

不同形状砂尘高速冲蚀 TC4 平板的数值仿真

马松林, 赵振华, 颜 诚, 陈 伟

(南京航空航天大学 能源与动力学院

航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 含有砂尘的空气吸入发动机, 会与压气机转子叶片以较高的相对速度发生碰撞, 产生砂尘冲蚀现象, 严重影响到飞行器飞行安全。通过采用能较好适应大变形的光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法和有限元 (FE) 耦合的方法, 建立不同形状砂尘冲蚀 TC4 平板模型, 研究 TC4 平板表面受砂尘高速冲蚀的典型损伤形式及其规律。结果表明: 砂尘尖角越小, 冲击产生的弹坑越深, 所造成的损伤也越大; 随砂尘逐颗撞击平板, 弹坑的深度变化越来越小, 表现为平板表面的塑性硬化过程; 在砂尘连续冲击下, 受到冲击角的影响, 损伤处的堆积物可能被砂尘冲脱平板, 也可能被重新压回弹坑。

关 键 词: 砂尘冲蚀; TC4 平板; 堆积物; 光滑粒子流体动力学 (SPH); 冲击角

中图分类号: V252 **文献标志码:** A

Numerical simulation of TC4 plates with high speed erosion of sand dust with different shapes

MA Songlin, ZHAO Zhenhua, YAN Cheng, CHEN Wei

(Aero-engine Thermal Environment and Structure Key

Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology,

College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The air inhalation engine containing sand dust could collide with the compressor rotor blade at a higher relative speed and produce sand dust erosion, seriously affecting the flight safety of the aircraft. The model of TC4 plate with different shapes of sand dust was established by using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) and finite element (FE) coupling, which could better adapt to the large deformation. The typical damage forms and laws of high speed erosion of the sand dust on the surface of the TC4 plate were studied. Results showed that the smaller sand dust angle meant the deeper impact crater and the greater damage. With the sand dust hitting the plate, the depth of the pit became smaller and smaller, showing the plastic hardening process of the flat surface; under the continuous impact of the sand dust, the impact angle was affected by the sand dust, the accumulation of

收稿日期:2018-04-05

基金项目:研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20170205)

作者简介:马松林(1994—),男,硕士生,主要从事航空发动机结构强度、砂尘冲蚀损伤规律方面的研究。

通讯作者:赵振华(1979—),男,副教授,博士,主要从事航空发动机结构疲劳与可靠性方面的研究。

E-mail:zhaozhenhua@nuaa.edu.cn

引用格式: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.

the damage may be flushed off the plate by sand dust and repressed back to the crater.

Key words: sand dust erosion; TC4 plate; pile-up; smoothed particle hydrodynamics (SPH); impingement angle

直升机在沙尘地带或战场前线等恶劣环境起降或飞行时,当沙尘被吸入发动机压气机,将与钛合金材料压气机转子叶片以 300~400 m/s 的相对速度发生碰撞,产生沙尘冲蚀损伤,严重影响到直升机飞行安全^[1]。而沙尘高速冲蚀过程的研究对于提高发动机工作的可靠性和安全性具有重要意义。

由于沙尘速度高、体积小,采用试验观察沙尘高速冲蚀过程具有很大难度,使用仿真模拟沙尘的冲蚀过程是一种研究沙尘冲蚀的有效途径。王宇飞等^[2]用刚性球形颗粒模型沙尘冲蚀过程,分析了韧性材料和脆性材料的冲蚀速率。然而由廉晓庆、Ghobeity 等^[3-4]的研究表明,不同形状沙尘的冲蚀机理可能是不同的,而适用于不同形状沙尘的高速冲蚀目前研究成果很少。传统的有限元方法(FEM)在处理大变形问题时会 出现网格畸变,计算精度不高甚至难以计算的问题。光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics,SPH)方法,是一种完全拉格朗日无网格粒子方法,在大变形、瞬态冲击爆炸、网格畸变等问题的处理上具有显著优势,但在处理小变形问题时不如有限元方法精确。SPH-FEM 耦合方法作为一种数值仿真研究方法,在大变形区域使用 SPH 粒子离散,小变形区域使用有限元离散,是计算冲击动力学问题的一种有效手段。在同一材料中同时使用 SPH 和 FEM,耦合界面的计算是关键。在这方面 Johnson 等^[5-6]和 Ferna'ndez-Me'ndez 等^[7]分别提出了各自的算法。Johnson 等将 SPH 粒子固结在有限元节点,通过固结的粒子传递与有限单元之间的相互作用力。Ferna'ndez-Me'ndez 等在有限单元和 SPH 粒子之间设置了过渡区域,在过渡区域使用混合插值函数,不需要将有限元节点替换为粒子。张志春等^[8]提出一种耦合算法。将 SPH 粒子固结在有限元节点,在有限元节点设置背景粒子,通过背景粒子的方式将有限元节点纳入 SPH 粒子的邻近搜索列表。林晓东等^[9]与张文超等^[10]使用 SPH-FEM 方法在冲蚀领域研究固液两相流的磨料磨损,而目前对于气砂混合的沙尘冲蚀相关领域的研究较少。

本文在试验研究的基础上采用 SPH 和 FEM 耦合的方法,建立不同形状沙尘高速冲击 TC4 平板的仿真计算模型,研究 TC4 平板表面受高速沙尘冲蚀而出现的典型材料变形及损伤形式,为进一步研究沙尘冲蚀 TC4 叶片材料的损伤机理奠定理论基础。

1 试 验

利用 10 mm 空气炮试验系统(如图 1 所示)开展钢珠的冲击试验,利用 OLYMPUS 公司 LEXT OLS4100 型三维形貌仪对试样损伤部位的微观表面进行观测。试验采用直径为 0.5 mm 的钢珠,TC4 平板试验件尺寸为 130 mm×30 mm×2 mm,设定钢珠冲击角为 90°、冲击速度为 200 m/s。

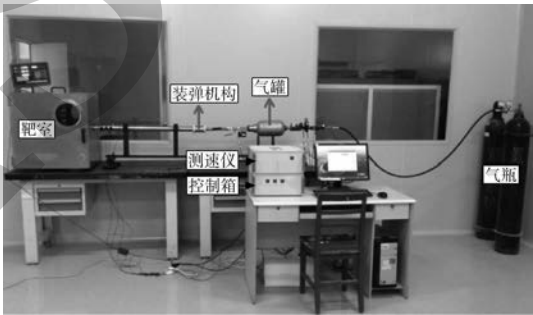
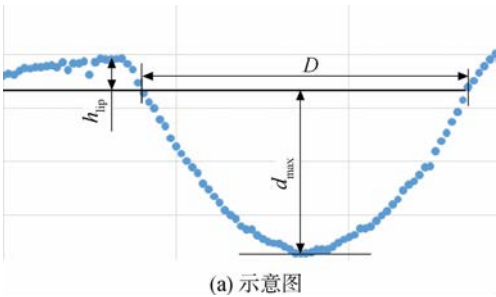
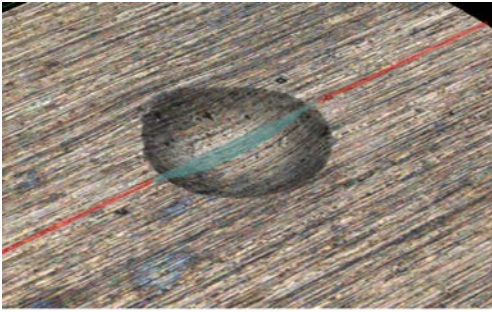


图 1 单粒子冲蚀试验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of single particle erosion test device

钢珠在撞击后会射入平板使平板表面形成弹坑,弹坑周围也会形成材料堆积物,在碰撞后的参数测量中,定义弹坑最大深度 $d_{\max}$ 和堆积物最大高度 h_{lip} ^[11],如图 2(a)所示。通过测量得到弹坑直径 $D=313.9\text{ }\mu\text{m}$,弹坑深度 $d_{\max}=40.2\text{ }\mu\text{m}$,弹坑形貌如图 2(b)所示。





(b) 实物图

图 2 钢珠撞击形成的弹坑形貌

Fig. 2 Morphology of the crater formed by the impact of steel ball

2 数值仿真模型

2.1 SPH 基本原理

SPH 方法的基础是插值理论^[12-13]。在 SPH 中任一宏观变量都能方便的借助于一组无序点上的值表示成积分插值计算得到。核近似函数为

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) d\mathbf{x}' \quad (1)$$

式中 $f(\mathbf{x})$ 为三维坐标向量 $\mathbf{x}$ 的函数; Ω 为点 $\mathbf{x}$ 的支持域; $\mathbf{x} - \mathbf{x}'$ 为粒子间距; h 为 SPH 粒子的光滑长度, 光滑长度随时间和空间变化; $W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h)$ 为核函数通常使用辅助函数 $\theta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$ 进行定义, 即

$$W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) = \frac{1}{h(\mathbf{x} - \mathbf{x}')^d} \theta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad (2)$$

式中 d 为空间维数。

SPH 中最常用的光滑核是 3 次 B 样条曲线, 即

$$\theta(u) = C \times \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}u^2 + \frac{3}{4}u^3 & |u| \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-u)^3 & 1 \leq u \leq 2 \\ 0 & |u| \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中 C 为归一化常量, 由空间维数确定 $u = \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}'}{h}$ 。

联系式(1)、式(2)用粒子近似方法将连续形式的积分方程转换成离散型的方程形式为

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\rho_i} \cdot \frac{1}{h(\mathbf{x} - \mathbf{x}')^d} \theta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad (4)$$

式中 ρ_i 为粒子 i 的密度; m_i 为位于 i 处的粒子质量。

2.2 TC4 平板的数值模型

由于弹体只对平板的冲击处及其临近区域有所影响, 且试验得出的弹坑直径 $D = 313.9 \mu\text{m}$, 弹

坑深度 $d_{\max} = 40.2 \mu\text{m}$, 故只取平板一部分 $12 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的块体进行建模即可满足仿真要求; 块体中心受冲击处及其临近区域用 SPH 质点建模, 平板模型如图 3 所示。单个 SPH 粒子的质量为 $2.55 \times 10^{-11} \text{ kg}$; 平板的其他部分使用带有一个积分点和沙漏控制的 8 节点六面体单元建模; 在 SPH 区域和有限单元之间建立了点面固定连接触; 约束平板底部单元的 6 个方向自由度。

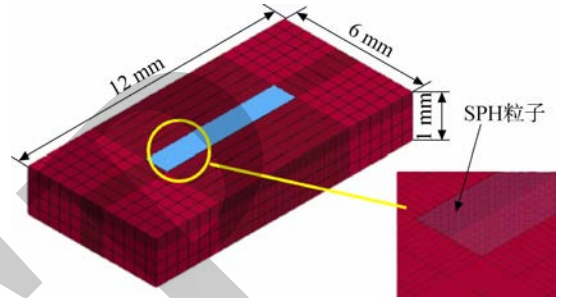


图 3 平板 SPH-FEM 耦合模型

Fig. 3 SPH-FEM flat coupling model

使用 Johnson-Cook 黏塑性模型模拟 TC4 平板在高压、高应变率下的行为。该模型认为材料的强度是应变、应变率和温度的函数, 其表达式如下:

$$\sigma_f = [A + B(\epsilon^p)^n] \left[1 + c \ln \left(\frac{\epsilon^p}{\epsilon_0} \right) \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (5)$$

式中 σ_f 为 von Mises 流动应力, ϵ^p 为等效塑性应变, n 为应变硬化指数, ϵ^p 为应变率, ϵ_0 为参考应变率, T 为靶材温度, T_r 为室温, T_m 为熔点, m 为应变率敏感指数, A 、 B 和 C 分别为屈服强度、应变硬化系数和应变率常数。

Johnson-Cook 材料模型的断裂由下面的累积损坏法则导出

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^p}{\epsilon_f} \quad (6)$$

式中 D 为失效参数, $\Delta \epsilon^p$ 为载荷增加引起的等效塑性应变增量。Johnson 和 Cook^[14-15] 提出的剪切损伤演化模型中将 ϵ_f 描述如下:

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \sigma^*)] \cdot \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\epsilon^p}{\epsilon_0} \right) \right] \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (7)$$

其中 $\sigma^* = p/\sigma_e$, 为压力与等效应力的比值, 无量纲。 d_1, d_2, d_3, d_4 和 d_5 为试验常数, 可以通过分离式 Hopkinson 压杆试验测得。失效应变 ϵ_f 和

损伤的累积是平均应力、应变率和温度的函数。当失效参数 $D=1$ 时发生失效。

叶片材料平板模型使用的 Johnson-Cook 材料模型参数如表 1 所示^[16-17]。

表 1 TC4 平板的材料属性

参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	4400
弹性模量 E/GPa	115
切变模量 G/GPa	42.9
泊松比 ν	0.34
J-C 屈服强度 A/MPa	862
J-C 硬化系数 B/MPa	1080
J-C 应变硬化系数 n	0.341
J-C 应变速率常数 c	0.0182
热软化指数 m	0.767
熔点温度 T_m/K	1910
环境温度 T_r/K	298
失效参数 d_1	-0.09
失效参数 d_2	0.27
失效参数 d_3	0.48
失效参数 d_4	0.014
失效参数 d_5	3.859

2.3 SPH 粒子间距选取

为分析 SPH 粒子间距对仿真结果准确性的影响,建立不同 SPH 粒子间距的仿真模型,各组模型的参数和计算结果列于表 2。

表 2 SPH 粒子间距对计算结果的影响

Table 2 Influence of SPH particle spacing on the calculation results			
SPH 粒子间距/ μm	冲击坑直径 $D/\mu\text{m}$	冲击坑深度 $d/\mu\text{m}$	计算时间/ min
20.00	334.6	41.5	426
33.33	361.9	44.4	142
50.00	455.7	76.5	84

通过仿真结果可以发现,SPH 粒子的间距越小,仿真计算的结果与试验的结果(弹坑直径为

$313.9\mu\text{m}$)越接近,但过小的 SPH 粒子间距势必会使计算时间大大增加;而过大的 SPH 粒子间距会导致仿真计算的结果精度不足;综合考虑仿真计算的精度和计算时间,选取表 2 中 SPH 粒子间距为 $33.33\mu\text{m}$ 的模型,在随后建模时均设置成该值。

2.4 数值仿真算例

在对砂尘建模时,由于砂尘撞击靶板后破碎会有能量损失,为了以损伤最严重情况来模拟损伤过程,将砂尘简化为边长为 0.5 mm ,厚度为 0.15 mm 的刚体,砂尘和 SPH 区域之间建立点面侵蚀接触;砂尘颗粒的密度为 $2\,260\text{ kg}/\text{m}^3$,冲击平板的速度为 $350\text{ m}/\text{s}$;SPH 粒子间距设置在 $33.3\mu\text{m}$ 。砂尘的几何形状可由尖角 A 确定;在各个算例中的运动方向和碰撞方位可由冲击角 α 和方位角 θ 完全确定^[18],如图 4 所示。

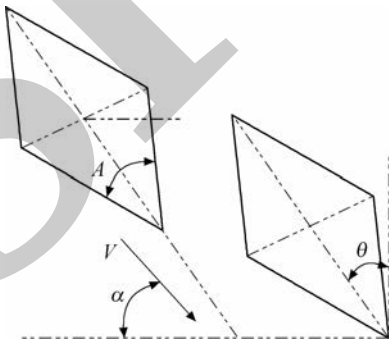


图 4 尖角砂尘的几何描述

Fig. 4 Geometric description of the sharp angle sand dust

为分析 TC4 平板表面的砂坑受砂尘连续冲击的影响规律,根据上文的平板 SPH/FEM 耦合建模方法,分别建立尖角为 50° 、 60° 和 90° 的砂尘,如图 5 所示。以冲击角为 90° 、 60° 和 45° 等入射条件的多颗砂尘连续冲击在 TC4 平板同一位置的仿真模型,模型建立结果以 60° 砂尘尖角为例,如图 6 所示。

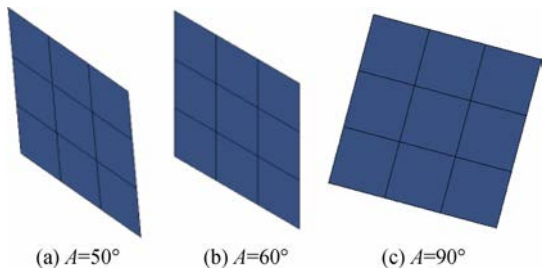


图 5 不同尖角的砂尘模型

Fig. 5 Sand dust model with different sharp corners

选取砂尘尖角为 50° 和 90° 的砂尘模型,首先用一颗砂尘以某冲击角冲击平板表面以产生材料堆积物,然后用第 2 颗砂尘以不同方位角冲击在

堆积物上,如图 7 所示,并将各模型的冲击条件列于表 3。

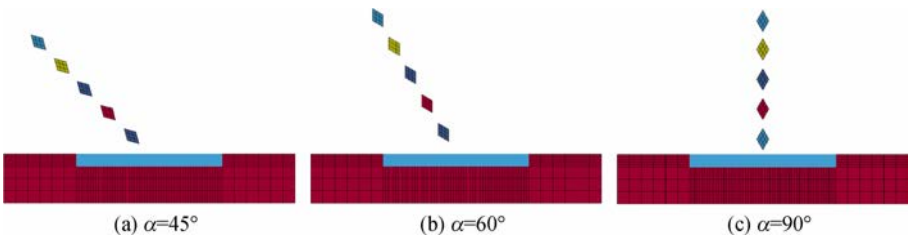


图 6 $A=60^\circ$ 砂尘冲蚀模型
Fig. 6 $A=60^\circ$ sand erosion model

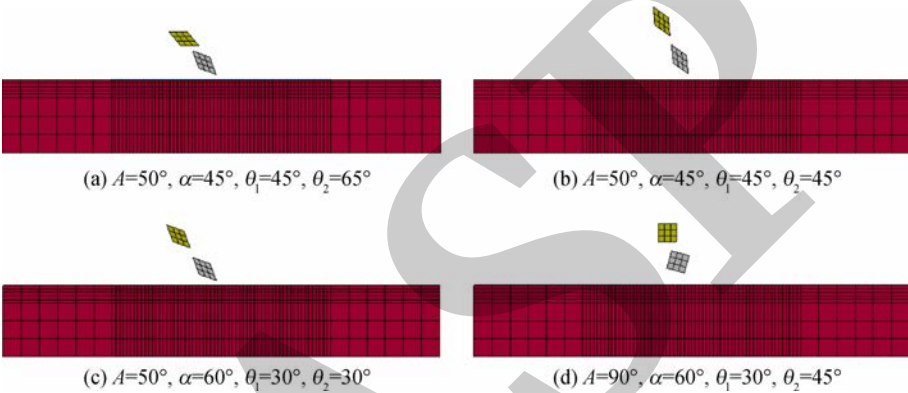


图 7 不同砂尘形状和冲击条件的仿真模型
Fig. 7 Simulation model of different sand dust shapes and impact conditions

表 3 各组仿真模型冲击条件

Table 3 Impact conditions of simulation models in each group

模型 编号	砂尘尖角/ ($^\circ$)	冲击角/ ($^\circ$)	第 1 颗砂尘 方位角/($^\circ$)	第 2 颗砂尘 方位角/($^\circ$)
1	50	45	45	45
2	50	45	45	65
3	50	60	30	30
4	50	60	30	65
5	90	45	45	45
6	90	60	30	45

3 仿真结果分析

3.1 连续砂尘以同一方位角冲击下的损伤

各组仿真模型的冲蚀条件和计算测量结果列于表 4,其中表中第 N 颗砂尘冲击后弹坑深度为 d_{mN} 。

对于同一砂尘尖角,第 1 颗、第 2 颗砂尘在平

板表面冲击出了较深的弹坑;而当后续砂尘冲击到平板的同一位置时,在 45° , 60° 和 90° 冲击角条件下所产生的弹坑深度增大趋势相近,且增幅趋于平缓,以砂尘尖角为 50° 的砂尘为例如图 8 所示。为便于比较相同冲击角,不同砂尘尖角大小的首颗砂尘对砂坑深度影响趋势,将表中数据绘制成点线图,如图 9 所示。可见,尖角越小,砂尘越容易刺穿靶材,造成的损伤也越大;随着砂尘尖角的增大,弹坑深度逐渐减小,且在不同冲击角下弹坑深度的减小趋势相近。

从任一仿真模型来看,前三颗砂尘的冲击会使平板表面具有较大的塑性变形,而当后续砂尘冲击到平板的同一位置时,弹坑深度的变化相较之前有所减小,即表现为 TC4 平板的表面发生了塑性硬化。

3.1.1 弹坑形貌变化规律

通过观察仿真结果发现,当砂尘沿平板的法线方向撞击时,会产生楔状的弹坑,弹坑的截面轮廓为三角形;随着后续砂尘的冲击,弹坑截面形状不会有太大变化,但深度和截面积会逐步增大,如

表 4 各组模型冲蚀条件和计算结果

Table 4 Erosion conditions and calculation results of each model

模型编号	砂尘尖角/(°)	冲击角/(°)	第 N 颗砂尘冲击后弹坑深度为 d_{mN}				
			$d_{m1}/\mu\text{m}$	$d_{m2}/\mu\text{m}$	$d_{m3}/\mu\text{m}$	$d_{m4}/\mu\text{m}$	$d_{m5}/\mu\text{m}$
7	50	45	90.6	119.4	127.5	138.5	146.8
8	50	60	96.2	122.4	143.4	154.4	162.5
9	50	90	101.2	128.1	137.9	144.3	156.7
10	60	45	85.8	112.8	123.3	134.7	145.6
11	60	60	94.8	119.3	136.5	159.6	165.8
12	60	90	96.3	116.3	128.2	135.1	143.5
13	90	45	30.4	33.9	43.0	53.8	60.7
14	90	60	67.2	78.4	92.8	108.3	115.2
15	90	90	77.8	104.4	116.4	127.2	131.9

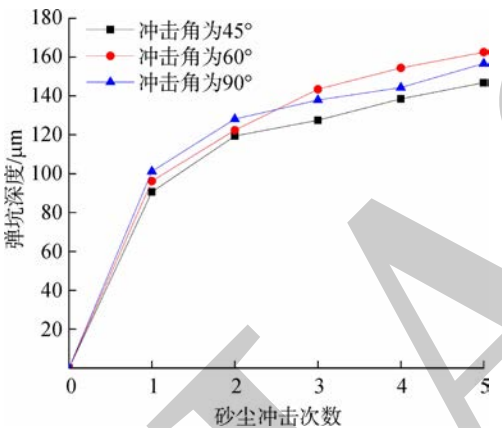


图 8 $A=50^\circ$ 时不同冲击角对弹坑深度影响

图 10(a)所示。这种情况会导致撞击区域产生应力集中。

而当砂尘倾斜冲撞平板时,在 60° 冲击角下会产生一侧隆起的楔状弹坑,随着后续砂尘的冲击,弹坑深度增大,隆起的堆积物增高,如图 10(b)所示;在 45° 冲击角下,首颗砂尘会产生类似的楔状弹坑,并在砂尘飞离平板表面的过程中会将堆积物冲脱,如图 10(c),对于后续砂尘,由于砂尘会撞入前一砂尘产生的弹坑,首先会在弹坑内壁产生一个小的楔形坑,随后会因 TC4 表面发生塑性硬化,受弹坑内壁角度影响导致运动方向发生偏折,产生切削行为,最后形成一个截面形状为半椭圆形的弹坑,而后面的砂尘会进一步使弹坑的截面积增大。

3.1.2 堆积物形貌变化规律

通过分析模型仿真的结果,当砂尘斜撞向平板时,所产生的堆积物高度明显大于沿法向撞击平板时产生堆积物的高度;但当冲击角小于 45° 时,砂尘会产生切削行为,将堆积物冲脱。以 60° 尖角砂尘在不同冲击角下撞击靶板为例,逐个量取分析结果中每颗砂尘冲击平板后的堆积物高度,结果如表 5 所示,表中第 N 颗砂尘冲击后堆积物的高度为 h_N 。

为了更加直观地观察堆积物高度的变化情况,将 60° 和 90° 冲击角下每颗砂尘冲击下的堆积物高度绘成点线图,如图 11 所示。

首颗砂尘所产生的材料堆积物高度变化最大,当后续砂尘冲击到平板的同一位置后,所造成堆积物高度的变化越来越小。在分析造成堆积物

图 8 $A=50^\circ$ 时不同冲击角对弹坑深度影响

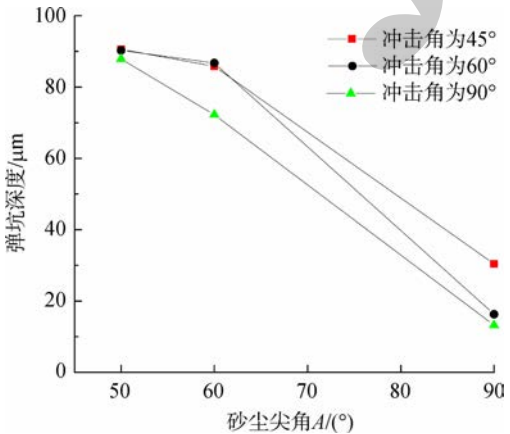


图 9 砂尘尖角对首颗砂尘冲击弹坑深度影响

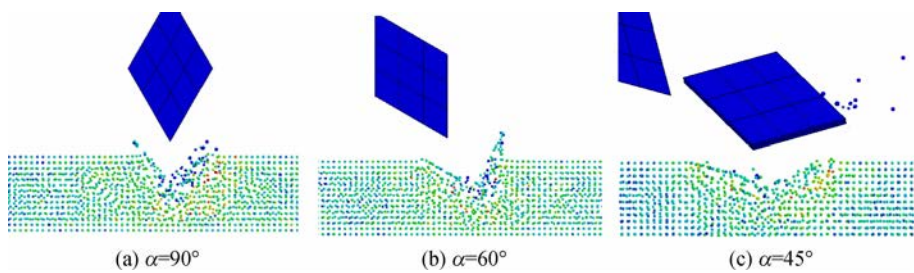


图 10 不同冲击角下的计算模型

Fig. 10 Calculation model under different impact angles

表 5 每颗砂尘冲击后各组模型的堆积物高度

Table 5 Accumulation height of each model after each sand dust impact

砂尘尖角/(°)	冲击角/(°)	第 N 颗砂尘冲击后堆积物的高度为 h_N				
		$h_1/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$	$h_3/\mu\text{m}$	$h_4/\mu\text{m}$	$h_5/\mu\text{m}$
60	45	28.7				
60	60	96.2	146.2	164.5	204.5	227.9
60	90	46.0	66.3	89.5	98.1	102.7

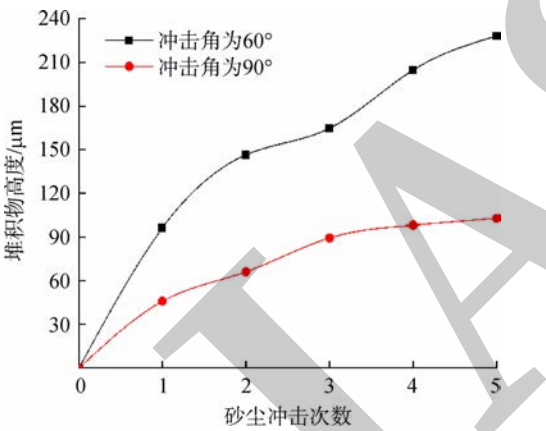


图 11 不同冲击角下堆积物高度变化

Fig. 11 Change of accumulation height under different impact angles

高度变化逐渐减小这一现象可能的原因时,涉及到了堆积物形貌的变化。对于砂尘垂直冲击平板的情况,首先会在弹坑的边缘形成鼓包形的堆积物。随着后续砂尘的冲击,弹坑深度增大,堆积物被向外排挤,使堆积物得端部变薄并向外翻折,唇边的隆起程度略有增大,所以堆积物的高度变化不是很明显;对于砂尘倾斜冲击平板的情况,第 1 颗砂尘会在平板上产生一个较高隆起的堆积物,在砂尘尖角背侧产生一个较低隆起的唇边。在后续砂尘冲蚀过程中,对砂尘尖角背侧的唇边进行挤压以扩大弹坑面积,而对唇边的形貌影响不大;砂尘尖角前侧的堆积物会随着冲击逐步延伸,并且会被砂尘向弹坑外侧挤压弯折,如图 12 所示;

甚至有部分堆积物会被冲脱,如图 13 所示。当砂尘的冲击角过小时,弹坑内的材料会直接被砂尘冲出平板表面,此为砂尘冲蚀过程中的微切削行为,在这种情况下弹坑周围不会有明显的堆积物。

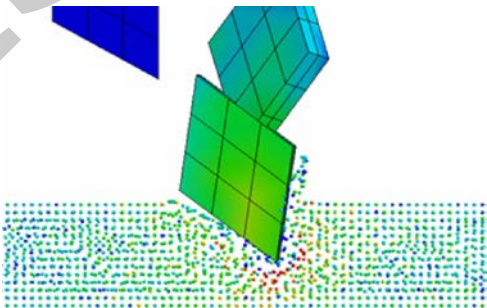


图 12 砂尘向外挤压堆积物

Fig. 12 External extrusion of sand dust

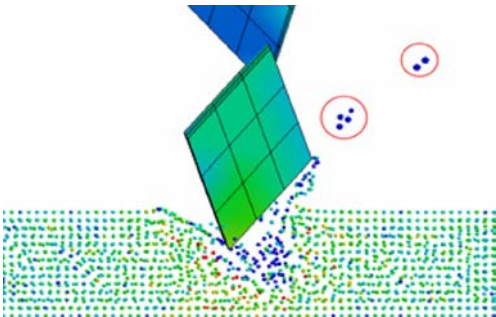


图 13 堆积物被砂尘冲脱平板

Fig. 13 Deposit is flush off the plate by sand dust

3.2 连续砂尘以不同方位角冲击下的损伤

本节将着重关注以砂尘不同方位角冲击平板产生的堆积物,对材料堆积物在后续砂尘冲击下变形乃至脱离平板表面的过程进行仿真分析。

根据仿真计算的结果,可以发现,当第 2 颗砂尘撞上第一颗砂尘冲击平板所产生的堆积物时,可能会将堆积物沿第 2 颗砂尘的撞击方向压回平板并向外排挤,由于砂尘具有较大的动能,故还将继续切割平板表面,与原先的堆积物一起形成新的冲蚀堆积物,其高度相较第 1 次冲击产生的堆积物大,弹坑的面积较之前也有所增大,如图 14 所示,图中 t 表示仿真计算时间,在 $t=0.4\mu\text{s}$ 时砂尘未与靶板产生碰撞; $t=3.8\mu\text{s}$ 时第 1 颗砂尘

与靶板碰撞; $t=9.6\mu\text{s}$ 时第 2 颗砂尘与靶板碰撞产生二次冲击。

当砂尘以较大方位角冲击堆积物时,即砂尘以更为倾斜的角度冲击,可能将堆积物冲断使其脱离平板,如图 15 所示。

而当砂尘以某一方位角冲击堆积物时,可能恰好将堆积物压回弹坑内,而不会产生新的堆积物,如图 16 所示。这种情况可以使砂尘对叶片冲击所产生的影响最小。

对于 90° 尖角的砂尘,在某一方位角下冲击堆积物,同样可以将堆积物压回弹坑,且新产生的弹坑底缘较平整,弹坑深度较浅,但弹坑边缘仍会产生少量堆积物,如图 17 所示。

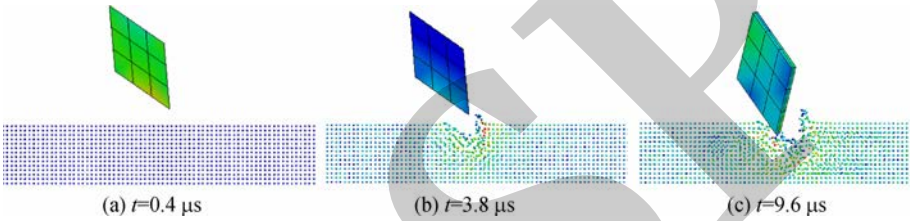


图 14 模型编号 3 不同时刻仿真结果
Fig. 14 Model number 3 simulation results at different times

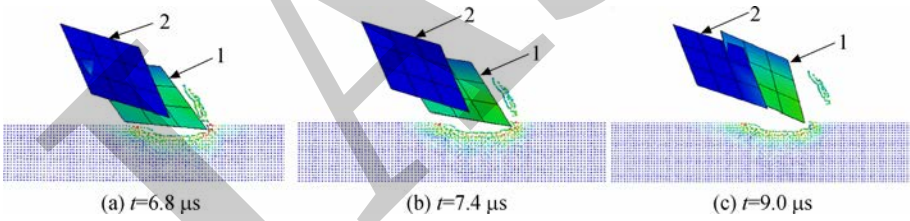


图 15 模型编号 1 不同时刻仿真结果
Fig. 15 Model number 1 simulation results at different times

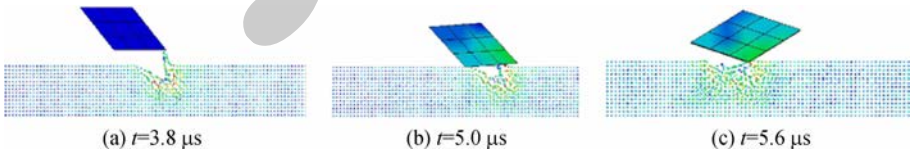


图 16 模型编号 2 不同时刻下仿真结果
Fig. 16 Model number 2 simulation results at different times

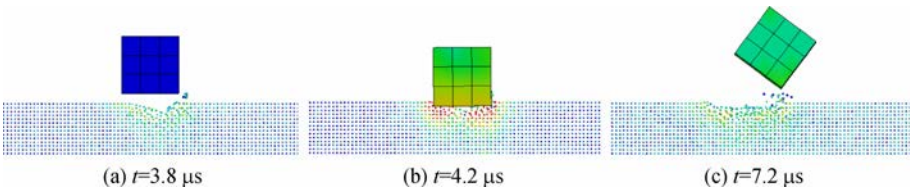


图 17 模型编号 6 不同时刻下仿真结果
Fig. 17 Model number 6 simulation results at different times

当冲击角和碰撞时的方位角处于某一范围时,砂尘将于材料表面发生微切削现象。例如,在冲击角为 45°,方位角为 45°仿真过程中,观察到了切削行为。此时,砂尘在碰撞之后的翻转方向也发生变化——砂尘向后翻转,这样的运动规律也出现在所有发生微切削现象的算例中。TC4 合金具有良好应变强化特性和较好韧性,这解释了弹坑周围的唇边隆起的过程中不易断裂的现象。当砂尘倾斜撞向平板时,堆积物高度明显大于法向方向撞击,隆起的唇边材料十分容易被后来的砂尘切除;而冲击角越低,隆起的唇边越薄,抗击打能力越弱,所以材料堆积物受砂尘撞击脱落是冲蚀过程中材料去除的主要因素,这解释了为什么低冲击角时的冲蚀率要明显高于高冲击角时的冲蚀率,同时也验证了唇边极易受后续砂尘撞击而断裂的事实。

4 结 论

本文采用 SPH/FEM 耦合的分析方法开展了不同形状砂尘冲击钛合金平板的数值仿真,主要结论如下:

- 1) 在冲击速度,冲击角不变条件下,砂尘尖角越小,冲击产生的弹坑越深,所造成的损伤也越大。
- 2) 在砂尘连续冲击下,弹坑的深度变化越来越小,表现为平板表面的塑性硬化过程。
- 3) 在砂尘连续冲击下,堆积物的高度随冲蚀角的减小而增大,当砂尘的冲击角小于 45°时,弹坑周围不会有明显的堆积物,此为砂尘冲蚀过程中的微切削行为。
- 4) 受到砂尘方位角的影响,损伤处的堆积物可能被后续砂尘冲脱平板,也可能被重新压回弹坑。

参考文献:

[1] 何光宇,李应红,王健.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 Guangyu,LI Yinghong,WANG Jian. Plasma based erosion resistant coating technology and its application in helicopter engine field [J]. High Voltage Technology, 2014,40(7):2133-2139. (in Chinese)

[2] WANG Yufei,YANG Zhenguo. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials [J]. Wear, 2008,265(5):871-878.

[3] 廉晓庆,蒋明学.基于有限元模拟研究不同形状磨料对高铝砖的冲蚀磨损[J]. 硅酸盐学报,2014,42(6):762-767.

LIAN Xiaoqing,JIANG Mingxue. Erosion wear of high alumina brick with different shapes of abrasive based on finite element simulation[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2014,42(6):762-767. (in Chinese)

[4] GHOBEITY A,CIAMPINI D,PAPINI M. An analytical model of the effect of particle size distribution on the surface profile evolution in abrasive jet micromachining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5):6067-6077.

[5] JOHNSON G R. Linking of Lagrangian particle methods to standard finite element methods for high velocity impact computations[J]. Nuclear Engineering and Design,1994, 150(2/3):265-274.

[6] JOHNSON G R,STRYK R A,BEISSEL S R. SPH for high velocity impact computations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,1996,139(1/2/3/4):347-373.

[7] FERNA'NDEZ-ME'NDEZ S,BONET J,HUERTA A. Continuous blending of SPH with finite elements[J]. Computers and Structures,2005,83(17/18):1448-1458.

[8] 张志春,强洪夫,高巍然.一种新型 SPH-FEM 耦合算法及其在冲击动力学问题中的应用[J]. 爆炸与冲击,2011,31(3):244-249.

ZHANG Zhichun, QIANG Hongfu,GAO Weiran. A new SPH-FEM coupling algorithm and its application in shock dynamics[J]. Explosion and Shock,2011,31(3):244-249. (in Chinese)

[9] 林晓东,汤积仁,卢义玉.基于 SPH-FEM 耦合算法的磨料水射流破岩数值模拟[J]. 振动与冲击,2014,33(18):171-176.

LIN Xiaodong,TANG Jiren,LU Yiyu. Numerical simulation of rock breaking by abrasive water jet based on SPH-FEM coupling algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock,2014,33(18):171-176. (in Chinese)

[10] 张文超,武美萍,任仲贺.基于 LS-DYNA 仿真的射流加工参数分析[J]. 表面技术,2017,46(10):268-276.

ZHANG Wenchao,WU Meiping,REN Zhonghe. Analysis of jet processing parameters based on LS-DYNA simulation[J]. Surface Technology, 2017, 46(10):268-276. (in Chinese)

[11] TAKAFFOLI J M,PAPINI M. Material deformation and removal due to single particle impacts on ductile materials using smoothed particle hydrodynamics [J]. Wear, 2012, 274/275(3):50-59.

[12] SCHUHMACHER A,TCHERNIAK D. Engine contribution analysis using a noise and vibration simulator [J]. Sound and Vibration,2009,43(1):16-21.

[13] SCHUHMACHER A. Techniques for measuring the vibro-acoustic transfer function [J]. Sound and Vibration, 2010,44(3):6-12.

[14] JOHNSON G R,COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechan-

ics,1985,21(1):31-48.

[15] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague: International Symposium on Ballistics,1983:541-548.

[16] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact; Part 2 mechanical properties of materials directly associated with erosion damage[J]. Wear,2005,259(1):102-109.

[17] OKA Y I, NAGAHASHI K. Measurements of plastic strain around indentations caused by the impact of round and angular particles, and the origin of erosion[J]. Wear, 2003,254(12):1267-1275.

[18] AZIMIAN M, SCHMITT P. Numerical investigation of single and multi impacts of angular particles on ductile surfaces[J]. Wear,2015,342/343(8):252-261.

(编辑:王碧珺)