

表面失效及防护

航空发动机叶片 TiN/Ti 涂层基体冲蚀响应数值模拟

张翼飞, 何光宇, 王学德, 何卫锋, 柴艳

(空军工程大学 等离子体动力学国家级重点实验室, 西安 710038)

摘要: **目的** 研究 TiN/Ti 涂层结构变化对 TC4 钛合金基体冲击塑性应变的影响。**方法** 采用有限元分析软件 ABAQUS 建立球形 Al_2O_3 颗粒冲击覆有 TiN/Ti 涂层 TC4 基体的二维轴对称模型, 分析涂层硬质层厚度、硬质层层数对基体在冲击过程中的等效塑性应变的影响规律。**结果** 对于无涂层的基体, 其冲击塑性应变仅发生在冲击的加载阶段, 冲击塑性应变分为加载及卸载两个阶段, 加载阶段基体的塑性应变由球形颗粒的冲击产生, 卸载阶段基体的塑性应变由涂层硬质层的回弹产生。对于单层结构涂层, 当硬质层厚度低于 $12\text{ }\mu\text{m}$ 时, 随着硬质层厚度的增加, 基体的塑性应变较大且呈振荡变化; 当硬质层厚度超过 $12\text{ }\mu\text{m}$ 时, 随着硬质层厚度的增加, 基体的塑性应变减小。对于多层结构涂层, 当硬质层的厚度不变, 增加涂层硬质层层数使得基体的塑性应变减小。**结论** 有限元可以模拟分析 TiN/Ti 涂层结构对 TC4 钛合金冲蚀性能影响规律, 优化 TiN/Ti 抗冲蚀涂层的结构设计参数, 对抗冲蚀涂层的结构设计及其进一步研究具有指导意义。

关键词: 抗冲蚀涂层; 基体; 数值模拟; 塑性应变; 航空发动机叶片; TiN/Ti 涂层

中图分类号: TG174.45; TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)07-0081-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.07.015

Numerical Simulation on the Erosion Behavior of Aeroengine Blade Substrate with TiN/Ti Coating

ZHANG Yi-fei, HE Guang-yu, WANG Xue-de, HE Wei-feng, CHAI Yan

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

ABSTRACT: **Objective** To study the effect of TiN/Ti coating structure on equivalent plastic strain of TC4 titanium alloy after impact. **Methods** By using the finite analysis software ABAQUS, a 2D axisymmetric finite element model was established for the impact between spherical particle and TC4 substrate coated by TiN/Ti coating. The effects of hard layer thickness and hard layer num-

收稿日期: 2015-03-17; 修订日期: 2015-05-06

Received: 2015-03-17; Revised: 2015-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(5145506); 陕西省科学技术发展计划(2014K0826)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (5145506) and Science and Technology Development Program of Shaanxi Province (2014K0826)

作者简介: 张翼飞(1989—), 男, 江苏人, 硕士研究生, 主要研究方向为航空发动机压气机叶片抗冲蚀涂层。

Biography: ZHANG Yi-fei(1989—), Male, from Jiangsu, Master graduate student, Research focus: anti-erosion coating technique.

通讯作者: 何光宇(1980—), 男, 博士, 主要研究方向为先进表面强化技术。

Corresponding author: HE Guang-yu(1980—), Male, Doctor, Research focus: advanced surface enhancement technology.

ber on the equivalent plastic strain of substrate were analyzed. **Results** Plastic strain of uncoated substrate occurred only during the loading stage of impact. Coating divided the plastic strain response of substrate into two parts, loading and unloading. For the single layer coating, when the thickness of the hard layer was less than $12\text{ }\mu\text{m}$, the increased hard layer thickness oscillated the plastic deformation of substrate. When the thickness of the hard layer exceeded $12\text{ }\mu\text{m}$, the increased hard layer thickness reduced the plastic deformation of substrate. For the multi-layer coating, when the thickness of hard layers was remained, the increased number of layers can reduce the plastic deformation of substrates. **Conclusion** In conclusion, finite element simulation can be used to investigate the erosion behavior of TC4 titanium alloy with TiN/Ti coating, optimize the architecture of TiN/Ti anti-erosion coating, and has guiding significance of architecture design and further research on anti-erosion coatings.

KEY WORDS: anti-erosion coating; substrate; numerical simulation; plastic deformation; aircraft engine blade; TiN/Ti coating

沙漠地带执行任务的直升机或运输机在起降或低空飞行过程中,使得自然环境中的沙尘在旋翼下洗气流的诱导下高速吸入发动机,导致发动机部件受沙尘冲蚀损伤十分严重;尤其是处于发动机最前端的压气机叶片,在沙尘的冲击和磨损作用下,压气机叶片外形和结构完整性遭到破坏,导致发动机性能衰减、寿命降低,严重影响作战效能和安全可靠性的^[1-5]。

抗冲蚀涂层是解决压气机叶片冲蚀的有效手段,冲蚀环境下带有涂层的压气机叶片寿命可提高2~3倍^[2,4]。多年以来,硬质涂层被普遍认为是提高表面磨损性能的有效方法,如氮化钛涂层常用于提高刀具、磨具表面抗磨损性能^[6-9]。然而,对于沙尘冲蚀问题,多尺度、无规则沙尘对材料表面的冲蚀损伤机理十分复杂,单纯提高硬度并不一定会获得期望的效果^[10],涂层的冲击韧性逐渐受到重视^[12],涂层强韧结构设计一直是亟待解决的关键问题,涂层层数、层厚和弹性模量等结构参数直接影响涂层本身的寿命和防护性能^[11-13]。

本文针对航空发动机压气机 TC4 钛合金叶片上常用氮化钛/钛 (TiN/Ti) 抗冲蚀涂层^[14],采用有限元法模拟球状颗粒冲击涂层和基体过程,研究基体在法向冲击下的塑性应变响应,计算覆有多种结构涂层的基体等效塑性应变,分析涂层硬质层厚度与硬质层层数变化对基体受冲击后塑性变形的影响。

1 冲蚀涂层模型的建立

1.1 冲蚀损伤机理

图1是沙尘对材料表面的冲蚀损伤机理示意,金属材料表面遭受沙尘小角度冲蚀时,磨损机制以微切削为主,而大角度(接近垂直)冲击时,冲击产生的微裂纹或者损伤成为疲劳源,疲劳破坏成为主要失效机制^[14-16]。因此改善材料表面的强度和韧性是提高材

料表面抗冲蚀性的有效措施。

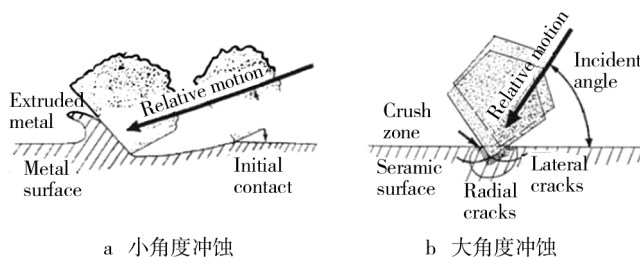


图1 沙尘冲蚀损伤机理

Fig.1 Sand erosion mechanism

1.2 涂层结构建模

强韧性好的涂层是提高材料表面抗冲蚀性能的有效手段,如图2所示,常用抗冲蚀涂层主要包括单层和多层两种结构。涂层与基体之间为结合层,由结合层和单层硬质层组成的简单涂层结构称之为单层结构,结合层以及多层硬质层与过渡层交替排列的涂层称为多层结构。

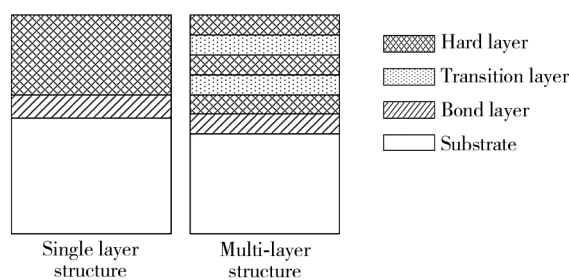


图2 涂层结构

Fig.2 Coating structure

采用图2所示结构的涂层,表层硬质层通常由硬度较高的陶瓷材料构成(例如 TiN, WC, TiC),可有效提高材料表面的抗小角度冲蚀磨损性能,但陶瓷材料抗大角度冲蚀磨损性能较差,所以将硬质层分层并在各层之间加入过渡层。过渡层材料一般由金属构成,(例如 Ti)具有较高的断裂韧性,可减缓冲击载荷对涂层的作用^[15-17]。结合层是一层很薄的金属层,其

作用是增强涂层与基体之间的结合力,并减小由于涂层与基体热膨胀作用产生的内应力。

TiN/Ti 涂层的结构参数主要包括:单层硬质层厚度 H_H ,单层过渡层厚度 H_T ,结合层厚度 H_B ,硬质层层数 N ,过渡层层数 $N-1$ 。本文重点分析涂层结构参数 H_H 和 N 的变化对基体塑性应变的影响,假定过渡层、结合层厚度 H_T, H_B 均为 $1 \mu\text{m}$ 。

1.3 有限元模型

对模型进行简化,不考虑涂层的开裂,且假设涂层为完全弹性体。使用的分析方法为有限元法,建立的有限元模型为 2D 轴对称模型,有限元计算和分析软件分别为 ABAQUS/Explicit 6.13 和 ABAQUS/Viewer 6.13。涂层与基体使用的网格为 4 节点轴对称减积分四边形单元 (CAX4R),小球选用刚性体并选用三角形轴对称单元。建好网格的模型如图 3 所示,为了提高计算精度,在小球与涂层的接触部位对涂层及小球的网格进行了加密。

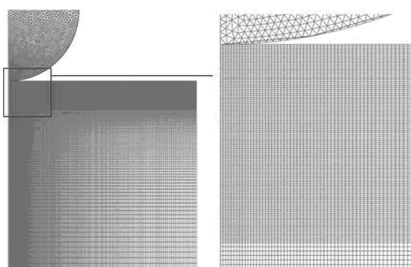


图3 有限元网格

Fig. 3 Finite element mesh

1.4 仿真参数

根据某型航空发动机进口条件,本文选取的冲蚀条件为:砂尘速度 100 m/s ,颗粒尺寸 $150 \mu\text{m}$,砂尘颗粒材料 Al_2O_3 ,并且砂尘颗粒在冲蚀过程中不发生变形,即假设砂尘颗粒为刚性体。

模型的材料参数见表 1,涂层硬质层材料为 TiN 并且被假设为完全弹性体,结合层与过渡层材料为 Ti,基底材料为航空发动机常用钛合金材料 TC4 (Ti-6Al-4V)。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Elastic modulus /GPa	Poisson's ratio
Ti-6Al-4V	4428	104.8	0.31
Ti	5000	100	0.27
TiN	5220	480	0.25
Al_2O_3	3970		

对于 Ti,其屈服应力为 1000 MPa ,其应变硬化被假设为线性并且在应变为 10% 时应力达到 1500 MPa 。对于 Ti-6Al-4V,使用 Johnson-Cook 材料模型,其参数为: $A=1098 \text{ MPa}$, $B=1092 \text{ MPa}$, $n=0.93$, $m=1.1$, $C=0.014$ 。

Johnson-Cook 材料模型屈服应力的表达式为:

$$\sigma^0 = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - \hat{\theta}^m) \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; A, B, n, m, C 为材料参数; $\hat{\theta}$ 为无量纲温度。 $\hat{\theta}$ 表达式为:

$$\hat{\theta} = \frac{\theta - \theta_{\text{room}}}{\theta_{\text{melt}} - \theta_{\text{room}}} \quad (2)$$

式中: θ 为当前温度, θ_{melt} 为融化温度, θ_{room} 为室温。

2 结果及分析

2.1 等效塑性应变

当涂层受到冲击时,基体与涂层同时发生变形,当这一变形超过基体材料的屈服强度时,材料发生塑性变形。随着大量粒子的不断冲击,塑性变形不断累积,最终导致材料硬化并开裂^[16]。

等效塑性应变 (PEEQ) 是衡量材料塑性变形的一个物理量,是整个变形过程中塑性应变的累积结果。PEEQ 的表达式为:

$$\text{PEEQ} = \bar{\varepsilon}_0^{\text{pl}} + \int_0^t \dot{\varepsilon}^{\text{pl}} dt \quad (3)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_0^{\text{pl}}$ 为初始时刻的等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}^{\text{pl}}$ 为等效塑性应变率,其表达式为:

$$\dot{\varepsilon}^{\text{pl}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{pl}} \dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{pl}}} \quad (4)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{ij}^{\text{pl}}$ 为塑性应变率。

本文通过比较基体所有计算结点的最大等效塑性应变,分析涂层结构变化对基体塑性应变的影响。

2.2 单层结构硬质层厚度变化对基体 PEEQ 的影响

图 4 为无涂层和单层结构中硬质层厚度 H_H 分别为 $1, 10, 35 \mu\text{m}$ 情况下,基体最大 PEEQ 随时间的响应曲线。图 5 为冲击结束后基体的最大 PEEQ 随硬质层厚度变化曲线。

从图 4 中可以看出,无涂层时基体最大 PEEQ 响

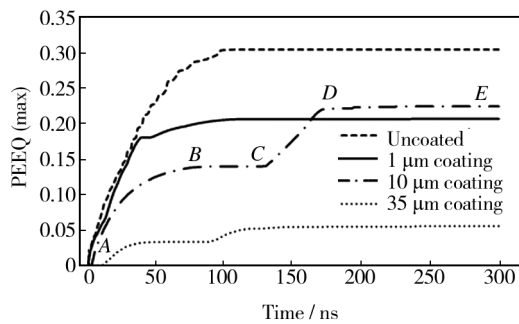
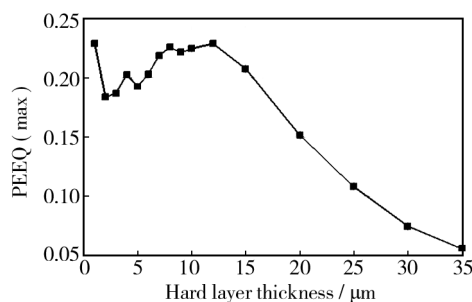


图4 基体的最大 PEEQ 随时间响应

Fig. 4 Maximum PEEQ vs. time for substrate

图5 基体的最大 PEEQ 随 H_H 变化Fig. 5 Maximum PEEQ vs. H_H for substrate

应为先增大,然后逐渐平稳,覆有涂层的基体最大 PEEQ 响应曲线呈现出先增大后平缓再上升最后平缓的趋势。以图中硬质层厚度为 10 μm 的情况为例,时刻为 0 时球形颗粒冲击开始加载,0 点至 A 点基体发生弹性变形,A 点时基体开始出现塑性变形;AB 段基体塑性变形不断增大;B 点时球形颗粒冲击加载结束并开始卸载,基体塑性变形暂时结束;BC 段为弹性过程基体塑性变形无变化;C 点时基体开始出现塑性变形;CD 段基体塑性变形不断增大;D 点时卸载过程结束,涂层与基体处于平衡状态,基体不再发生塑性变形。

从图 5 中可以看出,当涂层硬质层的厚度在一定范围内(对于单层涂层为 12 μm),随着涂层厚度的增加基体中的最大等效塑性应变值出现振荡现象;当硬质层厚度超过 12 μm 时,增加硬质层厚度使得基体的最大等效塑性应变减小。

对仿真结果进行分析如下:无涂层情况下,基体塑性应变发生在球形颗粒冲击基体的冲击加载过程,在这一过程中颗粒的动能转化为基体的弹性势能及塑性应变能;有涂层情况下,球形砂粒冲击带有涂层的基体表面时,冲击过程可分为加载和卸载两个阶段都使 PEEQ 不断累加,加载阶段由于涂层吸收冲击能

量,使基体塑性应变较小,卸载阶段,涂层将吸收的部分冲击能量又传递给基体,使基体塑性应变增大。

由图 5 可知,最大 PEEQ 在涂层厚度小于 12 μm 时出现振荡现象,其主要原因为:当涂层厚度较小时,冲击载荷由基体承担,基体塑性应变较大;当涂层厚度较大时,冲击载荷由涂层承担,基体塑性应变较小,并且在卸载阶段涂层将部分能量传递给基体。

2.3 多层结构硬质层层数 N 对基体 PEEQ 的影响

图 6 给出多层结构中硬质层层数 N 分别为 2, 6, 10 时,基体最大 PEEQ 随时间的响应曲线。图 7 为冲击结束后基体最大 PEEQ 随硬质层层数 N 变化曲线。

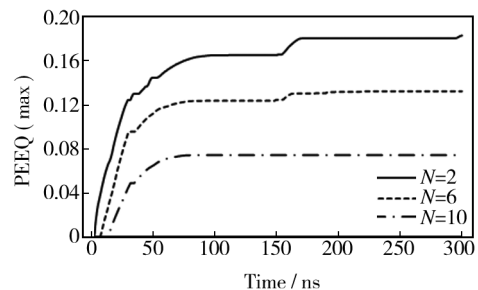
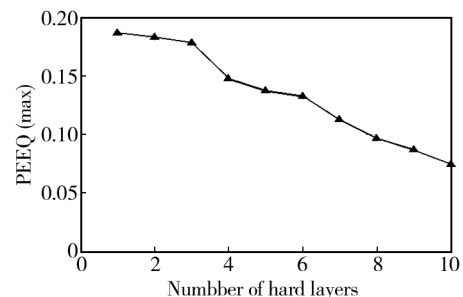


图6 基体的最大 PEEQ 随时间响应曲线

Fig. 6 Maximum PEEQ vs. time for substrate

图7 基体最大 PEEQ 随 N 变化Fig. 7 Maximum PEEQ vs. N for substrate

从图 6 中可以看出,对于多层涂层,其基体的塑性应变与单层涂层一样分两个阶段,即冲击加载阶段和冲击卸载阶段。冲击加载阶段与卸载阶段所造成的塑性应变均随涂层的层数增加而减小,并且当涂层的层数 N 达到 10,冲击的卸载阶段基体不发生塑性变形。

从图 7 中可以看出,随着 N 的增加,基体在冲击结束后的最大 PEEQ 不断减小。

在加载阶段,由于涂层硬质层吸收冲击能量,随着 N 的增大,基体的塑性应变减小;在冲击卸载阶段,由于过渡层吸收了一部分硬质层的弹性势能,所以在

这一阶段随着 N 增大,基体的塑性应变减小。由于两个过程导致的塑性应变均随 N 的增大而减小,所以随着 N 的增大,基体冲击结束后的最大 PEEQ 减小。

从图4及图6可以看出,提高涂层对基体的保护作用有两种途径,一种是将涂层硬质层的厚度提高到 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以上,一种是使用较薄的硬质层并增加其层数。当涂层厚度要求在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下时使用较薄的硬质层并使用多层结构可以更好的保护基体,当涂层的厚度要求在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以上时则需要进一步考虑涂层的结构对涂层本身的抗冲蚀性能的影响。

3 结论

使用有限元方法模拟基于 TiN/Ti 抗冲蚀涂层的 TC4 基体受球形颗粒冲击后基体内的塑性变形情况,结果表明:1) 涂层使基体塑性变形分加载及卸载阶段,随着涂层硬质层厚度的增加,加载阶段导致的塑性应变减小,卸载阶段导致的塑性应变则会先增大后减小;2) 对于单层结构的涂层,当硬质层厚度低于 $12\text{ }\mu\text{m}$ 时,增加硬质层厚度,基体的塑性变形呈振荡变化;当硬质层厚度超过 $12\text{ }\mu\text{m}$ 时,增加硬质层厚度,基体的塑性变形减小;3) 多层涂层的基体,其塑性变形分为加载及卸载阶段,当硬质层的厚度不变,随着涂层硬质层层数的增加,加载阶段及卸载阶段导致的塑性应变均减小。

参考文献

- [1] HENDERSON R E, HENNECKE D K. Erosion Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines[R]. ADA289820, 1998.
- [2] TRAYNOR T. Compressor Coatings for Life Extension in Aero Engines[C]//SEUS 2009 Conference, 2009.
- [3] PEPI M, SQUILLACIOTI R, PFLEDDERER L. Solid Particle Erosion Testing of Helicopter Rotor Blade Materials[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, 12: 96—108.
- [4] SARAVANAMUTTOO H. Erosion Corrosion and Foreign Object Damage Effects in Gas Turbines[C]//Propulsion and Energetics Panel Symposium, 1994.
- [5] 何光宇,李应红,王建,等.基于等离子体的抗冲蚀涂层技术及其在直升机发动机领域的应用[J].高电压技术, 2014, 40(7): 2133—2139.
HE Guang-yu, LI Ying-hong, WANG Jian, et al. Anti-erosion Coating Technique Based on Plasma and Its Application in Helicopter Aero-engines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 2133—2139.
- [6] DISERENS M, PATSCHEIDER J, LEVY F. Mechanical Properties and Oxidation Resistance of Nanocomposite TiN-SiN_x Physical-vapor-deposited Thin Films[J]. Surface and Coating Technology, 1990, 11(120/121): 158—165.
- [7] SPROUL W D. Turning Tests of High Rate Reactively Sputter-coated T-15 HSS Inserts[J]. Surface and Coating Technology, 1987, 3(133): 1—4.
- [8] 王广宏,安志义. TiN 涂层性能的分析与测定[J]. 表面技术, 1992(2): 120—123.
WANG Guang-hong, AN Zhi-yi. Analysis and Determination of the Properties of TiN Coating[J]. Surface Technology, 1992(2): 120—123.
- [9] 蒋一江,张降生. 氮化钛涂层刀具的镀制及应用[J]. 表面技术, 1991(3): 31—35.
JIANG Yi-jiang, ZHANG Jiang-sheng. Plating of Titanium Nitride on Cutter and Its Application[J]. Surface Technology, 1991(3): 31—35.
- [10] PFLEDDERER L, PEPI M. Sand Erosion Test Method for DOD Unique Environments[C]//Tri-Service Corrosion Conference, 2008.
- [11] BORAWSKI B, SINGH J. Multi-layer Coating Design Architecture for Optimum Particulate Erosion Resistance[J]. Wear, 2011, 271: 2782—2792.
- [12] BORAWSKI B, JUDITH A T, et al. The Influence of Ductile Interlayer Material on the Particle Erosion Resistance of Multilayered TiN based Coatings[J]. Wear, 2011, 271: 2890—2898.
- [13] LEYLAND A, MATTHEWS A. Thick Ti/TiN Multilayered Coatings for Abrasive and Erosive Wear Resistance[J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 70(1): 19—25.
- [14] TABAKOFF W. Protection of Superalloys from Erosion in Turbomachinery and other Systems Exposed to Particulate Flows[J]. Wear, 1999, 233/235: 200—208.
- [15] 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 Lie-hang. Research on Cutting Brittle Materials by Premixed Abrasive Water Jet[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(3): 97—104.
- [16] 刘道新,奚运涛. 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 Dao-xin, XI Yun-tao. Research on Solid Particle Erosion Wear Resistant of Ion Assisted Deposited ZrN Algorithm Coating[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(4): 31—37.
- [17] SHELDON G L, FINNIE I. On the Ductile Behavior of Nominally Brittle materials during Erosive Cutting[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1966, 88: 387—392.