

# 激波加载固定单双球模型有效阻力测量

元洪训, 张 苹, 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:** 提出利用动态压力测量确定激波加载固定颗粒群有效阻力的新测量方法, 针对单、双球模型推导了有效阻力表达式, 构思了颗粒群模型固定方法, 设计了动态压力固定装置和模型球间距可调的可视化实验段。通过膜片材质与厚度、驱动气源等的选择对气相参数实现精确控制, 利用细金属丝、笼状支架的连接方式实现颗粒群有效阻力向动态压力信号的转换, 通过动态压力  $P$  的测定, 利用有效阻力表达式最终确定颗粒群有效阻力。为深入开展激波与颗粒群相互作用机理研究和建立更合理的颗粒群阻力系数模型, 攻克了后续深入研究的关键难题。

**关键词:** 激波; 颗粒群; 有效阻力; 动态压力; 气固两相流

**中图分类号:** TQ028

**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流体机械、环保、医疗和航空航天等多个领域中具有重要的应用, 比如药物粉末的无针注射<sup>[1]</sup>、超音速冷喷涂<sup>[2]</sup>, 以及利用斜激波实现气固两相的分离<sup>[3-5]</sup>等。颗粒阻力系数模型的建立是气固两相流机理研究的主要方面, 颗粒阻力系数模型可分为单颗粒模型和颗粒群模型。

在单颗粒模型方面较典型的是 K Takayama 和 H Tanno 等利用垂直激波管装置并将加速计安装在球体内部的方法进行了不定常单球阻力系数精确的实验测量<sup>[6-7]</sup>, 然而单球模型未能考虑临近颗粒之间激波结构和颗粒尾迹涡的相互干涉, 以及由此引起的环绕颗粒流场的变化对颗粒受力的影响, 因此基于单球模型所建立的颗粒群阻力系数模型直接应用于众多超声速气固两相流数值模拟时, 可能存在明显的理论缺陷和实验依据。

颗粒群在激波加载时的受力及其影响规律是激波诱导气固两相流研究中的重要课题, 也是实现颗粒群运动准确预测的关键。已开展的针对颗粒群阻力系数模型的研究主要基于光学方法<sup>[8-12]</sup>, 存在气

相参数难以精确控制、装置个体差异影响大以及实验结果不精确等缺点。

因此, 本文提出一种新的激波加载固定颗粒群有效阻力的实验装置和测试方法, 可实现气相参数的精确控制和颗粒群有效阻力的精确测量, 为深入开展激波与颗粒群相互作用机理研究和建立更合理的颗粒群阻力系数模型, 攻克了后续研究的关键难题。

## 1 实验装置及实验方法

图 1 是实验装置系统简图, 主要是由圆形水平激波管、高压氮气瓶、实验段及测试仪器组成, 其中测试仪器主要是高速数据采集系统和动态测试分析仪以及计算机。首先利用激波管的原理产生激波, 然后利用动态测试分析仪测出激波速度, 以便确定激波马赫数, 其次激波到达钢球颗粒模型时, 对其产生的动态压力由高速数据采集系统采集, 最后经过数据处理将动态压力转换成有效阻力值。

### 1.1 激波产生原理

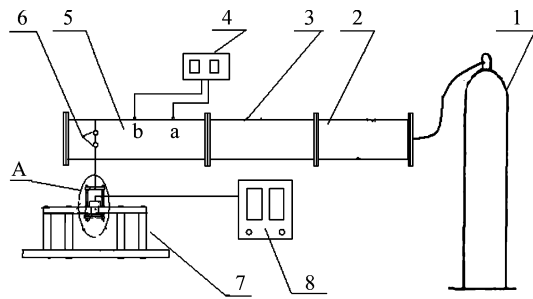
激波管是产生平面激波的装置, 本实验应用的激波管为内径 200 mm 的水平圆管, 用膜片将其分隔为不同压力值的驱动段和被驱动段。向驱动段充

收稿日期: 2012-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(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: 元洪训(1983-), 男, 山东莱芜人, 硕士研究生, 主要从事车辆制造技术的研究。

通讯作者: 章利特, 电子邮箱: langzichsh@zstu.edu.cn



1. 高压气瓶, 2. 驱动段, 3. 被驱动段, 4. 动态测试分析仪, 5. 实验段, 6. 钢球颗粒群模型, 7. 传感器固定装置, 8. 高速数据采集系统, a 和 b 是实验段壁面上的压力传感器, A 是笼状支架

图1 实验装置结构图

入高压氮气, 被驱动段是常压空气, 当膜片两侧的压力差值达到某一临界值时, 膜片破裂产生平面激波, 包括向低压段传播的压缩波、向高压段传播的膨胀波及驱动气体与被驱动气体间的接触面, 其中压缩波运动速度大于接触面的运动速度。当激波到达实验段处的固定钢球颗粒群时, 对颗粒群产生有效阻力的作用, 使颗粒群产生较小的位移。

### 1.2 气相参数控制与测量

实验在室内平均温度为  $27^{\circ}\text{C}$  的条件下进行, 使用高纯氮气作为驱动气体, 铝膜作为膜片且驱动段是常压空气, 这样便可精确控制激波马赫数等气相参数。

确定激波速度的测试系统主要包括动态压力传感器、电荷放大器和动态测试分析仪, 其中动态压力传感器自振频率大于  $100\text{ kHz}$ , 型号为 CY-YD-205, 由江苏联能电子有限公司提供; 电荷放大器满量程时误差小于  $1.5\%$ , 型号为 BZ2102B-4, 由北戴河兰德公司提供; 动态测试分析仪采样率为  $500\text{ Hz} \sim 10\text{ MHz}$ , 型号为 TST3106, 由成都泰斯特电子有限公司提供。

实验段是一段长  $1500\text{ mm}$ , 内径为  $200\text{ mm}$  的有机玻璃管, 在管壁上开有两个相距  $800\text{ mm}$  的孔, 可以布置压力传感器作为测点, 测点信号通过电荷放大器转换并传至动态测试分析仪, 可获得压力—时间曲线, 当激波传播至测点时, 相应的压力传感器将输出阶跃信号, 利用两个测点的阶跃信号存在的时间差  $\Delta t$  和测点距离  $\Delta L$ , 可求出激波速度  $V$  为:

$$V = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (1)$$

图2为在铝膜厚度为  $0.1\text{ mm}$  的工况下由动态测试分析仪所测到的压力阶跃信号。

由图2及式(1)可得激波速度  $V = \frac{\Delta L}{\Delta t} =$

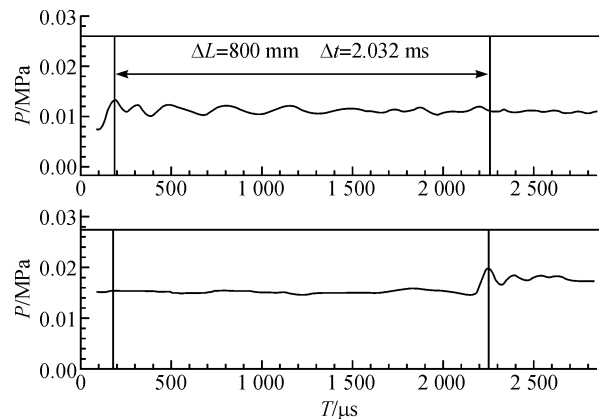


图2 压力阶跃信号

$393.7\text{ m/s}$ 。根据马赫数的定义公式及当地音速公式:

$$M_a = \frac{V}{V_s} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\gamma R T} \quad (3)$$

可确定激波马赫数  $M_a$ 。式(1)~(2)中  $V_s$  是被驱动段当地音速, 由于破膜后激波运动速度大于接触面的运动速度, 因此计算公式中  $\gamma$  是空气绝热指数, 取  $\gamma = 1.4$ ;  $R$  是空气气体常数, 取  $R = 287\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ;  $T$  是热力学温度。由于激波运动速度是超音速, 因此可以认为是绝热, 本实验所处的室内平均温度为  $27^{\circ}\text{C}$ , 因此  $T(\text{K}) = 273.15 + 27 = 300.15\text{ K}$ , 将  $\gamma$ 、 $R$  和  $T$  值代入式(3), 可得被驱动段当地音速为  $V_s = 347.28\text{ m/s}$ 。然后根据式(2)可得出激波马赫数  $M_a = 1.13$ 。根据文献[13], 可计算得到接触面的速度即波后气流的速度  $V_2$ :

$$V_2 = \frac{2}{r_1 + 1} \left( M_a - \frac{1}{M_a} \right) V_s \quad (4)$$

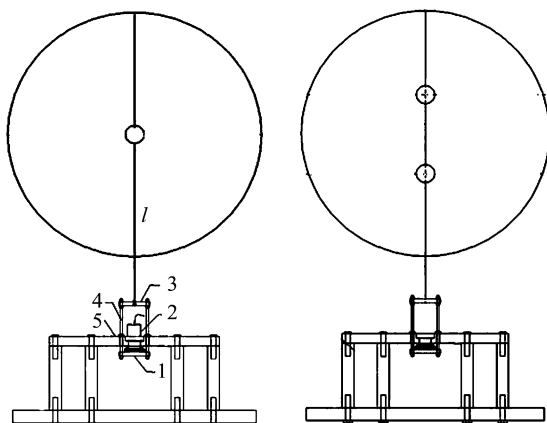
式(4)中:  $r_1$  是被驱动段气体绝热指数, 此处是空气取  $r_1 = 1.4$ 。因此可得波后气流速度  $V_2 = 70.92\text{ m/s}$ 。

### 1.3 有效阻力测量原理

有效阻力的测量仪器主要有齐平膜冲击波高频压力传感器( $1\text{ MHz}$  频响)、传感器固定装置(自行设计加工制造, 主要材料是铸铁, 其中笼状支架采用不锈钢材料)和高速采集系统(TST5911, 江苏泰斯特电子有限公司)。

实验中需用金属丝将钢球颗粒群模型固定在实验段中, 为避免金属丝对气相扰流的影响, 选择直径为  $0.5\text{ mm}$ , 弹性模量为  $206\text{ GPa}$  且具有较强抗塑性形变能力的钢丝。为实现钢球颗粒群模型的固定及钢球颗粒间间距的方便调整, 在距离实验段左端  $300\text{ mm}$  处开有一圈在同一截面上且等距分布的小孔 36 个, 孔径大小取决于钢丝的直径, 只需钢丝恰好穿过即可。钢球颗粒有 4 种直径类型, 分别是 8、

12、16 mm 和 20 mm,以便通过实验比较得出不同质量的颗粒群模型对有效阻力的影响规律。每个钢球上都开有钢丝可以恰好穿过的孔。图 3 是单钢球和双钢球实验工况下钢球颗粒模型的固定方法及与笼状支架连接的示意图。其中大圆是实验段横截面,中间小圆是钢球颗粒,由竖直方向的钢丝固定在实验段有机玻璃管的中部,其中钢球与金属丝通过金属胶固定连接。



1. 笼状支架底盖, 2. 齐平膜冲击波高频压力传感器, 3. 笼状支架顶盖, 4. 滑动杆, 5. 传感器固定装置上盖板,  $l$ . 钢球到笼状支架顶盖的距离

图 3 单钢球固定模型

图 3 中,传感器固定装置上盖板的中部开有螺纹孔。齐平膜冲击波高频压力传感器旋紧到此螺纹孔后连接到高速数据采集系统上。滑动杆(共 4 根)穿过上盖板后将笼状支架顶盖和笼状支架底盖分别在上盖板的上下两侧连接成整体,构成所谓的笼状支架,其中笼状支架顶盖的中心开有直径为 1.5 mm 的孔,当竖直方向的钢丝穿过钢球及实验段上的小孔后通过此孔与笼状支架顶盖固定相连。当钢球颗粒群模型受到激波作用的有效阻力时便会产生实验段管轴向水平位移并拉动钢丝,在钢丝的拉动下,笼状支架产生向上的滑动趋势,笼状支架底盖便给传感器一个压紧力,然后传感器信号传输到电荷放大器并经转换后传至高速数据采集系统上,得到动态压力  $P$  随时间的变化曲线。

实验步骤:首先按照图 1 和图 3 所示安装好所有的仪器装置,然后安装铝膜,启动动态测试分析仪和高速数据采集系统,再打开高压气瓶向驱动段内充高压氮气直至破膜,最后保存动态测试分析仪的结果和动态压力  $P$  的测量结果并处理数据。

#### 1.4 有效阻力公式推导

##### 1.4.1 单钢球固定模型受力分析

图 4 是图 3 中单钢球固定模型的受力分析,其

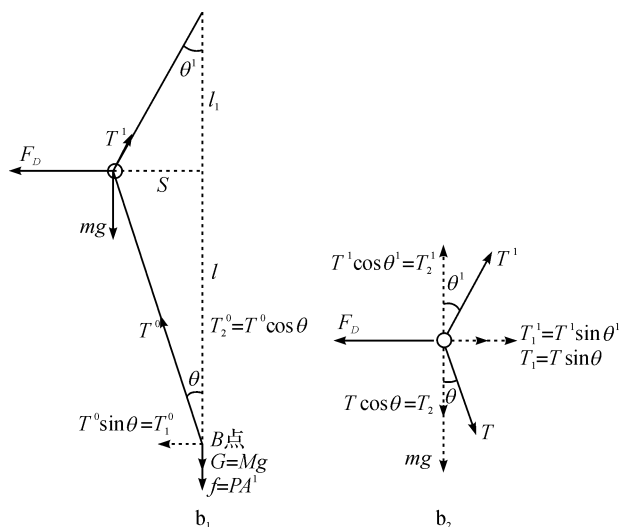


图 4 单钢球固定模型受力分析

中  $b_1$  是整个系统的受力示意图,  $b_2$  是钢球的受力示意图。钢球受到激波的有效阻力  $F_D$  后发生位移  $S$ , 实验中的角度  $\theta$  较小, 且忽略水平方向钢丝提供的轴向弹力, 其中钢球受到上下两段钢丝的拉力, 大小分别为  $T^1$  和  $T$ , 并分别将其在水平和竖直方向上进行受力分解, 如图所示。由力学原理, 可得钢球的在水平方向上的动力学关系式为:

$$F_D - T_1 - T_1^1 = F_D - T \sin \theta - T^1 \sin \theta^1 = ma \quad (5)$$

其中  $m$  是单个钢球的质量,  $a$  是钢球的加速度。由图 4 的几何关系可以得到:

$$\frac{s}{l} = \tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}, \frac{s}{l_1} = \tan \theta^1 = \frac{\sin \theta^1}{\cos \theta^1} \quad (6)$$

式(6)中:  $l$  和  $l_1$  是钢丝下半段和上半段的长度。由于实际实验中钢球发生的位移  $S$  较小, 所以  $\theta$  和  $\theta^1$  都较小, 因此

$$\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1 \quad (7)$$

故式(6)可整理为:

$$\frac{s}{l} \approx \theta, \frac{s}{l_1} \approx \theta^1 \quad (8)$$

将(8)代入(5)中得:

$$F_D \approx T^1 \frac{s}{l_1} + T \frac{s}{l} + ma \quad (9)$$

首先求  $T$  和  $T^1$ :

在图 4 中, 由钢球在竖直方向的受力分析可得:

$$T^1 \cos \theta^1 = mg + T \cos \theta \quad (10)$$

由式(7)可将(10)整理为:

$$T^1 \approx mg + T \quad (11)$$

对  $B$  点进行受力分析可得:

$$G + PA^1 = T^0 \cos \theta \approx T^0 = T \quad (12)$$

式(12)中:  $A^1$  是指笼状支架底盖与传感器膜片作用的有效面积, 可利用拉力计与高速数据采集系统的

稳定测量值的比值确定; $G$ 是笼状支架所受重力; $P$ 是高速数据采集系统所得到的压力值。

将(12)式代入(11)中,可得:

$$T^1 \approx mg + T \approx mg + G + PA^1 \quad (13)$$

再求  $S$  和  $a$ :

对于钢球下方长度为  $l$  的钢丝,在钢球发生位移  $S$  后,由于弹性形变而发生的增量记为  $\Delta l$ ,由几何关系(如图4所示)及三角函数关系,可得:

$$\Delta l = \frac{l}{\cos\theta} - l = l \left( \frac{1 - \cos\theta}{\cos\theta} \right) = l \frac{2\sin^2 \frac{\theta}{2}}{\cos\theta} \approx l \frac{\theta^2}{2} \quad (14)$$

根据弹性力学关系式  $\Delta l = \frac{Tl}{EA}$  和  $\frac{s}{l} \approx \theta$ ,可将式

(14)整理为:

$$s^2 = \frac{2l^2 T}{EA} = \frac{2l^2 G + PA^1}{EA \cos\theta} \approx \frac{2l^2 (G + PA^1)}{EA}$$

即:

$$s = \sqrt{2}l \left( \frac{G + PA^1}{EA} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式(15)中: $E$ 是钢丝的弹性模量; $A$ 是钢丝的横截面积。

对式(14)求二阶导数可得:

$$a = \frac{d^2 s}{dt^2} = -\frac{\sqrt{2}}{4}l \left( \frac{G + PA^1}{EA} \right)^{-\frac{3}{2}} \left( \frac{dPA^1}{dt EA} \right)^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}l \left( \frac{G + PA^1}{EA} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{d^2 PA^1}{dt^2 EA} \quad (16)$$

将(12)、(13)、(15)和(16)四式代入到(9)中,可得  $F_D$  的最终表达式为:

$$F_D = \sqrt{2}l \left( \frac{G + PA^1}{EA} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{mg + G + PA^1}{l_1} + \frac{G + PA^1}{l} \right) + m \left[ -\frac{\sqrt{2}}{4}l \left( \frac{G + PA^1}{EA} \right)^{-\frac{3}{2}} \left( \frac{dPA^1}{dt EA} \right)^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}l \left( \frac{G + PA^1}{EA} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{d^2 PA^1}{dt^2 EA} \right] \quad (17)$$

#### 1.4.2 双钢球固定模型受力分析

图5是双钢球固定模型受力分析示意图,此处可认为颗粒群所受的有效阻力是单个球有效阻力的两倍,因此与单钢球模型情景相类似,可得到双球模型中单个球的有效阻力  $F_D^0$  表达式:

$$F_D^0 = \sqrt{2} \frac{(G + PA^1)^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{EA}} + m \left[ -\frac{\sqrt{2}}{4}l \left( \frac{G + PA^1}{EA} \right)^{-\frac{3}{2}} \left( \frac{dPA^1}{dt EA} \right)^2 + \frac{\sqrt{2}}{2}l \left( \frac{G + PA^1}{EA} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{d^2 PA^1}{dt^2 EA} \right] \quad (18)$$

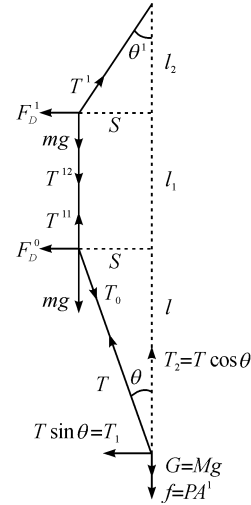


图5 双钢球固定模型受力分析

由单球和双球模型颗粒有效阻力的表达式容易看出,确定有效阻力的关键在于获得动态压力  $P$  的测量结果。

#### 1.5 实验结果

由前面可知,激波的速度  $V = \frac{\Delta L}{\Delta t} = 393.7 \text{ m/s}$ ,

接触面(波后气流)速度  $V_2 = 70.92 \text{ m/s}$ ,且膜片位置到颗粒群模型的距离为  $3.27 \text{ m}$ ,由此,可以得出自激波到达颗粒群后,接触面大约经过  $37 \text{ ms}$  到达颗粒群,因此有效阻力的作用时间大约为  $37 \text{ ms}$ 。由于波后气流的这段作用区域处于准稳态,所以有效阻力也基本趋于稳定值。

图6、图7所示是在室温  $27^\circ\text{C}$ ,铝膜厚度为  $0.15 \text{ mm}$ ,激波马赫数为  $1.19$  且用同种钢球类型的工况下进行实验所得到的单、双球模型的动态压力  $P$  测量结果图。其中单球模型中的钢球位于有机管中心;双球模型中的两球间距为  $65 \text{ mm}$  且呈竖直分布。所选用的钢球直径都为  $20 \text{ mm}$ ,质量为  $32 \text{ g}$ 。根据前面推导出的有效阻力  $F_D$  的计算公式,可得出单球模型和双球模型的有效阻力  $F_D$ :单球模型中钢球的有效阻力约为  $1.0133 \text{ N}$ ,而双球模型中单个球的有效阻力为  $5.5 \text{ N}$ 。可以看出双球模型中由于钢球间距的存在影响了波后气流流场的结构,进而使得气相对其中单个球的有效阻力作用完全不同于同条件下的单球模型。

## 2 结论

利用激波管装置实现激波马赫数和其它气相参数的精确控制,提出用细金属丝固定颗粒群模型的方法,以减少对激波的扰流作用,设计了能方便调整模型球间距的可视化实验段和传感器固定装置,构思了颗粒群有效阻力的测量方法,针对单、双球模型,理论推到了有效阻力的表达式,并通过实验测量

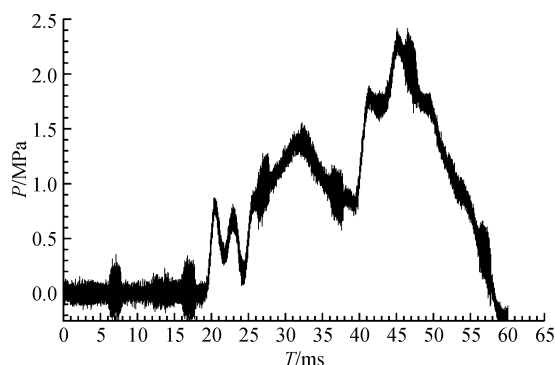
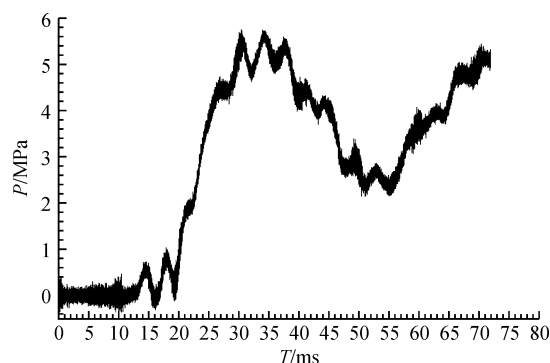
图6 单、双球模型动态压力  $P$ 

图7 单、双球模型动态压力图

标定等方法确定了表达式中的各个相关参数,最终利用测得的动态压力  $P$  的结果实现了激波加载固定颗粒群有效阻力的确定,为深入开展激波与颗粒群相互作用机理研究和建立更合理的颗粒群阻力系数模型突破了关键一步。

#### 参考文献:

[1] Quinlan N J, Kendall M A F, Bellhouse B J. Investiga-

tions of gas and particle dynamics in first generation needle-free drug delivery devices[J]. Shock Waves, 2001, 10(6): 395-404.

[2] 侯根良,王汉功. 冷喷涂技术制备纳米涂层[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(2): 49-51.

[3] Zhang L T, Gao T Y, Xia Q F. Condition analysis of the steady gas-gas interface existence and the separation of gas and solid in supersonic gas phase flows[J]. World Journal of Engineering, 2006, 3(2): 91-102.

[4] 徐延相,章利特,辛 杨. 高温高压气体除尘新概念[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(7): 1311-1314.

[5] 高铁瑜,章利特,夏庆锋,等. 超音速气固两相分离实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1311-1314.

[6] Sun M, Saito T, Takayama K. Unsteady drag on a sphere by shock wave loading [J]. Shock Waves, 2005, 14(2): 3-9.

[7] Tanno H. Interaction of a shock with a sphere suspended in a vertical shock tube[J]. Shock Waves, 2003, 13(3): 191-200.

[8] 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.

[9] Shi H, Yamamura K. The interaction between shock waves and solid sphere arrays in a shock tube [J]. Acta. Mechanica, 2004, 20(3): 219-227.

[10] 岳树元,施红辉,章利特. 高速气固两相流运输技术实验研究[J]. 浙江理工大学学报, 2008, 25(1): 60-64.

[11] 章利特,施红辉. 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.

[12] Zhang L T, Shi H H, Wang C. Aerodynamic characteristics of solid particles' acceleration by shock waves [C]//The 27th International Symposium on Shock Waves, 2011: 243-252.

## Measurement of Effective Resistance of Fixed Single and Double Sphere Model with Shock Wave Load

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

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

**Abstract:** This paper puts forward a new measuring method of using dynamic pressure measurement to determine the effective resistance of fixed particle group with shock wave load; infers the expression of effective resistance in allusion to single and double sphere model, conceives a fixation method of particle group model and designs dynamic pressure fixed device and visualization experiment section with adjustable model sphere space; realizes accurate control of gas phase parameters through the selection of membrane material and thickness and driving air source, realizes the transformation of effective resistance of particle group to dynamic pressure signal through the connection type of fine wire and cage support; and finally determines the effective resistance of particle group using effective resistance expression through the measurement of dynamic pressure  $P$ . To further conduct mechanism research on interaction between shock wave and particle group and establish a more reasonable particle group resistance coefficient model, this paper overcomes key difficulties of subsequent further research.

**Key words:** shock wave; particle group; effective resistance; dynamic pressure; solid-gas flow

(责任编辑:张祖尧)