

沉积粉尘的激波点火*

陆守香^a 黄涛^b 龙新平^b 范宝春^c

(a. 淮南矿业学院化学工程系 安徽淮南市 232001)

(b. 中国工程物理研究院化工材料研究所 成都 610003)

(c. 南京理工大学动力工程学院 南京 210094)

摘要 采用瞬态阴影技术及红外光电传感器技术实验研究了沉积玉米粉的激波点火过程,并对此进行了理论分析。实验与理论分析结果表明,激波掠射沉积粉尘床后,粉尘颗粒先上扬到一定高度后才点火,颗粒的点火延迟时间与激波波前马赫数、气相氧气含量等因素有关。另外,沉积粉尘的激波点火延迟时间比相同条件下的悬浮粉尘激波点火延迟时间长。

关键词 点火 激波 沉积粉尘 粉尘爆炸

中图法分类号 O381

1 引言

粉尘爆炸是严重的工业灾害。局部悬浮粉尘意外爆炸产生的冲击波掠过沉积粉尘时,会有大量的沉积粉尘卷入空气流,并参与二次爆炸,从而造成更严重的破坏。为揭示这一现象发生的内在机制,人们从70年代开始至今已广泛研究了激波诱导沉积粉尘上扬的机理^[1~3],并在近年研究了沉积粉尘的激波点火问题^[4~5]。对后一问题的研究主要是在实验方面,如 Boiko^[4]、Wlinski^[5]等利用激波管实验技术测量了沉积麦粉、褐煤粉的激波点火延迟时间,而相应的理论研究尚未见报道。

我们从实验和理论两方面研究激波对沉积粉尘的点火过程。采用新设计的水平激波管和瞬态阴影技术、新型红外光敏传感技术研究了激波后沉积玉米粉的点火过程,并将实测的激波点火延迟时间与理论预测值进行了对比。文中还详细讨论了沉积粉尘激波点火的基本过程及其与悬浮粉尘激波点火过程的差异。

2 实验研究

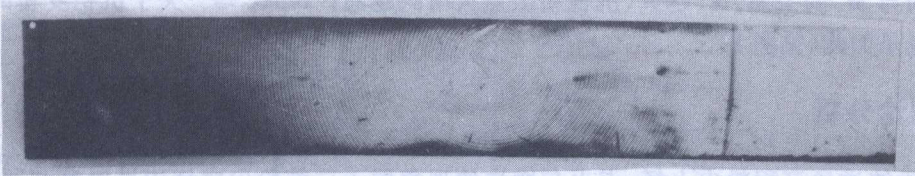
实验装置及测量系统在文献[6]中有详细介绍。方形水平激波管全长1.9m,截面为20mm×20mm,其驱动段为长0.1m的高压燃烧室,实验段有0.02m×0.2m的观察窗口。被驱动段及实验段有多点传感器安装孔,被驱动段上盖可打开,以便铺粉。

实验时,先将粉尘均匀铺于激波管被驱动段和实验段的底壁,驱动段内无烟火药点火燃烧产生高温高压气体,使膜片破膜并在被驱动段内形成一定强度的激波,此激波掠过铺于底壁的玉米粉尘床,使玉粉尘上扬、点火燃烧。

* 国家自然科学基金及中国工程物理研究院科学技术基金资助。
1995年2月13日收到原稿,8月23日收到修改稿。

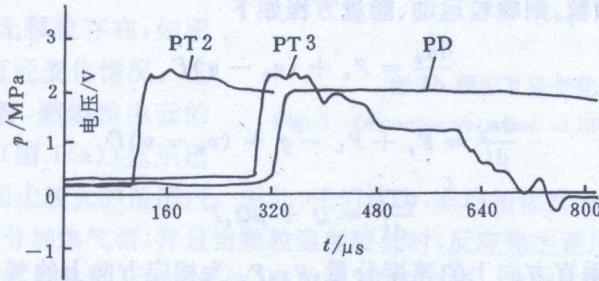
采用压电测压系统测量激波速度和压力,瞬态阴影系统拍摄激波与粉尘床相互作用过程,红外光敏二极管测量颗粒的点火时间。各系统测量原理见文献[6,7]。

实验所用的玉米粉平均直径为 $15\mu\text{m}$,图 1 为激波波前马赫数 $M_s=4.6$ 的激波掠过玉米粉尘床后的实验记录。图 1(a)为激波诱导的燃烧玉米粉尘云的瞬态阴影照片,如同



(a) 瞬态阴影照片

(a) Transient shadow photograph .

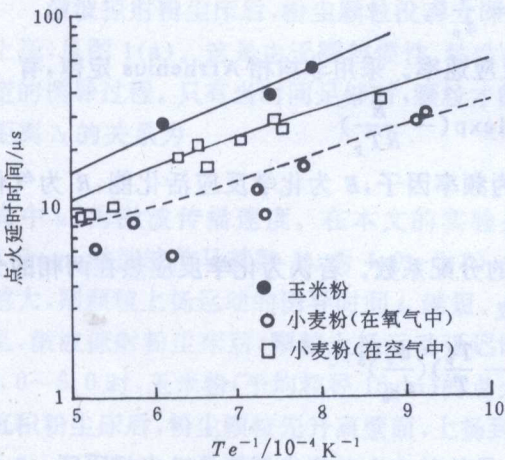


(b) 压力信号与颗粒反应发光信号

(b) Pressure history and output voltage of the photodiode

图 1 激波掠射玉米粉尘床的实验记录 ($M_s=4.6$)

Fig. 1 The typical experimental records



● Cornstarch; ○ Wheat (in oxygen); □ Wheat (in air)

图 2 沉积粉尘的激波点火延迟时间

Fig. 2 Shock ignition delay of dust layers

激波掠过惰性粉尘床一样,激波掠射可燃的玉米粉尘床后,粉尘颗粒飞离壁面进入气流,在一定的范围内,离激波阵面愈远,颗粒上扬高度愈大。不过,其阴影照片的轮廓不如惰性颗粒的照片^[6]清晰,这可能是可燃粉尘燃烧及其自身发光产生的效应。图 1(b)为相应条件下实验记录的压力信号和光电管输出信号,其中 PT2 和 PT3 分别为 2 号和 3 号压电传感器输出的压力信号,PD 为光电管输出的电压信号,它反映了颗粒发光强度的变化。光电管与 3 号压电传感器布置于激波管同一截面上^[6]。由高速动态信号分析仪对信号 PT2、PT3 和 PD 进行数

据处理,可得到激波速度及颗粒点火延迟时间。实验测得的沉积玉米粉激波点火延迟时间如图2所示,图中实验点为多次实验结果平均值。图2反映了沉积粉尘点火延迟时间与激波阵面上气相温度 T_e 的倒数的关系。由于激波阵面上无粉尘颗粒存在,故 T_e 可由气体激波关系式确定,它依赖于激波波前马赫数 M_s ,所以,图2实际上也反映了沉积粉尘点火延迟时间与 M_s 的关系, M_s 越大,沉积粉尘点火时间越短。Boiko等^[4]关于沉积麦粉的实验结果也是如此(见图2)。

3 理论分析

激波诱导沉积粉尘上扬、点火与燃烧的现象属于二维粉尘燃烧边界层流动问题,笔者等人对此已作过理论描述^[7]。

假设颗粒只受剪切升力(Saffman力)、气动阻力及重力的作用,颗粒非均相化学反应热同时加热气体和颗粒,则颗粒运动、能量方程如下

$$\frac{du_p}{dt} = F_r + (u_p - u)\Gamma \quad (1)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = F_r + F_L - g + (v_p - v)\Gamma \quad (2)$$

$$\frac{dT_p}{dt} = Q + \beta Q_r \Gamma \quad (3)$$

其中: u 、 v 为水平和垂直方向上的速度分量, F_r 、 F_L 为相应方向上的气动阻力分量, F_L 为剪切升力, Q 为气体与颗粒间对流传热, Q_r 为非均相反应热效应, T 代表温度。下标“p”代表颗粒,无下标代表气相。 g 为重力加速度。方程(1)、(2)右边最后一项表示因颗粒非均相反应而引起的动量变化,方程(3)最后一项表示相应反应热效应对颗粒的贡献,其中 Γ 为颗粒质量变化率。

$$\Gamma = \frac{b}{d_p} R_s \quad (4)$$

式中: d_p 代表颗粒直径, R_s 为非均相化学反应速率。采用非均相Arrhenius定律,有

$$R_s = Y_{O_2} A \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right) \quad (5)$$

其中: Y_{O_2} 为颗粒表面附近的氧气分数, A 为频率因子, E 为化学反应活化能, R 为气化常数。

β 为非均相反应热在气体与颗粒之间的分配系数。若认为化学反应热在两相的分配与两相温度差及颗粒已气化质量有关,可取

$$\beta = \left(1 - \frac{T_p}{T}\right) \left(\frac{d_p}{d_{p_0}}\right)^3 \quad (6)$$

其中 d_{p_0} 为颗粒的初始直径。

由此模型对沉积玉米粉和麦粉的点火延迟时间进行理论预测,其结果如图2曲线所示,可见,理论预测值与实验值较为符合。由图2还可看出,沉积粉尘在氧气中比在空气中的点火延迟时间短,这是因为气相中氧气含量变化会影响气相输运特性,改变气固两相间的对流传热速率,从而影响颗粒的温度历程和点火时间;此外,氧气含量变化也会影响颗

粒化学反应特性,改变非均相化学反应热的释放速率,引起颗粒点火过程的变迁,使颗粒点火时间发生变化。因此,在本文的理论模型中,考虑了化学反应热对颗粒的加热效应。Sichel 等人^[8]在研究悬浮粉尘的激波点火时也考虑了此效应,并认为化学反应热全部用于加热颗粒,这相当于本模型中的 β 值取为 1。在讨论本文的问题时,若取 β 为 1,则点火后颗粒燃烧过程迅速完成,颗粒迅速消失。因此,颗粒只存在于壁面附近区域,而稍稍远离壁面的区域即无颗粒存在,如图 3 所示的颗粒直径变化情况。这与实验结果不符,燃烧粉尘云的瞬态阴影照片(图 1(a))显示出

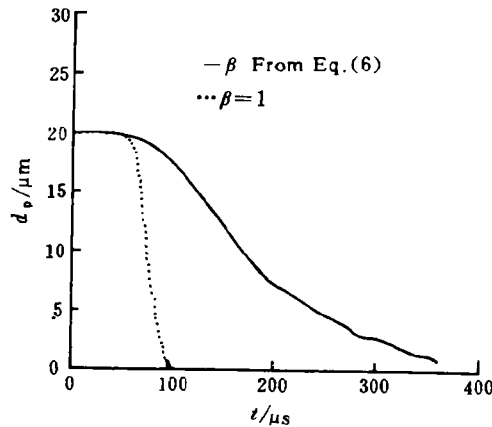


图3 颗粒直径变化过程

Fig. 3 Diameter variation of lifting particulates

颗粒存在于壁面上较大的范围内。因此,我们认为,非均相化反应热只有一部分用于加热颗粒,而另一部分加热气相,并且当颗粒温度较低时,反应热主要用于加热颗粒,当颗粒温度升高后,反应热主要用于加热气体,即按(6)式取 β 值。这样,不仅使沉积粉尘激波点火延迟时间的理论值与实验值较为一致,也保证了粉尘云高度在两者上的一致。

4 讨论

4.1 激波后沉积粉尘的运动延迟

激波掠射粉尘床后,粉尘颗粒没有立即上扬,而是经过一定的延迟时间后才开始显著上扬,见图 1(a)。这是由于颗粒惯性、粘性等诸因素的作用,颗粒由静止开始运动要有一定的诱导过程。只有当时间足够时,颗粒才能显著上升。颗粒运动诱导时间 t_c 与上扬延迟距离 Δ 的关系为

$$\Delta = u_s t_c \quad (7)$$

式中 u_s 为激波传播速度。在本文的实验条件下(玉米粉平均粒径为 $15\mu\text{m}$,粉尘床厚 0.5mm ,激波波前马赫数 M_s 为 $4.0\sim 5.0$),上扬延迟距离约 $8\sim 10\text{mm}$ 。激波传播速度 u_s 越大,则颗粒上扬运动的诱导时间 t_c 越短。 M_s 在 $4.0\sim 5.0$ 之间时, t_c 约 $5\sim 7\mu\text{s}$ 。由此可见,激波掠射粉尘床后,颗粒上扬运动延迟时间大大小于其点火延迟时间,因为当 M_s 在 $4.0\sim 5.0$ 时,玉米粉(平均粒径 $15\mu\text{m}$)的点火延迟时间在 $25\sim 55\mu\text{s}$ 之间。所以,激波掠射沉积粉尘床后,粉尘颗粒先升高壁面,上扬到一定高度后才点火燃烧。

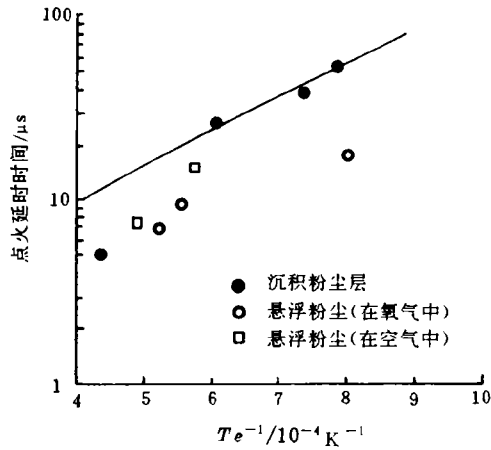
4.2 沉积粉尘与悬浮粉尘激波点火的差异

与相同条件下的悬浮粉尘^[9]相比,沉积粉尘的激波点火延迟时间长一些,如图 4,这是因为激波后两种情况下颗粒流动特征存在较大的差异。人们已对悬浮粉尘受激波作用后的流动特征及点火过程作了广泛而深入的研究^[8~10]。激波与悬浮粉尘作用后,气体与

颗粒之间的速度和温度滑移立即达到最大,即气固之间从激波作用开始就存在较大的动量和能量输运,使颗粒获得较大的加热速率。而且,在气固两相速度滑移足够大的情况下,悬浮颗粒之前还存在着弧激波(bow shock wave),使颗粒升温更快,颗粒更易点火^[8,10]。激波与沉积粉尘作用后,粉尘颗粒由壁面向上运动,其运动过程和温度历程与其经过的局部气相流场有关。由于粘性作用,气相流场的特征参数分布受壁面条件约束,图5为激波掠过沉积粉尘床后气相速度和气相温度剖面。在壁面上,气体与颗粒的速度、温度相同,均为壁面的速度、温度值。对于传热壁面,激波后的壁面温度 T_w 由下式近似确定^[2]

$$T_w = T_0 + T_r \frac{E(p_0 x)^{0.8} M_s^{1/2}}{0.38} \left(\frac{u_s}{u_0}\right)^{4/5} \quad (8)$$

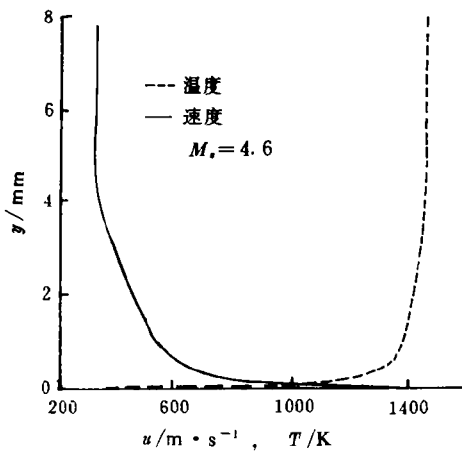
其中: T_0 、 p_0 为波前温度和压力, T_r 为恢复温度, E 为壁面材料参数, u_s 为波后主流速度, x 为波后离激波阵面距离。由于壁面传热,气相在壁面上的温度 T_w 与激波前气体温度



● Layer; ○ Cloud (in oxygen); □ Cloud (in air)

图4 沉积粉尘与悬浮粉尘激波点火时间对比

Fig. 4 Comparison of shock ignition delay between a dust layer and a suspension



..... Temperature; —— Velocity

图5 激波掠过沉积粉尘床后的气相参数
Fig. 5 Profiles of gas parameters behind a shock sweeping a dust layer

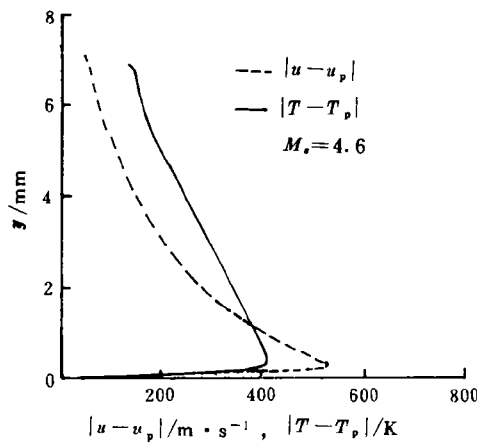


图6 激波掠过沉积粉尘床后的气固参数滑移
Fig. 6 Parameter slides between gas and particulate phases behind a shock sweeping a dust layer

T_0 比较接近,故有图5所示的气相温度剖面。颗粒由壁面上扬穿过这样的气相流场时,气体与颗粒间的速度和温度滑移由小渐大,断而又减小,如图6所示。所以,此情形下的气固两相间输运效应不如悬浮粉尘条件时强烈,上扬的颗粒在点火前的诱导阶段也就不能获得最大的加热速率。故而,与悬浮粉尘相比,沉积粉尘需要更长的诱导时间才能点火。

另外,沉积粉尘在激波作用后还存在上扬运动延迟,也会使其点火时间延长。

5 结 论

实验和理论分析结果表明,激波掠射粉尘床后,粉尘颗粒先升离壁面一定高度后才点火燃烧,颗粒的点火延迟时间与激波前马赫数、气相氧气含量等因素有关。与相同条件下的悬浮粉尘相比,沉积粉尘的激波点火时间长。文中分析模型能很好地解释实验现象,沉积粉尘激波点火时间的理论值与实验值较一致。

参 考 文 献

- 1 Fletcher B. The Interaction of A Shock with A Dust Deposit. *J Phys D: Appl Phys*, 1976, 9(2): 197~202
- 2 Mirels H. Blowing Model for Turbulent Boundary-layer Dust Ingestion. *AIAA J*. 1984, 22(11): 1582~1589
- 3 Rayevsky D, Ben-Dor G. Shock Wave Interaction with A low Speed of Sound Layer: Analytical and Numerical Investigation. Presented 19th Int Symp on Shock Waves and Shock Tubes, 1993
- 4 Bojko V M, Papyrin A N, Wolinski M, Wolanski P. Dynamis of Dispersion and Ignition of Dust Layers by A Shock Wave. In: Bowen J R et al. Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 94, New York: AIAA Inc, 1984, 293~301
- 5 Wolinski M, Wolanski P. Shock Wave-induced Combustion of Dust Layer. Presented at 13th ICDEERS. Nagoya, 1991
- 6 陆守香, 范宝春, 龚昌超. 激波卷扬的气体粉尘边界层的实验与数值研究. *爆炸与冲击*, 1994, 14(3): 199~207
- 7 范宝春, 陆守香, 龚昌超, 李鸿志. 激波诱导的燃烧粉尘云边界层的结构. *力学学报*, 1995年录用.
- 8 Sichel M, et al. The Shock Wave Ignition of Dust. *AIAA J*. 1985, 23(9): 1374~1380
- 9 Geng J H. Shock Ignition of A Dust Suspension; [dissertation thesis]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1993
- 10 Borisov A A, et al. Ignition of Dust Suspensions Behind Shock Waves. In: Bowen J R, et al. Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1984, 94: 332

SHOCK IGNITION OF DUST LAYERS

Lu Shouxiang^a, Huang Tao^b, Long Xinping^b, Fan Baochun^c

(*a. Department of Chemical Engineering, Huainan Mining Institute, Anhui Huainan, 232001*)

(*b. Institute of Chemical Materials, Chinese Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003*)

(*c. Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094*)

ABSTRACT The experimental studies and theoretical analysis of dust ignition process induced by a shock sweeping a dust layer are presented in this paper. The experiments are conducted in a horizontal rectangular shock tube with the transient shadow photogrammetry and ultrared photodiode transducer techniques. It is shown that dust particles are first lifted up to a certain altitude and then ignited behind a shock sweeping a dust layer. The greater the preshock Mach number and more the content of oxygen in gas, the shorter the ignition delay time. In addition, the shock ignition delay of a dust layer is longer than that of a suspension because of heat convection to the wall.

KEY WORDS ignition, shock, dust layer, dust explosion