

文章编号:1000-4939(2003)01-0041-05

# 用激波管研究超音速气固两相流\*

施红辉

(中国科学院力学研究所 LNM 北京 100080)

**摘要:**在激波管里进行了可压缩性气固两相流的实验研究。测量了激波通过颗粒群时的压力的衰减过程。用纹影仪拍摄了激波与颗粒群相互干涉的照片。试验了颗粒群的不同构造对压力衰减的影响。指出了激波反射、聚焦等非线性气动因素是可压缩性气固两相流的关键问题。

**关键词:**气固两相流;激波;压力;可视化;非线性气动力

**中图分类号:** O359, O354.3 **文献标识码:** A

## 1 引 言

近年来随着中国经济的快速发展,对可压缩性气固两相流特别是激波与固体颗粒相互作用问题的研究日渐增多<sup>[1~4]</sup>。对于这一类问题,了解在激波的作用下固体颗粒运动的初始阶段的重要性已成为共识<sup>[5]</sup>。而在这个初始阶段里,包含了诸多非线性气动力因素,例如:激波的多次反射、激波的聚焦以及激波与旋涡的相互作用,这使得到目前为止还没有适当的理论模型可用于工程计算。本文将介绍用激波管研究激波与固体颗粒相互作用过程的若干实验结果。

## 2 实验装置与实验方法

图 1 示出了实验装置。用激波管的低压段(大气状态)作为实验段。激波管的内径为 80mm,在激波管上安装有传感器 CH6、CH5 和 CH4 等,用来测量端壁和侧壁的压力以及激波速度。压力信号经由电荷放大器被送往一台示波器。图中还给出了各传感器之间的距离尺寸。实验时固体颗粒被放置在管

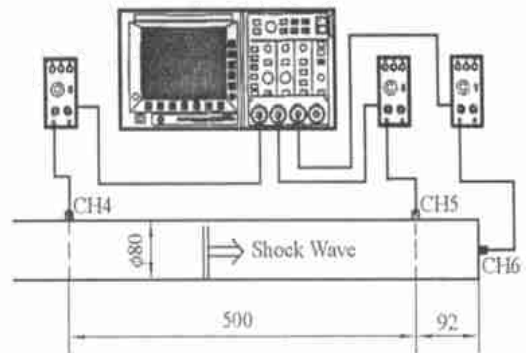


图 1 激波管及压力测量系统

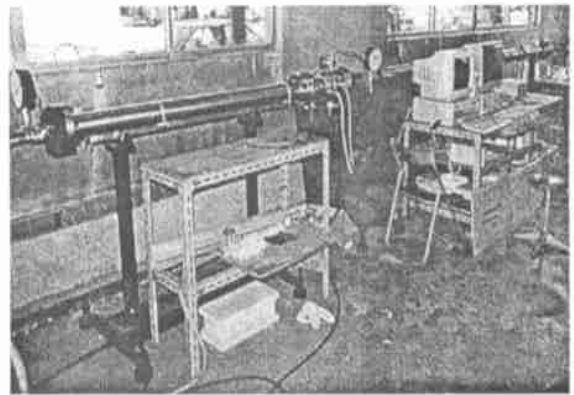


图 2 激波管实验装置照片

\* 来稿日期:2002-06-25 修回日期:2003-01-10

第一作者简介:施红辉,男,1962年生,中国科学院力学研究所教授、博导;研究方向:多尺度复杂流动的流体力学、液体射流及气泡动力学与空蚀流、激波与多相介质的相互作用、固体材料的侵蚀侵蚀机理。

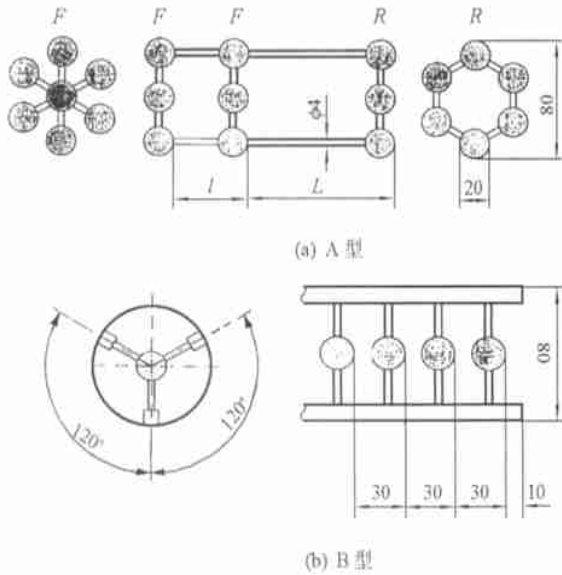


图 3 试验用的固体颗粒模型

末端。图 2 示出了实验装置的照片。图 3 示出了实验用的固体颗粒模型。模型分为 A 型和 B 型,它们全由直径为 20mm 的铝合金球和直径为 4mm 的不锈钢棒组成。A 型模型由紧贴激波管端壁的一系列 R 列和若干列 F 列的颗粒组成,其中 F 列由中心球体和与中心对称的六个球体组成,而 R 列由与中心对称的六个球体组成(没有中心球体)。从 R 列颗粒到第一排 F 列颗粒的距离  $L$  一般选为 200mm, F 列之间的距离  $l$  按 50mm 或 100mm 间隔来选取,即:  $l = 50 \times n$  或  $l = 100 \times n$ 。这里  $n$  是 F 的列数,如果  $n = 0$ ,就意味着只有一排 F 列。本文实验中所用的 B 型模型由四个等间距的球体组成,球体被放射状的不锈钢骨架固定。整个 B 型模型的右端紧贴着激波管端壁。

### 3 实验结果

图 4 的纹影照片示出了马赫数为 1.43 的激波通过在一排的两个对向的球体时的过程。图中的球体是 10mm 直径的铝合金球。在图 4(a) 中可以看出入射激波已出现在球的左侧。在图 4(b) 中入射激波正好处于两球之间,而且可以看见由两个球体反射的激波。在图 4(c) 中,从两个球反射回来的激波相互干涉,形成了 A-B-B-A 的马赫反射波系,此时入射激波已趋近激波管的端壁。注意此时球体后面的尾迹区开始出现。等到入射激波被激波管端壁反射回来时(图 4(d)),尾迹区的紊流已发达起来。在图 4(e) 中,反射激波通过尾迹区再次到达两球之间,

尾迹区的紊流被激波强化。在图 4(f) 中,反射激波已推进到左边远离球体,流场变得相对均匀。

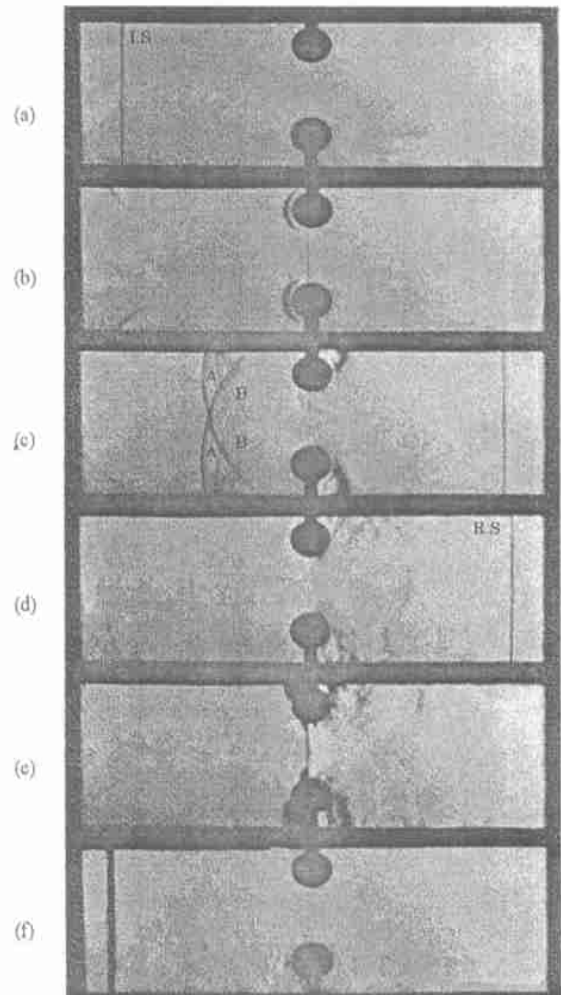


图 4 激波与并排两个球体的相互作用  
球体直径 10mm, 激波马赫数 1.43

图 5 的纹影照片示出了马赫数为 1.43 的激波通过前后两个直径为 20mm 的半球体时的过程。在通过第一个半球后,激波发生衍射(图 5(a)-图 5(b))。衍射激波与第二个半球接触后(图 5(c) 中所示的( )) 变成反射波向第一个半球后的尾迹区推进(图 5(d)-图 5(e))。同样,激波与尾迹区的相互作用导致了复杂的流场(图 5(f)-图 5(i))。图 5(i) 中的( ) 表示入射激波已通过第二半球。

图 6 是压力测量的结果。固体颗粒是  $L$  等于 200mm 及  $n$  等于零时的 A 型模型。图中所示的 0.094mm ~ 0.500mm 是每次实验时激波管高低压段之间的铝隔膜的厚度,它们在破膜后产生的激波的马赫数为 1.42 ~ 1.9(图 7)。先看从侧壁 CH5 测出的压力波形。左边的五张图是在不同的马赫数下在空气中的压力波形,右边的五张图是对应的在相同或相近马

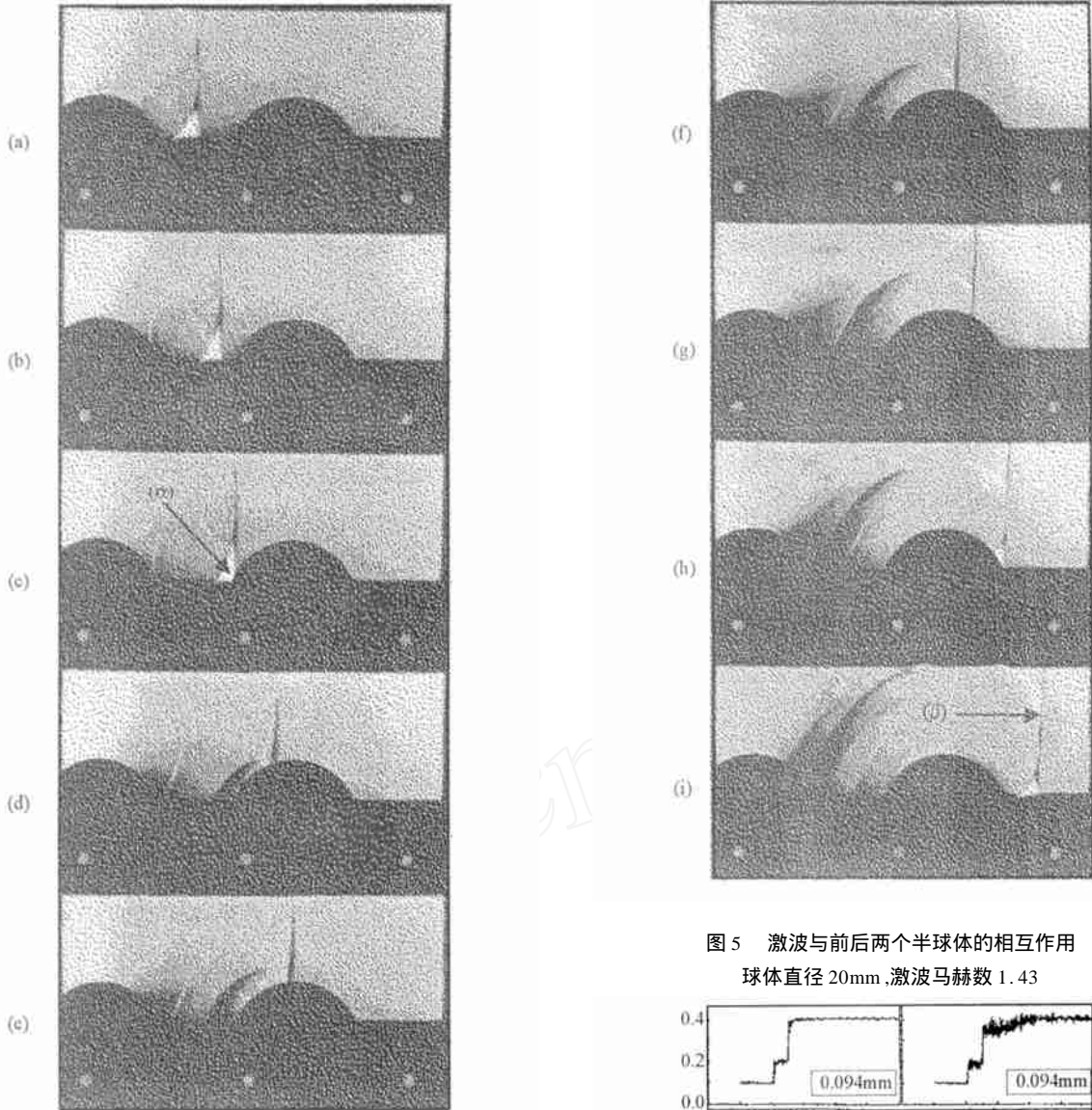
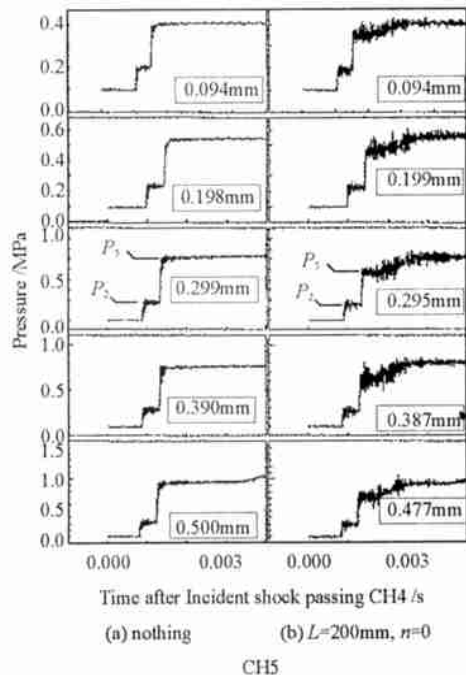


图 5 激波与前后两个半球体的相互作用  
球体直径 20mm,激波马赫数 1.43

赫数下在颗粒群中的压力波形。 $P_2$  和  $P_5$  分别是入射激波和反射激波后的压力。从图中可以看出,颗粒群中的压力出现了高频振荡,这是因为激波与颗粒群相互作用时出现了复杂的激波反射、衍射以及激波与尾迹区旋涡的干涉。再看从端壁 CH6 测出的压力波形。CH6 测出了颗粒群的端壁压力  $P_{max}$  高于在空气中的端壁压力  $P_5$ ,增幅额达到 1.5 到 2 倍。 $P_{max}$  的出现,是因为激波在激波管端壁聚焦的缘故。

图 7 整理了入射激波马赫数与端壁压力的关系。这里的端壁压力是图 6 中示出的在  $P_{max}$  之后的周期  $T$  内的平均压力。该实验是在矩形激波管内进行的。固体颗粒类似于图 3 所示的 A 型模型,但是由三列等间距的按对角线对称布置的四个球体组成,中心的球体和对角线上的球体均为 10mm 直径的铝合金球。各列间距有 10, 15, 25 和 30mm。从图 7 可以看出,增加颗粒的间距,将使压力降低。图 7 中说



明实验数据符号的 Block-1 是指图 3 所示的 A 型固体颗粒模型。Block-1 后面的五位数字,例如 10315 中的头两位数 10 是指 10mm 直径的铝合金球,中间的

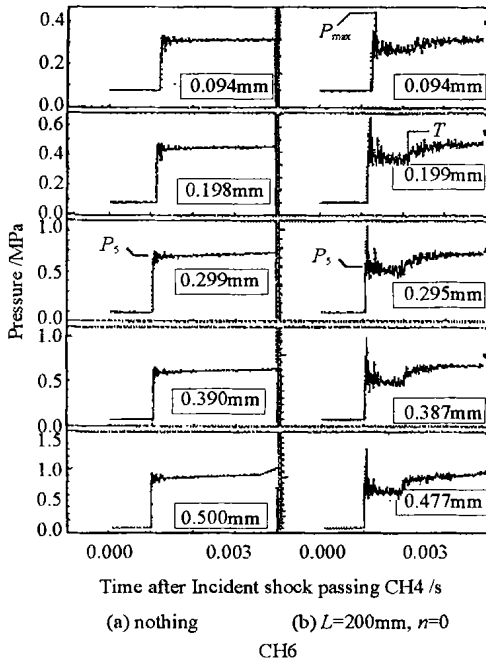


图 6 模型 A 的压力测量结果。CH5:侧壁压力,CH6:端壁压力

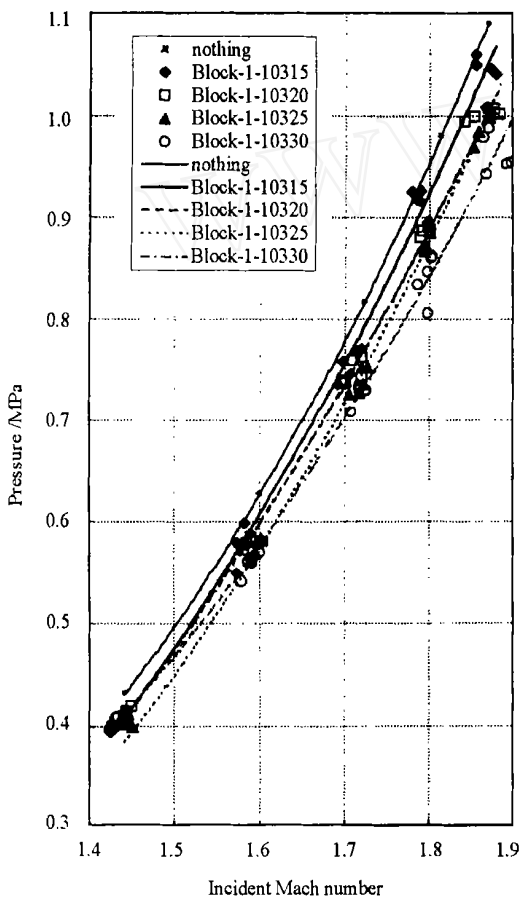


图 7 颗粒间距对端壁压力的影响

一位数 3 是指三列固体颗粒,后面的两位数 15 是指各列间距为 15mm,依此类推。图 8 示出了 B 型模型的实验结果。可以发现 B 型颗粒对端壁压力并不造

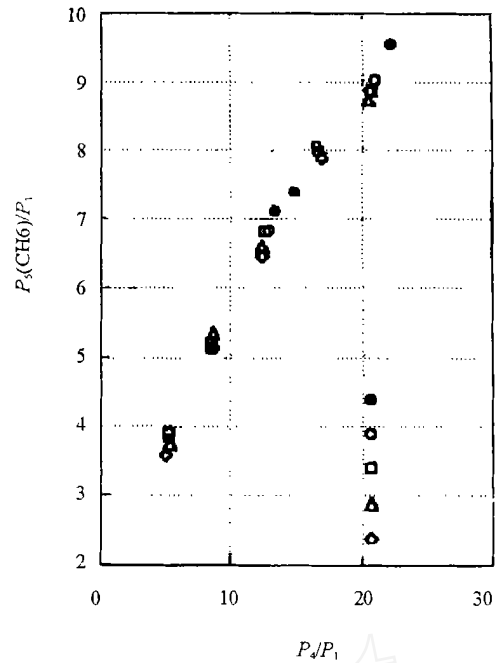


图 8 模型 B 的压力测量结果

成影响。所以,颗粒群是否对压力有影响要取决于颗粒数、颗粒群结构等因素。图 8 的横坐标与纵坐标中的物理量  $P_1$  是激波管低压段的压力,在本实验中为大气压;  $P_4$  是激波管高压段的压力,它也被称为破膜压力。在已知气体性质的情况下,测量不同  $P_4/P_1$  时的激波马赫数及压力的变化状况,是常用的试验方法<sup>[6]</sup>。

## 4 结论与讨论

激波与固体颗粒群的相互作用过程是一个典型的非线性力学过程,其中出现了激波的复杂反射、衍射、聚焦以及激波与尾迹区旋涡的干涉等现象。因此颗粒群中出现了压力的高频振荡和压力增幅。不同的颗粒群的构造可以导致不同的气体压力。

本文的工作强调了用激波管研究激波与固体颗粒群的相互作用,是探讨可压缩性气固两相流的方便的途径之一。尽管本文所用的颗粒模型是多球刚性组合体,不能排除连接球体的不锈钢骨架对绕流的干扰。但是,用这种方法可以检查在超音速气流中颗粒群内部的任意组合对气动力的影响,而通过放置离散颗粒的方法是难以达到此目的的。

到目前为止,在计算超音速气流中颗粒轨迹时所用的阻力系数,基本上使用的是单个颗粒(球体)的实验数据。这些数据要么是从超音速风洞中的绕流实验来获得的<sup>[7]</sup>,或者是在自由飞行靶上通过测

量飞行体的速度来获得的<sup>[8]</sup>。涉及超音速气流中颗粒群的阻力系数时,因为出现了激波与激波的干涉、激波与旋涡的干涉等非线性因素,单个颗粒的阻力系数不一定能推广到颗粒群的计算。换句话说,此时若仍然使用单个颗粒的公式,会造成多大误差的问题是必须回答的。进行颗粒群的自由飞行靶实验是不现实的,而运转超音速风洞是耗资较大的工作。所以,利用激波管这一方便的实验手段,不但能迅速进行先期的实验工作,而且能配合超音速风洞的实验,取得对可压缩性气固两相流的完整认识。

### 参 考 文 献

- 1 王柏懿,王超,戚隆溪,平面激波在含灰方腔中的绕射与反射[J], 自然科学进展,2001,11(1): 8~12
- 2 范宝春,雷勇,赵振平,激波与堆积粉尘相互作用的实验和理论研究[J],实验力学,2002,17(1): 77~81
- 3 浦以康,胡俊,贾复,高炉喷吹用烟煤煤粉爆炸特性的实验研究[J],爆炸与冲击,2000,20(4): 303~312
- 4 洪滔,铝颗粒在激波后气流作用下的点火[J],爆炸与冲击,2002,22(1): 36~39
- 5 Igra O, Takayama K, Shock tube study of the drag coefficient of a sphere in a non-stationary flow[J], Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 1993, 442(8): 231~247
- 6 Gaydon A G, Hurler I R, The shock tube in high-temperature chemical physics[M], Chapman and Hall, London, 1963
- 7 Shapiro A H, The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow, Vol. II[M], The Ronald Press Company, New York, pp. 880-888, 1954
- 8 Charters A C, Thomas R N, The aerodynamic performance of small sphere from subsonic to high supersonic velocities[J], J. Aeronaut. Sci., 1945, 12(Oct.): 468~476

www.cnki.net

The problem of holes has to be faced in studying its influence on fracture characteristics. In the past, researches about holes problem focused on the effective moduli and strengths, and had made some theoretic achievement, but there were little reports about the influence of holes on fracture properties except for the toughness enlargement of micro-cracks, fiber and deflexion et al. So the holes influence on fracture is discussed in this paper. Usually, the influence of holes on fracture property is regarded as a positive effect by some researchers for two ways of toughness enlargement, namely, crack tip halt for decreasing singularity and ductile enlargement of materials. The first one can only be discussed in qualitative analysis, and the second one can be researched in quantitative analysis.

Based on the above cognition, we first investigate shapes and layout of holes in the braided structure, and make out a model of hole. Secondly, for the complicated shape of holes, the material effective moduli can only be drawn up by the twice homogenization of engineering methods, and comparing with the test results, its results are satisfactory. Then the increment of stress intensity factor  $K$  and its controlling section  $r_p$  are analyzed with the volume content of holes in 3D braided CMC. At last, energy release rate  $G$  is quoted to describe the fracture toughness increment of holes to 3D braided CMC in a figure. Obviously, there is a conclusion that toughness increment of holes is less efficient.

Keyword: 3D braided CMC, Fracture toughness, Hole, Mixing rule, Effective cracks, relative rate of toughness enlargement.

## Using Shock Tube to Investigate Supersonic Gas-Solid Two-Phase Flow

*Shi Honghui*

(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The compressible gas-solid two-phase flow is investigated in a shock tube. The shock attenuation caused by solid particles is measured. The shock interaction with the particles is visualized using the schlieren photography. Different structures of particles are tested. It is found that the non-linear aerodynamics is a key factor.

Keywords: gas-solid two-phase flow, shock wave, pressure, visualization, non-linear aerodynamics.

## Hybrid Control of Earthquake Excited Nonlinear Structures Using Liapunov's Theory

*Pan Ying*<sup>1</sup> *Wang Chao*<sup>1</sup> *Chen Jianbin*<sup>2</sup>

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)<sup>1</sup> (Tongji University, Shanghai 200433)<sup>2</sup>

**Abstract:** The paper is concerned with the hybrid control of earthquake excited high-raised buildings. The building is modeled as a shear-wall type structure with non-linear hysteretic restoring forces after the structure enter the period of nonlinearity and plasticity. A passive baseisolation is combined with actuators applied at the basement of the structure. A candidate for Liapunov function is found out based on the theory of energy. A non-linear control law is designed following the theory of liapunov, since small residual deformations have to be toler-