

障碍物对铝粉火焰加速 作用的实验研究

刘晓利 李鸿志 叶经方 刘殿金

(南京理工大学 南京 210094)

摘要 在沿火焰传播的通道上重复设置障碍物对粉尘火焰有明显加速作用,这种加速作用的机理可归功于障碍物诱导的湍流区对燃烧过程的正反馈。在封闭容器中,铝粉-空气混合物燃烧达到的最大压力 p_{max} 与障碍物的存在关系不大,而最大压力上升率 $(dp/dt)_{max}$ 与障碍物的存在有关。因为 p_{max} 取决于容器内的总能量, $(dp/dt)_{max}$ 则取决于燃烧过程,即能量释放率。

关键词 粉尘爆炸 铝粉 燃烧 火焰

中图分类号 O 381

1 引言

障碍物会使火焰在传播过程中加速这一现象早已引起人们的注意^[1],而且在工业生产部门又大量存在这种障碍物。例如,通风设备、机械设备、测试仪器、各种管道、门窗、人员物品等,爆炸灾害中的实际情况大多与火焰在有障碍物群的通道中传播的物理现象有关。因此,近十年来,为了预防工业中的爆炸事故,人们加强了对气相火焰在有障碍物的管道中传播和加速机理的研究。J. H. Lee 和 I. O. Moen 等人在他们的实验结果分析中认为火焰加速的原因主要是由障碍物诱导的湍流区对燃烧过程的正反馈。由于实验测试上的困难,人们对粉尘火焰物理现象的研究还处于探索阶段,因此,对有障碍物情况下火焰传播与加速机理的认识很不充分,特别是对于气-固两相火焰在有障碍物的管道中传播、加速及其燃烧特性等了解就更少。

本文通过对有无障碍物和所设障碍物数量多少的变化来研究障碍物对粉尘火焰加速过程的影响。其目的是获得对火焰传播规律及火焰加速过程等物理现象的定性认识,同时提出在给定管长上使火焰加速达到某种确定状态的有效途径,以便在实验室范围内实现铝粉-空气混合物的爆轰转捩,进而研究粉尘的燃烧转爆轰过程^[2]。

2 实验系统

实验系统由火焰加速管、泄压罐、扬尘系统、点火控制系统和测试系统组成。

火焰加速管 火焰加速管如图1所示,内径为158mm,长4.2m,其中实验段长3.0m(长径比约19),装有扬尘系统,而后1.2m为排气管,与泄压罐相连。

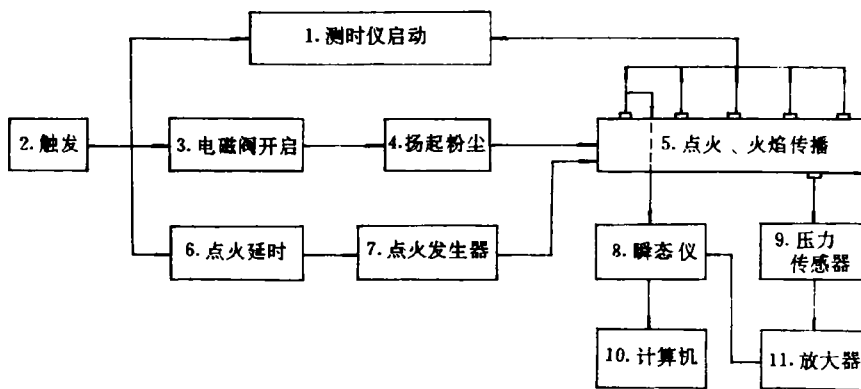
根据实验目的的不同,排气管与实验段之间可以用钢板分隔,亦可用塑料薄膜分隔;

测试系统 测试系统包括火焰阵面的测量和压力信号测量。测量管内火焰阵面传播情况的测量系统由火焰探头和 HG202A 型-6 通道电子测时仪组成。各火焰探头的安装位置见图 1。

压力测量由 YCW-A 型压阻传感器、IB601 放大器和瞬态记录仪及数据处理系统组成测压系统,压力传感器的测量位置见图 1。

实验系统工作原理 当实验系统准备就绪以后,下达触发指令,接通电源,电磁阀开启,火焰计时仪同时启动,释放压缩空气将管内预置的铝粉扬起,从而在燃烧管中形成一定浓度的粉尘云。经过预定的点火延迟时间以后由点火延时发生器点燃位于燃烧管端部的点火药包,并点燃粉尘云,火焰向前传播。

位于各测点的火焰探头和火焰计时仪共同记录火焰传播轨迹,并由预选的火焰探头信号触发压力测量系统(本实验选 1# 火焰探头),传感器测出的压力信号经放大器放大后由瞬态记录仪记录,最后送入计算机处理。其工作时序逻辑框图见图 2。



1. Turn on timer; 2. Trigger; 3. Turn on magnetic valve; 4. Dispersing dust;
5. Ignite flame propagate; 6. Delay of igniter; 7. Igniter generator;
8. Multichannel recorder; 9. Pressure transducer; 10. Computer; 11. Amplifier

图 2 实验系统工作时序逻辑框图

Fig. 2 Operative order of experimental system

3 实验结果与分析

对平均颗粒直径为 $13\mu\text{m}$ 的铝粉,在改变障碍物数目条件下,进行封闭燃烧实验,其结果分成两组:一组是火焰阵面传播轨迹,由此可以处理得到火焰传播速度;另一组是压力信号,由此可处理得到最大压力 p_{max} 和最大压力上升率 $(dp/dt)_{\text{max}}$ 。通过这些结果的对比分析,可以获得对火焰加速传播的定性认识。

3.1 火焰传播轨迹的测试结果

表 1 是火焰探头测得的铝粉火焰传播轨迹的一组典型结果,表中 x 为火焰探头所处的轴向位置(以点火端面算起), t 为火焰阵面传到火焰探头时的时间, \bar{u}_f 为火焰传播的平均速度。

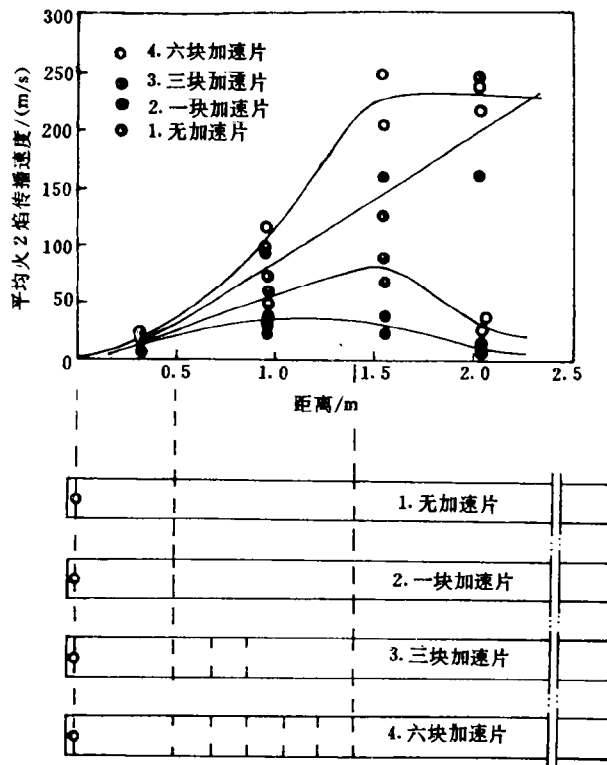
表1 13 μm 铝粉火焰轨迹测试结果
Table 1 Flame locus of 13 μm aluminum dust

火焰站	1	2	3	4	5	6
x/m	0	0.65	1.05	1.25	1.85	2.25
t/ms	316.90	369.00	372.49	373.62	376.21	377.84
$\bar{u}_f/(\text{m/s})$	12.5	114.6	177.0	231.7	245.4	

由表可见,在铝粉-空气两相混合物中,以 370ms 为界,火焰传播大体上分成两段:前一段传播速度较低,后一段传播速度较高,两者相差将近一个数量级。在后面的分析中将会看到,造成这种结果的原因是障碍物对火焰加速作用引起的。

3.2 障碍物对火焰传播速度的影响

图3绘出了障碍物(根据其作用在此称它为加速片)对火焰传播速度的加速作用的对



1. Non- accelerating plate; 2. One accelerating plate; 3. Three accelerating plates; 4. Six accelerating plates

颗粒直径: 13 μm ; 浓度: 500g/m³; 点火延时: 300ms; 点火药: 1g(无加速片时: 5g)

Dust diameter: 13 μm ; Concentration 500g/m³; Time delay: 300 ms; Ignite powder: 1g(5g for no accelerating plate)

图3 障碍物对火焰传播速度的影响

Fig. 3 The effect of obstacles on the velocity of flame propagation

比实验结果。对颗粒直径为 $13\mu\text{m}$, 浓度为 $500\text{g}/\text{m}^3$ 的铝粉-空气混合物。在使用 0、1、3、6 块加速片的不同条件下进行对比实验可以清楚地看到这种加速作用。图中绘出了加速片所安装的位置, 它与曲线的横坐标对应。

由图可见, 采用加速片可以使火焰加速, 加速片多, 加速作用就大; 采用 6 块加速片比不采用加速片可以提高火焰速度一个数量级。即使仅用一块加速片, 也能使火焰速度提高 3~5 倍。

在无加速片的情况下, 曾用 1g 火药进行点火, 结果在火焰传到第二个火焰站以后熄灭了, 前两个站之间的平均传播速度为 $8.8\text{m}/\text{s}$ 。图中的曲线提高了点火能, 采用了 5g 火药点火, 因而火焰得以传播, 其最大传播速度约为 $40\text{m}/\text{s}$, 在传播到 2m 时, 降为 $8\text{m}/\text{s}$, 在这里比较高的火焰速度 ($40\text{m}/\text{s}$) 与提高点火能量有关, 在远离点火源处, 仍降为 $8\text{m}/\text{s}$, 可以认为这是层流火焰传播速度。

在采用一块加速片的情况下, 火焰传播的最大速度可以达到约 $110\text{m}/\text{s}$, 这显然比提高点火能量更为有效。但是这一速度不能保持, 在远离加速片时, 火焰速度仍然下降到 $45\text{m}/\text{s}$ 。

使加速片增加到 3 块的情况下, 火焰速度在全管中呈线性增加, 最后达到 $200\text{m}/\text{s}$ 以上。进一步使加速片增加到 6 块, 火焰速度就以更高的速率增加, 在 1.5m 处就达到了 $230\text{m}/\text{s}$ 。而后便维持这一传播速度。由此可见, 以加速火焰传播速度为目的, 采用 6 块加速片基本上挖掘了全部潜力。在后面将要进一步讨论加速片的加速机理, 探讨达到稳定火焰传播速度的原因。

3.3 p_{max} 和 $(dp/dt)_{\text{max}}$ 的测量结果

对于压力信号的测量要分两种情况, 一种是全封闭情况, 另一种是用塑料膜片封闭的可破膜情况。图 4 给出压力测量信号的两张典型照片, 其中 (a) 是全封闭情况, (b) 是可破膜情况。由这两张照片可见, 如果燃烧管全封闭、铝粉燃烧的能量全部封闭于管内, 使温度和压力上升, 并在达到最大值之后缓慢下降。在可破膜的情况下, 当压力达到某一值时, 破膜会导致管内气体向外流动, 稀疏波内传, 因而在压力上升到破膜压力以后, 就会迅速下降, 形成一个压力尖峰。



图 4 压力测量信号

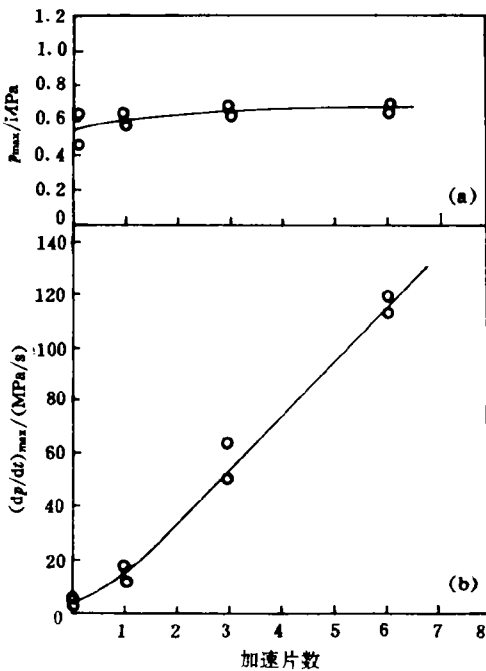
Fig. 4 Pressure signals

根据粉尘在全封闭管道中燃烧时的压力信号可以确定两个重要参数, 即最大压力 p_{max} 和最大压力上升率 $(dp/dt)_{\text{max}}$ 。最大压力是粉尘在封闭容器中所能达到的最大压力值;

最大压力上升率 $(dp/dt)_{max}$ 是压力信号曲线上上升段切线的最大斜率。

3.4 障碍物对 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 的影响

图5绘出了障碍物(加速片)对 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 影响的对比实验结果。对于颗粒直径为 $13\mu\text{m}$ 、浓度为 $500\text{g}/\text{m}^3$ 的铝粉-空气混合物,在使用0、1、3、6块加速片的不同条件下进行对比实验。结果表明,加速片对 p_{max} 的影响很小,而对 $(dp/dt)_{max}$ 的影响十分显著。这种结果是合乎逻辑的。因为在封闭容器中, p_{max} 取决于燃烧物质释放出的总能量,若燃烧容器绝热,那么同样浓度和同样颗粒直径的铝粉燃烧,其释放的总能量是一定的,因而最大压力 p_{max} 应保持恒定。它不会因为有无障碍物而改变,因而变化很小。但是随着加速片数量增加,火焰速度会大幅度提高,燃烧过程加快,能量释放率相应增加,燃烧总时间变短,因而 $(dp/dt)_{max}$ 相应增大。同时,由于燃烧总时间变短,燃烧过程所释放的能量对壁面的热散失相应减少,因而 p_{max} 又有微小增加。



颗粒直径: $13\mu\text{m}$; 浓度: $500\text{g}/\text{m}^3$;
 点火延时: 300ms ; 点火药: 1g (无加速片时 5g)
 Dust diameter $13\mu\text{m}$; Concentration: $500\text{g}/\text{m}^3$;
 Time delay: 300ms ; Ignite powder
 1g (5g for non-accelerating plate)

图5 障碍物对 p_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 的影响

Fig. 5 The effect of obstacles on the p_{max} and $(dp/dt)_{max}$

4 火焰加速机理探讨

在前一节中已经看到,控制燃烧容器内压力上升率的最重要因素是燃烧速度,而对于给定的可燃混合物而言,湍流在火焰传播和燃烧过程中发挥着非常重要的作用。大多数气相可燃混合物的层流燃烧速度量级是 $0.5\text{m}/\text{s}$ 。借助于湍

流,燃烧速度能很容易地增加一个到两个数量级。另外要从燃烧转变为爆轰,就要从起始较慢的火焰连续地加速到某一临界速度,在此,化学反应(即火焰)的传播机理突然改变,即从扩散控制转变为由激波加热的自动点火。发生这种转变的可能性也取决于火焰加速程度。

在燃烧学中,把从一种光滑的层流火焰表面出现的任何变化都定义为湍流火焰,显然,在这一普遍定义范围内,很多因素(或机理)都可能对光滑层流的任何一种变化产生影响。起初,在点火后,火焰通常是层流的。随着火焰从点火中心生长,就逐步“湍流化”了,湍流化过程指的就是火焰加速机理。

图6给出了湍流火焰阵面的结构示意图: $\vec{s}(\vec{r}, t)$ 表示当地燃烧速度; $d\vec{A}$ 表示燃烧表面微元; δ 表示火焰厚度($[\delta^2] \ll [d\vec{A}]$), λ 表示火焰折迭的变形尺度($\lambda \gg \delta$)。根据这些参

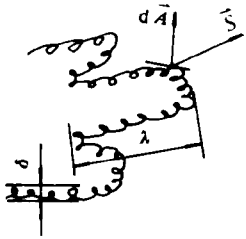


图 6 湍流火焰阵面结构示意图

Fig. 6 The front structure of turbulent flame

数, 体积燃烧率 \dot{V}_b 就可以表达为:

$$\dot{V}_b(t) = \oint d\vec{A} \cdot \vec{s}(\vec{r}, t) \quad (3.1)$$

其中积分是在任一时刻对所有燃烧表面求取的。显然, 如果火焰折迭尺度越大, 燃烧表面积就越大, 体积燃烧率 $\dot{V}_b(t)$ [或质量燃烧率 $\dot{m}_b(t) = \dot{V}_b(t) \rho_u$] 也就越大, 结果能量释放率增加, 反应加快, 火焰传播速度加快。因此大尺度湍流通过折迭来增加火焰燃烧的总面积, 而小尺度湍流则增加局部热和质量交换, 它们对形成较高的燃烧速度都有贡献。

火焰在容器内部传播时, 在容器壁面上(与粗糙度有关), 剪切和速度梯度会在未燃流场中发展; 如果还存在障碍物, 则流场就会进一步变形, 并在障碍物表面的边界层和尾迹中形成速度梯度。图

7给出了 P. Wolanski^[1]对气相火焰在有障碍物管中传播的高速摄影照片。在火焰通过一个单台阶障碍物的过程中, 在火焰未到达之前, 未燃混合物的平移流动建立了一个高速梯度场和一个围绕障碍物的伴随绕流场; 当火焰到达这一障碍物时, 随着火焰沿梯度场的聚汇, 火焰表面被迅速拉伸, 在尾迹流中的剪切层使当地燃烧速度得到相当大的增加。

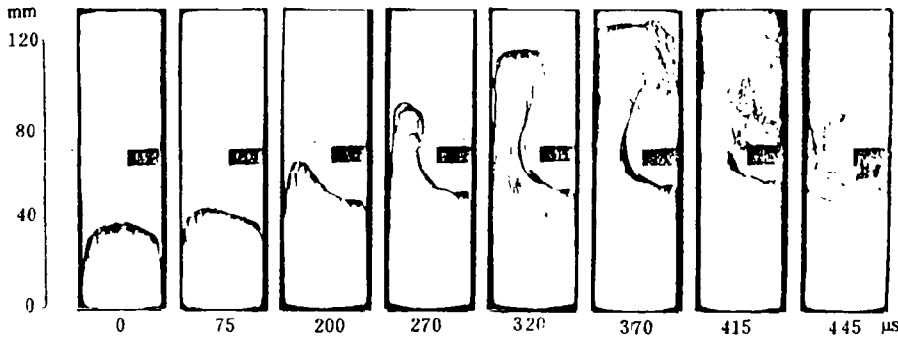


图7 火焰通过单台阶障碍物时的高速摄影照片

Fig. 7 High speed photographs of a flame propagating past a single obstacle

随着火焰阵面在这个梯度场中传播, 并发生“伸长和折迭”。这种火焰的变形将在一个较大表面上消耗燃料和氧气, 导致热释放率的增加, 火焰传播速度加快; 较高的燃烧速度导致了火焰前面未燃混合物较大的平移流动速度, 这又会引起流场梯度的进一步增大, 导致了更强烈的火焰伸展和折迭。如此下去, 随着火焰在速度梯度场中伸展与折迭, 就建立起了气动力流动与燃烧过程之间的正反馈耦合——火焰加速机理。

对于折迭湍流火焰, 在它之前有可能维持一个梯度场, 因而维持其折迭湍流结构不再受边界或障碍物影响。但是, 无论是在气相火焰^[1]还是在非均相火焰中(本文前一节图3)都有实验结果说明, 在某些情况下, 把障碍物取消, 则大尺度火焰折迭不能自身维持, 因而, 随着“火焰折迭”的燃尽, 燃烧速度会迅速下降。因此, 为了维持大尺度湍流的高燃烧速度, 必须连续不断地产生大尺度火焰折迭, 于是, 就需要在火焰传播的途径上周期性地设

置一系列障碍物。例如 Schekin 在爆轰管中设置金属丝螺旋造成周期性障碍物,对诱导 DDT 是很有效的。

对于自由传播火焰,周期性地设置适当大小的障碍物能够连续产生火焰折迭。对于给定的混合物,可能存在一个临界大小和空间尺度的障碍物群分布,在这种分布情况下,可能获得最佳火焰加速效果。虽然为了加速火焰,希望产生较大的旋涡,然而旋涡的动能以及尺度的增加还会使输运率下降。因而存在一个最优旋涡尺度,如果障碍物的尺度和分布与产生这一最优旋涡尺度相匹配,就会取得最优加速效果。

本文采用的加速片(障碍物)对火焰传播速度的作用基本体现了上述分析,见图3。例如,不设置加速片,火焰速度为 $8\sim 40\text{m/s}$;设置一块加速片,可使火焰速度达到 110m/s ,但由于没有重复设置加速片,在第一个大尺度火焰折迭消耗之后,火焰速度仍然降为 45m/s ;重复设置三块加速片,情况就不同了,它可以连续产生大尺度旋涡,使火焰速度线性增加至 200m/s 以上;当加速片增至六块时,除了火焰速度以更高的速率线性增加,在 1.5m 处就达到 230m/s 外,在后续部分基本上维持这一速度,说明此时障碍物(加速片)诱导的火焰折迭达到了两种竞争机理的平衡状态。

应当指出,我们完全可以对各种不同形状、不同尺度、不同空间分布的障碍物群,进行一系列实验,考察火焰加速与诱导湍流之间的关系。并找出特定燃烧工质的最优旋涡尺度和障碍物尺寸及分布。目前本文所采用的加速片方案,当然不一定是最优方案,这些方案的结果只给我们提供了一种对火焰加速的定性认识;同时为我们能在实验室范围内实现铝粉-空气混合物稳态爆轰而遇到的火焰加速问题提供了一种有效的解决方案。

当然,火焰加速机理绝非仅此一种。例如,在气相燃烧理论中的 Taylor 压力波与燃烧阵面相互作用而导致界面不稳定性理论,由火焰产生的前驱激波对未燃混合物的加热和压缩的正反馈机理,并导致燃烧转爆轰等。然而结合本文目前的研究内容,对于铝粉-空气混合物火焰在有障碍物的管道中传播的加速机理,其主要方面应归功于障碍物诱导的湍流区对燃烧过程的正反馈。

5 结 论

1) 实验证明,在沿火焰传播的通道上重复设置障碍物,不仅对气相火焰,而且对气-固二相火焰都有加速作用。这种加速作用的机理可归功于障碍物诱导的湍流区对燃烧过程的正反馈。本文研究的铝粉-空气混合物,障碍物可以提高火焰传播速度一至两个数量级,证明这种方法是火焰加速的一种有效手段。

2) 在封闭容器中,铝粉-空气混合物燃烧达到的最大压力 p_{\max} 与障碍物存在关系不大,说明 p_{\max} 主要取决于容器内可燃混合物的总能量,而燃烧过程的快慢只在减少壁面热散失方面对 p_{\max} 有贡献。

然而,最大压力上升率 $(dp/dt)_{\max}$ 则与障碍物的存在有很大关系。障碍物可以加速火焰传播,加快燃烧过程,缩短燃烧时间,提高能量释放率,因而提高 $(dp/dt)_{\max}$,说明 $(dp/dt)_{\max}$ 与过程有关,是一个过程量。

参 考 文 献

- 1 Lee John H S. Explosion Phenomenon. (Printed Teaching Materials), McGill University, Montreal, Canada
- 2 刘晓利,等. 铝粉-空气混合物的爆轰管研究. 弹道学报, 1993, 2: 76~82
- 3 刘晓利,等. 水平粉尘爆轰管上扬尘方法研究. 南京理工大学学报, 1993, 5: 9~15
- 4 刘晓利. 可燃粉尘-空气混合物燃烧与爆轰特性的实验研究与数值模拟:[博士论文]. 南京:南京理工大学, 1993.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE ACCELERATING EFFECT OF THE ALUMINUM DUST FLAME WITH OBSTACLES

Liu Xiaoli, Li Hongzhi, Ye Jingfang, Liu Dianjin
(*Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094*)

ABSTRACT Obstacles setting repeatedly along the path of the flame propagation possess obviously accelerating effect on the dust flame. The mechanism of the accelerating effect is attributed to the positive feedback of the turbulence region induced by obstacles for combustion process. The maximum explosion pressure p_{\max} of the aluminum dust-air mixture in closed combustion vessel relies slightly on the existence of obstacles. The maximum rate of pressure rise $(dp/dt)_{\max}$ relies strongly on the existence of obstacles, because p_{\max} depends on the total energy inside the vessel and $(dp/dt)_{\max}$ depends on the process of combustion, i. e. the rate of energy release.

KEY WORDS dust explosion, aluminum dust, combustion, flame