

TC4 平板冲蚀磨损的数值仿真与试验验证

杨晓军, 柳笑寒, 刘文博, 袁中楠
(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘 要: 为了准确地预测不同冲蚀机制下 TC4 材料的冲蚀率, 通过有限元法建立多颗粒随机冲蚀模型, 研究在不同颗粒形状、冲击角与冲击速度的 Al_2O_3 颗粒冲蚀下 TC4 平板的冲蚀机理和冲蚀率。通过与相同条件下的冲蚀试验获得的冲蚀率进行对比, 验证了数值仿真模型的合理性与真实性。结果表明: 30° 的低角度冲蚀仿真应使用正方体颗粒, 其棱角与材料的相对运动更符合刀具切削的过程; 90° 的高角度冲蚀仿真应使用球形颗粒, 能体现冲蚀过程中对凹坑接触面造成的剪切和挤压作用; 相同条件下颗粒冲击速度越大, 冲蚀率增长越快, 30° 的冲蚀率增长较为迅速, 90° 的冲蚀率增长较为平缓。

关 键 词: TC4 平板; 冲蚀率; 有限元法; 颗粒形状; 冲击角

中图分类号: V252

文献标志码: A

Numerical simulation and experimental validation for erosion wear of TC4 plates

YANG Xiaojun, LIU Xiaohan, LIU Wenbo, YUAN Zhongnan

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to accurately predict the erosion rate of TC4 material under different erosion mechanisms, a multi-particle random erosion model was established by finite element method, and the erosion mechanism and erosion rate of TC4 plate under the erosion of Al_2O_3 particles with different particle shapes, impact angles and impact velocities were studied. Compared with the erosion rate obtained by erosion test under the same conditions, the rationality and authenticity of the numerical simulation model were verified. Results showed that cubic particles should be used in the simulation of low-angle erosion at 30° , and the relative movement between edges and materials was more in line with the cutting process. Spherical particles should be used in the simulation of 90° high-angle erosion, which can reflect the shearing and squeezing effects on the contact surface of pits during erosion. Under the same conditions, the greater the impact velocity of particles was, the faster the erosion rate increased, the faster the erosion rate increased at 30° , and the more gentle the erosion rate increased at 90° .

Keywords: TC4 plate; erosion rate; finite element method; particle shape; impingement angle

航空器在高空飞行时, 会遇到沙尘暴与火山喷发输送到高空的沙尘与火山灰; 在地面起降时, 跑道上的砂石会被吸入发动机。这些颗粒物在航

空发动机内输运的同时会冲蚀部件, 缩短各个部件的使用寿命, 提高其发生故障的概率, 其中对压气机的影响最为显著。长时间的冲蚀会导致压

收稿日期: 2021-11-10

基金项目: 中国民航大学中央高校基本科研业务费项目(3122019187)

作者简介: 杨晓军(1980—), 男, 教授、硕士生导师, 博士, 主要从事航空发动机流动与换热方面研究。E-mail: xiaojunyoung@hotmail.com

通信作者: 柳笑寒(1997—), 男, 硕士生, 主要从事航空发动机冲蚀磨损规律方面研究。E-mail: 2019012096@cauc.edu.cn

引用格式: 杨晓军, 柳笑寒, 刘文博, 等. TC4 平板冲蚀磨损的数值仿真与试验验证[J]. 航空动力学报, 2023, 38(9): 2193-2203. YANG Xiaojun, LIU Xiaohan, LIU Wenbo, et al. Numerical simulation and experimental validation for erosion wear of TC4 plates[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(9): 2193-2203.

气机叶片的叶尖间隙和表面粗糙度增大、厚度减薄,导致压气机喘振裕度减小、效率降低,发动机高空中喘振和熄火的风险增大,燃油消耗率提高^[1]。所以合理地预测不同冲蚀机制与因素影响下压气机叶片常用材料 TC4 的冲蚀率,对于提高航空发动机的安全性与经济性有着重大意义。

颗粒的冲蚀磨损多种损伤形式耦合作用产生的现象,因此其机理较为复杂。Finnie 等^[2]和 Bitter^[3-4]的研究表明,颗粒的形状、冲击角、冲击速度对冲蚀过程的影响较大,不同的形状和冲击角直接导致不同冲蚀机制的发生。颗粒在低角度冲蚀时,颗粒的尖角如同刀具般,在与材料表面接触并移动的同时去除材料,此时切削磨损发挥主要作用。高角度冲蚀时,撞击的颗粒动能转化为材料内能,材料超过其弹性极限后发生塑性变形并硬化,颗粒不断的撞击致使表层硬化材料脱落,此时变形磨损发挥主要作用。因此,预测冲蚀率需要考虑到不同条件下产生的不同冲蚀机制。

使用有限元法的数值仿真是研究各种因素对冲蚀过程影响的有效手段。Eltobgy 等^[5]建立了 5 个钢制颗粒冲击 TC4 的冲蚀模型,给出了冲击速度与冲蚀率的指数关系大小。并且研究指出在模拟冲蚀过程时,单个颗粒的冲蚀模拟无法体现出材料的冲蚀,需要至少 3 个颗粒冲蚀才能得到准确的冲蚀过程。Wang 等^[6]通过多颗粒随机撞击韧性材料与脆性材料,模拟了冲击速度与冲击角的影响。然而上述研究基于理想的球形颗粒,在一定的条件下与试验结果相符,实际情况下颗粒则存在不规则尖角。Azimian 等^[7]、马松林等^[8]和杜明超等^[9]建立了菱形颗粒冲蚀仿真模型,研究表明颗粒冲击角与尖角的方向决定了冲蚀机制的产生。王光存^[10]建立了多棱柱和球型颗粒的冲蚀仿真模型,发现颗粒棱柱角越锋利,越多的颗粒动能转化为材料内能,造成凹坑深度越深。且随着颗粒撞击次数增多,材料去除速率逐渐变缓。

目前的冲蚀数值仿真多以少数几个颗粒按顺序先后撞击同一位置研究材料受到冲蚀后的变形与去除,进而分析其冲蚀机制,实际情况下颗粒物则会在某一范围内随机冲蚀材料表面。此外由于不同冲击角下冲蚀机制不同,颗粒形状会严重影响冲蚀率的计算结果,目前关于上述问题的研究较少。本文运用 ANSYS/LS-DYNA 软件,建立不同条件下多颗粒随机冲蚀 TC4 平板的数值仿真模型,研究由于高低冲击角导致的不同冲蚀机制下,颗粒形状与冲击速度对冲蚀率的影响。搭

建了气流喷砂式冲蚀试验平台,进行与数值仿真相同条件设置下的试验,将试验结果与数值仿真结果进行对比,验证数值仿真模型的可靠性。为预测颗粒物对压气机常用材料 TC4 的冲蚀率,进一步研究冲蚀机理提供依据。

1 数值仿真模型

1.1 TC4 材料模型

针对 TC4 材料,本文采用 Johnson-Cook 本构模型。该模型能较好的表达金属材料在高压与大应变率下的状态,体现 TC4 在冲蚀过程中发生的弹性、塑性变形^[11]。其表达式如式(1)所示

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中 A 、 B 、 C 、 n 、 m 均为材料参数, $\bar{\sigma}$ 是 von Mises 应力, $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 是标准等效塑性应变率 ($\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ m/s}$), T 是材料当前温度, T_r 是室温、 T_m 是材料熔点。

为了模拟冲蚀过程中材料的去除,在 Johnson-Cook 本构模型中加入了剪切损伤失效模型,其表达式为:

$$\epsilon_f = \left[d_1 + d_2 \exp d_3 \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_e} \right) \right] \cdot \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (2)$$

式中 ϵ_f 为失效应变, σ_p 为压应力, σ_e 为流动应力, $d_1 \sim d_5$ 为经验参数,可由霍普金森压杆试验获得^[12]。失效参数定义为

$$D = \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_f} \quad (3)$$

式中 $\Delta \epsilon$ 为塑性应变增量。本文将 TC4 平板模型按有限元法离散成许多小单元,通过计算每一个时间步长内单元的 $\Delta \epsilon$ 来判定失效。如果某一单元的塑性应变增量达到失效应变值,即失效参数 $D=1$,则单元失效并从模型中删除。

由于颗粒物冲击压气机叶片的速度较高,需要使用 Grüneisen 状态方程来模拟 TC4 材料的冲击波效应,如式(4)所示:

$$V_s = C_0 + S V_p \quad (4)$$

式中 C_0 为弹性体波速,与材料有关,立方激波速度 V_s 是颗粒速度 V_p 的函数, S 是函数的斜率。TC4 平板模型使用的 Johnson-Cook 模型参数如表 1 所示^[13]。

表 1 TC4 平板的材料参数
Table 1 Material parameter of TC4 plate

材料参数	Ti-6Al-4V
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	4 430
弹性模量 E/GPa	110
泊松比 ν	0.33
J-C 屈服强度 A/MPa	1 098
J-C 硬化系数 B/MPa	1 092
应变硬化系数 n	0.93
应变率硬化常数 C	0.014
热熔化系数 m	1.1
熔点 T_m/K	1903
比热容 $c_p/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	670
J-C 失效参数 d_1	-0.09
J-C 失效参数 d_2	0.27
J-C 失效参数 d_3	0.48
J-C 失效参数 d_4	0.014
J-C 失效参数 d_5	3.87
$C_0/(\text{km}/\text{s})$	5 130
S	1.028
Grüneisen 系数 γ	1.23

1.2 有限元模型

航空器在高空飞行时,发动机可能会吸入沙尘暴与火山喷发输送到高空的砂尘与火山灰。火山灰成分主要包括 Al_2O_3 , 相比于砂尘其硬度更高,造成的冲蚀磨损更为严重。为了考虑冲蚀更为严重的情况,选择 Al_2O_3 颗粒进行冲蚀模拟。其材料参数如表 2 所示。

表 2 Al_2O_3 颗粒材料参数
Table 2 Material parameters of Al_2O_3 particles

材料参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	4 000
弹性模量 E/GPa	310
泊松比 ν	0.22

本文使用 ANSYS/LS-DYNA 进行显式动力学计算。冲蚀过程中材料发生大变形至失效去除,属于非线性的塑性变形问题,将颗粒与平板都划分为单积分点的八节点六面体单元,可以有效的减小沙漏能,以保证结果更加可靠。主要研究材料的冲蚀过程同时为了减小计算量,将颗粒假设为刚体。采用面面侵蚀接触算法,此算法为双向接触,在颗粒冲蚀掉材料表面第一层单元后可以继续与下一层单元接触计算。并将平板模型受撞

击区域网格细化,保证冲蚀率计算更加准确。平板模型的底面设置固定约束,底面和侧面设置非反射边界条件^[14]。TC4 平板模型如图 1 所示。

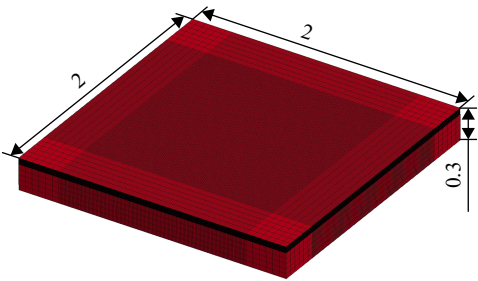


图 1 TC4 平板有限元模型(单位: mm)

Fig. 1 TC4 plate finite element model (unit: mm)

1.3 算例设置

在压气机实际工况下,叶片的前缘、压力面等易受冲蚀的位置会在一定的面积内受到颗粒的随机撞击。本文设置 50 个相同粒径、材料的颗粒在一定范围内的随机位置撞击平板,撞击位置由 Excel 随机生成。为提高计算效率,将颗粒分为 10 组,5 个颗粒一组,同组颗粒同时撞击平板表面。为了避免同组颗粒之间距离过近产生重叠损伤导致冲蚀量过大,同组颗粒间距至少为 0.6 倍颗粒半径^[15]。颗粒与平板之间的摩擦因数设为 0.2。

冲蚀可认为由变形磨损和切削磨损叠加计算。冲击角 $\alpha=90^\circ$ 时,可认为总磨损量全部由变形磨损造成;对于 TC4 材料, Yerramareddy 等^[16] 的试验表明,最大冲蚀量对应的冲击角出现在 $\alpha=30^\circ$ 。因此 90° 与 30° 对于两种磨损最具代表性。为了探究分别在高、低冲击角下,颗粒形状对冲蚀发生机制的影响,本文设置球形和正方体颗粒分别在 90° 和 30° 的冲击角,在不同冲击速度 V 下对平板进行冲蚀。球形颗粒直径为 $180\ \mu\text{m}$, 正方体颗粒的截面为球截面的内接正方形,算例设置结果如图 2 所示。

正方体颗粒冲蚀 TC4 平板的冲击角与尖角方向示意如图 3 所示。将颗粒中心运动方向与平板的夹角定义为冲击角;将正方体对角线与法向夹角定义为方位角,本算例中正方体颗粒的方位角均为 30° 。

为了方便后续试验对照,每种冲击角与颗粒形状下选择 4 种不同的冲击速度 V 进行仿真计算,且均可在试验平台上进行。仿真条件设置如表 3 所示。

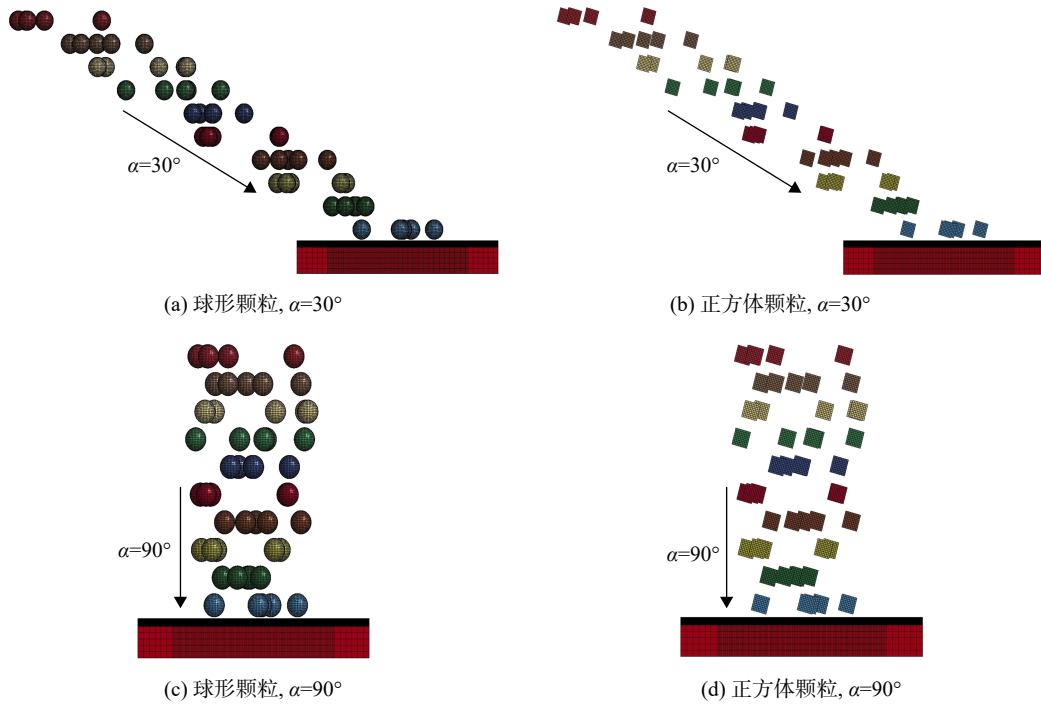


图 2 多颗粒冲蚀仿真模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-particle erosion simulation model

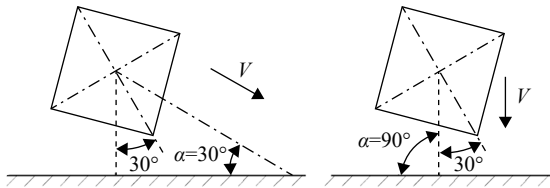


图 3 正方体颗粒冲击角与方位角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of impingement angle and azimuth angle of cube particles

表 3 数值仿真模型条件设置

Table 3 Condition setting of numerical simulation model

编号	形状	冲击角/(°)	冲击速度/(m/s)
1	球	90	90
2	球	90	107
3	球	90	122
4	球	90	132
5	球	30	90
6	球	30	107
7	球	30	122
8	球	30	132
9	正方体	90	90
10	正方体	90	107
11	正方体	90	122
12	正方体	90	132
13	正方体	30	90
14	正方体	30	107
15	正方体	30	122
16	正方体	30	132

2 试 验

2.1 试验条件

为了验证数值仿真模型的准确性,按照数值仿真算例中设定的条件来设置试验各项参数进行冲蚀试验。试验在气流喷砂式冲蚀试验平台上进行。试验平台主要由以下 3 个系统组成:高速气源系统、颗粒供给系统、冲蚀试验系统,具体设备如图 4 所示。高速气源系统可提供压力在 0~0.8 MPa 范围内的压缩空气,并可去除压缩气体中的水分、油污等杂质,以提供稳定、干燥的气流。颗粒供给系统采用电动机带动螺杆的方式均匀输送颗粒,通过调节电动机转速来控制颗粒流量。冲蚀试验系统采用减压阀控制气体压力进而控制颗粒速度,颗粒被喷枪入口处的负压吸入,在喷

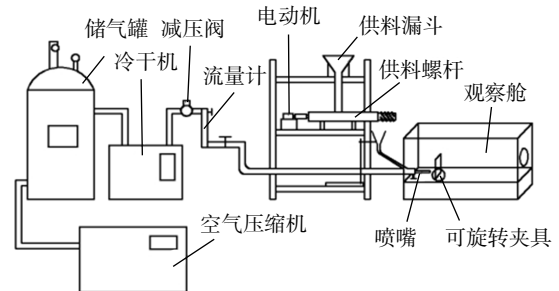


图 4 气流喷砂式冲蚀试验平台

Fig. 4 Air blast erosion experiment platform

枪内与气体均匀混合后冲击到 TC4 试样上。将 TC4 试样放置在具有与试样相同大小凹槽的金属板中,再将金属板装夹在夹具上。夹具可任意旋转与来流设置成不同角度^[17]。

2.2 试验方案

冲蚀试样选择与仿真算例中相同性能参数的 TC4 平板,经过线切割加工为 5 mm 厚,40 mm × 40 mm 的试样片。将试样表面打磨至表面粗糙度 R_a 约为 1.0 μm 以保证试样初始条件一致。将试样安装在夹具上,分别与来流成 30°与 90°角,与喷枪距离均为 40 mm^[18]。颗粒选用仿真算例中直径 180 μm 的 Al_2O_3 颗粒。为了不造成重叠损伤,每分钟供料质量不超过 10 g^[19]。本试验颗粒供料流量为 8 g/min,每次冲蚀 10 min。调节主管道上的减压阀以控制气体速度,进而改变颗粒速度,每种气压条件下的颗粒速度由旋转双转盘法测得^[20]。冲蚀试验的冲击角与冲击速度按仿真算例设定。

试验结果用冲蚀率 ε_e 来表示。冲蚀率定义为材料被冲蚀去除掉的质量除以撞击到材料表面的颗粒物质量,如式(5)所示

$$\varepsilon_e = \frac{m_i}{M_p} \quad (5)$$

式中 m_i 为材料去除质量, M_p 为颗粒物质量。在试验前后使用 0.1 mg 高精度电子天平测量 TC4 试样的质量以测定冲蚀去除质量。每种条件下进行 3 次试验,取 m_i 平均值,以减小随机误差。试验条件设置如表 4 所示。

表 4 试验条件设置

Table 4 Test condition setting

编号	粒径/ μm	冲击角/(°)	冲击速度/(m/s)
1	180	90	90
2	180	90	107
3	180	90	122
4	180	90	132
5	180	30	90
6	180	30	107
7	180	30	122
8	180	30	132

3 结果与分析

3.1 30°角冲蚀

冲击角为 30°、冲击速度为 132 m/s 时, TC4 平板受球形颗粒冲蚀后的 von Mises 应力分布云图如图 5 所示。可以看出球形颗粒冲蚀后,材料虽然发生塑性变形,但是材料去除量较少。从颗粒撞击的侧视图也可以看出,颗粒撞击后引起材料塑性变形产生凹坑,但是塑性应变增量达到失效应变值的单元较少,得到的冲蚀量较小。冲击角为 30°、冲击速度为 132 m/s 时, TC4 平板受正方体颗粒冲蚀后的 von Mises 应力分布云图如图 6 所示。正方体颗粒冲蚀后,正方体尖角接触平板表层材料的单元被切削去除,材料沿颗粒水平方向形成堆积,冲蚀效果比较明显。

材料累计质量损失随累计撞击球形颗粒质量变化如图 7 所示。在撞击的颗粒质量相同时,随着冲击速度 V 的增大,材料的质量损失增大。但

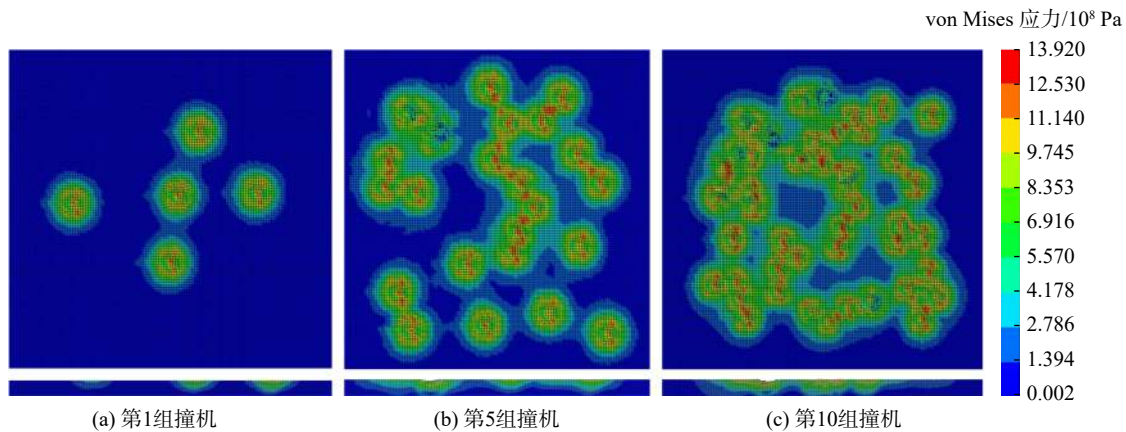


图 5 冲击角为 30°、冲击速度为 132 m/s 球形颗粒冲蚀 TC4 的 von Mises 应力分布云图

Fig. 5 Cloud diagram of von Mises stress distribution of TC4 eroded by spherical particles at impingement angle of 30° and impact velocity of 132 m/s

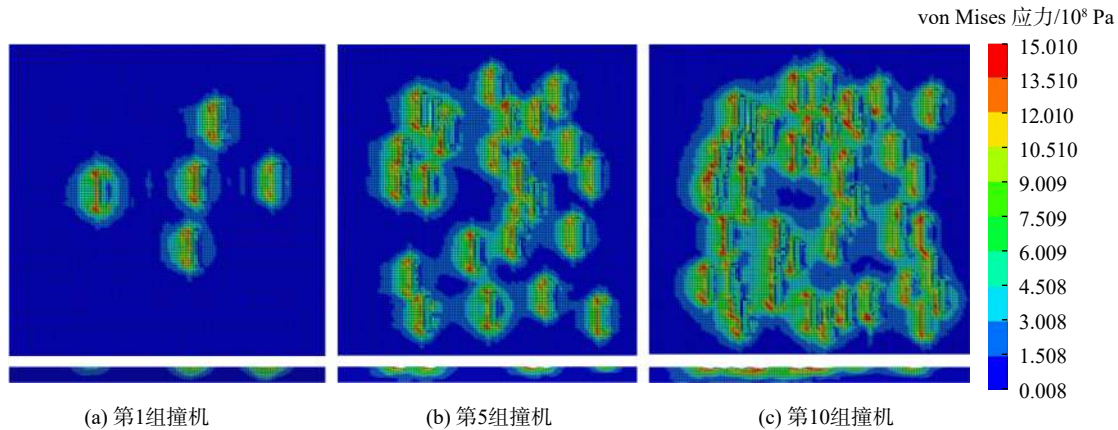


图 6 冲击角为 30° 、冲击速度为 132 m/s 正方体颗粒冲蚀 TC4 的 von Mises 应力分布云图

Fig. 6 Cloud diagram of von Mises stress distribution of TC4 eroded by cubic particles at impingement angle of 30° and impact velocity of 132 m/s

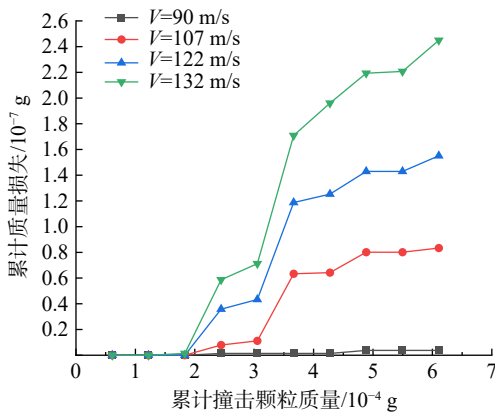


图 7 30° 角冲击下 TC4 累计质量损失随累计冲击球形颗粒质量的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of cumulative mass loss of TC4 with cumulative impact spherical particle mass at impingement angle of 30°

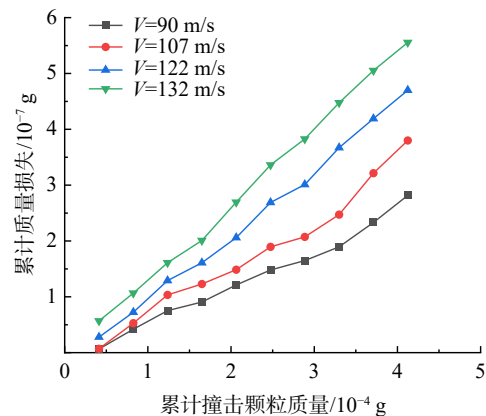


图 8 30° 角冲击下 TC4 累计质量损失随累计冲击正方体颗粒质量的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of cumulative mass loss of TC4 with cumulative impact cubic particle mass at impingement angle of 30°

是可以发现初始几组颗粒只造成塑性变形, 冲蚀量很少, 只有在颗粒撞击位置重叠面积较大时, 有少部分材料由于多次冲蚀后局部应力达到并超过材料的屈服强度而被去除。后续几组颗粒由于撞击位置重叠面积较小, 冲蚀结果不明显。材料累计质量损失随累计撞击正方体颗粒质量变化如图 8 所示。正方体颗粒冲蚀的情况下, 材料的质量损失与累计颗粒质量大致呈线性关系, 在颗粒撞击位置重叠面积较大时冲蚀量的增长变快。

颗粒在撞击材料表面时, 颗粒的动能在使材料发生弹性变形时会消耗一部分, 剩余的能量来使材料发生塑性变形。而颗粒在 30° 角冲蚀时, 颗粒的垂直方向分速度较小, 颗粒垂直方向的动能向平板的内能转化量变小, 进而导致颗粒使材料发生弹性变形后剩余的能量变小, 所以颗粒压

入材料的深度较浅。因此球形颗粒在水平运动方向上与平板接触面的切割面宽度小于高角度冲蚀时的宽度, 所以冲蚀掉的材料体积相对偏小。同时因为球形颗粒的表面光滑, 在水平方向上对材料造成的局部应力较小, 只受到一次冲击位置的材料应变值较小, 只发生塑性变形, 不会被冲蚀, 只有部分受到重复冲击的材料会被冲蚀。而正方体颗粒在尖角切入材料之后, 在水平方向上与平板接触面的切割面宽度仍为正方体的边长, 且正方体的尖角在平板沿颗粒水平运动方向上造成的局部应力较大, 变形区域相对集中, 较少组颗粒的冲击就会使材料达到弹性极限进而失效去除, 所以正方体颗粒冲蚀掉的材料体积更多。

30° 角时冲蚀率随速度变化的数值仿真与试验结果对比如图 9 所示。在 30° 角冲蚀时, 随着冲

击速度 V 从 90 m/s 提高到 132 m/s, 冲蚀率增量为 0.68 mg/g, 增长较为迅速。这是因为在 30° 角时颗粒主要对在其水平运动方向上的材料造成的切削, 粒子的动能大部分转化为作用在沿其运动方向上的使材料发生塑性变形的能量, 去除单位质量材料所需的能量较少。因此在 V 提高时, 所有颗粒总的动能增大, 总磨损量增长较大, 冲蚀率的增长较快。正方体颗粒的数值仿真结果与试验得到的冲蚀率十分接近, 而球形颗粒的仿真冲蚀率严重偏低。所以在以切削磨损为主的低角度冲蚀数值仿真中应使用正方体颗粒。

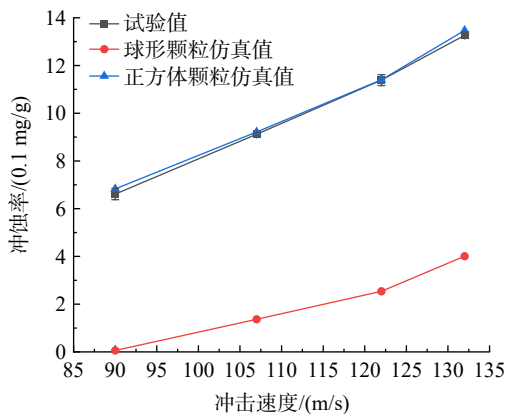


图9 30°角冲击下冲蚀率随速度变化关系仿真与试验结果对比

Fig. 9 Comparison between simulation and experimental results of the relationship between erosion rate and velocity at impingement angle of 30°

3.2 90°角冲蚀

冲击角为 90°、冲击速度为 132 m/s 时, TC4 平板受球形颗粒冲蚀后的 von Mises 应力分布云图如图 10 所示。可以看出第 1 组球形颗粒在垂

直撞击时造成的塑性变形较大, 凹坑最深处的应力最大, 但是还未达到弹性极限, 只有在凹坑边缘处的材料由于应变过大而失效引起的脱落。在后续颗粒的撞击下, 受到重复撞击的位置材料去除较多、从侧视图可以看出, 平板的凹坑深度大于 30° 角冲蚀时的凹坑深度。冲击角为 90°、冲击速度为 132 m/s 时, TC4 平板受正方体颗粒冲蚀后的 von Mises 应力分布云图如图 11 所示。在第 1 组颗粒撞击时材料尖角会压入材料内部, 形成一个矩形凹坑, 在矩形的边缘处应力较大。在后续颗粒的撞击下重复撞击位置有大量材料去除。

材料累计质量损失随累计撞击球形颗粒质量变化如图 12 所示。第 1~2 组颗粒撞击时, 不同速度的颗粒造成的冲蚀量很小且几乎相同, 后续撞击次数增多, 速度越快的颗粒冲蚀量增长越快。总体 TC4 累计质量损失与撞击球形颗粒质量呈线性关系。材料累计质量损失随累计撞击正方体颗粒质量变化如图 13 所示。与球形颗粒不同的是, 在初始几组颗粒撞击时冲蚀量反而小于球形颗粒。但是在后几组颗粒撞击时冲蚀量迅速增大, 总体冲蚀量显著高于球形颗粒。

颗粒在 90° 角冲蚀时, 颗粒在撞击过程中动能全部转化为材料内能。在一部分能量使材料发生弹性变形后, 剩余的动能大于低角度冲蚀时颗粒垂直方向的剩余动能。所以颗粒在 90° 角冲蚀时造成的凹坑深度更深。在颗粒的动能降为零时, 平板少部分内能又转化为颗粒动能, 使颗粒反弹。不同于低角度冲蚀集中的变形区域, 90° 角冲蚀时材料与颗粒的整个接触面都是变形区域, 集中程度达到最低。因此要与低角度冲蚀的冲蚀量相同,

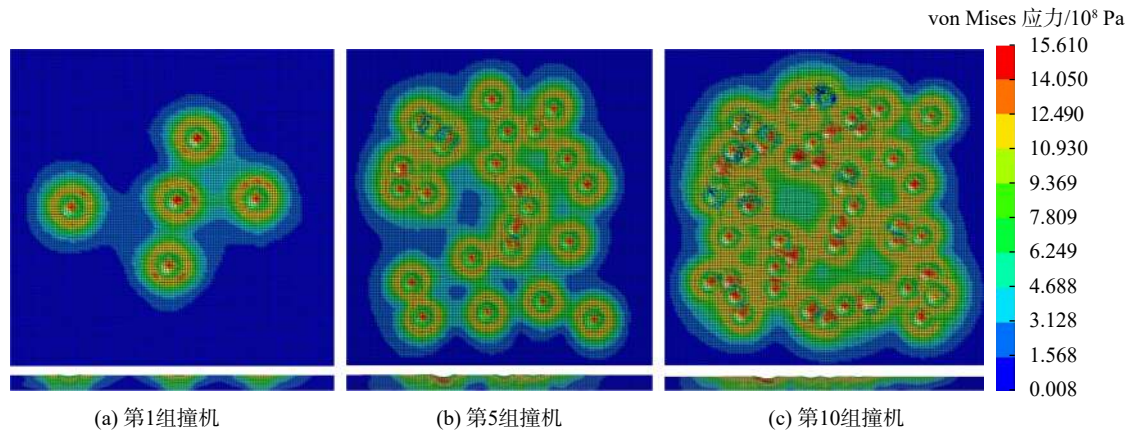


图10 冲击角为 90°、冲击速度为 132 m/s 球形颗粒冲蚀 TC4 的 von Mises 应力分布云图

Fig. 10 Cloud diagram of von Mises stress distribution of TC4 eroded by spherical particles at impingement angle of 90° and impact velocity of 132 m/s

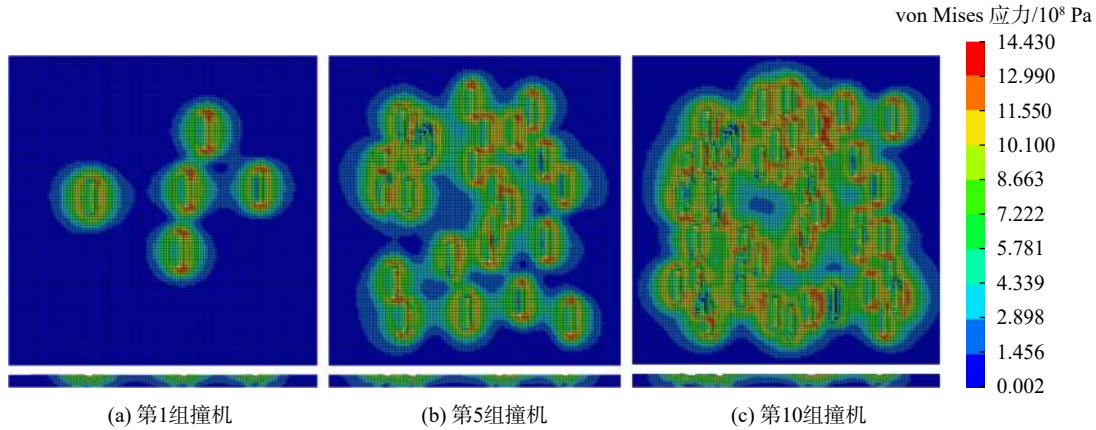


图 11 冲击角为 90° 、冲击速度为 132 m/s 正方体颗粒冲蚀 TC4 的 von Mises 应力分布云图

Fig. 11 Cloud diagram of von Mises stress distribution of TC4 eroded by cubic particles at impingement angle of 90° and impact velocity of 132 m/s

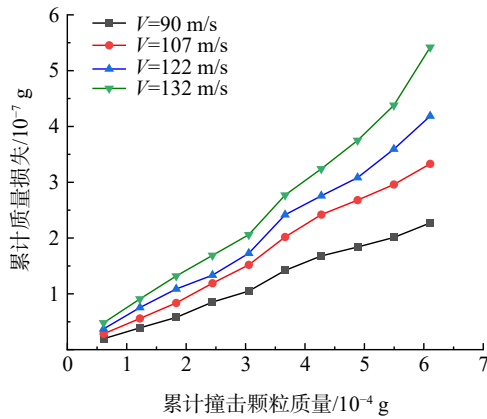


图 12 90° 角下 TC4 累计质量损失随累计撞击球形颗粒质量的变化曲线

Fig. 12 Variation curve of cumulative mass loss of TC4 with cumulative impact spherical particle mass at impingement angle of 90°

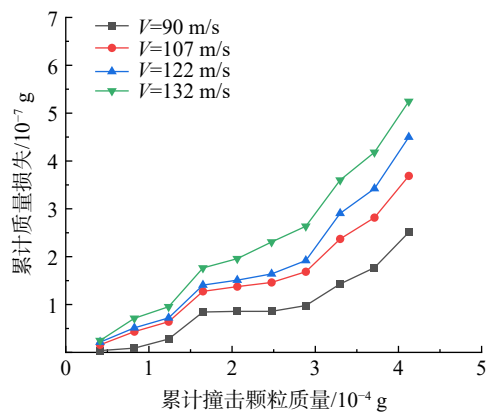


图 13 90° 角下 TC4 累计质量损失随累计撞击正方体颗粒质量的变化曲线

Fig. 13 Variation curve of cumulative mass loss of TC4 with cumulative impact spherical particle mass at impingement angle of 90°

高角度冲蚀需要更多颗粒不断的撞击材料,使材料反复受到剪切与挤压作用,直至材料达到屈服强度而脱落,所以 90° 角的冲蚀率较低且变化较为平缓。球形颗粒的撞击可以较好的模拟剪切与挤压的作用,不会使接触面产生变形过于集中的情况。而正方体颗粒的棱角会对材料造成过大的剪切作用,且冲蚀量的增长不规律。所以在以变形磨损为主的高角度冲蚀数值仿真中应使用球形颗粒。

90° 角时冲蚀率随速度变化的数值仿真与试验结果对比如图 14 所示。随着冲击速度的增大,冲蚀率增大,但增长的幅度较为平缓。随着冲击速度从 90 m/s 提高到 132 m/s,冲蚀率增量为 0.47 mg/g,小于 30° 角冲蚀的冲蚀率增量。

这是因为在 90° 角时,材料表面受到颗粒垂直

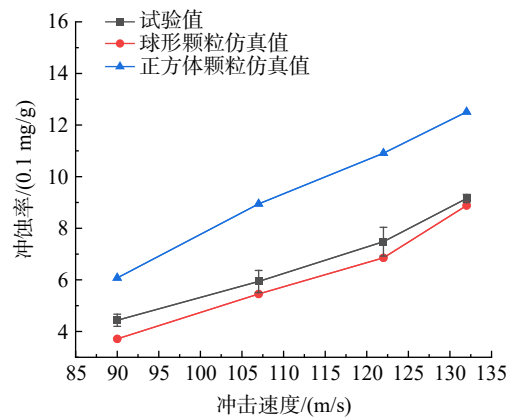


图 14 90° 角下冲蚀率随速度变化关系仿真与试验结果对比

Fig. 14 Comparison between simulation and experimental results of the relationship between erosion rate and velocity at impingement angle of 90°

冲击产生变形,颗粒的大部分动能虽然都沿着垂直方向作用,但是由于变形区域为整个凹坑,需要更多的颗粒反复冲击后才能使表层材料断裂脱落,即去除单位质量材料所需的能量较大。因此在速度提高时,所有颗粒总的动能增大,总磨损量增长较小,冲蚀率的增长较为平缓。在 90°角冲蚀时球形颗粒的数值仿真结果与试验得到的冲蚀率较为接近,而正方体颗粒的冲蚀率则严重偏高。试验冲蚀率稍高的原因是颗粒流从喷枪口流出后在 TC4 试样上会再呈现出大于喷枪直径的圆形区域。撞击在圆形区域外围的颗粒的冲击角会略低于 90°角,因此这部分颗粒还会造成少量切削磨损,导致试验结果略高于数值仿真结果。

3.3 全角度范围冲蚀

为了讨论球形颗粒与正方体颗粒在全角度范围内的冲蚀效果,选择 132 m/s 的冲击速度分别在不同的冲击角进行上述两种颗粒形状的数值仿真,并在相同条件下进行冲蚀试验加以验证,仿真与试验条件设置如表 5 所示。结合文中第 3.1 节、第 3.2 节中 30°与 90°的仿真与试验结果对两种颗粒形状在全角度范围冲蚀的适用情况进行

表 5 全角度范围仿真与试验条件设置
Table 5 Full angle range simulation and test condition setting

冲击角/(°)	试验		仿真	
	编号	形状	编号	形状
15	9	球、正方体	17	球
			18	正方体
45	10	球、正方体	19	球
			20	正方体
60	11	球、正方体	21	球
			22	正方体
75	12	球、正方体	23	球
			24	正方体

分析。
冲击速度为 132 m/s 时,TC4 平板受球形颗粒不同冲击角冲蚀后的 von Mises 应力分布云图如图 15 所示。在 15°冲击角时,材料几乎不发生冲蚀。球形颗粒以小角度刮过接触面后水平速度依旧较大,仍有大部分动能,动能向材料内能的转化量很小,因此冲蚀量很低;在 45°冲击角时因为

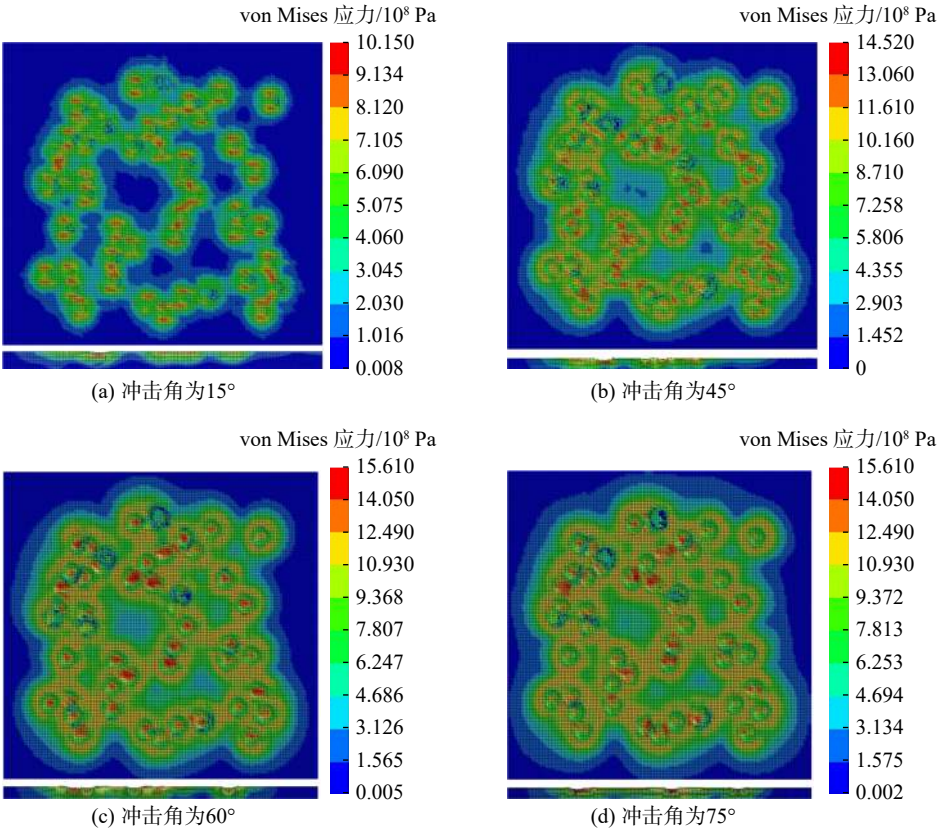


图 15 不同冲击角下,冲击速度为 132 m/s 时球形颗粒冲蚀 TC4 的 von Mises 应力分布云图
Fig. 15 Cloud diagram of von Mises stress distribution of TC4 eroded by impact velocity of 132 m/s spherical particles at different impingement angles

法向速度的提高以及变形磨损占比变大,相比 30° 角的冲蚀量有所增加;冲击角进一步加大为 60° 与 75° 时,此冲击角属于高角度冲蚀范围,变形磨损在总磨损量中占比较大,此时球形颗粒会在重复撞击的位置对平板造成大量冲蚀,且冲击角越大,重复撞击位置的凹坑截面积越小,冲蚀量越低。

冲击速度为 132 m/s 时, TC4 平板受正方体颗粒不同冲击角冲蚀后的 von Mises 应力分布云图如图 16 所示。在 15° 冲击角时,由于正方体颗粒的尖角与材料表面的夹角较小,颗粒切入材料的深度较浅,对材料造成的水平方向的挤压作用较小,所以颗粒在刮过接触面时会造成浅且宽的痕迹,冲蚀率较低;在 45° 冲击角时,切削磨损仍占总磨损量的大部分,材料在颗粒运动方向上会受到较大的剪切与挤压作用,但小于 30° 冲击角;冲击角为 60° 和 75° 时,材料的磨损量仍较高,与 45° 角时相差不大。此时材料的磨损是由颗粒尖角切入材料造成局部应力过高使单元失效所致,并不属于变形磨损的材料去除机制。冲击角越大,凹坑的凹坑截面积越小,凹坑深度越深,但冲蚀量相对较高且变化不明显。

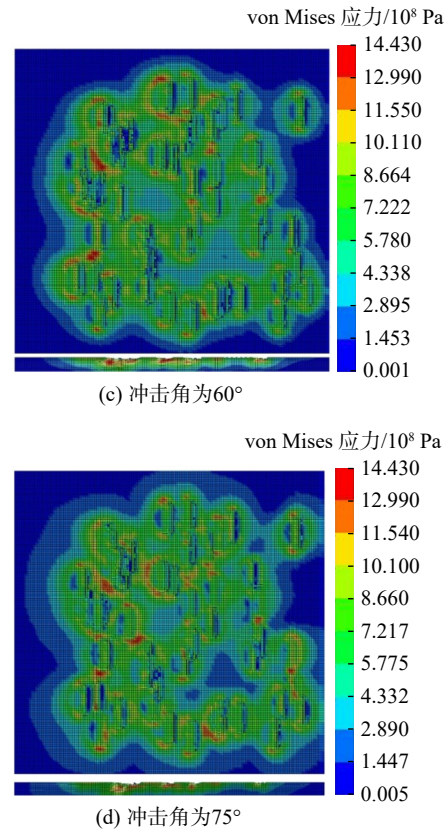
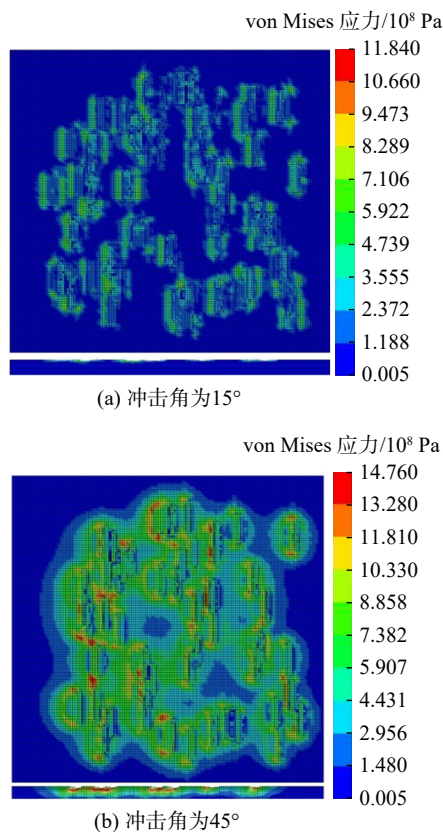


图 16 不同冲击角下,冲击速度为 132 m/s 时正方体颗粒冲蚀 TC4 的 von Mises 应力分布云图

Fig. 16 Cloud diagram of von Mises stress distribution of TC4 eroded by impact velocity of 132 m/s cubic particles at different impingement angles

冲击速度为 132 m/s 时冲蚀率随冲击角变化的数值仿真与试验结果对比如图 17 所示。通过试验结果可以发现 TC4 的冲蚀率先快速增大后平缓减小,在 30° 左右时达到最大值,符合典型韧

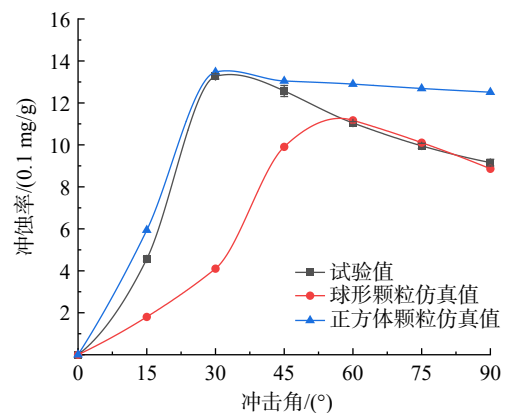


图 17 冲击速度为 132 m/s 时冲蚀率随冲击角变化关系仿真与试验结果对比

Fig. 17 Comparison between simulation and experimental results of the relationship between erosion rate and impingement angles at impact velocity of 132 m/s

性材料冲蚀率随冲击角的变化曲线。同时可以看出球形颗粒在高角度范围内可以得到合理的计算结果,但在低角度范围内的结果严重偏低,冲击角越接近 30° , 仿真的冲蚀率与实际相差越大; 正方体颗粒在低角度范围内可以得到合理的计算结果,但在高角度范围内的结果严重偏高,冲击角越大,仿真冲蚀率与实际相差越大。

4 结 论

本文运用 ANSYS/LS-DYNA 建立多颗粒随机冲蚀模型,分别在 30° 与 90° 的冲击角下,使用球形和正方体 Al_2O_3 颗粒,对 TC4 平板进行不同速度的冲蚀磨损数值仿真,计算冲蚀率。进行相同条件下的冲蚀试验来验证数值仿真结果的真实性,主要结论如下:

30° 角的低角度冲蚀时,总磨损量以切削磨损为主。正方体颗粒的冲蚀率与试验结果相符,其棱角与材料的相对运动更符合刀具切削的过程。因此应使用正方体颗粒进行低角度下冲蚀磨损的数值仿真。

90° 角的高角度冲蚀时,总磨损量可认为全部是变形磨损。球形颗粒的冲蚀率与试验结果相符,可较好的模拟冲蚀过程中对材料造成的剪切和挤压作用,因此应使用球形颗粒进行低角度下冲蚀磨损的数值仿真。

相同条件下颗粒冲击速度越大,冲蚀率增长越快。颗粒冲击速度从 90 m/s 提高到 132 m/s 的过程中, 30° 角的冲蚀率增大较为迅速,增量为 0.68 mg/g ; 90° 角的冲蚀率增大较为平缓,增量为 0.47 mg/g 。

参考文献:

- [1] HAMED A, TABAKOFF W C, WENGLARZ R V. Erosion and deposition in turbomachinery[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(2): 350-360.
- [2] FINNIE I, MCFADDEN D H. On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence[J]. *Wear*, 1978, 48(1): 181-190.
- [3] BITTER J G A. A study of erosion phenomena: Part I [J]. *Wear*, 1963, 6(1): 5-21.
- [4] BITTER J G A. A study of erosion phenomena: Part II [J]. *Wear*, 1963, 6(1): 169-190.
- [5] 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.
- [6] WANG Yufei, YANG Zhenguo. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials[J]. *Wear*, 2008, 265(5/6): 871-878.
- [7] AZIMIAN M, SCHMITT P, BART H J. Numerical investigation of single and multi-impacts of angular particles on ductile surfaces[J]. *Wear*, 2015, 342/343: 252-261.
- [8] 马松林, 赵振华, 颜诚, 等. 不同形状砂尘高速冲蚀 TC4 平板的数值仿真[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(2): 321-330.
MA Songlin, ZHAO Zhenhua, YAN Cheng, et al. Numerical simulation of TC4 plates with high speed erosion of sand dust with different shapes[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(2): 321-330. (in Chinese)
- [9] 杜明超, 李增亮, 董祥伟, 等. 菱形颗粒冲击材料表面冲蚀磨损特性分析[J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(1): 1-11.
DU Mingchao, LI Zengliang, DONG Xiangwei, et al. Analysis of material surface erosion characteristics due to rhomboid-shaped particle impact[J]. *Tribology*, 2020, 40(1): 1-11. (in Chinese)
- [10] 王光存. 离心压缩机叶轮冲蚀磨损机理和规律的研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
WANG Guangcun. Study on erosion wear mechanism and law of impeller in centrifugal compressor[D]. Jinan: Shandong University, 2015. (in Chinese)
- [11] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983, 21: 541-548.
- [12] GREGORY K. Failure modeling of titanium 6Al-4V and aluminum 2024-T3 with the Johnson-cook material model[R]. Washington DC: Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2003.
- [13] ZHANG Yancheng, OUTEIRO J C, MABROUKI T. On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4 V using three types of numerical models of orthogonal cutting[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 31: 112-117.
- [14] 唐长刚. LS-DYNA 有限元分析及仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [15] WOYTOWITZ P J, RICHMAN R H. Modeling of damage from multiple impacts by spherical particles[J]. *Wear*, 1999, 233/234/235: 120-133.
- [16] YERRAMAREDDY S, BAHADUR S. Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V[J]. *Wear*, 1991, 142(2): 253-263.
- [17] 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.
- [18] EVSTIFEV A, KAZARINOV N, PETROV Y, et al. Experimental and theoretical analysis of solid particle erosion of a steel compressor blade based on incubation time concept[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2018, 87: 15-21.
- [19] 董刚. 材料冲蚀行为及机理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
DONG Gang. Study on the erosion wear behaviors and mechanisms of several materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [20] American Society of Testing Materials (ASTM). Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets: ASTM G76-13 [S]. West Conshohocken: ASTM, 2013: 1-6.

(编辑: 王碧珺)