

TC4 钛合金与多层 TiN/Ti 涂层的砂尘 冲蚀损伤试验

曹鑫, 王冠, 何卫锋, 张翼飞, 何光宇, 杨竹芳

(空军工程大学 航空航天工程学院 等离子体动力学重点实验室, 西安 710038)

摘 要: 建立了砂尘冲蚀试验系统, 采用粒子成像测速方法获得了气体压力和砂尘速度之间的关系, 并在砂尘质量浓度为 28.91 g/m^3 , 速度为 80 m/s , 冲蚀角度为 30° 的条件下, 对 TC4 钛合金和多层 TiN/Ti 涂层进行了冲蚀试验. 结果表明: TC4 钛合金抗冲蚀损伤能力较差, 平均质量损失率达 0.7 mg/min . 多层 TiN/Ti 涂层可承受砂尘冲蚀 200 min 以上, 且 TiN/Ti 调制比为 $1:3$ 涂层的抗冲蚀能力优于调制比为 $1:1$ 的涂层. 砂尘粒子垂直冲击速度分量引起的微区剥落是涂层冲蚀损伤的主要原因, 增加多层涂层韧性是提高其抗冲蚀性能的关键.

关 键 词: 钛合金; 砂尘冲蚀; 损伤; 多层 TiN/Ti 涂层; 质量损失率

中图分类号: V252

文献标志码: A

Sand erosion damage test on TC4 titanium alloy and TiN/Ti multilayer coating

CAO Xin, WANG Guan, HE Wei-feng, ZHANG Yi-fei,
HE Guang-yu, YANG Zhu-fang

(Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory,
Aeronautics and Astronautics Engineering College,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: A sand erosion test system was set up. The relationship between gas pressure and sand particle velocity was obtained by using particle image velocimetry method, and the erosion performance of TC4 titanium alloy and TiN/Ti multilayer coating was tested at the condition of sand concentration 28.91 g/m^3 , sand particle velocity 80 m/s , and impact angle 30° . The results show that, the anti-erosion performance of TC4 titanium alloy is poor with average mass loss rate about 0.7 mg/min . TiN/Ti multilayer coatings can withstand sand erosion more than 200 minutes. TiN/Ti multilayer coating with modulation ratio of $1:3$ is superior to that with the modulation ratio of $1:1$ on the anti-erosion performance. Micro-spalling caused by the vertical impact component of sand particle velocity is the main reason for erosion damage of coating. Therefore, the key to improve anti-erosion performance of multilayer coating is enhancing the toughness.

收稿日期: 2015-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(51405506); 陕西省科学技术研究发展计划(2014K08-26);
陕西省科技统筹创新工程计划(2015KTCQ01-72)

作者简介: 曹鑫(1991—), 男, 江苏泰州人, 硕士生, 主要从事航空发动机压气机叶片抗冲蚀涂层研究.

通讯作者: 何卫锋(1977—), 男, 湖南益阳人, 教授、硕士生导师, 博士, 主要从事航空发动机结构疲劳强度与表面工程技术研究.
E-mail: hehe_coco@163.com

Key words: titanium alloy; sand erosion; damage; TiN/Ti multilayer coating; mass loss rate

飞行器(尤其是直升机)在起降或低空飞行时,尺度约为数 $10\mu\text{m}$ 的不规则细小砂尘不可避免地随气流进入发动机,高速冲击、摩擦发动机工作叶片,引起叶片的冲蚀损伤^[1],如图1。

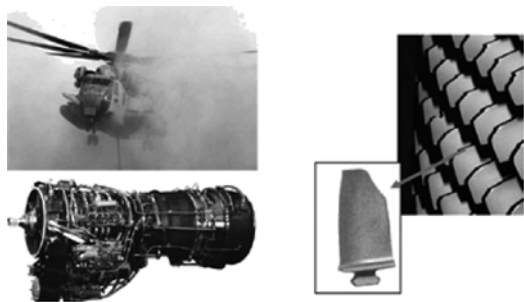


图1 CH-53E直升机的T64涡轴发动机压气机叶片冲蚀损伤

Fig.1 Compressor blade erosion damage of T64 turboshaft engine in CH-53E helicopter

为了降低质量,航空发动机叶片大量采用比强度高、密度较低的钛合金,但是钛合金硬度较低,耐冲击磨损能力较差,砂尘环境下的冲蚀损伤问题非常突出^[2]。美国统计表明,砂尘环境条件下,美军直升机实际使用寿命降低了75%,且耗油率和维修成本大幅提高^[3-4]。2007年,美军发布的一份研究报告中指出:“沙漠风暴”行动中装配CH-53E直升机的T64涡轴发动机,翻修间隔期由原先的450h下降为100h,装配CH-46E直升机的T58涡轴发动机压气机叶片的初始设计寿命为3000h,在沙漠环境下使用的寿命仅为100h。

砂尘冲蚀是粒子对材料冲击和磨损过程的耦合,其机理非常复杂^[5]。研究表明,砂尘的冲蚀角度、速度和质量浓度对材料的冲蚀损伤影响较大^[6-7]。例如,金属材料遭受砂尘小角度冲蚀时,形成犁沟效应,微切削是材料表面主要的磨损机制;当砂尘冲击角度较大时,容易产生微裂纹,在载荷作用下甚至发展成为疲劳源,此时疲劳破坏是主要失效机制^[8-9]。因此,通过在材料表面制备硬度高的涂层是改善叶片抗冲蚀性能的重要手段^[10-12]。

世界各国对抗冲蚀涂层的研究主要集中在陶瓷涂层、WC/Co涂层、ZrN等。近年来,尤其在TiAlN、高分子涂层、超弹性硬质涂层和SiC/SiC涂层深入发展。TiN作为硬质耐磨涂层,具有优良

的力学和摩擦性能,成为抗冲蚀涂层研究的热点,得到了国内外的广泛关注^[13-14]。单层TiN涂层的厚度对涂层结合强度有较大影响,若涂层太薄(小于 $1.5\mu\text{m}$),在外力作用下涂层容易变形剥落;若涂层太厚(大于 $4.7\mu\text{m}$),涂层应力增加,抗变形、抗剥落能力也会下降。因此,涂层厚度在 $2.5\sim 3.5\mu\text{m}$ 为最佳。对于航空发动机叶片而言,在其表面制备涂层的厚度也有一定要求,涂层太厚,容易影响基体的疲劳性能并会影响叶片的气动性能;太薄,防护效果不明显,一般认为,叶片表面的涂层厚度不超过 $25\mu\text{m}$ 。由于TiN涂层脆性大、断裂韧性低,涂层在受到恶劣环境砂尘粒子冲击时极易出现裂纹。为提高涂层韧性,可在硬质涂层中增加延性金属,形成复合涂层^[15],也可以将硬质涂层、金属交替排列,形成陶瓷/金属涂层多层^[16]。美国发展了ER-7,Black Gold等涂层,可同时承受砂尘的小角度磨损和大角度冲击,并在发动机上得到了应用,试验表明带有ER-7涂层的T64涡轴发动机叶片在沙漠中正常运行的时间是未镀涂层的3.3倍^[17]。ER-7涂层的主要成分为TiN,Black Gold涂层的主要成分则为TiAlN。

目前,抗砂尘冲蚀涂层在国内尚未得到应用,主要原因是多层涂层的砂尘冲蚀损伤机理不清楚,涂层结构缺乏设计和考核评估方法。不能对砂尘速度、质量浓度进行精确控制,制约了叶片抗冲蚀涂层结构的设计和优化。

本文搭建了一套砂尘冲蚀试验系统,通过气体压力控制砂尘速度,采用螺杆进砂装置精确控制砂尘的流量,可通过参数调整模拟发动机不同工作状态下的砂尘环境。在此基础上进行了TC4钛合金和多层TiN/Ti涂层冲蚀试验,对试样的冲蚀损伤规律和损伤机制进行了探讨。

1 砂尘冲蚀试验设备

砂尘冲蚀试验设备采用模块化设计,主要包括供气系统、供砂系统、试验舱和控制系统4个部分,如图2所示。其中,供气系统主要是按要求提供不同压力的空气,压力可在 $0.2\sim 1.0\text{MPa}$ 范围内调节;供砂系统采用螺杆装置,可通过调节转速精确控制砂尘流量。试样按照一定角度安装在试验舱内的夹具上,砂尘粒子经供气系统提供的压

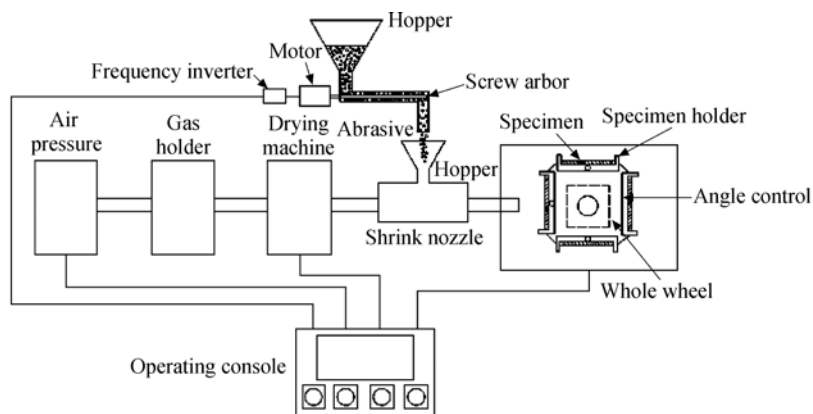


图2 沙尘冲蚀试验设备示意图

Fig. 2 Diagram of sand erosion test equipment

缩空气加速后由喷嘴喷出,入射到试样表面。

在冲蚀试验过程中,沙尘的流量和速度对试验结果有很大的影响^[18]。沙尘经过气体加速,最后冲蚀试件表面,涉及复杂的气固两相流,气流与粒子之间、粒子与粒子之间以及不同的粒子运动形式之间,能量传递与转换过程十分复杂,通过模拟计算的方法获得沙尘的速度的精度较低^[19]。本文采用粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)方法^[20]进行沙尘速度的测量,获得气体压力 p 和沙尘速度 V 之间的关系。

将沙尘直接作为流场中散布的示踪粒子,用脉冲激光片光源照亮经设备喷嘴喷出的沙尘所形成的流场区域,经过两次曝光,沙尘的图像被记录在图像传感器(charge coupled device, CCD)相机上。采用互相关法,将每个图像进行逐点处理,从而直接得到沙尘的速度分布。试验所用的沙尘取自塔克拉玛干沙漠,其粒子形貌如图3(a)所示。采用激光法对沙尘粒径进行了测量,图3(b)为使用马尔文粒度仪的测量结果,经测试显示该沙尘的粒径范围为 $100 \sim 400 \mu\text{m}$,且多数在 $150 \mu\text{m}$ 左右。

在进行 PIV 测试时,沙尘流量保持不变(进

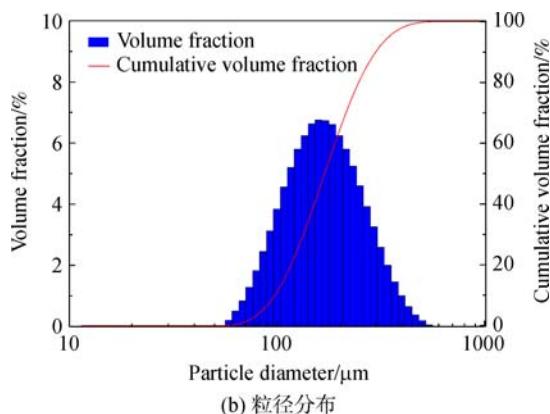
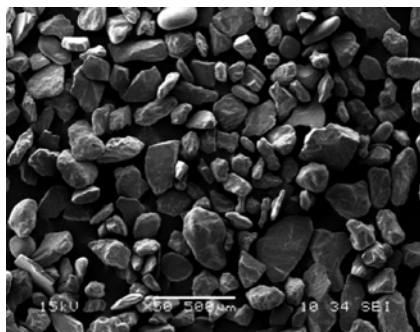


图3 试验所用的沙尘粒子形貌和粒径分布

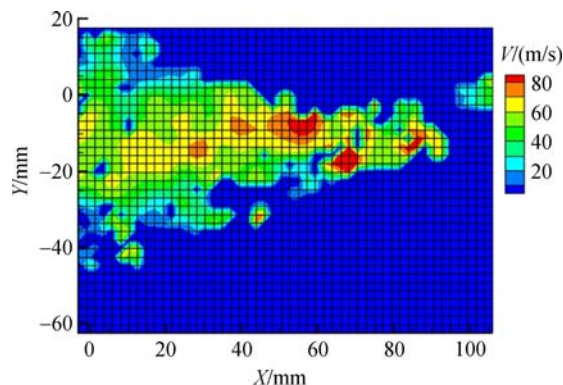
Fig. 3 Sand morphology and diameter distribution of test

砂螺杆转速一定),依次将气体压力设定在某一固定值,使沙尘经气流加速后均匀喷射出来,采用 PIV 测试得到不同压力条件下的沙尘速度分布。例如,当气体压力为 0.2 MPa 和 1.0 MPa 时,PIV 测试结果如图4(a)和图4(b)所示。图4(c)为不同气体压力时的测试到的沙尘速度,基本符合线性关系

$$V = 323.33 p + 12.67 \quad (1)$$



(a) 砂粒形貌

(a) $p=0.2 \text{ MPa}$

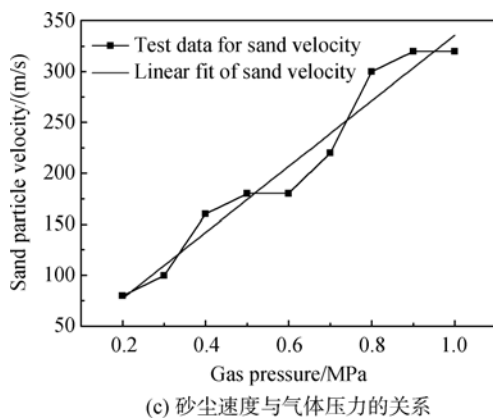
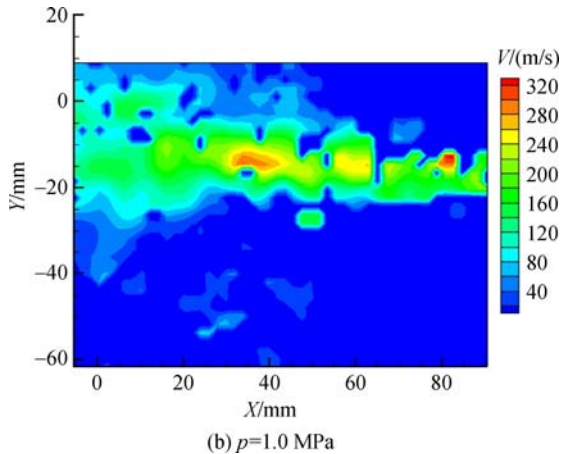


图4 不同气体压力下的砂尘速度分布

Fig. 4 Sand particle velocity distribution under different gas pressures

2 砂尘冲蚀试验

2.1 TC4 钛合金砂尘冲蚀试验

为了准确得到砂尘冲蚀损伤规律,本文设定的砂尘速度较小,为 80 m/s,冲蚀角度为 30° ,对应的气体压力为 0.2 MPa.

本文对试验模拟的砂尘环境和真实某直升机砂尘环境进行了对比,在理想状态下(假设压气机内部的砂尘均匀分布),采用单位时间、单位进口面积的砂尘含量等效换算两种情况.对于某发动机在砂尘环境中的单位时间、单位进口面积的砂尘质量为

$$S_b = \frac{q_m \rho_s}{\frac{1}{4} \pi \rho (D_1^2 - D_2^2)} \quad (2)$$

式中 q_m 为发动机进气流量; ρ_s 为空气中砂尘质量浓度; D_1, D_2 分别为机匣直径和压气机叶盘直径; ρ 为空气密度.

本文采用的冲蚀设备在单位时间、单位进口面积砂尘质量为

$$S_{\text{exp}} = \frac{m}{\frac{1}{4} \pi d^2} \quad (3)$$

式中 m 为进砂质量, d 为喷嘴直径(8 mm),喷嘴距试样 15 mm. 利用 $S_b = S_{\text{exp}}$, 设定砂尘流量为 9.68 g/min, 经计算试验环境下的砂尘质量浓度为 28.91 g/m^3 , 对比某直升机砂尘环境级别^[21], 可以看出本次试验超出 5 级砂尘环境, 属于恶劣环境.

试件长×宽×高为 50 mm×20 mm×4 mm, 试验过程中,每隔一定时间(例如 5 min)将试件取出测量其质量,计算出试样的质量损失率,在测量前试件需经超声波清洗,清除试件表面砂尘.

图 5 为 TC4 钛合金冲蚀质量损失率随时间变化的曲线. 从图中可以看出, TC4 钛合金冲蚀过程可分为两个阶段.

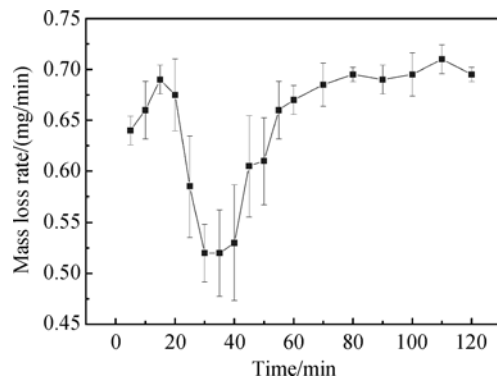


图5 TC4 钛合金质量损失率

Fig. 5 Mass loss rate of TC4 titanium alloy

第 1 阶段,砂尘粒子刚开始冲刷试样表面,由于表面不可避免存在一些缺陷,冲击和磨损作用引起质量损失较高,随后粒子的冲击导致表面硬化,硬度增加,砂尘对材料的切削影响下降,质量损失变化减小;第 2 阶段,超过 25 min 后,粒子的反复冲击,局部位置发生冲击剥落与磨损的耦合作用,材料的质量损失逐渐增加,直到硬化和磨损对材料的作用相当,质量损失率维持在一个稳定的值,约为 0.7 mg/min ^[22].

图 6 为 TC4 钛合金冲蚀后表面的扫描电子显微镜(SEM)图,砂尘对表面作用后出现许多切削作用的沟壑,呈现出韧性材料典型的冲蚀损伤特征^[23].

在砂尘冲蚀过程中,包括硬质颗粒对表面的撞击和颗粒对表面的磨损两种形式^[24],由于钛合金韧性较好,在砂尘冲蚀角度为 30° 时,磨损占主要地位.

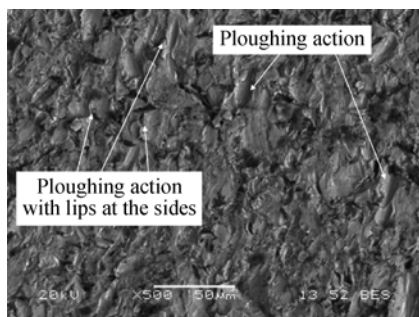


图 6 TC4 钛合金冲蚀后表面形貌

Fig. 6 TC4 titanium alloy surface morphology after erosion

2.2 多层 TiN/Ti 涂层砂尘冲蚀试验

图 7 为多层 TiN/Ti 涂层的结构示意图, 其中, l_a 为 Ti 层厚度, l_b 为 TiN 层厚度, Δ 是调制周期, 为 Ti 层与 TiN 层厚度之和, 即 $l_a + l_b$, 调制比为 Ti 层与 TiN 层厚度之比, 即 $l_a : l_b$. 涂层按一定的结构参数重复交替排列.

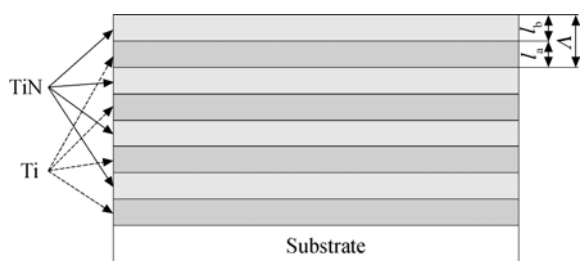


图 7 涂层结构示意图

Fig. 7 Diagram of coating structure

涂层采用物理气相沉积的方法制备. 首先使用 0.02 Pa 的氩气对试样进行清洗, 清洗偏压为 $-700 \sim -1000$ V. 将清洗后的试样放入 JGP450 型超高真空磁控溅射炉中进行涂层的制备, 其他控制参数为: 基体偏压为 -400 V, 钛靶电流为 $60 \sim 100$ A, 氮气压力为 0.2 Pa.

本文制备了两种不同参数的 TiN/Ti 涂层, 分别为: ①总厚度为 $3 \mu\text{m}$, $l_a : l_b = 1 : 1$, $\Delta = 500$ nm; ②总厚度为 $3 \mu\text{m}$, $l_a : l_b = 1 : 3$, $\Delta = 500$ nm. 按与 TC4 钛合金相同的条件对涂层进行冲蚀试验.

图 8 是涂层的质量损失率随时间变化的曲线. 从图中可以看出, 每种涂层在冲蚀刚开始的时候会有较大的质量损失率; 经过小段时间后质量损失率开始保持平缓, 稳定在某一范围内; 随着冲蚀时间延长, 质量损失率逐渐上升, 直至涂层剥落. 与 TC4 钛合金相比, 涂层的质量损失率明显

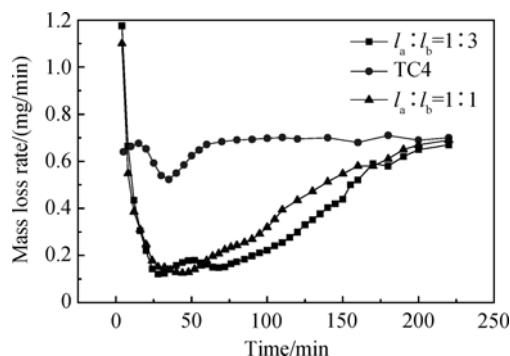


图 8 涂层和 TC4 钛合金质量损失率与时间的关系

Fig. 8 Relationship between mass loss rate of coatings and TC4 titanium alloy with time

较低, 稳定时的质量损失率为 0.15 mg/min , 降低了 65%, 表明涂层可以显著提高钛合金材料的抗冲蚀性能.

从试验结果看, 涂层的冲蚀损伤基本分为 3 个阶段: 第 1 阶段, 从开始到 20 min 左右, 此阶段涂层的质量损失率较高; 第 2 阶段, 从 20 min 至 60 min 左右, 此阶段涂层质量损失率逐渐降低并稳定在 0.15 mg/min ; 第 3 阶段, 60 min 往后, 此阶段涂层质量损失率逐渐升高, 直到与基体损失率相同, 涂层破坏. 可以看出, 涂层抗砂尘冲蚀时间可达 200 min 以上.

第 1 个阶段主要是因为涂层磁控溅射过程中, 不可避免会产生熔滴和孔隙等微小缺陷, 如图 9. 这些缺陷在冲蚀开始时会被砂尘快速去除, 因此, 冲蚀的质量损失率较高^[8], 为了提高表面质量, 减小喷溅粒子, 可采用磁过滤的方法.

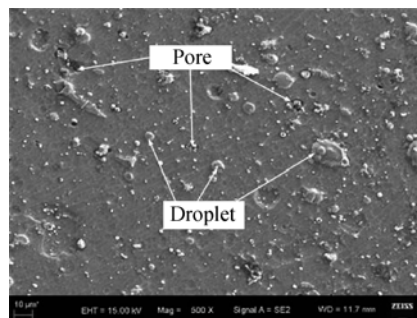
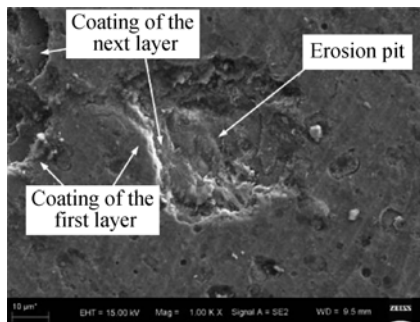


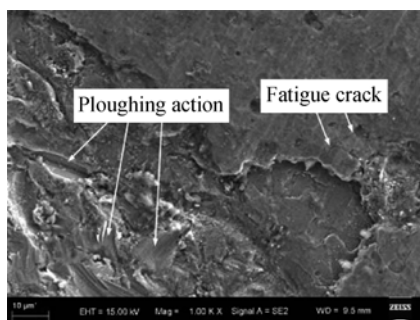
图 9 涂层表面形貌

Fig. 9 Coating surface morphology

稳定冲蚀过程中, 涂层的主要失效模式是微区剥落, 如图 10 和图 11 所示, 冲蚀形成的凹坑周围呈现台阶状和微裂纹. 砂尘垂直冲击速度分量的作用导致大应力出现在涂层内部的结合位置, 从而引起涂层的块状破碎并逐层剥落, 出现台阶



(a)



(b)

图10 涂层冲蚀后的SEM图

Fig. 10 SEM picture of coating after erosion

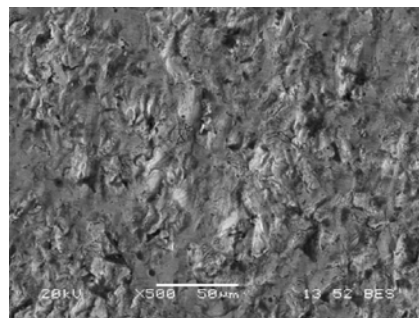
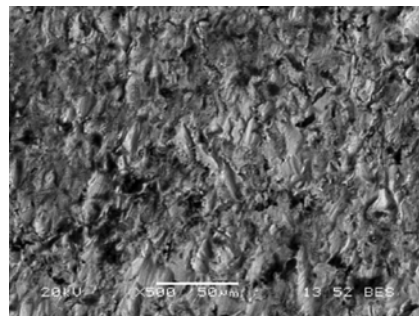
(a) $t_{\text{erosion}} = 15 \text{ min}$ (b) $t_{\text{erosion}} = 40 \text{ min}$ 图12 TiN/Ti涂层冲蚀损伤($l_a : l_b = 1 : 1$)

Fig. 12 Erosion damage of TiN/Ti coating

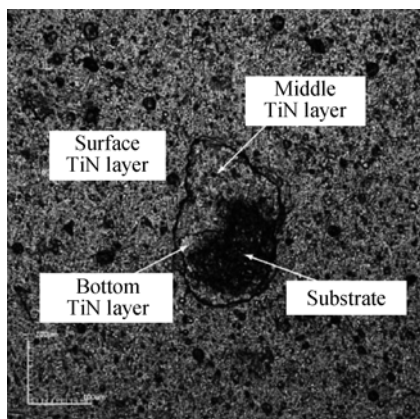
($l_a : l_b = 1 : 1$)

图11 涂层冲蚀后的激光共聚焦显微镜图

Fig. 11 Laser confocal microscope picture of coating after erosion

形状貌,台阶周围受砂尘冲击,甚至出现微裂纹,从而导致质量损失率升高。

由于涂层中TiN和Ti层厚度比例不同,两种涂层的质量损失率也有差异,具体表现为TiN/Ti调制比为1:3的涂层质量损失率总体低于调制比为1:1的涂层,表明1:3涂层的抗冲蚀能力优于1:1涂层。图12和图13分别为两种涂层不同冲蚀试验时间(t_{erosion})后的SEM图,其中图12(a)、图13(a)为15 min,图12(b)、

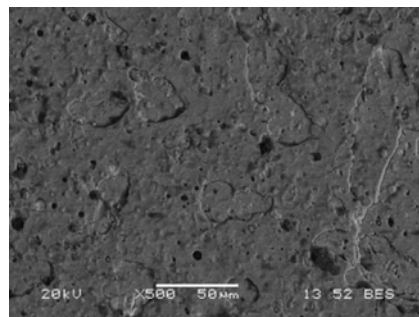
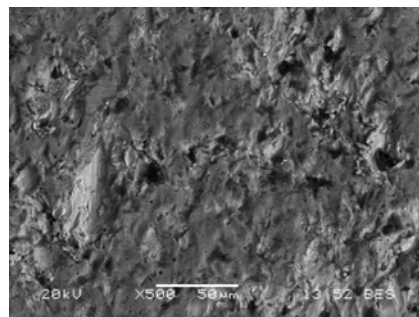
(a) $t_{\text{erosion}} = 15 \text{ min}$ (b) $t_{\text{erosion}} = 40 \text{ min}$ 图13 TiN/Ti涂层冲蚀损伤($l_a : l_b = 1 : 3$)

Fig. 13 Erosion damage of TiN/Ti coating

($l_a : l_b = 1 : 3$)

图13(b)为40 min,可以看出当冲蚀进行15 min后,1:3涂层的表面由于部分涂层的脱落出现许多大小不一的剥落岛,但还没有露出基体;反观1:1涂层,其表面已经出现许多冲蚀粒子切削产生的沟壑,表明已经露出基体,甚至有些地方还存在粒子冲击引起疲劳断裂而产生的微裂纹.当冲蚀进行40 min后,可以看出1:1涂层表面的涂层已经大部分脱落,基体的损伤更为严重;而1:3涂层只是小部分的涂层脱落,基体的损伤程度较轻.根据文献[25],对于Ti/TiN双层涂层来说,当下层的Ti层厚度变厚时会引起其同上层TiN层结合强度的减小,在砂尘冲击时越容易产生脱落.文献[26]中对Ti/TiN涂层结构变化对其抗冲蚀性能的影响进行了探讨,发现在粒子冲击涂层时,当TiN层比较薄时,涂层会更容易产生裂纹并脱落.因此,本文中的1:3涂层相对于1:1涂层表现出更好的抗冲蚀性能.

涂层硬度高,在砂尘冲击作用下容易发生脆性断裂.对比本文的两种涂层,其稳态时的质量损失率相近,但是TiN/Ti调制比为1:3的涂层在第3个阶段的质量损失率低于调制比为1:1的涂层,涂层微区剥落小,这是由于其硬度和韧性匹配更好所致.航空发动机叶片实际工作中的情况十分复杂,冲蚀角度、速度范围宽,通过调整涂层的结构(优化调制比和调制周期)可进一步提高其抗砂尘冲蚀性能.

3 结 论

TC4钛合金在砂尘冲蚀作用下冲蚀损伤严重,在砂尘冲蚀角度为 30° ,速度为80 m/s,砂尘流量为9.68 g/min的条件下,质量损失率达0.7 mg/min.

在钛合金表面制备涂层是有效提高其抗砂尘冲蚀能力的方法.涂层中Ti层和TiN层的调制比对质量损失率有较大影响,TiN/Ti调制比为1:3的涂层抗冲蚀性能优于调制比为1:1的涂层,抗砂尘冲蚀时间可达200 min以上.

砂尘冲蚀条件下,涂层的主要失效模式是砂尘冲击垂直分量引起的微区剥落,因此,涂层结构硬度和韧性的匹配是涂层设计需要考虑的主要因素.

参考文献:

[1] American Society for Metals. ASM handbook: friction, lubrication, and wear technology[M]. [S. l.]: ASM International, 1992.

[2] 吴小梅,李伟光,陆峰.钛合金叶片防护涂层研究[J].装备环境工程,2006,3(3):116-129.
WU Xiaomei, LI Weiguang, LU Feng. Research of protective coating to the titanium alloy blade[J]. Equipment Environment Engineering, 2006, 3(3): 116-129. (in Chinese)

[3] Pfledderer L, Pepi M. Sand erosion test method for DOD unique environments[C]// Proceedings of Tri-Service Corrosion Conference. Aberdeen, UK: Army Research Laboratory, 2008: 1-24.

[4] Pepi M, Squillacioti R, Pfledderer L, et al. Solid particle erosion testing of helicopter rotor blade materials[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, 12(1): 96-108.

[5] 何光宇,李应红,柴艳,等.航空发动机压气机叶片砂尘冲蚀防护涂层关键问题综述[J].航空学报,2015,36(6): 1733-1743.
HE Guangyu, LI Yinghong, CHAI Yan, et al. Review of key issues on coating against sand erosion of aero-engine compressor blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(6): 1733-1743. (in Chinese)

[6] 郝负洪,邢永明,杨诗婷.风沙环境下钢结构表面涂层冲蚀行为与侵蚀机理研究[J].摩擦学学报,2010,30(1): 26-31.
HAO Yunhong, XING Yongming, YANG Shiting. Erosion-wear behavior of steel structure coating subject to sandstorm[J]. Tribology, 2010, 30(1): 26-31. (in Chinese)

[7] 郝负洪,邢永明,杨诗婷,等.风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损力学性能研究[J].应用力学学报,2013,30(3): 350-355.
HAO Yunhong, XING Yongming, YANG Shiting, et al. The erosion-wear mechanical properties of the coating of steel structure subject to sandstorm[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(3): 350-355. (in Chinese)

[8] 刘道新,奚运涛,韩栋,等.离子辅助电弧沉积ZrN梯度涂层抗固体粒子冲蚀行为研究[J].航空材料学报,2010,30(4): 31-37.
LIU Daoxin, XI Yuntao, HAN Dong, et al. Study on solid particle erosion behaviors of ZrN gradient coating prepared by ion assisting arc deposition[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(4): 31-37. (in Chinese)

[9] 张沙,龚烈航.前混合磨料水射流切割脆性材料研究[J].润滑与密封,2011,36(3): 97-104.
ZHANG Sha, GONG Liehang. Research on cutting brittle materials by pre-mixed abrasive water jet[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(3): 97-104. (in Chinese)

[10] Feuerstein A, Kleyman A. Ti-N multilayer systems for compressor airfoil sand erosion protection[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(6): 1092-1096.

[11] Laguna-Camacho J R, Cruz-Mendoza L A, Anzelmetti-Zaragoza J C, et al. Solid particle erosion on coatings employed to protect die casting molds[J]. Progress in Organic Coatings, 2012, 74(4): 750-757.

- [12] Reedy M W, Eden T J, Potter J K, et al. Erosion performance and characterization of nanolayer (Ti, Cr) N hard coatings for gas turbine engine compressor blade applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 206(2): 464-472.
- [13] Yang Q, Bielawski M, McKellar R C. Microstructures, mechanical properties, and erosion resistance of unbalanced magnetron sputtering deposited TiN/VN nano-structured coatings[J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2012, 1(3/4): 150-157.
- [14] Zhuravleva P L, Treninkov I A, Sbitneva S V, et al. Investigation into the structure of TiN single-layer and TiN/ZrN multilayer coatings[J]. *Nanotechnologies in Russia*, 2010, 5(9/10): 669-675.
- [15] Kleis I, Kulu P. Solid particle erosion: occurrence, prediction and control[M]. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2007.
- [16] Alegria-Ortega J A, Ocampo-Carmona L M, Suárez-Bustamante F A, et al. Erosion-corrosion wear of Cr/CrN multilayer coating deposited on AISI-304 stainless steel using the unbalanced magnetron (UBM) sputtering system[J]. *Wear*, 2012, 290/291(4): 149-153.
- [17] Schell J D, Hein G, Mendez M, et al. Erosion durability improvement of T64 engine for military helicopters[C] // *Proceedings of American Helicopter Society 60th Annual Forum*. Baltimore, US; American Helicopter Society, 2004: 7-10.
- [18] Swaminathan V P, Smith J S, Gandy D. High-temperature erosion testing standard and round robin testing[R]. Santa Fe, US; 6th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, 2010.
- [19] Momber A W. Effects of target material properties on solid particle erosion of geomaterials at different impingement velocities[J]. *Wear*, 2014, 319(1/2): 69-83.
- [20] 黄明辉. 喷动床内气固两相流体流动数值模拟[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- HUANG Minghui. Numerical simulation of gas-solids flow in spouted bed[D]. Xi'an: Northwest University, 2009. (in Chinese)
- [21] 栗鸿飞, 宋文武. PIV 技术在流动测试与研究中的应用[J]. *西华大学学报: 自然科学版*, 2009, 28(5): 27-31.
- LI Hongfei, SONG Wenwu. Application of PIV in the test and study of flow field[J]. *Journal of Xihua University: Natural Science Edition*, 2009, 28(5): 27-31. (in Chinese)
- [22] 张永清, 陈登崖, 顾佩芝. 韧性材料冲蚀磨损的机理研究[J]. *上海交通大学学报*, 1989, 23(3): 99-106.
- ZHANG Yongqing, CHEN Dengya, GU Peizhi. Erosion mechanism of ductile material[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1989, 23(3): 99-106. (in Chinese)
- [23] 吴小梅, 商晓宇. 三种不锈钢材料抗固体颗粒冲蚀性能研究[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(3): 68-72.
- WU Xiaomei, SHANG Xiaoyu. Study on erosion resistance of three stainless steels using solid particles[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(3): 68-72. (in Chinese)
- [24] Alefeld G, Mayer G. Interval analysis: theory and applications[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2000, 121(1): 421-464.
- [25] Guu Y Y, Lin J F. Comparison of the tribological characteristics of titanium nitride and titanium carbonitride coating films[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1996, 85(3): 146-155.
- [26] Borawski B, Singh J, Todd J A, et al. Multi-layer coating design architecture for optimum particulate erosion resistance[J]. *Wear*, 2011, 271(11/12): 2782-2792.

(编辑: 陈 越)