

压气机叶片用耐冲刷防腐有机涂层的制备及性能研究

关振威, 李静, 张玉忠, 田泳

(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: **目的** 提高压气机叶片有机涂层的耐冲刷和防腐性能。**方法** 以氨基改性环氧树脂为粘接剂, 通过加入高硬度 Al_2O_3 填料以及其他着色、防锈颜料, 并充分分散, 制备一种具有耐冲刷防腐功能的有机涂层。通过摆杆硬度测试、磨耗测试、冲刷测试、腐蚀测试及其他力学性能测试, 对耐冲刷防腐有机涂层的综合性能进行评价, 对比高硬度 Al_2O_3 填料含量对涂层性能的影响。**结果** 添加高硬度 Al_2O_3 填料, 有效提高了涂层的硬度、耐磨耗性和冲刷性。当添加量为 15% (质量分数) 时, 性能达到最优, 硬度为 0.92, 冲刷失效时间为常温的 475 s 和高温的 385 s, 相比未添加氧化铝时, 性能提高了 300% 以上。进一步添加氧化铝填料将对涂层形貌和粗糙度有较大劣化影响, 硬度和耐冲刷性都相应降低, 但耐磨耗性数据却在不断提高, 涂层的摆杆硬度更能反映真实的耐冲刷能力。研制的耐冲刷有机涂层综合性能优异, 相比渗铝等无机涂层工艺, 该涂层还具有腐蚀防护的特性。**结论** 高硬度 Al_2O_3 填料的加入可以有效提高涂层的耐冲刷能力, 但需控制添加量, 以免影响涂层的粗糙度, 有机耐冲刷涂层的腐蚀防护性能相比传统无机涂层具有明显优势。

关键词: 压气机叶片; 有机涂层; 氨基改性; 耐冲刷; 防腐

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)06-0036-06

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.06.006

Fabrication and Evaluation of an Organic Coating for Anti-scouring and Anti-corrosion Application on Compressor Blades

GUAN Zhen-wei, LI Jing, ZHANG Yu-zhong, TIAN Yong

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: To improve the scouring and corrosion resistance of organic coating on compressor blades, in this paper, hard Al_2O_3 fillers with other coloring and rust-prevent pigments were dispersed in amino modified epoxy resin. Pendulum hardness, abrasion test, scouring test, corrosion display and mechanical test were taken to value the properties of the organic coatings. It shows that the addition with Al_2O_3 fillers was effectively strengthened on hardness, abrasion and scouring resistance, which peaked when amount was 15%wt(mass fraction). Such coating showed 0.92 pendulum hardness, breakdown time of 475 s in room temperature and 385 s in high temperature, and its properties improved by 300% compared with the blank coating. Nevertheless, morphology and roughness were influenced with further addition of Al_2O_3 , thus lowered pen-

收稿日期: 2021-03-08; 修订日期: 2021-04-19

Received: 2021-03-08; Revised: 2021-04-19

作者简介: 关振威 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航空及航空发动机涂料。

Biography: GUAN Zhen-wei (1987—), Male, Master, Engineer, Research focus: aero and aero engine paints.

引文格式: 关振威, 李静, 张玉忠, 等. 压气机叶片用耐冲刷防腐有机涂层的制备及性能研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(6): 036-041.

GUAN Zhen-wei, LI Jing, ZHANG Yu-zhong, et al. Fabrication and evaluation of an organic coating for anti-scouring and anti-corrosion application on compressor blades[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(6): 036-041.

dulum hardness and breakdown time, while abrasion resistance was increasing still. Hence, it is the pendulum hardness of coatings that actual scouring properties relies on rather than conventional abrasive test. The anti-scouring and anti-corrosion organic coatings fabricated achieved good general performance and superior corrosion resistance compared with traditional aluminized inorganic layer.

KEY WORDS: compressor blades; organic coating; amino modify; scouring resistance; corrosion resistance

压气机叶片是航空发动机、燃气轮机等必不可少的重要组成部分。发动机运行过程中，砂石等高硬度颗粒常常被吸入压气机，叶片在经受这些高速砂砾和气流的不 断冲刷下，极易发生磨损失效^[1]。据统计，每年因冲刷失效引起的发动机损失高达 13.4 亿美元^[2]。冲刷磨损是压气机叶片失效的一大关键因素，主要由夹带固体颗粒的气流以一定速率和角度冲击叶片表面形成^[3]。为了避免过度冲刷磨损，通常会在压气机前端加装过滤器以隔离固体颗粒，但过滤器本身不仅影响发动机工作效率，同时还会带来成本和增重等问题，因此真正使用的机型反而较少^[4]。与此同时，海洋（岛礁）环境下服役的压气机还要同时面临高盐高湿环境的腐蚀，对叶片的可靠性提出了严峻的挑战。

在压气机叶片表面涂覆保护层是一种有效对抗冲刷磨损的方法，目前研究较为深入的涂层技术为高弹性涂层和高硬度涂层。高弹性涂层使用具有动能吸收的材料（如弹性聚氨酯、橡胶）作为基本结构，将高速冲刷转换为热能，从而降低叶片的磨损^[5]。其缺点在于与叶片基材的附着力较差，介质屏蔽性不足，以及冲刷后的粗糙表面所引起的气流效率低下^[6]。相对而言，高硬度涂层通过形成坚硬的表面对抗冲刷，具有较高的附着力，冲刷后的表面依然具有较好的气动性。

金属涂层是一类研究较为深入的高硬度耐冲刷涂层。如 PVD 法制备的 TiN 涂层，硬度可达 700 以上^[7-8]，但制得的耐冲刷涂层结构多孔，耐腐蚀性不足^[3]。关于铝合金涂层的研究也较多，如 MCrAlY 和 MCrAlTaY 作为增强相的 Al₂O₃ 涂层，其中 M 为 Ni、Co 和 Fe 等，具有优异的抗冲刷和抗氧化特性^[9]。目前大量应用的涂层主要为渗铝涂层，其硬度和抗冲刷能力已得到普遍验证^[10]。相比需复杂和昂贵制备工艺的金属涂层，有机涂层具有制备工艺简单、涂层去除和修复简便的特性^[11-12]，但达到同等高硬度技术水平的研究较少。另一方面，具有较好防腐性能的有机涂层的使用温度一般在 200 ℃ 以下，能够承受高温烘烤的耐冲刷有机涂层未见报道。文中以常见有机涂层粘接剂环氧树脂出发，引入氨基改性，提高涂层的附着力，通过高硬度无机填料的选择与分散强化涂层硬度，制备了一种具有优异抗冲刷特性的防腐多功能有机涂层。

1 试验

1.1 涂层制备

所用测试基板和压气机叶片成分为 30CrMnSiA 结构钢，化学成分（以质量百分数计）为：C 0.28%~0.34%，Si 0.90%~1.20%，Mn 0.80%~1.10%，Cr 0.80%~1.10%，Fe 余量。基板前处理方法：400 号砂纸打磨后，在丙酮中超声 15 min，60 ℃ 下烘干（5 min）。

原材料：环氧树脂，601，三木化工；聚酰胺固化剂，115，亨斯曼化工；氨基树脂，三木化工；氧化铝，1200 目，隆泰新材料；氧化铁黄，裕诺化工；钛白粉，石原化工；防锈颜料，思坦化工；助剂，BYK；稀释剂，自制。

涂料按配方（见表 1）称取各原材料后，使用高速分散机（BGD 740/1）进行分散，然后使用专用陶瓷腔砂磨机（Dispermat D-51580）进行进一步研磨分散，直至涂料的研磨细度不大于 20 μm，方可出料。按比例称取固化剂，手动搅拌均匀，适当加入稀释剂调节黏度。使用喷枪在基板表面进行空气喷涂，空气压力为 4~6 MPa，喷枪口径为 1.0 mm，交叉喷涂 2 次。闪干 30 min 后，放入 170 ℃ 烘箱中恒温 3 h，取出即可得到涂层试板。

表 1 耐冲刷防腐涂料配方
Tab.1 Formula of anti-scouring and corrosion coatings

Composition	Percentage of content/%			
	A	B	C	D
Epoxy resin	50	50	50	50
Amino resin	10	10	10	10
TiO ₂	7	7	7	7
Iron oxide yellow	1	1	1	1
Al ₂ O ₃	0	10	15	20
Corrosion inhibitors	5	5	5	5
Additives	0.8	0.8	0.8	0.8
Solvent	21.2	11.2	6.2	1.2
Hardener	5	5	5	5

1.2 性能测试

1) 采用 COSSIM CMY-310 光学显微镜观察涂层表面形貌。

2) 采用 BYK Gardner 摆杆硬度仪测试涂层的硬度, 方法为 König 摆, 根据涂层与玻璃的摆动次数相对值表征涂层硬度^[13]。

3) 采用 TABER 5155 磨耗测定仪表征涂层的耐磨性, 使用 CS-10 磨轮, 载质量为 1 kg。每次测试前, 用 400 号砂纸预磨 500 转, 使磨轮平整, 分别称量试样在不同转数磨耗前后的质量^[14]。

4) 采用 FA200DR 自动吹砂机测试涂层的耐冲刷性, 其结构如图 1 所示。试验时, 试样固定于旋转台上, 以一定速度旋转, 冲击颗粒经由加速装置被快速送至喷嘴, 喷向试板表面, 喷砂角度约为 45°, 同时从水平方向不断吹入空气, 将冲击后的沙粒吹离试样表面, 观察试样表面涂层的剥落情况, 从吹砂开始计

时, 记录底材初次露出所需时长。试验参数: 转速为 10 r/min, 风压为 0.35 MPa, 喷嘴距离试板 200 mm, 使用 60 目过筛氧化铝陶瓷颗粒作为冲击颗粒。

5) 采用 HOMMEL W5 粗糙度仪测定涂层表面粗糙度。

6) 采用 Q-FOG 盐雾箱进行涂层防腐性测试, 参照 GB/T 1771—2007《色漆和清漆耐中性盐雾性能的测定》。

7) 参照 GB/T 1731—1993《漆膜柔韧性测定法》测试涂层的柔韧性; 参照 GB/T 1731—1993《漆膜耐冲击测定法》测试涂层的耐冲击性; 参照 GB/T 5210—2006《色漆和清漆拉开法附着力试验》测试涂层与基材的附着力。

2 结果及分析

2.1 涂层形貌

4 组配方涂料喷涂固化后的表面形貌如图 2 所示。可见 A 涂层均较为平整均匀, 存在少量凹坑和缺陷。当引入氧化铝颗粒后, B/C/D 涂层的表面均呈现均匀分布的山峰状不平整形貌, 且随着氧化铝添加量的上升, 这种微不平整程度有劣化的趋势。D 涂层的表面微缺陷尺寸最大, 这与其中添加量高达 20% (质量分数) 的氧化铝颗粒有关。由于树脂含量不足以完全包裹全部固体填料, 致使部分颗粒无法随粘接剂形成流平的涂层形貌。经测试, A/B/C/D 4 种涂层的表面粗糙度 R_a 分别为 0.27、0.29、0.29、0.36 μm 。D 试样呈现最高的粗糙度, 与形貌结果一致。

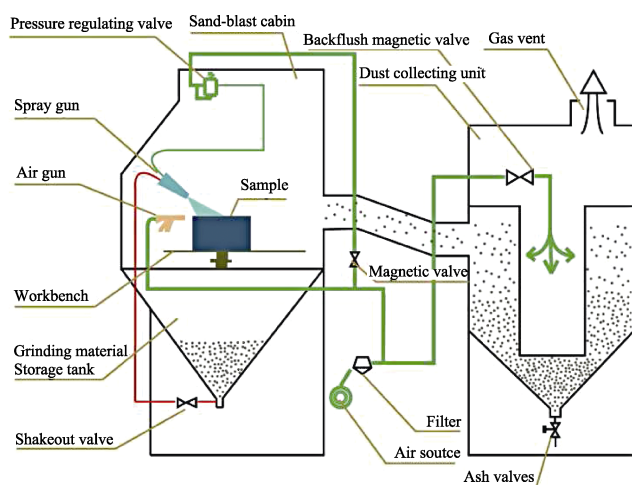


图 1 自动吹砂机结构

Fig.1 Schematic diagram of auto sand-blasting machine

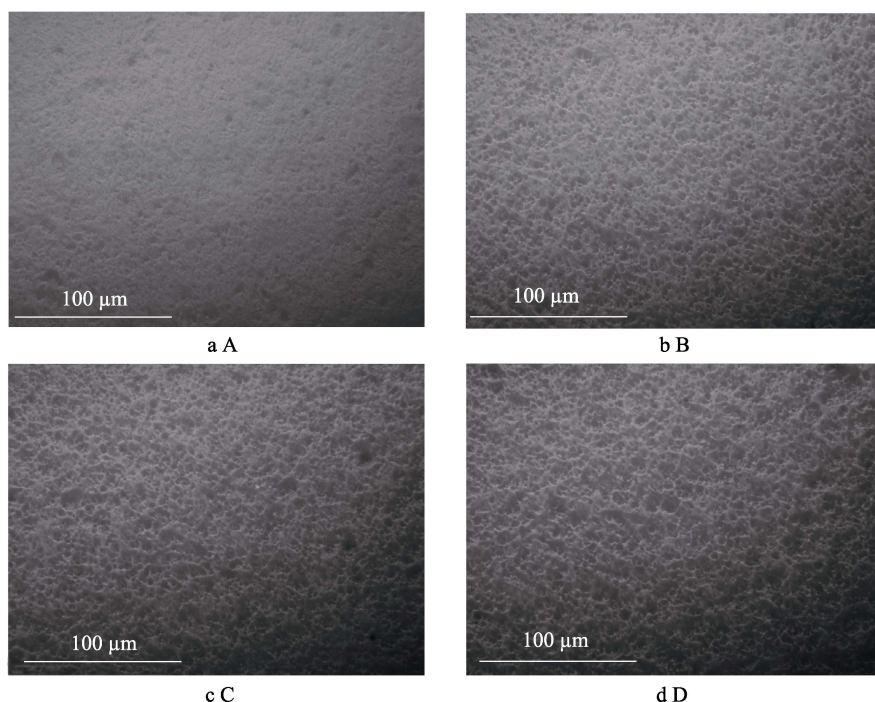


图 2 涂层 A、B、C、D 表面形貌显微镜图

Fig.2 Optical microscope images of coating A/B/C/D

2.2 氧化铝对涂层硬度的影响

使用 BYK Gardner 摆杆硬度计对 4 种涂层的硬度进行评价。由图 3 试验结果可见, A/B/C/D 4 组涂层中, B/C/D 的硬度明显高于 A 组, 这是由于高硬度氧化铝的引入, 涂层的硬度相应得到提高, 而 B/C/D 3 组试样的涂层硬度与氧化铝的添加量并不是正相关。当添加量为 15% 时, 其摆杆硬度达到最高值 0.92, 继续加入氧化铝至 20%, 反而致使硬度降低 (D 组 0.83)。主要原因在于, 摆杆硬度作为一种涂层专用硬度测试方法, 不仅可以宏观表征涂层抵抗硬质外物磨损的能力, 还与有机涂层的表面化学状态有很大关联^[15-16], 因而, 涂层的表面粗糙度会影响摆杆硬度的结果。D 组试样的粗糙度较 B/C 明显降低, 这与涂层形貌的结果相吻合。

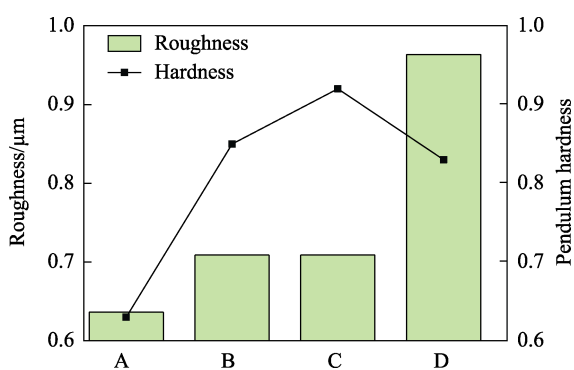


图 3 涂层的摆杆硬度和粗糙度测试结果

Fig.3 Results of pendulum hardness and roughness of coatings

2.3 氧化铝对涂层耐磨性的影响

4 种涂层分别在 500/1000/1500/2000 转磨耗试验后的质量损失曲线如图 4 所示。各组试样的质量都随着磨耗转数的增加而逐渐降低, 表明涂层在与磨轮的滚动摩擦下产生了表面磨损。与摆杆硬度类似, 添加氧化铝的 B/C/D 组试样, 磨耗质量损失明显低于空白组 A。B/C/D 相比, 质量损失由 B 组至 D 组逐渐降

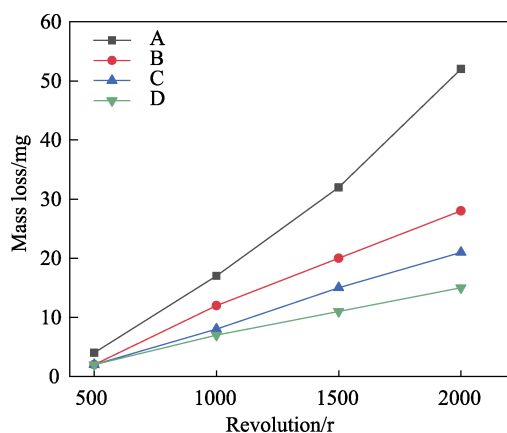


图 4 涂层的磨耗性测试结果

Fig.4 Results of abrasion of coatings

低, 且曲线由 B 组至 D 组逐渐平缓, 即随着磨损次数的不断增加, D 组的抗磨损能力越来越显著。以上结果表明, 随着氧化铝含量的增加, 涂层的抗磨损性能得到了提升。

2.4 氧化铝对涂层耐冲刷性的影响

涂层遭遇实际含硬质颗粒的气流冲刷是复杂的物理过程, 气流速度、角度以及颗粒大小都会影响冲刷的结果。从航空发动机实际工作状态中总结出了相对常见的冲刷参数, 并利用自动吹砂机模拟实际工况。相比常见的落砂试验测试, 该方法可从多角度冲刷试样表面, 气流速度和温度可控, 具有更高的可参考性。

测试中选用相同厚度的 4 种涂层 (60~70 μm), 分别置于自动吹砂机的样品台。在不断冲刷的作用下, 涂层逐渐变薄, 直至完全穿透。记录各涂层失效所需的时长, 并且分别在常温 and 200 °C 高温下进行了试验, 结果如图 5 所示。A 组空白试样在常温下 123 s 失效, 高温下 79 s 即失效, 对抗冲刷性能最差。B/C/D 组中 C 组的失效时间最长, 常温下达 485 s, 高温下为 370 s; B 组和 D 组接近, B 组为常温下的 328 s 和高温下的 266 s; D 组为常温下的 331 s 和高温下的 299 s。相比 A 组耐冲刷结果, C 组的性能提高了 300% 以上。

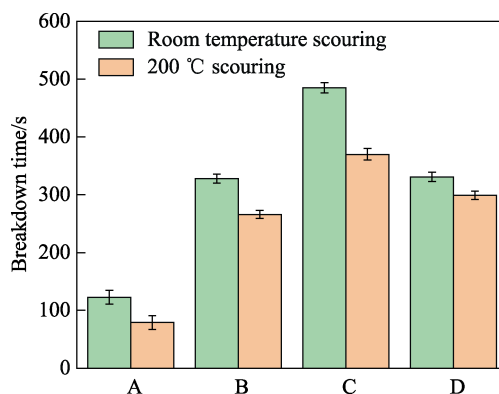


图 5 涂层的耐冲刷性测试结果

Fig.5 Results of scouring of coatings

综合涂层的硬度、耐磨性和耐冲刷性数据可知, B/C/D 3 组的性能变化趋势中, 涂层的耐冲刷性与摆杆硬度较为吻合, 而与耐磨性有所出入。虽然耐磨性可以较大程度上体现涂层对硬质外力的对抗效果, 但其测试主要依据涂层与磨轮间的动摩擦程度进行判定^[17], 很难体现气流在冲刷磨损中的重要作用。另一方面, 摆杆硬度的测试结果很大程度与表面粗糙度吻合, 恰好与耐冲刷能力对涂层气动效率的高要求一致。由此可知, 作为一种非破坏性表征手段, 摆杆硬度可快速验证表面涂层在压气机叶片上的适用性。

2.5 涂层综合性能

以配方 C 为优选配方, 验证了涂层的综合性能 (见表 2)。制备的涂层在具有高硬度的同时, 兼具

1 mm 的高柔韧性和 50 cm 的耐冲击性, 在合金钢表面的附着力高达 36.3 MPa, 且进行 200 h 的 200 °C 高温烘烤后, 涂层无变化, 可靠性优异。综合耐冲刷性测试结果, 该涂层非常适合压气机叶片这类长期处于恶劣工况下的装备应用^[18]。

表 2 耐冲刷防腐涂料性能

Tab.2 Test results of anti-scouring and corrosion coatings

Test item	Results
Color	Yellow, uniform
Gloss	Semi-gloss to Gloss
Flexibility	1 mm
Impact	50 cm
Adhesion	(36.3±2.5) MPa
Pendulum hardness	0.92
Salt Spray	1000 h
Heat resistance/200 °C	200 h

与此同时, 该涂层还可以发挥有机涂层独特的环境保护特性, 耐中性盐雾可达 1000 h, 满足海洋(岛礁)环境下发动机防护材料的需求。试验中选择了已实际应用的渗铝工艺无机镀层作为对照, 分别将 2 种涂层涂覆于同种压气机叶片表面, 在中性盐雾中腐蚀仅 500 h 后, 铝涂层即产生了明显的腐蚀, 而耐冲刷防腐有机涂层则完好未腐蚀, 如图 6 所示。



a 有机涂层



b 无机铝镀层

图 6 叶片耐中性盐雾 500 h 后照片

Fig.6 Images of blades after 500 h salt spray: a) organic coatings; b) aluminum layer

3 结论

1) 加入氧化铝填料对涂层的形貌有直接影响, 粗糙度随添加量下降而降低。

2) 高硬度 Al_2O_3 填料的加入, 可以有效提高涂层的摆杆硬度和耐磨性。摆杆硬度在添加量为 15% 时达到最佳, 耐磨性与氧化铝的添加量正相关。

3) 耐冲刷性与摆杆硬度结果吻合度更高, 即氧化铝的添加为 15% 时, 性能最优, 相比未添加时, 性能提高了 300%。

4) 有机耐冲刷涂层的腐蚀防护性能相比传统渗铝无机镀层具有明显优势。

参考文献:

- [1] 陈文生. MTU 公司开发的侵蚀防护涂层[J]. 航空维修与工程, 2008(6): 34-35.
CHEN Wen-sheng. MTU's erosion prevention coatings [J]. Aviation repair and engineering, 2008(6): 34-35.
- [2] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
SUN Jia-shu. Attrition of metal[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992.
- [3] 徐向阳, 左铁镛, 刘世参, 等. 航空涡轮发动机叶片的表面失效及涂层防护技术[J]. 航空维修与工程, 2000(6): 21-23.
XU Xiang-yang, ZUO Tie-yong, LIU Shi-can, et al. The surface failure and protective coatings technology of blades of gas turbine engines[J]. Aviation engineering and repair, 2000(6): 21-23.
- [4] 陈文生. 直升机发动机压气机的抗侵蚀涂层[J]. 航空维修与工程, 2008(3): 39-40.
CHEN Wen-sheng. Advanced coating protect helicopter engines from compressor erosion[J]. Aviation repair and engineering, 2008(3): 39-40.
- [5] JONES L C. Low angle scouring erosion behaviour of elastomeric materials[J]. Wear, 2011, 271: 1411-1417.
- [6] SAREI R, MARDELJ I, HILLA J. Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries—An overview[J]. Wear, 2001, 250: 1-10.
- [7] ZALNEZHAD E, SARHAN AA D, HAMDI M. Optimizing the PVD TiN thin film coating's parameters on aerospace AL7075-T6 alloy for higher coating hardness and adhesion with better tribological properties of the coating surface[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 64: 281-290.
- [8] 孙刚, 冒昌伟, 陈希亮, 等. 不同微结构 Ti/TiN 多层涂层的抗冲蚀性能研究[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(8): 683-688.
SUN Gang, MAO Chang-wei, CHEN Xi-liang, et al. Erosion Resistance Enhancement of TC11 alloy with Ti/

- TiN multilayers: An experimental study[J]. Chinese journal of vacuum science and technology, 2019, 39(8): 683-688.
- [9] HUO W, SUN H. Advanced coating technology of aviation turbine engine blades[J]. Aerospace science and technology, 2001, 3: 34-36.
- [10] 杨珍, 鲁金涛, 张鹏, 等. Super304H 钢表面铝扩散涂层的组织结构和抗蒸汽氧化性能[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 64-71.
- YANG Zhen, LU Jin-tao, ZHANG Peng, et al. Microstructure and steam oxidation performance of the aluminium diffusion coating on Super304h steel[J]. Surface technology, 2020, 49(1): 64-71.
- [11] ZOUARI B, TOURATIER M. Simulation of organic coating removal by particle impact[J]. Wear, 2002, 235: 488-497.
- [12] PAPINI M, SPELT J K. Organic coating removal by particle impact[J]. Wear, 1997, 213: 185-199.
- [13] ASTM D4366—2014. Standard test methods for hardness of organic coatings by pendulum damping tests[S].
- [14] ASTM D4060—2019. Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the taber abraser[S].
- [15] HERMANNA A, BURRB D, LANDRYA V. Comparative study of the impact of additives against oxygen inhibition on pendulum hardness and abrasion resistance for UV-curable wood finishes[J]. Progress in organic coatings, 2020(148): 105879.
- [16] MA Xiao-yang, QIAO Ze-min, HUANG Zhi-feng, et al. The dependence of pendulum hardness on the thickness of acrylic coating[J]. Journal of coatings technology and research, 2013, 10(3): 433-439.
- [17] SONG K, CHEN D, POLAK R, et al. Enhanced wear resistance of transparent epoxy composite coatings with vertically aligned halloysite nanotubes[J]. ACS applied materials and interfaces, 2016, 8: 35552-35564.
- [18] 何光宇, 李应红, 柴艳, 等. 航空发动机压气机叶片沙尘冲刷防护涂层关键问题综述[J]. 航空学报, 2015, 36(6): 1733-1743.
- HE Guang-yu, LI Ying-hong, CHAI Yan, et al. Review of key issues on coating against sand erosion of aero-engine compressor blade[J]. Chinese journal of aeronautics, 2015, 36(6): 1733-1743.