

密闭容器内粉尘爆炸特性研究

中国科学院力学研究所 郭汉彦 等*

摘要 本文对密闭容器中粉尘爆炸压力随时间变化规律进行分析, 确定其影响因素, 并根据实测压力波形推算爆燃波传播速度及火焰厚度。

关键词 粉尘爆炸特性 火焰速度 火焰厚度

一、引言

近年来, 由于工业粉尘爆炸事故时有发生, 给国家和人民的生命财产造成了很大损失, 因而引起了国内各有关部门的高度重视, 相继开展了粉尘爆炸研究工作, 对粉尘爆炸机理和粉尘防爆措施进行了大量的试验研究工作, 并取得了大批粉尘爆炸参数实验数据。在粉尘爆炸参数中, 粉尘爆炸效应类参数, 即粉尘最大爆炸压力及最大压力上升速率, 是关系到粉尘爆炸造成破坏严重程度的参数, 因而对其进行深入的分析研究有着重大的实际意义。同时由于工业粉尘爆炸事故危害大的多发生或首先发生在建筑物或工艺设备的相对密闭的空间内, 所以密闭空间内粉尘爆炸压力和压力上升速率的变化规律更应得到人们的重视。

为进行泄爆或其他类型的控爆设计, ISO-6184/1 规定利用 K_{st} 对可燃粉尘进行危险性分级。它是根据在一定容积范围的密闭容器内进行试验测试的压力上升速率得出的工程近似关系。分析表明最大爆炸压力上升速率不仅与容器形状有关, 而且与容器的容积大小的关系并不是简单的立方根关系。为了探索粉尘爆炸最大压力上升速率的变化规律及影响因素, 本文试图首先对密闭容器中粉尘爆炸压力随时间变化规律进行分析确定其影响因素, 随后根据实测压力波形推算爆燃波传播速度及火焰厚度等。

二、爆燃波(火焰阵面)速度和火焰厚度

粉尘爆炸是气体与固体颗粒两相混合物的不定常化学流动, 其流场非常复杂。其反应阵面既可能以每

秒仅数十厘米的层流爆燃速度传播, 又可能以每秒一千多米的爆轰波速度传播。更多的情况则是初始时以较低速度传播的爆燃波在传播过程中不断加速达到较高的传播速度, 甚至可能转变为爆轰波。其反应阵面的厚度亦在传播过程中发生变化。反应阵面的传播速度及反应(火焰)阵面的厚度不同, 容器内压力变化规律亦不相同。因此, 爆燃波火焰阵面速度和火焰厚度是描述粉尘爆炸特性的很重要的两个参数。要测量这两个参数需要用专门的测量仪器进行专门的试验, 通常是利用光学、热学或电学的传感器来测定各个时刻(反应火焰)阵面到达的位置或利用高速摄影机拍摄火焰传播的轨迹。除去需要这些专门的测量仪器设备外, 还需要专门的爆炸容器, 这样就使得试验所得数据资料有限。而我们在 20L 及 2 m³ 等球形或接近球形粉尘爆炸试验装置测定粉尘爆炸最小点火能、爆炸浓度下限、最大爆炸压力及最大压力上升速率时可取得大量容器内爆炸压力波形。问题在于是否可从这些压力波形得到粉尘爆燃波阵面速度及反应(火焰)阵面的厚度。国外曾有人对容器内铝粉尘爆炸时压力变化过程进行了计算, 并与实验对比, 其间有较大差异。考虑到上述这些容器内粉尘爆燃波接近球形, 并取其传播速度的平均, 我们对于给定爆燃阵面速度及反应(火焰)阵面厚度条件下计算了中心点火时容器内爆炸压力变化过程, 其结果与容器内粉尘爆炸实测压力波形完全一致。经反复分析比较后发现: 粉尘云中心点火后爆燃波自中心向四周传播时, 容器内压力逐渐上升; 当爆燃波阵面达到器壁时, 压力波形的斜率最大, 即压力上升速率达到最大值; 以后压力继续上升, 但压力上升速率逐渐减慢, 直至容器内粉尘全部

* 本文作者: 中科院力学研究所郭汉彦、陈立红、任学文、王小京、张春丽

化学反应过程（燃烧过程）全部结束，压力达到最大值（见图1）。

这样我们就可以从实验得到的压力波形来估算其爆燃波阵面的传播速率及火焰厚度。

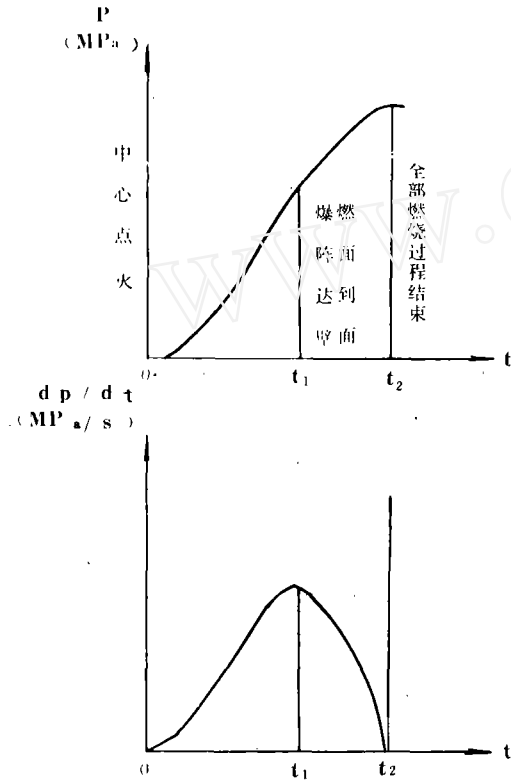


图1

三、试验装置及试验方法

本文所用试验爆炸容器均为高度和直径相等的近似球形密闭容器，容积分别为20L和2m³。可燃粉尘

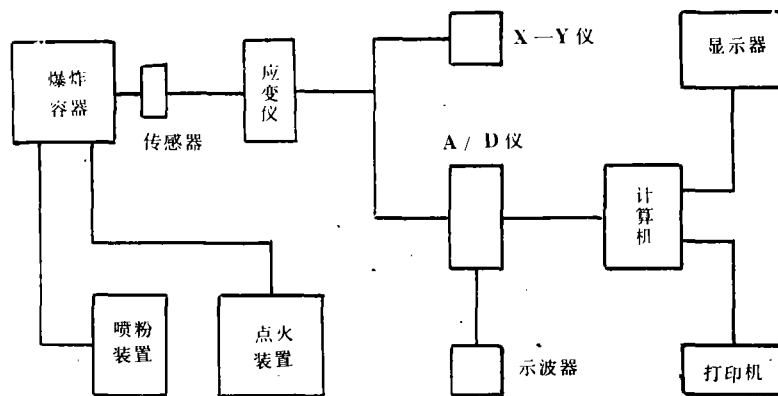


图2 试验系统框图

选用玉米淀粉、亚麻粉尘、铝粉、煤粉等。容器内粉尘爆炸压力变化情况利用装在容器壁上的BPR-2型应变式及压电式压力传感器测得，所输出压力模拟信号，在送入X-Y笔式记录仪记录压力波形的同时，送给A/D转换器进入计算机处理，得到最大压力、最大压力上升速率等粉尘爆炸参数。粉尘点火采用容器中心点火方式。

试验系统框图如图2所示。

四、试验结果与分析

试验所得压力波形如图3所示：

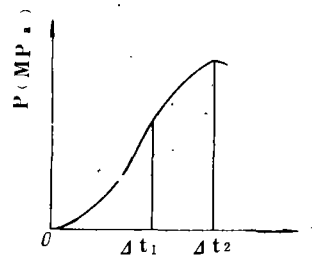


图3 压力波形

由上述典型压力波形可以看到，从起点到波形的拐点处这一段时间相当于从粉尘容器中心点火到爆燃波阵面接触容器壁的时间，用 Δt_1 表示。从波形拐点到达最大压力即波形最高点处所用时间表示为 Δt_2 ，这是由于爆燃波火焰阵面有一定厚度，火焰接触器壁持续的时间。两段时间之和即为容器内燃烧的持续时间。因此，容器内的爆燃阵面传播的平均速度即可由下式求得：

$$V_f = R / \Delta t_1$$

式中 V_f —爆燃波速度

R ——容器的半径

Δt_1 ——从点火到火焰到达器壁的时间

同时可估算密闭容器内粉尘爆炸的火焰厚度为:

$$\delta_f = V_f \cdot \Delta t_2$$

式中 δ_f ——火焰厚度

V_f ——火焰速度

Δt_2 ——火焰碰壁持续时间

通常,在粉尘发生爆燃时,火焰阵面前沿处粉尘云存在湍流运动,加上火焰燃烧阵面的不稳定,从而更加速了火焰阵面的传播速度。此外,如点火源的位置,局部粉尘浓度的大小,爆炸空间的形状尺寸等等因素在研究大尺寸结构、特别是情况复杂的空间内的粉尘爆燃时,尤其应该注意。本试验中我们采用的20 L和2 m³容器的半径分别为150 mm和700 mm。

鉴于目前尚未见到有关密闭容器内火焰传播规律及火焰厚度的报道,因此我们在这方面进行了一些探索性工作,取得了密闭容器内火焰速度和火焰厚度的变化规律,结果如图4、5、6、7所示。

试验结果表明,密闭容器中的火焰速度随粉尘的浓度增加而增加。另外,火焰速度与容器的容积大小关系很大,小尺寸容器中火焰传播距离较短,湍流加速过程短。而随着容器尺寸增大,湍流加速过程变长,湍流加速影响就大。火焰厚度的变化呈现出类似的规律。

通过以上分析,我们得到下列结果:

1. 密闭容器内火焰速度和火焰厚度都随容器内粉尘云浓度增加而增加;

2. 20 L容器中火焰速度和火焰厚度均远小于2m³中的数据;

3. 20 L容器中火焰平均速度为0.7 m/s,最大为1.5 m/s,火焰平均厚度为74.7 mm,最大为114 mm;

4. 2 m³容器中火焰平均速度为3.2 m/s,最大为3.9 m/s,火焰平均厚度为636.6 mm,最大为778 mm。

五、结论

1. 火焰速度及火焰厚度随容器尺寸增加而增加;
2. 火焰速度对于最大压力上升速率有明显的影响;
3. 本文首次得出火焰厚度对最大压力上升速率影响甚大,特别是在压力的初始阶段。在进行泄爆设计时应给以注意。

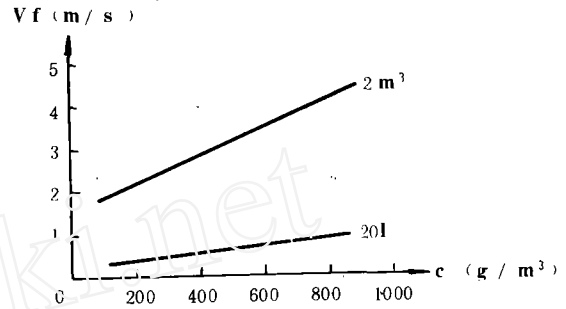


图4 淀粉爆炸火焰速度变化规律

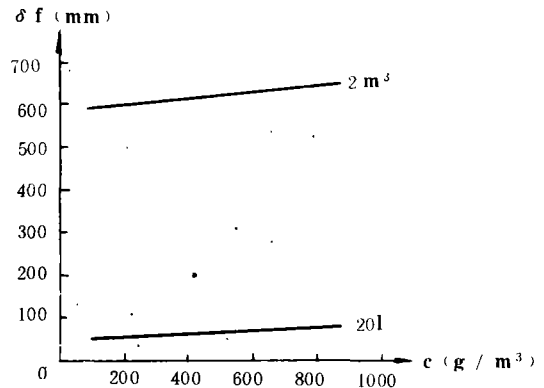


图5 淀粉爆炸火焰厚度变化规律

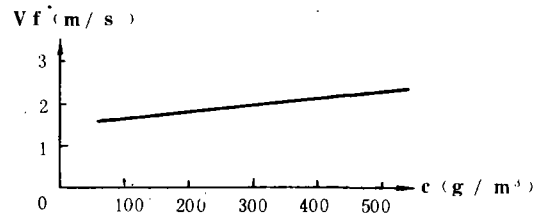


图6 20L 亚麻粉尘爆炸火焰速度变化规律

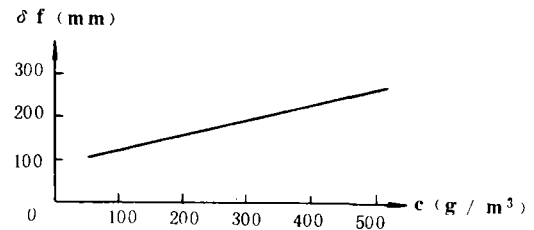


图7 20L 亚麻粉尘爆炸火焰厚度变化规律