

超声速气固两相流在不同压强比下的数值模拟研究

孙建国^{1,2}, 金英子¹, 金羲东²

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 安东国立大学, 韩国安东 760-749)

摘 要: 使用 FLUENT 中的 DPM(离散相)模型对不同压强比下的气固两相流在超声速喷管中的流动、分布等情况进行了数值模拟研究。结果显示:两相流在喷管壁上的压力分布波动较大;在较小压强比条件下,固体颗粒的速度分布较均匀;当压强比增加时,固体颗粒的速度分布在径向上呈中间高,边界低的曲线状;大的压强比能获得较高的颗粒速度和激波强度。

关键词: 超声速; 气固两相流; 悬浮流动; 缩放喷嘴; 压强比

中图分类号: O353.4 **文献标志码:** A

0 引 言

近年来,气固两相流在超声速喷管中的流动得到了较高的关注,在众多工业设备和国防设施中应用广泛^[1],例如火箭推进系统、气力输送设备、无针注射系统等^[2]。在上述设备中,两相流的速度都达到了超声速。超声速气固两相流会和许多复杂的物理作用联系在一起。由于固体颗粒的加入,流场中会增加很多与气相物理场的压力梯度有关的特殊附加力,如 Kendall 等^[3]。颗粒和气体湍流之间的相互作用、颗粒之间的碰撞、颗粒和边界之间的撞击以及颗粒的物理性质,如体积大小,密度,形状,也能影响两相流动的特性^[4]。

一些专家和学者做过大量的研究来研究气固两相流动。陈伟等^[5]采用 NND 格式求解气相 N-S 方程,采用了 DSMC 方法模拟固相颗粒运动,数值模拟了三维管道超声速气固两相流场,分析了固体颗粒对流场结构产生的影响,计算结果表明将 DSMC 方法与 CFD 方法相结合是解决气固两相流动问题的一种有效途径。R Ishii 等^[6]数值分析了轴对称的超声速气固两相流在喷管内和围绕圆形柱体的流动,把气体看作连续相,固体小颗粒看作离散相,并

且把颗粒团分成若干个微小有限体,结果发现在有限体内的颗粒和气相几乎具有相同的速度和温度,但气固两相混合物的性质在诸多方面和单相流动完全不同。然而上述文献中也存在不足,首先使用单颗或部分固体微粒的速度来预测颗粒群的速度显然是不够全面的。在超声速气固两相流中,颗粒的数量多、速度快,容易受到气相湍流的影响,因此对分析研究和实验手段提出了很高的要求。

本文通过对 4 种不同压强比的两相流在超声速喷管中的流动情况进行数值模拟,分析其内部流动情况和固体颗粒的速度和空间分布。在气力输送等 devices 中,要求了解两相流的内部流动情况,例如无针注射器,要求固体颗粒有较均匀的速度和空间分布,本研究期望为此类设备的设计提供理论依据。

1 模型的建立

DPM(离散相)模型中假设固体颗粒的体积非常小,因此所占的体积通常可以忽略不计;颗粒是圆球体且大小一致;惰性粒子,它们不会与周围的颗粒交换质量,也不会发生化学反应^[7]。

本文所使用的模型如图 1 所示,喷管的进口、喉部、出口的直径分别为 22、5.8、20 mm。为了得到

收稿日期: 2012-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51006090),浙江省科技计划项目(2011C11073,2011C16038)

作者简介: 孙建国(1983-),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事电液控制与流体传动的研究。

通信作者: 金英子,电子邮箱:jiny. yz@163. com

稳定的模拟结果,在原模型的基础上,对喷管的进出口进行了拓展,进口拓展到 $5D$ 的区域,出口拓展到 $20D$ 的区域(D 为喷管的出口直径);进而将计算区域划分为 3 个区域:进口段,喷嘴和出口段。使用了 GAMBIT 进行网格的划分,网格为结构化四边形。因为喷管是中心对称的结构,故而在计算中采用了 2 维简化模型。并在壁面附近使用加密的边界层网格以获得较为准确的边界流动和较小的 y^+ 值。

网格独立试验结果如图 2 所示,本文后续计算使用的模型网格数为 260 000。不仅因为它有较小的误差,还因为它有较好的收敛性和较小的 y^+ 值。

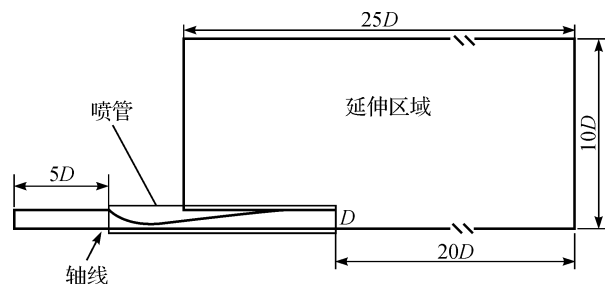


图1 喷管的几何形状和尺寸

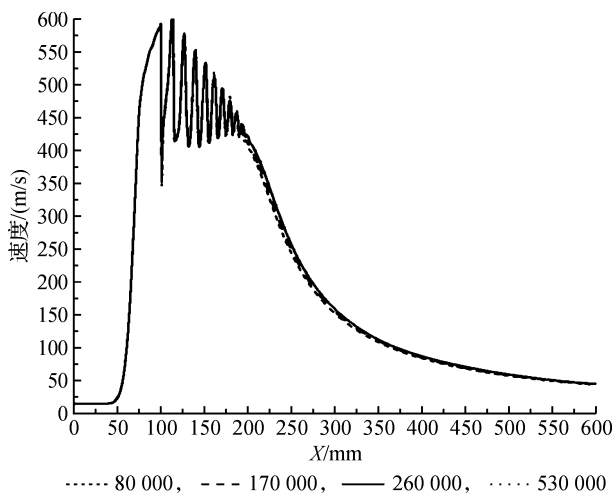


图2 网格独立实验

2 计算方法和边界条件

本文使用了 FLUENT 中的非定常 DPM 模型(discrete phase, 离散相)来模拟固体颗粒的运动。在计算的开始首先使用标准 $k-\omega$ 湍流模型对流体相进行定常计算,等各项残差小于 10^{-6} 就认为收敛,然后再引入离散相固体颗粒进行非定常计算。采用基于密度的求解器、标准 $k-\omega$ 湍流模型和 3 阶 MUSCL 精度。进口和出口为压力边界,出口压力固定为 101 325 Pa,在模拟计算中,采用了相同的网格。进出口压强比(p_0/p_e)分别为 2、5、10 和 20。使用了理想气体作为流体相,固体颗粒的直径

$1 \mu\text{m}$ 、密度 1.05 g/cm^3 、质量流量为 1.4178 g/s 。由于颗粒相的所占的质量分数小于 5%,颗粒呈离散分布且直径较小,因此在离散型模型中并不考虑颗粒的体积的影响。但必须考虑到高速运动的颗粒对气相的速度以及温度等参数的影响,因此在模拟中使用了两相耦合模型(两相之间可以相互作用),并选取了基于高马赫数的颗粒阻力系数(high Mach number drag law)。

在计算的开始,为了验证 DPM 模型的可靠性,从文献[8]中选取了 3 组实验数据进行对比。数值模拟采用了和实验完全相同的颗粒和边界条件,从图 3 中可以看出数值模拟结果和实验结果能较好地吻合(x 轴坐标点 70 mm 代表了喷管的喉部,170 mm 代表了喷管发散段结束的位置)。

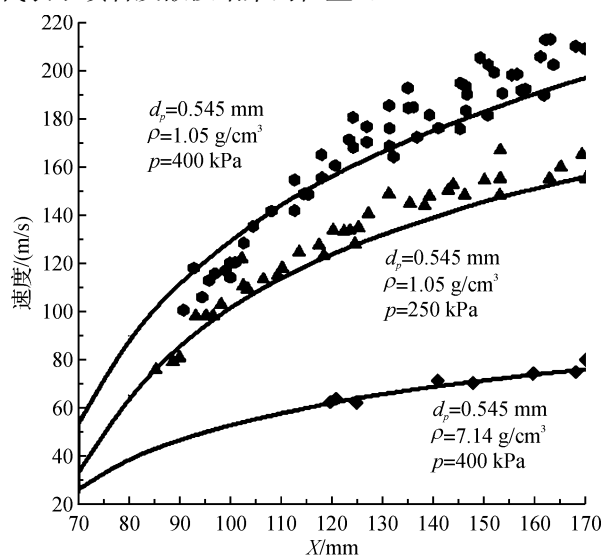


图3 数值模拟结果和实验结果对比

注:符号为实验数据,实线为模拟数据

3 结果分析

颗粒在不同时间在喷管内的分布如图 4 所示。图 4 中不同的颜色代表了颗粒在喷管内部的居留时间,每个点都代表了不同的固体颗粒。在图 4(a)中,均匀分散于气相中的固体颗粒以统一的速度在入口段不间断地射入喷管内。当固体颗粒到达喷管的收敛段时,少量颗粒会和喷管壁发生碰撞,但大部分的颗粒会跟随气相加速流动。从超声速喷管流动的特性可知,气相在喷管的喉部会达到声速,在喷管下游达到超声速。由于边界层和中心区域的速度梯度增大,流动在喷管下游会产生壁面分离。靠近壁面的区域,由于回流会产生涡流。从图 4(c)中可以看出,在喷管的下游区域,大部分固体颗粒聚集在壁面低速流动和中心区域高速流动之间的剪切层。当颗

粒随气流流动到喷管的出口区域时,由于喷管壁的形状发生了变化,颗粒的分布将相对均匀。

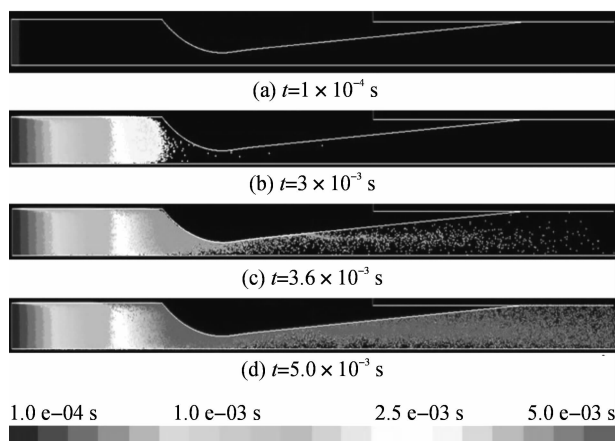


图4 固体颗粒在不同时刻的分布

在本文中,固体颗粒离散地分布在气相中,它对气相的影响可以通过观察气相的压力分布等参数来测定。在压强比为5的情况下,两相流在喷管轴线上的静压分布如图5所示。图5可以看出,在 $t=5 \times 10^{-3}$ s后,静压随时间的变化非常小。虽然固体颗粒为非定常流动,但由于此刻流场的基本流动参数如压强比、分离点和激波的位置大体已经确定,离散相只是在局部对气流产生微小的扰动,因而可以把此时刻以后的流场看作准定常流场。其他压强比也有相同的趋势,因此在本文中,选取 $t=5 \times 10^{-3}$ s时刻的流动参数来进行分析。

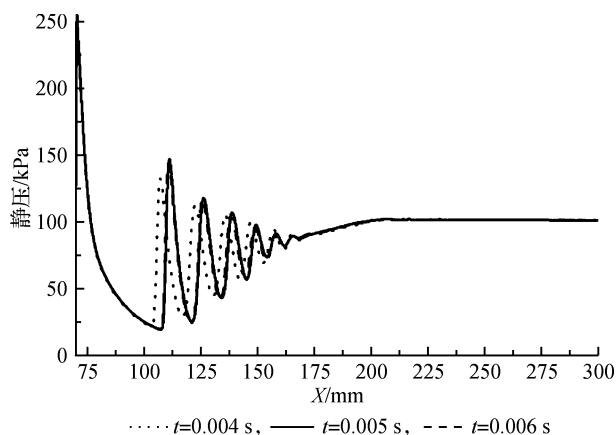


图5 喷管轴线静压在不同时刻的分布($p_0/p_\infty=5$)

不同压强比条件下的两相流静压分布如图6所示。从图6中可以看出,随着压强比的增大,喷管内的激波系的结构发生了很大的变化,最主要的便是流动分离点和激波系向喷管下游的移动,以及第一道斜激波的坡度和强度的改变。

不同压强比条件下,静压在喷管壁上的分布如图7所示。从图7中可以看出,这8条曲线的总体

趋势是相似的,都是从喉部开始,静压随着轴向位置的增加而逐步降低。在喷管下游位置,由于核心流动和边界流动的速度梯度的增加而导致了流动在壁面的分离;并因此产生了斜激波,使得静压骤然上升,直至喷管出口。对比单相流动和两相流动,可以看出,单相的曲线比两相流的曲线平滑得多。这是由于固体颗粒和喷管壁相互作用,使得壁面静压波动很频繁。从图中看,两相流的分离点比单相流的分离点更靠近下游。分离点的位置与很多因素有关,比如喷管的形状,进出口的压强比和湍流强度等。在本文中,分离点的位置被湍流强度和压强比所影响,两相流中由于颗粒的存在,使得流动中的湍流更加激烈,进而增强了湍流强度和边界层的附着,因而两相流的分离点会向下游移动。而高压强比的流动具有较高的速度,使得在壁面上的流速增加,使流动可以长时间附着于管壁。

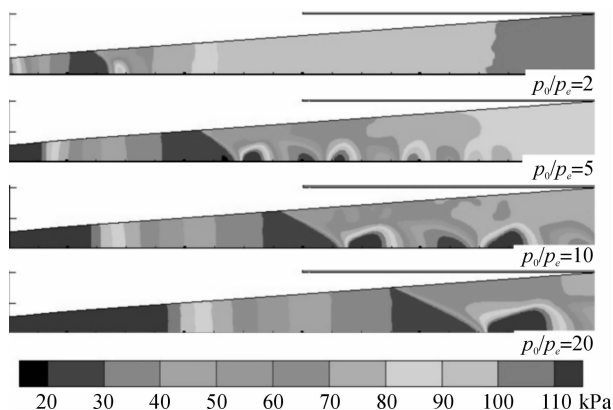


图6 不同压强下喷管静压分布

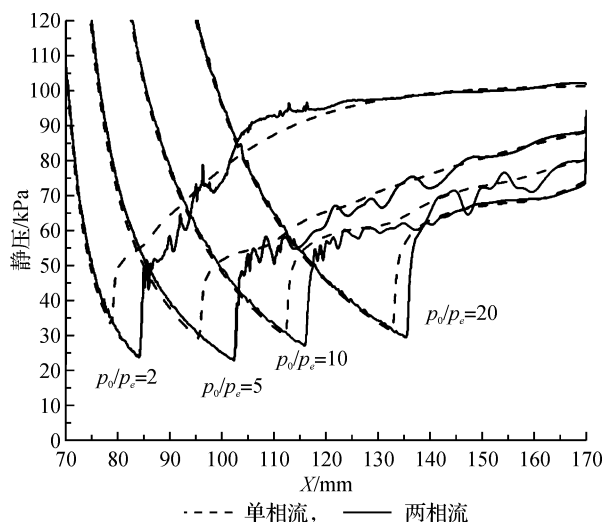


图7 静压在喷管壁上的分布

马赫数在轴线上的分布如图8所示。从图8中可以看出,随着压强比的增加,气流的马赫数增大,

激波系的数量和长度都在增加。对比单相流和两相流的马赫曲线可以看到,携带固体颗粒的两相流,由于分离点的后移,将具有更高的马赫数,在第一道激波中速度下降更大,但在随后的流动中,两相流的速度要比单相流的要低。在本文中,由于采用的颗粒质量流量较小且为定值,与气相的质量流量相比,其质量分数小于5%,而随着压强的增加,其质量比值会进一步降低,因此从图7和图8中可以看到,随着压强的增加,两相流和单相流的差别在逐渐缩小。

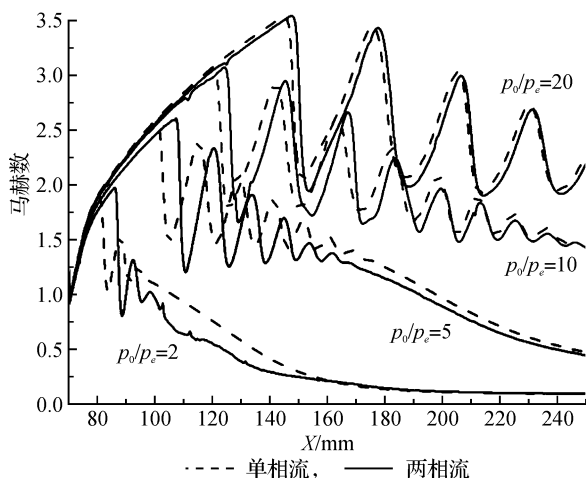


图8 马赫数在轴线上的分布

静压在轴线上的分布如图9所示。结果显示,两相流和单相流的趋势大体相似,高压强比的流动,其第一道激波后的压升比较大,这意味着激波强度的增加。图10显示了随着压强比的增加,两相流的激波强度也在增大。

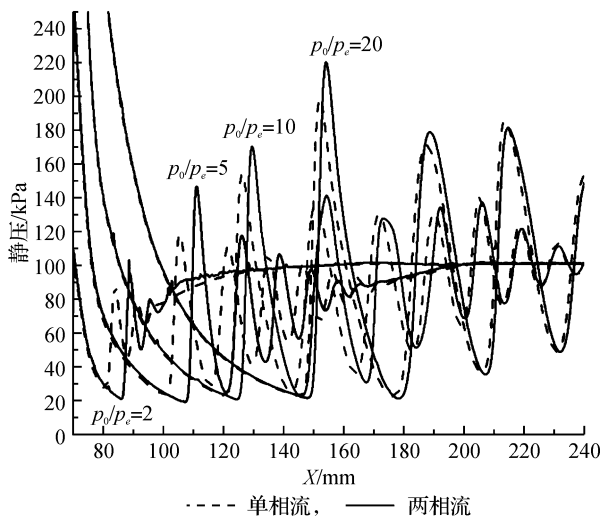


图9 轴线上的静压分布

在不同压强下,固体颗粒的加速情况不同,其速度和空间分布的规律也不同。图11是在4种压强

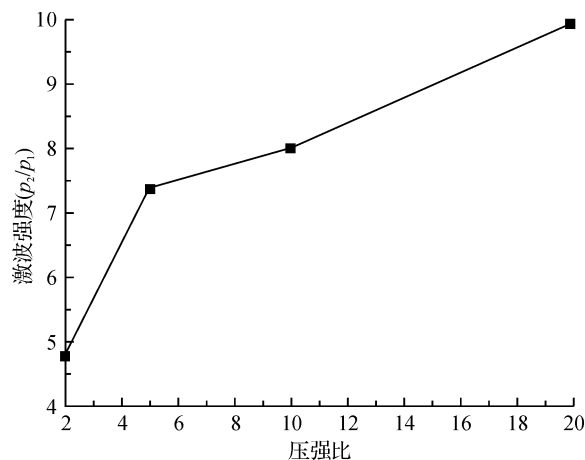


图10 不同压强下两相流的激波强度

比下,固体颗粒在喷管出口处($x=200$ mm)的分布情况。本文使用宏观统计方法,采集了长时间的固体颗粒空间分布数据以消除时间引起的误差。具体方法是在喷管的出口处设置一条观测线,当固体颗粒经过观测线时,它的速度等参数便被记录下来。并把这条线等分成十小段, $Y/D=0$ 的点位于喷管轴线上, $Y/D=1$ 的点位于喷管壁上。经过一定的时间后,把经过每一小段的颗粒数除以经过观测线的总的颗粒数就可以得到图11中的百分比。百分比越大,意味着经过此段的颗粒数目越多。从图11中可以看出,因为压强的变化使分离点的位置往喷管下游移动,从而气流的剪切层(图4c中颗粒集中在气流的剪切层)发生变化,进而使得颗粒的分布情况发生了变化,颗粒在出口处的空间分布更加集中到中间偏向管壁位置。

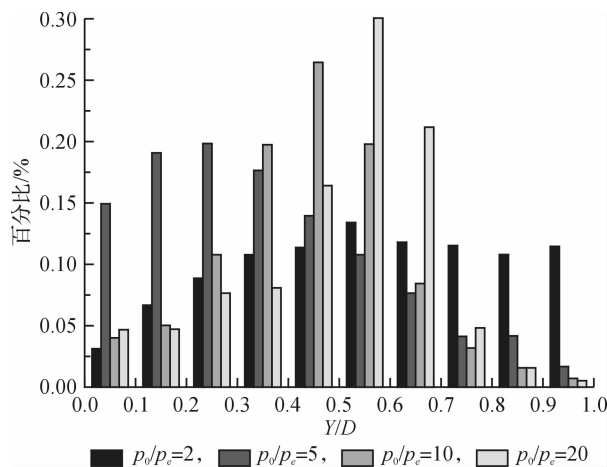


图11 固体颗粒在喷管出口处的分布情况

图12是固体颗粒在喷管出口处的平均速度分布。从图12中可以看出,当压强比较低时,固体颗粒在喷管出口处的速度分布较均匀,但速度值较低。随着压强比的升高,速度的分布开始呈现曲线状,靠

近核心流动区域的颗粒拥有更高的速度。随着压强比的进一步升高,速度分布均匀的区域将从轴线处向管壁处扩张。

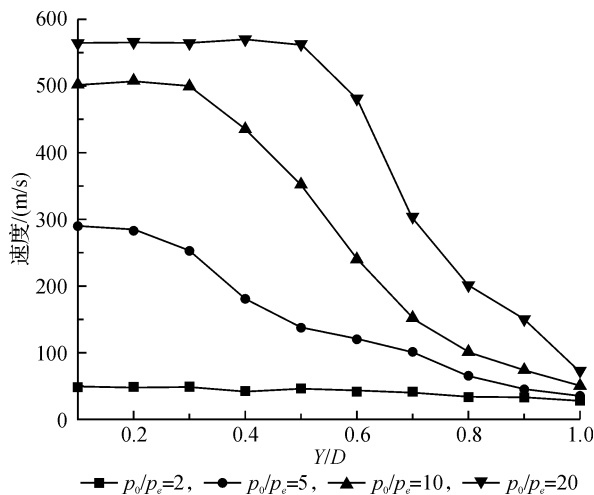


图 12 固体颗粒在喷管出口处的平均速度分布

3 结 论

a) 尽管气固悬浮流中固体颗粒的流动是非定常流动,但经过一定的时间以后,由于流场的基本参数已经确立,且本文中颗粒相的质量流量非常小,固体颗粒只会在很小的区域引起流场轻微的变化。因而可以把一定时刻后的流场近似看作定常流场。

b) 随着压强比的增加,两相流和单相流的趋势一致,都会产生以下变化:流动分离点会向下游移动,流动速度增大,激波数目增多,激波强度增大。

但由于两相流中颗粒的加入,会影响到分离点的位置,进而影响到速度和压强的分布。

c) 两相流中颗粒的速度,会随着压强的增加而增大,但是由于分离点的后移,使得剪切层的位置发生变化,进而使颗粒在出口处的空间分布更加集中到中间偏向管壁位置。

参考文献:

- [1] Geng J H, Groeng H. Dust suspensions accelerated by shock waves[J]. Experiments in Fluids, 2000, 28: 360-367.
- [2] Jackson C R, Lear W E. Generalized shock wave analysis of two-phase flow[J]. Mechanics Research Communications, 1998, 25(6): 613-622.
- [3] Kendall M A F. The delivery of particulate vaccines and drugs to human skin with a practical hand-held shock tube-based system[J]. Shock Waves, 2002, 12: 23-30.
- [4] 沈天耀, 林建忠. 叶轮机械的气固两相流基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 3-12.
- [5] 陈 伟, 常 雨. 三维管道超声速气固两相流动的 CFD/DSMC 仿真[J]. 推进技术, 2005, 26(3): 239-241.
- [6] Ishii R, Umeda Y. Nozzle flows of gas-particle mixtures [J]. Phys Fluids, 1987, 30(3): 752-760.
- [7] Quinlan N J, Kendall M A F. Investigations of gas and particle dynamics in first generation needle-free drug delivery devices[J]. Shock Waves, 2001, 10: 395-404.
- [8] Okuda S, Chol W S. Gas-particle mixture flow in various types of convergent-divergent nozzle[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1978, 11(6): 432-437.

Research on Numerical Simulation of Supersonic Gas-solid Flow under Different Pressure Ratios

SUN Jian-guo^{1,2}, JIN Ying-zi¹, JIN Xi-dong²

- (1. School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Andong National University, Andong 760-749, South Korea)

Abstract: This paper conducts numerical simulation research on the flow and distribution of gas-solid flow in supersonic nozzle under different pressure ratios by using DPM(dispersed phase) model in FLU-ENT. The result shows that the pressure distribution of two-phase flow on nozzle wall has a large fluctuation; under the condition of low pressure ratio, the velocity distribution of solid particles is uniform; when pressure ratio increases, the velocity distribution of solid particles is curved in radial direction, high in the middle and low in the boundary; high pressure ratio can result in high particle velocity and shock-wave intensity.

Key words: supersonic; gas-solid flow; suspension flow; convergent-divergent nozzle; pressure ratio

(责任编辑: 张祖尧)