

收缩扩张喷管中稀疏颗粒加速运动及喉道优化

李 平¹, 肖良华¹, 何卫锋^{1,✉}, 徐伟胜¹, 侯晓松²

(1. 空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 西安, 710038; 2. 北京航空工程技术研究中心, 北京, 100076)

摘要 直升机、运输机在简易场地起降过程中, 发动机可吸入的二氧化硅等微小颗粒, 对叶片造成冲击磨损, 冲击速度可达 200 m/s 以上。冲蚀试验常采用直喷管加速固体颗粒, 在入口总压为 0.6 MPa 时, 颗粒速度难以达到 200 m/s。为更有效地加速颗粒, 采用超音速收缩-扩张喷管, 通过数值模拟研究了该喷管对稀疏二氧化硅颗粒的加速运动, 并利用实验验证了数值模拟的准确性。在此基础上, 对喉道尺寸进行优化以提高喷管对颗粒的加速性能。结果表明: 收缩-扩张喷管对颗粒的加速主要发生在扩张段, 管内激波不会引起颗粒速度的震荡, 颗粒的加速度与气流、颗粒之间的相对速度以及气流的密度有关; 在入口总压为 0.6 MPa 的条件下复现 5 级沙尘环境, 喉道半径为 0.001 6 m 的喷管加速效果最佳, 可获得的颗粒速度达到 218 m/s。

关键词 收缩-扩张喷管; 稀疏两相流动; 二氧化硅微尘颗粒; 喉道优化

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.05.002

中图分类号 V211.1⁺7 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)05-0007-06

A Research on Particles Motion and Throat Optimization for Accelerating Sparse Particles in Supersonic Convergent-divergent Nozzle

LI Ping¹, XIAO Lianghua¹, HE Weifeng^{1,✉}, XU Weisheng¹, HOU Xiaosong²

(1. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: Small silica particles may be inhaled into the engine when helicopters and other aircraft are in the process of takeoff or landing on the gravel ground. The particles collide with engine blades at a relative speed more than 200 m/s, thus eroding the blades seriously. The particle velocity is hard to reach 200 m/s with straight-wall nozzle when total pressure is 0.6 MPa. So supersonic convergent-divergent nozzle is designed to increase the particle velocity. Particles motion in and out of the nozzle and throat optimization are studied by two-phase simulations. The research shows that particles are speeded up mainly in the divergent part of the nozzle, and the acceleration of particles not only depends on the relative speed of gas and particles, but also the gas density. The throat radius is optimized, and the particles can be accelerated to 218 m/s by the nozzle with 0.001 6 m throat radius.

Key words: convergent-divergent nozzle; sparse two-phase flow; SiO₂ smalls; throat optimization

收稿日期: 2017-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(11602302); 陕西省科技统筹创新工程计划(2015KTCQ01-72)

作者简介: 李 平(1992—), 男, 辽宁宽甸人, 硕士生, 主要从事航空发动机部件表面工程与可靠性研究。E-mail: lptianxia33@163.com

通信作者: 何卫锋(1977—), 男, 湖南桃江人, 副教授, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究。E-mail: hehe_coco@163.com

引用格式: 李平, 肖良华, 何卫锋, 等. 收缩扩张喷管中稀疏颗粒加速运动及喉道优化[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 7-12. LI Ping, XIAO Lianghua, HE Weifeng, et al. A Research on Particles Motion and Throat Optimization for Accelerating Sparse Particles in Supersonic Convergent-divergent Nozzle [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(5): 7-12.

飞机在起飞和降落过程中,航空发动机(尤其是直升机发动机)不可避免吸入粒径小于1 mm的微尘颗粒,引起发动机叶片冲蚀损伤,表面完整性破坏,甚至引起发动机性能降低^[1]。冲蚀过程中,二氧化硅等坚硬微小固体颗粒冲击叶片的速度大于200 m/s^[2]。现有的冲蚀模拟一般采用气动喷管,考虑到较高入口总压会带来一定的安全风险,所以入口总压一般小于0.7 MPa,颗粒速度不超过154 m/s^[3],不能复现叶片的真实工作环境和条件,难以满足实验要求。为更好地研究固体颗粒高速冲蚀叶片的损伤机理和防护方法,需要设计效果更好的固体微小颗粒加速装置。

气动喷管存在微小颗粒与气体的相互作用,具有典型的气固两相流动特征。王金东^[3]等人运用数值模拟方法研究了不同直径的直喷管对粒子速度的影响;章利特^[4]等运用一元流动理论和拉格朗日方法研究了收缩-扩张喷管对颗粒的加速作用同颗粒大小及喷管长度之间的关系;张腾飞等^[5]对后混喷嘴内的磨料颗粒运动开展了数值模拟和实验研究;Rudinger^[6]通过假设收敛喷管内气流和颗粒的温度不变,研究了高颗粒加载率对气流运动的影响。从国内外文献来看,喷管内两相流的数值模拟已有一些研究,但大部分数值模拟结果缺乏定量实验数据的验证,且喷管内气流运动速度低,缺乏对固体颗粒运动影响因素的详细分析。

1 气固两相流数学模型

为模拟5级砂尘环境(4 001~10 000 mg/m³)中的冲蚀情况,将喷管的颗粒流量设为5 g/min,而入口气流总压最低为0.3 MPa,此时气流流量最小,颗粒浓度最大,颗粒的无量纲平均间距最小,为22.42,大于10,属于稀疏颗粒流范畴^[7]。且体积分数为1.84%,因此数值模拟采用单向耦合的离散相模型(Discrete Phase Model, DPM)。

数值模拟中,气相运动的控制方程为可压缩Navier-Stokes方程(N-S方程)。

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \mathbf{F} \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T -$$

$$\sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{v})] \quad (3)$$

式中: ρ 为气流密度; t 为时间; \mathbf{v} 为气流速度矢量; p 为静态压力; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量; \mathbf{F} 为体积力,主要包括重力和由颗粒引起的外部体积力; E 为能量; k_{eff} 表示热传递效率; T 为静温; \mathbf{J}_j 为 j 方向上的能量耗散; $\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}}$ 为粘性传递效率。颗粒相的运动方程为:

$$m_p \cdot \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_m \quad (4)$$

式中: m_p 为颗粒质量; \mathbf{v}_p 为颗粒速度; \mathbf{F}_d 为气动阻力; \mathbf{F}_g 为颗粒重力; \mathbf{F}_m 包括虚拟质量力、旋转参考系下的力、热泳力、Brownian力以及Saffman力。颗粒在超音速气流作用下受到的力主要为轴向的气动阻力:

$$\mathbf{F}_d = \frac{1}{2} C_D \rho (\mathbf{v} - \mathbf{v}_p)^2 S \quad (5)$$

式中: C_D 为阻力系数; S 为颗粒迎风面积。由于喷管内气流为超音速,需考虑可压缩性对阻力系数影响,采用Clift、Grace和Weber研究成果^[8]:

$$C_D = f C_{D_{fm}} + (1-f) C_{DI} \quad (6)$$

式中: $C_{D_{fm}}$ 为自由分子流区下的阻力系数; C_{DI} 为连续流区下的标准阻力系数; f 为比例系数; C_{DI} 称为无粘阻力系数,实际上对应为高雷诺数条件下的阻力系数。

2 数值模拟设置及验证

2.1 几何模型及模拟设置

根据一维无粘流动理论初步设计轴对称收缩-扩张喷管,设计入口总压为0.6 MPa时,气流在喷管出口处恰好完全膨胀,出口马赫数为1.7。考虑到加工成本以及冲蚀试验中喷管的使用寿命,喷管的喉道位置设计成平直段(GF),见图1。其中喷管入口段AB为12 mm,对称轴BD为90 mm,平直喉道段GF为3 mm,喷嘴半径DE为2.5 mm,喉道半径CG为2 mm,AHGF为管壁。模拟采用的基准网格见图2,以喷管轴向为 x 轴,以径向为 y 轴,喷管出口位于 $x=90$ mm位置。

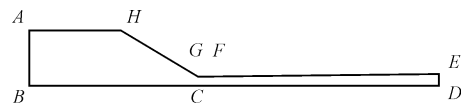


图1 喷管模型

Fig. 1 The model of nozzle

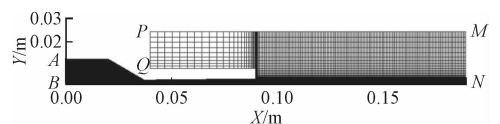


图2 基准(basic)网格

Fig. 2 The basic mesh of nozzle

气流相采用可压缩的 N-S 方程以及湍流方程 (Realizable $\kappa\epsilon$ 湍流模型^[9]) 联合求解^[10]。设置 BN 为对称轴, AB 为压力入口, 入口总压分别为 0.3~0.7 MPa, 出口 $QPMN$ 为压力出口, 出口压力为大气压, 其他边界设置为无滑移绝热壁面^[11]; 气流相为理想气体, 初始温度均为 300 K。空间离散格式选择二阶迎风格式。颗粒相的计算采用 DPM 模型^[12-13]。根据实验条件, 待气流相计算收敛后, 在喷管入口处加入二氧化硅颗粒, 颗粒直径为 0.1 mm, 密度为 $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 假设颗粒与管壁的碰撞为弹性碰撞, $QPMN$ 边界设置为逃逸^[14-15], 受力模型选用 high-Mach-number^[8]。

2.2 网格无关性验证

为排除网格疏密程度对计算结果的影响, 选择入口总压为 0.6 MPa 工况开展网格无关性研究。对喷管内部 x 和 y 方向网格数进行变稀或加密调整, 得到网格数为 400×45 、 500×50 、 650×70 , 分别记为 coarse1、coarse2、fine。数值模拟得到喷管轴线位置的气流马赫数和颗粒速度变化曲线见图 3。可见, basic 和 fine 网格的模拟结果几乎重合, 而 coarse1 和 coarse2 网格则存在差别。故本文的后续研究均采用 basic 网格。喷管出口处气流马赫数为 1.74, 且不存在明显的激波或膨胀波, 符合设计。

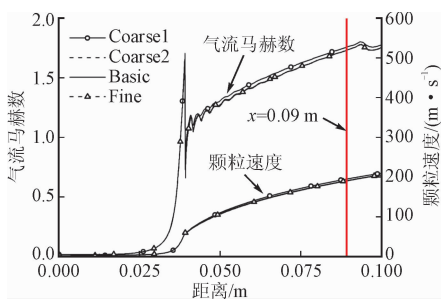


图 3 不同网格的喷管轴线位置气流马赫数及颗粒速度曲线
Fig. 3 Mach number & particles velocity with different meshes

2.3 实验验证

为验证数值模拟, 采用双盘测速测量不同入口总压下所得的颗粒速度。双盘测速是利用颗粒经过 2 个圆盘之间距离所需时间及旋转圆盘在该时间段转过的角度来实现速度测量^[16]。如图 4 所示, 2 个圆盘由电机带动同步旋转, 靠近电机侧的圆盘带小孔, 另一圆盘不带孔。测试过程中, 待圆盘转速稳定后, 喷管开始喷砂, 通过圆孔的颗粒撞击无孔圆盘并留下痕迹, 待撞痕稳定后即可停止。然后电机反方向转动, 重复上述步骤。无孔圆盘上则留下 2 个圆孔状的撞痕, 测量两个撞痕中心与圆盘圆心所形成夹角 θ , 经过推导则可获得颗粒速度:

$$v_{\text{nom}} = \frac{6L(n_1 + n_2)}{\theta} \quad (7)$$

式中: $L=0.1 \text{ m}$ 为 2 个圆盘的间距; n_1 、 n_2 (r/min) 分别为正转、反转的转速。

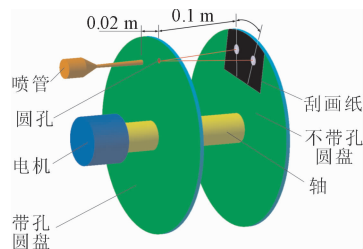


图 4 双盘测速实验结构原理图

Fig. 4 Schematic of a double disk method

根据实验原理, 采用图 1 所示的喷管, 对直径为 0.1 mm 的 SiO_2 颗粒加速, 测量了入口总压为 0.3~0.7 MPa 时, 距离喷嘴出口 0.02 m 处的颗粒速度。为保证测量数据的可重复性及可靠性, 同一入口总压下, 进行 3 次测量, 取其平均值作为最终结果, 见图 5。可以看出, 在其他条件不变的情况下, 颗粒速度随入口总压的增大而增加, 最大速度可达 210 m/s (入口总压为 0.7 MPa)。并且随着入口总压的增大, 0.3~0.4 MPa 之间的颗粒速度增长率较快, 0.4~0.7 MPa 之间的颗粒速度增长率较 0.3~0.4 MPa 之间缓慢。

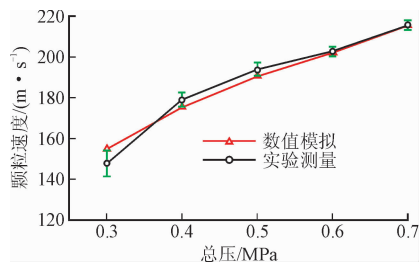


图 5 数值模拟结果与双盘测速结果比较

Fig. 5 The comparison of simulation and experiment

按照双盘测速实验过程, 对收缩-扩张喷管内气、固两相流运动进行数值模拟, 得到颗粒在距离喷管出口 0.02 m 处的颗粒群平均速度大小 (数值模拟结果的具体分析见第 3 节)。将模拟所得颗粒群平均速度同实验测量的颗粒速度进行对比分析, 见图 5。可见, 数值模拟与实验测量结果吻合较好, 除入口总压为 0.3 MPa 时, 误差为 4.78%, 其余误差都在 1.72% 以下, 证明了本文所采用的数值模拟方法可以准确地模拟收缩-扩张喷管内气、固两相流运动规律。

3 数值模拟结果分析

经过数值模拟, 得到不同入口总压下, 轴线位置的气流马赫数与颗粒速度分布曲线, 见图 6。由于

喷管喉道处的平直段(GF)存在,使得气流在经过喉道时产生激波,气流马赫数发生剧烈波动。

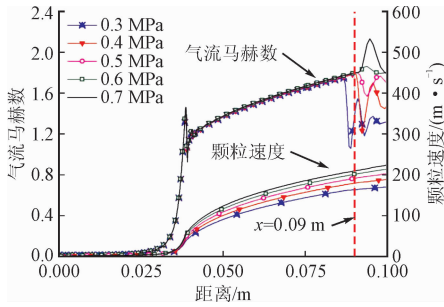


图6 轴线位置的气流马赫数与颗粒速度曲线

Fig. 6 The curves of Mach number & particles velocity at axis

当气流位于喷管出口时,气流出现激波(0.3~0.5 MPa)和膨胀波(0.6~0.7 MPa),气流马赫数对应减小(激波)和增大(膨胀波);入口总压为0.6 MPa时,由于粘性作用,喷管出口处出现微弱的膨胀波,气流马赫数为1.74,大于设计马赫数(1.7),喷管经数值模拟达到了设计目标。喷管中的颗粒在超音速气流的作用下得到加速,粒子速度在喉道位置迅速增大,进入扩张段后,增长速度逐渐放缓。

由式(5)可知,对于粒径固定的颗粒,气动力(颗粒加速度)大小由阻力系数、颗粒-气流之间的相对速度、及气流密度共同决定。图7~10分别为轴线位置颗粒阻力系数、颗粒加速度、相对速度及气流密度的分布。可见,整个加速过程中,阻力系数变化不大,对颗粒受力的影响可以忽略。

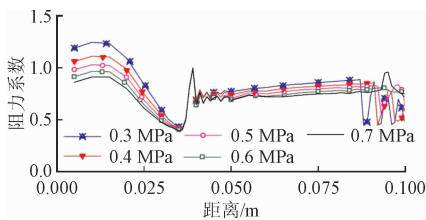


图7 不同入口总压下轴线位置的阻力系数分布

Fig. 7 The curves of drag coefficient at the axis

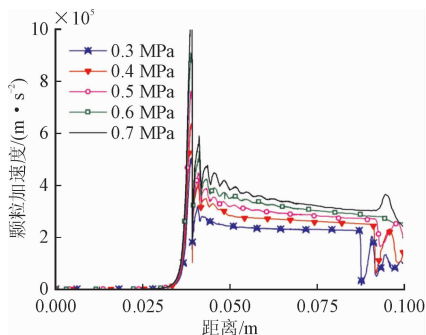


图8 不同入口总压下轴线位置的粒子加速度分布

Fig. 8 The curves of particles acceleration at the axis

喷管对颗粒产生明显加速始于喉道位置。此

时,气、粒间的相对速度迅速增加,颗粒受力(加速度)增大,颗粒速度增加。扩张段的气、粒的相对速度基本保持不变,气流的膨胀导致密度下降,如图10所示,故加速度下降,颗粒速度增长率放缓;喷管出口附近,流场出现激波和膨胀波,气流速度波动较大,致使气动力剧烈变化,但由于作用时间短,颗粒速度未见波动,仍平稳增长。

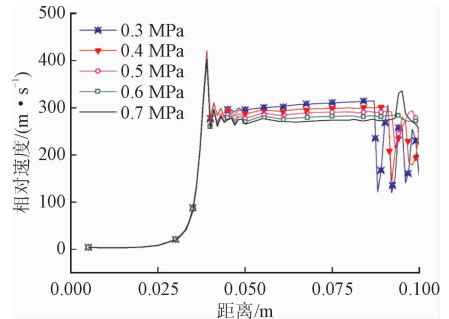


图9 不同入口总压下轴线位置的相对速度分布

Fig. 9 The curves of relative velocity of particle & gas at the axis

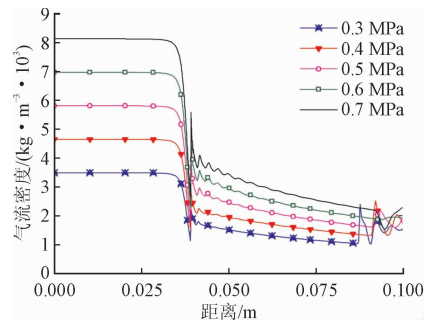


图10 不同入口总压下,轴线位置的气流密度分布

Fig. 10 The curves of gas density at the axis

4 喷管喉道尺寸优化

在入口总压为0.6 MPa,喷嘴截面积为 $1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2$,供砂量为5 g/min的实验条件下,研究5级砂尘环境中颗粒的运动速度,发现喉道面积对砂尘运动情况影响较大,因此在入口总压、喷嘴截面积和喷管长度保持不变情况下,研究不同喉道尺寸对固体颗粒运动影响。在前期研究基础上^[17],将喷管喉道半径设计为1 mm、1.5 mm、1.6 mm、1.8 mm,分别记为喷管1~4,而初步设计的喉道半径为2 mm(图1所示的喷管结构),记为喷管5。

4.1 气流运动规律

在入口总压为0.6 MPa条件下,对不同喉道直径喷管时气流、颗粒的运动状态进行模拟,图11为轴线位置气流马赫数变化情况。可见,在入口总压及喷嘴直径不变的情况下,缩小喷管喉道直径,对扩张段气流运动状态影响较大。喉道直径的缩小,相

当于增大了扩张段的扩张角度,气流在扩张段的膨胀更加充分,提高了气流的加速度以及最大速度;除喷管 5 外,其余喷管均处于过膨胀状态,管内出现激波,随着喉道直径的缩小,激波逐渐向管内移动。

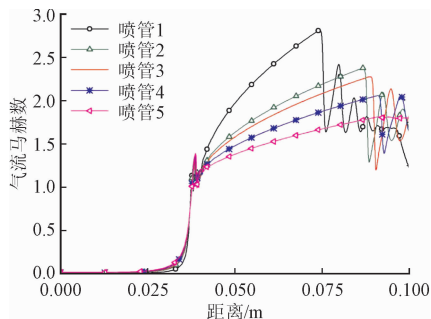


图 11 不同喉道直径喷管的轴线位置马赫数曲线

Fig. 11 The curves of Mach number at the axis

4.2 二氧化硅颗粒的加速运动

由 2.2 节的分析可知,颗粒直径一定时,气流与颗粒之间的相对速度以及气流密度是影响气动力(颗粒加速度)大小的主要因素。图 12~图 14 分别为喷管轴线上颗粒的加速度、气流与颗粒间的相对速度和气流密度分布。

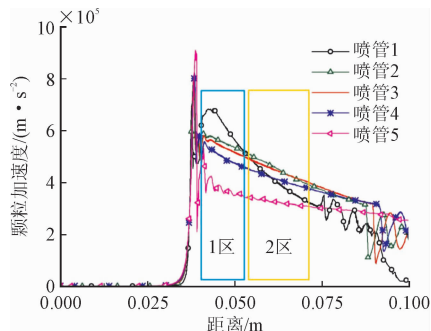


图 12 不同喉道直径的喷管轴线位置颗粒加速度曲线

Fig. 12 The curves of particles acceleration at the axis

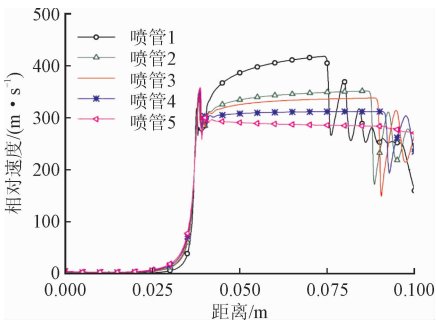


图 13 不同喉道直径的喷管轴线位置气、粒相对速度曲线

Fig. 13 Relative speed between particle and air flow at the axis

气流对颗粒的加速始于喷管喉道位置,并在喉道位置迅速提升至最大,之后又呈递减趋势,当颗粒遇到激波时,加速度亦出现波动,见图 12。

颗粒经过喷管喉道及出口位置附近时,气流产生的激波对气、粒间相对速度及气流密度产生影响,

进而颗粒加速度也随着激波波动。颗粒在喷管内的时间小于 0.001 s,穿越激波时间更短,颗粒速度增长很小,故未见速度波动。喉道尺寸对颗粒加速度影响见图 12,图中的 1 区,随着喉道的缩小,气流膨胀更快、速度更高,因此颗粒-气流的相对速度亦高(图 13),加速度随之增大;图中的 2 区,喷管 1 对应的加速度反而较喷管 2、3 和 4 的小,此处虽然喷管 1 对应的颗粒与气流的相对速度最高,但由于气流密度小(图 14)导致加速度减小。

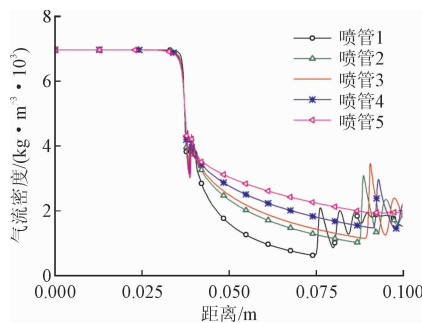


图 14 不同喉道直径的喷管轴线位置气流密度曲线

Fig. 14 Gas density at the axis

轴线位置的砂尘颗粒速度变化见图 15。喷管喉道半径变化,使得颗粒在管内的运动出现不同程度差异。喷管 3 在喷管出口处颗粒速度最大,加速效果最好;喷管 1 中的颗粒速度在 $x=0.07$ m 之前最大,之后颗粒加速效果有所下降,低于喷管 2、3;喷管 5 的颗粒速度最低,加速效果最弱。喷管出口处的颗粒速度与喷管喉道半径关系见图 16。

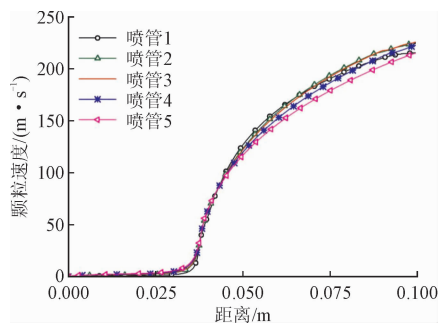


图 15 不同喉道直径喷管的轴线位置颗粒速度分布

Fig. 15 Particles velocity at the axis

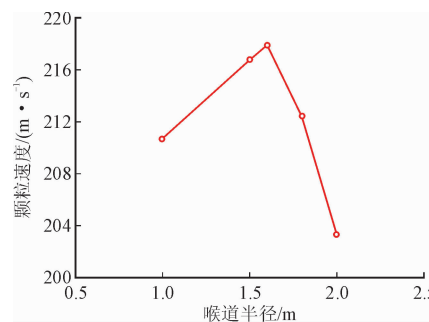


图 16 不同喉道直径的喷管出口处颗粒速度

Fig. 16 Particles velocity at the nozzle's egress

喷管喉道半径的缩小,可使气流过度膨胀,在更短的距离加速颗粒至更高的速度,因此可以增强对颗粒的加速效果;但是,气流的过度膨胀也导致管内出现激波,波后气流速度急剧下降,颗粒加速度随之下降,因此随着喉道半径的继续缩小,喷管出口处颗粒速度不升反降。喷管内气流速度已达到超音速,颗粒速度仍处于亚音速,故颗粒速度还有提升空间,但受到实验场地的限制,喷管扩张段长度固定。故该实验条件下,上述5个喷管,喉道半径为16 mm的喷管3对直径为0.1 mm的二氧化硅颗粒的加速效果最佳。

5 结论

1)通过数值模拟和实验的对比分析,验证了数值模拟方法的准确性,并且颗粒在喷嘴出口的速度与入口总压近似呈线性关系。

2)收缩-扩张喷管对砂尘颗粒的加速作用主要体现在喷管的扩张段,并且加速效果与气、粒间的相对速度和气流密度有关;管内激波对颗粒速度没有明显的影响。

3)在入口总压固定为0.6 MPa,喷管其它尺寸不变的条件下,且不改变喷管的长度,喉道半径为16 mm的喷管对直径为0.1 mm的稀疏二氧化硅颗粒的加速效果最佳。

参考文献(References):

- [1] 谢安琦,刘道新,刘明霞,等. 表面处理对17-4PH不锈钢抗固体粒子冲蚀性能的影响[J]. 航空材料学报, 2015, 35(2): 43-53.
- [2] 杨丽,谭明,周文峰,等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层冲蚀试验装置的研制[J]. 装备环境工程, 2016(3): 48-56.
- [3] 王金东,吕志利,刘树林,等. 基于FLUENT的气动喷砂两相流场分析[J]. 科学技术与工程, 2009(17): 5113-5115.
- [4] 章利特,徐廷相. 缩放喷管内的气固两相流动和缩放喷管长度的研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(7): 702-704.
- [5] 张腾飞,邓松圣,陈晓晨,等. 后混磨料射流颗粒运动仿真和实验分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(2): 57-60.
- [6] ZHANG T F, DENG S S, CHEN X C, et al. Simulation and Analysis of Post-Mixed Abrasive Water Jet Particle Trajectory [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(2): 57-60. (in Chinese)
- [7] RUDINGER G. Gas-Particle Flow in Convergent Nozzle at High Loading Ratios [J]. Aiaa Journal, 2015, 8(7): 41-52.
- [8] 边飞龙,朱有利,杜晓坤,等. 基于CFD方法的气动喷丸两相流场特性研究[J]. 计算机仿真, 2015(1): 264-269.
- [9] BIAN F L, ZHU Y L, DU X K, et al. Research on Performance of Two-Phase Flow Field of the Pneumatic Shot Peening Based on CFD Method [J]. Computer Simulation, 2015(1): 264-269. (in Chinese)
- [10] CLIFT R, GRACE J R, WEBER M E. Bubbles, Drops, and Particles [M]. New York: Academic Press, 1978.
- [11] 汪琦. 气固流化床两相流动的CFD模型研究和实验验证[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [12] WANG Q. Comparative Analysis of CFD Models of Gas-Solid Fluidized Bed and Experimental Verification [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [13] SALVADOR F J, MARTINEZ-LOPEZ J, CABALLER M, et al. Study of the Influence of the Needle Lift on the Internal Flow and Cavitation Phenomenon in Diesel Injector Nozzles by CFD Using RANS methods [J]. Energy Conversion & Management, 2013, 66(3): 246-256.
- [14] DE-YU L I, HAI-JIN W U, WANG C L. Numerical Investigation of Flow Characteristics in Hydraulic-Cutting-Seam Nozzle [J]. Journal of the China Coal Society, 2010, 35(4): 686-690.
- [15] DEEN N G, ANNALAND M V S, HOEF M A V D, KUIPERS J A M. Review of discrete particle modeling of fluidized beds [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(1-2): 28-44.
- [16] 罗静,曾国辉,李丙乾. 基于FLUENT的喷嘴孔型两相流场模拟分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(10): 44-47.
- [17] LUO J, ZENG G H, LI B Q. Simulation analysis of Two-phase Flow Field inside Pass of Nozzle Base on FLUENT [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(10): 44-47. (in Chinese)
- [18] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A New Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation [J]. Computer & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [19] 王健威,张云,范春茂,等. 气固两相流数值模拟及喉管结构优化[J]. 农机化研究, 2014(3): 50-53.
- [20] WANG J W, ZHANG Y, FAN C M, et al. Ansys Simulation on Gas-solid Flow of the Getter Spraying Machine for Deratization in Grassland and Optimization of Pipe [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(3): 50-53. (in Chinese)
- [21] RUFF A W, IVES L. Application of Ion Beam Milling to the Characterization of Cracks in Metals [J]. Wear, 1975, 35(1): 195-199.
- [22] 曹鑫,王冠,何卫锋,等. TC4钛合金与多层TiN/Ti涂层的砂尘冲蚀损伤试验[J]. 航空动力学报, 2016, 31(9): 2218-2225.
- [23] CAO X, WANG G, HE W F, et al. Sand Erosion Damage Test on TC4 Titanium Alloy and TiN/Ti Multilayer Coating [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9): 2218-2225. (in Chinese)