

激波驱动颗粒群加速效果优化的实验研究

张 苹, 元洪训, 章利特, 施红辉, 黄保乾

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 为了通过波后气流的加速来实现颗粒群加速效果的优化,该研究基于现有的水平激波管装置,设计加工了分别针对亚声速、跨声速和超声速波后气流的三种不同类型加速喷嘴。使用高速摄影仪对固体颗粒群的运动图像进行捕捉,通过沿激波管轴向动态压力测量确定激波速度和激波马赫数 Ma 。结果表明:其他条件都相同时,颗粒粒径越小,颗粒群运动的尾迹现象越不明显,颗粒群的加速效果越好;对于不同类型的喷嘴结构,其他条件都相同时,应该根据波后气流的马赫数合理的选取喷嘴来进行加速,从而优化颗粒群的加速效果。

关键词: 激波; 颗粒; 加速; 喷嘴

中图分类号: O354;O359

文献标志码: A

0 引 言

超声速气相流场中的气固两相流现象在医疗、机械和航天航空等领域中普遍存在,相关基础研究对于火山喷发、工业粉尘爆炸、粉末灭火、粉末的无针注射和超声速冷喷涂等技术研发和工程应用意义重大。英国牛津大学 BJ Bellhouse 等^[1]曾利用激波管原理输运药物颗粒,实现了粉末的无针注射技术。他们设计了两种无针注射的装置,分别将粉末药物颗粒注射到皮肤和口腔黏膜中。MAF Kendall 等^[2]为了加速疫苗和药物粉末的输运,实验研究了缩放喷嘴中气固两相流运动,通过毕托管来测试喷嘴出口处的静压变化,利用纹影照片来分析气相流场的结构变化。在激波管装置中,当激波由气相介质传入含有颗粒的装载室时,由于相间的动量和能量的交换,激波的传播行为是非定常的,涉及到气、固两相间以及固体颗粒之间的相互作用,而且固粒相载荷比、气相热力参数和颗粒相参数(粒径、密度)的改变,会对固体颗粒的加速效果和激波衰减产生影响,分析其影响规律,对相关应用领域的装置设计和优化具有显著意义。

文献[3-6]已经对水平激波管内激波与固体颗粒群的相互作用过程进行了详细的观察分析,通过改变气相热力参数、颗粒相参数和固相载荷比,来分析其对颗粒群加速效果的影响。前期的实验研究主要是针对毫米级的小钢球,而本文实验中选用的颗粒均为微米级粉末。由于水平激波管内激波驱动固体颗粒群运动时,颗粒群在加速过程中大部分时间经历的都是波后气流的作用,所以可以通过波后气流的加速来实现颗粒群加速效果的优化。本文的主要工作是基于激波管-尾喷嘴装置对气固两相流输运规律进行实验研究,在现有的水平激波管装置的基础上设计加工了三种不同类型的喷嘴,其目的是使不同马赫数条件下的波后气流得到加速,从而优化颗粒群的加速效果。

1 喷嘴设计计算

通过改变高压气源和铝膜厚度使得水平激波管内产生的激波马赫数不同,从而使产生的波后气流马赫数也不同,存在亚声速、跨声速或者超声速等三种可能性。等熵管流中存在的速度 v , 截面积 A 和马赫数 Ma 之间的关联式如下:

收稿日期: 2012-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51006091);浙江省高校重中之重学科优秀青年人才培养基金(ZSTUMD2011B011)

作者简介: 张 苹(1989-),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事基于激波管装置的固体颗粒群输运技术的研究。

通信作者: 章利特,电子邮箱: langzichsh@zstu.edu.cn

$$(Ma^3 - 1) \frac{dv}{v} = \frac{dA}{A} (1)$$

可以看出,气流为亚声速时流速随管道截面积的减小而增大,超声速时则相反。所以针对马赫数达到亚声速、跨声速或超声速范围内的波后气流,分别采用收缩形、缩放形或扩张形喷嘴来进行加速。特别地,对于缩放形喷嘴,要求喉部设计马赫数大于或等于 1,这样才能保证气流在喷嘴扩张段得到加速。考虑到加工成本和简便性,喷嘴的壁面全部采用直锥面,所以设计计算中只需确定喷嘴截面积的变化规律。

以收缩形喷嘴为例,假设流动为一维等熵流动,直管段截面积为 A_1 ,喷嘴入口压强为 p_1^* ,温度为 T_1^* ,喷嘴设计入口马赫数为 M_1 ,喷嘴出口截面积为 A_e ,喷嘴出口压强为 p_e^* ,温度为 T_e^* ,喷嘴设计出口马赫数为 M_2 ,不计摩擦损失,则对喷嘴进口和出口运用连续方程得到:

$$C \frac{p_1^*}{\sqrt{T_1^*}} A_1 q(\lambda_1) = C \frac{p_e^*}{\sqrt{T_e^*}} A_e q(\lambda_e) \quad (2)$$

其中, $C = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$, 气动函数 $q(\lambda) = \lambda \left(\frac{k+1}{2} - \frac{k-1}{2} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$, λ 表示速度系数(对空气取 $k=1.4$, $C=0.04042$)。

喷嘴进出口的温度和压力关系如下:

$$T_1^* = T_e^*, \quad (3)$$

$$p_1^* = p_e^* \quad (4)$$

由式(2)、式(3)、式(4)得:

$$A_e = \frac{A_1 q(\lambda_1)}{q(\lambda_e)} \quad (5)$$

根据喷嘴设计入口马赫数 M_1 和喷嘴设计出口马赫数为 M_2 ,查气动函数表得 $q(\lambda_1)$ 和 $q(\lambda_e)$ 的值,即求得喷嘴出口截面积大小^[7]。喷嘴的长度取为 80 mm。

由于气体实际流动过程中存在着一定的摩擦损失,所以还需要对等熵计算得到的喷嘴出口截面积进行粘性流动数值修正。本文采用数值模拟的方法进行辅助设计,针对激波管-尾喷嘴装置建立二维轴对称几何模型,再根据网格无关性检验结果^[8],将网格空间步长取为 0.5 mm,采用结构化网格,计算网格数目约为 30 万,应用 Fluent6.3 计算软件对模型内气相流场进行数值模拟。对于收缩形喷嘴,设计入口和出口马赫数分别为 0.6 和 1,根据已知的破膜压比和喷嘴参数进行数值计算,比较分析不同喷嘴几何参数下的出口马赫数,通过建立几何参数和

相应出口马赫数之间的线性关系从而得到满足设计要求的喷嘴参数^[5]。如图 1 所示,粘性修正后得到的入口和出口马赫数参数随时间而变化,图 1 表明当入口马赫数到达 0.6 左右时,出口马赫数接近 1,由此说明修正后的喷嘴参数可以满足设计要求。

综上所述,可以根据一定的设计入口马赫数和出口马赫数值进行等熵计算得到喷嘴截面积参数,再作进一步修正,从而得出喷嘴的出口或喉部截面积,如表 1 所示。

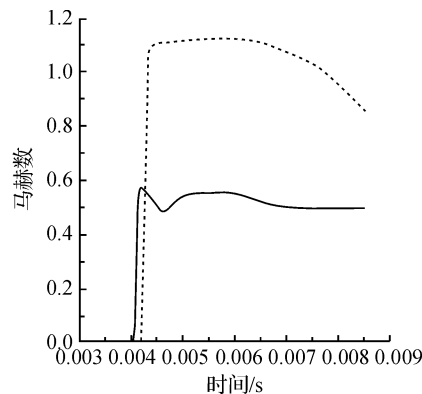


图 1 收缩形喷嘴入口和出口马赫数随时间的变化

注:破膜压比为 7.5,喷嘴截面积比为 0.77

表 1 喷嘴设计参数表

	收缩形喷嘴	缩放形喷嘴	扩张形喷嘴
入口面积/mm ²	490.625	490.625	490.625
喉部面积/mm ²	—	379.94	—
出口面积/mm ²	379.940	907.460	907.460
喷嘴长度/mm	80	100	80
设计入口马赫数	0.6	0.8	1.2
设计出口马赫数	1	2	2

2 实验装置与实验参数

本实验装置如图 2 所示,驱动段 5 和被驱动段 7 长度分别为 500 mm 和 1 570 mm,装载室 9 长为 50 mm,直管加速段 11 长为 500 mm。为了保持实验环境的安全和洁净,尾部喷嘴 12 后连接立方回收室 13,其边长为 600 mm。实验中采用 Keyence 公司的动态分析三维显微系统(VW-6 000/5 000)进行运动颗粒的动态图像捕捉,该系统分为摄像头 15 和控制台 16 两部分,在自然光线下高速摄影仪捕捉不到足够的采光点,所以需要辅助照明灯 14 增加背景亮度。采用的压力测量系统主要由四部分组成,分别是压电式压力传感器(CY-YD-205,灵敏度为 13.79 PC/Pa⁵)、电荷放大器(BZ2102B)、动态测试分析仪(TST3000)和专用电脑。

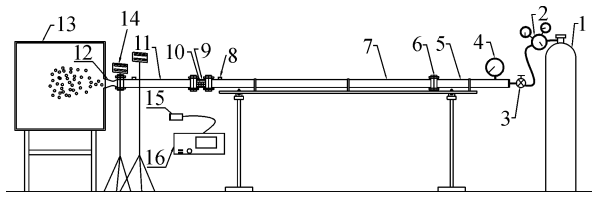


图 2 实验装置简图

1. 高压气瓶, 2. 减压阀, 3. 针阀, 4. 压力表, 5. 驱动段, 6. 铝膜, 7. 被驱动段, 8. 传感器, 9. 装载室, 10. 颗粒群, 11. 直管加速段, 12. 尾喷嘴, 13. 回收室, 14. 照明灯, 15. 摄像头, 16. 控制台

实验操作步骤: 将测定粒径的颗粒加入装载室, 用厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 的薄锡纸将装载室两端封闭, 确认减压阀、针阀均处于关闭状态, 开启电荷放大器和照明灯, 打开高压气瓶, 分别点击压力测试分析系统软件的触发压力信号采集按钮和动态分析系统软件的

图像采集按钮, 调节减压阀, 将压力值调至预期范围, 再缓慢打开针阀使高压气体进入驱动段, 继续充气直至破膜, 立即依次关闭高压气瓶、减压阀、针阀, 保存动态压力数据与拍摄照片, 实验结束。

本实验选用的是 SiC 颗粒, 粒径分别为 $550\ \mu\text{m}$ 和 $160\ \mu\text{m}$, 装载室中颗粒群所占体积分数用装载比 α 来表示。具体实验参数如表 1 所示, 其中 $\text{N}_2-0.08$ 表示驱动气体为氮气, 铝膜厚度为 $0.08\ \text{mm}$, 其他工况类似表示。实验分别采用氮气和氦气作为高压气体, 表 1 中接触面表示的是激波运动过程中高压气体与空气的交界面, P_4/P_1 表示破膜时驱动段和被驱动段的压比, 激波速度由装载室前端和加速段末端间距为 $540\ \text{mm}$ 的两测点上的动态压力测量确定。

表 1 激波管实验参数表

工况	破膜压比 P_4/P_1	激波马赫 数 Ma	激波速度 $v/$ (m/s)(测量值)	接触面前波后 气流马赫数 Ma	接触面后波后 气流马赫数 Ma	激波强度 P_2/P_1 (理论值)
$\text{N}_2-0.08$	7.9	1.481	508.150	0.587	0.575	2.392
$\text{N}_2-0.10$	17.0	1.687	578.919	0.757	0.742	3.154
$\text{He}-0.08$	7.9	1.969	675.590	0.944	0.321	4.357

3 实验结果分析

本实验的拍摄频率均设置为 $4\ 000\ \text{fps}$, 所以两幅图片之间的时间间隔为 $0.25\ \text{ms}$, 通过刻度尺标定, 确定拍摄区域的实际长度为 $167\ \text{mm}$ 。

3.1 不同粒径下颗粒运动尾迹现象比较

对驱动气体均为氮气、铝膜厚度同为 $0.08\ \text{mm}$ 、激波马赫数 $Ma=1.481$ 、颗粒群装载比 $\alpha=1$ 、颗粒粒径分别为 $550\ \mu\text{m}$ 和 $160\ \mu\text{m}$ 的两种工况进行比较, 结果见图 3 和图 4 所示。图 3(a)~图 3(f) 为粒径为 $550\ \mu\text{m}$ 的 SiC 颗粒群运动一段时间后在直管内的图像, 从图中可以看到颗粒运动尾迹沿上管壁面运动, 说明颗粒受 Saffman 升力作用影响较大, 同时又受到壁面效应的影响, 所以颗粒的尾迹长细比逐渐增大。图 3(g)~图 3(o) 表示的是粒径为 $550\ \mu\text{m}$ 的 SiC 颗粒在喷嘴内的运动尾迹, 可以看出颗粒群的运动尾迹逐渐偏离壁面向管内发展, 这是由于波后气流在缩放喷嘴内得到加速, 从而使得气固两相相对速度增大, 颗粒受到的曳力增大。图 4(a)~图 4(f) 表明粒径为 $160\ \mu\text{m}$ 的 SiC 颗粒在直管内的整个运动过程没有出现明显的尾迹现象。图 4(g)~图 4(r) 可见粒径为 $160\ \mu\text{m}$ 的 SiC 颗粒在喷嘴内运动时, 尾迹区域还是非常短。

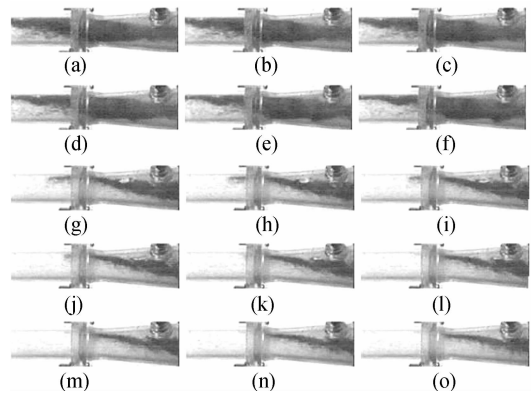


图 3 $\text{N}_2-0.08$ 工况下 $550\ \mu\text{m}$ 颗粒群运动尾迹

注: 缩放形喷嘴, 装载比为 1, 运动方向自左向右, $4\ 000\ \text{帧/s}$

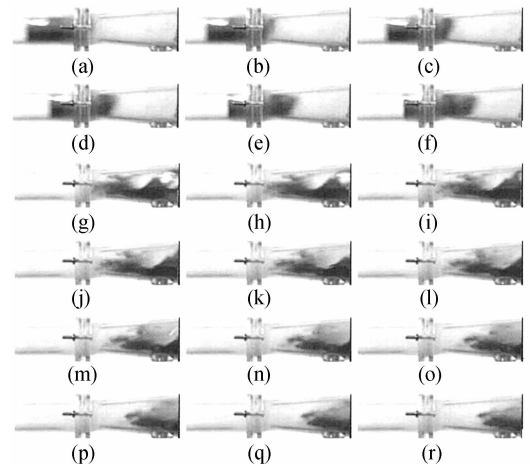


图 4 $\text{N}_2-0.08$ 工况下 $160\ \mu\text{m}$ 颗粒群运动尾迹

注: 缩放形喷嘴, 装载比为 1, 运动方向自左向右, $4\ 000\ \text{帧/s}$

综上所述,其他条件都相同时,颗粒的粒径越小,运动的尾迹现象越不明显,颗粒群的加速效果越好。

3.2 不同工况下颗粒运动速度和加速度比较

由于高速摄影设备很难捕捉到单个微米级颗粒的运动图像,所以实验测量颗粒速度时,取图像上出现明显颗粒群时的前缘点为研究对象,假设其速度为颗粒群的速度。

如图5,可以看出: $N_2-0.08$ 工况下, $Ma=1.481$,颗粒群进入喷嘴段的初速度 $v_0=35$ m/s,出口速度为40 m/s; $N_2-0.1$ 工况下, $Ma=1.687$,颗粒群的初速度 $v_0=40$ m/s,出口速度为50 m/s; $He-0.08$ 工况下, $Ma=1.969$,颗粒群的初始速度 $v_0=70$ m/s,出口速度为80 m/s。由此可知,同种驱动气体作用下, $N_2-0.1$ 工况与 $N_2-0.08$ 工况相比较,随着马赫数增大,扩张形喷嘴使得颗粒群的加速效果得到了明显的优化;不同绝热指数驱动气体作用下, $He-0.08$ 工况与 $N_2-0.1$ 工况相比较,随着马赫数增大,扩张形喷嘴对颗粒群加速效果的优化并不明显。

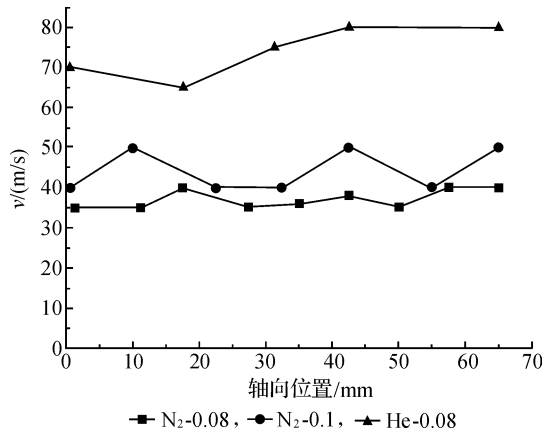


图5 不同工况下喷嘴内颗粒群速度随轴向位置变化
注:喷嘴均为扩张形,出口位置为 $x=67$ mm处,且喷嘴长度为80 mm

如图6和图7所示,对于相同喷嘴参数,在相同工况下,喷嘴内颗粒群加速度较直管段的颗粒群加速度大;然而在不同工况下,随着马赫数的增大,直管段和喷嘴内颗粒群的速度和加速度均增大,并且颗粒群在喷嘴内的加速度增幅较直管内的大,这是由于不同马赫数的波后气流通过喷嘴时得到了不同程度的加速。 $N_2-0.08$ 工况下,扩张形和缩放形喷嘴内颗粒群的速度和加速度并没有明显的区别,此时不同喷嘴参数对颗粒群的加速效果影响较小; $He-0.08$ 工况下,颗粒群在扩张形喷嘴内加速度为 14 km/s²,而在缩放形喷嘴内的加速度达到了 25.6 km/s²,这说明缩

放形比扩张形喷嘴的加速效果好。

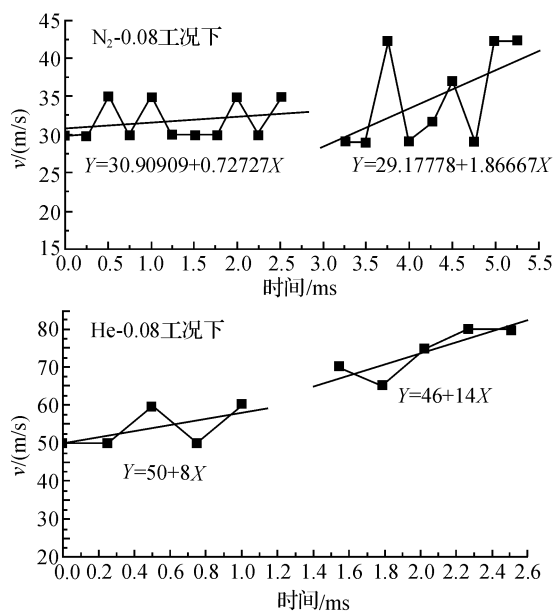


图6 不同工况下颗粒群在直管和喷嘴内的速度变化(颗粒沿直管段向扩张形喷嘴内运动,速度逐渐增大)
注:图中拟合直线的斜率为加速度

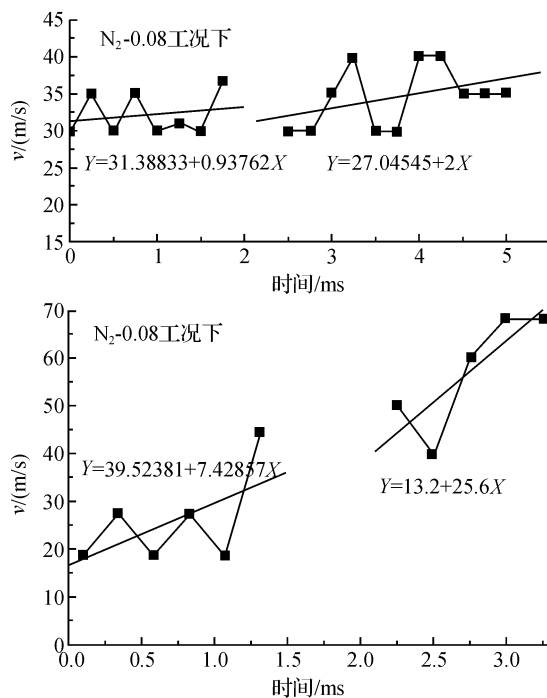


图7 不同工况下颗粒群在直管和喷嘴内的速度变化(颗粒沿直管段向缩放形喷嘴内运动,速度逐渐增大)
注:图中拟合直线的斜率为加速度

如图8所示,对于收缩形喷嘴,在相同工况下,喷嘴内颗粒群加速度较直管段的颗粒群加速度大。对于工况 $N_2-0.08$ 和 $He-0.08$,随着马赫数的增大,直管段颗粒群的速度和加速度均增大,喷嘴内颗粒群的速度也增大,但是加速度减小。这是由

于氦气中的音速大于氮气中的音速,使得接触面之后波后气流马赫数和激波马赫数的关系也发生了变化。

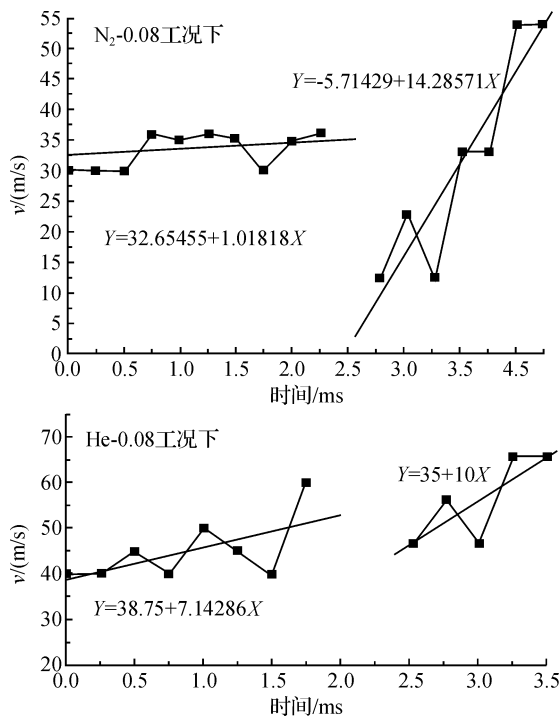


图 8 不同工况下颗粒群在直管和喷嘴内速度的变化(颗粒沿直管段向收缩形喷嘴内运动,速度逐渐增大)

注:图中拟合直线的斜率为加速度

4 结 论

a) 设计加工喷嘴时,采用等熵计算与数值修正相结合的方法,以便于减少设计参数的误差。

b) $N_2-0.08$ 工况下,激波马赫数 $Ma=1.481$,颗粒群装载比 $\alpha=1$,比较不同颗粒粒径参数下颗粒群的加速效果,颗粒粒径越小,颗粒群的运动尾迹现象越不明显,颗粒群的加速效果越好。

c) 对于不同的喷嘴参数,其他条件都相同时,随着马赫数的增大,颗粒群的速度增大,但是不同马赫数下的波后气流通过喷嘴可能会加速或减速,这会对喷嘴内颗粒群的加速度大小产生影响,所以应根据波后气流的马赫数选取合适的尾喷嘴来进行加速。

参考文献:

- [1] Bellhouse B J, Quinlan N J, Ainsworth R W. Needleless delivery of drugs, in dry powder form, using shock waves and supersonic gas flow[C]//. Proceedings of the 21st International Symposium on Shock Waves. Queensland, Australia, 1997: 51-56.
- [2] Kendall M A F, Quinlan N J, Thorpe S J, et al. Measurements of the gas and particle flow within a converging-diverging nozzle for high speed powdered vaccine and drug delivery[J]. Experiments in Fluids, 2004, 37 (1): 128-136.
- [3] Shi Honghui, Kazuki Yamamura. The interaction between shock waves and solid spheres arrays in a shock tube[J]. Acta Mechanica Sinica, 2004, 20(3): 219-227.
- [4] 施红辉. 用激波管研究超音速气固两相流[J]. 应用力学学报, 2003, 20(4): 41-45.
- [5] 张晓娜, 岳树元, 章利特, 等. 激波驱动的气固两相流力学特性研究[A]. 水动力学研究与进展, 2008, 23 (5): 538-545.
- [6] 章利特, 施红辉, 王 超, 等. 激波与可运动颗粒群相互作用反射与透射机理实验研究[J]. 应用力学学报, 2010, 27(2): 280-285.
- [7] 陆志良. 空气动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [8] 王 佳, 杨志刚, 朱 晖. 阶背式 MIRA 模型气动阻力数值模拟网格无关性研究[J]. 佳木斯大学学报, 2012, 30(3): 345-349.

(下转第 95 页)

labus prescribed for a student to learn this course. Then, the authors employ the Two-Sample Pooled T-Test to analyze the final scores and the ZCSTBII scores of the two groups of students. Analysis results show that the mean of the final scores and the mean of ZCSTBII scores of Group I are ZCSTBII those of Group II by 9.0 and 7.0 points, respectively, and the passing rates of final test and ZCGTBII of Group I are greater than those of Group II by 18.75 and 19.54 percentage points, respectively. Therefore, the authors conclude that the amount of time students spend practicing programming on computers plays a very important role in mastering the C programming language.

Key words: C programming language; student score; hypothesis test; computer programming time; homework

(责任编辑: 陈和榜)

(上接第 75 页)

Experimental Investigation on Optimizing the Effect of Particles' Acceleration Driven by Shock Waves

ZHANG Ping, QI Hong-xun, ZHANG Li-te, SHI Hong-hui, HUANG Bao-qian

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This research designs three different types of accelerating nozzles and machines these nozzles behind the horizontal shock tube. The aim behind the concept is to accelerate subsonic, transonic and supersonic flow respectively so that they can optimize the effect of particles' acceleration. Thus, this research uses high-speed photography to capture the image of solid particles group moving in tube. Meanwhile, it utilizes dynamic pressure measurement to measure and calculate experimental shock wave velocity and Mach number along the axial position. Based on the experimental results, this thesis gives the conclusion. Under the same condition, the smaller the particle's diameter is, the more unobvious the wake phenomenon of particles group movement will be. For different types of nozzle structures, it is necessary to choose appropriate nozzles according to the Mach number of the gas flow in order that they can optimize the effect of particles' acceleration.

Key words: shock wave; particle; acceleration; nozzle

(责任编辑: 朱松英)