

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180101001

# TC4 钛合金表面冲蚀损伤机理的砂尘粒径依赖效应

耿明睿<sup>1</sup>, 陈 皎<sup>2</sup>, 杨竹芳<sup>1</sup>, 刘梅军<sup>3</sup>, 何光宇<sup>1</sup>, 王学德<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 等离子体动力学国家重点实验室, 西安 710038; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049; 3. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

**摘 要:** 在自主搭建气流喷射式冲蚀试验平台上, 采用不同粒径的石英砂, 对 TC4 钛合金进行冲蚀试验; 利用电子天平、扫描电子显微镜和 X-射线应力仪对试件表面冲蚀质量损失率、冲蚀区微观形貌及应力进行检测与分析。结果表明, TC4 钛合金表面的冲蚀损伤机理显著依赖于砂尘粒径, 并在 400  $\mu\text{m}$  处发生机理转变。砂尘粒径小于 400  $\mu\text{m}$  时, TC4 钛合金表面冲蚀质量损失率小于 0.4 mg/g, 其表面损伤形式以犁削、切削、铲削以及点坑等塑性损伤为主; 砂尘粒径大于 400  $\mu\text{m}$  时, TC4 钛合金表面在高应变率条件下发生表观韧脆转变, 质量损失率突增至 0.8 mg/g 以上, 损伤形式以解理破坏、脆性剥落为主。基于解理断裂的双判据模型, 解释了砂尘粒径高于 400  $\mu\text{m}$  时 TC4 钛合金表面发生的脆性剥落现象。

**关键词:** 冲蚀磨损; 砂尘粒径; TC4 钛合金; 冲蚀机理

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)03-0017-10

## Dependent Effects of Particle Size on Erosion Wear Mechanism of TC4 Titanium Alloy

GENG Ming-rui<sup>1</sup>, CHEN Jiao<sup>2</sup>, YANG Zhu-fang<sup>1</sup>, LIU Mei-jun<sup>3</sup>, HE Guang-yu<sup>1</sup>, WANG Xue-de<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049; 3. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract:** Using a self-developed air jet erosion experiment platform, an erosion experiment on TC4 titanium alloy with quartz sand in different sizes was performed. The mass loss rate of the erosion, microtopography of erosion areas and the stress were measured and analyzed, using a variety of instruments including electronic balance, scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results show that the erosion mechanism of TC4 titanium alloy surface is significantly dependent on the particle size and the mechanism changes at 400  $\mu\text{m}$ . When the particle size is below 400  $\mu\text{m}$ , the mass loss rate gets less than 0.4 mg/g and plowing, cutting, shoveling and pitting are the main forms of damage in the surface of TC4 titanium alloy. While the particle size is more than 400  $\mu\text{m}$ , ductile-brittle transition occurs on the surface of TC4 titanium alloy at high strain rate, the mass loss rate suddenly rises above 0.8 mg/g, and cleavage damage and brittle flaking are the main forms of damage. Furthermore, the dual criterion model of cleavage fracture explains the brittle flaking phenomenon on TC4 titanium alloy when the particle size is more than 400  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** erosion wear; particle size; TC4 titanium alloy; erosion mechanism

收稿日期: 2018-01-01; 修回日期: 2018-05-03

网络出版日期: 2018-05-09 10:05; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180509.1005.036.html>

通讯作者: 何光宇 (1980—), 男 (汉), 副教授, 博士; 研究方向: 等离子体表面工程; E-mail: hegy\_22@126.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51405506); 国防科技重点实验室基金 (61422020702162202)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China (51405506) and Science and Technology Foundation of State Key Laboratory (61422020702162202)

引文格式: 耿明睿, 陈皎, 杨竹芳, 等. TC4 钛合金表面冲蚀损伤机理的砂尘粒径依赖效应[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 17-26.

GENG M R, CHEN J, YANG Z F, et al. Dependent effects of particle size on erosion wear mechanism of TC4 titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 17-26.

# 0 引言

军用直升机、大型运输机在沙漠环境下服役，涡轴及涡扇发动机压气机进口级叶片表面不可避免遭受空气中砂尘颗粒的冲蚀磨损作用，冲蚀磨损已成为沙漠环境服役涡轴及涡扇发动机叶片表面失效的主要形式之一<sup>[1]</sup>。尽管利用等离子体喷涂<sup>[2-3]</sup>、激光熔覆<sup>[4]</sup>、化学气相沉积<sup>[5]</sup>和物理气相沉积<sup>[6-7]</sup>等技术制备硬质涂层可起到一定的防护作用，然而，砂尘特性对涂层防护性能影响十分关键，需要针对服役砂尘环境进行涂层设计。

砂尘特性是影响冲蚀损伤的主要因素，砂尘的粒径、硬度、冲蚀速度、角度和浓度等都会对材料表面的冲蚀磨损行为产生较大影响<sup>[8-9]</sup>。但是目前国内外在防砂领域的研究仍不够充分，多停留于冲蚀速度与冲蚀角度对材料表面冲蚀磨损行为的探究<sup>[10-14]</sup>。国军标仅仅在砂尘成分、硬度、浓度等方面做了限定，将砂尘定义为粒径范围在 0.1~1 000  $\mu\text{m}$  的以  $\text{SiO}_2$  为主要成分的小颗粒物质，在给定浓度条件下进行考核<sup>[15]</sup>，而关于砂尘粒径要求仅参照美军标而设定<sup>[16]</sup>，并未对粒径引起的材料表面冲蚀损伤规律和机理进行深入研究。

文中采用航空发动机压气机叶片常用的 TC4 钛合金<sup>[17]</sup>。基于自主搭建气流喷射式冲蚀试

验平台，采用 5 个不同粒径范围的石英砂在 5 级砂尘浓度及 30°和 60°两个冲蚀角度下，开展砂尘粒径对 TC4 钛合金表面冲蚀磨损行为影响的试验研究，旨在揭示砂尘粒径特性对发动机叶片表面冲蚀损伤机理的影响规律，为发动机防砂设计以及涂层防护技术的发展提供理论基础。

## 1 材料及方法

### 1.1 材料制备

冲蚀材料为退火态 TC4 钛合金，尺寸 50 mm×20 mm×5 mm，其化学成分如表 1 所示。使用磨床对 TC4 钛合金表面进行处理，分别用丙酮及无水乙醇进行超声波清洗后烘干。用精度 0.1 mg 的分析天平对清洗后的试样进行称重。

表 1 试验用 TC4 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of the TC4 titanium alloy used in the experiment (w/%)

| Element | Fe   | V    | Al   | C    | O    | N     | H      | Ti   |
|---------|------|------|------|------|------|-------|--------|------|
| Content | 0.10 | 4.00 | 5.70 | 0.02 | 0.05 | <0.01 | <0.001 | Bal. |

选用  $\alpha$  相石英砂作为冲蚀砂尘。粒径范围分别为 0~125、125~200、200~400、400~600、>600  $\mu\text{m}$ 。图 1 是砂尘的 SEM 形貌，粒径依次增大，该砂尘呈现不规则多面体外观，棱角尖锐。

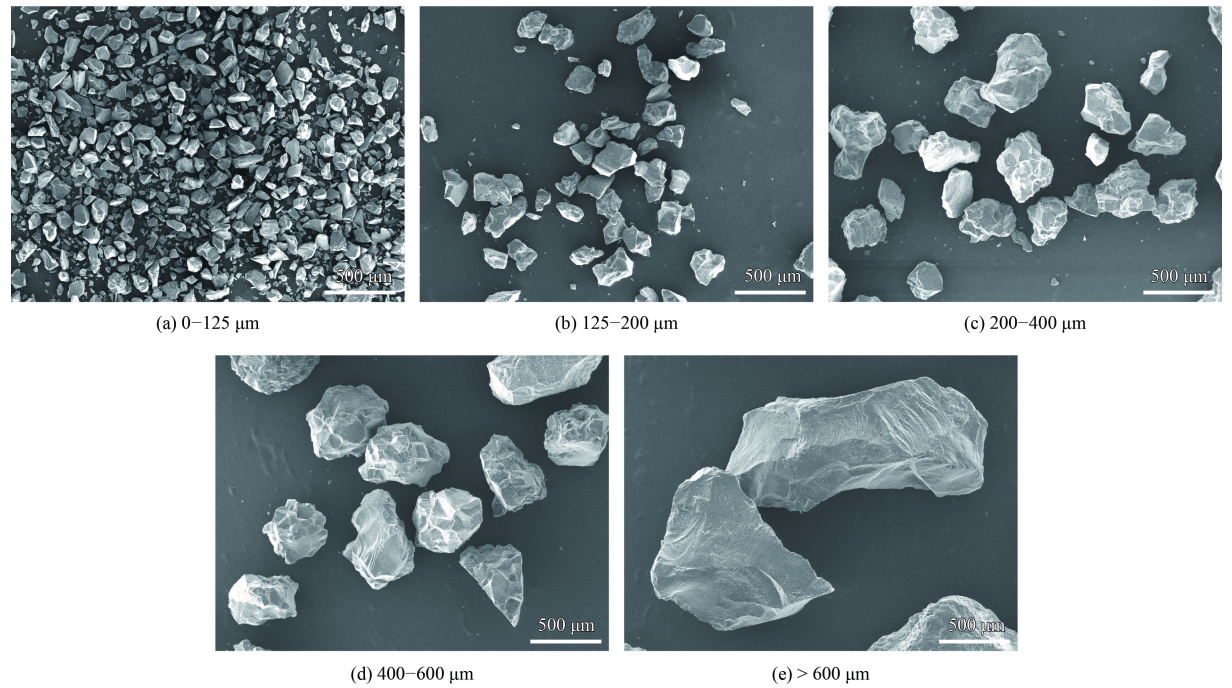


图 1 不同粒径冲蚀砂尘的 SEM 形貌

Fig.1 SEM images of erosion particles with different size

1.2 试验方法

参考美国材料试验学会 ASTM-G76 标准搭建了气流喷射式冲蚀试验平台<sup>[18]</sup>, 如图 2 所示, 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, 从而控制冲蚀过程中的砂尘浓度。使用该平台对 TC4 钛合金表面进行冲蚀试验。

使用 SJ-201P 表面形貌仪测量冲蚀区二维轮廓, 利用 TESCAN-MIRA III 型扫描电子显微镜观察 TC4 钛合金表面的冲蚀磨损形貌, 利用 PROTO-LXRD 型 X-射线应力仪对 TC4 钛合金冲蚀后表面的残余应力进行检测。

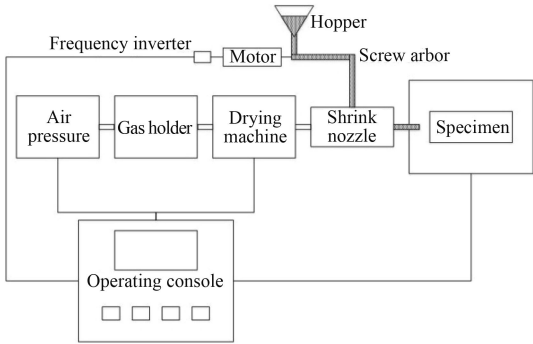


图 2 砂尘冲蚀试验设备示意图  
Fig.2 Schematic diagram of sand erosion test equipment

2 试验与结果

2.1 砂尘冲蚀试验

为了探讨砂尘粒径对 TC4 钛合金表面冲蚀行为的影响规律, 应保证砂尘冲蚀速度与冲蚀角度保持一致。冲蚀角度可直接在冲蚀平台上进行调整。但是不同粒径砂尘在气压加速作用下, 运动规律不尽相同, 故利用双盘测速装置<sup>[19]</sup>, 对不同气压下各粒度范围砂尘的冲蚀速度进行了标定, 如图 3 所示。

冲蚀试验中冲蚀速度固定 130 m/s, 5 种粒度对应气体相对压强分别为 0.17、0.25、0.3、0.49 和 0.6 MPa。通过调节供砂系统螺杆装置转速, 设定砂尘流量 2 g/min, 采用单位时间、单位进口面积的砂尘含量等效换算, 得到对应砂尘浓度约 6 g/m<sup>3</sup><sup>[18]</sup>, 属于 5 级砂尘环境, 近似沙漠环境对应浓度<sup>[8]</sup>。使用不同粒径石英砂样作为冲蚀颗粒, 喷嘴内径 5 mm, 喷嘴距试样表面 20 mm。由于航空发动机压气机叶片在服役过程中很少遭受砂粒 90°方向上的垂直冲击, 故选择 30°和 60°两

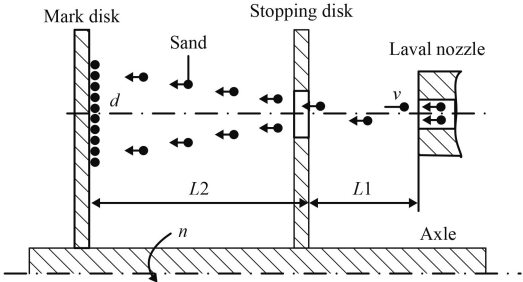


图 3 双盘测速原理图  
Fig.3 Principle of dual spinning disc

个冲蚀角度, 分别代表其所遭受的小角度与大角度冲蚀。

采用分析天平称量试样冲蚀磨损前后的质量, 取 3 次测量平均值, 以确定其冲蚀过程中的质量损失率。图 4 给出了砂尘速度为 130 m/s 时, 试件在不同粒径砂尘冲蚀下的质量损失。由图 4 可知, 无论是 30°还是 60°攻角下, TC4 钛合金的质量损失与总供砂量近似成线性关系, 且从一开始即保持相对稳定的冲蚀率, 表明试验中由于冲

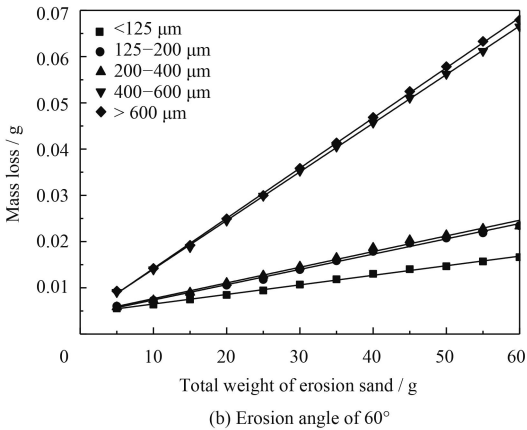
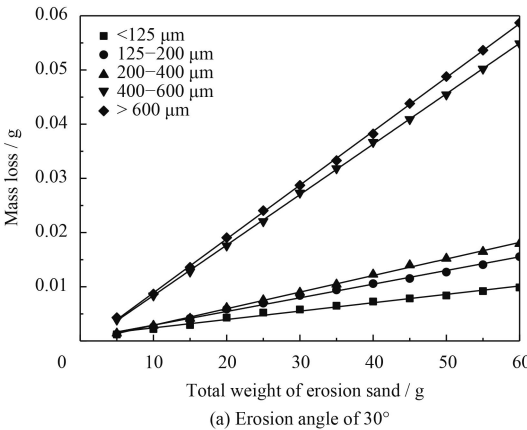


图 4 TC4 钛合金在不同粒径砂尘冲蚀下的质量损失  
Fig.4 Mass loss of TC4 titanium alloy affected by different particle size

蚀速度较高,在较短时间内即完成了对 TC4 钛合金表面的硬化及冲蚀形貌的构建,使得其质量损失维持在相对稳定的范围内。

由图 4 各拟合直线的斜率,可得到不同粒径沙尘冲蚀下,TC4 钛合金表面平均质量损失率,如图 5 所示。由图可知,在两冲蚀角下,试件的质量损失率皆随冲蚀沙尘粒径的增大明显出现了两个阶段:400  $\mu\text{m}$  以下的小粒径沙尘对 TC4 钛合金所造成的质量损失率小于 0.4 mg/g,而 400  $\mu\text{m}$  以上较大粒径对 TC4 钛合金造成的质量损失率突增至 0.8 mg/g 以上,两者存在显著差异。且在这两个阶段中,不同粒径沙尘对 TC4 钛合金质量损失率的影响并不明显。这说明 400  $\mu\text{m}$  附近,TC4 钛合金的损伤机理可能发生了显著变化。

对比 30°与 60°攻角下 TC4 钛合金的质量损失,可以看出,30°所代表的低角冲蚀并未对其表面造成更严重的质量损失,并未出现应有的典型塑性材料的冲蚀磨损特征。

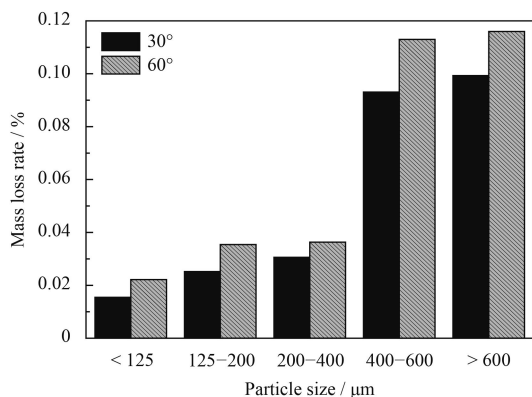


图 5 TC4 钛合金在不同粒径沙尘冲蚀下的质量损失率

Fig.5 Mass loss rate of TC4 titanium alloy affected by different particle size

## 2.2 TC4 钛合金表面冲蚀区宏观形貌

图 6 和图 7 是不同粒径及攻角下,TC4 钛合金的宏观损伤形貌与二维轮廓。攻角 60°时,冲蚀区域近似圆形;而 30°时更接近于椭圆,这与已有研究结果一致<sup>[12]</sup>。随着沙尘粒径增大,TC4 钛合金宏观损伤形貌并无明显差异,证明冲蚀区域的宏观形貌并不依赖于沙尘粒径的变化。

同时,TC4 钛合金的损伤深度随沙尘粒径的增加存在明显的变化,当攻角为 30°时,当沙尘粒径小于 400  $\mu\text{m}$ ,冲蚀区域深度随粒径增大略有加深,但整体深度在 5  $\mu\text{m}$  左右,当粒径大于 400  $\mu\text{m}$

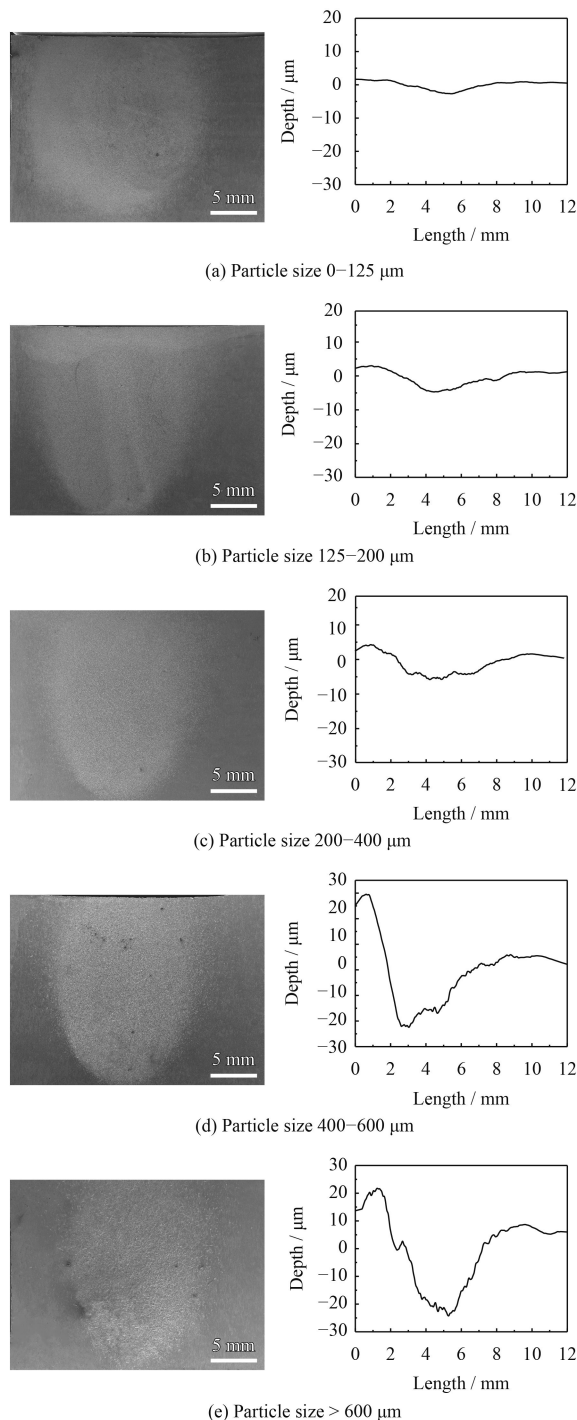


图 6 30°攻角下不同粒径沙尘作用下的 TC4 钛合金宏观损伤形貌及二维轮廓

Fig.6 Macroscopic morphologies and two-dimensional profiles of TC4 titanium alloy affected by different particle size at 30°

时,冲蚀区域深度突增至 25  $\mu\text{m}$ ,沙尘对 TC4 钛合金的作用深度及损伤程度明显加强。当攻角为 60°时,冲蚀坑深度随粒径变化也存在类似规律。这种现象进一步印证了在沙尘粒径 400  $\mu\text{m}$  时,TC4 钛合金的损伤情况存在突变。

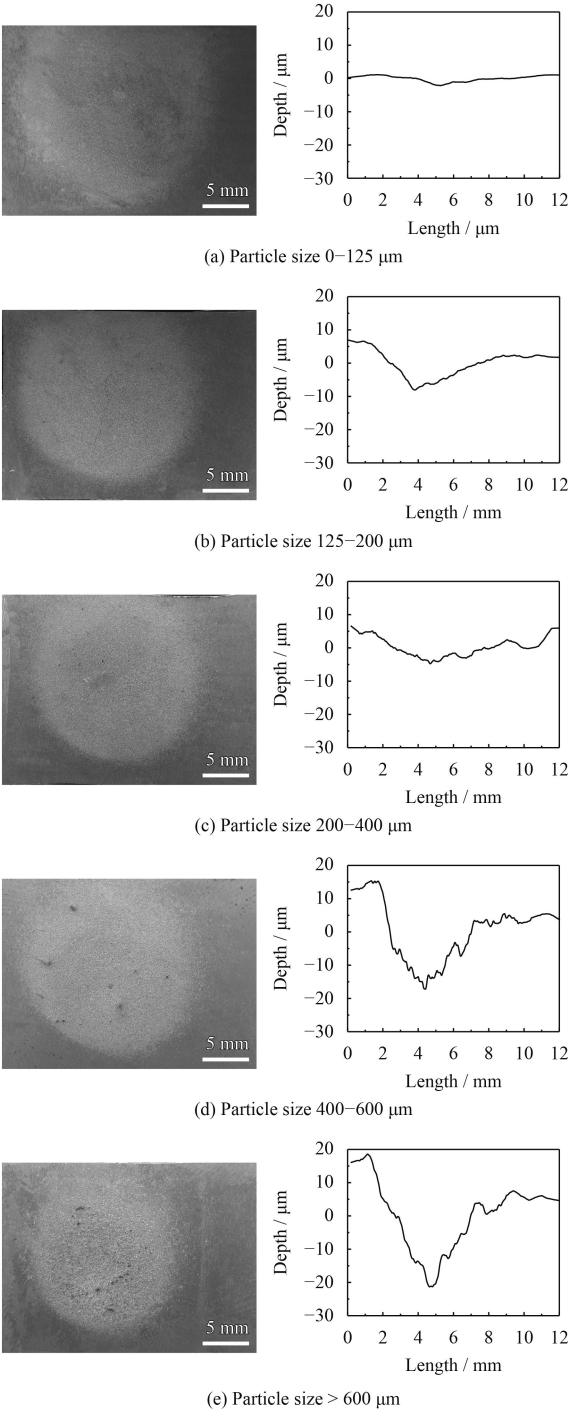


图 7 60°攻角下不同粒径砂尘作用下的 TC4 钛合金宏观损伤形貌及二维轮廓

Fig.7 Macroscopic morphologies and two-dimensional profiles of TC4 titanium alloy affected by different particle size at 60°

2.3 TC4 钛合金冲蚀区 SEM 微观形貌

为了研究 TC4 钛合金表面冲蚀磨损砂尘粒径特性对 TC4 钛合金表面冲蚀磨损行为的影响规律, 利用 SEM 对试样冲蚀形貌进行观察。图 8 为 TC4 钛合金表面在不同粒径砂尘 30°攻角冲蚀

下表面的损伤形貌。可以看出图 8(a) 中 TC4 钛合金表面的损伤形式以犁削 (Plowing) 为主, 同时存在少量铲削 (Shoveling)。这是由于小砂粒在与试件接触后运行轨迹发生明显改变, 只能对其表面产生影响, 但同时冲蚀砂尘硬度高, 棱角尖锐, 造成以犁削为主的表面损伤形式; 图 8(b)(c) 中 TC4 钛合金表面以切削和铲削为主要损伤形式。随着粒径增大, 单粒子对 TC4 钛合金表面的冲击逐渐加深, 能够以铲削的方式一次性去除大量金属材料, 且在不断的冲蚀作用下, 单粒子冲蚀造成的塑性区发生严重的交叠甚至破坏, 在试件表面形成不规则塑性区, 其完整性遭到破坏; 图 8(d) 中 TC4 钛合金表面仍存在铲削为主的冲蚀形貌, 但其周围除了有材料堆积的塑性区特征外, 在顺冲蚀方向的前端还存在有剥落的痕迹。对保存较为完整的剥落面进行观察, 其中存在大量河流状花纹, 证明 TC4 钛合金表面在砂尘冲蚀产生的高应变率条件下发生了表观韧脆转变, 试件表面在该条件下发生解理 (Fracture) 破坏; 图 8(e) 中, TC4 钛合金表面形貌在砂尘冲蚀作用下严重碎片化, 仅存在少量典型冲蚀形貌残片, 材料剥落痕迹广泛存在于视场。对剥落面进行观察, 存在典型解理台阶, 证明解理破坏已成为该冲蚀条件下 TC4 钛合金表面的重要损伤形式。

图 9 为 TC4 钛合金表面在不同粒径砂尘 60°攻角冲蚀下的损伤形貌。可以看出图 9(a) 中 TC4 钛合金表面损伤形式同样以犁削为主, 同时存在少量铲削形貌, 且犁沟长度与 30°冲蚀相比并无明显缩短。图 9(b) 中, TC4 钛合金表面损伤形式以铲削为主, 且存在较大尺寸的犁削与点坑, 与 30°条件下的损伤形貌存在一定差异, 这很大程度上是由于两者在面内和面法线两个方向上能量分配不同; 图 9(c) 中 TC4 钛合金表面以铲削为主要损伤形式。单粒子铲削所形成的塑性区面积加大, 材料大量堆积于铲削坑周围, 导致试件表面塑性区相互重叠、破坏, 几乎不存在完整的单粒子冲蚀形貌; 图 9(d) 中 TC4 钛合金表面已无法辨认出典型的冲蚀形貌, 不规则断面广泛分布于视场。对保存较为完整的剥落面进行观察, 其中同样存在大量河流状花纹, 证明 TC4 钛合金表面发生了解理破坏; 图 9(e) 中粒径砂尘冲蚀作用下, 试件表面塑性冲蚀形貌基本消失, 表面严重碎片

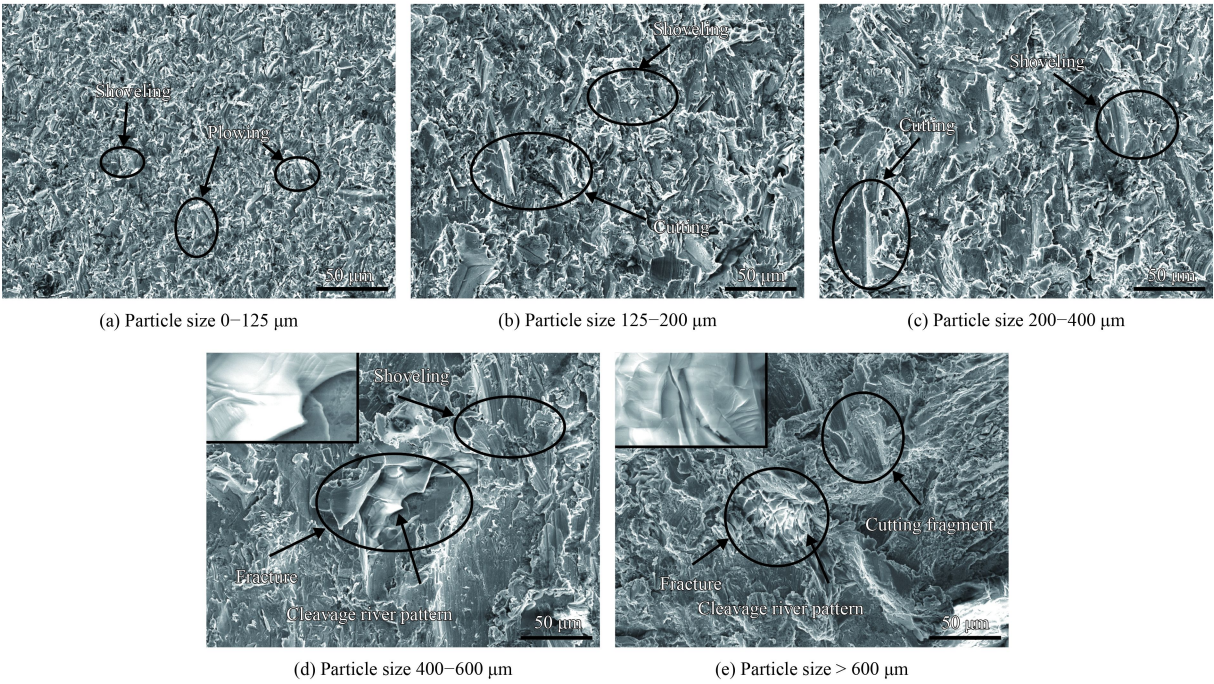


图 8 30°攻角下不同粒径沙尘作用下的 TC4 钛合金损伤 SEM 形貌

Fig.8 Damage SEM images of TC4 titanium alloy affected by different particle size at 30°

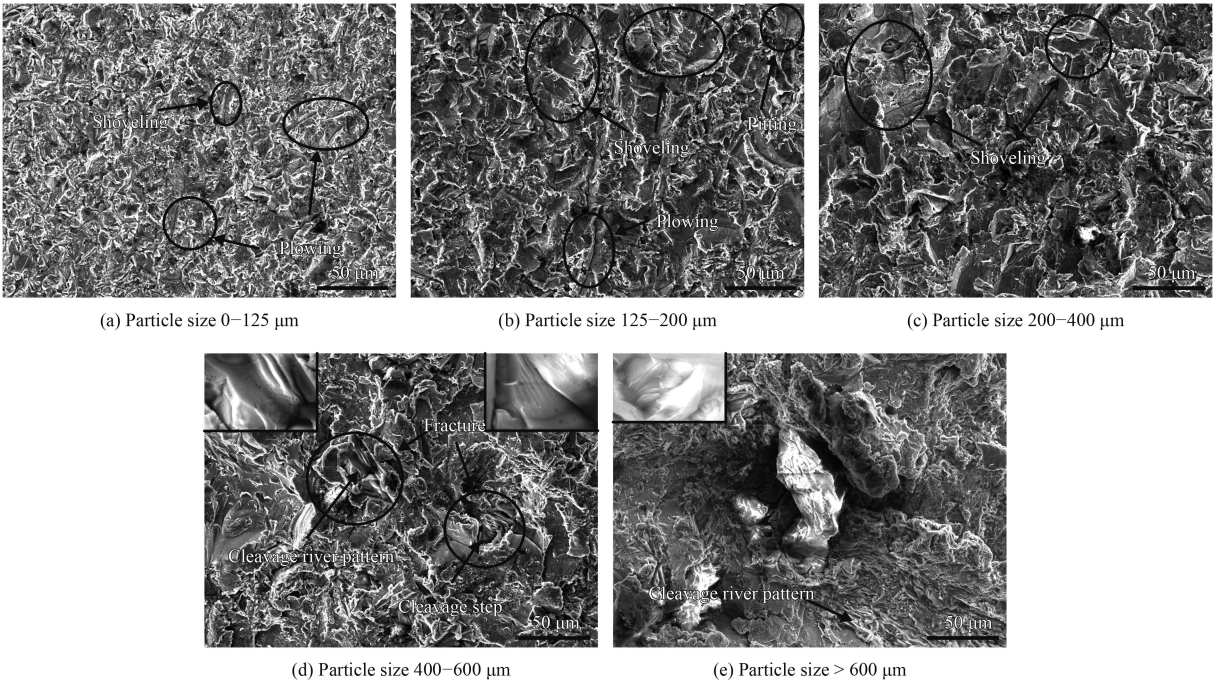


图 9 60°攻角下不同粒径沙尘作用下的 TC4 钛合金损伤 SEM 形貌

Fig.9 Damage SEM images of TC4 titanium alloy affected by different particle size at 60°

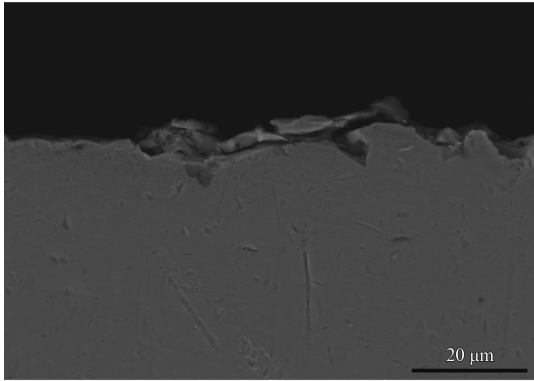
化且出现大尺寸凹坑，在坑内同样出现河流状花样，证明在该粒径冲蚀下，TC4 钛合金表面也发生了解理破坏。

对比两种角度冲蚀下的 TC4 钛合金表面的冲

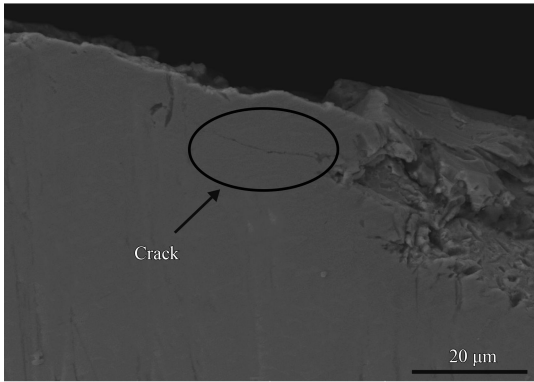
蚀形貌，冲蚀沙尘粒径在 200 μm 以下时，两者并无明显差异，粒径在 200~400 μm 时，30°条件下 TC4 钛合金表面塑性区交叠现象较弱，冲蚀特征更明显；粒径在 400~600 μm 时，两者都出现了明

显的解理特征, 但 30°冲蚀下表面损伤区域仍存在明显的铲削形貌。粒径大于 600 μm 时, 两者都有大片区域发生脆性剥落, 且 TC4 钛合金表面都发生了解理剥落。

图 10 为 60°攻角, 砂尘粒径 125~200 μm 及 > 600 μm 条件下, 钛合金冲蚀区截面形貌。图 10(a) 由砂尘反复冲击造成的损伤较浅, 冲蚀过程仅限于材料表面; 图 10(b) 中一方面冲蚀损伤深度增加, 另一方面, 在冲蚀区域以下, 出现了明显的横向裂纹, 该裂纹的萌生与扩展应与大粒径砂尘冲蚀下钛合金的解理剥落有关。



(a) Particle size 125~200 μm



(b) Particle size > 600 μm

图 10 60°攻角下不同粒径砂尘作用下的 TC4 钛合金截面 SEM 形貌

Fig.10 Cross section SEM images of TC4 titanium alloy affected by different particle size at 60°

2.4 TC4 钛合金表面冲蚀区残余应力测试

材料表面冲蚀区域的残余应力可以从一定程度上反映出不同粒径砂尘冲蚀所形成的表面硬化及塑性变形情况<sup>[20]</sup>。为了进一步确认砂尘粒径对 TC4 钛合金表面冲蚀损伤机理的作用规律, 利用 X 射线应力仪对试件表面冲蚀磨损区域进行检测, 每个试样测量 7 次, 并使用椭圆拟合。图 11

为不同粒径条件下 TC4 钛合金表面冲蚀区域的残余应力。由图可知, 在冲蚀磨损作用下, 试件表面均存在不同程度的硬化现象, 存在一定的残余压应力。在 30°与 60°攻角下, 残余应力最大值皆出现在 <125 μm 粒径砂尘冲蚀处, 之后随冲蚀砂尘粒径的增加, 试件表面残余压应力逐渐减小。但不同攻角下, 相同粒径砂尘冲蚀在时间表面产生的应力值有所差异。在以往研究中, 低角冲蚀时材料表面损伤以微切削为主因, 高角冲蚀时材料表面损伤以正面冲击为主因<sup>[12]</sup>, 损伤形式的差异就使得 TC4 钛合金表面呈现出不同的损伤形貌, 残余应力值也就会存在一定差异。

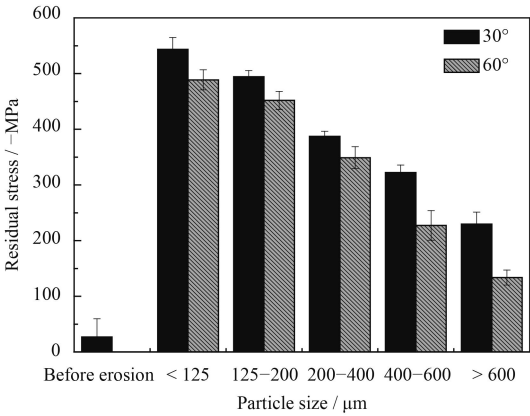


图 11 不同粒径砂尘作用下的 TC4 钛合金表面残余应力  
Fig.11 Residual stress of TC4 titanium alloy affected by different particle size

对于较小粒径, 砂尘的作用深度较浅, 冲蚀硬化区对下层材料起到了较好的保护作用, 同时, 由于 TC4 钛合金表面残余压应力较大, 冲蚀区域的塑性硬化区均匀而完整, 使得 TC4 钛合金的质量损失率维持在较低水平。随着砂尘粒径增大, TC4 钛合金表面主要损伤形式由犁削、点坑逐步过渡为切削、铲削单个砂粒对 TC4 钛合金的去除能力增强, 导致 TC4 钛合金塑性区变小, 同时砂尘冲蚀作用深度增加, 使得冲蚀硬化区对损伤的抑制作用减弱, 塑性区遭到严重破坏, 残余压应力得到一定程度的释放。对于粒径大于 400 μm 的砂尘, 由于 TC4 钛合金表面存在大量的脆性剥落情况, 残余压应力得到很大程度释放, TC4 钛合金质量损失率陡增。因此, TC4 钛合金表面冲蚀区域残余压应力随冲蚀砂尘粒径的增大, 呈现持续下降。

### 3 分析与讨论

砂尘粒径的变化,引起了 TC4 钛合金表面冲蚀形貌及质量损失率显著变化,而  $30^\circ$  与  $60^\circ$  两冲蚀角度的变化,仅使 TC4 钛合金表面损伤形貌发生部分差异,对质量损失率的影响有限。在本文试验条件下,当冲蚀砂尘粒径小于  $400\text{ }\mu\text{m}$  时,TC4 钛合金表面的损伤以切削、犁削、铲削以及点坑等塑性损伤形式为主,且对于不同粒径,TC4 钛合金的主要损伤形式也有所差异;对于较大粒径砂尘,尤其是  $400\text{ }\mu\text{m}$  以上大粒径,一方面粒子作用深度更深,使得表面冲蚀硬化层无法对 TC4 钛合金起到有效的保护作用;另一方面,使得表面部分区域发生脆性剥落,TC4 钛合金表面的冲蚀塑性区得到去除,残余应力降低,砂尘冲蚀对 TC4 钛合金表面的硬化作用随粒径增加不断减弱,造成大量质量流失。

TC4 钛合金表面的解理破坏,是其在大粒径砂尘冲蚀下发生严重损伤的重要原因。F. M. Beremin 等人<sup>[21-24]</sup>发现要使韧性试样发生脆性断裂,除了要超过临界应力之外,塑性应变还应满足一定要求。G.Z.WANG<sup>[25]</sup>等通过分析整理大量低合金钢和焊接金属四点弯曲实验数据,结合 F. M. Beremin 等的研究,提出了解理断裂的双判据模型。认为裂纹形核的临界塑性应变  $\varepsilon_{pc}$  与裂纹扩展所需的临界拉应力即断裂强度  $\sigma_f$  决定了材料的解理断裂行为。

$\varepsilon_{pc}$  与  $\sigma_f$  皆为材料的本质参数,对环境温度、加载速度的变化并不敏感<sup>[26]</sup>。当砂尘粒径较小时,在砂尘的反复冲击下表面冲蚀塑性区不断遭受挤压锻打,TC4 钛合金表面可以产生较高的塑性应变<sup>[27]</sup>,使局部塑性应变  $\varepsilon_p$  满足  $\varepsilon_p \geq \varepsilon_{pc}$  的裂纹形核条件。但是冲蚀区存在较高的残余压应力,其对裂纹扩展存在明显的抑制作用<sup>[28]</sup>,由于此时砂尘损伤能力有限,在冲蚀过程中难以克服该阻力,故裂纹源附近无法形成足够的拉应力  $\sigma_{yy}$  使裂纹发生扩展,即  $\sigma_{yy} \leq \sigma_f$ 。此时,TC4 钛合金表面的解理表现为裂纹的扩展控制,由于小粒径砂尘冲击靶材而在裂纹周围所产生的扩展应力无法达到临界值,故 TC4 钛合金表面不会发生解理剥落,而是产生塑性形变,并在砂尘的持续冲蚀下,材料以微切削以及挤压成片的方式发生流失<sup>[29]</sup>,如图 12 所示。

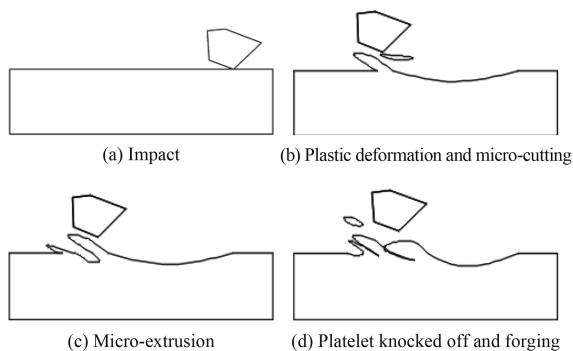


图 12 TC4 钛合金微切削、挤压成片示意图

Fig.12 Schematic diagram of micro-cutting and micro-extrusion of TC4 titanium alloy

随着砂尘粒径的增大,砂尘对 TC4 钛合金的作用效果逐渐明显,TC4 钛合金表面在砂尘冲击下产生高应变率。随砂尘粒径增大、其动能随之增大,一方面,导致 TC4 钛合金的屈服应力  $\sigma_y$  随加载速度的增加而升高,断裂韧性降低,材料因此变脆,抗断裂性能降低<sup>[30]</sup>;另一方面,使其对冲蚀区的作用力以及在裂纹源附近产生的拉应力  $\sigma_{yy}$  随之增大,使得  $\sigma_{yy} \geq \sigma_f$  的裂纹扩展条件更容易被满足。这时,TC4 钛合金表面的解理表现为起裂控制。图 13 为 TC4 钛合金表面解理破坏过程示意图,首先由粒子冲击 TC4 钛合金表面,形成冲蚀塑性区,塑性区在砂尘的反复冲击下局部产生较高的塑性应变。TC4 钛合金中存在的缺陷或第二相在高应变作用下形成裂纹源,后续高能粒子冲击下,裂纹源附近形成较高的扩展应力,在砂尘持续冲蚀下裂纹快速扩展,最终,试件表面以解理剥落的形式发生损伤。

结合试件表面冲蚀区域残余应力及冲蚀形貌

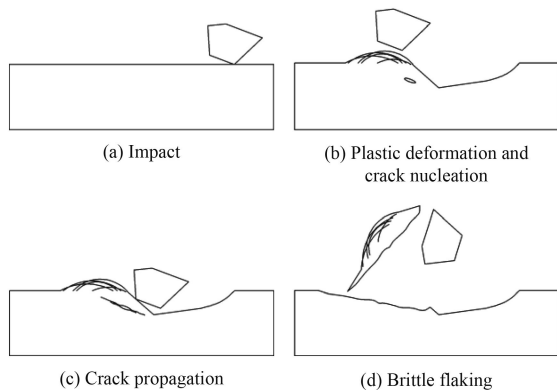


图 13 TC4 钛合金解理剥落示意图

Fig.13 Schematic diagram of cleavage fracture for TC4 titanium alloy

随砂尘粒径变化而出现的演化规律,砂尘粒径变化对 TC4 钛合金抗冲蚀磨损性能的影响最终是砂尘粒径的变化引起 TC4 钛合金响应模式的转变。当冲蚀砂尘粒径较小时,表面冲蚀区域存在较高的残余压应力,其对材料的冲蚀硬化作用较为明显。同时粒子作用深度较浅,表面硬化区对 TC4 钛合金起到了较好的保护作用,TC4 钛合金表面损伤以犁削为主;随着冲蚀砂尘粒径增大,粒子对表面塑性区的去除能力增强,表面材料流失以切削和铲削为主要形式。冲蚀区域残余压应力得到一定释放,同时粒子影响深度增加,硬化作用对 TC4 钛合金的保护作用降低,质量损失率有所提高。当冲蚀砂尘粒径继续增大,在冲蚀过程中 TC4 钛合金表面的局部会产生极高的应变率,并在该极端条件下出现河流花样等脆性特征,这就使得砂尘冲蚀在形成塑性区的同时,还造成 TC4 钛合金表面大范围的脆性剥落,这种剥落一方面导致残余压应力得到进一步释放,TC4 钛合金表面硬化区作用显著减弱,另一方面造成表面材料的大量流失,质量损失率急剧升高。

## 4 结 论

(1) 在  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  为攻角,冲蚀速度  $130\text{ m/s}$ ,砂尘浓度  $6\text{ g/m}^3$  的条件下,TC4 钛合金损伤情况在砂尘粒径  $400\text{ }\mu\text{m}$  处出现明显变化。

(2) 冲蚀磨损损伤机理的改变是导致大粒径砂尘冲蚀下,TC4 钛合金质量损失率突增的根本原因;在  $400\text{ }\mu\text{m}$  以下,TC4 钛合金表面损伤以塑性损伤形式为主;在  $400\text{ }\mu\text{m}$  以上时,以 TC4 钛合金表面的解理破坏、脆性剥落为主。在砂尘冲蚀速度一定的条件下,只有当砂尘粒径的增大使得 TC4 钛合金表面的解理行为由裂纹扩展控制转变为起裂控制,粒径因素才是影响其冲蚀磨损行为的主要因素之一。

(3) 小粒径冲蚀时,其在表面形成的硬化区对 TC4 钛合金起到了较好的保护作用,使质量损失率维持在较低水平;随着冲蚀粒径的增大,粒子作用深度加深,导致表面塑性硬化区发生破坏,残余压应力减小,硬化区的保护作用减弱,使质量损失率逐渐加大。

## 参考文献

[1] PLEDDERER I, PEPI M. Sand erosion test method for

DOD unique environments: Tri-service corrosion conference[C]. Aberdeen: Army Research Laboratory, 2008.

[2] WESTERGÅRD R, ERICKSON L C, AXÉN N, et al. The erosion and abrasion characteristics of alumina coatings plasma sprayed under different spraying conditions[J]. Tribology International, 1998, 31(5): 271-279.

[3] 梁存光,李新梅.喷涂距离对等离子体喷涂 WC-12Co 涂层抗冲蚀磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(6): 111-121.

LIANG C G, LI X M. Effects of spraying distance on erosion wear behavior of WC-12Co coatings prepared by APS[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(6): 111-121 (in Chinese).

[4] 徐斌,楼白杨,白万金,等.激光熔覆制备 SiC/Ni 基复合涂层及其耐冲蚀性能[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 147-150.

XU B, LOU B Y, BAI W J, et al. Synthesis of SiC/Ni composite coatings by laser cladding and property of erosion resistance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(1): 147-150 (in Chinese).

[5] 王新昶.高性能金刚石薄膜的制备、摩擦学性能及其在内孔表面的应用研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.

WANG X X. Study on fabrication, tribological properties of highperformance diamond films and application on hole surface[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015 (in Chinese).

[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] MAURER C, SCHULZ U. Solid particle erosion of thick PVD coatings on CFRP[J]. Wear, 317(1-2): 246-253.

[8] 董刚,张九渊.固体粒子冲蚀磨损研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(2): 307-312.

DONG G, ZHANG J Y. Developments of research on the solid particle erosion of materials[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003, 21(2): 307-312 (in Chinese).

[9] PARSI M, NAJMI K, NAJAFI FARD F, et al. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 850-873.

[10] NGUYEN V B, NGUYEN Q B, ZHANG Y W, et al. Effect of air-borne particle-particle interaction on materials erosion[J]. Wear, 2015, 322-323: 17-31.

[11] PEPI M, SQUILLACIOTI R, PFLEDDERER L, et al. Solid particle erosion testing of helicopter rotor blade materials[J]. Springer, 2012, 12(1): 96-108.

[12] 姜心,张来斌,樊建春,等.冲蚀角度对 40CrNi2Mo 材料冲

- 蚀磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2012, 37(6): 24-26.
- JIANG X, ZHANG L B, FAN J C, et al. Effect of impact angle on erosive resistance of 40CrNi2Mo[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(6): 24-26 (in Chinese).
- [13] TALIA M, LANKARANI H, TALIA J E. New experimental technique for the study and analysis of solid particle erosion mechanisms[J]. Wear, 1999, 225(4): 1070-1077.
- [14] 李阳, 刘阳, 段德莉, 等. WC-Co-Cr 涂层和 0Cr13Ni5Mo 基材的气体喷砂冲蚀行为[J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 14-20.
- LI Y, LIU Y, DUAN D L, et al. Sand-blasting erosion behavior of HVOF sprayed WC-Co-Cr coatings and 0Cr13Ni5Mo substrate[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(2): 14-20 (in Chinese).
- [15] 国防科学技术工业委员会. 军用直升机防沙尘要求: GJB 1171-91[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1992: 1-3.
- Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Requirements for sand and dust protection of military helicopters: GJB 1171-91[S]. Beijing: Technology and Industry for National Defense, 1992: 1-3 (in Chinese).
- [16] US Department of Defense. Engines, aircraft, turboprop, general specification for: MIL-E-8593[S]. Washington: US Department of Defense, 1954.
- [17] 陶春虎, 曹春晓, 张卫方, 等. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 199-200.
- TAO C H, CAO C X, ZHANG W F, et al. Failure and prevention of aeronautical titanium alloy[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 199-200 (in Chinese).
- [18] 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 X, WANG G, HE W F, 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).
- [19] RUFF A W, IVES L K. Measurement of solid particle velocity in erosive wear[J]. Wear, 1975, 35(1): 195-199.
- [20] 吉小超, 张伟, 于鹤龙, 等. 45 钢在超细 SiC 颗粒作用下的正向冲蚀行为[J]. 中国表面工程, 2012, 25(5): 67-72.
- JI X C, ZHANG W, YU H L, et al. Erosion behavior of 45 steel by ultrafine SiC particle under normal impact condition[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(5): 67-72 (in Chinese).
- [21] BEREMIN F M, PINEAU A, MUDRY F, et al. A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel[J]. Metallurgical Transactions A, 1983, 14(11): 2277-2287.
- [22] MENDIRATTA M G, GOETZ R L, DIMIDUK D M. Notch fracture in  $\gamma$ -titanium aluminides[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1996, 27(12): 3903-3912.
- [23] WALL M, LANE C E, HIPPSLEY C A. Fracture criteria for hydrogen and temper embrittlement in 9Cr1Mo steel[J]. Acta Metallurgica Et Materialia, 1994, 42(4): 1295-1309.
- [24] CHEN J H, WANG G Z, YAN C, et al. Advances in the mechanism of cleavage fracture of low alloy steel at low temperature. Part II: Fracture model[J]. International Journal of Fracture, 1997, 83: 121-138.
- [25] WANG G Z, CHEN J H. Cleavage fracture criterion of low alloy steel and weld metal in notched specimens[J]. International Journal of Fracture, 1998, 89(3): 269-284.
- [26] CHEN J H, WANG G Z, YAN C, et al. Advances in the mechanism of cleavage fracture of low alloy steel at low temperature[J]. International Journal of Fracture, 1997, 83(2): 139-157.
- [27] 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(3): 99-106.
- ZHANG Y Q, CHEN D Y, GU P Z. Study on erosion wear mechanism of ductile materials[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1989(3): 99-106 (in Chinese).
- [28] 胡奈赛, 张定铨. 表面形变强化层中裂纹的萌生与扩展[J]. 机械强度, 1992(3): 38-42.
- HU N S, ZHANG D Q. Initiation and propagation of cracks in surface deformation strengthening layer[J]. Journal of Mechanical Strength, 1992(3): 38-42 (in Chinese).
- [29] 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 X M, SHANG X Y. Study on erosion resistance of three stainless steel materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(3): 68-72.
- [30] 李曙林. 飞机与发动机强度[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- LI S L. Aircraft and engine strength[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)