

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.018

砂尘在典型金属壁面上的反弹特性仿真研究

马松林, 赵振华, 颜 诚, 陈 伟

(南京航空航天大学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, 会与叶片、内外机匣之间不可避免发生碰撞, 影响飞行器飞行安全。通过采用显式动力分析有限元法, 建立砂尘以不同入射角度、入射速度、粒径大小及其旋转速度撞击壁面的反弹模型, 研究砂尘在不同条件下与不锈钢及铝合金面碰撞后的反弹特性结果, 为预测砂尘在粒子分离器中的运动轨迹提供反弹特性数据支持。结果表明: 随砂尘入射速度增大, 反弹速度呈增大趋势, 速度恢复系数基本保持稳定; 相同入射条件下, 铝合金材料对砂尘速度恢复系数的影响小于不锈钢材料; 旋转速度、砂尘粒径对其碰撞反弹特性影响微弱, 可以忽略不计; 决定砂尘反弹角度仅取决于碰撞姿态和砂尘入射角度。

关键词: 砂尘冲蚀; 碰撞反弹; 旋转速度; 砂尘粒径

中图分类号: V252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)01-0142-08

Simulation Study of Rebound Characteristics of Sand and Dust on Typical Metal Wall

MA Songlin, ZHAO Zhenhua, YAN Cheng, CHEN Wei

(Aero-engine Thermal Environment and Structure Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The air suction engine containing sand and dust will inevitably collide with the blade and the inner and outer casing, which will affect the flight safety of the aircraft. By using explicit dynamic analysis finite element method, the rebound model of sand and dust impacting on the wall with different incident angles, incident velocities, particle size and rotating velocities was established. The rebound characteristics of sand and dust impacting on stainless steel and aluminium alloy surfaces under different conditions were studied, which provided data support for predicting the trajectory of sand and dust in particle separator. The results show that the rebound velocity increases with the increase of the incident velocity of sand and dust, and the velocity recovery coefficient keeps stable basically; under the same incident condition, the influence of aluminum alloy on the velocity recovery coefficient of sand and dust is smaller than that of stainless steel; the impact of rotational velocity and particle size of sand and dust on the impact rebound characteristics is weak and can be neglected. The sand and dust rebound angle depends only on the collision attitude and incidence angle of sand and dust.

Key words: sand and dust erosion; impact rebound; rotational speed; sand size

砂尘在发动机气流通流道流动时, 与叶片、内外机匣之间不可避免发生碰撞, 产生砂尘冲蚀损伤, 对发动机结构造成破坏, 严重影响到飞行安全^[1]。以往研究表明, 小粒径的砂尘运动主要受流场气动

基金项目: 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20170205)资助项目。

收稿日期: 2018-08-17; **修订日期:** 2019-03-01

通信作者: 陈伟, 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: chenwei@nuaa.edu.cn。

引用格式: 马松林, 赵振华, 颜诚, 等. 砂尘在典型金属壁面上的反弹特性仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 142-149. MA Songlin, ZHAO Zhenhua, YAN Cheng, et al. Simulation study of rebound characteristics of sand and dust on typical metal wall[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 142-149.

力的影响;而对于大粒径的砂尘,其运动主要受惯性力和壁面碰撞反弹的影响^[2-3]。

砂尘碰撞反弹特性问题的研究通常有试验法和数值仿真法。试验法虽然具有较高可信度,但成本较高且不易实施和观测;数值仿真法简单易行便于观测,更有益于在研究初期对砂尘碰撞反弹的特性形成规律上的认识。国外对于颗粒与金属壁面的碰撞及其轨迹模拟的相关研究较多。Grant等^[4]在大量碰撞试验的基础上,根据统计结果插值得出颗粒壁面的碰撞反弹经验关系式,该公式在之后的研究中广泛使用。Tsuji等^[5-7]根据碰撞相关原理引入虚拟壁面的概念,计算得到颗粒碰撞后的速度大小和方向,给出了颗粒壁面碰撞过程模型的计算公式。该模型在之后的研究中得到很好的运用。Sommerfeld^[8]在 Tsuji 等研究模型的基础上,引入高斯分布函数作为壁面粗糙度及颗粒材质对碰撞特性的影响因子,得出的模拟结果产生了相当高的粒子速度波动值,且对于大颗粒较为明显,而对于小颗粒的运动受壁碰撞模型选择的影响较小。Nguyen等^[9]运用边界层的相关理论,研究微小球形颗粒与圆弧型金属壁面的碰撞反弹特性,并考虑 Stokes 数对碰撞特性的影响。Breitman等^[10]采用了离散隐式算法对粒子分离器内的粒子碰撞轨迹进行了数值分析模拟,得到了两种不同的粒子分离器内粒子碰撞的轨迹,为粒子碰撞的轨迹预测提供理论依据。曾强^[11]将砂尘近似模拟成球状,研究砂尘在涡扇发动机风扇叶片通道中的运动规律。赵梦熊^[12]结合流场的特性预测砂尘运动轨迹,探索并实现了一种粒子分离器粒子轨迹数值模拟新方法。凡金金^[13]采用 LS-Dyna 建立粒子与壁面的碰撞模型,得到初始条件对反弹特性的影响规律,并基于能量分析法和牛顿定律对这些规律进行了分析。但砂尘选用的是球形粒子,并未考虑砂尘的形状与入射姿态。

本文在试验的基础上采用显式动力有限元方法计算不同形状和入射姿态砂尘在发动机进气部件粒子分离器的典型材质(不锈钢、铝合金)平板上的反弹特性,掌握砂尘反弹行为的规律,为进一步研究砂尘在粒子分离器中的碰撞反弹特性奠定理论基础。

1 数值仿真模型

在粒子分离器中,砂尘会从多个方向碰撞靶板壁面,其反弹也具有强随机性。本文对碰撞过程进行模化,设定砂尘的入射速度和入射角度均平行于全局坐标的 zox 平面,如图 1 所示。所描述的砂尘

的形状由尖角 A 决定;砂尘与壁面的碰撞姿态由入射角 α 、倾斜角 θ 共同决定^[14],各角度示意如图 2 所示。

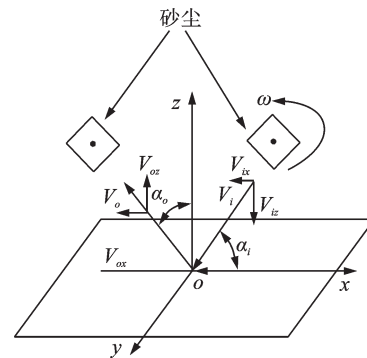


图 1 砂尘碰撞反弹参数示意图

Fig.1 Schematic diagram of rebound parameters of sand and dust collision

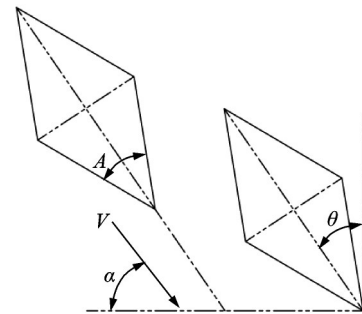


图 2 砂尘碰撞姿态示意图

Fig.2 Schematic diagram of sand and dust collision attitude

砂尘在运动过程中存在绕质心的转动,为分析砂尘绕其质心的旋转对其反弹特性的影响,本文设定砂尘旋转方向绕全局坐标 y 轴按右手定则正向旋转,图 1 中 V_i 表示入射速度; V_o 表示反弹速度; α_i 表示入射角度; α_o 表示反弹角度。

砂尘碰撞反弹的方向将随碰撞时的姿态不同而表现出反弹方向不同的行为。对于同样一颗砂尘,即便在相同旋转速度、入射速度、入射角条件下,其反弹角度也会因为砂尘与壁面碰撞时的倾斜姿态不同而产生变化,规定砂尘与入射 x 轴分速度相一致的方向反弹为正向,与入射 x 轴分速度相反的方向反弹为负向。因此,本文对于砂尘反弹角度的定义取 x 轴反弹分速度与反弹合成速度的反正弦值,既可表达出反弹角大小,又能通过反弹角的正负号表达出反弹方向,其表达式如下

$$\alpha_o = \arcsin\left(\frac{V_{ox}}{\sqrt{V_{ox}^2 + V_{oz}^2}}\right) \quad (1)$$

式中: V_{ox} 为砂尘反弹沿 x 轴分速度; V_{oz} 为砂尘反弹沿 z 轴分速度。

由于砂尘棱角对其反弹特性会有影响,本文将砂尘简化成六面体^[15-16]。设定砂尘切面分别为 50° ,

60°和90°三种尖角;0.3,0.5和0.7 mm三种边长的菱形,厚度为0.15 mm。靶板壁面几何尺寸为12 mm×6 mm×0.5 mm。靶板壁面与沙尘边长为0.5 mm的有限元网格模型如图3所示。

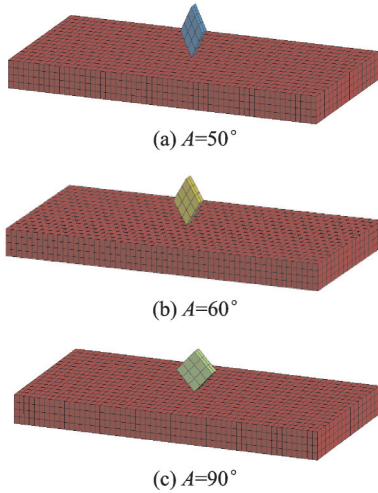


图3 靶板壁面及边长为0.5 mm沙尘网格模型
Fig.3 Sand and dust grid model with wall and a side length of 0.5 mm

模型材料参数设定在LS-Prepost前处理器中完成。金属靶板采用双线性弹塑性材料模型,将沙尘设为刚体,材料参数见表1。

表1 模型材料参数

Table 1 Model material parameters

材料	SiO ₂	410不锈钢	2024铝合金
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	3 200	7 700	2 780
E/GPa	196	206	70
σ_s/MPa		410	325
μ		0.34	0.34

沙尘与金属板的接触边界条件采用LS-DYNA的自动接触算法,碰撞时的接触类型为Contact Automatic Surface to Surface接触类型;求解时间50 μs ;约束靶板壁面底面节点的所有自由度。

2 仿真结果分析

2.1 数值仿真验证

利用10 mm空气炮试验系统(图4)开展沙尘碰撞反弹试验,试验用沙尘采用PTI公司生产的符合美军标MIL-E-5007C的破碎石英砂,粒径分布为300~700 μm ;铝合金平板试验件尺寸为130 mm×30 mm×2 mm。采用在弹托的存砂孔中放入沙尘的方式,加速弹托将沙尘加速至预设速度,弹托示意图如图5所示,在显微镜下沙尘的微观形貌如图6所示。

采用高速摄像机拍摄记录沙尘在入射角30°,

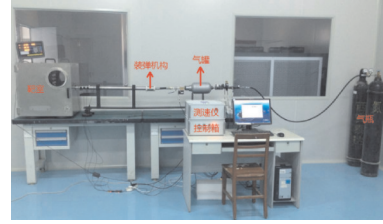


图4 碰撞反弹试验装置示意

Fig.4 Schematic diagram of impact rebound test device

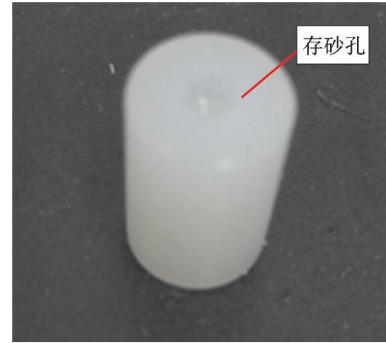


图5 携带沙尘加速的弹托

Fig.5 Sabot with sand and dust acceleration

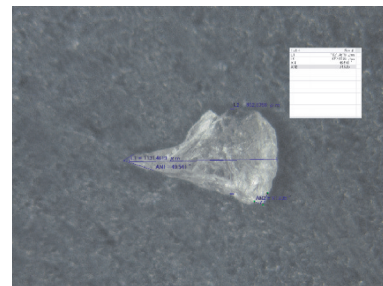


图6 试验沙尘微观形貌

Fig.6 Micro morphology of test sand and dust

入射速度70 m/s撞击铝合金平板的碰撞反弹过程,并与相同条件下的仿真结果进行比对,试验与仿真碰撞过程如图7所示,分别记录试验(图7(a—c))与仿真条件(图7(e—f))下沙尘的反弹速度和反弹角度等参数,发现仿真结果与试验结果吻合度较好,

不过由于试验成本高,且对设备精度等要求极高,下文将采用数值仿真的方式来模拟沙尘在典型金属壁面上的反弹特性。

2.2 旋转速度对反弹特性影响

沙尘与铝合金壁面以入射速度70 m/s、入射角90°、旋转速度200~800 r/s范围的碰撞反弹计算结果分别如图8—9所示。

由图8,9可知,不同转速下的沙尘反弹速度与反弹角度变化较小。当转速由800降到200 r/s时,其反弹速度变化不足1%,反弹角度变化小于1.5%。此外, $A=90^\circ$ 沙尘以倾斜角 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=-30^\circ$ 与壁面碰撞时,其反弹速度相对尖角 $A=50^\circ$,

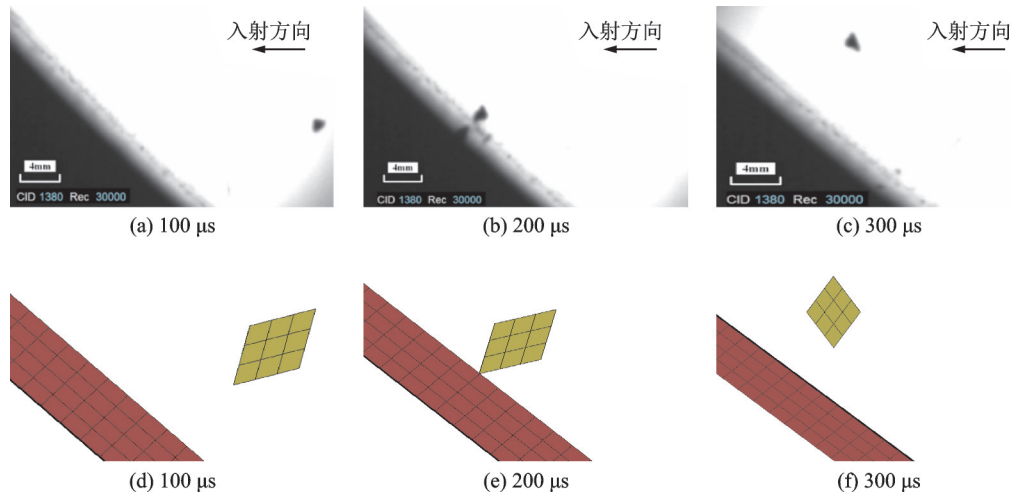


图 7 试验与仿真碰撞过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of test and simulation collision process

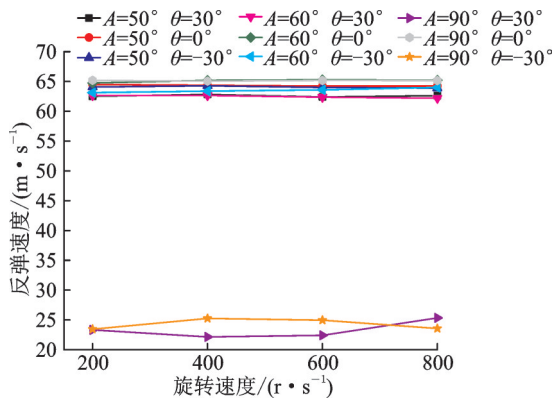


图 8 不同转速时的砂尘反弹速度

Fig.8 Rebound speed of sand and dust at different rotating speeds

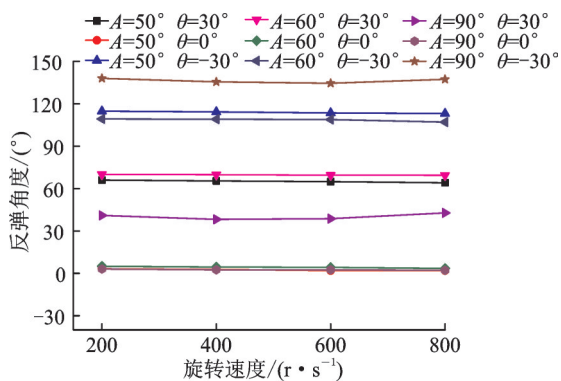


图 9 不同转速时的砂尘反弹角度

Fig.9 Rebound angle of sand and dust at different rotating speeds

$A=60^\circ$ 砂尘的偏小。分析认为,在 $A=90^\circ$ 砂尘以倾斜角 $\theta=30^\circ$ 和 $\theta=-30^\circ$ 入射条件下,砂尘与壁面发生了二次碰撞,其动能向壁面发生了两次能量传递,故动能损失相对较大。因此,后面分析 $\alpha=90^\circ$ 条件时不考虑此情况。

砂尘旋转速度对反弹状态影响较小的原因分析如下:砂尘边长仅为0.5 mm,砂尘旋转速度换算

成的相对线速度与砂尘入射速度相差数十倍,而砂尘质量为 10^{-7} kg的微小量级,速度是决定其动能的决定因素。相对而言,砂尘的入射速度对砂尘动能产生的贡献占主导地位。因此,砂尘旋转速度的变化对其反弹速度的影响基本可以忽略。

2.3 入射速度和角度对反弹特性影响

2.3.1 入射速度和角度对反弹速度影响

为便于观察比较入射速度与反弹速度之间的关系,采用速度恢复系数进行归一化处理^[13]。速度恢复系数反映的是砂尘与靶板碰撞前后速度的比值,这个值越大,说明砂尘在碰撞过程中速度恢复得越多,损失的能量比例就越少,其表达式为

$$e_v = V_o / V_i \quad (2)$$

砂尘与铝合金壁面在入射速度分别70,50和30 m/s,入射角分别为 $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ 和 30° ,旋转速度800 r/s的条件下,反弹速度恢复系数结果分别如图10—13所示。在不同入射角下,砂尘反弹速度均随入射速度的降低而降低;在30~70 m/s不同入射速度下,速度恢复系数变化较小,其中 $\alpha=90^\circ, A=50^\circ, \theta=30^\circ$ 条件下的变化最小,为0.68%; $\alpha=90^\circ, A=50^\circ, \theta=-30^\circ$ 下的变化最大,为4.74%。同一种砂尘在相同入射角下,入射速度对反弹的速度恢复系数影响较小,而且在相同倾斜角和入射速度下,砂尘尖角的不同对反弹速度同样影响很小。

在对比不同入射角度对反弹速度影响时,观察到对于相同形状相同倾斜角的砂尘,随着入射角降低,其反弹速度有略微升高的趋势。例如,在 $A=50^\circ, \theta=0^\circ, V=70$ m/s条件下, $\alpha=90^\circ$ 时速度恢复系数 $e_v=0.885$,随着入射角度减小至 $\alpha=30^\circ, e_v$ 逐步增大至0.932,增加了5.04%。原因在于,随着砂尘入射角降低,壁面表面的塑性变形量会随之减

小,砂尘动能转化为金属壁面内能的量亦随之减小,所以该情况下的砂尘反弹速度会略微升高。但在倾斜角 $\theta=30^\circ$ 时,随着入射角降低,其反弹速度反而降低。例如,在 $\alpha=90^\circ, V=50\text{ m/s}, A=60^\circ, \theta=30^\circ$ 时,速度恢复系数 $e_v=0.915$; $\alpha=60^\circ$ 时 $e_v=0.908$; $\alpha=45^\circ$ 时 $e_v=0.890$; $\alpha=30^\circ$ 时 $e_v=0.847$,这是在倾斜角 30° 时的各入射条件下,随入射角度减小,砂尘是以切削的姿态入射,其尖角相对较深地刺入到壁面,其依靠撞击坑周围的材料堆积物对砂尘施加的反向作用力将其弹回,使得反弹速度降低,即速度恢复系数减小。

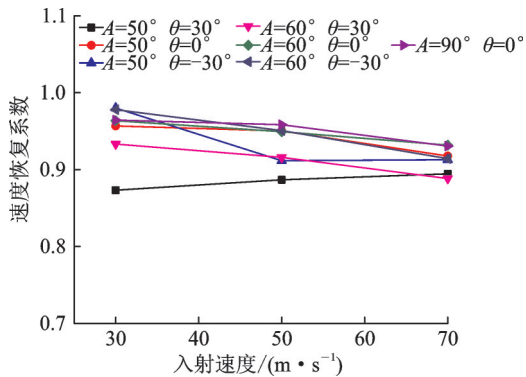


图10 $\alpha=90^\circ$ 时不同入射速度的速度恢复系数

Fig.10 Velocity recovery coefficient of different incident velocities at $\alpha=90^\circ$

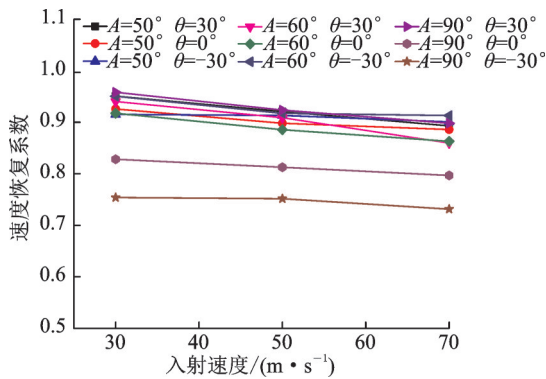


图11 $\alpha=60^\circ$ 时不同入射速度的速度恢复系数

Fig.11 Velocity recovery coefficient of different incident velocities at $\alpha=60^\circ$

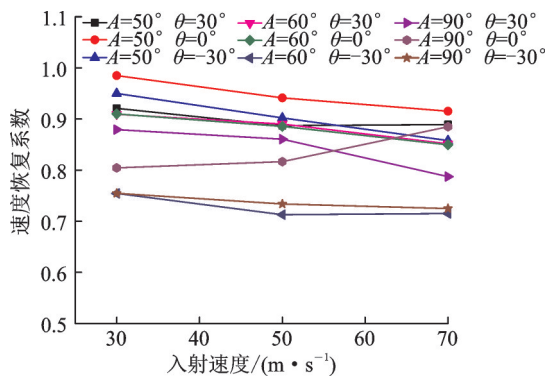


图12 $\alpha=45^\circ$ 时不同入射速度的速度恢复系数

Fig.12 Velocity recovery coefficient of different incident velocities at $\alpha=45^\circ$

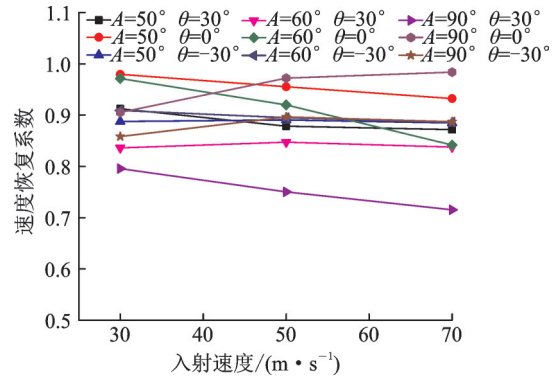


图13 $\alpha=30^\circ$ 时不同入射速度的速度恢复系数

Fig.13 Velocity recovery coefficient of different incident velocities at $\alpha=30^\circ$

2.3.2 入射速度和角度对反弹角度影响

砂尘以入射速度分别为70,50和30 m/s,入射角分别为 $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ 和 30° ,旋转速度800 r/s的条件,与铝合金壁面的碰撞反弹角度计算结果分别如图14—17所示。

可以看出,入射速度的改变对反弹角度基本没有影响;在相同倾斜角下,砂尘尖角的不同对反弹角度同样影响很小。而砂尘的倾斜角直接决定其反弹方向和反弹角度。对于各形状砂尘,在倾斜角 $\theta=30^\circ$ 时,砂尘反弹角均为正值,砂尘反弹方向为

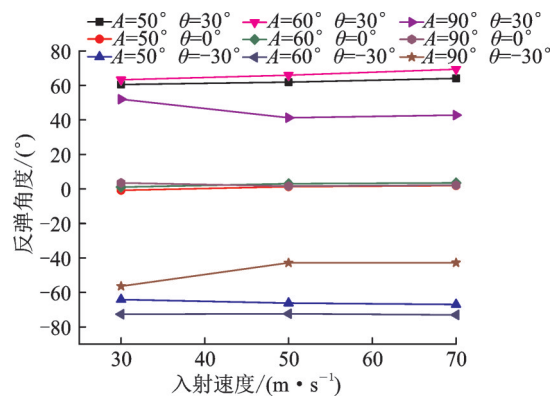


图14 $\alpha=90^\circ$ 时不同入射速度下的反弹角度

Fig.14 Rebound angle of different incident speeds at $\alpha=90^\circ$

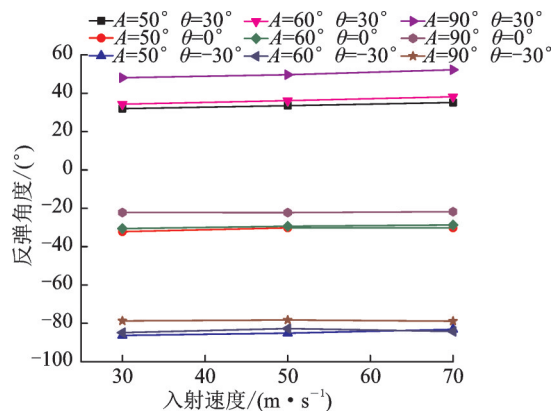


图15 $\alpha=60^\circ$ 时不同入射速度下的反弹角度

Fig.15 Rebound angle of different incident speeds at $\alpha=60^\circ$

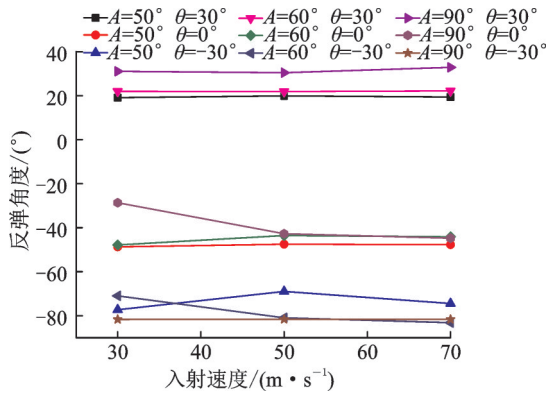


图 16 $\alpha=45^\circ$ 时不同入射速度下的反弹角度

Fig.16 Rebound angle of different incident speeds at $\alpha=45^\circ$

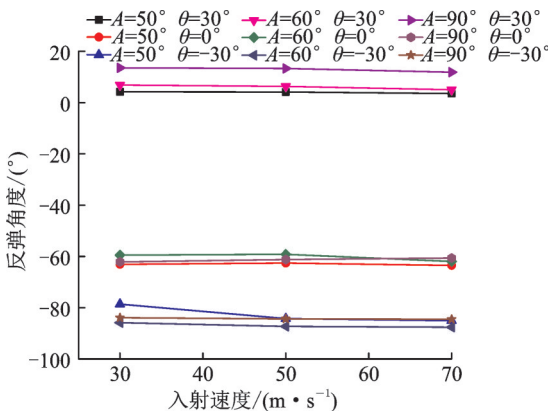


图 17 $\alpha=30^\circ$ 时不同入射速度下的反弹角度

Fig.17 Rebound angle of different incident speeds at $\alpha=30^\circ$

负。但随入射角度的降低,反弹角度也随之降低;在倾斜角为 0° 或者 -30° 时的各入射条件下,砂尘的反弹角均为负,反弹角随入射角的降低而降低,砂尘反弹方向为正。这也进一步验证了砂尘与壁面碰撞时的倾斜姿态,决定了砂尘的反弹角和反弹方向。

2.4 壁面材料对反弹特性影响

由于各形状砂尘的入射参数变化繁多,通过采取对比铝合金、不锈钢在不同入射参数条件下的砂尘反弹速度的方式,分析不同壁面材料对反弹速度影响规律。在 $\alpha=60^\circ, A=50^\circ, \theta=0^\circ$ 条件下,砂尘在不同壁面材料、不同入射速度的反弹速度恢复系数如图 18 所示。在 $\alpha=90^\circ, \theta=0^\circ$ 条件下,砂尘在不同壁面材料、不同砂尘形状、不同入射速度的反弹角度对比变化趋势如图 19 所示。

由图 18 可知,砂尘碰撞铝合金壁面时速度恢复系数小于其与不锈钢壁面碰撞的速度恢复系数。根据表 1 可知,铝合金的屈服强度小于不锈钢,相对不锈钢更容易发生塑性变形,更易吸收砂尘动能,导致反弹速度小。因此,砂尘与铝合金材料碰撞反弹速度恢复系数大于不锈钢材料。

通过对比不同形状砂尘以相同入射参数与不

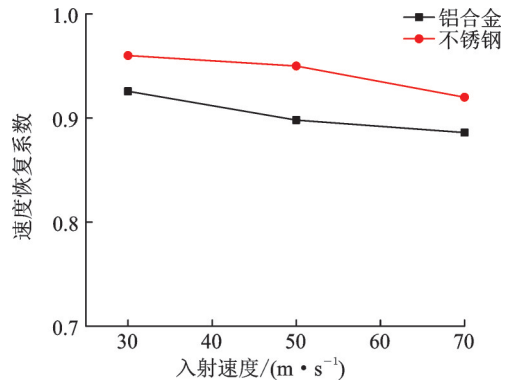


图 18 不同材料的反弹速度恢复系数

Fig.18 Recovery coefficient of rebound velocity of different materials

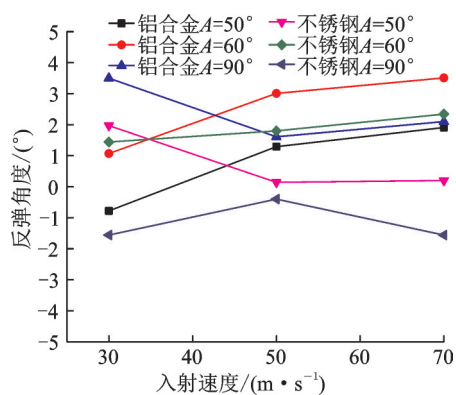


图 19 不同材料的反弹角度对比

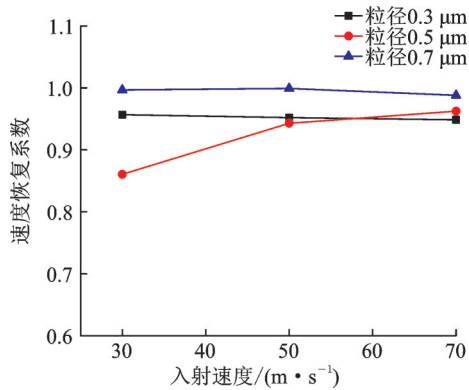
Fig.19 Comparison of rebound angles of different materials

同材料壁面的碰撞反弹角度结果,发现材料的不同对砂尘反弹角度影响相对较小。如图 19 所示,在 $\alpha=90^\circ, \theta=0^\circ$ 的不同形状砂尘在入射速度分别为 70, 50 和 30 m/s 时,两种材料的碰撞反弹角度在 $4^\circ \sim -2^\circ$ 以内,范围变化很小。相对于砂尘碰撞时的倾斜角对砂尘反弹角度影响程度而言壁面材料的不同对其反弹角度影响相对较小,因此,壁面材料并不是影响砂尘反弹角度的关键因素。

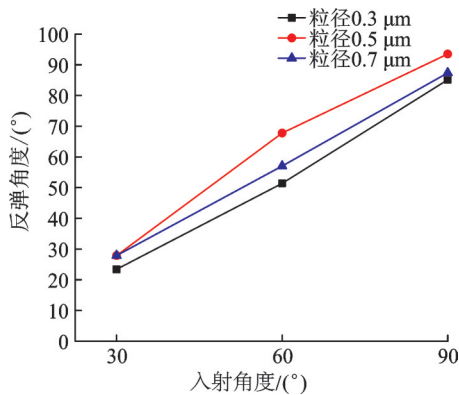
2.5 砂尘粒径对反弹特性影响

砂尘与铝合金壁面入射角度 $\alpha=30^\circ$ 时不同粒径下的砂尘反弹速度恢复系数结果,如图 20 所示。

通过对比不同粒径的砂尘在不同入射速度下的速度恢复系数变化,发现随砂尘粒径的增大,砂尘速度恢复系数基本保持不变,在 $\alpha=60^\circ, 90^\circ$ 时也符合该规律。主要因为,砂尘粒径变化仅仅导致砂尘质量改变,而相对入射速度而言,砂尘质量对入射动能的影响是微乎其微的,导致其反弹速度无明显变化。因此在砂尘碰撞反弹过程中,粒径的变化仅仅使砂尘初始动能变化微弱,其反弹速度恢复系数基本不受影响。

图20 $\alpha=30^\circ$ 时不同粒径砂尘速度恢复系数Fig.20 Recovery coefficient of sand and dust velocity of different particle sizes at $\alpha=30^\circ$

$V=30\text{ m/s}$ 时不同粒径下的砂尘反弹角度结果,如图21所示。

图21 $V=30\text{ m/s}$ 时不同粒径砂尘的反弹角度Fig.21 Rebound angle of sand and dust of different particle sizes at $V=30\text{ m/s}$

通过对比不同粒径的砂尘在不同入射角度下的反弹角度变化,发现随砂尘粒径的增大,砂尘反弹角度基本保持不变。主要因为,在前文中已得出砂尘反弹角度与入射角度及碰撞姿态有关的结论,粒径对其无明显影响。随砂尘粒径自 $0.3\ \mu\text{m}$ 增大到 $0.7\ \mu\text{m}$ 的过程中,无论入射速度如何变化,砂尘反弹角度变化不明显。发动机运转时吸入砂尘粒径大小不一,在砂尘碰撞反弹研究过程中,认为砂尘粒径对砂尘反弹角度的影响基本可以忽略。

3 结 论

本文通过采用显示动力分析有限元法,重点分析了砂尘以不同入射角度、入射速度、粒径大小及其旋转速度撞击壁面时对反弹结果的影响,主要结论如下:

(1) 砂尘绕其质点的旋转速度对其碰撞反弹特性影响比较微弱,基本可以忽略。

(2) 在相同条件下,随砂尘入射速度增大,反

弹速度呈增大趋势,速度恢复系数波动范围为 $0.68\%\sim 4.74\%$,即砂尘的速度恢复系数基本保持稳定。

(3) 决定砂尘反弹角度仅取决于碰撞姿态和砂尘入射角度。

(4) 相同入射条件下,铝合金材料对砂尘速度恢复系数的影响小于不锈钢材料。

(5) 砂尘粒径的变化对反弹速度和角度的影响比较微弱,基本可以忽略。

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(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(7): 2133-2139.
- [2] 于明州,金晗辉,陈丽华.粉尘粒子运动扩散特性的大涡模拟研究[J].环境科学学报,2005,25(7):891-895.
YU Mingzhou, JIN Hanhui, CHEN Lihua. Large eddy simulation of the dispersion of dust particles in air [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(7): 891-895.
- [3] AKBARZADEH E, ELSAADAWY E, SHERIK A M. The solid particle erosion of 12 metals using magnetite erodent [J]. Wear, 2012(282/283): 40-51.
- [4] GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles [J]. Journal of Aircraft, 1975, 12(5): 471-478.
- [5] TSUJI Y, SEKI W, MORIKAWA Y. Computer simulation of pneumatic conveying: The case of the presence of pipe branches [J]. J Soc Powder Tech, 1983, 20: 270-278.
- [6] TSUJI Y, OSHIMA T, MORIKAWA Y. Numerical simulation of pneumatic conveying in a horizontal pipe [J]. Kona, 1985, 3: 38-51.
- [7] TSUJI Y, MORIKAWA Y, TANAKA T, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a two-dimensional horizontal channel [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1987, 13(5): 671-684.
- [8] SOMMERFELD M. Modelling of particle-wall collisions in confined gas-particle flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1992, 18(6): 905-926.
- [9] NGUYEN A V, FLETCHER C A J. Particle interaction with the wall surface in two-phase gas-solid particle flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(1): 139-154.

- [10] BREITMAN D S, DUECK E G, HABASHI W G. Analysis of a split-flow inertial particle separator by finite elements[J]. *Journal of Aircraft*, 1985, 22(2): 135-140.
- [11] 曾强. 气流通道中砂尘运动轨迹的数值模拟研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
ZENG Qiang. Numerical simulation of sand and dust trajectories in air passage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013.
- [12] 赵梦熊. 粒子分离器粒子轨迹数值模拟方法的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
ZHAO Mengxiong. Numerical simulation of particle trajectories in particle separators[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014.
- [13] 凡金金. 砂尘碰撞平板模型的数值仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
FAN Jinjin. Numerical simulation of sand and dust impacting plate model[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015.
- [14] AZIMIAN M, SCHMITT P. Numerical investigation of single and multi impacts of angular particles on ductile surfaces[J]. *Wear*, 2015, 342/343: 252-261.
- [15] TAKAFFOLI M, PAPINI M. Material deformation and removal due to single particle impacts on ductile materials using smoothed particle hydrodynamics [J]. *Wear*, 2012(274/275): 50-59.
- [16] HADAVI V, PAPINI M. Numerical modeling of particle embedment during solid particle erosion of ductile materials[J]. *Wear*, 2015, 342/343: 310-321.

(编辑:夏道家)