

铝粉尘激波点火的实验研究^{*}

郑波^{a,b} 胡栋^{a,c} 丁懋^b

(a. 中国工程物理研究院流体物理研究所 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610003)

(b. 北京理工大学机电工程系 北京 100081)

(c. 成都科技大学应用物理研究所 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610065)

摘要 介绍了用铝粉氧化反应所生成的中间产物的特征光谱来测量铝粉尘受激波点火延迟的新的测量方法。测量了三种不同形状和粒度的铝粉尘激波点火延迟。由实验证实,当环境温度在 Al_2O_3 的熔点左右时,铝粒都可以被点火;由于机制的不同,点火延迟相差很大;点火延迟与铝粉颗粒的比表面积和活性铝的含量有关,而与环境的氧含量基本无关;但当氧含量小于1%时,铝粉尘不能被点火。

关键词 激波点火 激波管 点火延迟

中图法分类号 O643.2 TQ038.1

1 前言

实验表明在各类粉尘中,铝粉尘是比较容易达到爆轰的一种物质。在铝粉的工业生产中,不可避免地会产生大量的粉尘,这对于安全生产是十分危险的,也正是工业部门急待研究解决的安全生产的热点问题。在军事方面,由于铝粉尘云比较容易达到爆轰,而且铝粉含有较高的能量,所以铝粉又是燃料空气炸药(FAE)的首选添加燃料。因此开展铝粉爆炸特性和机理研究有着重要的实际意义。可燃粉尘可以有许多的点火方式,对于认识粉尘爆炸最重要的是激波点火。激波点火与粉尘云中传播的爆轰波点燃粉尘颗粒有相同的机制,所以认识粉尘点火机理是认识粉尘爆炸特性的第一步^[1~3]。

激波与可燃粉尘的作用有二种。一是激波与可燃粉尘-空气(氧气)混合物的相互作用。此种情况人们早期主要地集中于对煤粉尘进行激波点火特性的研究。Nettleton 和 Stirling^[4~5]研究了煤粉尘的激波点火和抑制剂对激波点火和其后的燃烧过程的影响。在70年代后期和80年代初期发表了许多有机粉尘、镁粉尘和炸药粉尘的激波点火延迟的结果^[1~2]。关于细微铝粉尘的激波点火延迟至今未见报导。Tulis^[6]等在垂直爆轰管中利用2.8g RDX 或 Tetryl 爆炸点火研究了铝粉-空气混合物的爆轰特性,其点火机理与激波点火机理是不同的。激波与可燃粉尘的另一种作用是激波与沉积的可燃粉尘的相互作用。Boiko^[7]的实验研究证实,激波能有效地抛散沉积粉尘,且激波马赫数越大,粉尘颗粒越小,比重越轻,粉尘也就越容易被抛散。当马赫数大于6时,没有激波先卷扬粉尘再点火的过程,点火和激波卷扬几乎同时进行;此时其激波点火机理与激波点燃粉尘-空气混合物的点火机理相同,点火延迟亦基本相同。

* 冲击波物理与爆轰物理实验室科研基金和国家自然科学基金资助项目。

1995-08-29日收到原稿,1995-11-08收到修改稿。

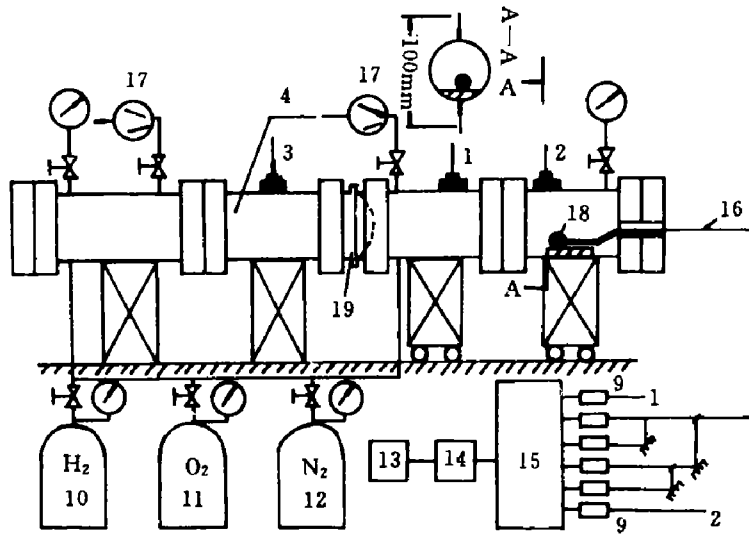
已有实验证实^[8]激波点火是由于激波后高温气流点燃粉尘颗粒,有三种可能的机制^[9]:1)热平衡的破坏(热爆炸);2)达到临界点火温度;3)粉尘颗粒被汽化(这里把颗粒的剥离、破碎、蒸发、升华和燃烧生成的气相产物等统称为汽化)。其中第二种点火机制是在热爆炸还没有产生之前但颗粒的表面温度已达到临界点火温度 T_{cr} (铝: $T_{cr}=2300\text{K}$,镁: $T_{cr}=1394\text{K}$)。第三种机制也经常会出现,即气流流过正熔化的颗粒,由于气动力学效应,液化的颗粒被剥离和汽化,这时在颗粒尾部的蒸汽和更微小的颗粒使得大颗粒被点火。激波点火的另一特点是粉尘颗粒的脱体激波的存在^[2];当颗粒穿越激波,这时颗粒处于超声速流中,由于颗粒的运动弛豫过程在颗粒的头部会出现脱体激波^[2];在颗粒和弓形脱体激波之间的滞止区的高温,使得粉尘在入射激波中更容易被点火,有时甚至比氢氧混合气体更容易被点火。总体说来,在强激波作用下(激波波后温度大于 2100K),铝粉尘的激波点火机制属于第二种,这时颗粒的表面温度接近铝颗粒外层的 Al_2O_3 保护层的熔点,当 Al_2O_3 熔化后便失去了保护特性,这时铝粉被点火。最近有关学者提出了铝粉点火的胀裂模型^[10]。对于激波点火,此模型是否适用,我们将以本文的实验为基础,在以后的文章中加以说明。

目前,国内外测量点火延迟的办法是用压力传感器确定激波与粉尘接触时间,用光电二极管或光电倍增管确定粉尘点火发光时间,两时间差便为激波点火延迟。一般在实验中很难做到精确地测量激波点火延迟^[1]。我们在激波管中研究堆积粉尘的激波点火延迟,在测量中利用了铝粒被点火就会出现铝反应的特征光谱这一特性,测量方法新颖,物理思路明确,测试精度比较满意。

2 实验原理与实验安排

实验安排如图 1 所示。它是由激波管,石英压力传感器、光电单色仪和数据采集系统组成。激波管长 4m ,内径为 0.1m ,在距激波管低压段的端部 1.217m 和 0.766m 处分别安装了精度达 3% 的 YY1-2 型石英压力传感器 1 和 2。由压力传感器输出的信号经电荷放大器放大后送到 DAS-820M 多通道高速数据采集与分析系统。在光辐射测量中,我们选用直径为 1mm 的塑料光纤。由于每一次实验对光纤端面的烧蚀,所以每次实验前都必须认真地处理光纤端面。由光纤引出的光信号经分光系统分别送到 CH5~CH8 共 4 台单色谱仪选频,再用 4 只光电倍增管转换为电信号后输送到 DAS-820M 多通道高速数据采集与分析系统。光电倍增管前沿上升时间小于 $0.1\mu\text{s}$,DAS 有 16 个数据采集通道,每个通道的采样率在 $20\times 10^6\sim 200$ 点/s 范围,分 16 档可调,因而整个测试系统的频响可以满足分辨 $0.1\mu\text{s}$ 动态信号的要求。调整各通道的波长,使之成为 AlO 的 $B^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Sigma^+$ 跃迁中的 $(0,0)$, $(1,0)$, $(2,0)$ 振动谱线带头的波长值。这样 CH5 的波长为 447.05nm ,CH6 的为 464.8nm ,CH7 和 CH8 均为 484.2nm ,但为了更详细地观察 AlO 的特征谱线出现时间,调整使得 CH8 的信号强度为 CH7 的 10 倍。CH5,CH6 和 CH7 的信号可计算 AlO 的激发温度,本文只用到 CH8 的信号。

实验时,在激波管的高压段充入摩尔比为 $2:1$ 的氢氧混合气体,由所需激波的强度调整混合气体充气压力。高压火花放电点燃混合气体,高压破膜在低压段传入一道激波。为了提高入射激波的马赫数,我们预先在低压段抽出空气,充入压力为 0.0025MPa 的氧



1、2. 压力传感器;3. 高压点火系统;4. 激波管;5~8. (CH5~CH8)光电单色仪;9. 电荷放大器;
10~12. 气源;13. 打印机;14. 显示器;15. 多通道数据采集系统;16. 光纤;
17. 真空泵;18. 被测铝粉;19. 膜片

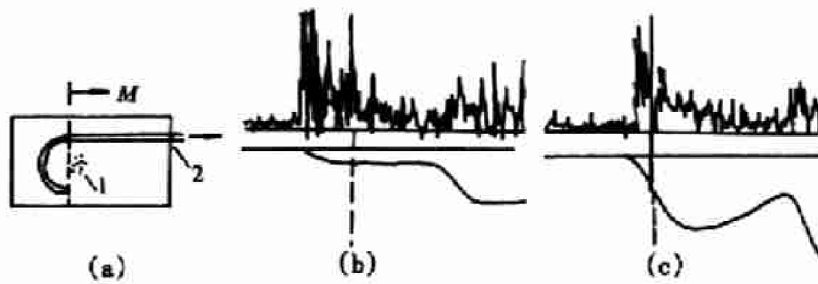
1, 2. Gauges; 3. Spark gap; 4. Shock wave tube; 5~8. (CH5~CH8) Monochromators;
9. Charge amplifier; 10~12. Gas bottle; 13. Printer; 14. Display; 15. Data acquisition
and analysis system; 16. Optical fibres; 17. Vacuum pump; 18. Aluminum dust; 19. Diaphragm

图1 水平激波管及测试系统示意图

Fig. 1 Schematic description of experimental set-up

气。入射激波速度由两个传感器的信号给出的激波平均速度代替,这样代替引入了一定误差,对于强激波来说,激波速度有形成减弱和距离衰减^[11],这时平均速度比即时速度要大。由于实验条件所限,我们用平均速度代替即时速度。

在传感器2的正下方的小平台上放置一小匙铝粉。当激波传到传感器2处也就是激波与铝粉开始相互作用时刻,用一根塑料光纤接收AlO的特征谱线的刚刚出现时刻,两时刻之差为激波的点火延迟。怎样放置光纤是决定测量是否成功的关键,将光纤的端面置于传感器2处,且端面向着电火花方向,也就是沿着入射波方向放置。由于激波后接触面之前的高温区发出强的连续谱,因而光的强度不断地增强,这就有可能区别不了AlO的特征谱线,见图2(c)。但从图2(c)测量出激波后,接触面之前拟定常流动的持续时间,也就是我们测试有效时间大于 $300\mu\text{s}$ 。将光纤的端面置于传感器2处且端面背向火花放置,见图2(a)。一方面激波后接触面之前的高温区使得光强不断增强,另一方面,激波远离光纤端面,接收光的张角变小,所以接收光的强度不断减小^[12],最后光强在反射波又传至传感器2之前保持一平台,这时如果光强突然放大,那么就是铝粉被点火而发出的特征光谱,见图2(b)。实验中铝粉前部与压力传感器2的垂直位置偏差小于5mm,这时所测量的点火延迟有 $\pm 2\mu\text{s}$ 的绝对误差。



1. 铝粉; 2. 光纤; 1. Aluminum; 2. Optical fibre

图 2 (a) 光纤端面背向火花放置示意图; (b) 没加铝粉时与 (a) 情况对应的光强压力信号;

(c) 没加铝粉时端面方向向着火花方向时光强压力信号

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the front of the optical fibre whose direction is opposite to that of the spark gap; (b) Typical record of pressure profiles and AIO emission on the condition of fig. 2(a) without aluminum dust; (c) Typical record of pressure profiles and AIO emission on the condition that the direction of the optical fibre is in that of the spark gap

3 点火延迟的实验测量

我们用表 1 列出的三种铝粉进行实验。为了防止球状铝粉结块, 实验前, 加入了少量 TMS 超细二氧化硅, 重量比小于 1%, 充分地 和铝粉混匀。图 3 给出了直径为 $6\mu\text{m}$ 的球状铝粉的电子显微镜照片。为了消除上次实验残存的铝粉的影响, 每次实验前用 1:1 的氢

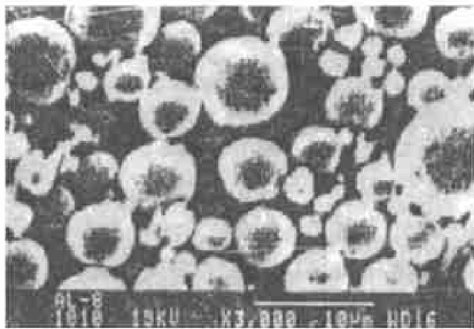


图 3 中位径 $6\mu\text{m}$ 球状铝粉的放大照片

Fig. 3 Photograph of aluminum dust sample under an electron microscope

氧混合气体爆炸的方法清除低压段的残存铝粉。图 4 给出了典型的实验结果。球状铝粒的中位径为 $2\mu\text{m}$, 激波马赫数为 6.65, 波后温度为 2744K。图 4(b) 第一条竖线对应于激波到达压力传感器 2 的位置, 这时激波已经与铝粉接触, 但由于点火延迟, 这时的特征谱线为一些杂光谱, 光强没有明显放大; 当经过 $9.9\mu\text{s}$ 后特征谱线光强开始放大, 这时颗粒被点火。

表 2 列出三种不同粒度和形状, 不同活性铝含量的激波点火延迟的实验测量值, 以及相应的马赫数和激波后温度的计算值^[8]。

图 5 给出了相应的散布图。图 6 给出同为球

状颗粒且粒度大小相同但不同活性铝含量的散布图。为了了解氧含量对激波点火延迟的影响, 低压段的压力仍为 0.0025MPa , 但氧气的分压分别取 (a) 99%; (b) 50%; (c) 20%; (d) 1%。图 7 给出不同氧含量下激波点火延迟的散布图, 入射激波马赫数大致相同 (Ma 约为 6.5)。表 3 列出了相应的实验测量值。由图 5 和图 6 可以看出实验结果有一定的散

布,但可以看出一些变化趋势。有一定的散布主要是平均速度代替即时速度有一定的误差,颗粒大小不均匀且有一定的分布,以及实验装配时有 $\pm 2\mu\text{s}$ 的误差。比较已发表的有关数据^[1],我们认为实验结果比较满意。



图4 (a)压力传感器记录;(b)AlO特征谱线强度

Fig. 4 (a)Typical record of pressure profiles;(b)Typical record of AlO emission

表1 被测铝粉一览表

Table 1 Properties of aluminum sample

形状	直径或粒度/ μm	比表面积/ (m^2/g)	活性铝含量/(%)
球状	2	0.94	95/90 *
球状	6	0.53	95
片状	45	1.68	88

* 高温加热使之进一步氧化。

表2 激波点火延迟的实验测量值

Table 2 Data of shock wave ignition delay of aluminum dust

$2\mu\text{m}$			$2\mu\text{m}$ (加热)			$6\mu\text{m}$			片状		
Ma	T/K	$\tau/\mu\text{s}$	Ma	T/K	$\tau/\mu\text{s}$	Ma	T/K	$\tau/\mu\text{s}$	Ma	T/K	$\tau/\mu\text{s}$
6.65	2744	9.9	6.44	2592	55	6.78	2845	15.6	6.10	2351	159.6
6.63	2728	9.9	6.32	2508	69.8	6.60	2704	19.9	5.91	2224	84
6.51	2645	39.6	6.06	2322	81.4	6.54	2661	16.5	5.69	2080	164.9
6.32	2508	9.9	5.94	2244	80.3	6.51	2638	20.5	5.59	2018	196.8
5.97	2263	28.6	5.83	2170	96.6	6.41	2571	13.2	5.40	1903	259.2
5.91	2224	29.7	5.67	2070	105.6	6.39	2552	14.3	5.13	1743	256.7
5.83	2175	9.9	5.34	1865	200.2	6.37	2541	12	4.94	1638	265
5.42	1917	111	5.32	1856	110.5	6.30	2492	14.2	4.61	1457	288.3
4.95	1643	158.1	5.04	1689	199.5	6.29	2484	36.3	4.33	1317	320
4.80	1561	137	4.15	1233	103.7	6.13	2370	28			
4.66	1486	256.2				6.03	2306	27			
4.38	1344	119				5.86	2192	46.2			
4.12	1221	150				5.60	2026	140.4			
3.77	1065	200.6				5.48	1949	167.7			
						5.36	1879	139.1			

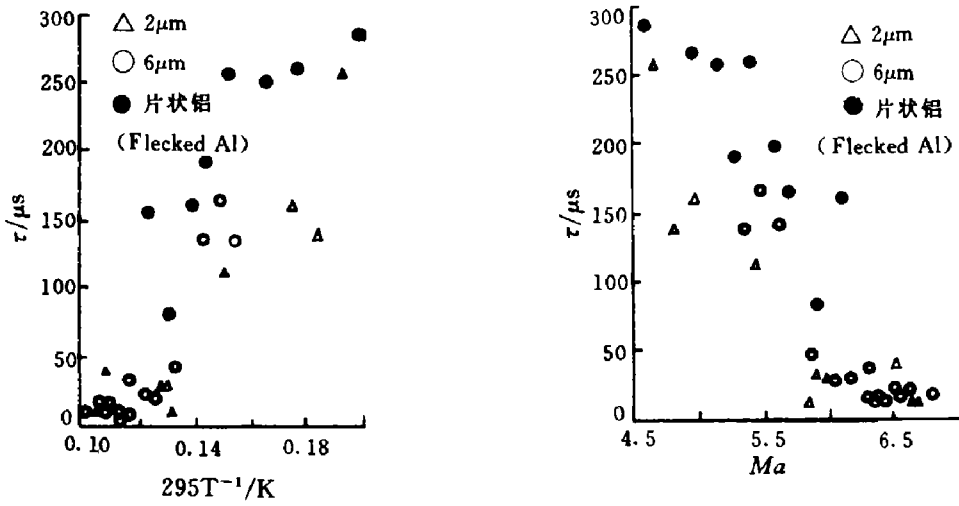


图 5 不同粒度激波点火延迟散布图

Fig. 5 Ignition delay data of aluminum particles with different diameters

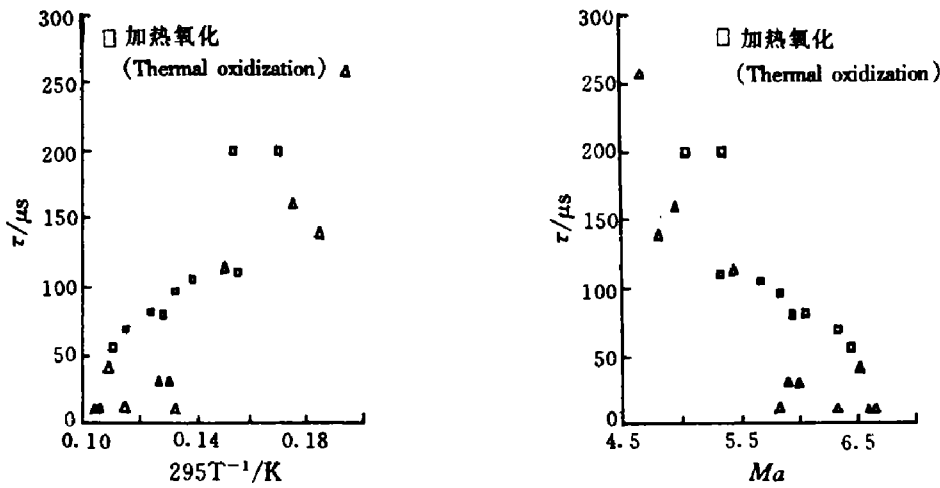


图 6 不同活性铝含量点火延迟散布图

Fig. 6 Ignition delay data of aluminum particles with different thicknesses of oxide film

表 3 不同氧含量的点火延迟测量值

Table 3 Data of ignition delay in diferent oxygen concentrations

氧含量 (分压)/(%)	6μm			2μm		
	Ma	T/K	τ/μs	Ma	T/K	τ/μs
99	6.47	2613	15.1	6.34	2521	9.9
50	6.53	2656	15.4	6.45	2601	19.8
20	7.07	3068	17.6	6.62	2725	19.8
1	6.10	2353	84	11.61	7817	24.2

4 结 论

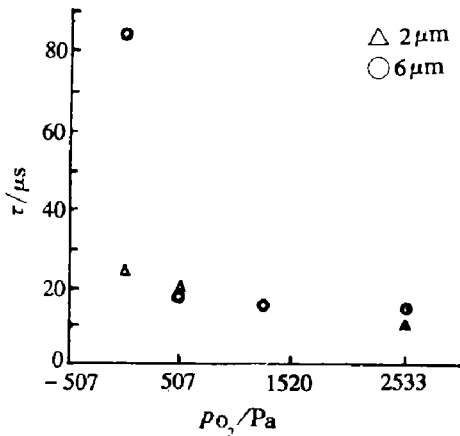


图 7 氧含量对点火延迟的影响

Fig. 7 Influence of oxygen concentration on ignition delay

测量了细微铝粉的激波点火延迟,见图 5。实验结果表明,当激波马赫数大于 5.6,这时激波后温度高于 2100K,铝粉的激波点火延迟明显小于激波后温度小于 2100K,的点火延迟。如果考虑到弓形脱体激波所导致的滞止区的高温,当激波后温度高于 2100K 时, Al_2O_3 保护层开始熔化(熔化温度 2300K)以致失去了它的保护特性,这时铝粒和周围氧气的反应急剧增加,导致铝粒的点火。当激波后温度小于又接近 2100K 时,虽然环境温度不足以使 Al_2O_3 保护层胀裂,由于热应力的作用,使得 Al_2O_3 保护层胀裂,这时铝蒸汽透出裂缝与氧气反应而使得铝粒点火。

由于经历热传导,膨胀以及胀裂一系列过程使所需的点火延迟明显加长。实验证实了对于铝粉颗粒的激波点火,其临界点火温度为 2100K。

据文献[2]分析,对于小颗粒粉尘的激波点火,由于它可以迅速地被加速,所以曝露在高温滞止区的时间较短;而对于较大颗粒的粉尘,由于加速度慢,所以曝露在高温滞止区的时间较长。但是,另一方面对于较大颗粒的粉尘,颗粒内部的温度分布必须加以考虑,需要较多的热量才能点火。综合上述两个因素,有一个最合适的颗粒直径,这时激波点火延迟最小。通过我们实验(见图 5)发现直径大的颗粒粉尘,其激波点火延迟明显增长。根据上述观点,如果存在最合适的直径,那么一定小于 $2\mu m$ 。

从图 6 可以看出进一步加热氧化后的 $2\mu m$ 的铝粒,其激波点火延迟明显大于加热之前的铝粒的点火延迟。由图 7 可以看出氧含量,当它大于 1%时,其对点火延迟几乎没有影响。但是当氧含量小于 1%时,在实验有效持续时间内,几乎没有观察到激波点火现象,这一点与文献[13]结论相同。

参 考 文 献

- 1 Sichel M, Baek S W, Kauffman C W, Maker B, Nicholls J A. The Shock Wave Ignition of Dusts. AIAA J, 1985, 23(9): 1374~1380
- 2 Wolanski P. Detonation in Dust Mixtures. In: Shenyang International Symposium on Dust Explosions. Shenyang Northeast Institute of Technology, 1987, 568~598
- 3 浦以康等. 微细球形铝粉爆炸特性的实验研究. 爆炸与冲击, 1993, 13(3): 193~204
- 4 Nettleton M A, Stirling R. The Ignition of Clouds of Particles in Shock Heated Oxygen. Proc Roy Soc London, London; 1967, 300: 62~67.
- 5 Nettleton M A, Stirling R. The Influence of Additives on Burning of Clouds of Coal Particles in Shocked Gases. Combustion and Flame, 1974, 22: 543~549
- 6 Tulis A J, Selman J R. Detonation Tube Studies of Aluminum Particles Dispersed in Air. In: 19th International Symposium on Combustion, Pittsburgh; The Combustion Institute. 1982, 655

- 7 Boiko V M, Papyrin A N, Wolinski M, Wolanski M, Wolanski P. Dynamics of Dispersion and Ignition of Dust Layers by a Shock Wave. In: Bowen J R, Manson N, Oppenheim A K, Soloukhin R I, eds. Dynamics of Shock Waves Explosions and Detonations, New York: Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, 1994, 293~301
- 8 Boiko V M, Papyrin A N, Poplavskii S V. Mechanism of Dust Ignition in Incident Shock Waves. CESW A4, 1993, 29(3): 253~418
- 9 Medvedev A E, Fedorov A V, Fomin V M. Mathematical Modeling of Metal Particle Ignition in the High-temperature Flow behind a Shock. CESW A4, 1982, 18(3): 389
- 10 Ermakov V A, Razdobreev A A, Skorik A I, Pozdeev V V, Smolyakov S S. CESW A4, 1982, 18(2): 256
- 11 拉赫马杜林 XA, 谢苗诺夫 C C. 激波管. 北京: 国防工业出版社, 1965. 233~245
- 12 谭 华. 金属的冲击波温度测量(I). 高压物理学报, 1994, 8(4): 254
- 13 Fox T W, Rackett C W, Nicholls J A. Shock Wave Ignition of Magnesium Powders. Proc 11th Int Symposium on Shock Tubes and Waves, 1977, 262~268

EXPERIMENTAL STUDY OF SHOCK WAVE IGNITION OF ALUMINUM DUST

Zheng Bo^{a,b} Hu Dong^{a,c} Ding Jing^b

(a. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Southwest Institute of Fluid Physics, Chengdu, 610003*)

(b. *Beijing Institute of Technology, Mechanics and Engineering Department, Beijing, 100081*)

(c. *Institute of Applied Physics, Chengdu University of Science and Technology, Chengdu, 610065*)

ABSTRACT The paper describes how to measure the delay of shock wave ignition of alumina dust with a new method which makes use of AlO emission spectrum of Aluminum-Oxygen reaction in a shock tube. The delayed times of three kinds of aluminum granule in different shapes and diameters are measured by the method. We have made the conclusions that aluminum dust can be ignited by a shock wave when its temperature behind it is near 2200 K which is near the melting temperature of Al_2O_3 , but the delayed time is rather different due to different of mechanics. By the experiments, we have proved that the delayed time of ignition is not only dependent on the surface-to-mass ratio of aluminum dust, but also on the content of pure aluminum in an aluminum particle. The experiments have indicated that the delayed time of ignition is independent on oxygen concentration down to 1 percent oxygen, ignition is not observed in pure nitrogen.

KEY WORDS shock wave ignition, shock tube, ignition delayed time