

粒子撞击树脂涂层/铝/合金钢板的 反弹特性试验

牛佳佳, 王锁芳, 李洁琼, 谭慧俊

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 为了精准探索直升机进气粒子分离器性能,研究了砂粒撞击不同壁面材料的反弹特性。采用粒径为 $600\sim 800\mu\text{m}$ 的砂粒撞击树脂涂层/铝/合金钢板开展试验探究。设计的试验系统可实现单颗粒子撞击板面。撞击角度在 $10^\circ\sim 80^\circ$ 范围内变化,撞击前后的速度矢量由高速摄影仪拍摄获得。结果表明:撞击树脂涂层板时,法向恢复系数要高于撞击铝板及合金钢板的法向恢复系数。切向恢复系数主要受摩擦力的影响。同时由于阴影效应的影响,在接近切向/法向撞击时,切向/法向恢复系数分别出现大于1的现象。不同扫气比(SCR)下,应用砂粒撞击铝板的切向/法向恢复系数对粒子分离器进行数值模拟的分离效率与已有的分离器试验结果最接近。

关 键 词: 粒子-壁面碰撞; 反弹; 砂粒; 进气粒子分离器(IPS); 恢复系数

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Experiment of particle rebound characteristics for impingement on resin coated/Al/alloy steel plate

NIU Jiajia, WANG Suofang, LI Jieqiong, TAN Huijun

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: In order to accurately explore the helicopter performance of inlet particle separator, the rebound characteristics of sand impinging different material surfaces were studied. The experiment of particle diameters of $600\sim 800\mu\text{m}$ sands impacting resin coated/Al/alloy steel plate was conducted. A self-designed experimental system can realize the single particle impact plate. The velocity vectors before and after impact were measured with the high speed camera, within a range of impact angle from 10° to 80° . Results showed that the normal restitution coefficient with sand impinging resin coated plate was higher than that with sand impinging Al/alloy steel plate, while the tangential restitution coefficient was mainly affected by the friction. At the same time, due to the influence of the shadow effect, the normal restitution coefficient or tangential restitution coefficient was more than 1 respectively when the impact angle was close to tangential or normal impact direction. At different scavenging ratio (SCR), the separation efficiency of simulation using the restitution coefficient of sand impinging Al plate was closest to the result of recent experiment on inlet particle separator.

收稿日期: 2016-10-19

作者简介: 牛佳佳(1992—),女,硕士生,主要从事发动机进气防护方面的研究。

引用格式: 牛佳佳,王锁芳,李洁琼,等. 粒子撞击树脂涂层/铝/合金钢板的反弹特性试验[J]. 航空动力学报,2018,33(4):928-935.

NIU Jiajia, WANG Suofang, LI Jieqiong, et al. Experiment of particle rebound characteristics for impingement on resin coated/Al/alloy steel plate[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(4): 928-935.

Key words: particle-wall collision; rebound; sand; inlet particle separator (IPS); restitution coefficient

进气粒子分离器(inlet particle separator, IPS)可以为直升机发动机清除污浊空气中的砂尘,从而延长发动机的寿命。其中惯性粒子分离器以其分离效率高、质量轻、紧凑性好等特点得到了广泛应用^[1]。粒子分离器的效率取决于砂粒在分离器中的运动轨迹,而粒子撞击壁面的反弹特性对其轨迹起着至关重要的作用。探究粒子撞击不同材料壁面的反弹特性可为粒子分离器型面材料的选择提供一定的参考。

图 1 为某型惯性粒子分离器的数值模拟结果。图中的①、②、③、④分别为采用 Tabakoff 论文^[2]中撞击 3 种不同材料的经验公式以及切向/法向恢复系数为常数(0.5)时所得的单颗粒子的预测轨迹。可见恢复系数对正确预测粒子轨迹有重要意义。

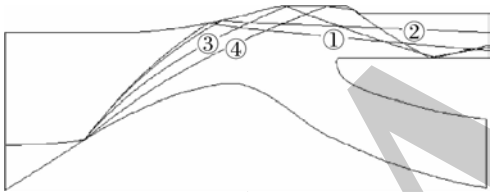


图 1 惯性粒子分离器中的粒子轨迹

Fig. 1 Particle traces in inertial particle separator

1976 年,Maw 等^[3]建立了斜撞击反弹模型,对球形颗粒撞击不同材料平板的反弹特性进行理论分析,了解粒子在碰撞前后的受力、速度变化及能量变化。之后,学者对于撞击过程中的力、时间等^[4-5],碰撞模型及碰撞过程模拟^[6-7]、粒子形状、壁面材料的影响^[8-10]等方面的研究不断深入。Sommerfeld 等^[11]对管道中的粒子撞击壁面进行研究,总结了恢复系数随撞击角度的变化,提出阴影效应,并采用离散单元法对粒子碰撞过程进行模拟。Gorham 等^[12]对 5 mm 的氧化铝球撞击不同材料壁面的反弹特性进行了研究,得到斜撞击下切向分量对撞击过程的影响,其试验具有高可再现性。国内学者徐义华等^[13]设计粒子侵蚀炭化层恢复系数的试验,测量了直径为 1.5 mm 的粒子对炭化层进行了不同角度下的法向及切向恢复系数。吴铁鹰等^[14]采用数值模拟方法,得到了大量不同初始条件下反弹参数,分析反弹速度、反弹角度等参数与入射条件的关系特性。关于粒子

对发动机叶片腐蚀方面已有大量的研究成果^[15-16]。但腐蚀试验为大量颗粒撞击壁面,缺乏对单颗粒撞击壁面的研究。学者对惯性粒子分离器的分流器等性能进行了大量的试验研究及数值模拟^[17-19]。

由于以往针对粒子反弹特性的研究多以球形颗粒为研究对象或采用大量粒子同时撞击板面,缺乏针对单颗的不规则砂粒撞击壁面的研究。本文分别针对砂粒撞击树脂涂层/铝/合金钢板 3 种工况进行了试验。由于粒径较小的颗粒随流性十分强,碰撞主要发生在粒径较大的颗粒撞击壁面间。在砂尘环境中,粒径一般小于 1 mm。为了保证拍摄效果同时避免粒径较小的粒子的黏附现象,试验选择砂粒粒径为 600~800 μm。最后将反弹特性应用到数值模拟中,验证了反弹系数的可靠性。

1 基于恢复系数的碰撞模型

Maw 等^[3]建立的斜撞击反弹模型中对颗粒的反弹特性进行了公式推导,并对碰撞过程中的速度矢量进行了分析。图 2 为粒子碰撞壁面反弹过程的示意图,壁面处的 3 个球形分别表示粒子从接触壁面-在壁面上停留-离开壁面的过程。

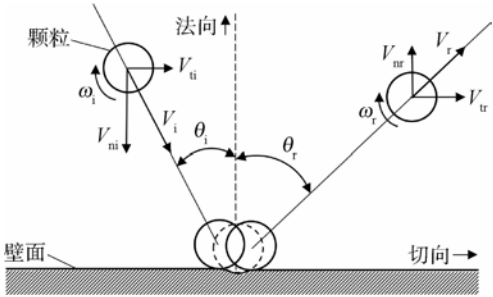


图 2 撞击速度分量、角速度及角度

Fig. 2 Impact velocity components, angular velocity and angles

其中,法向恢复系数 e_n 和切向恢复系数 e_t 的定义式^[20]为

$$e_n = \frac{V_{nr}}{V_{ni}} = \frac{V_r \cos \theta_r}{V_i \cos \theta_i} \tag{1}$$

$$e_t = \frac{V_{tr}}{V_{ti}} = \frac{V_r \sin \theta_r}{V_i \sin \theta_i} \tag{2}$$

其中 V_i 为粒子撞击速度, V_r 为粒子反弹速度矢

量,粒子撞击角为 θ_i (撞击速度矢量与壁面法向的夹角),粒子反弹角为 θ_r (反弹速度矢量与法线的夹角), V_{ti} 、 V_{ni} 分别为撞击速度 V_i 的切向及法向分量; V_{tr} 、 V_{nr} 分别为反弹速度 V_r 的切向及法向分量; ω_i 、 ω_r 分别为反弹前后颗粒的旋转角速度。

经典的刚体理论在分析反弹过程时存在一定的缺陷。Kruggel-Emden 等^[6]提出弹簧-阻尼模型处理粒子的撞击-反弹过程,考虑了碰撞过程中的变形等。这种模型将壁面在法向上的变形恢复过程采用弹簧-阻尼模型。而在切向上,采用有库伦限制的弹簧模型。即未发生动滑移时,认为壁面对颗粒的力为变形恢复力,一旦变形恢复力达到一定值便发生滑移,此时切向力转变为动摩擦力。同时忽略重力的影响。

2 试验系统

图 3 是整个粒子反弹试验系统的示意图,包括投砂装置、粒子反弹试验箱、砂粒回收装置、测量装置等部分。

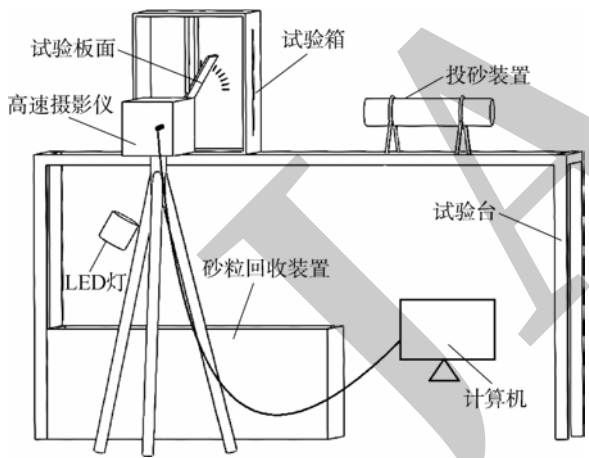


图 3 试验系统示意图

Fig. 3 Sketch of experimental facility

投砂装置主要由弹射轨道、弹头以及弹力绳组成,其中弹头与皮带连接固定于轨道中。投砂方法是通过拉紧弹力绳使得装有砂粒的弹头具有一定的能量,松开弹力绳后弹头在轨道中快速运动并于轨道尽头处被阻拦。而砂粒则由于惯性继续向前射入试验箱内,撞击试验板后发生反弹。试验箱入口处开有一狭缝,只有经过该狭缝的粒子才能进入试验箱,这保证了砂粒的撞击轨迹保持在狭缝与投砂设备共同确定的平面内。试验箱内包含碰撞平板、角度调节杆及安装架。通过调整调节杆与安装架,可以改变平板的角度以及平

板在试验箱内的位置。为了保证拍摄效果的清晰度,LED(light-emitting diode)光源的照射平面与撞击轨迹所在的平面重合。测试系统采用的高速摄影仪拍摄速度为 1 455 帧/s。高速摄影仪与计算机连接,通过计算机控制高速摄影仪将粒子与试验板的碰撞前后的运动过程以单帧图片的形式储存。通过 Matlab 自编程序及 Auto CAD 软件处理图片得到粒子反弹前后的速度矢量。

3 试验结果分析

试验中,粒子的撞击角 θ_i 为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 。试验物料采用粒径为 $600\sim 800\mu\text{m}$ 的砂粒,保持粒子的撞击速度在 20 m/s 左右。试验过程发现小范围内速度变动对恢复系数的影响很小,可忽略。

图 4 为高速摄影仪记录的单颗粒子的撞击-反弹过程,图中 t_i 表示不同时刻。测量相邻两条轨迹中点间的距离再除以相邻两帧图像间隔时间,便可得到粒子的撞击速度与反弹速度。恢复系数图表中的点均为 100 个以上的重复工况下的试验结果平均值。

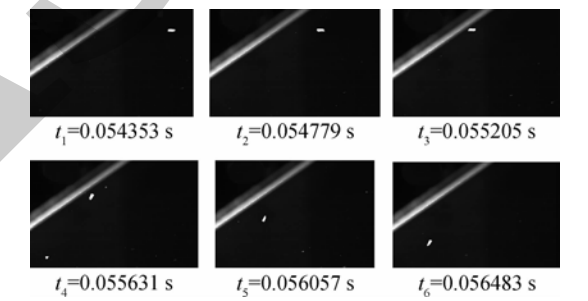


图 4 粒子的撞击-反弹过程

Fig. 4 Impact-rebound process of particle

3.1 法向恢复系数

图 5 为砂粒撞击铝板,合金钢板及树脂涂层板时的法向恢复系数随着撞击角度的变化关系。撞击 3 种材料的法向恢复系数均随着撞击角度的增大而增大。在接近垂直于壁面碰撞时,法向恢复系数很小,对于铝板,合金钢板及树脂涂层板,分别在 0.15、0.29、0.32 左右。而当撞击角越来越接近切向撞击时,法向恢复系数迅速上升,对于铝板及树脂涂层板,分别在约 75° 及 70° 角入射时,法向恢复系数超过 1。

这种恢复系数超过 1 的现象可由 Sommerfeld 等^[11]提出的阴影效应图 6(a)解释。阴影效应由壁面的表面粗糙度或非球形粒子引起。即粒

子碰撞粗糙壁面时,与迎风面③区(微观结构表面与壁面切线的夹角大于 0°)碰撞概率较大,与背风面②区(微观结构表面与壁面切线的夹角小于 0° ,且与法线的夹角大于撞击角)碰撞的概率较小,与背风面①区(微观结构表面与壁面法线的夹角小于撞击角)碰撞的概率为 0 的现象。如图 6 (b)为颗粒撞击实际壁面时的微观结构图。实际撞击角 θ_{ic} (粒子与所接触的撞击板的表面上的微小表面法向的夹角)小于观测到的撞击角 θ_i (撞击方向与壁面法向夹角)的现象。 n, t 表示壁面的法向和切向; n_c, t_c 表示实际接触到的微观表面的法向和切向。

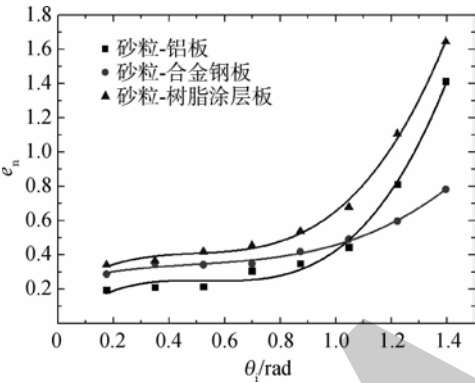


图 5 法向恢复系数随撞击角的变化

Fig. 5 Variation of the normal restitution coefficient with impact angle

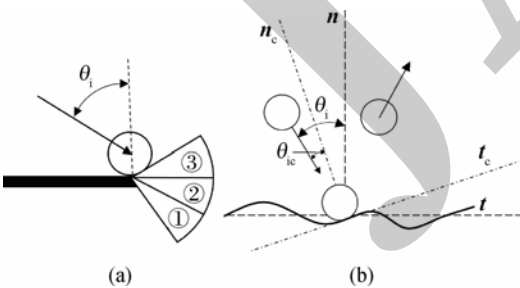


图 6 阴影效应

Fig. 6 Illustration of shadow effect

在接近切向撞击时,阴影效应使得实际的撞击角小于观测到的撞击角度的概率大大增加,同时使得观测到的反弹角度小于实际的反弹角。在撞击速度和反弹速度不变的情况下,观测的撞击法向速度小于实际的撞击法向速度,而观测的反弹法向速度大于实际的反弹法向速度,从而导致法向恢复系数的增加。

在法向上采用弹簧-阻尼模型分析。由于树脂材料板面弹性较好,阻尼小,恢复能力强,在粒

子与弹性板撞击的过程中,其法向恢复系数始终高于变形恢复能力很差(阻尼非常大)的铝板及合金钢板的恢复系数。在小撞击角度下,合金钢板的法向恢复系数略高于铝板的。这是由于撞击速度一定,撞击角度越小,法向速度分量越大,对板面的冲击力也越大。由于铝板比合金钢板弹性模量更小,更加容易变形,因此相同角度下,其变形更大。由于两者阻尼都十分大,因此铝板的恢复系数也相应更加小。但当撞击角度逐渐接近切向时,撞击铝板的法向恢复系数增长率变快。当撞击角大于 60° 时,法向恢复系数超过撞击合金钢板的法向恢复系数。

由试验数据归纳撞击 3 种材料的法向恢复系数随着角度的变化为

$$e_{n,r} = 0.178 + 1.241\theta_i - 2.352\theta_i^2 + 1.589\theta_i^3 \quad (3)$$

$$e_{n,s} = 0.238 + 0.444\theta_i - 0.694\theta_i^2 + 0.470\theta_i^3 \quad (4)$$

$$e_{n,Al} = -0.0096 + 1.502\theta_i - 2.865\theta_i^2 + 1.799\theta_i^3 \quad (5)$$

其中撞击角度 θ_i 的单位为 rad;下标 r、s、Al 分别表示树脂涂层板、合金钢板、铝板,下同。

不规则粒子撞击壁面的反弹行为具有概率分布的特点^[11]。本文试验结果也呈现此特点。图 7 为撞击角为 20° 时,砂粒撞击树脂涂层板面的法向恢复系数分布规律。大致符合高斯分布。

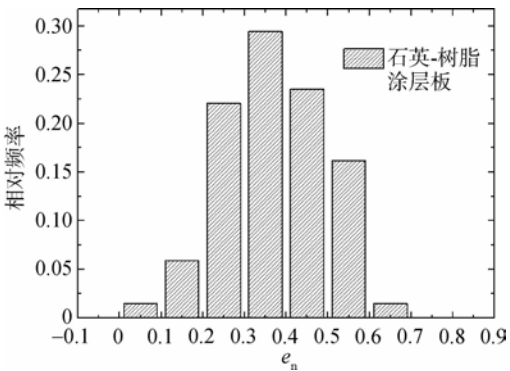


图 7 法向恢复系数的分布特性($\theta_i = 20^\circ$)

Fig. 7 Distribution characteristics of e_n ($\theta_i = 20^\circ$)

归纳撞击 3 种不同材料的法向恢复系数的分布特性,其标准差 σ_{e_n} 随撞击角度的变化如图 8 所示。

标准差随撞击角度的的变化规律如下:

$$\sigma_{e_{n,r}} = 0.055 + 0.676\theta_i - 1.406\theta_i^2 + 0.879\theta_i^3 \quad (6)$$

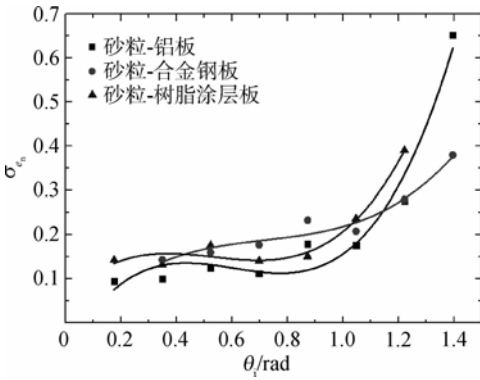


图 8 法向恢复系数标准差随撞击角的变化

Fig. 8 Variation of σ_{e_n} with θ_i

$$\sigma_{e_{n,s}} = -0.032 + 0.773\theta_i - 0.971\theta_i^2 + 0.450\theta_i^3 \quad (7)$$

$$\sigma_{e_{n,Al}} = -0.072 + 1.180\theta_i - 2.119\theta_i^2 + 1.168\theta_i^3 \quad (8)$$

3.2 切向恢复系数

从图 9 中可以看出,砂粒撞击壁面的切向恢复系数随着撞击角度增大先减小后增大。撞击树脂涂层板面时,切向恢复系数大致在 45° 时达到最小值(0.45)。撞击合金钢板的切向恢复系数大致在 40° 达到最小值(0.625)。而铝材料大致在 50° 时达到最小值(0.52)。在小角度撞击时,切向恢复系数出现超过 1 的情况。

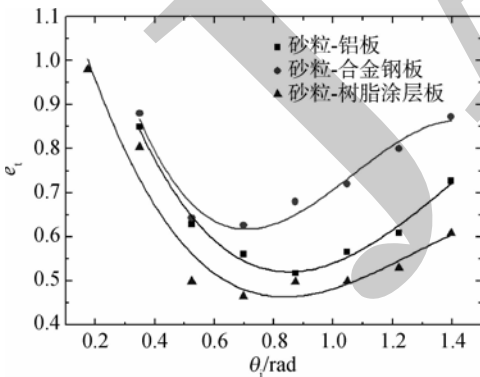


图 9 切向恢复系数随撞击角的变化

Fig. 9 Variation of the tangential restitution coefficient with impact angle

文献[3]根据无量纲切向速度的大小将颗粒接触壁面过程分为 3 种情况。①当无量纲切向速度小于 1 时,即碰撞角度较小时,碰撞过程由黏滞发展为微动滑移最后发展为完全滑移,此时的切向变形恢复力最小,切向动能损失也很少,因此恢复系数较大。②当撞击角度增大时,无量纲切向速度大于 1 且小于一临界值时,碰撞过程由完全

滑移或微动滑移开始,在摩擦力的作用下,接触点的切向速度变为零,即转化为黏滞状态,此后过程与①阶段相同。该阶段切向动能损失增大,导致切向恢复系数减小。③当撞击角度继续增大时,无量纲切向速度超过某一临界值,该阶段仅发生完全滑移,颗粒仅受到动摩擦力,该阶段可能由于接触时间短,法向冲击力变小导致切向摩擦力变小等原因使得切向动能损失变小,该阶段的切向恢复系数不断增大。对于在小角度下撞击壁面时切向恢复系数超过 1 的现象,同样可由阴影效应解释。

撞击树脂涂层板时,其切向恢复系数始终小于撞击铝板及合金钢板的切向恢复系数。在撞击树脂涂层板时,若不发生滑移,由于树脂材料的变形恢复力大,粒子所受到的阻力也大;发生滑移时,树脂材料弹性好的表面的摩擦因数通常高于金属材料的摩擦因数,两种情况都变形导致其切向恢复系数要小于非弹性材料的,使得粒子的切向恢复系数较小。相同撞击角度下,法向撞击速度相同。由于铝板比合金钢板弹性模量更小,铝板的变形更大,使得粒子受到的阻力更大,使得切向恢复系数较小。在撞击角度较小时,由于法向撞击速度很大,铝板与合金钢板都发生较大的变形,切向反弹系数的差距变得不明显。

拟合试验数据可得 3 种材料的切向恢复系数与撞击角度的关系式为

$$e_{t,r} = 1.403 - 2.691\theta_i + 2.408\theta_i^2 - 0.637\theta_i^3 \quad (9)$$

$$e_{t,s} = 1.818 - 4.069\theta_i + 4.332\theta_i^2 - 1.367\theta_i^3 \quad (10)$$

$$e_{t,Al} = 1.171 - 1.523\theta_i + 0.972\theta_i^2 - 0.079\theta_i^3 \quad (11)$$

图 10 为切向恢复系数标准差 σ_{e_t} 随撞击角度的变化图。

归纳得到标准差随撞击角度的变化规律如下:

$$\sigma_{e_{t,r}} = 2.143 - 6.561\theta_i + 7.225\theta_i^2 - 2.612\theta_i^3 \quad (12)$$

$$\sigma_{e_{t,s}} = 0.218 + 0.510\theta_i - 0.958\theta_i^2 + 0.364\theta_i^3 \quad (13)$$

$$\sigma_{e_{t,Al}} = 1.1046 - 2.4\theta_i + 2.067\theta_i^2 - 0.603\theta_i^3 \quad (14)$$

3.3 旋转角速度

Gorham 等^[12]对粒子碰撞不同材料壁面后的旋转角速度进行了研究。由于投射砂粒时未施加

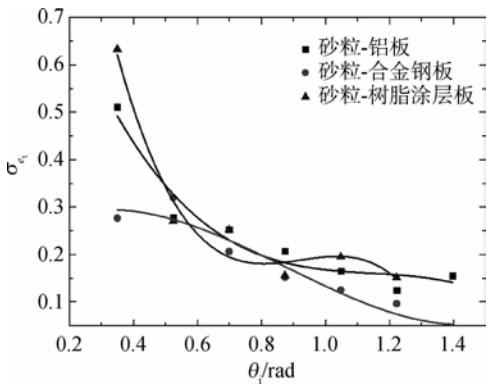


图 10 切向恢复系数标准差随撞击角的变化
Fig. 10 Variation of σ_{e_t} with θ_i

初始角速度,考虑在入射过程中,气流剪切速度不大,可取初始角速度 ω_i 为零。则 ω_r 有切向力 F_t 做功引起。

根据动量定理推导可得

$$\omega_r = \frac{F_t R}{m_0 k_g^2} = \frac{5}{2R} (V_{ti} - V_{tr}) = \frac{5V_{ti}}{2R} (1 - e_t) \quad (15)$$

其中 ω_r 为碰撞反弹后角速度,粒子反弹角为 θ_r ; m_0 为单颗砂粒的质量, k_g 为回转半径, R 为砂粒半径。由于砂粒均为不规则形状, R 取砂粒的中间半径为 $350 \mu\text{m}$ 。

由式(15)可以看出,粒子撞击时的旋转角速度随着粒子的撞击角度以及切向恢复系数的变化而变化。图 11 为粒子在弹性碰撞下的旋转角速度与撞击角度的变化关系。

从图 11 中曲线可以看出,随着撞击角度的增大,撞击 3 种材料的旋转角速度均由十分小的值逐渐增大,到 60° 达到极大值,而后逐渐下降。但在接近 90° 时并未减小为零。这与 Gorham 等^[12] 在撞击角为 90° 时,旋转角速度为零的研究结果有所

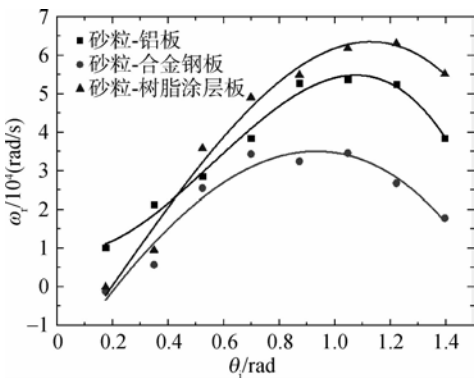


图 11 旋转角速度随撞击角的变化
Fig. 11 Variation of rotation angular velocity with impact angle

不同,这可能是由粒子的不规则形状引起的。

粒子碰撞后的旋转动能是由摩擦力对颗粒的力矩做功而来。不同于摩擦力对切向动能做负功,摩擦力力矩对旋转动能做正功。因此,旋转角速度的变化趋势与切向恢复系数相反。

4 结果验证

本小节应用不同恢复系数对文献[21]中 $281 \sim 315 \mu\text{m}$ 颗粒撞击型面一的工况进行数值模拟并与试验结果进行对比验证。

为了符合粒子撞击壁面的反弹行为具有概率分布的特点,数值模拟中采用 UDF (user-defined function) 实现粒子的概率性反弹。反弹恢复系数的期望值和标准差符合式(3)~式(14)的规律。

已有研究证明粒子的旋转角速度对碰撞过程也有一定的影响^[22],但目前粒子分离器的数值模拟计算的 DPM (discrete phase model) 中尚未考虑该作用。

重要参数定义
分离效率

$$\eta = \frac{m_s}{m_{in}} \quad (16)$$

扫气比(SCR,量符号记为 R_{sc})

$$R_{sc} = \frac{W_s}{W_m} \quad (17)$$

其中 m 为砂粒质量, W 为流量,下标 in、s、m 分别表示进口、清除流、主流。

图 12 为对计算域的网格划分,采用结构化网格及边界层加密,网格总数为 19 300。延长两个出口的计算域,使其满足充分发展条件。在软件 Fluent 中设置两个出口为 outflow 边界,进口采用流量进口,保持进口流量不变。

选取 RNG (re-normalization group) $k-\epsilon$ 计算模型。粒子粒径为 $300 \mu\text{m}$,进口粒子质量浓度为 0.4 g/m^3 。由于颗粒相体积分数远小于 10% ,属于稀相流动,可忽略颗粒相对流场的影响,颗粒轨迹计算选择 DPM。计算收敛条件为各项残差小

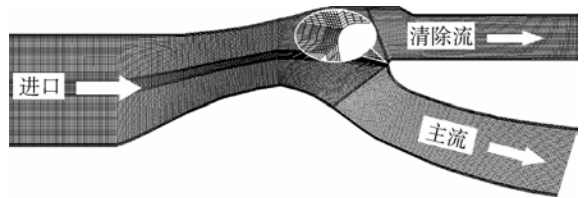


图 12 计算域网格划分

Fig. 12 Mesh illustration of the computational domain

于 10^{-5} , 各项物理量趋于稳定^[23]。

改变扫气比, 应用 Tabakoff 中的经验公式及本文的不同材料的反弹系数公式对文献[21]中的分离器进行数值模拟, 与文献[21]中的试验结果进行对比。图 13 为不同扫气比下数值模拟结果及试验结果的对比。砂粒撞击铝板的数值模拟结果与试验结果最为接近, 这是文献[21]中试验件材料为铝。但当扫气比增大时, 应用铝板反弹系数进行模拟所得的分离效率稍低于试验结果。砂粒撞击合金钢板的数值模拟分离效率随着扫气比增大有小幅增加。Tabakoff 经验公式及砂粒撞击树脂板的模拟分离效率随扫气比的增加先上升后下降。扫气比大于 0.282 后, 分离效率随扫气比增大而增大。同时, 粒子粒径对于反弹特性也有一定的影响。反弹试验中使用的颗粒粒径与数值模拟中的粒径不同也可能带来一定的误差。

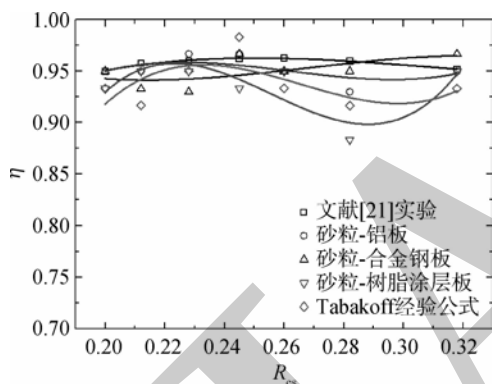


图 13 分离效率随扫气比的变化

Fig. 13 Variation of η with SCR

5 结 论

本文通过 $600 \sim 800 \mu\text{m}$ 砂粒撞击不同材料的板面试验得到了 3 种不同材料下的切向/法向恢复系数, 为粒子分离器的数值模拟提供更为准确的边界条件, 为粒子分离器型面材料的选择提供一定的参考。但对于小粒径颗粒可能会引入一定的误差。主要结论如下:

1) 法向恢复系数都随着撞击角度的增大而增大。撞击树脂材料的法向恢复系数要大于撞击合金钢板及铝板的法向恢复系数。撞击合金钢板的法向恢复系数在小角度撞击时要高于撞击铝板的。而随着角度的增大, 撞击铝板的法向恢复系数超过撞击合金钢板;

2) 切向恢复系数随着撞击角度的增大而先减小后增大。撞击树脂涂层板的切向恢复系数要

小于撞击合金钢板及铝板的切向恢复系数。撞击角大于 20° 后, 撞击合金钢板的切向恢复系数大于撞击铝板的;

3) 旋转角速度随着撞击角度先增大后减小。撞击角度大于 25° 后, 撞击树脂涂层板后的旋转角速度最大, 撞击合金钢板后的旋转角速度最小;

4) 应用本文砂粒撞击铝板的反弹系数进行数值模拟所得分离效率与试验结果最为接近。不同壁面材料的粒子分离器的分离效率有所不同。

参考文献:

- [1] 李立国, 王锁芳. 直升机发动机的进气防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] TABAKOFF W. Measurements of particles rebound characteristics on materials used in gas turbines[J]. Journal of Propulsion and Power, 1995, 7(5): 805-813.
- [3] MAW N, BARBER J R, FAWCETT J N. The oblique impact of elastic spheres[J]. Wear, 1976, 38(1): 101-114.
- [4] KRUGGEL-EMDEN H, STURM M, WIRTZ S, et al. Selection of an appropriate time integration scheme for the discrete element method (DEM) [J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32(10): 2263-2279.
- [5] GHAEDNIA H, POPE S A, JACKSON R L, et al. A comprehensive study of the elasto-plastic contact of a sphere and a flat[J]. Tribology International, 2016, 93: 78-90.
- [6] KRUGGEL-EMDEN H, WIRTZ S, SCHERER V. An analytical solution of different configurations of the linear viscoelastic normal and frictional-elastic tangential contact model[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(23): 6914-6926.
- [7] THORNTON C, CUMMINS S J, CLEARY P W. An investigation of the comparative behaviour of alternative contact force models during inelastic collisions[J]. Powder Technology, 2013, 233(3): 30-46.
- [8] KRUGGEL-EMDEN H, RICKELT S, WIRTZ S, et al. A study on the validity of the multi-sphere discrete element method[J]. Powder Technology, 2008, 188(2): 153-165.
- [9] GHEADNIA H, CERMIK O, MARGHITU D B. Experimental and theoretical analysis of the elasto-plastic oblique impact of a rod with a flat[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 86: 307-317.
- [10] GUI N, YANG X, TU J, et al. A generalized particle-to-wall collision model for non-spherical rigid particles[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 27(1): 154-163.
- [11] SOMMERFELD M, HUBER N. Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(6): 1457-1489.
- [12] GORHAM D A, KHARAZ A H. The measurement of particle rebound characteristics[J]. Powder Technology, 2000, 112(3): 193-202.
- [13] 徐义华, 胡春波, 李江. 炭化层对粒子反弹系数测量试验研

究[J]. 弹箭与制导学报,2011,31(1):119-122.

XU Yihua, HU Chunbo, LI Jiang. The experimental research on measurement of rebound coefficient for particle impacting charring-layer[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance,2011,31(1):119-122. (in Chinese)

[14] 吴铁鹰,赵梦熊. 颗粒-壁面碰撞建模与数据处理[J]. 振动工程学报,2014,27(4):589-597.

WU Tieying, ZHAO Mengxiong. Data processing and modeling of particle-wall collision[J]. Journal of Vibration Engineering,2014,27(4):589-597. (in Chinese)

[15] WAKEMAN T, TABAKOFF W. Measured particle rebound characteristics useful for erosion prediction[R]. ASME Paper 82-GT-170,1982.

[16] 蔡锴,王建梅,张新生,等. 引风机叶片磨蚀原因分析和防止措施[J]. 电站系统工程,2001,17(4):207-210.

CAI Kai, WANG Jianmei, ZHANG Xinsheng, et al. Erosion analysis of induced draft fan blade and countermeasures[J]. Power System Engineering, 2001, 17(4): 207-210. (in Chinese)

[17] 侯凌云,严传俊. 二维粒子分离器的流场及分离效率的数值模拟[J]. 航空动力学报,1997,12(4):374-376.

HOU Lingyun, YAN Chuanjun. Numerical simulation of two-dimensional flow field in particle separator[J]. Journal of Aerospace Power,1997,12(4):374-376. (in Chinese)

[18] 况开鑫,王锁芳. 分流器对进气粒子分离器性能的影响[J]. 航空动力学报,2012,27(7):1542-1548.

KUANG Kaixin, WANG Suofang. Effect of splitter on performance of inlet particle separator[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(7):1542-1548. (in Chinese)

[19] 曾平君,孙姝,黄河峡,等. 直升机/粒子分离器一体化流场特性:第一部分 前进比的影响[J]. 航空动力学报,2014,29(4):858-866.

ZENG Pingjun, SUN Shu, HUANG Hexia, et al. Integrated flow field characteristics of helicopter/particle separator, Part 1 influence of advance ratio[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(4):858-866. (in Chinese)

[20] GOLDSMITH W, FRASIER J T. Impact: the theory and physical behavior of colliding solids[J]. Journal of Applied Mechanics,1961,28(4):639.

[21] 李洁琼,王锁芳,董伟林,等. 整体式粒子分离器性能的试验研究[J]. 推进技术,2016,37(9):1617-1623.

LI Jieqiong, WANG Suofang, DONG Weilin, et al. Experimental study on performance of inertial particle separator[J]. Journal of Propulsion Technology,2016,37(9):1617-1623. (in Chinese)

[22] DONG H, MOYS M H. Experimental study of oblique impacts with initial spin[J]. Powder Technology, 2006, 161(1):22-31.

[23] MUSGROVE G O, BARRINGER M D, THOLE K A, et al. Computational design of a louver particle separator for gas turbine engines[R]. ASME Paper GT2009-60199, 2009.

(编辑:王碧琚)