

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170406003

硬质颗粒重复冲击 TiN/Ti 涂层损伤分析

徐伟胜¹, 何光宇¹, 蔡振兵², 廖 斌³, 曹 鑫¹, 何卫锋¹

(1. 空军工程大学 等离子体动力学国家级重点实验室, 西安 710038; 2. 西南交通大学 摩擦学研究所, 成都 610031; 3. 北京师范大学 核科学与技术学院, 北京 100875)

摘 要: 航空发动机压气机叶片表面制备硬质涂层可显著提高其抗砂尘冲蚀性能, 但砂粒高角度冲击对涂层损伤严重, 易出现脆性裂纹。采用受控动能型重复冲击设备模拟硬质颗粒对涂层的高角度冲击, 研究调制比、层数结构对 TiN/Ti 涂层冲击损伤的影响, 并根据涂层损伤特征、冲击力学响应以及应力分布分析涂层的破坏机理。结果表明, TiN/Ti 涂层出现剥落和圆周裂纹; 硬质层内部、硬质层与结合层/过渡层界面存在高的应力梯度, 而冲击坑点边缘硬质层上表层受到拉应力且由于材料堆起, 在重复冲击下将导致涂层的疲劳剥落和圆周疲劳裂纹。调制比、层数显著影响涂层冲击响应过程, 其中不同调制比的 2 层涂层, 调制比为 3:1 的抗冲击性能较好; 调制比为 9:1 的不同层数涂层, 4 层结构的抗冲击性能较好。

关键词: TiN/Ti 涂层; 重复冲击; 发动机叶片; 能量吸收率; 接触力

中图分类号: TG174.444

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)05-0028-08

Damage Analysis of TiN/Ti Coatings Under Cycling Impact with Hard Particles

XU Wei-sheng¹, HE Guang-yu¹, CAI Zhen-bin², LIAO Bin³, CAO Xin¹, HE Wei-feng¹

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038; 2. Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031; 3. College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Hard thin coatings deposited on blades of the compressor of an aircraft engine can improve the anti-erosion performance; however, the coatings hardly protect particle damage with a high impact angle and brittle cracks occur easily. A kinetic energy controlled cycling impact test was applied to simulate the normal impact to coatings. The influence of the volume fraction and layers on the impact damage of TiN/Ti coatings was investigated. The failure mechanism of coatings was analyzed through damage characteristics, impact mechanics response, and stress distribution. The results show that spalling and circular crack failures occur in TiN/Ti coatings. The spalling and circular cracks are induced by high stress gradient existing in the hard layer and the interface between the hard layer and the adhesive/transition layer, tensile stress in the upper surface of the hard layer at the edge of the impact zone, and material pilling under cycling impacts. The impact dynamic response remarkably differs with volume fractions and layers. The bilayer coating with a volume fraction of 3:1 shows better anti-impacting performance among different volume fractions, and the coatings with 4 layers shows better anti-impact performance among different layers sharing the same volume fraction of 9:1.

Keywords: TiN/Ti coating; cycling impact; engine-blade; energy absorption rate; contact force

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2017-06-22

网络出版日期: 2017-09-11 16:44; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170911.1644.012.html>

通讯作者: 何卫锋 (1977—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 航空发动机结构强度与可靠性; **Email:** hehe_coco@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51405506, 51375407); 陕西省科技统筹创新工程计划项目 (2015KTCQ01-72); 陕西省自然科学基金 (2015JQ5171)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51405506, 51375407), Shanxi Science & Technology Co-ordination & Innovation Project (2015KTCQ01-72) and Natural Science Foundation of Shanxi (2015JQ5171)

引文格式: 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 W S, HE G Y, CAI Z B, et al. Damage analysis of TiN/Ti coatings under cycling impact with hard particles[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 28-35.

0 引 言

直升机/运输机沙漠环境起飞、降落和低空盘旋时, 发动机不可避免吸入大量砂粒。粒子分离器对粗砂的分离效率为 90%, 对细沙的效率为 80%, 因而仍然有大量砂粒反复冲击压气机叶片, 导致表层材料产生磨损和疲劳裂纹^[1], 严重影响航空发动机飞行安全可靠, 大大降低使用寿命。叶片表面沉积硬质涂层是提高发动机抗沙尘冲击磨损性能的主要方法^[2-3]。TiN 涂层由于其能提高钛合金基体抗冲蚀性能 5 倍以上, 已被美国应用到发动机叶片上^[4]。TiN 涂层冲蚀损伤机理为低角度的微切削和高角度冲击导致的裂纹与剥落, 且涂层冲蚀质量损伤率随冲蚀角度增大而上升, 在 90°时达到最大^[5]。增加涂层硬度可提高 TiN 涂层抗冲蚀磨损性能, 然而硬度上升将使涂层脆性增大, 导致韧性不足, 致使涂层砂粒高角度冲击下协调变形能力下降, 冲击产生的裂纹和剥落更为严重^[6], 因而涂层的抗高角度冲击性能受到重视。因此, TiN 与延性金属交替排列的多层结构涂层受到广泛关注^[7]。Chai 研究表明, 涂层破坏临界载荷受涂层结构影响, 其中多层结构的调制比优化值应在 9:1 以上^[8]。Brian^[9]系统研究了 TiN/Ti 多层涂层的冲蚀性能, 发现不同结构的涂层在不同冲蚀条件下冲蚀表现差异很大, 如调制比为 19:1 的 8 层 TiN/Ti 在石英颗粒 150 m/s 和 180 m/s 冲蚀下抗冲蚀性能较好, 而调制比为 3:1 的 32 层 TiN/Ti 涂层抗大尺寸玻璃细珠高速冲蚀性能较好。可见, 涂层的调制比和层数是影响其抗冲蚀性能的重要因素。

关于 TiN 涂层砂粒高角度冲击损伤的研究很多, 大部分都是采用沙尘冲蚀试验作为研究手段^[10]。虽然沙尘冲蚀试验能够较为真实地模拟涂层服役环境, 但沙尘冲蚀过程中, 砂粒数量难以计量, 外形复杂, 且速度大小与方向得不到精准控制^[11-12], 难以剥离微切削作用而对涂层高角度冲击损伤进行研究。Knotek^[13]首先研制出了一套重复冲击设备, 实现了以单一小球重复冲击涂层的疲劳试验。该设备是基于力控制的重复冲击试验机, 主要用于刀具涂层的动态载荷试验^[14-17]。其通过调整载荷实现不同冲击力的冲击, 且冲击过程中小球始终与载荷加载装置保持连接, 这与砂粒实际的冲击过程不符, 不适用于砂粒冲击涂层试

验研究。蔡振兵^[18]近年来研制出基于力或速度控制型的重复冲击设备, 实现冲击块在水平方向上以某一特定速度自由冲击试验。

由于沙尘高角度冲蚀条件下涂层冲击损伤最为严重, 且试验过程中难以排除微切削影响的问题, 文中采用速度控制型单颗粒重复冲击设备, 对不同调制比、层数的 TiN/Ti 涂层在恒定速度下进行垂直重复冲击试验, 通过力、激光位移传感器获得冲击力响应和能量吸收率, 采用激光共聚焦显微试验测试冲击坑点二维轮廓和体积, 并进行数值仿真计算获得涂层冲击条件下的应力分布, 研究层数对多层 TiN/Ti 涂层在高角度冲击下的失效特征与机理, 分析涂层层数对抗冲击性能的影响规律, 为多层结构设计提供试验依据。

1 试验方法

1.1 TiN/Ti 涂层准备

为研究涂层结构对 TiN/Ti 涂层抗垂直冲击性能的影响, 制备 3 种不同调制比和 4 种不同层数的 TiN/Ti 涂层。所有 TiN 层和 TiN 层/TC4 钛合金基体之间均制备一层 Ti 层, 作为结合层或过渡层。硬质层 (TiN) 与结合层或过渡层 (Ti) 厚度比为调制比。TC4 钛合金基体镀膜前经过丙酮超声波清洗 3 次, 采用 MEVVA 离子源注入与 FCVA 沉积复合技术制备涂层, 工艺参数为: 靶材为 99.999% 高纯钛; Ti⁺注入电压为 12 kV, 剂量为 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$; Ti 层沉积弧流为 100 A, 衬底偏压为 -200 V, 束流为 550 mA; TiN 层沉积弧流为 100 A, 衬底偏压 -200 V, 束流 600 mA, N₂ 流量 22 mL/min。

采用 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜 (SEM) 测试涂层厚度。利用 Nano Indenter G200 型纳米压痕仪进行 TiN 涂层的纳米硬度与弹性模量测试: TiN 泊松率取 0.27, 压入深度为 1 μm, 测量 5 次并取均值。测试结果如表 1 所示, 如表中编号

表 1 TiN/Ti 涂层结构和力学性能

Table 1 Structures and mechanical properties of TiN/Ti coatings				
Coatings	Thickness / μm	Layer	Modulation (TiN:Ti)	(H ³ /E ²) / GPa
L2(19:1)	14.78	2	19:1	0.18
L2(9:1)	10.84	2	9:1	0.22
L2(3:1)	10.74	2	3:1	0.26
L4(9:1)	10.63	4	9:1	0.24
L10(9:1)	11.24	10	9:1	0.09
L20(9:1)	9.73	20	9:1	0.10

L10(9:1),表示涂层有5层硬质层和5层结合层/过渡层,其余可类推。

1.2 动能控制型重复冲击试验

动能控制型重复冲击试验机能够实现冲击块与载荷加载装置的分离且能对冲击速度进行控制,图1为该设备结构示意图。

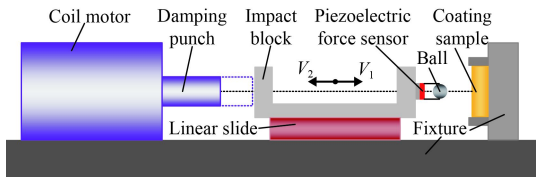


图1 动能控制型重复冲击设备示意图
Fig.1 Schematic illustration of the kinetic energy-controlled impact tester

试验过程中,小球与冲击块连接,阻尼冲头为载荷输出装置,由音圈电机进行控制。对一个冲击过程而言,冲击块在阻尼冲头驱动作用下获得动能,当其速度达到设定值 V_1 后,与阻尼冲头分离,然后冲击试样表面。在小球与试样接触过程中,由于冲击块及小球在水平方向上无其他力平衡来自涂层/基体体系的力作用,其将从涂层/基体体系的弹性恢复中获得动能,并以速度 V_2 反弹。通过特殊结构装置,冲击块停止并与阻尼冲头接触,等待下一次冲击。通过线圈电机响应,可控制冲击的速度和频率,同时也可在冲击块上添加重物,改变冲击块动能。

砂粒冲击,实质上是砂粒在垂直材料表面方向上以某一速度进行冲击和碰撞的过程,涉及到材料的力响应和能量吸收。速度控制型的单颗粒重复冲击试验,其冲击块在水平导轨上滑行,摩擦力可忽略不计^[18],与砂粒冲击试样的实际过程相符。每一次冲击的力响应及速度变化被实时记录。冲击试验参数如表2所示,冲击块质量为215 g,单次冲击动能为1.548 mJ。

涂层冲击磨损区域的二维轮廓和体积通过OLS400型激光共聚焦显微镜(Confocal laser scanning microscope, CLSM)测得,每次测试重复3次并取均值。

采用ABAQUS 6.13软件,研究层涂层在颗粒冲击条件下的应力分布,并结合涂层的结构和力学性能特征,分析冲击条件下涂层冲击损伤特征。

表2 TiN/Ti 涂层重复冲击试验参数	
Table 2 Parameters of cycling impact testing of TiN/Ti coatings	
Parameters	Values
Material (ball)	Si ₃ N ₄
Diameter / mm	2.38
Mass of impact block / g	215
Velocity / (mm·s ⁻¹)	120
Impact cycles	10 ⁴
Kinetic energy / mJ	1.548

2 结果与分析

垂直入射条件下,硬质颗粒冲击涂层表面,忽略磨损的影响,可认为材料表面冲击坑点深度最小或体积最小的涂层,其抗冲击变形性能最好。

2.1 重复冲击结果

对不同结构TiN/Ti涂层进行Si₃N₄硬质颗粒重复冲击试验,经过10⁴冲击循环后,其冲击坑点的二维轮廓如图2所示,深度和体积如图3所示。对3种调制比的TiN/Ti涂层,调制比为3:1的L2(3:1)的冲击坑点深度和体积最小,分别是5.36 μm和1.51×10⁵ μm³,L2(19:1)的次之,L2(9:1)的最大。对不同层数的TiN/Ti涂层,冲击坑宽度在510~540 μm,其随层数增加先增加后减小,其中涂层L4(9:1)的坑点宽度最小,为513.29 μm,涂层L10(9:1)的最大,为532.29 μm。涂层冲击坑点深度随涂层层数的增加先减小后增大,其中L2(9:1)的最小,为6.73 μm,L10(9:1)的最大,为9.33 μm;涂层L4(9:1)的坑点体积最小,为2.49×10⁵ μm³,L10(9:1)的最大,为3.4×10⁵ μm³。同时,所有涂层冲击坑点边缘均存在材料堆起。

若从坑点深度和体积大小来衡量涂层的冲击变形性能,对不同调制比的2层TiN/Ti涂层,L2(3:1)的抗冲击性能最好,L2(19:1)的次之,L2(9:1)的最差;对调制比为9:1的多层TiN/Ti涂层,层数为4的涂层L4的抗冲击性能相对最好,L2(9:1)的次之,L10(9:1)和L20(9:1)的最差。硬质涂层 H^3/E^2 值(H 为纳米硬度, E 为弹性模量)也被用来评价抵抗塑性变形能力。研究认为^[19], H^3/E^2 值越大,抵抗塑性变形的能力越强。由表1可知,涂层L2(3:1)的 H^3/E^2 值最大,为0.26 GPa;L4(9:1)次之,为0.24 GPa,L2(9:1)的为0.22 GPa,

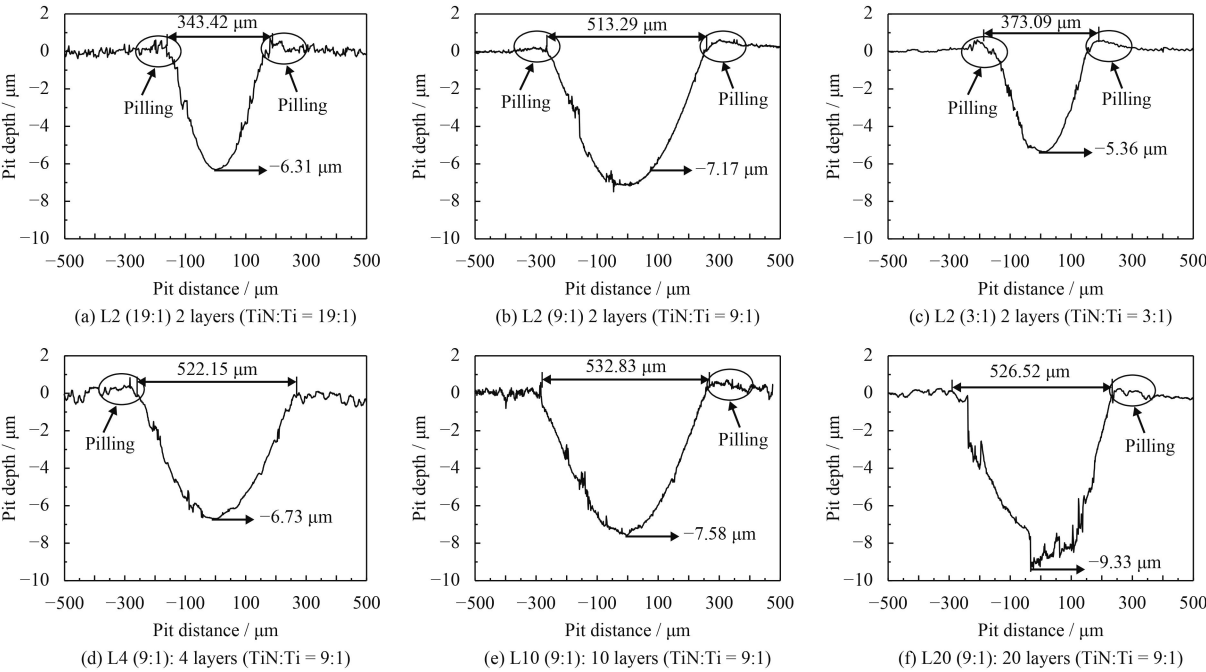


图 2 不同结构的 TiN/Ti 涂层冲击坑点二维轮廓

Fig.2 2D profile of impact scar of different structural TiN/Ti coatings

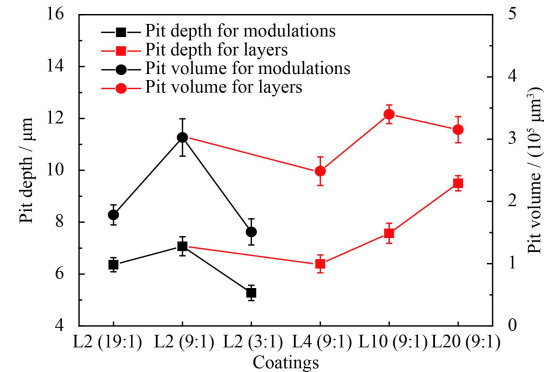


图 3 TiN/Ti 涂层冲击坑点的深度和体积

Fig.3 Depth and volume of scar of impact TiN/Ti coatings

L10(9:1) 和 L20(9:1) 最小, 分别为 0.09 GPa 和 0.10 GPa。从而可得到相同的结果。

TiN/Ti 涂层在速度为 120 mm/s 的 Si_3N_4 陶瓷硬质球的冲击条件下, 第 10^4 次冲击的力响应过程如图 4 所示。由图 4 可知, 单次冲击接触时间在 0.43~0.65 ms 之间。涂层受到的接触力呈现先增大后减小的趋势, 当冲击力达到最大值时, 涂层/基体冲击区域变形最大。根据冲击前后小球速度方向的变化, 将冲击过程分为两个阶段: 接触阶段和分离阶段。对涂层 L2(9:1) 而言, 前者经历的时间比后者的长, 而对其余 3 种涂层来说, 前者经历的时间比后者的短。接触阶段和分离阶段所经历时间的不同, 表明该冲击接触过程为非弹

性碰撞。在冲击接触过程, 冲击块动能将主要转变到以下 4 个方面: 材料的塑性变形能, 弹性变形能, 表面断裂能, 以及其它形式的能量 (热, 光)^[20-21]。

在相同冲击条件下, 对不同调制比的 TiN/Ti 涂层, 涂层 L2(3:1) 单次冲击接触时间最长, 为 0.66 ms, 达到冲击力峰值所需的时间也最长, 为 0.35 ms, 冲击力峰值最小, 为 129.08 N; L2(9:1) 的单次冲击接触时间最小, 为 0.54 ms, 达到冲击

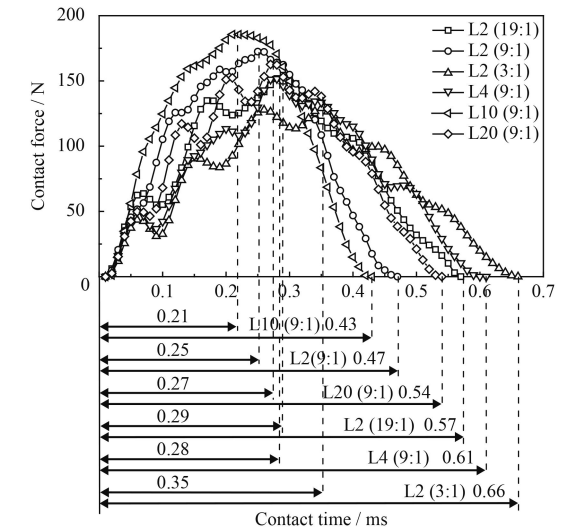


图 4 TiN/Ti 涂层第 10^4 次的冲击力响应曲线

Fig.4 Force response curves at 10^4 th impact of TiN/Ti coatings

力峰值所需的时间也最小,为 0.27 ms,冲击力峰值最大,为 172.49 N。对不同层数的 TiN/Ti 涂层, L10(9:1) 单次冲击的接触时间最少,为 0.43 ms,到达冲击力值峰值所需时间最小 0.21 ms,且冲击力峰值最大,为 185.60 N;涂层 L4(9:1) 的单次冲击接触时间最长,为 0.61 ms,达到其冲击力最大值处所需时间最长,为 0.28 ms,冲击力峰值最小,为 151.65 N。由图 4 可得,单次冲击的力响应时间的大小与冲击力峰值大小相反,即接触时间越短,冲击力峰值越大,涂层的单次冲击力峰值大小: L10(9:1)>L2(9:1)>L20(9:1)>L2(19:1)>L4(9:1)>L2(3:1)。

根据冲击前后小球入射和反弹速度得到其能量损耗率,即涂层对颗粒冲击的能量吸收率,如图 5 所示。能量吸收率与冲击力峰值有相同的增减趋势,即随冲击力峰值的增大而增加,对不同调制比, L2(3:1) 的最小,为 30.92%, L2(9:1) 的最大,为 36.24%;对不同层数,涂层 L4(9:1) 的最小,为 31.82%, L10(9:1) 的最大,为 37.41%。

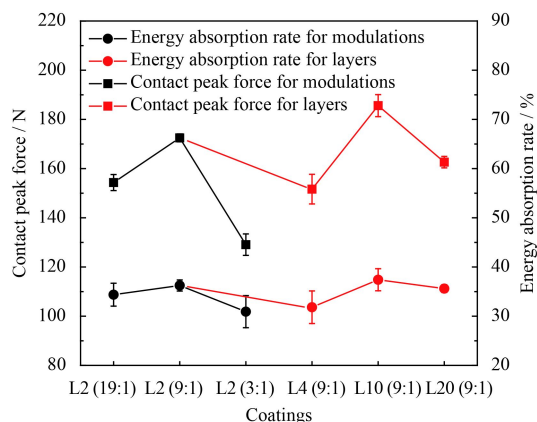


图 5 TiN/Ti 涂层第 10^4 次冲击的接触力峰值和能量吸收率

Fig.5 Contact peak force and energy absorption rate at 10^4 th impact of TiN/Ti coatings

与其他调制比的涂层相比,涂层 L2(3:1) 的冲击力峰值和能量吸收率最小,而与其他层数的涂层相比,涂层 L4(9:1) 的冲击力峰值和能量吸收率最小,这是 L4(3:1) 和 L4(9:1) 的冲击坑点深度和体积在所有涂层中最小的主要原因。这表明涂层结构的改变,影响其与硬质球碰撞的冲击力学响应,进而影响涂层损伤行为。

2.2 涂层的重复冲击损伤微观形貌

不同结构涂层的重复冲击损伤微观形貌如

图 6 所示。所有涂层的冲击坑点边缘均存在圆周裂纹,其中二层涂层 (L2(19:1), L2(9:1), L2(3:1)) 冲击坑点中存在的圆周裂纹最多,涂层 L20(9:1) 和 L10(9:1) 次之, L4(9:1) 的最少。在冲击坑点中间位置,出现涂层的剥落,主要发生在裂纹的两侧,如图 6 中的 M 区域所示,其中涂层 L20(9:1) 出现较大面积的涂层剥落,损伤最为严重,涂层 L2(9:1)、L2(3:1) 和 L10(9:1) 次之,涂层 L2(19:1) 和 L4(9:1) 的剥落最少,损伤最小;同时,在非裂纹区域也存在剥落,如图 6 中的 N 区域。

不同调制比涂层 L2 的层数为 2,即只有一层结合层 Ti 和硬质层 TiN,随着调制比减小,即 Ti 层体积分数增加, TiN 层体积分数减小,涂层受到垂直方向上的冲击时,由于 TiN 层为脆性材料,抵抗变形能力较差,冲击坑点边缘在冲击条件下容易断裂形成裂纹^[7],因此,调制比为 3:1 的 2 层的圆周裂纹及其两侧剥落较多,而调制比为 19:1 的较少。当层数增加后,涂层断裂韧性提高^[7],硬质层之间的延性金属层 Ti 提升涂层变形协调能力,减少涂层表层裂纹的出现,如涂层 L4(9:1)、L10(9:1) 和 L20(9:1)。这表明,增加涂层层数可减少垂直冲击条件下圆周裂纹的产生。由表 1 的 H^3/E^2 值和图 3 的坑点深度值可知,层数为 10 和 20 的 H^3/E^2 值最小,坑点深度最大,坑点边缘变形大,因而其产生圆周裂纹及其两侧剥落较多;而层数为 4 的涂层 H^3/E^2 值最大,坑点深度最小,坑点边缘变形小,圆周裂纹及其两侧剥落最少。Brian^[7]指出,多层结构的层数并非越多越好,其与冲击条件有关,并在某个冲击条件下存在最优层数。因此,在文中试验条件下,4 层结构 TiN/Ti 圆周裂纹和剥落最少,其抗冲击性能最好。

建立基体为 TC4 的多层 TiN/Ti 涂层计算模型,冲击颗粒为粒径 100 μm 的 Si_3N_4 球,材料参数见表 3。TiN/Ti 和 TC4 设置为 4 节点轴对称减积分四边形网格, Si_3N_4 球定义为刚形体,采用三角形轴对称单元,冲击速度为 100 m/s,其应力分布如图 7 所示。

如图 7 所示,硬质层内部 (A 区域) 和硬质层与结合层/过渡层的界面两侧 (B 区域) 分别存在拉、压应力,两者交汇处存在非常大的应力梯度。由于涂层中存在非常多的缺陷,其往往成为损伤源。涂层损伤主要是由疲劳机制引起的,导

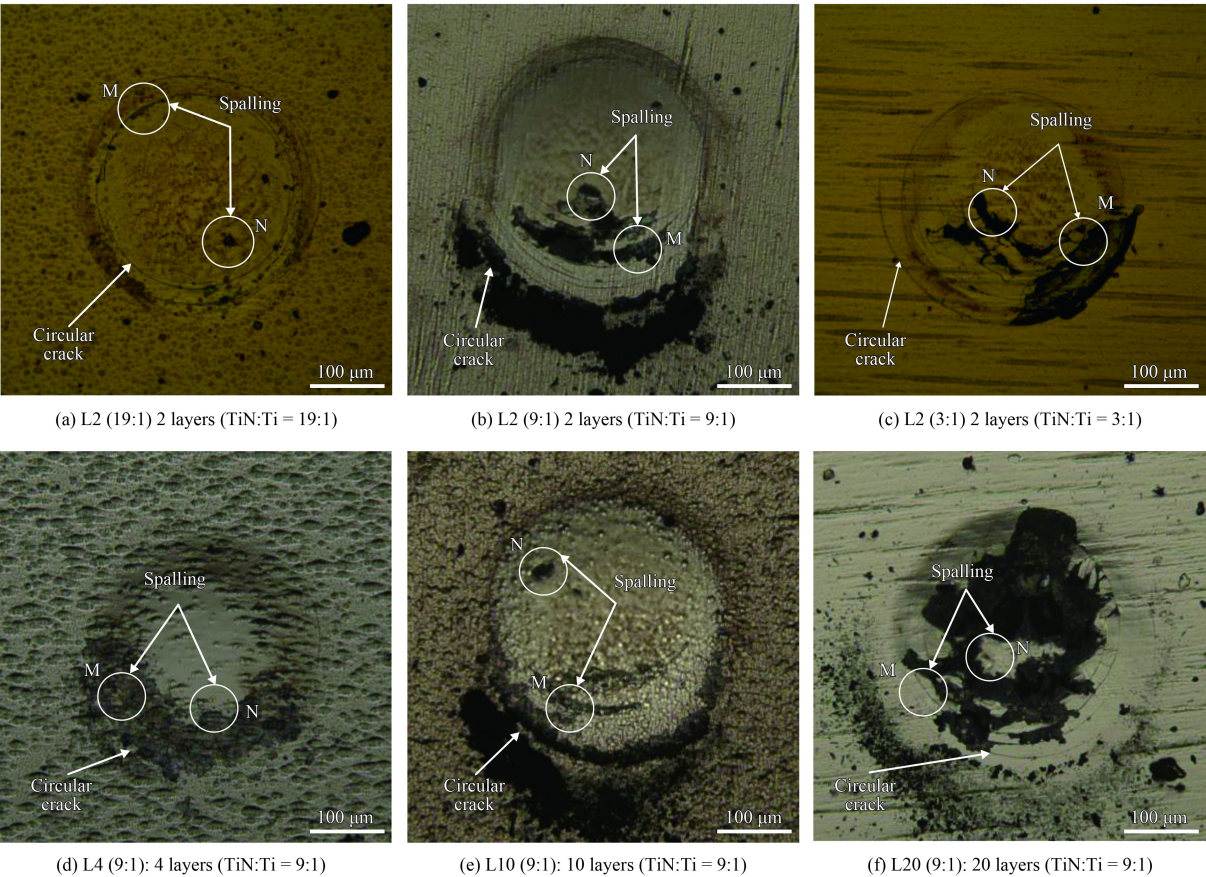


图 6 不同结构 TiN/Ti 涂层冲击坑点微观形貌

Fig.6 Morphologies of impact zone of different structural TiN/Ti coatings

表 3 TiN/Ti 多层涂层数值仿真的材料参数

Table 3 Material parameters of numerical simulation of TiN/Ti coatings

Material	TC4	Ti	TiN	Si ₃ N ₄
Density / (kg·m ⁻³)	4 428	4 500	5 400	3 200
Elastic modulus / GPa	104.8	100	480	
Poisson's ratio	0.31	0.27	0.25	

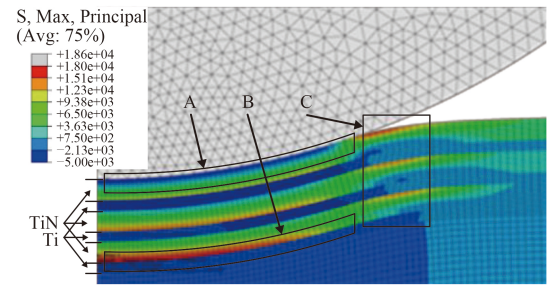


图 7 TiN/Ti 多层涂层冲击应力分布

Fig.7 Stress distribution of multilayer TiN/Ti coating under impacting

致涂层片块剥落^[22]。因而在重复冲击下将导致在硬质层内部和硬质层与结合层/过渡层界面的高应

力梯度将使涂层产生疲劳剥落。Matthews 将这种涂层分离剥落分为两种类型^[15, 23]，一是硬质层内部分层形式的内聚力型剥落，另一个是硬质层和结合层/过渡层分离形式的结合力型剥落。

C 区域为颗粒与涂层的接触半径外周表面处应力分布，硬质层上层存在拉应力。冲击过程中硬质层的反复拉应力会诱发涂层疲劳裂纹^[24]，如图 6 中所示的圆周裂纹；硬质层与结合层/过渡层之间同样存在拉/压应力的应力梯度，会导致涂层的疲劳剥落，如图 6 中的 M 区域。同时，C 区域结合层/过渡层和基体为延性金属，受到颗粒挤压应力，在冲击坑点边缘形成材料堆起，如图 2 中冲击坑点边缘处所示的材料堆起，其进一步加剧涂层的圆周疲劳裂纹和涂层剥落的产生。

因此，在硬质颗粒重复冲击条件下，涂层冲击坑点的圆周裂纹是由于硬质层上层存在反复拉应力导致的疲劳裂纹，而剥落是硬质层内部和硬质层与延性金属界面受到重复的高应力梯度导致的。

3 结 论

采用受控动能型重复冲击设备,使用硬质 Si_3N_4 颗粒,对不同调制比、层数的 TiN/Ti 涂层进行重复冲击试验,研究层数对 TiN/Ti 涂层冲击响应和损伤行为的影响,得到以下结论:

(1) 在硬质颗粒重复冲击条件下, TiN/Ti 涂层结构显著影响其抗冲击性能。冲击力响应受涂层结构的影响,且涂层能量吸收率随冲击力增大而增加。对不同调制比的二层涂层,调制比为 3:1 的冲击力峰值、能量吸收率最小,分别为 129.08 N 和 30.92%,磨痕深度和体积也最小,抗冲击性能最好;对调制比为 9:1 的不同层数涂层,4 层结构的冲击力峰值、能量吸收率、磨痕深度和体积最小,抗冲击性能最好。

(2) 在硬质颗粒重复冲击条件下,圆周裂纹是由于硬质层产生疲劳裂纹导致的,硬质层内部和结合层/过渡层界面受到重复的高应力梯度是产生剥落的主要原因。

(3) 涂层抗重复冲击性能与其 H^3/E^2 值有关,且 H^3/E^2 值大的抗冲击性能优于值小的。

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 G Y, LI Y H, CHAI Y, 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] 袁福河,张佳平,程玉贤,等.我国航空发动机用几种涂层技术的差距及未来发展[J].航空制造技术,2016(1-2): 40-44.
YUAN F H, ZHANG J P, CHENG Y X, et al. Gap and future in technologies of coatings for aeroengine in China[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(1-2): 40-44 (in Chinese).
- [3] 张辉,付尧,张成成,等.激光原位制备 TiN/Al 复合涂层及其抗冲蚀性能[J].中国表面工程,2016,29(4): 125-131.
ZHANG H, FU Y, ZHANG C C, et al. In-situ synthesized TiN/Al composite coatings by laser nitriding and their erosion resistance[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 125-131 (in Chinese).
- [4] United States Department of Defense. MIL-STD-3033 Particle/sand erosion testing of rotor blade protective materials[S]. Washington, D.C.: United States Department of De-

fense, 2010.

- [5] BOUSSER E, MARTINU L, KLEMBERG-SAPIEHA J E, et al. Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 257: 165-181.
- [6] 曹鑫,何卫锋,何光宇,等. DLC、TiN 涂层对 TC4 钛合金抗砂尘冲蚀性能的影响[J].中国表面工程,2016,29(4): 60-67.
CAO X, HE W F, HE G Y, et al. Effects of DLC and TiN coatings on sand erosion resistance of TC4 titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 60-67 (in Chinese).
- [7] BRIAN B. Multilayer erosion resistant coatings for the protection of aerospace components[D]. Philadelphia: The Pennsylvania State University, 2011.
- [8] CHAI H, LAWN B L. Cracking in brittle laminates from concentrated loads[J]. Acta Materialia, 2002, 50(10): 2613-2625.
- [9] BRIAN B, JOGENDER S, JUDITH A T, et al. Multi-layer coating design architecture for optimum particulate erosion[J]. Wear, 2011, 271(11-12): 2782-2792.
- [10] BOUSSER E, MARTINU L, KLEMBERG-SAPIEHA J E, et al. Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 257: 165-181.
- [11] TIAN HH, ADDIE GR, BARSH EP, et al. A new impact erosion testing setup through Coriolis approach[J]. Wear, 2007, 263(1-6): 289-294.
- [12] LIU R, YAO J H, ZHANG Q L, et al. Effects of molybdenum content on the wear/erosion and corrosion performance of low-carbon Stellite alloys[J]. Materials & Design, 2015, 78: 95-106.
- [13] KNOTEK O, SCHREY A, LEYENDECKER T, et al. A new technique for testing the impact load of thin-films-the coating impact test[J]. Surface & Coating Technology, 1992, 54(1-3): 102-107.
- [14] BOBZIN K-D, BAGCIVAN N, EWERING M, et al. Wear behavior of HPPMS deposited (Ti, Al, Si)N coating under impact loading[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2011, 42(3): 165-171.
- [15] ZHU X D, DOU H L, BAN Z G, et al. Repeated impact test for characterization of hard coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(9-11): 5493-5497.
- [16] BOUZAKIS K D, LONTOS A, MICHAILIDIS N, et al. Determination of mechanical properties of electron beam-physical vapor deposition-thermal barrier coatings (EB-PVD-TBCs) by means of nanoindentation and impact testing[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 163: 75-80.
- [17] HEINKE W, LEYLAND A, MATTHEWS A, et al. Evalu-

ation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests[J]. Thin Solid Films, 1995, 270(1-2): 431-439.

[18] LIN Q W, CAI Z B, CHEN Z Q, et al. Influence of diameter-thickness ratio on alloy Zr-4 tube under low-energy impact fretting wear[J]. Materials Today Communications, 2016, 8: 79-90.

[19] MUSIL J. Hard and superhard nanocomposite coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 125(1-3): 322-330.

[20] CAI Z B, GUAN H D, CHEN Z Q, et al. Impact fretting wear behavior of 304 stainless steel thin-walled tubes under low-velocity[J]. Tribology International, 2017, 105: 219-228.

[21] UETZ H. Wear as an energy transformation process[J]. Wear, 1978, 49(2): 253-264.

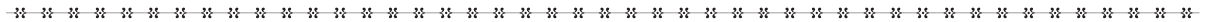
[22] BOUZAKIS K. Strain rate effect on the fatigue failure of thin PVD coatings: An investigation by a novel impact tester with adjustable repetitive force[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44: 89-97.

[23] BANTLE R, MATTHEWS A. Investigation into the impact wear behavior of ceramic coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 1995, 74-75(1-3): 857-868.

[24] 谢文伟. 氮化物涂层的冲蚀磨损模拟研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012.

XIE W W. Numerical simulation study on erosion wear of nitride coatings[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2012 (in Chinese).

(责任编辑: 常青)



• 本刊讯 •

《中国表面工程》关于参考文献著录的要求

本刊参考文献符合国标 GB/T7714—2015, 并参考 CAJ-CDB/T1-1998 技术规范, 采用顺序编码著录, 依照其在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出, 并将序号至于方括号内, 排列于文后。参考文献应尽量引用国内外正式公开发表的引文且各项信息齐全, 作者的英文名采用姓前名后格式, 姓用全称且首字母大写, 名用缩写且保留大写的首字母, 作者在 3 名以上只列前 3 名, 后加“等”; 题名后应标注文献标识类型; 期刊名称(包括英文期刊)采用全称; 著录期刊的年、卷、期信息应齐全。具体格式如下:

- ① 期刊: [序号] 作者. 题名[J]. 刊名, 出版年, 卷(期): 起止页码.
- ② 论文集: [序号] 作者. 题名[C]. 编者. 文集名, 出版地: 出版者, 出版年, 起止页码.
- ③ 学位论文: [序号] 作者. 题名[D]. 保存地: 学位授予单位, 年份.
- ④ 专著: [序号] 著者名. 书名[M]. 版本. 出版地: 出版者, 出版年.
- ⑤ 报告: [序号] 作者名. 报告题名[R]. 出版地: 出版者, 出版年.
- ⑥ 标准: [序号] 标准代号. 标准顺序号 - 发布年. 标准名称[S].
- ⑦ 专利: [序号] 专利所有者. 专利题名: 专利号[P]. 年 - 月 - 日 (公告日期).
- ⑧ 报纸: [序号] 作者. 题名[N]. 报纸名, 年 - 月 - 日 (版次).
- ⑨ 电子文献: [序号] 作者名. 题名[J/OL] ([EB/OL]或[DB/OL]). 电子文献出处或可获得的地址, 发表或更新日期.

另为适应国际数据库的要求, 从 2014(6) 期开始, 本刊要求原属中文的参考文献需同时标出其对应的英文格式。例如:

[1] 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.

HE J W. Comments on nano-treatment of surface attrition via historical review[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 1-13 (in Chinese).

(本刊编辑部 供稿)