

含灰气体激波结构的实验观察<sup>1)</sup>

俞鸿儒 林建民 袁生学 李仲发

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 利用激波管实验对含灰气体激波结构作了研究。在灰粒负荷率低于0.4及激波马赫数低于1.5的范围内测取了压力、激波速度及灰粒浓度。激波后冻结及平衡压力可用R-H关系很好地加以计算,但松弛区长度则较基于球定常运动的计算值短得多。实验中观察到耗散激波结构并发现灰尘的存在减少气流中的压力脉动。激波传播速度与基于“等效气体”模型计算值相符。

## 符 号 表

$a$ 气体声速	$l$ 微粒云厚度
$R$ 含灰气体常数	$\Gamma$ 含灰气体比热比
$A_p$ 微粒横截面积	$\dot{m}$ 气体质量流率
$t$ 时间	$\delta = C/C_p$
$C$ 微粒材料比热容	$\dot{m}_p$ 微粒云质量流率
$T$ 气体温度	$\rho$ 气体密度
$T_p$ 微粒温度	$M_s$ 激波马赫数
$C_p$ 气体等压比热容	$\rho_p$ 灰粒材料密度
$u$ 气体速度	$n_p$ 微粒数密度
$C_D$ 阻力系数	$\sigma$ 灰粒浓度
$u_p$ 微粒速度	$Nu = \frac{hD}{K}$ 努赛数
$D$ 微粒直径	$\tau_0$ 速度松弛时间
$V$ 电压	$P$ 压力
$E$ 消光系数	$\mu$ 气体粉性系数
$x$ 距离	$R$ 气体常数
$h$ 传热系数	$\eta = \dot{m}_p/\dot{m}$
$X = x/\beta$	下标
$I$ 透光量	0 波前或初始值
$\alpha$ 含灰气体声速	$d$ 暗值
$k$ 公式(2)系数	$f$ 冻结值
$\beta = a_0\tau_0$	$e$ 平衡值
$K$ 热导系数	
$\gamma$ 气体比热比	

## 一、前 言

含灰气体中的激波结构已经有许多研究者<sup>[1-14]</sup>作过详细的理论研究及数值分析。这

本文系编委林同骥推荐,于1983年7月1日收到。

1) 谨以此文纪念导师郭永怀教授逝世十五周年。

些工作是在若干理想化假定下进行的. 其中最基本的有微粒均匀散布在完善气体介质中, 微粒云认为是连续体; 两相之间动量及能量交换仅考虑孤立刚性球定常运动的阻力及对流传热等. 然而除了以测定微粒云有效阻力系数为目的的实验外<sup>[11,12]</sup>, 含灰气体激波结构的观察结果很少.

本文报道在激波管中对这种激波结构以及含灰激波管驱动特性的观察结果.

## 二、实验简述

实验用激波管垂直安装, 驱动段在上. 驱动段长 1.5m, 内直径 84 mm; 被驱动段长 5m, 内直径 185mm. 采用这样粗的管子是为了尽量减轻管壁干扰影响. 观察区在离夹膜处下游 4m 处.

微粒材料为氧化铝, 密度为 3.9—4.0 g/cm<sup>3</sup>, 比热容为 0.73 KJ/kg·K, 形状接近球体但表面不光整. 灰粒从夹膜处附近引射入激波管. 灰粒散布均匀度以及初始扰动量对实验结果有重大影响. 我们将灰粒向上喷射, 在膜片处反射后下降, 灰粒基本上为自由沉降, 散布较均匀. 引射用气量很少, 初始扰动量很低, 实验用气体均为氮气. 激波前为大气压.

除初始状态各种常规静态测量外, 实验过程中测量了沿管轴的激波传播速度、压力及灰粒浓度. 灰粒浓度测量采用消光法. 对灰粒尺度均匀或尺度散布较狭窄的场合, 这是一种简便可靠的方法. 我们选用小功率氦氛激光器作光源, 穿过微粒云的透射光, 按 Bouger 定律<sup>[13]</sup>

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-n_p A_p l E) \quad (1)$$

可求得微粒数密度. 透射光用光电二极管接收. 二极管输出电压讯号与接收的光量成正比. 上式可改写为

$$\sigma(t) = k \ln \frac{V_0 - V_d}{V(t) - V_d} \quad (2)$$

系数  $k$  与微粒形状尺寸、微粒云厚度及光路器件损耗有关. 我们对所使用的各种灰粒用实测标定来确定. 灰粒浓度测量中最严重的困难为灰粒吸附在观察窗玻璃上造成透射光减少. 浓度低及流速低时吸附量少. 本工作中的灰粒浓度测量主要用作灰粒轴向均匀度监察以及提供初始浓度值.

所有动态测量均用瞬态波形记录仪记录, 经讯号分析仪后数字输出或作图.

## 三、含灰气体正激波

如果灰粒浓度不高, 灰粒所占体积可以忽略. 对静止激波可列出如下质量、动量及能量守恒方程

$$\dot{m} = \rho u = \rho_0 u_0 \quad (3)$$

$$\dot{m}_p = \eta \dot{m} = \sigma u_p = \sigma_0 u_{p0} \quad (4)$$

$$\dot{m} u + \eta \dot{m} u_p + P = (1 + \eta) \dot{m} u_0 + P_0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{2} u^2 + C_p T + \eta \left( \frac{1}{2} u_p^2 + C_p \delta T_p \right) = \frac{1}{2} u_0^2 (1 + \eta) + C_p (1 + \eta \delta) T_0 \quad (6)$$

加上气体状态方程

$$P = \rho RT \quad (7)$$

对于求解  $u, \rho, T, P, u_p, \sigma$  及  $T_p$  七个变量, 上述五个方程的方程组尚缺二个方程。

一般将激波分为三个区域分别处理: 在紧靠激波阵面的冻结区, 由于灰粒密度较气体密度高  $10^3$  倍, 激波阵面又极薄, 微粒通过阵面经历的时间很短, 因此冻结区内可以认为灰粒速度及温度被冻结。即

$$u_{pj} = u \quad (8)$$

$$T_{pj} = T \quad (9)$$

将此二式代入 (5)(6) 式, (5)(6) 式中与灰粒有关项均被消去, 方程组化为纯气体激波方程。因此冻结区气体参数, 可由纯气体正激波关系求出。

在激波阵面下游的平衡区, 两相之间经过动量及能量交换已趋平衡, 因此有

$$u_{pe} = u_e \quad (10)$$

$$T_{pe} = T_e \quad (11)$$

将此关系代入 (5)(6) 式并加以交换, 可以看出与纯气体同形式的动量及能量方程的区别在于以含灰气体平衡声速  $\alpha_0 = \left[ \frac{\Gamma}{\gamma(1+\eta)} \right]^{1/2} a_0$  代替  $a_0$ , 以含灰气体比热比  $\Gamma = (1 + \eta\delta)\gamma / (1 + \gamma\eta\delta)$  代替  $\gamma$ 。因此平衡区参数亦可从纯气体激波关系式求出。

对于冻结区及平衡区压力, 有下列关系:

$$\frac{P_j}{P_0} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \left( \frac{u_0}{a_0} \right)^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \quad (12)$$

$$\frac{P_e}{P_0} = \frac{2\Gamma}{\Gamma+1} \left( \frac{u_0}{\alpha_0} \right)^2 - \frac{\Gamma-1}{\Gamma+1} \quad (13)$$

对于冻结区及平衡区气体速度, 分别有下列关系:

$$u_j u_0 = \frac{2\gamma R}{\gamma+1} T_0 + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} u_0^2 \quad (14)$$

$$u_e u_0 = \frac{2\Gamma \bar{R}}{\Gamma+1} T_0 + \frac{\Gamma-1}{\Gamma+1} u_0^2 \quad (15)$$

因为  $\alpha_0, \Gamma$  及  $\bar{R}$  总是分别低于  $a_0, \gamma$  及  $R$ , 因此  $P_e > P_j, u_e < u_j$ 。由质量守恒方程  $\rho_e > \rho_j$ 。至于两区气体温度, 一般差别不大, 究竟孰高孰低, 决定于灰粒与气体比热容的大小。

求解松弛区参数所缺的二个方程, 可利用灰粒与气体之间的动量及能量交换方程。由于对微粒云的阻力及传热规律还缺少了解, 现有分析及数值解均采用孤立刚性球在定常流中的阻力及传热律列出运动及传热方程:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} \frac{C_D}{D} \frac{\rho}{\rho_p} (u - u_p) |u - u_p| \quad (16)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{6KNu}{CD^2\rho_p} (T - T_p) \quad (17)$$

松弛区参数需数值求解。按 No. 201 次实验条件计算求出的灰尘气体激波结构示于图 1。

当来流速度  $u_0 = a_0$ , 则  $M_{ej} = u_0/a_0 = 1$ , 冻结区参数与波前相同。因为  $\alpha_0 < a_0$ ,

$M_{sc} = u_0/a_0 > 1$ , 平衡区参数可与波前不同. 在这种情况下, 可出现无间断面的耗散激波结构.

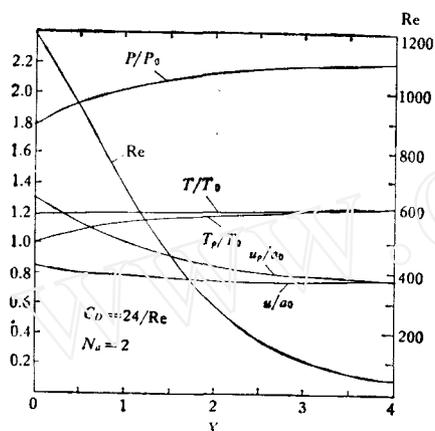
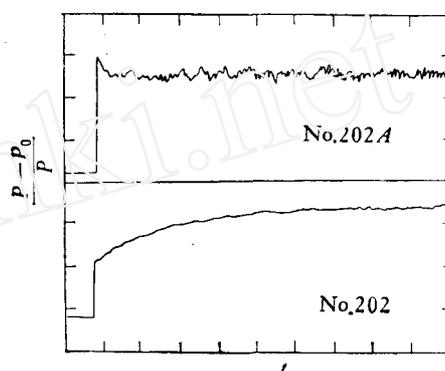


图1 计算求出的含灰气体激波结构  
( $M_{sf} = 1.30$ ,  $\eta = 0.17$ ,  $D = 80\mu\text{m}$ )



50kpa, 0.5ms 每格  
图2 典型的压力记录曲线  
上线: 不含灰  $M_s = 1.44$   
下线:  $\eta = 0.17$ ,  $D = 80\mu\text{m}$ ,  $M_{sf} = 1.24$

#### 四、观察结果

如前所述, 实验中测量了激波传播速度, 压力及灰粒浓度变化过程. 由于激波传播经过光学观察窗后, 灰粒逐渐吸附在窗玻璃上, 造成浓度测量值偏高. 对于自由沉降的灰粒, 吸附不明显, 提供初始浓度数据还是比较准确的. 现以压力测量数据结合激波传播速度及初始灰粒浓度来讨论. 典型的无灰及含灰压力测量曲线见图2.

**1. 冻结区及平衡区压力** 分析结果指出: 冻结区压力  $P_f$  不受灰粒负荷率、尺寸及形状影响. 图3绘入  $\eta = 0-0.4$ ,  $M_{sf} = 1.04-1.5$ ,  $D = 80\mu\text{m}$  及  $55\mu\text{m}$  范围内的实验结果. 图中曲线为按下式

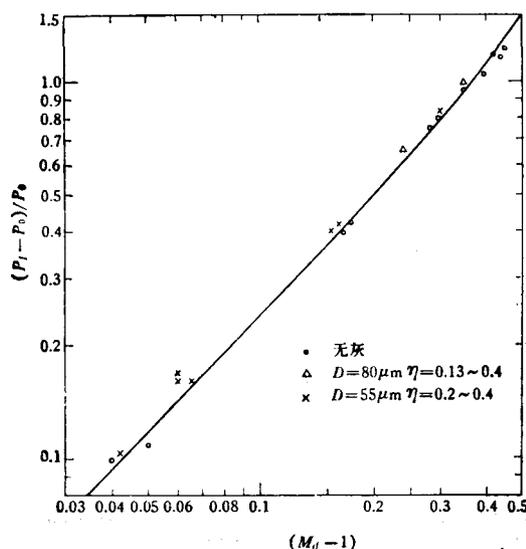


图3 冻结区压力与激波马赫数关系

$$\frac{(P_f - P_0)}{P_0} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} [M_{sf}^2 - 1] \quad (18)$$

计算求出的数值,由图可以看出,观察结果证实理论预见.

平衡区压力与灰粒负荷率有关. 观察结果列于表1. (均为  $80\mu\text{m}$  微粒)

表 1

实验序号	$M_{sf} = \frac{u_0}{a_0}$	$\eta$	$\Gamma$	$\alpha_0/a_0$	$(P_r - P_0)/P_0$		测量值/计算值
					计算值	测量值	
197	1.35	0.13	1.365	.929	1.28	1.31	1.02
201	1.30	0.17	1.356	.910	1.20	1.21	1.01
202	1.24	0.40	1.309	.817	1.48	1.35	.912

表中作比较的计算值系按灰粒负荷率  $\eta$  求出  $\Gamma$  及  $\alpha_0$  后,按下式求出:

$$\frac{(P_r - P_0)}{P_0} = \frac{2\Gamma}{\Gamma + 1} [M_{sc}^2 - 1] \quad (19)$$

由表可以看到,理论预见与观察结果相符. 表中 202 次实验测量值低于计算值是由于弱激波松弛区较长,观察时间不够充足未达平衡区所致.

**2. 松弛区特性** 松弛区状态可由(3)(4)(5)(6)(7)及(16)(17)式数值解出. 计算结果决定于所选用的阻力系数及传热系数值. Rudinger<sup>[9]</sup> 计算表明: 对于速度及压力,  $C_D$  值影响大而 Nu 数影响小. 我们对 No. 197 及 No. 202 次实验条件选  $Nu = 2$ , 而分别选取 Stokes 阻力及拟合标准曲线阻力系数计算出压力变化曲线(图 4a). 由图看出,变化趋势相同,但 Stokes 阻力公式计算出的松弛区很长. 与实验结果相比(图 4b),实验测出的松弛区较两者都短得多.

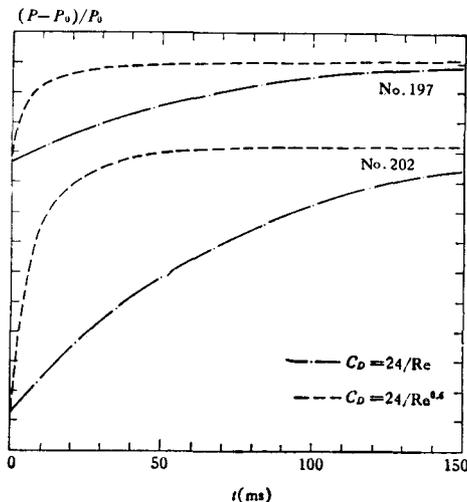


图 4a 不同阻力系数计算结果比较

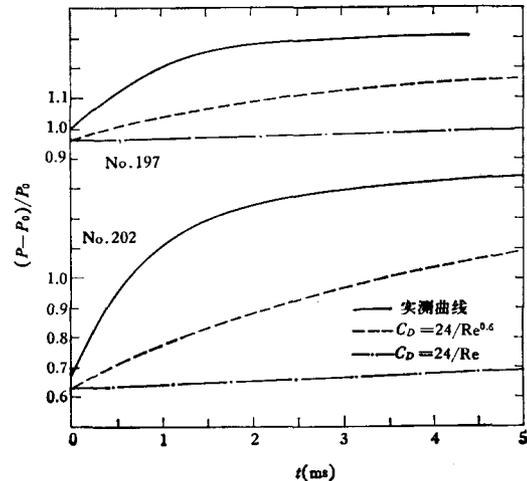


图 4b 计算值与测量值比值

Stokes 阻力计算结果与实验不符的理由很明显,因为上述计算条件下雷诺数远远大于一. 标准曲线阻力公式虽然能代表孤立球定常运动的阻力,但不能反映多微粒尾流干扰影响,微粒形状及表面状态影响,加速度影响等. 由于测量结果与计算结果相差悬殊,松

弛区特性有待深入研究。

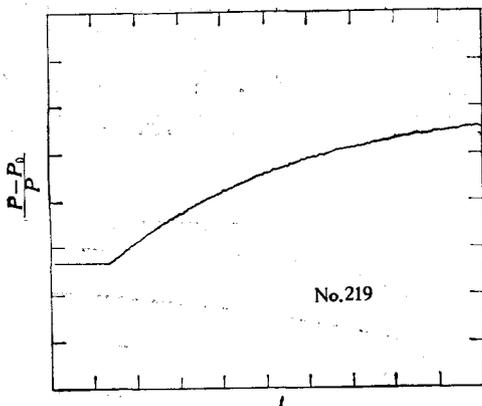
**3. 耗散激波结构** 根据前述分析,当激波传播速度等于气体声速时,将出现无间断阵面的耗散激波。由于激波强度弱及无间断面,产生这种激波及观察都相当困难,我们在 219 次实验中记录下这种激波的压力波形,实验证实存在耗散激波结构(图 5)。

该次实验条件如下: 驱动气体压力 0.54 MPa, 被驱动气体压力 0.1 MPa; 灰粒直径 20—30  $\mu\text{m}$ , 灰粒初始浓度 0.3  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ; 室温 27 $^{\circ}\text{C}$ 。激波速度通过比较安装相隔一定距离的二个压电传感器的波形求出,测得激波传播速度为 355 $\text{m}/\text{s}$ 。

**4. 灰粒对扰动的阻尼** 图 2 上线是无灰时的压力曲线,下线是含灰时的压力曲线。除了有无灰粒外,其它实验条件全部相同。可以看到上线脉动明显高于下线。这种脉动一般是由湍流脉动及管壁不平引起的。散布在气体中的微粒对这些扰动有明显的抑制作用。

**5. 含灰气体激波管驱动特性** 目前,含灰气体激波管用来作各种研究应用的日渐增多,在设计这种激波管时,达到预定要求所需的驱动能力是主要关心的问题之一。

只要激波传播距离或者更确切地说,激波与分界面的间隔大于松弛区长度,则分界面处的压力及速度就等于平衡区压力及速度。含灰气体激波管参数的计算只要用含灰气体热力学参数代替纯气体参数,即可由经典激波管计算公式求出驱动参数。



25 kpa, 0.5ms 每格  
图 5 耗散激波压力曲线

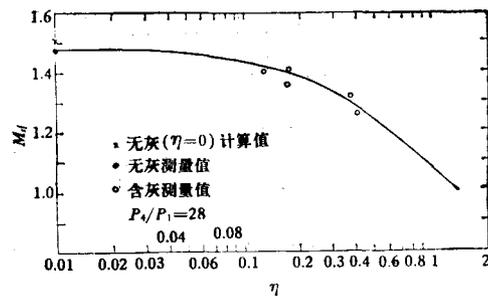


图 6 灰粒负荷率与激波马赫数关系

图 6 给出本实验所用变截面激波管计算曲线与实验测量结果。图中数据取观察区的激波传播速度。由图得出按上述模式计算值与测量结果相符。

## 五、结 论

1. 对于冻结区及平衡区参数,理论分析能正确加以预计。
2. 对于松弛区,选用孤立刚性球定常运动的阻力及传热系数计算求出的结果,其变化趋势与观察结果相符。但定量差别很大,应进一步加以研究。
3. 当激波以波前气体声速传播时,观察到无间断阵面的耗散激波。证实了理论预见。
4. 灰粒具有阻尼气流中扰动的作用。

5. 离膜片较远处的激波强度可利用等效气体热力学参数从经典激波管公式加以预计。

李振华、浦以康两同志参加了本实验所用设备的设计及建造,在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Carrier, G. F., Shock waves in dusty gas, *Jour. of Fluid Mechanics*, 4(1958), 376.
- [2] Kliegel, J. R. One dimensional flow of a gas-particle system IAS paper, 60—5 (1960).
- [3] Marble, F. E., Dynamics of a gas containing small solid particles, 5th Combustion and Propulsion AGARD Coll. (1963).
- [4] Kriebel, A. E., Analysis of normal shock waves in particle laden gas, *Trans. ASME, Jour. of Basic Eng.*, 86(1964), 655—665.
- [5] Rudinger, G., Some properties of shock relaxation in gas flows carrying small particles, *Physics of Fluids*, 7(1964), 658—663.
- [6] Lu, H. Y. & Chun, H. H., Dynamics of gas containing evaporable liquid droplets under a normal shock wave, *AIAA Jour.*, 4, 6(1966), 1008—1011.
- [7] Varm, T. D. & Chopra, N. K., Analysis of normal shock waves in a gas-particle mixture, *ZAMP*, 18(1967), 650—660.
- [8] Schmitt-Von Schubert, B., Struktur statt nearer Verdichtungsstosse in Gasen mit festen Teichen, *ZAMM*, 50 (1970), 671.
- [9] Narkis, Y. & Gal-or, B., Two-phase flow through normal shock, *Trans. ASME, Jour. of fluid Eng.*, 971(1975).
- [10] Krier, H. & Mozaffarian, A., Two-phase reactive particle flow through normal shock waves, *Int. Multiphase Flow*, 4, 1(1978), 65—79.
- [11] Selberg, B. P. & Nicholls, J. A. Drag coefficient of small spherical particles, *AIAA Jour.*, 6 (1968).
- [12] Rudinger, G., Effective drag coefficient for gas particle flow in shock tube, *Trans. ASME, Jour. of Basic Eng.* 92(1970).
- [13] Hodkinson, J. R., *Aerosol Sci.*, Ed. Davies (1966).

## EXPERIMENTAL OBSERVATION OF THE STRUCTURE OF SHOCK WAVES IN DUSTY GAS

Yu Hongru Lin Jianmin Yuan Shengxue Li Zhongfa

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

### Abstract

The structures of shock wave in dusty gas are studied by shock tube experiments. Pressure, shock wave velocity and dust concentration are measured under the condition that the dust loading ratio is less than 0.4 and the shock Mach number is less than 1.5. The frozen and equilibrium pressures behind the shock wave are well described by the Rankine-Hugoniot relation. But the relaxation length is significantly shorter than that calculated from drag of sphere at steady motion. And the disperse shock wave in dusty gas are observed. It is found that the presence of dust decreases the pressure fluctuation in the flow. The propagation velocity of shock wave agrees with the result of the model analysis on a "effective gas".