶片的实际使用需要。

1 试验

1.1 试样制备

采用单晶镍基高温合金 DD5 作为基体材料,试样尺寸为:30 mm×10 mm×1.5 mm。合金基体采用直径小于 0.154 mm 的刚玉砂进行液体吹砂,用 0.3%~0.5%水基清洗剂溶液进行超声波清洗 20 min,用自来水漂洗,去离子水洗,无水乙醇脱水后吹干,称量。采用 ALUVAP CVA 190BL-Single 型化学气相沉积(CVD)涂层设备在 DD5 合金试样上沉积 30~70 μm 的 Al 涂层,沉积工艺为 1045 °C 下反应 8 h,真空室压力为 0.01~0.03 MPa。涂层试样经过 1050 °C 真空扩散 2 h,涂层厚度为 50 μm 左右。

1.2 涂层退除

配置退除溶液,采用 DW-2 型多功能电动搅拌器搅拌均匀,待溶液中固体成分完全溶解后放置 24 h 待用。用直径为 0.154 mm 的刚玉砂对 DD5 合金试样和带 Al 涂层试样分别进行氧化物去除,最大压力为 0.2 MPa。去除氧化物后的试样用 0.3%~0.5%水基清洗剂溶液进行超声波清洗 20 min、自来水漂洗,无水乙醇脱水后吹干,称量。将经过处理后的 DD5 合金试样和带 Al 涂层试样放入退除溶液中进行涂层退除。退除过程中,退除溶液由开始的透明无色随反应进行逐渐变色,至反应结束,退除溶液完全变成墨绿色甚至黑色时,应该重新配置溶液并进行更换。在退除过程中,合金和带 Al 涂层试样以表面出现微显晶为限度(即试样表面显晶即将试样取出,停止退除),防止出现过腐蚀的现象^[9]。退除后采用热着色法检验涂层是否退除完全。将退除后的试样在 565~595 °C 下加热 1 h,出现蓝色代表涂层退除完成,土黄色或者金黄色代表有涂层残留。若涂层有残留视情将试样再次放入退除溶液中继续进行涂层退除直至涂层退除干净为止。具体的方法流程如下^[7,9-11]:沉积涂层→化学溶液退除→去除腐蚀产物→称量→金相→溶液分析。

1.3 试验方法

采用 FEI-Quanta600 扫描电镜(SEM)分析合金、涂层试样的表面和截面显微组织,同时用 Oxford INCA-X-Sight6427 能谱仪(EDS)检测合金和涂层试样的化学成分。

采用 DC-B/14 热循环/热震试验炉进行抗热冲击试验,评价经过退除再涂覆后带涂层试样的热态结合力,试验参照 HB 5258《钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法》,试验条件为:炉内 1100 °C 保温 5 min,出炉冷却 5 min 为 1 周期,按规定的周期数称量试样质量变化,试样质量增加值<0 时,终止试验。

采用 HB 5150-1996《金属高温拉伸持久试验方法》进行高温持久性能测试,试验条件为 1093 °C/158 MPa,测试试样的持续时间,对比时效后合金和经过退除再涂覆后带涂层试样的高温持久性能。采用 HB 5195-1996《金属高温拉伸试验方法》进行高温瞬时拉伸性能测试,试验条件为 870 °C,测试试样的抗拉强度,对比时效后合金和经过退除再涂覆后带涂层试样的高温持久性能。力学性能试验均以同炉次 DD5 合金试样沉积涂层与未沉积涂层进行同条件测试,确定涂层退除及再涂覆对 DD5 合金的高温持久和高温

拉伸性能的影响。

2 试验结果和讨论

2.1 涂层的退除溶液

表1为退除DD5合金上时效后Al涂层的化学溶液。溶液组分为强酸和酸性盐。本溶液能够退除Al涂层且不损伤单晶合金基体,从合金和涂层在退除溶液中退除后的显微形貌和成分可验证。

表1 退除DD5合金上时效后Al涂层的化学溶液

Tab.1 Chemical removal solution of Al coating on DD5 alloy after aging

Components	Application	Specification
Nitric acid strong acid 1 H ₂ O	DD5 alloy+ Al coatings+ aging behavior	Temperature: 40~50 °C Time: 50~80 min

2.2 合金和涂层在退除溶液中退除后的显微形貌

图1为DD5合金在退除溶液中退除60min后的显微形貌。从图1可见,DD5合金界面平整,没有明显缺陷,说明退除溶液对DD5合金没有明显侵蚀。对界面进行能谱分析,结果见表2。从表2可见,DD5合金在退除溶液中退除60min后,试样的主要元素成分(以质量分数计)为:Al 5.35%,Si 4.11%,Mo 0.85%,Cr 8.92%,Co 8.67%,Ni 72.08%,对照合金手册中DD5合金的元素,Al、Cr等涂层防护元素含量与合金原始态接近,合金元素Mo、Ta、W、Re等没有受到损失,进一步说明退除溶液对DD5合金本身不腐蚀。

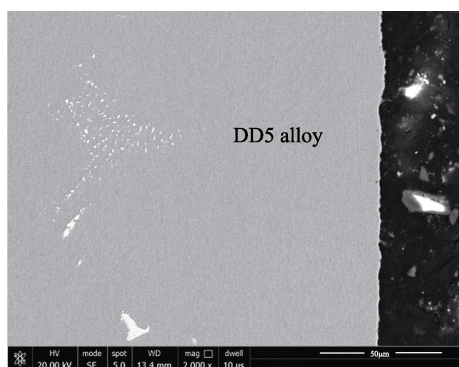


图1 DD5合金试样在退除溶液中退除60min后的截面显微形貌

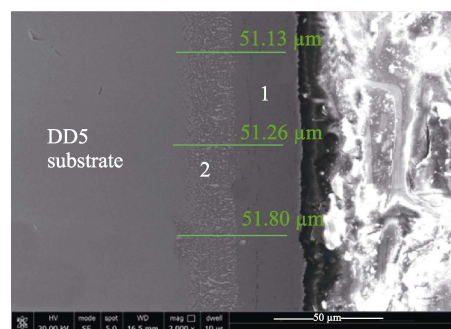
Fig.1 Cross-sectional morphology of DD5 alloy after removal for 60 min in removing solution

表2 合金内部能谱分析结果

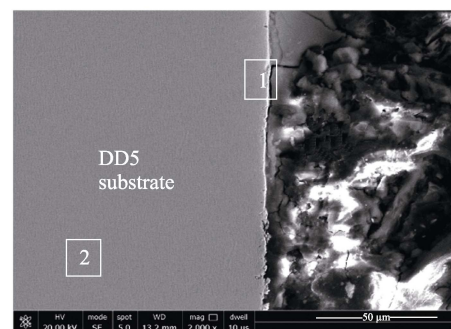
Tab.2 EDS analysis of alloy interior %

Item	Al	Si	Mo	Cr	Co	Ni
Sample	5.35	4.11	0.85	8.92	8.67	72.08

图2a为采用CVD方法在DD5合金上沉积的Al涂层的显微形貌,图2b为在DD5合金上采用CVD沉积Al涂层的试样在退除溶液中退除后的显微形貌。对沉积态Al涂层进行组织结构见图2a和成分分析(见表3),分析结果表明,CVD沉积的Al涂层分为涂层和扩散区两层,涂层总厚度为51.13~51.80 μm;外层铝含量为29.97%,扩散区铝含量为12.79%。对比图2a可见,图2b中DD5+Al涂层试样上的Al涂层已100%退除,涂层的外层和扩散区均被退除溶液完全退除,剩余的涂层/合金界面光滑平整无明显腐蚀坑、孔洞、黑点等腐蚀缺陷,说明退除溶液能够完全退除Al涂层并且对DD5合金没有明显侵蚀。对涂层/合金界面以及合金内部进行能谱分析,结果见表4。从表4可见,涂层/合金界面的主要元素成分(以质量分数计)为:Al 7.50%,Si 17.48%,Cr 9.78%,Co 8.42%,Ni 56.83%,界面处Al、Cr含量与合金试样的Al、Cr含量基本一致;合金内部防护涂层元素Al、Cr含量分别为5.35%和8.92%,与合金原始态中Al、Cr含量基本一致,合金元素Mo、Co等没有受到损失,进一步说明退除溶液能够完全退除Al涂层并且对DD5合金没有明显侵蚀。



a DD5+Al 涂层退除前



b DD5+Al层+60 min退除后

图2 DD5+Al涂层试样在退除溶液中退除60min前后金相

Fig.2 Metallography of DD5+Al coatings before and after removal for 60 min in removing solution: a) DD5+Al coatings before removal; b) DD5+Al coatings after removal for 60 min

2.3 涂层结合强度

涂层与合金的热态结合强度采用冷热冲击方法进行评价,取3个试样(DD5+Al涂层退除/再涂覆后)

表 3 去除前 Al 涂层试样能谱分析结果
Tab.3 EDS analysis of DD5+Al coatings (mass fraction) before removal %

Item	Al	Si	Cr	Co	Mo	Ta	W	Re	Ni
1-Outer layer	29.97	—	—	—	—	—	—	—	70.03
2-Diffusion layer	12.79	2.99	10.16	7.85	1.17	10.58	1.17	5.06	49.40

表 4 去除后 Al 涂层试样内部能谱分析结果
Tab.4 EDS analysis of Al coating interior (mass fraction) after removal %

Item	Al	Si	Cr	Co	Ni
1	7.50	17.48	9.78	8.42	56.83
2	5.32	4.03	9.85	9.79	71.01

开展试验。试验在 1100 °C 条件下进行, 炉内保温 5 min, 出炉空冷 5 min, 按规定的周期数 (100、500、1000、2000 次) 称量试样质量变化, 结果见表 5。表 5 的试验结果表明, 涂层试样历经 100、500、1000、2000 次冷热冲击后, 试样氧化质量增加平均值分别为 0.29、0.30、0.33 和 0.37 mg/cm², 试样质量变化呈现缓慢上升趋势, 涂层表面未见大面积和局部剥落, 从外观观察, 涂层表面完好并且覆盖一层均匀一致的墨绿色氧化膜; 一直到 2016 次, 试样氧化质量增加平均值为 0.40 mg/cm², 仍然处于增重状态, 观察试样外观(如图 3 所示), 涂层没有剥落。综上所述, 涂层在 1100 °C 测试条件下抗热冲击次数大于 2000 次, 达到涂层的热态结合强度要求。



图 3 DD5+Al 涂层去除/再涂覆后 1100 °C 热冲击试验 2016 次外观

Fig.3 Photographs of removed and recoated DD5+Al coatings after 2016 times of thermal shock test at 1100 °C

表 5 DD5+Al 涂层去除/再涂覆后 1100 °C 冷热冲击试验质量变化结果

Tab.5 Results of mass change in removed and recoated DD5+Al coatings after thermal shock tests at 1100 °C

Item	Weight change/(mg·cm ⁻²)				
	100 次	500 次	1000 次	2000 次	2016 次
Sample 1	0.30	0.31	0.32	0.35	0.40
Sample 2	0.29	0.30	0.33	0.38	0.41
Sample 3	0.28	0.29	0.35	0.39	0.40
average	0.29	0.30	0.33	0.37	0.40

2.4 力学性能

表 6 为 DD5 合金+时效与 DD5 合金沉积厚度为 50 μm 的 Al 涂层经过去除/再涂覆试样的 1093 °C/158 MPa 高温持久试验结果。表 7 为 DD5 合金+时效与 DD5 合金沉积 50 μm Al 涂层经过去除/再涂覆试样的 870 °C 高温瞬时拉伸试验结果。

表 6 不同状态试样 1093 °C/158 MPa 持久试验结果
Tab.6 Result of stress rupture test of different samples at 1093 °C/158 MPa

Test condition	Types	Time/h
1093 °C 158 MPa	DD5+aging behavior	22.375
	DD5+Al coating+removing Al coatings+ recoating Al coatings	44.73
	DD5	≥18

表 7 不同状态试样 870 °C 瞬时拉伸试验结果
Tab.7 Result of high temperature tensile test of different samples at 870 °C

Test condition	Types	σ _b /MPa
870 °C	DD5+DD5+aging behavior	968
	DD5+coating+removing and recoating	987
	DD5	768

2.4.1 持久性能

由表 6 的持久试验结果看, 时效后 DD5 合金态试样和 Al 涂层经去除/再涂覆后的试样的持久寿命分别为 22.375 h 和 44.73 h, 均满足合金态试样的持久寿命要求 (≥18 h)。总之, DD5 合金上的 Al 涂层去除及再涂覆基本不影响基体合金 DD5 的高温持久性能。

2.4.2 瞬时拉伸性能

由表 7 的瞬时拉伸试验结果看, 时效后 DD5 合金态试样和 Al 涂层经去除/再涂覆后的试样的抗拉强度 σ_b 分别为 968 和 987 MPa, 可见时效后合金态试样比合金态试样抗拉强度提高了 26%, Al 涂层经去除/再涂覆后的试样比合金态试样抗拉强度提高了 28%。总之, DD5 合金上的 Al 涂层去除及再涂覆基本不影响基体合金 DD5 的高温拉伸性能。

由表 6-7 可知, Al 涂层经化学方法去除后再涂覆, 对 DD5 合金基体的力学性能 (高温持久、高温瞬时拉伸) 无明显影响。

3 结论

1) 退除溶液对 DD5 合金基本不腐蚀。

2) 采用退除溶液退除 DD5 合金上的 Al 涂层, 退除溶液 100%退除 Al 涂层, 并且对 Al 涂层/DD5 合金界面不造成影响。

3) DD5 合金上的 Al 涂层经过退除后再涂覆, 在 1100 °C 热冲击条件下, 经过 2016 次热冲击, Al 涂层依然完整, 与原始涂层抗热冲击性能相近。

4) DD5 合金上的 Al 涂层退除及再涂覆, 基本上不影响基体合金 DD5 的力学性能 (高温持久和高温瞬时拉伸), 满足合金使用要求。

参考文献:

- [1] 胡壮麟, 刘丽荣, 金涛, 等. 镍基单晶高温合金的发展[J]. 航空发动机, 2005, 31(3): 1-7.
HU Zhuang-lin, LIU Li-rong, JIN Tao, et al. Development of Ni-base Single Crystal Superalloys[J]. Aeroengine, 2005, 31(3): 1-7.
- [2] 陈荣章. 单晶高温合金发展现状[J]. 材料工程, 1995(8): 3-12.
CHEN Rong-zhang. Development Status of Single Crystal Superalloys[J]. Journal of Materials Engineering, 1995(8): 3-12.
- [3] 崔仁杰, 黄朝晖. 二代镍基单晶高温合金 DD5 的组织演化和稳定性[J]. 中国有色金属学报(英文版)2016, 26(8): 2079-2085.
CUI Ren-jie, HUANG Zhao-hui. Microstructural Evolution and Stability of Second Generation Single Crystal Nickel-based Superalloy DD5 [J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2016, 26(8): 2079-2085.
- [4] 崔仁杰, 黄朝晖, 张毅鹏等. 980 °C 长期时效对 DD5 镍基单晶高温合金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(6): 38-42.
CUI Ren-jie, HUANG Zhao-hui, ZHANG Yi-peng, et al. Effect of 980 °C Long-term Aging on Microstructure and Properties of DD5 Single Crystal Ni-base Superalloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(6): 38-42.
- [5] WALSTON W S, O' HARA K, ROSS E W, et al. Ren6N6: Third Generation Single Crystal Superalloy [c]. Superalloys 1996, Warrendale: TMS, 1996: 27-34.
- [6] 鲍泽斌, 蒋成洋, 朱圣龙, 等. 高温防护金属涂层的发展及活性元素效应[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 21-31.
BAO Ze-bin, JIANG Cheng-yang, ZHU Sheng-long. High Temperature Protective Bond Coats: Development and Effect of Reactive Element[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(2): 21-31.
- [7] 薛召露, 郭洪波, 官声凯, 等. 新型热障涂层陶瓷隔热层材料[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 10-20.
XUE Zhao-lu, GUO Hong-bo, GONG Sheng-kai et al. Novel Ceramic Materials for Thermal Barrier Coatings [J]. 2018, 38(2): 10-20.
- [8] 张磊, 吴勇, 顿易章, 等. 采用CVD法制备空心叶片内腔铝化物涂层[J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 124-128.
ZHANG Lei, WU Yong, DUN Yi-zhang, et al. Preparation of Aluminide Coatings on Hollow-blade Inner-cavity by CVD Method
- [9] 沈明礼, 朱圣龙. 先进铝化物涂层制备技术进展[J]. 航空制造技术, 2016, (21): 105-109.
SHEN Ming-li, ZHU Sheng-long .Advancement of Technologies for Preparing High-performance Aluminide Coatings.
- [10] 刘培生. 铝化物高温防护涂层现状[J]. 稀有金属材料工程, 2003, 32(9): 681-685.
LIU Pei-sheng. Status of Study on High Temperature Oxidation Law for Aluminide Coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(9): 681-685.
- [11] 姚明明, 蔡英俊, 何业东. 高温防护涂层研究进展[J]. 中国粉体技术, 2005, 11(3): 32-37.
YAO Ming-ming, GOU Ying-jun, He Ye-dong. Research Progress on High Temperature Protection Coatings[J]. China Powder Science and Technology 2005, 11(3): 32-37.
- [12] 王凯, 许振华, 何利民, 等. 钴基高温合金铝化物涂层的高温氧化行为研究[J]. 真空, 2014, 51(1): 37-40
WANG Kai, XU Zhen-hua, He Li-min, et al. High Temperature Oxidation Behavior of Aluminide Coatings on the Cobalt-based Superalloy[J]. Vacuum, 2014, 51(1): 37-40.
- [13] 戴建伟, 易军, 王占考等. 单晶高温合金铂改性铝化物涂层的高温氧化行为[J]. 航空材料学报, 2015, 35(5): 32-38.
DAI Jian-wei, YI Jun, WANG Zhan-kao, et al. High Temperature Oxidation Behavior of Pt Modified Aluminide Coating on Single Crystal Superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(5): 32-38.
- [14] 陶顺衍, 周霞明, 季珩等. W251B11 型燃气轮机叶片高温抗氧化涂层的修复与使用[J]. 航空制造技术, 2008, 4: 426-428.
TAO Shun-yan, ZHOU Xia-ming, JI Hang, et al. Recoating and Application of Heat Resistance and Oxidation Resistance Coating for W251B11 Gas Turbine Blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 4: 426-428.
- [15] 蔡妍, 陆峰, 李建平. HY3 包覆型涂层修复对 DD3 合金性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008(1): 152-155.
CAI Yan, LI Jian-ping, LU Feng. Effect of Removing and Recoating of HY3 Overlay Coatings on Performance of DZ125 Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008(1): 152-155.
- [16] 孙立. 关于发动机高压涡轮叶片修理[J]. 航空维修与工程, 2015(1): 35.

- SUN Li. Engine Blades Reaping Technological Advancements for Repairs[J]. Aviation maintenance & engineering, 2015(1): 35.
- [17] 蔡妍, 李建平, 陆峰. Cr 对 HY3 包覆型涂层退除的影响[J]. 材料工程, 2006(3).
CAI Yan, LI Jian-ping, LU Feng. The Effect of Cr on Removing the HY3 Overlay Coating[J]. Journal of Materials Engineering, 2006, 3: 33-36.
- [18] 蔡妍, 李建平, 陆峰. 铁粉对 NiCrAlYSi 涂层退除的作用研究[J]. 材料保护, 2006(7): 162-164
CAI Yan, LI Jian-ping, LU Feng. The Effect of Fe on Removing the HY3 Overlay Coating[J]. Materials Protection, 2006, 7: 162-164.
- [19] 王占考, 许振华, 戴建伟等. 铂改性铝化物涂层的高温防护性能研究[J]. 装备环境工程, 2016(3): 76-81.
WANG Zhan-kao, XU Zhen-hua, DAI Jian-wei, et al. High Temperature Anti-oxidation Behavior of Pt Modified Aluminide Coating[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016(3): 76-81.
- [20] 蔡妍, 李建平, 汤智慧, 等. DZ125 合金 HY3 包覆型涂层退除研究[J]. 装备环境工程, 2018(12): 115-119.
CAI Yan, LI Jian-ping, TANG Zhi-hui, et al. The study of removing HY3 Coating on DZ125 Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018(3): 115-119.