

TiN/Ti 强韧涂层在砂尘高速冲蚀下的失效机理

陈 伟, 李 舟, 赵振华, 颜 诚, 马松林

(南京航空航天大学 能源与动力学院

航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 利用高速连续冲蚀试验系统,在不同的冲击角及供砂量下,对有无 TiN/Ti 强韧涂层的不锈钢试件进行了砂尘高速冲蚀试验,获得了试件的质量冲蚀率。采用扫描电镜(SEM)对涂层损伤表面及断面形貌进行观测与分析,研究 TiN/Ti 涂层在不同冲击条件下的失效机理。结果表明:TiN/Ti 涂层质量冲蚀率随冲击角及供砂量的增加而增加。在低冲击角下,砂尘粒子的切削作用是导致涂层材料剥落的主要原因;高冲击角下,砂尘冲击引起的裂纹萌生及扩展致使涂层材料块状破碎而剥落。TiN/Ti 涂层显著提高了不锈钢的抗冲蚀性能,尤其是在低冲击角下。低冲击角下,涂层能将不锈钢的冲蚀性能提高约 5 倍;高冲击角下能提高约 2 倍。

关 键 词: TiN/Ti 涂层; 砂尘冲蚀; 冲击角; 质量冲蚀率; 失效机理

中图分类号: V252 **文献标志码:** A

Failure mechanism of TiN/Ti strength and tough coating under high-speed sand-dust erosion

CHEN Wei, LI Zhou, ZHAO Zhenhua, YAN Cheng, MA Songlin

(Aero-engine Thermal Environment and Structure Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Through high-speed continuous erosion test system, high-speed sand-dust erosion tests of stainless steel specimens with or without TiN/Ti strength and tough coating were carried out at different impact angles and sand supplies, and the mass erosion rates of specimens were obtained. The surface and cross-sectional damage morphology of the coating were observed by scanning electron microscopy (SEM), and the failure mechanism of TiN/Ti coatings under different impact conditions was analyzed. The results show that the mass erosion rate of TiN/Ti coatings increases with the increase of impact angle and sand supply. At low impact angle, the cutting action of sand particles is the main reason for the spalling of coatings; at high impact angle, the crack initiation and propagation caused by sand-dust impact lead to massive fragmentation and spalling of coatings. TiN/Ti coating can significantly improve the erosion resistance of stainless steel, especially at low impact angle. At low im-

收稿日期:2019-04-22

作者简介:陈伟(1968—),男,教授,博士,主要从事航空发动机结构冲击与疲劳方面的研究。E-mail:chenwei@nuaa.edu.cn

通信作者:赵振华(1979—),男,讲师,博士,主要从事结构冲击与疲劳方面的研究。E-mail:zhaozhenhua@nuaa.edu.cn

引用格式:陈伟,李舟,赵振华,等. TiN/Ti 强韧涂层在砂尘高速冲蚀下的失效机理[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9): 1866-1872.
CHEN Wei, LI Zhou, ZHAO Zhenhua, et al. Failure mechanism of TiN/Ti strength and tough coating under high-speed sand-dust erosion[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 1866-1872.

pact angle, the erosion resistance of stainless steel with coating can be increased by about 5 times, and at high impact angle it can be increased by about 2 times.

Key words: TiN/Ti coating; sand-dust erosion; impact angle; mass erosion rate; failure mechanism

直升机在沙漠地带起降过程中,旋翼产生的巨大升力直接作用在地面,导致其周围形成高浓度的砂尘环境,砂尘吸入压气机后将与转子叶片发生高速碰撞,在砂尘颗粒冲击、磨损作用下,发动机最前端的压气机叶片外型和结构完整性遭到破坏,导致发动机性能衰减、寿命降低^[1-5]。在叶片表面涂覆涂层是改善其抗冲蚀性能的有效措施^[6]。研究表明:压气机叶片表面涂覆了硬质涂层后,延长了直升机在沙漠等恶劣环境条件下的使用寿命,扩大了直升机的作战范围^[7-9],具有十分重要的军事意义。

国内外抗冲蚀涂层研究主要包括陶瓷涂层、ZrN、TiN 涂层等典型脆性材料,其质量冲蚀率随冲击角的增加而增加^[10],但是在高、低冲击角下的冲蚀行为略有差异^[11];涂层硬度高,抗粒子切入能力较强,表现为低冲击角下质量冲蚀率低;高冲击角下由于涂层韧性不足,变形协调能力弱,导致质量冲蚀率急剧增加^[12-13]。为了提高涂层的抗高冲击角的冲击性能,改善涂层韧性引起了学者的重视,一般在硬质涂层中添加延性金属层以提高其韧性^[14]。Yang 等^[15]在 TC4 表面制备了不同铝质量分数的 TiAlN 涂层,发现 TiAlN 的耐侵蚀性能是 TiN 涂层的好几倍,反映出高硬度和高韧性的良好结合能显著提高涂层的耐侵蚀性能。

TiN/Ti 强韧涂层结合了硬质层 TiN 及软质层 Ti 以改善其抗冲蚀性能^[16]。曹鑫等^[17]进行了 80 m/s 冲击速度、30°冲击角下的 TiN/Ti 涂层冲蚀试验,发现该冲击条件下砂尘法向冲击动能导致的微区剥落是涂层损伤的主要形式。然而实际情况下,进入压气机的砂尘将与转子叶片以 300~400 m/s 的相对速度发生碰撞,且冲击角分布于 0°~90°之间^[18]。目前国内鲜有开展砂尘高速至超声速条件下的 TiN/Ti 涂层冲蚀试验,无法模拟砂尘高速冲击压气机叶片的真实情况,其在砂尘高速冲蚀对涂层造成的损伤演化规律尚不明晰,无法准确评价 TiN/Ti 涂层抗冲蚀性能,急需开展相关研究。

本文采用自制的高速连续冲蚀试验系统加速砂尘至平均速度 330 m/s,在冲击角为 30°、45°、60°、90°下冲击涂层及不锈钢试件,研究 TiN/Ti

强韧涂层在高速冲击条件下的失效机理及损伤规律,并讨论了 TiN/Ti 强韧涂层对不锈钢抗冲蚀性能的影响,分析了 TiN/Ti 强韧涂层的优势与不足。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用物理气相沉积(PVD)技术,在 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢试件表面制备了 TiN/Ti 涂层,涂层从外向内为硬质层、软质层,硬质层为 13.5 μm 厚度的 TiN,软质层为 1.5 μm 厚度的 Ti,扫描电镜(SEM)拍摄的涂层试件断面如图 1。带涂层及不带涂层不锈钢试件尺寸均为 25 mm×20 mm×2.5 mm。试验所用砂尘颗粒为符合 GJB1171-91 的国产破碎石英砂,筛选粒径范围为 200~300 μm 的砂尘进行试验。

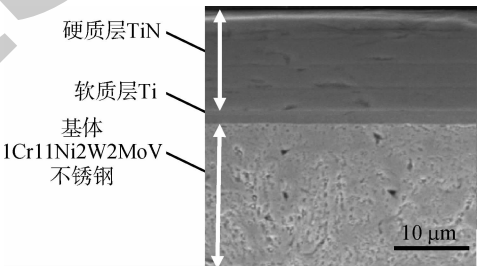


图 1 TiN/Ti 涂层断面形貌

Fig. 1 Cross-sectional morphology of TiN/Ti coating

1.2 试验方法

采用自制的高速连续冲蚀试验系统开展 TiN/Ti 强韧涂层高速冲蚀试验。该系统主要由气源系统、连续供砂装置及高速喷砂枪等组成,如图 2 所示。其中,气源系统压力范围为 0.1~0.8 MPa,通过控制气压大小即可将砂尘加速至指定速度冲击试件;连续供砂装置采用电动机带动螺杆喂料的方式实现砂尘的连续输送,改变电动机频率进而改变转速即可改变供砂流量;高速喷砂枪可让气流在通道中达到高超声速,进而将砂粒加速至超声速状态,喷砂枪出口直径为 10 mm,距试件 20 mm。试验舱内试件夹具可实现从 15°至 90°,每间隔 15°调节冲击角。

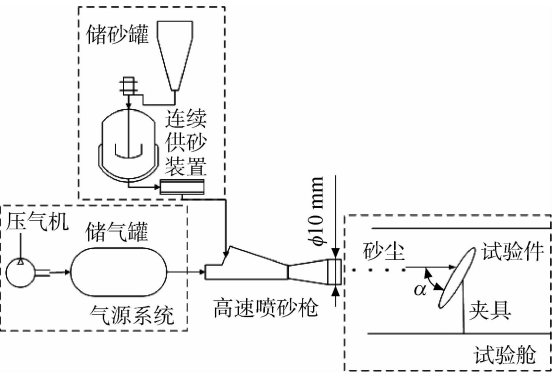


图 2 高速连续冲蚀试验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high-speed continuous erosion test system

为了得到 TiN/Ti 强韧涂层在砂尘高速冲蚀下的损伤规律及失效机理,考虑到实际情况下砂尘撞击叶片相对速度较高,本文设定砂尘平均冲击速度为 330 m/s,对应的气体压力为 0.8 MPa,供砂流量为 0.138 g/s。设定试验变量:冲击角 $\alpha=30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}$;为了准确获得涂层的质量冲蚀率,冲蚀试验应在涂层完全剥落之前进行,取冲击时间 $t=10, 20$ s,对应的供砂量 $s=1.38, 2.76$ g,研究不同冲击时间及冲击角对 TiN/Ti 涂层抗冲蚀性能的影响。

试验结束后将试件取出,经超声波清洗仪清除试件,烘干后称量其质量,提取质量冲蚀率 ϵ ,计算方法如下式。采用 SEM 观察涂层表面及断面形貌,研究不同冲击条件下 TiN/Ti 强韧涂层的失效机理。

$$\epsilon = \frac{\Delta m}{s}$$

式中 ϵ 为质量冲蚀率, Δm 为试件冲蚀前后的质量差(mg), s 为供砂量(g)。

2 结果与分析

2.1 TiN/Ti 涂层在砂尘高速冲蚀下的失效机理

2.1.1 冲击角对 TiN/Ti 涂层抗冲蚀性能的影响

图 3 是试件的质量冲蚀率随冲击角变化的曲线。从图中可以看出, TiN/Ti 涂层试件的质量冲蚀率随冲击角增大而增大,供砂量为 1.38 g 时,冲击角为 90° 下的质量冲蚀率是冲击角为 30° 的 8 倍。文献[19]研究表明,在高冲击角下冲击到材料表面的法向动能增加,脆性材料的塑性变形能力差,只能以裂纹扩展的方式消耗砂尘的冲击动能,而裂纹扩展所消耗的能量较低,体现为冲击角较大时,材料的质量冲蚀率急剧增加。图 3 显示

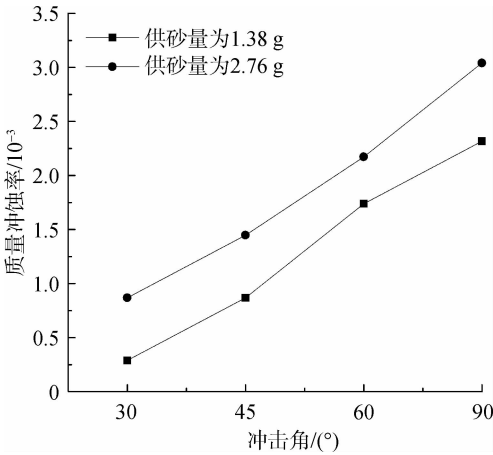


图 3 不同冲击角下 TiN/Ti 强韧涂层质量冲蚀率的变化
Fig. 3 Changes of mass erosion rate of TiN/Ti strength and tough coatings at different impact angles

在高冲击角下质量冲蚀率曲线斜率无明显增大,这可能是因为 TiN/Ti 强韧涂层添加了软质层 Ti,提高了其在高冲击角下的变形协调能力。

2.1.2 供砂量对 TiN/Ti 涂层抗冲蚀性能的影响

图 3 展示了不同供砂量下,涂层的质量冲蚀率随冲击角的变化曲线。从图中可以看出,冲击时间增加,冲击至试件表面的砂尘质量增加,涂层质量冲蚀率增大。通过计算可得随着冲击角增大,质量冲蚀率分别增长了 200%、67%、25%、31%,即在高冲击角下质量冲蚀率的增长率明显低于低冲击角,反映出冲击角对质量冲蚀率的影响程度高于供砂量。

2.1.3 供砂量对 TiN/Ti 涂层抗冲蚀性能的影响

1) 宏观形貌分析

涂层试件的宏观损伤形貌如图 4 所示;可以看出,在冲击速度及冲击时间 t 相同的情况下,随冲击角(α)的增大,涂层表面损伤面积逐渐减小;冲击角为 30° 时,损伤区域为长轴为 24 mm,短轴为 12 mm 的椭圆,冲击坑较为分散,并未完全覆盖;随着冲击角增大,损伤区域面积逐渐减小;冲击角为 90° 时,砂尘正撞试件,损伤由中心向四周扩散,损伤区域为直径 12 mm 的圆形,损伤区域尺寸见表 1。随着冲击时间增加,损伤面积相同但冲击坑分布更为密集,且冲击坑深度增加并逐渐扩大并连接起来,汇聚成大的冲击坑,最后造成整块的剥落,在高冲击角下露出部分基体。

2) 微观形貌分析

图 5、图 6 给出了不同冲击角下 TiN/Ti 涂层试件的表面及断面损伤典型形貌。冲击角为 30° 时,砂尘冲击以微切削为主,试件表面存在大量切

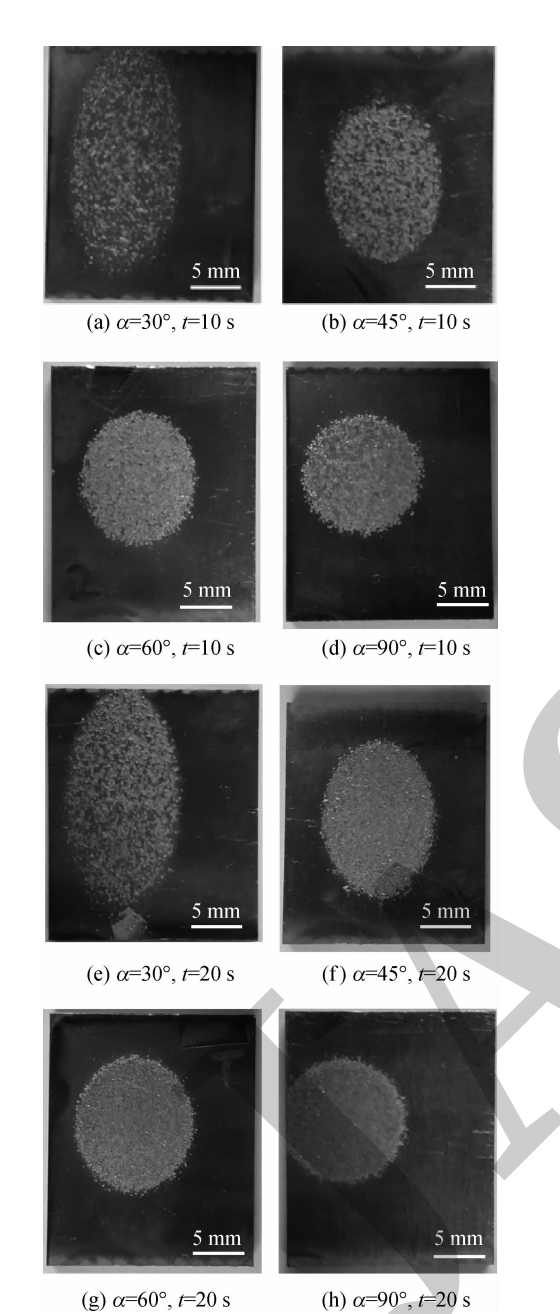


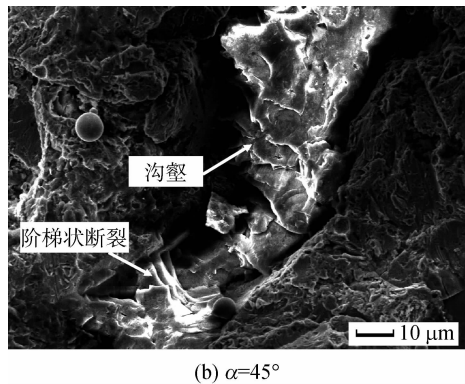
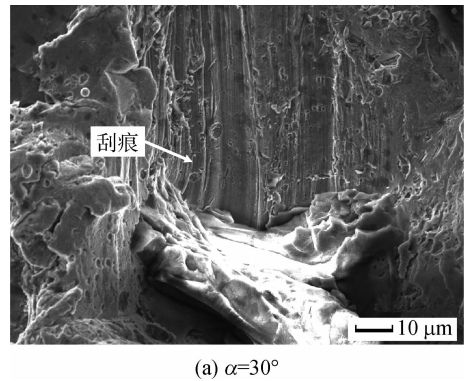
图 4 不同冲击条件下的 TiN/Ti 涂层损伤情况
Fig. 4 Damage of TiN/Ti coatings under different impact conditions

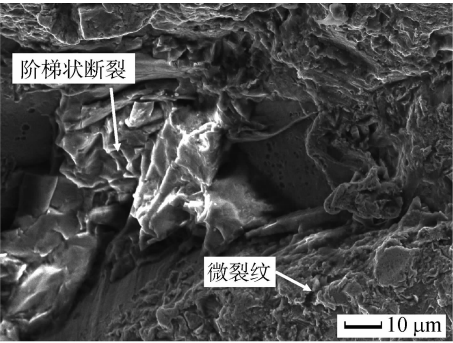
表 1 不同冲击角下的损伤区域尺寸			
Table 1 Damage area size at different impact angles			
冲击角 $\alpha/(^{\circ})$	椭圆长轴 $2a/\text{mm}$	椭圆短轴 $2b/\text{mm}$	损伤区域面积 A/mm^2
30	24	12	226.08
45	16	12	150.72
60	13	12	122.46
90	12	12	133.04

削产生的刮痕,如图 5(a)所示。涂层表面出现部分材料脱落,涂层未剥落区域出现裂纹。从断面也可以看出,由于 TiN 涂层硬度较高,抵抗颗粒微切削能力较强,冲击坑较浅尚未露出基体,如图 6(a)所示;对应试验结果也表明低角度下质量冲蚀率较低。

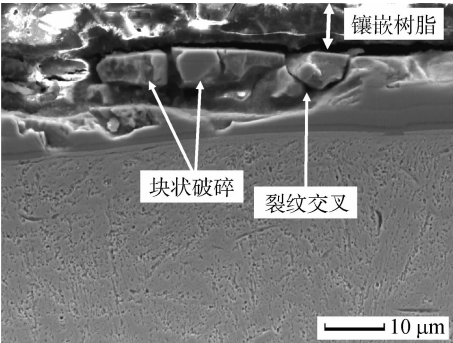
冲击角为 45°时,在砂尘切削及挤压的共同作用下,试件表面产生明显沟壑,涂层逐层断裂剥落,形成了阶梯状形貌,如图 5(b)所示;冲击坑附近出现纵向裂纹,并沿着界面处往外扩展,同时存在向下一层扩展的趋势,且涂层过渡层界面处产生横向裂纹,如图 6(b)所示。冲击角为 60°时,观察到粒子冲击引起材料疲劳断裂产生的微裂纹,冲击坑周围出现阶梯状形貌,如图 5(c)所示。涂层疲劳断裂而产生的纵向裂纹与涂层结合层处产生的横向裂纹扩展交叉,致使涂层块状破碎,进而导致材料的去除,如图 6(c)所示。

冲击角为 90°时,如图 5(d)所示,在垂直冲击载荷作用下,涂层主要呈轴向劈裂状破坏,部分冲击坑内露出基体;从断面形貌可以看出,材料脆性断裂产生垂直冲击坑;由于冲击角为 90°时砂尘的法向冲击动能最大,导致涂层内部结合处产生较大应力,硬质层与软质层之间变形不匹配造成层与层之间出现分层现象,如图 6(d)所示,导致裂纹扩展速率增加,质量冲蚀率最高。

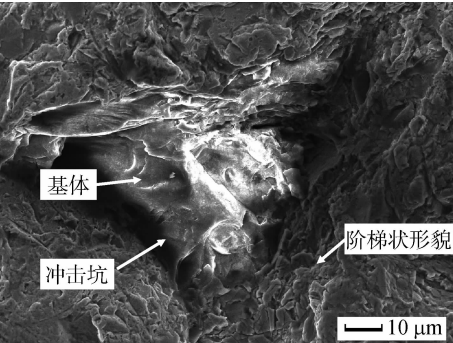




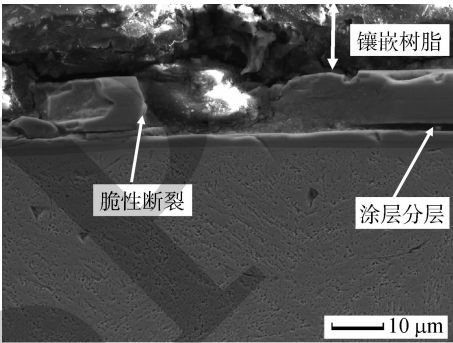
(c) $\alpha=60^\circ$



(c) $\alpha=60^\circ$



(d) $\alpha=90^\circ$



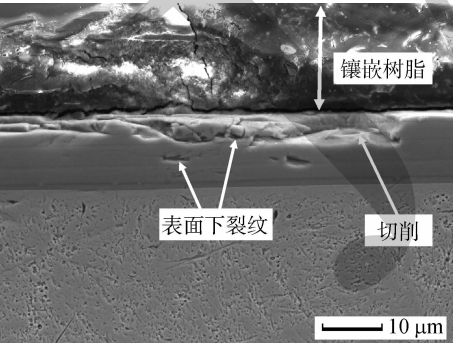
(d) $\alpha=90^\circ$

图 5 TiN/Ti 涂层在不同冲击角下的表面损伤形貌
($t=10\text{ s}$)
Fig. 5 Surface damage morphologies of TiN/Ti coating
at different impact angles ($t=10\text{ s}$)

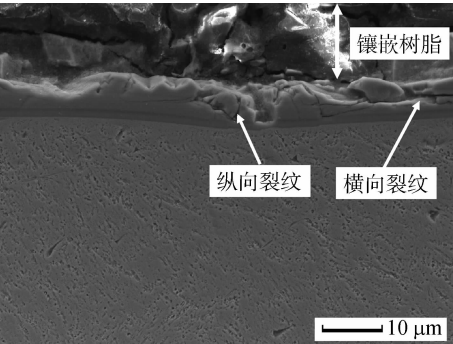
图 6 TiN/Ti 涂层在不同冲击角下的断面损伤形貌
($t=10\text{ s}$)
Fig. 6 Cross-sectional damage morphologies of TiN/Ti
coating at different impact angles ($t=10\text{ s}$)

2.2 TiN/Ti 涂层对基体抗冲蚀性能的影响

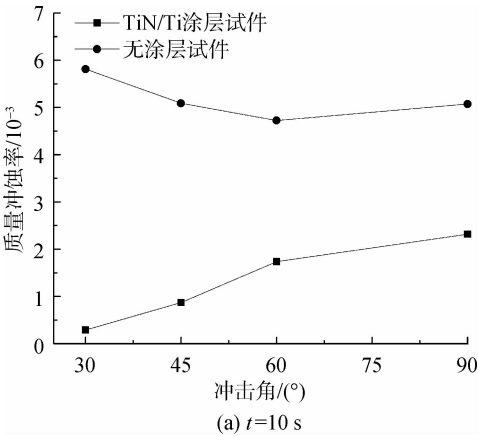
图 7 对比了相同冲击条件下 TiN/Ti 涂层试件与无涂层不锈钢试件的质量冲蚀率。冲击时间 $t=10\text{ s}$ ($s=1.38\text{ g}$) 时,低冲击角如 30° 、 45° 冲蚀时,无涂层不锈钢试件质量冲蚀率分别是 TiN/Ti 涂层试件的 20.0、5.8 倍,高冲击角如 60° 、 90° 冲蚀时,不锈钢试件质量冲蚀率分别是 TiN/Ti 涂层 2.7、2.1 倍;冲击时间 $t=20\text{ s}$ ($s=2.76\text{ g}$) 时,低冲击角度如 30° 、 45° 冲蚀时,不锈钢试件质量冲蚀



(a) $\alpha=30^\circ$



(b) $\alpha=45^\circ$



(a) $t=10\text{ s}$

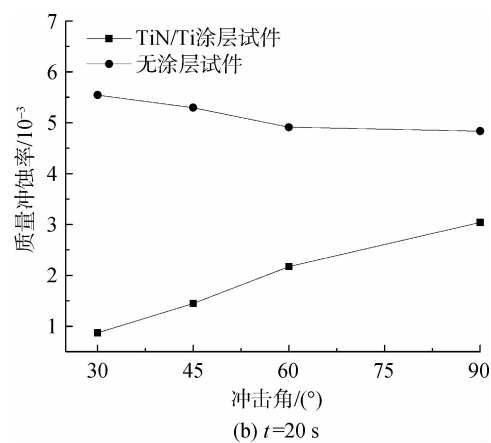


图 7 涂层和不锈钢质量冲蚀率与冲击角的关系
Fig. 7 Relationship between mass erosion rate of stainless steel with/without coating with impact angle

率分别是 TiN/Ti 涂层的 6.3、3.6 倍,高冲击角度如 60°、90°冲蚀时,不锈钢试件质量冲蚀率分别是 TiN/Ti 涂层 2.2、1.5 倍。因此,TiN/Ti 涂层显著提高了不锈钢表面的抗冲蚀性能,且 TiN/Ti 涂层在低冲击角的条件下抗冲蚀性能较高冲击角下更为优异,这是由于 TiN/Ti 涂层内应力大,韧性差,在高冲击角下裂纹扩展速率较大引起材料的剥落增加。

3 结 论

本文开展了砂尘平均速度为 330 m/s 冲击不锈钢及 TiN/Ti 强韧涂层的试验,获得质量冲蚀率,并采用 SEM 对涂层损伤微观形貌进行观测与分析,研究 TiN/Ti 涂层在高速冲击条件下的失效机理,得到以下结论:

- 1) TiN/Ti 涂层质量冲蚀率随冲击角增大而增加,在冲击角为 90°法向冲击时达到最大;冲击时间越长,冲击至试件表面的砂尘量增大,TiN/Ti 涂层质量冲蚀率增加,抗冲蚀性能下降。
- 2) 低冲击角下,砂尘冲击以微切削为主,试件表面存在大量犁削产生的刮痕及沟槽;高冲击角下,涂层内产生较大应力,疲劳断裂产生的纵向裂纹与硬质层及软质层之间变形不匹配而产生的横向裂纹交截扩展导致材料去除。
- 3) TiN/Ti 涂层显著提高了不锈钢的抗冲蚀性能,尤其是在低冲击角下。低冲击角下,涂层能将基体的冲蚀性能提高约 5 倍;高冲击角下能提高约 2 倍。

参考文献:

[1] 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)
[2] CATER T J. Common failures in gas turbine blades[J]. Engineering Failure Analysis,2005,12(2):237-247.
[3] YANG Q,ZHAO L R,CAI F,et al. Wear,erosion and corrosion resistance of CrTiAlN coating deposited by magnetron sputtering[J]. Surface and Coatings Technology,2008,202(16):3886-3892.
[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] BOUSSER E,MARTINU L,KLEMBERG J E,et al. Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications[J]. Surface and Coatings Technology,2014,257:165-181.
[6] BOUSSER E, MARTINU L, KLEMBERG-SAPIEHA J E. In situ real-time solid particle erosion testing methodology for hard protective coatings[J]. Surface and Coatings Technology,2013,237:313-319.
[7] LATHABAI S, OTTMÜLLER M, FERNANDEZ I. Solid particle erosion behaviour of thermal sprayed ceramic, metallic and polymer coatings[J]. Wear,1998,221(2):93-108.
[8] KRELLA A K. Cavitation erosion resistance of Ti/TiN multilayer coatings[J]. Surface and Coatings Technology,2013,228:115-123.
[9] SHIMIZU K,NOGUCHI T,SEITON H,et al. FEM analysis of the dependency on impact angle during erosive Wear[J]. Wear,1999,233/234/235:157-159.
[10] WENSINK H,ELWENSPOEK M C. A closer look at the ductile-brittle transition in solid particle erosion[J]. Wear,2002,253(9/10):1035-1043.
[11] 徐伟胜,何光宇,蔡振兵,等. 硬质颗粒重复冲击 TiN/Ti 涂层损伤分析[J]. 中国表面工程,2017,30(5):28-35.
XU Weisheng, HE Guangyu, CAI Zhenbing, et al. Damage analysis of TiN/Ti coatings under cycling impact with hard particles[J]. China Surface Engineering,2017,30(5):28-35. (in Chinese)
[12] 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.
[13] BORAWSKI B, TODD J A, SINGH J, et al. The influence of ductile interlayer material on the particle erosion resistance of multilayered TiN based coatings[J]. Wear,2011,271(11/12):2890-2898.
[14] 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 ap-

plications[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206 (2/3): 464-472.

[15] YANG Q, SEO D Y, ZHAO L R, et al. Erosion resistance performance of magnetron sputtering deposited TiAlN coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 188/189: 168-173.

[16] SONG Shenglin, ZHOU Kesong, DAI Mingjiang, et al. Structural, mechanical, and sand erosion properties of TiN/Zr/ZrN multilayer coatings[J]. Vacuum, 2015, 122: 179-186.

[17] 曹鑫, 王冠, 何卫锋, 等. TC4 钛合金与多层 TiN/Ti 涂层的砂尘冲蚀损伤试验[J]. 航空动力学报, 2016, 31(9): 2218-2225.

CAO Xin, WANG Guan, HE Weifeng, et al. Sand erosion damage test on TC4 titanium alloy and TiN/Ti multilayer coating[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9): 2218-2225. (in Chinese)

[18] FEUERSTEIN A, KLEYMAN A. Ti-N multilayer systems for compressor airfoil sand erosion protection[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 204(6/7): 1092-1096.

[19] 吴小梅, 李伟光, 陆峰. 固体颗粒冲蚀对钛合金 ZrN 涂层抗冲蚀性能的影响[J]. 航空材料学报, 2006, 26(6): 26-29.

WU Xiaomei, LI Weiguang, LU Feng. Effect of solid particle erosion on erosion resistance of ZrN coating on titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(6): 26-29. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)