

# 钛合金靶材颗粒冲蚀磨损及 能量转化特性数值研究

侯燕芳, 蔡柳溪, 姚佳伟, 贺尧, 李云

(西安交通大学 化学工程与技术学院, 西安 710049)

**摘要:** **目的** 解决钛合金材料固体颗粒磨损问题。**方法** 采用显式动力学有限元分析手段, 结合 Johnson-cook 材料模型和应变累积失效模型, 对多颗粒连续冲击 Ti-6Al-4V 钛合金靶材的冲蚀特性和能量转化特性进行数值模拟。**结果** 在颗粒以倾斜角度连续冲击靶材时, 最大冲蚀应力呈现一定波动性。当颗粒在法向连续冲击时, 靶材会快速进入稳定冲蚀阶段。在不同入射角度下, 多颗粒连续冲击靶材的最大应力均位于靶材产生材料堆积的位置。在入射角  $90^\circ$  和入射速度  $130\text{ m/s}$  下, 当颗粒尺寸从  $50\text{ }\mu\text{m}$  增至  $150\text{ }\mu\text{m}$  时, 最大冲击坑深度从  $3.124\text{ }\mu\text{m}$  增至  $8.997\text{ }\mu\text{m}$ 。当颗粒尺寸超过  $100\text{ }\mu\text{m}$  后, 由于加工硬化机制的影响, 后续颗粒冲击产生的应力比第 1 次冲击产生的应力降低了  $30\%\sim 60\%$ 。在冲角为  $30^\circ$  下, 当摩擦因数从 0 增至 0.2 时, 颗粒动能损失增大了  $22.69\%$ 。随着入射角度的增加, 摩擦因数对颗粒动能损失的影响逐渐减弱。**结论** 从微观机制上解释了入射角度和颗粒粒径对多颗粒连续冲蚀行为的影响, 明确了摩擦因数对颗粒冲蚀过程中能量转化特性的影响。

**关键词:** 钛合金; 冲蚀磨损; 能量转化; 摩擦因数; 数值模拟

中图分类号: TH117 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)08-0151-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.08.010

## Numerical Study on Particle Erosion and Energy Conversion Characteristics of Titanium Alloy Target

HOU Yan-fang, CAI Liu-xi, YAO Jia-wei, HE Yao, LI Yun

(School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the problem of solid particle erosion of titanium alloy materials, the nonlinear dynamic numerical simulation based on the finite element method is an important tool to study the high temperature erosion and failure mechanism of materials, which can effectively make up for the lack of detailed description in erosion experiments. In this paper, a systematical numerical simulation study on the erosion characteristics and energy conversion

收稿日期: 2022-07-29; 修订日期: 2022-11-22

Received: 2022-07-29; Revised: 2022-11-22

基金项目: 国家自然科学基金 (52076173); 中国博士后科学基金 (2020M680157)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52076173); China Postdoctoral Science Foundation (2020M680157)

作者简介: 侯燕芳 (1999—), 女, 硕士生, 主要研究方向为材料冲蚀磨损。

Biography: HOU Yan-fang (1999-), Female, Postgraduate, Research focus: erosion and of materials.

通讯作者: 蔡柳溪 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为多相流及材料冲蚀磨损。

Corresponding author: CAI Liu-xi (1985-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: multiphase flow and erosion of materials.

引文格式: 侯燕芳, 蔡柳溪, 姚佳伟, 等. 钛合金靶材颗粒冲蚀磨损及能量转化特性数值研究[J]. 表面技术, 2023, 52(8): 151-160.

HOU Yan-fang, CAI Liu-xi, YAO Jia-wei, et al. Numerical Study on Particle Erosion and Energy Conversion Characteristics of Titanium Alloy Target[J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 151-160.

characteristics of multi-particle impact on Ti-6Al-4V titanium alloy target material was performed with the help of explicit dynamic finite element analysis, the Johnson-cook material model and the strain accumulation failure criterion model. Before calculation, the maximum Mises stress and the maximum indentation depth were used as the evaluation indicators, and a grid independence verification of the calculation model was carried out to determine the number of grids and the minimum grid size of the calculation model. After that, the effectiveness of the numerical method adopted in this paper was verified by comparing with the calculation results of the Hertzian elasticity theory, and the error between theoretical calculation and numerical simulation under different working conditions was less than 8.4%.

When the particles continuously impacted at a large incident angle, the target could enter the stable erosion stage faster. At this time, the erosion stress, the maximum indentation depth and the equivalent plastic strain would remain constant. However, when the particles continuously impacted the target at a small incident angle, the maximum stress during the erosion process exhibited a certain fluctuation due to the interaction between different wear mechanisms. The smaller the incident angle, the larger the fluctuation of the maximum stress of erosion.

The maximum stress for continuous impacts of multiple particles on the target at different incident angles was located at the position where the target produced material accumulation. The maximum impact stress peaks at 30°, 60° and 90° attack angles were located downstream the impact center, upstream the impact center and around the impact center, respectively. As the number of impacts increased, the uniformity of the stress distribution also increased.

At an incidence angle of 90° and an incidence velocity of 130 m/s, the maximum impact depth increased from 3.124  $\mu\text{m}$  to 8.997  $\mu\text{m}$  as the particle size increased from 50  $\mu\text{m}$  to 150  $\mu\text{m}$ . However, when the particle size exceeded 100  $\mu\text{m}$ , due to the influence of the work hardening mechanism, the stress generated by the subsequent particle impact was 30%-60% lower than that of the first impact.

When the incident angle was small, the change of friction coefficient significantly affected the size of particle kinetic energy loss. Under the incident angle of 30 degrees, when the friction coefficient increased from 0 to 0.2, the kinetic energy loss of particles increased by 22.69%. As the incident angle increased, the effect of the friction coefficient on the kinetic energy loss of the particles was weakened, and the frictional dissipation energy decreased accordingly.

The effects of incident angle and particle size on the continuous erosion behavior of multi-particles are explained in terms of microscopic mechanisms, and the effect of friction coefficient on the energy conversion characteristics during the particle erosion process is clarified.

**KEY WORDS:** titanium alloy; erosion wear; energy conversion; friction coefficient; numerical simulation

钛合金具有比强度高、比韧性高、耐腐蚀优异、耐高温性好和成形性良好等综合性能,广泛应用于生物医学、石油化工等领域<sup>[1]</sup>。在服役过程中,由于服役环境恶劣且自身硬度较低,钛合金构件经常受到硬质颗粒物的冲蚀磨损。例如在飞机低空飞行、起飞和降落过程中,空气中的尘埃和沙粒会对压气机钛合金叶片造成严重的冲蚀损伤,显著缩短了发动机的工作寿命<sup>[2-3]</sup>。高压高温深井气层出砂会对钛合金油管造成冲蚀损伤,从而降低输油质量,提高开采成本<sup>[4-5]</sup>。类似问题屡见不鲜,已经成为影响设备寿命和安全运行的重要因素,因此研究 Ti-6Al-4V 合金的冲蚀损伤机理和防治方法对于延长钛合金部件的服役寿命具有重要意义。

目前,针对颗粒冲蚀磨损机理的研究主要借助于实验测量和数值模拟 2 种手段。任小萍<sup>[6]</sup>、耿明睿等<sup>[7]</sup>、Avcu 等<sup>[8]</sup>、Naveed 等<sup>[9]</sup>分别针对 Ti-6Al-4V 合金材料开展了固体颗粒冲蚀实验研究,探索了入射角度、颗粒尺寸、入射速度及靶材特性等因素对靶材冲蚀率和

冲蚀机制的影响。冲蚀实验方便研究者从宏观角度分析颗粒形状、靶材特性、实验参数等单一因素对材料冲蚀率的影响规律,但缺乏对颗粒撞击冲蚀过程的瞬态演化分析,因此在揭示冲蚀机理方面仍有欠缺。

基于有限元方法的非线性动力学数值模拟是研究材料高温侵蚀和破坏机制的重要工具,可以有效弥补冲蚀实验研究在细节方面的不足。Eltobgy 等<sup>[10]</sup>采用三维有限元方法结合 Johnson-cook 模型分析了 Ti-6Al-4V 合金的冲蚀情况,指出用单一颗粒冲击来模拟目标材料的冲蚀,无法准确计算材料的冲蚀率,且未考虑小粒径的颗粒尺寸效应对材料表面冲蚀性能的影响。Zheng 等<sup>[11]</sup>对多颗粒冲蚀 Q345 钢的过程进行了有限元模拟,发现小角度下材料的侵蚀机制是塑性变形和切割,大角度下是垂直开裂和疲劳。Yaer 等<sup>[12]</sup>建立了 GH720Li、GH4738 和 GH4169 等 3 种材料的多颗粒同时冲击模型,揭示了不同条件下各种材料表面的侵蚀失效特性及与靶材弹塑性行为之间的关联机制。Di 等<sup>[13]</sup>采用有限元方法研究了颗粒形状

对不锈钢靶材冲蚀特性的影响, 指出微切削在片状颗粒冲蚀过程中起着主导作用, 而球形颗粒冲蚀过程中移除材料的主要机制是微挤压和锻造。Khoddami 等<sup>[14]</sup>建立了对单一目标位置和多目标区域同时冲击 2 种有限元模型, 研究了 Ti-6Al-4V 合金的多重固体颗粒侵蚀失效特征, 指出 45° 冲角下合金的冲蚀率最大, 且剪切应力在 Ti-6Al-4V 材料的塑性和破坏演化中起着重要作用。然而, 仅对冲击角度对冲蚀率的影响规律进行探索, 并不能明晰冲蚀过程中的动态侵蚀机制。

总结上述文献发现, 国内外学者通过有限元数值模拟, 对多颗粒冲击不同材料表面造成的材料冲蚀破坏特征进行了大量研究, 获得了相关因素对材料冲蚀率的影响规律, 加深了人们对材料冲蚀破坏的认识。然而, 对多颗粒连续冲击 Ti-6Al-4V 表面的动态冲蚀机制及侵蚀坑的几何形状演变规律仍不明晰。同时, 由于对侵蚀过程中颗粒-靶材系统的能量转化特性的研究匮乏, 颗粒与壁面相互作用的机理及颗粒冲蚀与颗粒撞击壁面反弹行为之间的内在联系均尚未阐明。基于上述背景, 本文采用显式动力学有限元方法结合 Johnson-cook 材料模型和应变累积失效模型, 对多颗粒连续冲击 Ti-6Al-4V 钛合金靶材的冲蚀行为进行数值模拟, 探索入射角度、冲击次数、颗粒尺寸等因素对钛合金靶材冲蚀形貌、冲蚀应力的影响。在此基础上, 对比分析摩擦因数对颗粒冲蚀过程中能量转化特性的影响, 拟为钛合金靶材多颗粒连续冲蚀损伤机理研究提供参考。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 数学模型

使用 ABAQUS CAE 建立如图 1 所示的多颗粒冲蚀模型。 $d$  为颗粒直径, 颗粒的直径分别为 50、100、150  $\mu\text{m}$ 。颗粒采用特制石英砂, 在模拟过程中, 将颗粒视为刚体, 因此只需考虑颗粒的密度。材料参数如表 1 所示。实际粒子为一些形状不规则的尖角粒子和

圆形粒子, 根据球形颗粒计算得到的应力比不规则粒子所得结果更大, 因此选择球形粒子计算更具说服力<sup>[15]</sup>。单颗粒冲击研究是冲蚀磨损研究的基础, 可以更好地理解粒子去除材料的机理, 明确材料属性和粒子大小、速度、撞击角度等对材料去除的影响<sup>[16]</sup>。文献[10]指出, 单个粒子冲击很难完整解释冲蚀现象, 因此为了与实际情况更接近, 有必要采用连续多个粒子对同一位置进行冲击。

靶材采用 Ti-6Al-4V 合金。由于在高速冲击过程中, 材料的应变率将达到  $10^4 \text{ s}^{-1}$  以上<sup>[17]</sup>, 在高应变率情况下材料所具备的性能与常态下有相当大的差距, Johnson-cook 材料模型是一种经验型的黏弹性本构模型, 这种模型可以较好地描述金属材料的加工硬化效应、应变率效应和温度软化效应, 因此 Johnson-cook 模型成为冲蚀磨损机理研究中常用的本构模型<sup>[18]</sup>。这里选用 Johnson-Cook 模型作为靶材的本构模型, 以模拟冲蚀过程中材料的流动应力行为, 见式 (1)。

$$\sigma_f = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 - \hat{\theta}^m) \quad (1)$$

式中:  $\bar{\epsilon}^{pl}$  为等效塑性应变;  $n$  为应变硬化指数;  $\dot{\epsilon}$  为应变率;  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率;  $m$  为温度软化指数;  $A$  为材料的屈服强度;  $C$  为应变率敏感指数;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  均为实验测得的常数, 具体数值见表 2;  $\hat{\theta}$  为无量纲温度, 见式 (2)。

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0 & \theta < \theta_{\text{transition}} \\ (\theta - \theta_{\text{transition}}) / (\theta_{\text{melt}} - \theta_{\text{transition}}) & \theta_{\text{transition}} \leq \theta \leq \theta_{\text{melt}} \\ 1 & \theta > \theta_{\text{melt}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为当前温度;  $\theta_{\text{melt}}$  为熔融温度;  $\theta_{\text{transition}}$  为转变温度。

采用应变累积失效作为材料的失效模型, 模拟冲蚀过程中的材料去除, 即 Johnson-Cook 材料损伤模型。该模型考虑了应力三轴度、应变率和温度效应, 如式 (3) 所示。

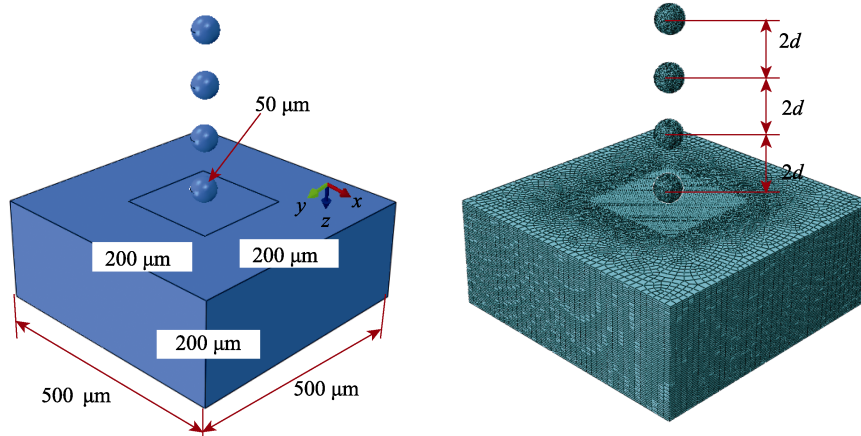


图 1 几何模型和网格划分  
Fig.1 Geometric model and meshing sketches

表 1 颗粒的材料属性  
Tab.1 Material properties of particles

Material parameter	Density/ ( $\text{mg} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	Elastic modulus/GPa	Poisson ratio
Rigid sphere	2.2	73.1	0.16

表 2 Ti-6Al-4V 材料参数<sup>[19]</sup>  
Tab.2 Ti-6Al-4V material parameters<sup>[19]</sup>

Density/ ( $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	Elastic modulus/ GPa	Poisson ratio	$C_p$ / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$T_{\text{room}}$ / K	$T_{\text{melt}}$ / K	$A$ / MPa	$B$ / MPa
4.44	115	0.34	6.11	298	1 910	862	1 080
$n$	$C$	$m$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
0.341	0.0182	0.77	-0.09	0.27	0.48	0.014	3.86

$$\bar{\varepsilon}_f^{\text{pl}} = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( -d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{\text{pl}}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\theta}) \quad (3)$$

式中： $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 、 $d_5$  为材料的固有参数，可以由实验测得，具体数值如表 2 所示<sup>[19]</sup>； $p$  为压应力； $q$  为 Mises 应力； $\bar{\varepsilon}_f^{\text{pl}}$  为破坏应变； $\dot{\varepsilon}^{\text{pl}}$  为有效塑性应变率。

Johnson-Cook 损伤参数  $D$  由式 (4) 给出。

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^{\text{pl}}}{\bar{\varepsilon}_f^{\text{pl}}} \quad (4)$$

式中： $\bar{\varepsilon}^{\text{pl}}$  为等效塑性应变增量。当损伤参数  $D$  达到 1 时，破坏发生，单元删除。

另外，材料冲蚀是一个大变形动力学过程，显式算法对于求解动力学问题具有较大优势，因此采用 ABAQUS/Explicit 求解器进行求解。显式动力学基本方程如式 (5) 所示<sup>[20]</sup>。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{F}_{\text{ext}} - \mathbf{F}_{\text{int}} \quad (5)$$

式中： $\mathbf{M}$  为质量矩阵； $\ddot{\mathbf{U}}$  为节点加速度； $\mathbf{F}_{\text{ext}}$  为节点上的外部载荷； $\mathbf{F}_{\text{int}}$  为节点内力。

设置靶材与颗粒之间为库仑摩擦，摩擦因数为 0.2。颗粒冲击到靶材表面后反弹，不穿透靶材，法向为硬接触。每个颗粒与靶材之间的接触采用面-面接触，接触面追踪方式为有限滑移。将颗粒表面设置为从面，将靶材表面设置为主面。忽略颗粒相互作用的影响，颗粒之间不施加接触。对靶材底部约束所有自由度，颗粒设置 130 m/s 的初速度，忽略颗粒的损伤和破碎。

## 1.2 网格无关性验证

为了确保网格数量不影响数值模拟结果，进行了网格无关性验证。颗粒采用 C3D4 网格，靶材采用 C3D8R 网格，冲击速度为 130 m/s，颗粒直径为 50  $\mu\text{m}$ ，如图 2 所示。从图 2 可以看出，当网格节点数量超过 4 000 000 时，最大 Mises 应力和最大压痕深度基本稳定，数值变化分别小于 2.02% 和 0.17%。该模型对应

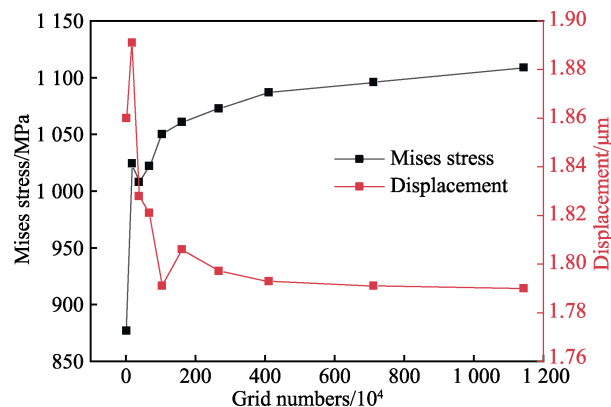


图 2 网格无关性验证  
Fig.2 Grid independence verification

的最小网格尺寸为 0.83  $\mu\text{m}$ 。在该网格尺度下，可兼顾计算效率、计算精度和计算资源。由此，这里的计算模型中所使用的最小网格尺寸均约为 0.83  $\mu\text{m}$ 。

## 1.3 数值模型有效性验证

当单个固体粒子垂直冲击靶材时，刚性球体的运动受到接触反力的制约，通过 Hertz 理论可以计算得到作用在刚性球上的力，见式 (6)<sup>[21-22]</sup>。

$$F = K_0 E D^{1/2} b^{3/2} \quad (6)$$

式中： $K_0$  为常数，一般取 1.036； $E$  为靶材的弹性模量； $D$  为刚性颗粒的直径； $b$  为压痕深度。

弹性势能可表示为式 (7)。

$$E_p = \frac{1}{2} F b = \frac{1}{2} K_0 E D^{1/2} b^{5/2} \quad (7)$$

球体在撞击瞬间的动能的计算见式 (8)。

$$E_k = \frac{1}{2} m v_0^2 \quad (8)$$

式中： $m$  为颗粒的质量； $v_0$  为颗粒撞击靶材表面的瞬时速度。

忽略撞击过程中的能量损伤，颗粒的动能全部转化为靶材的势能，即  $E_p = E_k$ ，由此可以计算得到最大压痕深度，见式 (9)。

$$b_{\text{max}} = \sqrt[5]{\frac{m^2 V_0^4}{K_0^2 E^2 D}} = \sqrt[5]{\frac{8 \pi^2 \rho^2 V_0^4}{9 K_0^2 E^2}} R \quad (9)$$

式中： $R$  为颗粒半径； $\rho$  为颗粒材料密度。

为了计算颗粒压入靶材所需的时间，除上述非线性方程外，还需对载荷-压痕方程进行线性化。线性条件下的势能方程见式 (10)。

$$E_p^* = \frac{1}{2} k_{\text{eq}} b^2 \quad (10)$$

式中： $k_{\text{eq}}$  为颗粒的线性刚度。

假设压痕深度在  $0 \sim b_{\text{max}}$  内，靶材势能在非线性方程和线性方程中保持一致，即  $E_p^* = E_p$ ，则颗粒的线性刚度计算见式 (11)。

$$k_{eq} = K_0 E D^{1/2} b_{max}^{1/2}$$

(11)

颗粒完全压入靶材所需的时间可以表示为简谐运动周期的 1/4, 则颗粒完全压入靶材所需时间的计算见式 (12)。

$$t_{imp} = \frac{1}{4} T_s = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{k_{eq}}} \propto R$$

(12)

不同粒径颗粒的冲击深度及时间模拟结果与理论计算值之间的误差如表 3 所示。模拟结果表明, 当粒子逐渐与基体接触后, 在相互作用力下不断压缩基体材料。在入射速度为 130 m/s、颗粒粒径为 50  $\mu\text{m}$  的条件下, 颗粒压入靶材的最大深度和时间分别为 1.642  $\mu\text{m}$  和 20.018 ns, 使用式 (9) 和 (12) 计算得到的理论值为 1.529  $\mu\text{m}$  和 18.469 ns, 此时, 材料失效体积达到最大值, 模拟结果与理论值的误差分别为 7.39% 和 8.39%, 在可接受范围内。根据式 (9) 和 (12) 可知, 最大冲击深度和冲击时间与颗粒粒径成正比。即随着颗粒粒径的增加, 冲击深度增加, 冲击时间也增加, 这与表 3 所反映的趋势一致。此外, 从表 3 可以看出, 有限元模拟结果与理论计算具有很好的一致性, 可以认为文中采用的数值模型可靠。

## 2 结果与讨论

### 2.1 钛合金靶材多颗粒连续冲蚀损伤特性

为了探索多颗粒连续冲蚀 Ti-6Al-4V 钛合金靶材的损伤机理, 这里结合冲蚀过程中靶材表面的形貌变化特征, 分别从 Mises 应力、等效塑性应变和  $z$  向位移等方面分析钛合金靶材表面多颗粒的冲蚀损伤特性。在 90° 冲角下, 4 个 50  $\mu\text{m}$  的颗粒连续冲击靶材表面后的  $z$  向位移、Mises 应力和等效塑性应变结果如图 3 所示。可以看到, 由于颗粒的锻造挤压作用, 球形粒子在靶材表面留下了凹坑和挤压唇, 这与马松林等<sup>[23]</sup>通过颗粒冲击实验得到的靶材表面宏观冲蚀形貌(冲击坑, 冲击坑的周围形成了堆积物)相吻合。同样, Takaffoli 等<sup>[24-26]</sup>基于 Al6061-T6 合金冲蚀实验和有限元模拟也证实了这一过程。随着前 3 次冲击的进行, 冲蚀坑的面积逐渐变大, 中心位置的最大  $z$  向位移(最大压痕深度)相应增大, 周围堆积了更多的材料, 但每次的冲击深度随着冲击次数的增加而减小, 在第 1 次撞击后获得了最大深度, 与第 1 次撞击

表 3 有限元和 Hertz 理论计算结果对比  
Tab.3 Comparison of finite element and Hertz theory calculation results

Particle size/ $\mu\text{m}$	$b_{\text{max}}$ theory/ $\mu\text{m}$	$b_{\text{max}}$ simulation/ $\mu\text{m}$	Relative error/%	$t_{\text{max}}$ theory/ns	$t_{\text{max}}$ simulation/ns	Relative error/%
50	1.529	1.642	7.39	18.469	20.018	8.39
100	3.057	3.216	5.20	36.938	37.545	1.64
150	4.586	4.698	2.44	55.407	60.049	8.39

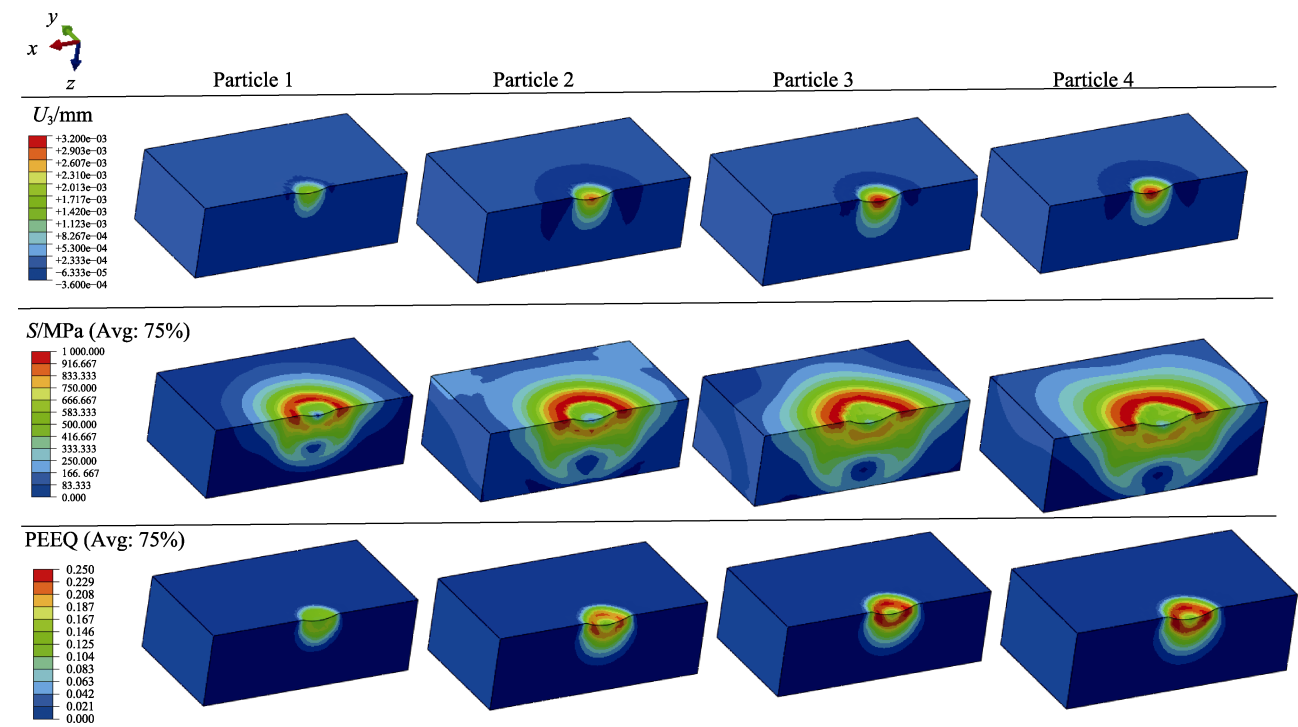


图 3 90°冲角下多颗粒的  $z$  向位移、应力、等效塑性应变  
Fig.3  $U_z$ ,  $S$  and PEEQ of multiple particles at 90° incidence angle

相比,第2次和第3次撞击的深度较小。这是由于多次撞击造成材料表面硬化。从第4次冲击开始, $z$ 向位移不再增加。观察应力云图发现,在颗粒的连续冲击下,靶材的最大Mises应力并非位于冲击的正中心,而是位于距离冲击中心有一定距离的亚中心,最大应力发生位置与图3变形云图中材料的堆积位置相对应。当前3次冲击完成后,靶材中受冲蚀部位的最大应力和等效塑性应变从975 MPa和0.161逐渐增至986 MPa和0.249。第4个颗粒继续冲击靶材表面后,靶材中受冲蚀部位的最大应力和最大等效塑性应变均不再增加,冲蚀进入稳定状态。从上述分析可知,在颗粒冲蚀过程中靶材表面冲蚀形貌的衍化与靶材表面应力的变化存在一定的对应关系。新巴雅尔等<sup>[27]</sup>根据实验和模拟结果指出,材料表面磨损的方式和大小与表面应力的分布和大小密切相关,这与前文的分析一致。因为颗粒在靶材表面特定的磨损方式下形成了相应的冲蚀形貌。探索冲蚀过程中材料表面应力的变化对分析冲蚀形貌及相应的冲蚀磨损方式具有指导意义。

分析了入射角度对颗粒群连续冲击钛合金靶材冲蚀特性的影响,在 $30^\circ$ 和 $60^\circ$ 冲角下不同颗粒撞击靶材表面的最大压入深度、最大等效塑性应变和最大应力如图4—5所示。从图4—5中可以看出,在倾斜的入射角度下,靶材表面的最大压入深度和最大等效塑性应变遵循法向冲击同样的规律。即,在颗粒前3次冲击完成后,靶材表面的最大压入深度和最大等效塑性应变基本稳定,不再随着后续颗粒的撞击而发生变化。在冲蚀应力方面,在倾斜入射角度下,冲蚀区域的最大应力随着冲击次数的增加在一定范围内波动。相比之下,在 $60^\circ$ 冲角下,靶材的最大冲蚀应力的波动幅度比在 $30^\circ$ 冲角下的小。仔细分析认为,在倾斜入射角度下,颗粒对塑性靶材的冲蚀是切削磨损和变形磨损共同作用的结果。随着颗粒入射角度的增大,冲击力的法向分量增大,变形磨损对靶材

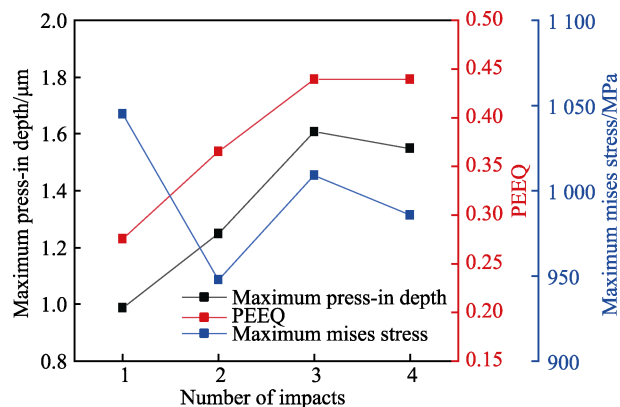


图4  $30^\circ$ 冲角下的最大压入深度、最大等效塑性应变和最大应力

Fig.4 Maximum press-in depth, equivalent plastic strain and stress values at  $30^\circ$  incidence angle

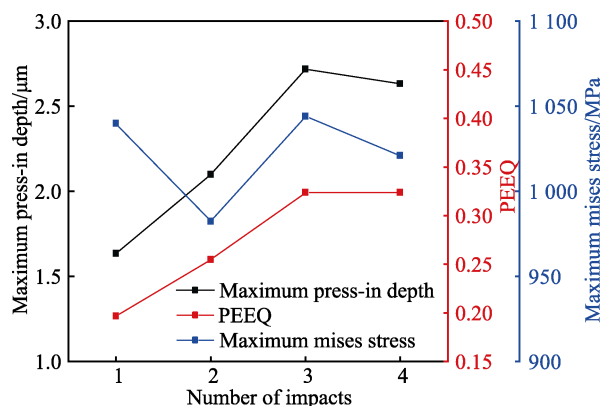


图5  $60^\circ$ 冲角下的最大压入深度、最大等效塑性应变和最大应力

Fig.5 Maximum press-in depth, equivalent plastic strain and stress values at  $60^\circ$  incidence angle

冲蚀的贡献更突出。在 $90^\circ$ 法向冲击下,靶材的冲蚀损伤基本由变形磨损引起,因此可以认为,当颗粒以较大入射角度连续冲击时,靶材可以更快地进入稳定冲蚀阶段。在入射角度较小时,尽管冲蚀效率更高,但因不同磨损机制间的相互作用,导致冲蚀过程中的最大应力呈现一定的波动性,入射角越小,这种波动越明显。Li等<sup>[28]</sup>在高速磨损实验中也发现,冲蚀中心和冲蚀边缘的应力均随着冲蚀时间的延长而不断变化,这在一定程度上证明文中数值模拟结果的可靠性。另外,耿明瑞等<sup>[7]</sup>在冲蚀实验中发现,在颗粒倾斜冲击下,钛合金表面的损伤形式以犁削为主,这实质上是切削磨损与变形磨损共同作用的结果。

为了进一步探索多颗粒连续冲蚀钛合金靶材表面的应力变化特性,这里对如图6所示的Path-1路径上的应力进行了提取统计。相较于选取特征距离提取应力的方式,尽可能多地提取路径上不同节点的应力数据,可以更清楚地反映冲蚀应力的分布情况。在 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 入射角度下,不同冲击次数下的靶材表面应力分别如图7—9所示。结果表明,当颗粒以 $30^\circ$ 入射角冲击靶材时,Path-1路径上4次冲击产生的最大峰值应力分别为936.23、753.18、654.33、633.04 MPa。通过观察还发现,在第1次冲击时,只出现了1个冲击应力峰。随着冲击次数的增加,最大应力显著降低,冲击应力峰的数量却逐渐增多。4次冲击所产生的最大冲击应力峰值均位于反弹侧,这与颗粒在 $30^\circ$ 小角度冲击下的靶材表面发生材料堆积的部位相对应。

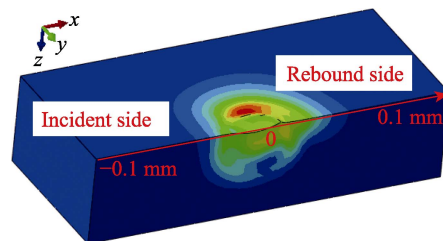


图6 Path-1示意图  
Fig.6 Diagram of path-1

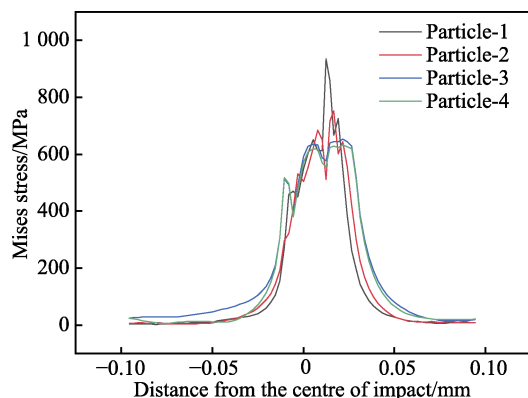


图 7 30°冲角下不同冲击次数下的表面应力  
Fig.7 Surface stress at 30° incidence angle with different number of impacts

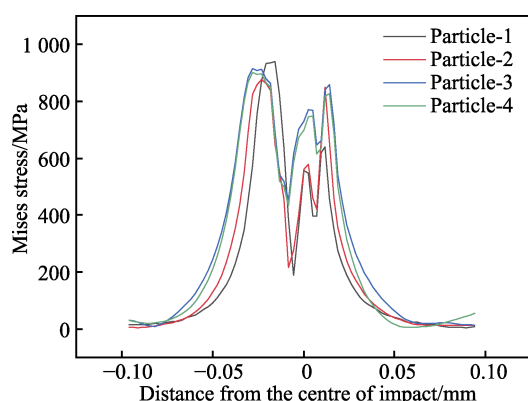


图 8 60°冲角下不同冲击次数下的表面应力  
Fig.8 Surface stress at 60° incidence angle with different number of impacts

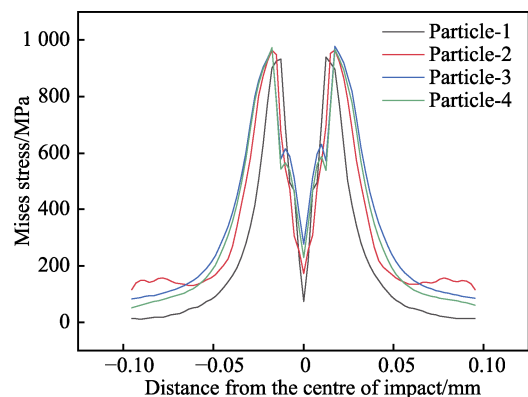


图 9 90°冲角下不同冲击次数下的表面应力  
Fig.9 Surface stress at 90° incidence angle with different number of impacts

当入射角为 60°时, 冲蚀区域路径上存在 3 个明显的冲击应力峰, 最大冲击应力出现在冲击中心两侧材料堆积处, 且入射侧的冲击应力更大。在 3 个冲击峰之间还存在 2 个冲击低峰。随着冲击次数的增加, 相应的冲击低峰应力值增大, 应力均匀化程度提高。

当入射角进一步提高到 90°时, 冲蚀区域路径上仅存在 2 个对称分布的冲击应力峰, 冲击中心位置存在 1 个冲击低峰, 这与图 3 所示的应力分布云图和材

料冲击变形云图相对应。随着冲击次数的增加, 该冲击低峰应力逐渐增大, 应力均匀化程度逐步提升。

粒径也是影响颗粒冲蚀行为的一个重要因素。不同粒径颗粒群在法向冲击靶材上产生的冲击应力和最大压痕深度分别如图 10—12 所示。可以看到, 当颗粒粒径从 50  $\mu\text{m}$  增至 150  $\mu\text{m}$  时, 靶材表面的最大压痕深度从 3.124  $\mu\text{m}$  增至 8.997  $\mu\text{m}$ , 颗粒群与靶材的相互作用时间也随之延长。当颗粒粒径为 50  $\mu\text{m}$  时

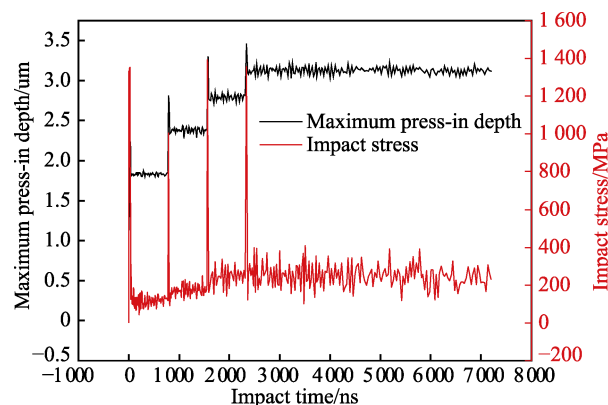


图 10 粒径为 50  $\mu\text{m}$  时的应力和最大压痕深度  
Fig.10 Impact stress and maximum press-in depth at a particle size of 50  $\mu\text{m}$

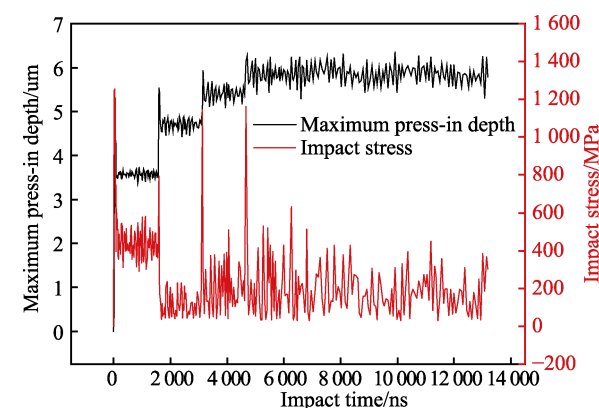


图 11 粒径为 100  $\mu\text{m}$  时的应力和最大压痕深度  
Fig.11 Impact stress and maximum press-in depth at a particle size of 100  $\mu\text{m}$

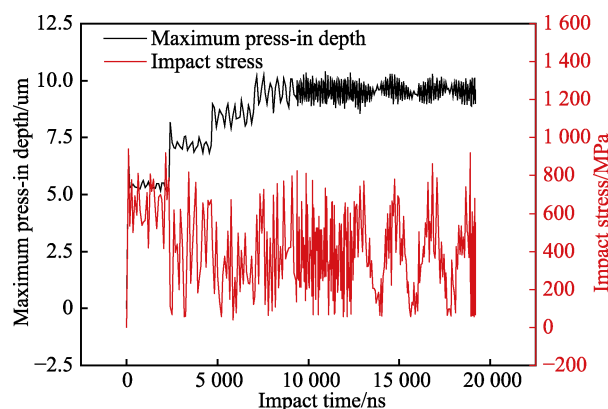


图 12 粒径为 150  $\mu\text{m}$  时的应力和最大压痕深度  
Fig.12 Impact stress and maximum press-in depth at a particle size of 150  $\mu\text{m}$

(图10),在颗粒与靶材接触的瞬間,瞬間冲击应力和压痕深度突增,分别达到1352.31 MPa和2.312  $\mu\text{m}$ 。当颗粒从靶材表面离开时,应力大幅减小,冲蚀坑部分恢复,冲击应力和冲蚀坑深度分别稳定在114.85 MPa和1.8301  $\mu\text{m}$ 。随着冲击次数的增加,冲蚀坑深度和最大应力逐渐增大,但增幅逐渐减缓。在第3次冲击后,应力基本不再增加。当颗粒粒径超过100  $\mu\text{m}$ 后,随着冲击次数的增加,冲击应力的平均值呈逐渐减小的趋势。在100  $\mu\text{m}$ 颗粒的冲击下,后续颗粒的冲击应力平均值仅为第1次冲击应力的39.0%。在150  $\mu\text{m}$ 颗粒冲击下,后续颗粒的冲击应力平均值为第1次冲击应力的69.9%。分析认为,主要是由于在大尺寸颗粒法向单次冲击下,钛合金靶材冲蚀区域很快地出现了加工硬化现象,导致后续颗粒的冲击应力显著降低。文献[7]对不同尺寸石英砂颗粒冲击钛合金靶材表面的残余应力进行了测试,测试结果证实了文中的结论,即随着颗粒尺寸的增加,冲蚀区域的残余压应力不断减小。

## 2.2 多颗粒连续冲蚀过程中的能量转化特性

在颗粒冲蚀靶材的过程中,冲蚀率与颗粒-靶材系统的能量转化特性密切相关<sup>[29]</sup>,因此研究多颗粒撞击过程中的能量转化及影响因素对分析颗粒冲蚀特性具有重要意义。当2个体面接触时,物体之间的切向力和法向力通过界面实现了相互的传递。这2个力的分量之间的联系被称为接触体之间的摩擦,通常以接触体界面处的应力来表达。库仑摩擦模型的基本原理是将界面上的最大许用摩擦(切)应力与接触体之间的接触压力关联。2个接触面在产生相对滑动前,能够承受一定大小的切应力,此状态称为黏着。库仑摩擦模型将此临界应力 $\tau_{\text{crit}}$ 定义为式(13)。

$$\tau_{\text{crit}} = \mu p \quad (13)$$

式中: $\mu$ 为库仑摩擦因数; $p$ 为法向压力。

在大多数冲蚀磨损数值模拟研究中,将摩擦因数取值为0~0.2<sup>[10,15,22,30-31]</sup>,因此这里将在0、0.1、0.2等3种摩擦因数下研究摩擦因数对颗粒冲蚀靶材过程中系统能量转化特性的影响。

不同入射角度下,在摩擦因数为0、0.1、0.2时,50  $\mu\text{m}$ 的颗粒(4颗)冲击靶材的能量变化曲线如图13—15所示。可以看到,在30°冲角下,摩擦因数为0、0.1、0.2的颗粒动能损失分别约为12.29%、22.96%、30.44%。在60°冲角下,摩擦因数为0、0.1、0.2的颗粒动能损失分别为44.97%、60.57%、60.66%。在90°冲角下,摩擦因数为0、0.1、0.2的颗粒动能损失分别为75.33%、74.72%、74.57%。结果表明,当入射角度较小时,摩擦因数的改变将显著影响颗粒动能损失。随着摩擦因数的增大,颗粒动能损失增大,靶材内能增加得更多。随着冲击角度的增加,摩擦因数对颗粒动能损失的影响逐渐减弱。在90°冲角下,摩擦因数在0~0.2间变化时,颗粒动能损失基本保持不变。

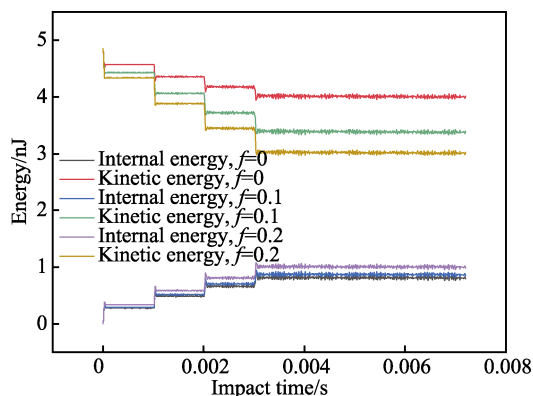


图13 30°冲角下靶材和颗粒能量的变化  
Fig.13 Target and particle energy change at 30° incidence angle

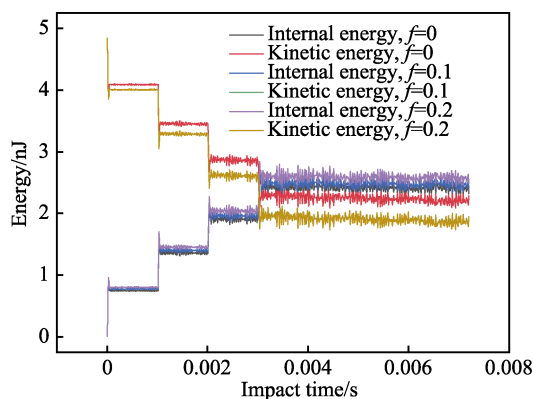


图14 60°冲角下靶材和颗粒能量的变化  
Fig.14 Target and particle energy change at 60° incidence angle

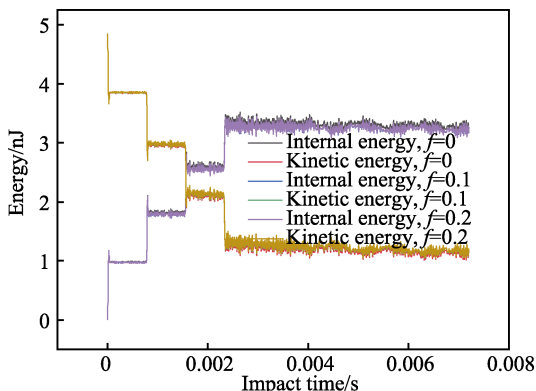


图15 90°冲角下靶材和颗粒能量的变化  
Fig.15 Target and particle energy change at 90° incidence angle

这意味着,在颗粒法向冲击钛合金靶材时,摩擦因数对颗粒-靶材系统的能量转化特性的影响甚微。

从图13—15中还可以看出,颗粒动能的减小和靶材内能的增加均呈现明显的波动性。这里将结果输出间隔频率设置为100,可以更好地捕捉应力和压痕深度的突增现象,提高了分析结果的精度。通过观察曲线走向发现,在冲蚀过程中能量不断地加载卸载,这与冲蚀过程中应力和压痕深度的变化相对应。随着冲击次数的增加,这种波动性明显增强。在固定冲击

角度下, 随着冲击次数的增加, 尽管靶材内能逐渐增大, 但增幅却逐渐减小。以  $50\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒 (4 颗) 连续垂直冲击靶材表面过程为例 (如图 15 所示), 当摩擦因数为 0.2 时, 第 1 次冲击结束时靶材内能由 0 增至  $0.973\times 10^{-6}\text{ J}$ ; 第 2 次冲击结束时, 靶材内能增大为  $1.791\times 10^{-6}\text{ J}$ ; 第 3 次冲击结束时, 靶材内能增大为  $2.557\times 10^{-6}\text{ J}$ ; 第 4 次冲击结束时, 靶材内能增大为  $3.256\times 10^{-6}\text{ J}$ 。

接触时间指从颗粒接触靶材到离开靶材表面所经历的时间。在  $50\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒 (4 颗) 连续垂直冲击靶材表面的过程中, 接触时间与冲击次数的关系如图 16 所示。结果表明, 随着冲击次数的增加, 接触时间逐渐减少。这种现象的发生是由于颗粒多次冲击使得材料表面的硬度提高, 导致接触时间缩短, 进而导致后续颗粒碰撞的能量损失依次减少。尽管 Zheng 等<sup>[11]</sup>在对 Q345 钢材动态侵蚀特性研究中指出了表面硬度和接触时间对能量损失的影响, 但并未对多颗粒撞击下颗粒与靶材之间的能量转化进行分析。综合以上分析可知, 随着颗粒冲击次数的增加, 材料表面的应力提高, 材料发生硬化, 导致接触时间缩短, 相应冲蚀过程中材料内能增量也减少, 可见材料内部能量转化特性与材料表面的应力状况有着直接关系。

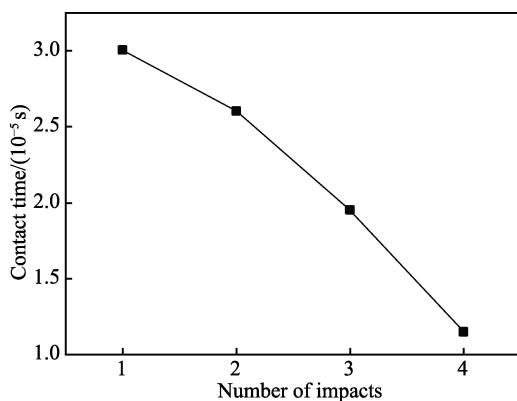


图 16 90°冲角下接触时间随冲击次数的变化

Fig.16 Contact time change with number of impacts at 90° incidence angle

在不同入射角下, 摩擦因数为 0.1、0.2 时摩擦耗散能随着冲击次数的变化趋势如图 17 所示。结果表明, 在 2 种摩擦因数下, 随着入射角度的增大, 摩擦耗散能逐渐减少。这主要是因为, 随着冲角的增大, 颗粒冲击力沿靶材的切向分量较小, 沿靶材的法向分量增大, 摩擦力对颗粒冲蚀靶材的贡献持续减弱。另外, 随着冲击次数的增加, 摩擦耗散能逐渐增大。分析认为, 这主要是由于在颗粒连续冲击下, 靶材的受冲蚀部位变得更粗糙, 而粗糙表面产生的摩擦耗散能比光滑表面产生的磨损耗散能更大。通过比较发现, 在固定冲击角度下, 摩擦因数对系统摩擦耗散能的影响规律并不固定。在冲击角为 30°时, 摩擦因数为 0.2 时的摩擦耗散能比摩擦因数为 0.1 时增加了约 40.80%。

当冲击角增至 60°和 90°时, 摩擦因数为 0.2 时的摩擦耗散能比摩擦因数为 0.1 时的摩擦耗散能分别降低了约 40.88%和 44.92%。由于大冲击角度下系统的摩擦耗散能相对于靶材内能和颗粒动能非常小, 因此摩擦因数的改变引起摩擦耗散能的变化对颗粒-靶材系统的整体能量转化特性的影响非常有限。

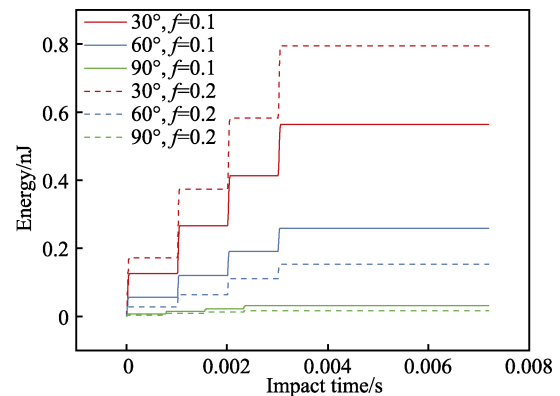


图 17 不同摩擦因数下的摩擦耗散能

Fig.17 Frictional dissipation of energy at different friction coefficients

### 3 结论

采用显式动力学有限元方法结合 Johnson-cook 材料模型和应变累积失效模型对多颗粒连续冲击 Ti-6Al-4V 钛合金靶材的冲蚀行为系统地进行了数值模拟, 探索了入射角度和冲击次数对钛合金靶材冲蚀形貌、冲蚀应力的影响。在此基础上, 对比分析了摩擦因数对颗粒冲蚀过程中能量转化特性的影响, 得到如下主要结论。

1) 当颗粒以大入射角度连续冲击时, 靶材可以更快地进入稳定冲蚀阶段。此时, 冲蚀应力、最大压入深度和等效塑性应变将保持恒定。当颗粒以小入射角度连续冲击靶材时, 由于不同磨损机制间的相互作用, 冲蚀过程中的最大应力呈现一定的波动性。入射角度越小, 冲蚀最大应力的波动幅度越大。

2) 在不同入射角度下, 多颗粒连续冲击靶材的最大应力均位于靶材发生材料堆积的位置。其中, 在 30°、60°、90°冲角下的最大冲击应力峰分别位于冲击中心下游、冲击中心上游和冲击中心周围。随着冲击次数的增加, 应力分布的均匀性也随之增加。

3) 在入射角度 90°和入射速度 130 m/s 工况下, 当颗粒尺寸从  $50\text{ }\mu\text{m}$  增至  $150\text{ }\mu\text{m}$ , 靶材表面的最大冲击坑深度从  $3.124\text{ }\mu\text{m}$  增至  $8.997\text{ }\mu\text{m}$ 。当颗粒尺寸超过  $100\text{ }\mu\text{m}$  后, 受到冲蚀区域加工硬化机制的影响, 后续颗粒冲击产生的应力比第 1 次冲击产生的应力降低了 30%~60%。

4) 在多颗粒连续冲蚀钛合金靶材的过程中, 能量的变化存在波动性。当入射角度较小时, 摩擦因数

的改变将显著影响颗粒动能损失。在 30°冲角下,当摩擦因数从 0 增至 0.2 时,动能损失增大了约 22.69%,靶材内能相应增加。随着入射角度的增大,摩擦因数对颗粒动能损失的影响逐渐减弱,产生的摩擦耗散能随之减少。

#### 参考文献:

- [1] 赵永庆, 葛鹏, 辛社伟. 近五年钛合金材料研发进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(S1): 527-534.  
ZHAO Yong-qing, GE Peng, XIN She-wei. Progresses of R & D on Ti-Alloy Materials in Recent 5 Years[J]. Materials China, 2020, 39(S1): 527-534.
- [2] 吴小梅, 李伟光, 陆峰. 钛合金叶片防护涂层研究——十五科研项目工作总结[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 116-118.  
WU Xiao-mei, LI Wei-guang, LU Feng. Research of Protective Coating to the Titanium Alloy Blade[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 116-118.
- [3] 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.
- [4] 吕祥鸿, 舒滢, 赵国仙, 等. 钛合金石油管材的研究和应用进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(6): 1518-1524.  
LYU Xiang-hong, SHU Ying, ZHAO Guo-xian, et al. Research and Application Progress of Ti Alloy Oil Country Tubular Goods[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(6): 1518-1524.
- [5] 张奇超, 张涛, 文松青. 基于有限元法分析 Ti-6Al-4V 合金的冲蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(1): 33-37.  
ZHANG Qi-chao, ZHANG Tao, WEN Song-qing. Erosion Behavior of Ti-6Al-4V Alloy Based on Finite Element Method[J]. Corrosion & Protection, 2019, 40(1): 33-37.
- [6] 任小萍. Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V 钛合金冲蚀机理研究[J]. 机电信息, 2016(18): 56-57.  
REN Xiao-ping. Study on Erosion Mechanism of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V Titanium Alloy[J]. Mechanical and Electrical Information, 2016(18): 56-57.
- [7] 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 Ming-rui, CHEN Jiao, YANG Zhu-fang, et al. Dependent Effects of Particle Size on Erosion Wear Mechanism of TC4 Titanium Alloy[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 17-26.
- [8] AVCU E, FIDAN S, YILDIRAN Y, et al. Solid Particle Erosion Behaviour of Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V Alloy[J]. Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces, 2013, 7(4): 201-210.
- [9] NAVEED M, SCHLAG H, KÖNIG F, et al. Influence of the Eroding Shape on the Erosion Behavior of Ductile and Brittle Materials[J]. Tribology Letters, 2017, 65(1): 18.
- [10] ELTOBGY M S, NG E, ELBESTAWI M A. Finite Element Modeling of Erosive Wear[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(11): 1337-1346.
- [11] ZHENG Chao, LIU Yong-hong, CHEN Cheng, et al. Numerical Study of Impact Erosion of Multiple Solid Particle[J]. Applied Surface Science, 2017, 423: 176-184.
- [12] YAER Xin-ba, SHIMIZU K, QU Jing-long, et al. Surface Deformation Micromechanics of Erosion Damage at Different Angles and Velocities for Aero-Engine Hot-End Components[J]. Wear, 2019, 426-427: 527-538.
- [13] DI Juan, WANG Shun-sen, XIE Yong-hui. Investigation on the Erosion Characteristics of Martensitic Blade Steel Material 1Cr<sub>12</sub>W<sub>1</sub>MoV by Micro-Particle Swarm with High Velocity[J]. Powder Technology, 2019, 345: 111-128.
- [14] KHODDAMI A, SALIMI-MAJD D, MOHAMMADI B. Finite Element and Experimental Investigation of Multiple Solid Particle Erosion on Ti-6Al-4V Titanium Alloy Coated by Multilayer Wear-Resistant Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 372: 173-189.
- [15] 董晓慧. 金属陶瓷涂层的固体粒子冲蚀磨损行为研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2015: 21-26.  
DONG Xiao-hui. Study on Erosion Wear Behavior of Solid Particles in Cermets Coating[D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2015: 21-26.
- [16] TAKAFFOLI M, PAPINI M. Finite Element Analysis of Single Impacts of Angular Particles on Ductile Targets[J]. Wear, 2009, 267(4): 144-151.
- [17] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 57-64.  
SUN Jia-shu. Wear of Metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 57-64.
- [18] Marc Andre Meyers. 材料的动力学行为[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 124-151.  
MEYERS M. Dynamic Behavior of Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 124-151.
- [19] 高骏冬. 钛合金叶片抗砂粒冲蚀性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 15-16.  
GAO Jun-dong. Study on Sand Erosion Resistance of Titanium Alloy Blades[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 15-16.
- [20] 孙家枢, 王小同, 郭大展. 几种等离子喷涂陶瓷涂层之固体粒子冲蚀磨损的特性与数学模型[J]. 摩擦学学报, 1994, 14(1): 57-64.  
SUN Jia-shu, WANG Xiao-tong, GUO Da-zhan. Impact-Erosion Wear Characteristics and Mathematic Model of Plasma Spray Ceramic Coatings by Solid Particles[J]. Tribology, 1994, 14(1): 57-64.
- [21] ROARK R J, YOUNG W C. Roark's formulas for stress and strain[M]. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1989.
- [22] BIELAWSKI M, BERES W. FE Modelling of Surface Stresses in Erosion-Resistant Coatings under Single Particle Impact[J]. Wear, 2007, 262(1/2): 167-175.

(下转第 207 页)