

# 恒定动能 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 颗粒重复冲击不同厚度 TiN/Ti 涂层损伤特征对比分析

吕长乐<sup>1</sup>, 何卫锋<sup>1</sup>, 徐伟胜<sup>1</sup>, 蔡振兵<sup>2</sup>, 廖斌<sup>3</sup>, 曹鑫<sup>1</sup>, 谭超<sup>1</sup>

(1.空军工程大学 等离子体动力学重点实验室, 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:** **目的** 研究砂粒冲击航空发动机压气机叶片不同厚度的 TiN/Ti 硬质涂层损伤特征与机理。**方法** 采用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  硬质球恒定动能垂直重复冲击试验方法, 研究厚度对 TiN/Ti 涂层冲击损伤的影响。通过对比涂层动力学响应、能量吸收率、冲击坑点轮廓、 $H^3/E^2$  值和损伤形貌, 分析不同厚度涂层的冲击坑点损伤特征。利用 ABAQUS 软件仿真获得垂直冲击下涂层的应力分布。**结果** 在调制比为 9:1 的两层 TiN/Ti 涂层中, 厚度为 25  $\mu\text{m}$  的涂层坑点直径最大, 达到 382.49  $\mu\text{m}$ , 比坑点直径最小的涂层 (20  $\mu\text{m}$ ) 大了 24.8%; 厚度为 25  $\mu\text{m}$  的涂层坑点最深, 达到 8.17  $\mu\text{m}$ , 比坑点最浅的涂层 (15  $\mu\text{m}$ ) 大了 49.9%; 厚度为 5  $\mu\text{m}$  涂层的接触力峰值最大, 为 161.4 N, 比接触力峰值最小的涂层 (20  $\mu\text{m}$ ) 大了 26.1%。随着涂层厚度的增加, 涂层的抗冲击能力先增加后减小, 厚度为 20  $\mu\text{m}$  的涂层抗冲击能力最好。冲击坑点损伤特征有三种: 中心区与过渡区的疲劳剥落与疲劳磨损, 边缘区的疲劳圆周裂纹与疲劳剥落, 涂层/基体变形, 其中, 以剥落为主。**结论** 硬质层内的应力梯度和重复交变拉/压应力导致硬质层内产生疲劳圆周裂纹和疲劳剥落, 硬质层与结合层界面处的高应力梯度导致产生层间疲劳剥落。

**关键词:** 重复冲击; TiN/Ti 涂层; 动力学响应; 疲劳圆周裂纹; 疲劳剥落; 应力梯度

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0205-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.028

## Comparative Analysis of Cycling Impact Damage Characteristics of TiN/Ti Coatings with Different Thickness under Constant Kinetic Energy $\text{Si}_3\text{N}_4$ Particles Mode

LYU Chang-le<sup>1</sup>, HE Wei-feng<sup>1</sup>, XU Wei-sheng<sup>1</sup>, CAI Zhen-bing<sup>2</sup>,  
LIAO Bin<sup>3</sup>, CAO Xin<sup>1</sup>, TAN Chao<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Science and Technology on Plasma Dynamics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2.Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3.School of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the damage characteristics and mechanism of TiN/Ti hard coatings with different thick-

收稿日期: 2018-06-22; 修订日期: 2018-09-03

**Received:** 2018-06-22; **Revised:** 2018-09-03

**基金项目:** 陕西省重点研发计划 (2017ZDXM-GY-048)

**Fund:** Key Research and Development Program of Shaanxi (2017ZDXM-GY-048)

**作者简介:** 吕长乐 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为涂层技术。

**Biography:** LYU Chang-le (1994—), Male, Master, Research focus: coatings technology.

**通讯作者:** 何卫锋 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为航空发动机部件表面强化与特种涂层技术。邮箱: hehe\_coco@163.com

**Corresponding author:** HE Wei-feng (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: aero-engine parts surface enhancement and special coatings technology. E-mail: hehe\_coco@163.com

ness deposited on the aero-engine compressor blades under the impact of sand particles. Vertical cycling impact test of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  hard particle under constant kinetic energy was adopted. The influence of thickness on the impact damage of TiN/Ti coatings was investigated. The impact damage characteristics of coatings with different thickness were analyzed by dynamic response of coatings, energy absorption rates, contours of impact pit,  $H^3/E^2$  values of coatings and damage morphologies. The stress distribution of coating under normal impact was obtained by ABAQUS software simulation. It was found that among the bilayer TiN/Ti coating of modulation 9 : 1, the pit diameter of coating with 25  $\mu\text{m}$  was the largest, about 382.49  $\mu\text{m}$ , and 24.82% larger than the minimum pit diameter of coating with 20  $\mu\text{m}$ . The pit depth of coating with 25  $\mu\text{m}$  was the largest, about 8.17  $\mu\text{m}$  and 49.91% larger than the minimum pit depth of coating with 15  $\mu\text{m}$ . The contact peak force of coating with 5  $\mu\text{m}$  was the largest, about 161.44 N and 26.16% larger than the minimum contact peak force of coating with 20  $\mu\text{m}$ . There were three characteristics of impact pit damage: the fatigue spalling and fatigue wear in the central zone and intermediate zone, fatigue circular crack and fatigue spalling in peripheral zone and deformation of coating/substrate. Spalling was the main damage characteristic. With the increase of the coating thickness, the impact resistance of coating increases first and then decreases. The coating with 20  $\mu\text{m}$  thickness shows the best anti-impact performance among different thickness. The stress gradient and cycling alternating tension-compression stress in the hard layer account for the fatigue circular crack and fatigue spalling and the high stress gradient in interface of hard and bonding layers accounts for the interface fatigue pilling.

**KEY WORDS:** cycling impact; TiN/Ti coating; dynamic response; fatigue circular crack; fatigue spalling; stress gradient

直升机在沙漠服役过程中,其旋翼下产生的下洗气流,会将地面沙尘吸入发动机,使发动机压气机叶片受到严重的砂粒冲击磨损,导致其寿命和效率大大下降<sup>[1]</sup>。在直升机压气机前端加装粒子分离器是提高沙尘冲蚀防护的一种途径,但由于分离器不能完全分离砂粒,导致叶片仍会受其重复冲击,使表面产生磨损和裂纹<sup>[1-2]</sup>。而在叶片表面沉积硬质涂层是提高沙尘冲蚀防护性能的另一种有效途径<sup>[1,3-4]</sup>。目前,美国、俄罗斯、加拿大等航空大国已经将抗冲蚀硬质涂层应用在多种型号的直升机上,较为典型的有 MDS-PRAD 公司的“ER7”涂层,这种抗沙尘冲蚀涂层与无涂层的叶片相比,其寿命提高了 3.3 倍<sup>[1]</sup>。涂层冲击损伤过程为疲劳损伤过程<sup>[5]</sup>,基于沙尘冲蚀过程中斜入射引起的微切削磨损和垂直入射引起的塑性变形与疲劳剥落的损伤机理<sup>[6-7]</sup>,采用表面硬度高、延性层韧性强的 TiN/Ti 涂层提高叶片表面抗磨损能力,可降低冲击载荷形成的应力集中,抵挡冲击载荷,减少疲劳源、裂纹形成以及剥落的产生,综合提高材料表面的抗冲蚀能力<sup>[8-10]</sup>。简言之,只有综合了高硬度和高韧性的涂层才能具备良好的抗冲蚀能力<sup>[11-12]</sup>。而涂层厚度则是影响抗冲蚀涂层性能的一大因素<sup>[13]</sup>。抗冲蚀涂层需要一定的厚度,但涂层过厚又会增加涂层内部的应力和制备的难度;过薄又难以满足抗冲蚀的条件。W. Heinke 等人<sup>[14]</sup>在抛光 SAE52100 钢表面沉积不同厚度(2~20  $\mu\text{m}$ )的单层 TiN 涂层,通过力控制型重复冲击试验发现,随着涂层厚度的增加,冲击坑点体积增加。卞达<sup>[15]</sup>通过建立有限元三维模型研究了涂层厚度对硬脆涂层结合强度的影响,发现涂层/基体界面的剪应力最大值随着厚度的增加,呈先减小后增大。但 W. Heinke 等人的力控制型试验机难以获得实验过程中材料对冲击的实时响应,卞达的三维仿真也

缺少对应的试验进行验证。王璋等人<sup>[16]</sup>利用动能控制模式冲击试验机得到了 Cr-DLC 涂层动力学响应,通过考察其冲击磨损行为发现,在相同冲击动能的条件下,其动力学行为随着质量和速度的变化而变化显著。

目前,能够比较直观地反映出涂层抗冲蚀性能的方法主要是采用沙尘冲蚀试验方法对抗冲蚀涂层进行考核,并利用高压气体通过喷管加速砂粒来冲蚀涂层<sup>[17-19]</sup>。沙尘在垂直冲击下对涂层的损伤最大,但是在沙尘冲蚀试验中,由于实际的冲蚀速度和角度不能精确控制,砂粒轮廓复杂无规则,粒径分布范围广,材料成分存在差异,因而不能提供恒定的冲蚀条件,以研究涂层垂直冲蚀损伤机理及损伤过程<sup>[20-21]</sup>。为了研究沙尘垂直冲蚀对不同厚度的 TiN/Ti 涂层的疲劳损伤机理,同时排除斜入射沙尘的影响,本文采用了动能控制型单硬质颗粒重复冲击试验机<sup>[22]</sup>,在恒定低动能下对相同结构、不同厚度(5~25  $\mu\text{m}$ )的 TiN/Ti 涂层进行  $10^4$  次重复冲击。通过涂层动力学响应、能量吸收率分析,结合坑点轮廓与评价材料抵抗塑性变形能力的  $H^3/E^2$  值( $H$  为纳米硬度,  $E$  为弹性模量)<sup>[23]</sup>、坑点损伤形貌分析以及 ABAQUS 软件仿真,得到了垂直重复冲击下硬质层与结合层的应力分布。最后在前期研究调制比和层数对涂层抗重复冲击性能影响<sup>[6]</sup>的基础上,进一步研究了不同厚度的涂层在垂直重复冲击下的失效特征和损伤机理,为抗冲蚀涂层制备时的厚度选择提供了参考依据。

## 1 试验方法

试验使用的基体材料为 50 mm×20 mm×4 mm 的 TC4 钛合金,表面沉积的涂层为一层延性金属结合层(Ti)与一层表面硬质层(TiN),调制比(硬质层厚

度:结合层厚度) 为 9 : 1, 所有涂层结构不变, 仅改变其厚度。试样表面在沉积涂层之前, 经粗磨、细磨、抛光 (粗糙度控制在  $Ra=(0.06\pm0.01)\text{ }\mu\text{m}$ ), 再先后利用丙酮与无水乙醇超声波清洗、去离子水与无水乙醇清洗, 最后干燥氮气吹干。涂层的沉积分为 MEVVA 源离子注入+FAVA 沉积两个步骤。Ti 靶为纯度 99.999%的高纯 Ti, N<sub>2</sub> 气纯度为 99.99%, 沉积 TiN 层的 N<sub>2</sub> 气流量为 22 mL/min。Ti<sup>+</sup>注入工艺参数如表

表 1 Ti<sup>+</sup>注入工艺参数  
Tab.1 Technological parameters of Ti<sup>+</sup> injection

Steps	Process	Injecting voltage/kV	Injecting dose /( $\times 10^{16}\text{ cm}^{-2}$ )	Arc current/A	Bias voltage/V	Duty cycle/%	Deposition time/min
1	Ti <sup>+</sup> injection	8	3	100	-200	90	0.1
2	Ti deposition						
3	Ti <sup>+</sup> injection	12	3				

表 2 不同厚度 TiN/Ti 涂层沉积工艺参数  
Tab.2 Deposition technological parameters of TiN/Ti coatings with different thickness

Coatings	Thickness/ $\mu\text{m}$	Arc current/A	Bias voltage/V	Duty cycle/%	Ti layer		TiN layer	
					Beam/mA	Deposition time/min	Beam/mA	Deposition time/min
T5	5	100	-200	90	550	6.2	600	55.8
T10	10	100	-200	90	550	12.4	600	111.6
T15	15	100	-200	90	550	18.6	600	167.4
T20	20	100	-200	90	550	24.8	600	223.2
T25	25	100	-200	90	550	31.0	600	279.0

利用传感器采集冲击小球的往返速度和接触力, 对比分析涂层厚度对冲击的能量吸收率和动力学响应的影响, 使用白光干涉仪 (Contour GT 型) 测得坑点轮廓、坑点面积及坑点体积, 再结合数值计算, 得到硬质层与结合层中的应力分布, 综合分析重复冲击下的失效形式与损伤机理。

2 结果与讨论

2.1 涂层冲击动力学响应

与将控制最大冲击力作为试验条件不同, 动能控制型单硬质颗粒重复冲击试验机控制的试验对象为冲击的动能, 而冲击力则是冲击动力学响应中的一个。在短暂的冲击过程中, 接触力随接触时间的力响应波形反映出了涂层的冲击力学性能。不同厚度的 TiN/Ti 涂层在相同冲击动能下第 10<sup>4</sup> 次冲击时的冲击力响应波形如图 1 所示。可以看出, 厚度对 TiN/Ti 涂层的接触时间和达到冲击力峰值的时间影响都不大。在冲击过程接触时间 0.59~0.64 ms 之间, 涂层 T5 的接触时间最大, 为 0.64 ms, 涂层 T15、T20、T25 次之, 涂层 T10 的接触时间最小, 为 0.59 ms; 在达到冲击力峰值 0.25~0.30 ms 之间, T10 涂层的

1 所示, 涂层的编号和沉积工艺参数如表 2 所示。  
冲击试验在冲击动能控制型单硬质颗粒重复冲击试验机上进行, 试验机结构及其原理参照文献[6]和[22]。试验环境为常温常压, 冲击为无介质直接碰撞, 冲击小球为直径  $\phi 2.38\text{ mm}$  的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷球, 其硬度为 21.06 GPa, 弹性模量为 262.38 GPa, 冲击块整体质量为 215 g, 冲击速度 120 mm/s, 冲击次数 10<sup>4</sup> 次, 冲击动能 1.548 mJ。

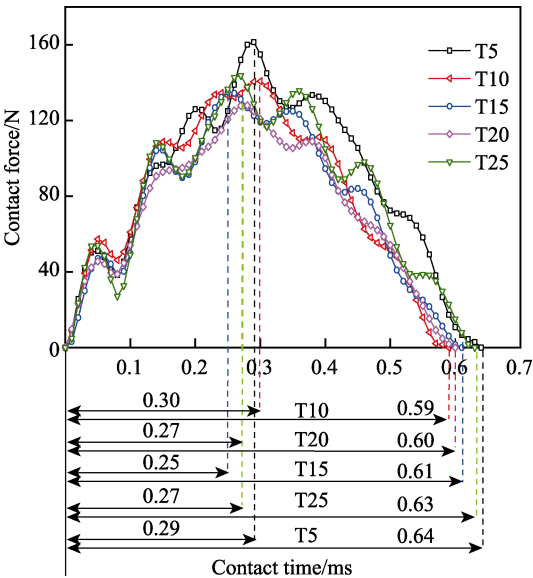


图 1 不同厚度 TiN/Ti 涂层第 10<sup>4</sup> 次冲击的冲击力响应波形  
Fig.1 Impact force response waveform at 10<sup>4</sup>th impact of TiN/Ti coatings with different thickness

峰值时间最大, 为 0.30 ms, 涂层 T5、T20、T25 次之, T15 涂层的峰值时间最小, 为 0.25 ms。不同厚度的 TiN/Ti 涂层在第 10<sup>4</sup> 次冲击 (相同冲击动能) 时

的接触力峰值和能量吸收率如图2所示。由图可知,随着涂层厚度的增加,接触力峰值先减小后增大,T20涂层的最小,为127.96 N, T5涂层最大,为161.44 N,比T20涂层大了26.16%。

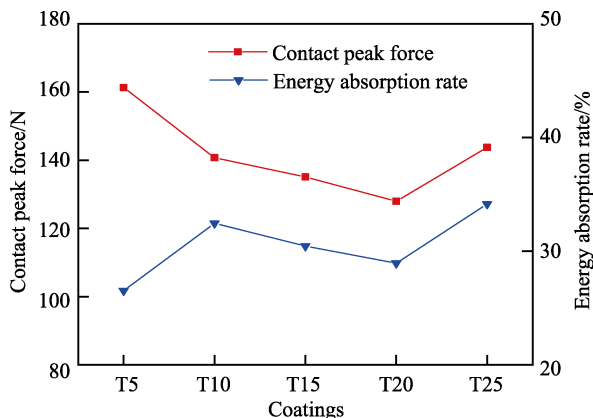


图2 不同厚度的TiN/Ti涂层第 $10^4$ 次冲击的接触力峰值和能量吸收率

Fig.2 Contact peak force and energy absorption rate at  $10^4$ th impact of TiN/Ti coatings with different thickness

由于冲击块入射和反弹的速度不同、入射阶段和反弹阶段的时间不同,冲击过程还是一个能量交换的过程,为典型的非弹性碰撞,存在动能耗散。而涂层在力的作用下发生弹性变形、塑性变形、表面断裂,并随温度的升高,吸收能量<sup>[24-25]</sup>。因此,根据光栅位移传感器测得冲击块的往返速度,可计算得到冲击块

的入射动能和反弹动能,其动能差值与入射动能的比值即为能量吸收率。如图2所示,不同厚度涂层的能量吸收率在26.53%~34.15%之间,且除T5外,涂层随着厚度的增加,能量吸收率先减小后增大,T25涂层的最大,为34.15%,涂层T5的最小,为26.53%。

## 2.2 冲击坑点轮廓

垂直重复冲击后,涂层抵抗硬质颗粒冲击的能力可从涂层/基体的变形和剥落(表现为冲击坑点的深度、面积和体积)直观地体现出来。用 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷硬质球对不同厚度的TiN/Ti涂层进行 $10^4$ 次重复冲击后,其冲击坑点云图与二维轮廓图如图3所示。可以看出,各厚度涂层的坑点同心圆等深较好,冲击坑点为较规则的圆形,说明涂层材料均匀。坑点面积和深度随厚度的增加而先减小后增大,涂层冲击坑点边缘均有较为明显的材料堆积。其中涂层T20坑点边缘有轻微的剥落,且直径最小,为306.43  $\mu\text{m}$ ;涂层T25坑点直径最大,达382.49  $\mu\text{m}$ ,比涂层T20大24.82%;涂层T15坑点最浅,为5.45  $\mu\text{m}$ 。此外,涂层T25坑点最深,达8.17  $\mu\text{m}$ ,比涂层T15大49.91%。

冲击坑点的深度、表面积、体积如图4所示。可以看出,随着厚度的增加,坑点的深度、表面积和体积均先减小后增大。其中涂层T25的坑点深度、表面积和体积都最大,分别为8.17  $\mu\text{m}$ 、 $11.48 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 、 $3.98 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ ;其次是涂层T5,分别为6.11  $\mu\text{m}$ 、 $9.72 \times 10^4 \mu\text{m}^2$ 、 $2.77 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ ;涂层T15的坑点深度最

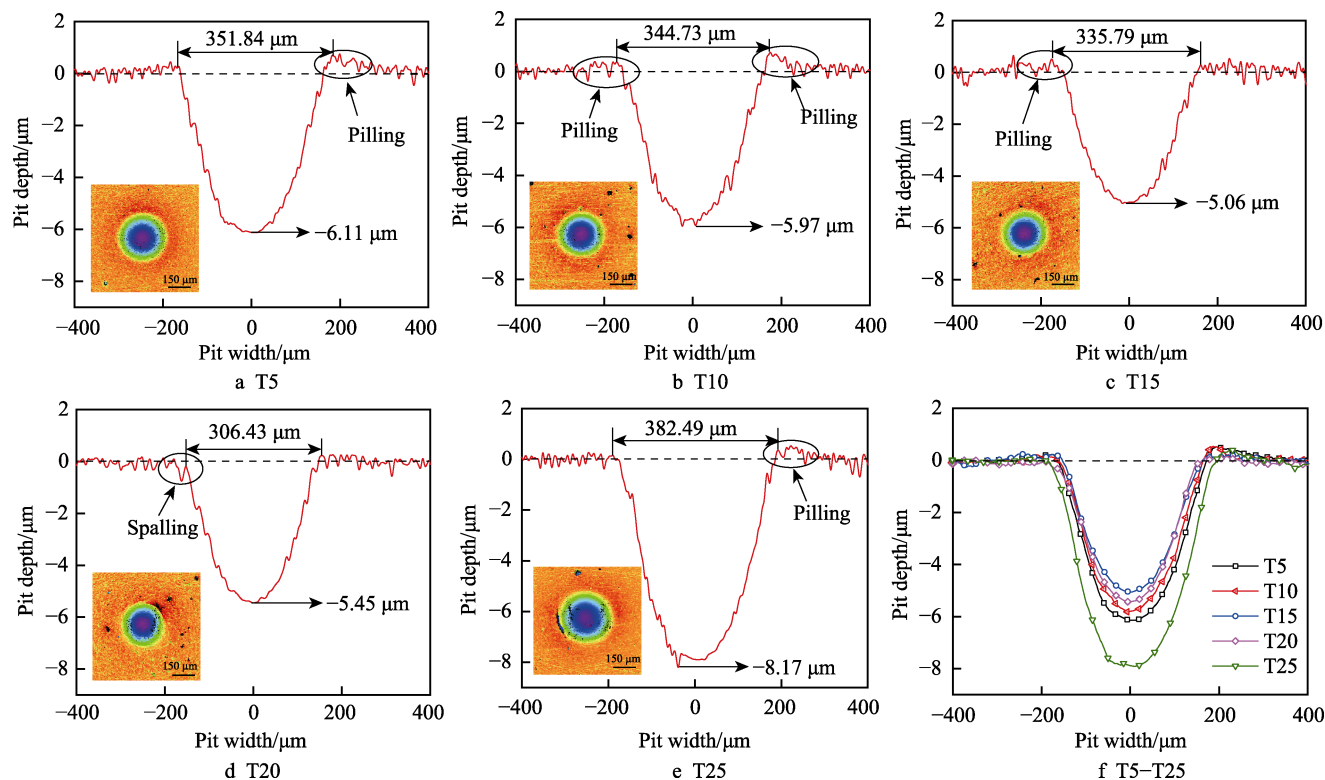


图3 不同厚度的TiN/Ti涂层的冲击坑点云图与二维轮廓图

Fig.3 Contours and 2D profiles of impact pits of TiN/Ti coatings with different thickness



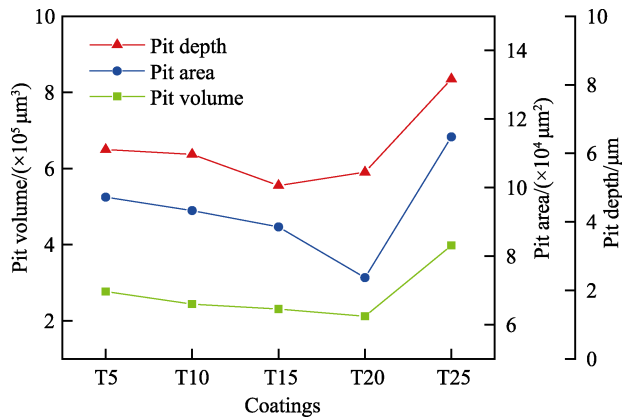


图 4 不同厚度 TiN/Ti 涂层的冲击坑点深度、表面积和体积

Fig.4 Depth, area and volume of impact pits of TiN/Ti coatings with different thickness

小, 为  $5.06 \mu\text{m}$ ; 涂层 T20 的坑点表面积和体积最小, 分别为  $7.37 \times 10^4 \mu\text{m}^2$  和  $2.12 \times 10^5 \mu\text{m}^3$ 。为了研究坑点冲击损伤的主要特征, 结合  $H^3/E^2$  值进行分析,  $H^3/E^2$  被认为是评价材料抵抗塑性变形能力的值,  $H^3/E^2$  值越大, 材料抵抗塑性变形能力越好<sup>[22]</sup>。利用纳米压痕仪 (Nano Indenter G200 型) 测量涂层的弹性模量和纳米硬度, 涂层的压入深度为  $1000 \text{ nm}$ 。

不同厚度涂层的纳米硬度与  $H^3/E^2$  值如图 5 所示。由图可知, 随着 TiN/Ti 涂层厚度的增加, 其纳米硬度和  $H^3/E^2$  值都减小, 但是涂层的冲击坑点大小并没有随之增大, 反而是先减小后增大。因此, 冲击损伤的主要特征不是涂层/基体变形, 而是剥落。除  $H^3/E^2$  外, TiN/Ti 涂层的总厚度和各层 (延性结合层与表面硬质层) 厚度, 对涂层在重复冲击中抵抗塑性变形的能力也有极大的影响。当涂层较薄时, 如涂层 T5 和 T10, 厚度分别为  $5 \mu\text{m}$  和  $10 \mu\text{m}$ , 单位体积涂层吸收的冲击动能较大, 因此涂层变形和剥落较大, 且垂直冲击时, 接触力和能量很容易透过硬质层和结合层传递到基体, 使基体也发生严重变形, 如涂层 T5 的冲击坑点深为  $6.11 \mu\text{m}$ , 超过了涂层的厚度, 不能起到保护作用。当涂层的厚度过大时, 如涂层 T25, 厚度为  $25 \mu\text{m}$ , 其硬质层厚度为  $22.5 \mu\text{m}$ , 结合层难以起到对涂层的整体协调变形作用, 且硬度和  $H^3/E^2$  值都最小, 导致产生较大的变形和剥落。而当涂层厚度适中时, 如 T15 和 T20, 厚度分别为  $15 \mu\text{m}$  和  $20 \mu\text{m}$ , 硬质层厚度分别为  $13.5 \mu\text{m}$  和  $18 \mu\text{m}$ , 单位体积涂层吸收的冲击动能较小, 结合层也能起到很好的协调变形作用, 且有较好的硬度和  $H^3/E^2$  值, 因此表现出较好的抗冲击能力。结合图 2 可知, 除 T5 以外, 随着接触力峰值的增大, 涂层对冲击的能量吸收率增大, 小球对涂层的冲击坑点也增大; 而涂层 T5 由于过薄, 冲击坑点深度已超过涂层厚度, 达到 TC4 钛合金基体, 涂层和基体都发生挤压变形和加工硬化, 使得接触时间最长, 接触力最大, 能量吸收率较小。

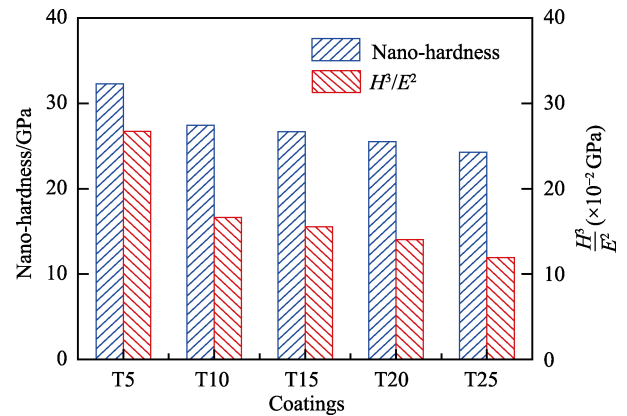


图 5 不同厚度 TiN/Ti 涂层的纳米硬度和  $H^3/E^2$  值  
Fig.5 Nano-hardness and  $H^3/E^2$  values of TiN/Ti coatings with different thickness

## 2.3 冲击坑点损伤形貌与分析

不同厚度的 TiN/Ti 涂层在进行  $10^4$  次重复冲击后的冲击坑点损伤形貌如图 6 所示。可以看出, 冲击坑点损伤由里至外大致分为三个区域, O 区域代表中心区, M 区域代表过渡区, C 区域代表边缘区。这与 W. Heinke 等人<sup>[14]</sup>得出的结论相符。他们对不同厚度的 TiN 进行力控制型重复冲击试验, 将冲击坑点失效分为三个区域, 由里至外依次是中心区域、中间区域、圆周区域。由此可见, 所有厚度的涂层在冲击坑点边缘区都有裂纹产生, 即圆周裂纹。圆周裂纹的产生是因为, 在冲击过程中, 坑点圆周承受较大的弯曲应力和交变切应力, 促使了疲劳裂纹的萌生和扩展<sup>[26]</sup>。涂层 T10 和涂层 T25 在圆周裂纹向里延伸至过渡区, 都出现了大面积的整体剥落, 其中涂层 T25 剥落尤为严重, 脱落面积超过了坑点面积的 30%。结合 EDS 能谱图, 还可以确定图 6b、e 中的 S 区剥落为 Ti 层与 TiN 层界面的层间剥落, 并且涂层 T10 和涂层 T25 坑点中心区都有块状剥落; 涂层 T5 过渡区出现较为密集的小斑点状涂层剥落, 坑点中心还出现较长的弧形裂纹和少量点状剥落; 涂层 T15 在圆周裂纹附近和过渡区出现少量的斑点状剥落; 而涂层 T15 和涂层 T20 在中心区都出现密集细微的疲劳磨损和很少的剥落, 没有出现大面积的整体剥落。

边缘区和过渡区的剥落形成存在两种形式。一是形成于圆周裂纹产生过程中, 并伴随着裂纹在脆性硬质层 TiN 中扩展, 这种剥落一般较小较密, 如图 6a 的 C 区域和 M 区域。另一种是形成于圆周裂纹生成之后, 即当圆周裂纹形成之后, 裂纹部位的涂层在另一侧缺失了支撑, 因而在后续冲击中因无法承受冲击带来的力作用而导致大面积剥落, 如图 6b、e 的 C 区域和 M 区域。

结合图 4 涂层的冲击变形情况分析可知, 涂层 T5 脆硬性最好, 但是过薄, 在所有厚度涂层中, 其单位体积涂层吸收的能量最大, 过渡区和边缘区受力

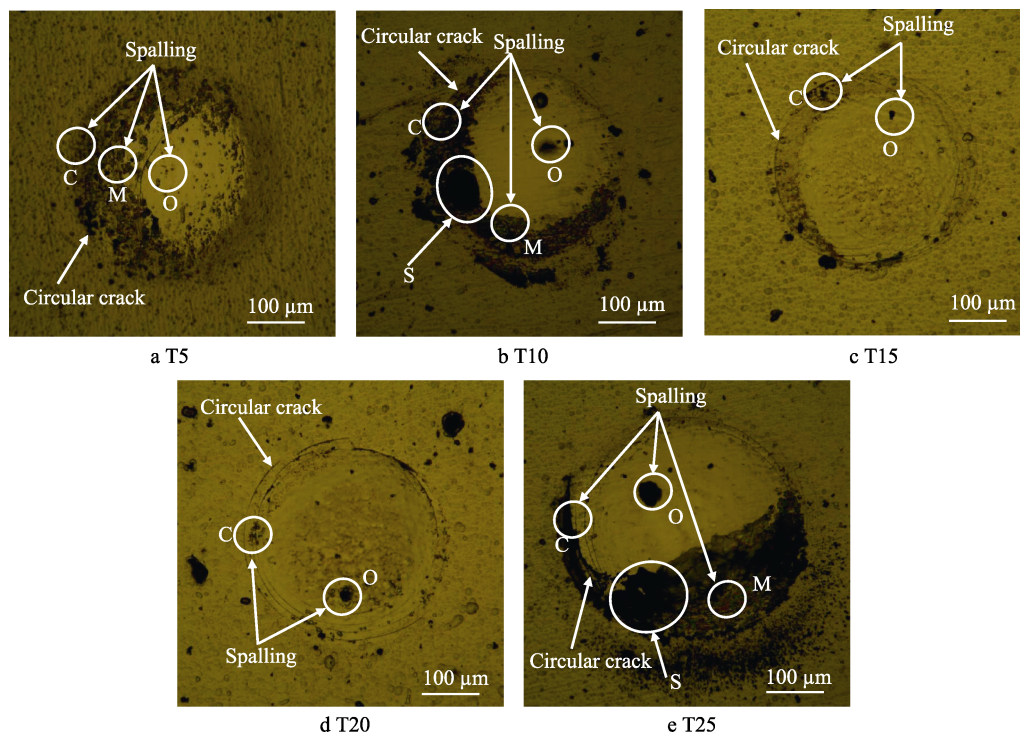


图6 不同厚度 TiN/Ti 涂层的冲击坑点损伤形貌

Fig.6 Damage morphologies of impact pits on TiN/Ti coatings with different thickness

也最大,且冲击力能透过硬质层和结合层传递到基体,使其也发生塑性变形,在硬质层、结合层和基体界面产生额外的内应力,导致冲击变形较大。因此,涂层表面易出现许多细小的裂纹<sup>[27]</sup>,进而导致密集的小斑点状剥落的形成。涂层 T25 过厚,硬质层厚度也较厚,结合层离冲击力影响范围较远,难以起到对涂层的整体协调变形作用,且涂层过厚会使涂层内有较大应力产生,导致涂层出现大面积的整体剥落和层间剥落,因此其坑点深度、面积和体积都最大。涂层 T15 和涂层 T20 厚度适中,硬质层有较高的硬度和足够的厚度抵抗冲击和吸收冲击动能,减少裂纹的成核机会,而且延性结合层又能起到协调变形和分担硬质层吸收动能的作用,减小硬质层、结合层和基体界面的内应力和圆周的交变切应力,有效地减小了裂纹的进一步扩展,减少剥落的产生。特别是涂层 T20,边缘区圆周裂纹较浅,过渡区涂层剥落很少,中心区主要是细密的疲劳磨损,带有少量剥落,从整体来看,在所有厚度涂层中,涂层 T20 表现出最好的抗冲击性能。

为了对 TiN/Ti 涂层冲击损伤机理进行更进一步的探讨,利用 ABAQUS 软件进行有限元模拟,得到涂层/基体系统在硬质颗粒冲击作用下的应力分布,进而分析涂层损伤机理。建立硬质  $\text{Si}_3\text{N}_4$  小球冲击 2 层结构 TiN/Ti 涂层的二维模型, $\text{Si}_3\text{N}_4$  小球视为刚性体,采用 CAX4 (3 节点线性轴对称三角形) 单元,半径为 1.19 mm。TiN/Ti 涂层及 TC4 钛合金基体采用 CAX4R (4 节点非线性轴对称四边形减积分) 单元,并对球面接触区域进行网格加密细化。材料的基本参数如表 3 所示,基体材料 TC4 及结合层 Ti 的塑性本

构关系使用 Johnson-Cook(J-C)本构模型<sup>[28]</sup>,如表 4 所示。

表 3 材料基本参数

Tab.3 Basic parameters of material

Material	$\text{Si}_3\text{N}_4$	TC4	Ti	TiN
Density/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	3200	4428	4500	5400
Elastic modulus/GPa		104.8	100	480
Poisson's ratio		0.31	0.27	0.27

表 4 TC4 与 Ti 的 J-C 参数

Tab.4 J-C parameters of TC4 and Ti

Material	TC4	Ti
$A/\text{MPa}$	1098	309
$B/\text{MPa}$	1092	80
$n$	0.93	0.16
$m$	1.1	1.58
$C$	0.014	0.058

TiN/Ti 涂层在硬质颗粒冲击作用下的应力分布随时间变化的过程如图 7 所示。其中,0~1.95  $\mu\text{s}$  为入射阶段,1.95~3.20  $\mu\text{s}$  为反弹阶段,A 点位于冲击区域的中心区,B 点位于过渡区,C 点位于边缘区。由图 7a 可知,硬质层 (TiN 层) 内的应力和硬质层下表层与结合层上表层的应力都存在梯度分布。由图 7b 可知,A 点和 B 点应力在 1.95  $\mu\text{s}$  时,达到最大;而 C 点应力在 1.95  $\mu\text{s}$  后,缓慢增长,约在 2.5  $\mu\text{s}$  处达到最大。由图 7c、d 可知,A 点与 B 点在一个冲击过程中,其 X 方向 (S11) 同时存在拉/压应力,这是

涂层/基系统在挤压下的协调应变机制导致的;而 A 点与 B 点在 Y 方向 ( $S_{22}$ ) 均受到压应力, 这是由颗粒对涂层在 Y 轴负方向持续挤压造成;因而, 在颗粒冲击区域的中心和过渡区域, TiN 层受到交变的拉/

压应力。对 C 点, 在 X 方向持续受到拉应力, 而在 Y 方向受到压应力, C 点上、下两侧应力梯度分布更为严重, 涂层在颗粒冲击下边缘区的 X 方向与 Y 方向的应力分布如图 8 所示。边缘区 TiN 层在 X 方向上的上

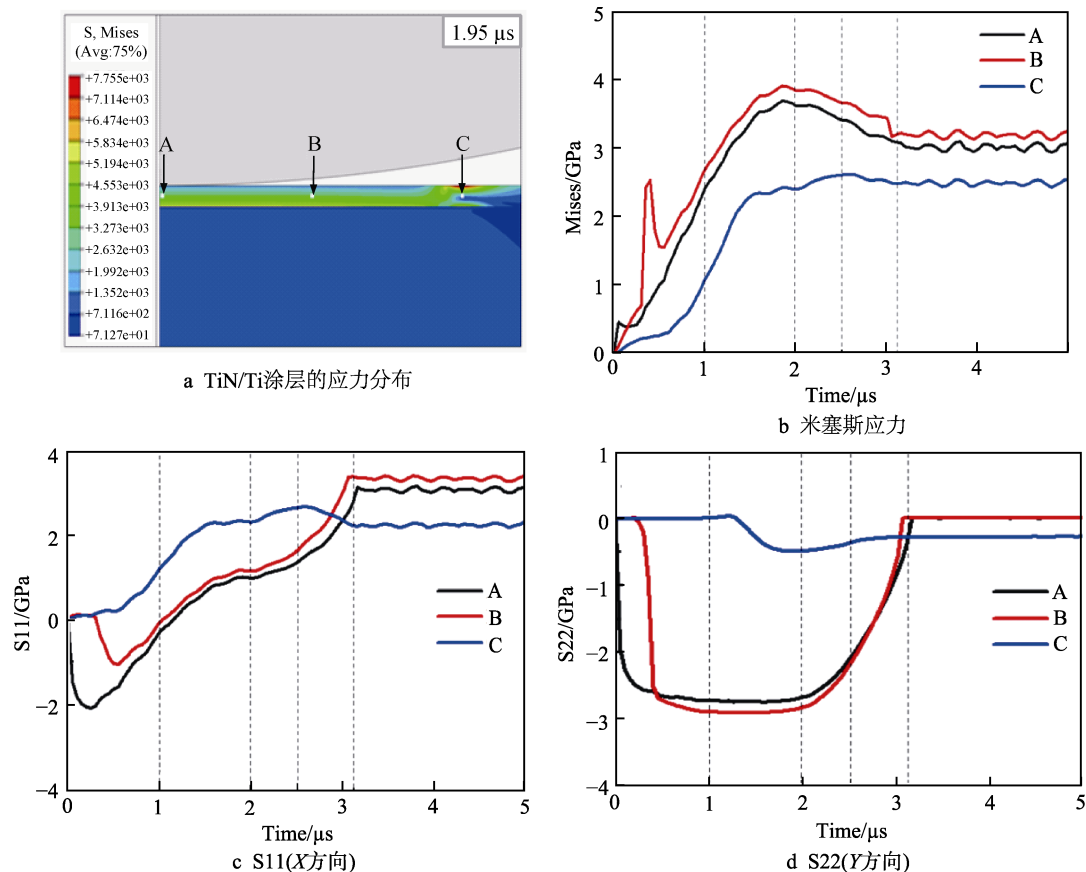


图 7 TiN/Ti 涂层的应力分布和变化过程

Fig.7 Stress distribution and change progress of TiN/Ti coating: a) stress distribution of TiN/Ti coating; b) mises stress; c) S11(X direction); d) S22(Y direction)

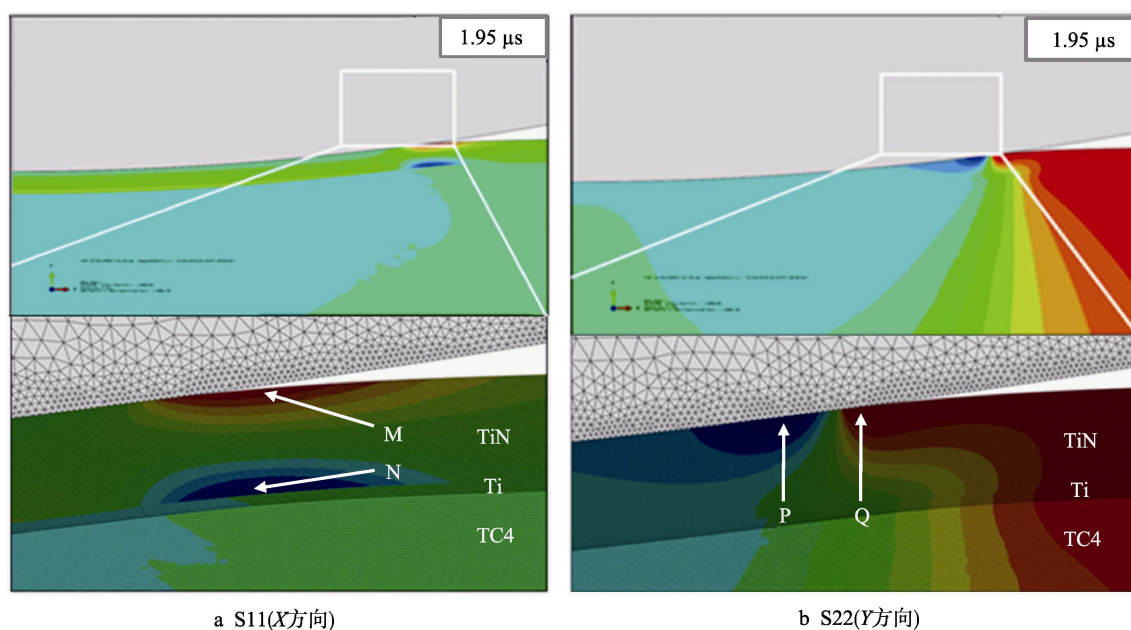


图 8 冲击坑点边缘区应力分布

Fig.8 Stress distribution on peripheral zone of impact pit: a) S11(X direction); b) S22(Y direction)



表层和下表层分别存在较大的拉应力与压应力,在M点与N点之间存在很大的应力梯度;边缘区TiN层上表层在Y方向上,其接触外圆周线左侧和右侧分别出现较大的压应力和拉应力,在P点与Q点之间存在很大的应力梯度。

因此,在硬质颗粒重复冲击作用下,硬质层内存在应力梯度且受到重复交变的拉/压应力作用,从而导致硬质层内产生疲劳圆周裂纹和疲劳剥落。硬质层与结合层界面处也存在高应力梯度,导致层间疲劳剥落。

### 3 结论

对不同厚度的TiN/Ti涂层进行 $10^4$ 次恒定动能重复冲击试验,分析了其失效特征和损伤机理,结论如下:

1) 在恒定动能重复冲击下,涂层厚度对抗冲击性能有显著的影响。在涂层冲击动力学响应中,厚度对接触时间和达到冲击力峰值时间的影响较小,涂层(除T5以外)随着冲击力峰值的增大,能量吸收率增大,冲击坑点也增大。综合看来,在一定范围内,随着涂层厚度的增加,其抗冲击能力增大,其中,涂层T20的抗冲击能力最好。但当涂层厚度超过 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,抗冲击能力显著降低;当涂层过薄时,单位体积涂层承受的动能过大,也会导致基体发生严重变形,不能起到保护作用。

2) 冲击区域的损伤特征有三种:中心区与过渡区的疲劳剥落与疲劳磨损,边缘区的疲劳圆周裂纹与疲劳剥落以及涂层/基体变形,其中以剥落为主。对于不同厚度的TiN/Ti涂层, $H^3/E^2$ 值与TiN/Ti涂层的总厚度和各层(延性结合层与表面硬质层)厚度对抵抗冲击变形和剥落的能力都有影响。

3) 硬质层内的应力梯度和重复交变拉/压应力是硬质层内产生疲劳圆周裂纹和疲劳剥落的原因。而硬质层与结合层界面处的高应力梯度,是产生层间疲劳剥落的原因。

#### 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 Guang-yu, LI Ying-hong, 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.
- [2] 张彩珍,杨健,魏磊,等.航空发动机钛合金叶片喷丸强化残余应力研究[J].表面技术,2016,45(4):208-212.  
ZHANG Cai-zhen, YANG Jian, WEI Lei, et al. Shot-peened residual stress of aeroengine titanium alloy blades[J]. Surface technology, 2016, 45(4): 208-212.
- [3] BORAWSKI B. Multilayer erosion resistant coatings for

the protection of aerospace components[D]. Pennsylvania Prefecture: The Pennsylvania State University, 2011.

- [4] 杨方亮,王彦峰.钛合金表面百微米级Ti/TiN多层复合涂层性能研究[J].表面技术,2017,46(3):96-100.  
YANG Fang-liang, WANG Yan-feng. Properties of hundred-micron Ti/TiN multilayer composite coating on titanium alloy[J]. Surface technology, 2017, 46(3): 96-100.
- [5] BOUZAKIS K D, MALIARIS G, MAKRIMALLAKIS S. 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.
- [6] 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 Wei-sheng, HE Guang-yu, CAI Zhen-bin, et al. Damage analysis of TiN/Ti coatings under cycling impact with hard particles[J]. China surface engineering, 2017, 30(5): 28-35.
- [7] 王艳,周仲荣.钛合金表面非平衡磁控溅射制备TiN薄膜的冲击磨损性能[J].中国表面工程,2010,23(4):7-10.  
WANG Yan, ZHOU Zhong-rong. Impact wear performance of TiN film grown on Ti alloys by unbalanced magnetron sputtering[J]. China surface engineering, 2010, 23(4): 7-10.
- [8] MANOHARAN M P, DESAI A V, HAQUE M A. Fracture toughness characterization of advanced coatings[J]. Journal of micromechanics & microengineering, 2009, 19(11): 115004.
- [9] 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 & coatings technology, 2011, 206(2-3): 464-472.
- [10] 谭超,何卫锋,曹鑫,等.多层梯度结构对TiAlSiN涂层摩擦磨损性能的影响[J].中国表面工程,2018,31(3):68-76.  
TAN Chao, HE Wei-feng, CAO Xin, et al. Effects of gradient multilayer structure on tribological property TiAl-SiN coating[J]. China surface engineering, 2018, 31(3): 68-76.
- [11] 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.
- [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] YANG Q, MCKELLAR R. Nanolayered CrAlTiN and multilayered CrAlTiN-AlTiN coatings for solid particle erosion protection[J]. Tribology international, 2015, 83: 12-20.
- [14] HEINKE W, LEYLAND A, METTHEWS A, et al.



- Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and rockwell-C adhesion tests[J]. *Thin solid films*, 1995, 270(1-2): 431-439.
- [15] 卞达, 王永光, 倪自丰, 等. 涂层厚度对硬脆涂层结合强度的影响[J]. *计算力学学报*, 2016, 33(1): 103-106.  
BIAN Da, WANG Yong-guang, NI Zi-feng, et al. Effect of the coating thickness on the bond strength for brittle coating-substrate system[J]. *Chinese journal of computational mechanics*, 2016, 33(1): 103-106.
- [16] 王璋, 蔡振兵, 孙阳, 等. 基于冲击动能控制的 Cr-DLC 涂层动力学响应和磨损行为[J]. *中国表面工程*, 2017, 30(4): 78-86.  
WANG Zhang, CAI Zhen-bin, SUN Yang, et al. Dynamic response and wear behavior of Cr-DLC coating under impact kinetic energy controlled mode[J]. *China surface engineering*, 2017, 30(4): 78-86.
- [17] 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.
- [18] BOUZAKIS K D, CHARALAMPOUS P, SKORDARIS G, et al. Fatigue and adhesion characterization of DLC coatings on steel substrates by perpendicular and inclined impact tests[J]. *Surface & coatings technology*, 2015, 275: 207-213.
- [19] LAWES S D A, HAINSWORTH S V, FITZPATRICK M E. Impact wear testing of diamond-like carbon films for engine valve-tappet surfaces[J]. *Wear*, 2010, 268(11): 1303-1308.
- [20] TIAN H H, ADDIE G R, BARSH E P, et al. A new impact erosion testing setup through coriolis approach[J]. *Wear*, 2007, 263(1-6): 289-294.
- [21] LIU Rong, YAO Jian-hua, ZHANG Qun-li, 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.
- [22] LIN Ying-wu, CAI Zhen-bin, CHEN Zhi-qiang, 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.
- [23] DENG Jian-xin, WU Feng-fang, LIAN Yun-song, et al. Erosion wear of CrN, TiN, CrAlN, and TiAlN PVD nitride coatings[J]. *International journal of refractory metals & hard materials*, 2012, 35(35): 10-16.
- [24] UETZ H. Wear as an energy transformation process[J]. *Wear*, 1978, 49(2): 253-264.
- [25] CAI Zhen-bin, GUAN Hai-da, CHEN Zhi-qiang, et al. Impact fretting wear behavior of 304 stainless steel thin-walled tubes under low-velocity[J]. *Tribology international*, 2017, 105: 219-228.
- [26] MATTHEW P S, FARRIS T N. Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-T351 aluminum alloy[J]. *Wear*, 1998, 221(1): 24-36.
- [27] ANDRESKA J, MAURER C, BOHNET J, et al. Erosion resistance of electroplated nickel coatings on carbon-fibre reinforced plastics[J]. *Wear*, 2014, 319(1-2): 138-144.
- [28] 田乐, 聂祥樊, 罗思海, 等. 激光冲击钛合金薄壁件动态响应及参与拉应力形成机制[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2018, 19(3): 7-12.  
TIAN Le, NIE Xiang-fan, LUO Si-hai, et al. Dynamic response and residual tensile stress formation mechanism of titanium alloy thin-walled piece in laser shock peening[J]. *Journal of Air Force Engineering University (natural science edition)*, 2018, 19(3): 7-12.