

粉尘云激波点火现象实验研究^{*}

耿继辉 汤明钧

(南京理工大学 南京 210094)

摘要 利用新型两相激波管成功地研究了中等强度入射激波诱导的均匀悬浮粉尘间断面点火现象。平均直径为 $10\ \mu\text{m}$ 的玉米粉尘由流化床均匀地分散在氧气或空气中。悬浮粉尘间断面激波点火过程由纹影法连续拍摄。结果表明:颗粒浓度对点火延迟时间影响不大,空气中的玉米粉尘点火延迟大于氧气中的值,低马赫数激波条件下尤为明显。

关键词 悬浮粉尘间断面 入射激波 点火延迟时间

中图法分类号 O334.5

1 引言

粉尘云激波点火机理的研究不仅对工业粉尘爆炸灾害预报及防治具有重要的意义,同时还为研讨粉尘爆炸特性提供基础数据。

入射激波诱导的粉尘云点火现象的系统研究始于70年代末^[1]。美国 Michigan 大学的研究小组对一系列粉尘的激波点火延迟时间进行了较为全面的测定^[2],但是,由于实验本身的复杂性,如何形成均匀分散的粉尘云,尤其是形成一个理想的悬浮粉尘间断平面是以往实验研究尚未解决的问题之一。由此而引起的实测数据重复性差^[3],对于同一类型粉尘难以给出激波诱导的点火延迟时间的准确值^[2]。

另一方面,在有粉尘结团条件下,目前为止有两种截然相反的实验结果。一种表明,有结团存在的粉尘云点火延迟时间明显大于均匀分散的粉尘云中的值^[3],也即,含有粉尘结团的粉尘云比均匀分散的粉尘云难点火;而另一种结果则相反,有结团存在或者相当稠密的粉尘云才能被点火^[4]。这样定性上的差异或许来源不同的实验装置或者不同的测量方法,但是,严重妨碍了粉尘云激波点火机理的研究。

鉴于以上研究现状,建立新的、有效的实验手段,进一步积累可靠的实验数据是必要的。我们利用自行设计的新型两相激波管研究了中等强度入射激波诱导的均匀悬浮粉尘间断面点火现象,系统测量了平均直径为 $10\ \mu\text{m}$ 玉米粉尘云的激波点火延迟时间与激波强度以及粉尘浓度的关系。

2 实验装置

两相激波管设计原理,气体与含尘气体之间分界平面的形成方法以及分界面处粉尘

* VW-Stiftung 基金和国家教委留学回国人员基金资助项目。
1995年1月19日收到原稿,10月19日收到修改稿。

浓度的原地测量在文献[5]中已详细介绍。为方便起见,简要描述如下。两相激波管(图1)主要由高压段、低压段和流化床组成。低压段分气相和含尘气体两部分,上下对称流使气相部分和含尘部分之间形成一个间断平面。实验段可采集电、光信号分别用于测定入射激波速度(或马赫数)以及记录激波与间断平面相互作用和点火现象,每发试验可连续拍摄四幅纹影照片,火花光源最小间隔为 $1.0 \mu\text{s}$ 。

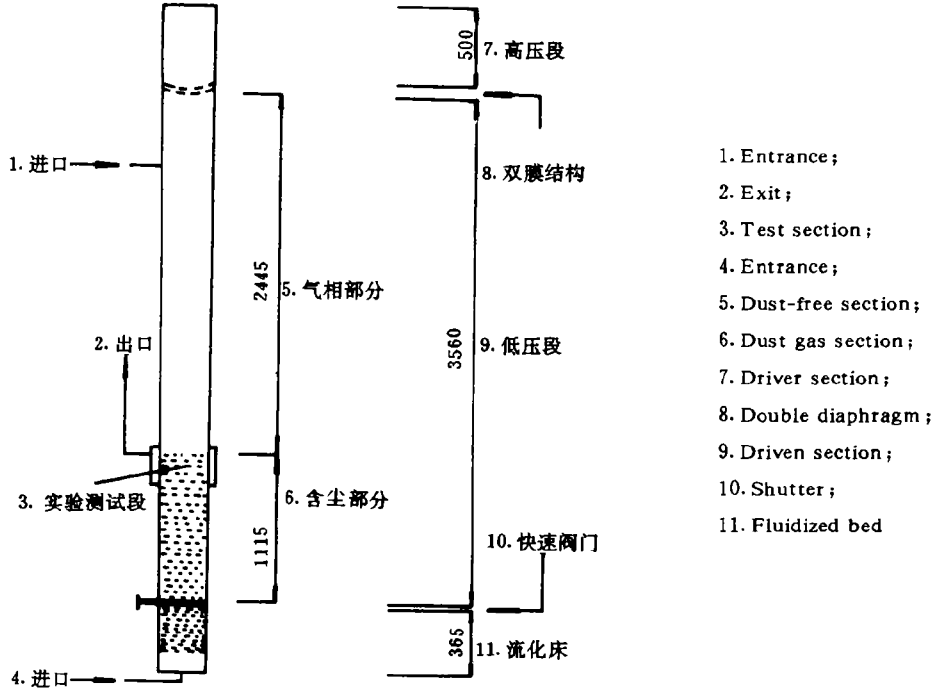


图1 两相激波管示意图

Fig. 1 Sketch of two-phase shock tube

3 实验结果与讨论

实验均在初压 $p_1 = 0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 和初温 $T_1 = 293 \text{ K}$ 条件下进行,工作介质为悬浮在氧气或空气中的玉米粉尘,其平均直径为 $10 \mu\text{m}$,粉尘浓度可变,入射激波马赫数在 $4.15 \sim 6.0$ 范围内。

3.1 悬浮粉尘间断面的激波点火现象

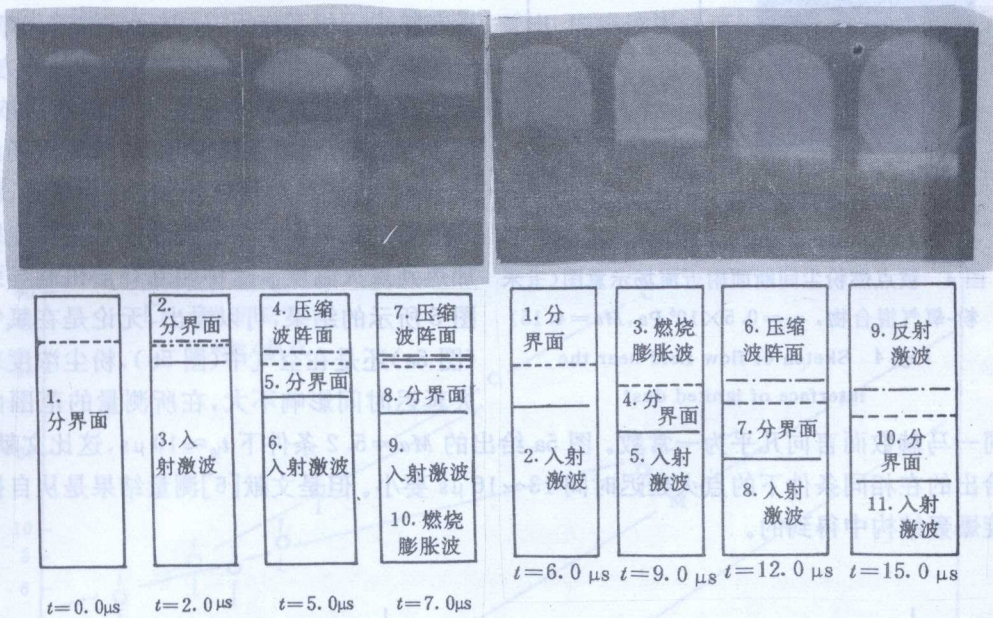
图2d展示了悬浮粉尘间断面的激波点火现象纹影照片。时间间隔从激波到达间断面时刻开始计算。

图2给出了在氧气中马赫数为 $Ma = 5.4$ 条件下的点火过程。开始时,相对于未被扰动的悬浮间断面的气流速度为 $u_2 = 1290 \text{ m/s}$,其马赫数为 4.12 ,即为超声速流,与其相对应的温度和压力分别为 $T_2 = 1840 \text{ K}$ 和 $p_2 = 1.693 \text{ MPa}$ 。通常图2所示相互作用过程可分为两个阶段:第一为动力学阶段,悬浮粉尘间断面将被加速;第二阶段以粉尘点火为标志,也即化学反应开始。正始文献[5]中讨论的,在动力学阶段,粉尘颗粒处在由入射激波引起

的超声流中而被加速和加热, 一组反射压缩波在运动的粉尘间断面之后产生, 图 2 中 $t=2.0 \mu\text{s}$ 和 $t=5.0 \mu\text{s}$ 的照片同样证明这一事实。由于在间断面附近粉尘的温度大于其他颗粒的温度, 因此间断面处粉尘首先达到点火温度而开始燃烧, 由此产生了燃烧膨胀波, 这可以从图 2 第四幅照片中清楚地看到。

图 3 给出了在空气中玉米粉尘云激波点火现象的另一例子, 这里第一幅是阴影照片。与图 2 相比 $t=6.0 \mu\text{s}$ 时反射激波尚未形成。第二幅照片 ($t=9.0 \mu\text{s}$) 表明, 除了在左边已产生的反射压缩波外, 在右边已有一个局部燃烧膨胀波。 $t=12.0 \mu\text{s}$ 时, 间断面其他部分粉尘也被点火, $t=15.0 \mu\text{s}$ 照片则展现了进一步燃烧现象, 在燃烧着的间断面正上方有一明显的反射激波。这一反射激波可以在图 4 中清楚地看到。

图 4 描述了处于运动、燃烧着的粉尘间断面附近的整个流场。透射激波以及反射激波均已远离间断面, 图 4 和图 3 第 4 幅照片上的多余扰动来自激波管出口处的小孔^[5]。



1、2、5、8. Interface; 3、6、9. Incident shock;
4、7. Compression wave front;
10. Combustion expansion wave

图 2 氧气中玉米粉尘云激波点火过程典型纹影照片

($p_1=0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$, $Ma=5.4$)

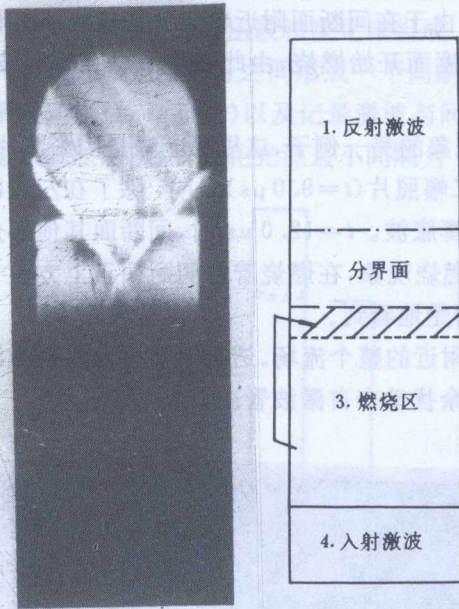
Fig. 2 Schlieren photograph of shock ignition process in corn dust/oxygen mixture

1、4、7、10. Interface; 2、5、8、11. Incident shock;
3. Combustion expansion wave; 6. compression wave front; 9. Reflected shock

图 3 空气中玉米粉尘云激波点火过程典型纹影照片

($p_1=0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$, $Ma=5.6$)

Fig. 3 Schlieren photograph of shock ignition process in corn dust/air mixture



1. Reflected shock; 2. Interface;
3. Combustion zone; 4. Incident shock

图 4 被点燃粉尘断面附近流场示意图(玉米粉-氧气混合物, $p_1=0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$, $Ma=4.15$)

Fig. 4 Sketch of flow field near the interface of ignited dust

3.2 点火延迟时间

点火延迟时间 t_{ig} 定义为激波开始与粉尘间断面接触到间断面处粉尘点火燃烧为止的时间间隔。基于这一定义, 点火延迟时间则为这样两个连续照片时间的平均值, 其中之一表明没有粉尘被点燃, 而另一照片上已出现燃烧膨胀波, 以图 2 为例, 有 $t_{ig}=6.0 \mu\text{s}$

我们所用火花光源最小间隔为 $1.0 \mu\text{s}$, 因此, 依据以上测量方法, 实验数据判读误差可控制在 $\pm 0.5 \mu\text{s}$ 范围内。

粉尘浓度以及激波马赫数对点火延迟时间的影响如图 5 所示。由于入射激波波后流场与粉尘云相互作用, 反射压缩波首先产生, 一定时间后粉尘间断面才被点火。另一方面, 反射压缩波强度取决于粉尘云的粉尘浓度, 即浓度越高, 压缩波强度越大, 气相流场温度上升也大, 气相对颗粒相加热快; 同时, 浓度高的粉尘云需要更多的能量才能使粉尘颗粒加热到点火温度。这种相互补偿机制导致了图 5 所示的结果, 可以看出, 无论是在氧气中(图 5a)还是在空气中(图 5b), 粉尘浓度对点火延迟时间影响不大, 在所测量的范围内对

同一马赫数而言向几乎为一常数。图 5a 给出的 $Ma=5.2$ 条件下 $t_{ig} \approx 10 \mu\text{s}$, 这比文献[6]给出的在相同条件下的点火延迟时间 $13 \sim 16 \mu\text{s}$ 要小。但是文献[6]测量结果是从自持螺旋爆轰结构中得到的。

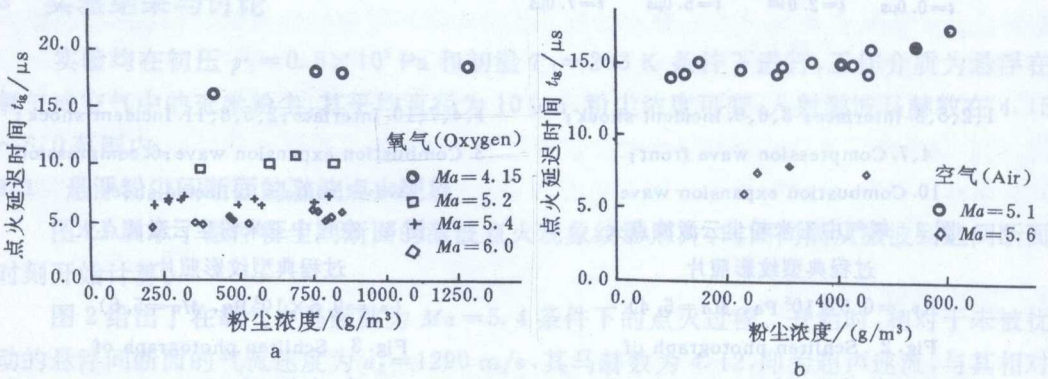


图 5 不同马赫数条件下粉尘浓度对激波点火延迟时间的影响($p_1=0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$)

Fig. 5 Effect of dust concentration on shock ignition delay at various Mach No

点火延迟时间与入射激波波后温度关系示于图 6 中。根据 Arrhenius 反应率定律^[1]

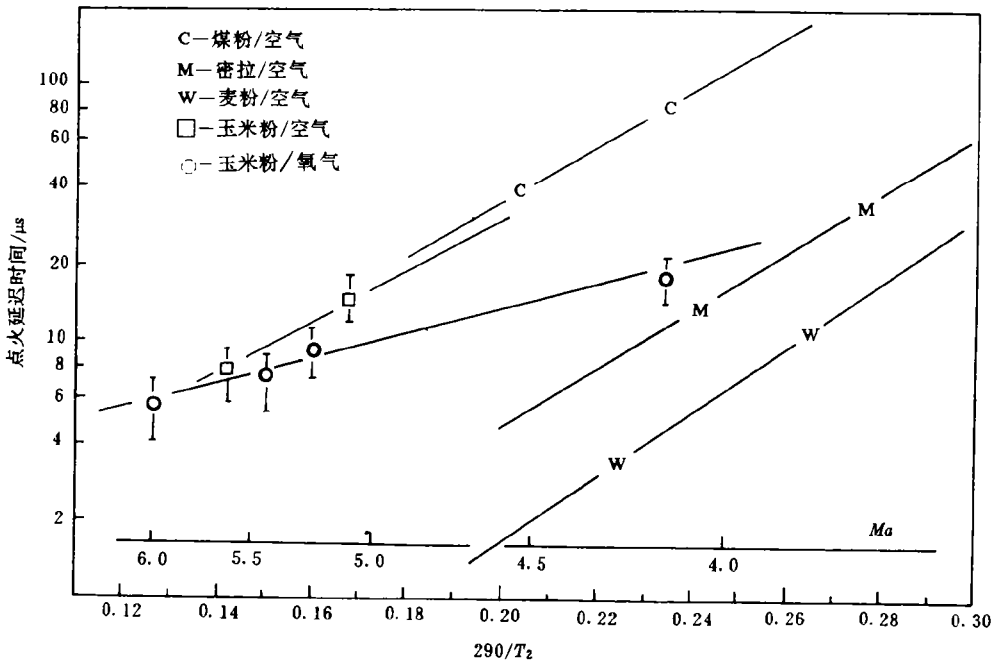
$$t_{ig} = A \exp(E/RT)$$

其中: E 表示活化能, A 为常数。所以图 6 点火延迟时间曲线的斜率与活化温度 $T_a = E/R$ 成正比。在空气和氧气中的玉米粉尘的表征活化能分别为

$$E = \begin{cases} 8.42 & \text{kcal/g} \cdot \text{mol} \text{ (空气中)} \\ 3.52 & \text{kcal/g} \cdot \text{mol} \text{ (氧气中)} \end{cases}$$

图 6 结果还表明玉米粉尘在空气中的激波点火延迟时间大于氧气中的值, 对于低马赫数的激波情形这一趋势尤为明显。图 6 同时给出了其它粉尘实验结果^[7]以作比较, 值得提及的是这些结果是在初压为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 条件下获得的。

在以往的实验研究中, 通常应用光电管对粉尘云激波点火延迟时间进行测量, 由于入射激波引起粉尘云运动, 光电管必须监测整个实验段^[3]。尽管由这样的实验系统而获得的数据可以对不同类型粉尘提供很好的比较结果, 但给同一类型粉尘的激波点火延迟时间的精确测量带来困难^[2]。从图 2 实验结果可以看出, 应用纹影法可以对悬浮粉尘间断面激波点火延迟时间进行较为准确的测量, 而且其测试误差可控制在 $\pm 0.5 \mu\text{s}$ 范围内。



C—Coal/Air; M—Milo/Air; W—Wheat/Air;
 □—Corn starch/Air; ○—Corn starch/Oxygen

图 6 点火延迟时间与入射激波波后气流温度 T_2 的关系 ($p_1 = 0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$)

Fig. The relationship between ignition delay time and gas flow temperature behind incident shock

4 结 论

在新型两相激波管中产生气体与含尘气体之间分界面,以及分界面处粉尘浓度原地测量为研究激波诱导的均匀悬浮粉尘间断面的点火现象,讨论粉尘云激波点火机理,尤其是入射激波波后流场与粉尘云相互作用的动力学影响机制提供了新的、有效的实验方法。

在我们所建立的实验系统中,应用纹影法可以较为准确地测定粉尘云激波点火延迟时间的绝对值,同时给出粉尘浓度的影响结果。由于动力学影响机制,使得在本文中考虑的浓度范围内点火延迟时间为一常数。

空气中的粉尘云激波点火延迟时间大于氧气中的实测值,在低马赫数条件下尤为明显。相应地,空气中玉米粉尘的表征活化能大于氧气中的表征活化能。

参 考 文 献

- 1 Fox T W, et al. In: Proceedings of 11th Inter symp on shock Tubes and shock waves, 1978, 262~268
- 2 Sichel M, et al. AIAA J, 1985, 23(9):1374~1380
- 3 Ural E A, et al. In: Proceedings of 13th Inter Symp on Shock Tubes and Shock Waves, 1982, 809~817
- 4 Boiko V M, et al. In: Proceedings of 5th Intern Colloquium on Dust Explosion, 1993, 329~334
- 5 耿继辉,汤明钧. 含尘气体中的非定常激波. 爆炸与冲击, 1994, 14(4): 319~331
- 6 Zhang F, et al. Dynamic Structure of Detonation in Gaseous and Dispersed Media. Kluwer Academic publishers, 1990, 157~213
- 7 Kauffman C W, et al. In: Proceedings of 1st Inter Symp on Grain Dusts, 1979, 164~190

EXPERIMENTAL STUDY OF THE IGNITION PHENOMENA ON SUSPENDED DUST

Geng Jihui, Tang Mingjun

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

ABSTRACT The ignition phenomena at the interface of suspended dust and oxidative gas induced by an incident shock wave of medium strength have been studied using a newly developed two-phase shock tube. Corn starch with 10 μm average diameter has been suspended uniformly in oxygen or air by means of a fluidized bed. The shock ignition process at the interface of dust suspension has been continuously observed by the schliren photograph.

Results show that the effect of dust concentration on ignition delay is insignificant, and the ignition delay of corn starch/air mixture is longer than that of corn starch/oxygen mixture. The difference is more pronounced at low strength shock conditions.

KEY WORDS interface of suspension, incident shock, ignition delay