

微细球形铝粉爆炸特性的实验研究

浦以康 袁生学

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

丁大玉 王伯良 汤明物

(华东工学院 南京 210014)

摘要 从工业安全角度出发,在三种不同实验装置上对五种粒度(直径由 $3\sim 30\mu\text{m}$)的球形铝粉的爆炸特性进行了全面、系统的实验研究。研究结果主要给出了铝粉在封闭容器的爆炸过程中,其粉末浓度、粒度、含氧量和初始扬尘湍流强度对爆炸后的最大压力升值、最大能量释放率和最低极限着火粉尘浓度的影响。结果表明:铝粉粒度和含氧量是对铝粉爆炸参数有最主要影响的两个因素。

关键词 粉尘爆炸 扬尘湍流 微细铝粉

在现代工业中,如面粉、制糖、煤和冶金以及金属材料制备等行业都不可避免地产生大量粉尘,大部分粉尘又都具有可燃性,当遇到足够能量的点火源时,粉尘-空气混合物就会产生燃烧和爆炸。粉尘爆炸过程中,热能释放率大得可以使爆炸后压力急剧地增加而形成爆燃波或爆轰波的传播,从而造成巨大的财产损失和人员伤亡。

已有实验结果表明,在同样条件下,微细铝粉的爆炸强度比有机物粉尘(如粮食粉尘、煤粉等)要激烈得多,同时,铝粉也是易于形成爆轰的一种物质。因此,为了更好地预防生产过程中可能出现的爆炸灾害,必须开展对铝粉爆炸特性及机理的研究,这不仅具有一定的理论价值,也具有很重要的实际意义。

国内外大部分粉尘爆炸工作的工业应用背景都是为了消除工业粉尘爆炸灾害的发生,或者当爆炸事故发生时,尽量减少爆炸引起的破坏性后果。粉尘爆炸的破坏性效应主要取决于如下一些爆炸特性,例如最大爆炸压力升值 Δp_{max} ,最大爆炸压力上升率 $(dp/dt)_{\text{max}}$ 以及粉尘火焰传播的速度和范围。这些特性又受到粉尘云的浓度(C_0)、粉尘颗粒的粒度(d_p)和形状、粉尘的化学成分、燃烧过程中的供氧量以及向周围边界的传热等因素的影响。

本文的目的是从工业安全的角度出发,分别在三种不同的实验装置上对微细球形铝粉的爆炸特性进行了全面、系统的研究。实验结果给出了球形铝粉的粉尘浓度及粉尘云中含氧量对最大爆炸压力升值,最大爆炸压力上升率以及最小粉尘点着极限的影响。为了确保本文在封闭容器中获得正常、重复的铝粉爆炸现象,从而给出可靠的铝粉爆炸参数,本文还在测得了扬尘过程中瞬态流动速度的基础上,采用了系综平均法来确定瞬态扬尘

1991年5月3日收到原稿,10月5日收到修改稿。

过程中扬尘湍流强度随时间的变化规律,给出了不同点火延迟时间(Δt_{di})所对应的扬尘湍流强度值(u_0)。此外还采用了激光光源给出了粉尘颗粒在封闭容器中的悬浮时间。

本文提供的实验数据,不仅为工业部门预防微细铝粉粉尘爆炸灾害给予了直接的支持,还将为进一步开展铝粉爆炸机制研究奠定了基础。

1 实验装置及测量系统

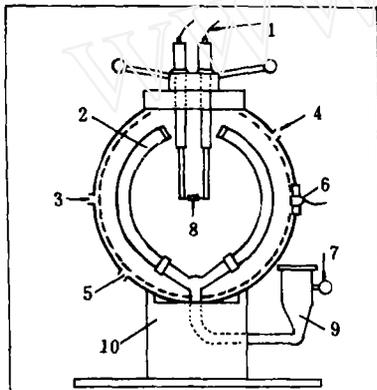
1.1 实验装置

1) 20 立升标准球形容器(长径比 $L/D=1$)

该容器直径为 0.34 米的高压球形燃烧室,扬尘系统由两根对称的半环形扬尘管、电磁阀和粉尘室组成,其中粉尘室与高压气室合一,见图 1。具体结构与描述见文献[1]。

2) 22 立升圆柱形封闭燃烧管(长径比 $L/D=6.5$)

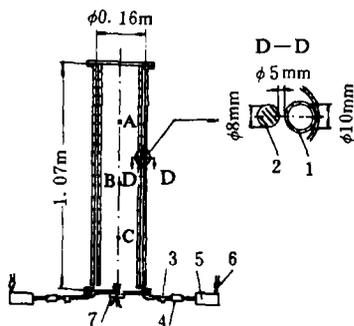
该管是一座自行设计与加工的内径为 0.16 米,长 1.07 米,两端封闭的垂直燃烧室。扬尘系统是由两套完全对称的扬尘管、电磁阀、粉尘室和高压气室组成,见图 2。当电磁阀



- | | |
|----------|-------------------------------|
| 1. 接电源 | 1. Ignition leads |
| 2. 环形扬尘管 | 2. Perforated dispersion ring |
| 3. 排气阀 | 3. Exhaust valve |
| 4. 冷却水入口 | 4. Water inlet |
| 5. 冷却水出口 | 5. Water outlet |
| 6. 压力传感器 | 6. Pressure transducer |
| 7. 压力表 | 7. Pressure gauge |
| 8. 点火头 | 8. Ignitor |
| 9. 粉尘室 | 9. Dust chamber |
| 10. 支架 | 10. Support |

图 1 20 立升标准形容器($L/D=1$)装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 20 liter spherical chamber



- | | |
|----------|--------------------------------|
| 1. 扬尘管 | 1. Dispersion pipe |
| 2. 棒 | 2. Bar |
| 3. 扬尘室 | 3. Dust vessel |
| 4. 电磁阀 | 4. Electromagnetic valve |
| 5. 高压空气室 | 5. High pressure air reservoir |
| 6. 阀门 | 6. Valve |
| 7. 点火头 | 7. Ignitor |

图 2 22 立升圆柱形封闭燃烧管($L/D=6.5$)装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the 22 liter closed combustion tube ($L/D=6.5$)

打开时,高压气室压缩气体将粉尘由扬尘管壁的小孔吹至燃烧室内。扬尘管的内径为10毫米,沿扬尘管壁有50多个孔径为1.0毫米至2.0毫米的小孔。这些小孔沿轴向管壁的分布和孔径的确定以保证粉尘浓度获得均匀的轴向分布为目的。两扬尘管平行地置于燃烧管内壁两侧,从小孔射出的粉尘射流碰撞后使截面上产生对称与均匀的粉尘浓度分布。但在实际操作时,两扬尘管的位置不可能安置得如此精确以保证两股射流能完全正碰,因此导致粉尘爆炸数据重复性较差。为此,我们在扬尘管小孔前约5毫米处各平行地放置

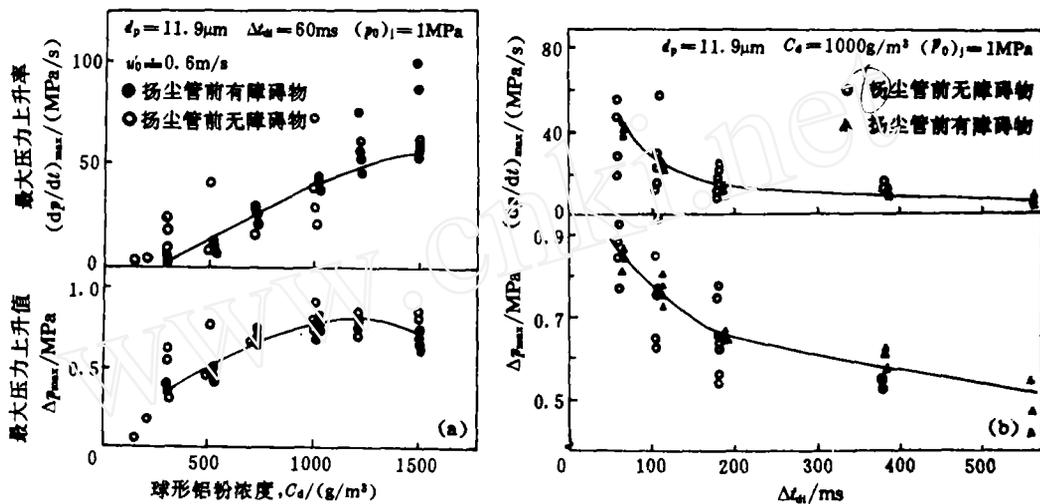


图3 扬尘系统中有阻挡物与无阻挡物情况下所测得的铝粉爆炸特性参数 $[\Delta P_{max}, (dp/dt)_{max}]$ 的比较
 Fig. 3 A comparison of the dust explosion parameters in aluminum dust air mixtures from the 22 liter closed tube in which the dispersion system with and without the bar in front of the dispersion pipes
 Dispersion system with a bar, \bullet Dispersion system without a bar

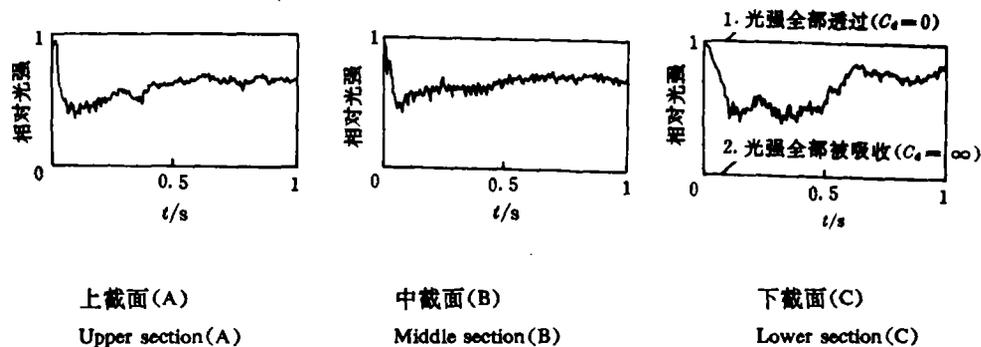


图4 22升圆柱形封闭燃烧管上、中、下三个不同截面上,粉尘浓度的光学测量结果
 Fig. 4 The relative dust concentration (according to the light transmission measurements) versus time at top, middle and bottom sections of the 22 liter closed test tube, respectively

一根直径为8毫米的棒,将从小孔喷出的射流转化为一绕流,一方面减小射流的平均速度,另一方面在燃烧室截面上获得较均匀的粉尘浓度分布。图3给出的实验结果表明:扬尘管前有棒阻挡比没有棒的情况下所获得的铝粉爆炸数据重复性要好。图4分别给出了在燃烧管上、中、下三个不同截面上扬尘过程中激光光源衰减的情况,此结果表明燃烧管沿轴向粉尘浓度分布是比较均匀的。

3) 哈特曼管(1.2 立升)

哈特曼管是一个工业部门通用的开口燃烧室,用它来测量粉尘爆炸的浓度下限。具体结构与描述见文献[2]。

1.2 测量系统

压力测量用 FTSV2100 应变压力传感器,记录采用 DM-2100 多通道瞬态记录仪。

粉尘浓度是根据放入粉尘室的粉尘重量和燃烧室的容积来确定的。铝粉和气体介质中氧含量是在干燥空气充氧或充氮来实现的。不同成分的氧或氮充入空气瓶后至少过24小时后才能使用,以保证充分混合。

本研究中所使用的铝粉(粒度范围为 $3\mu\text{m}$ 至 $30\mu\text{m}$),在显微镜下观察均呈标准球形。为了提高扬尘的均匀性和改善微细颗粒易结团的现象,实验用的铝粉均加入0.5%的流化剂(CAB-O-3II.)。

实验中采用底端中心点火,点火由0.6克黑火药自制而成。

实验中用热线风速仪测量了上述三种实验装置中瞬态扬尘过程中的速度随时间的变化。然后采用了系综平均法求得瞬态扬尘湍流参数^[3]。文献[4]的实验结果给出粉尘对扬尘湍流参数测定的影响较小($\sim 10\%$)。本文湍流参数的测量是在不带粉尘的空气中进行的,两相介质对流动的影响被忽略。

2 实验结果

2.1 粉尘浓度对球形铝粉(粒度范围 $3\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$)在封闭燃烧室中爆炸特性的影响,见图5与图6

在22立升柱形燃烧室中,对五种粒度(3,7,11.9,21.8,30 μm)球形铝粉,在粉尘浓度范围为 $150\text{g}/\text{m}^3$ 至 $1500\text{g}/\text{m}^3$ 的条件下的爆炸特性进行了系统研究。实验中采用了最短的点火延迟时间(60ms),其对应的初始扬尘湍流强度(u_0)约为0.6m/s,贮气室初始压力(p_0)= 10MPa 。图5给出的实验结果表明了:在封闭燃烧室的铝粉爆炸过程,其最大压力升与最大能量释放率均随粉尘浓度的增加而增值,后者的增值比前者要急剧得多。但当粉尘浓度达到 $1000\text{g}/\text{m}^3$ 以后,最大压力升值几乎趋近于一极限值。实验结果还表明:粉尘的最小着火浓度随着粒度的增大而明显增加。

在20立升球形燃烧室中,对三种粒度(5,15,30 μm)的球形铝粉,在粉尘浓度范围从 $150\text{g}/\text{m}^3$ 至 $1000\text{g}/\text{m}^3$ 的条件下的爆炸特性进行了系统研究。实验中采用了较短的点火延迟时间(100ms),其对应的初始扬尘湍流强度约为1m/s。实验中还对不同的扬尘总压对爆炸特性的影响进行了探讨,图6给出了实验结果。其变化规律与22立升柱形燃烧室的结果相符。

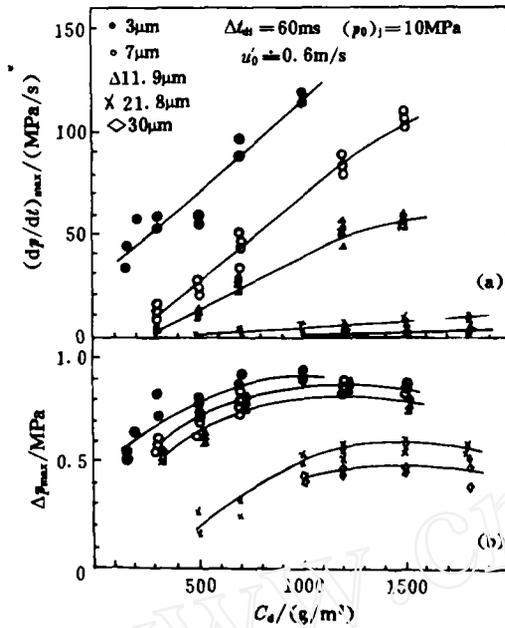


图 5 在 22 升圆柱形封闭燃烧管中，铝粉爆炸特性参数 $[\Delta P_{\text{max}}, (dP/dt)_{\text{max}}]$ 随铝粉浓度 (C_d) 的变化曲线
Fig. 5 The influence of aluminum dust concentration on the maximum rate of pressure rise and the maximum pressure rise of explosion in the 22 liter closed tube

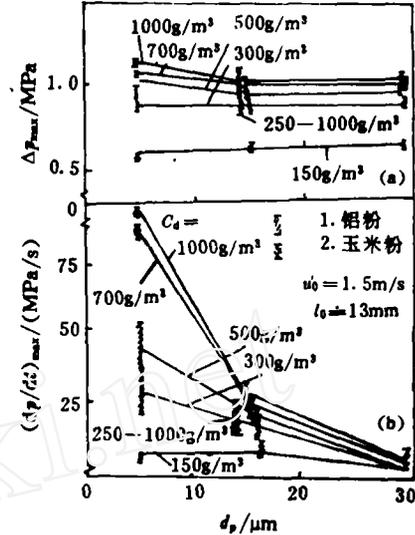
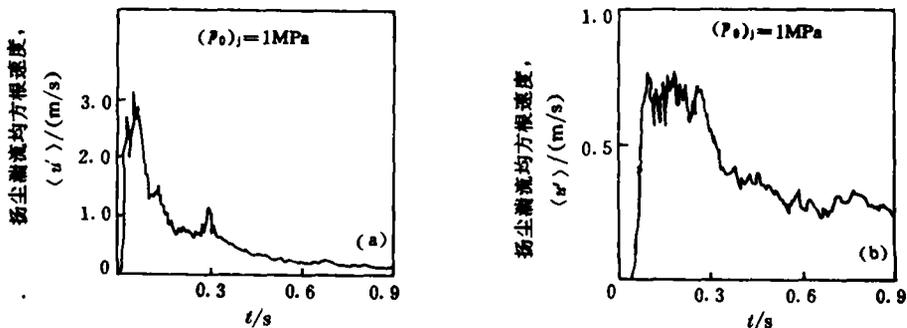


图 6 在 20 升球形容器中，铝粉爆炸特性参数 $[\Delta P_{\text{max}}, (dP/dt)_{\text{max}}]$ 随铝粉粒度 (d_p) 的变化曲线
Fig. 6 The influence of particle diameter of aluminum dust on the maximum rate of pressure rise and the maximum pressure rise of explosion in the 20 liter spherical bomb
1. Aluminum dust, 2. Corn dust

2.2 扬尘湍流强度对球形铝粉 (粒度范围为 $3\mu\text{m}$ 至 $30\mu\text{m}$) 在封闭燃烧室中爆炸特性的影响, 见图 8 和图 9



(a) 20 升燃烧球
(a) In the 20 liter spherical bomb
(b) 22 升垂直燃烧管
(b) In the 22 liter closed tube

图 7 在 20 升标准球及 22 升圆柱管两容器中扬尘湍流均方根速度的系综平均值随时间的变化曲线
Fig. 7 The ensemble average rms turbulent velocities as a function of time

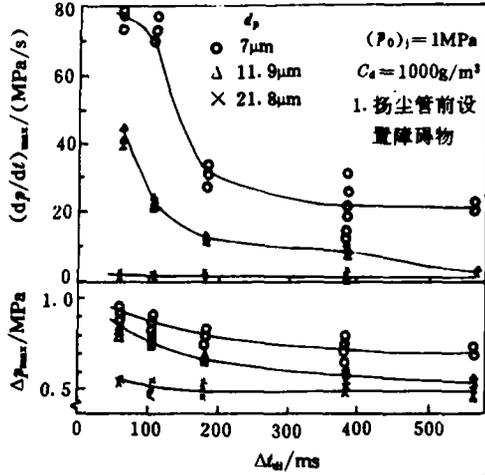
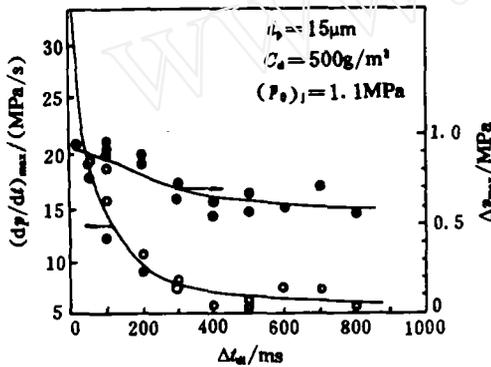
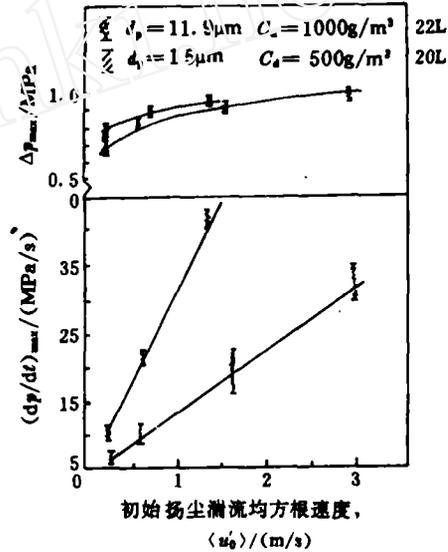


图8 在22立升圆柱形封闭燃烧管中, 铝粉爆炸特性参数 $[\Delta p_{max}, (dp/dt)_{max}]$ 随点火延迟时间 Δt_d 的变化曲线

Fig. 8 The influence of ignition delay time on the maximum rate of pressure rise and the maximum pressure rise of explosion
1. Dispersion system with a bar



(a) $[\Delta p_{max}, (dp/dt)_{max}] \sim (\Delta t_d)$



(b) $[\Delta p_{max}, (dp/dt)_{max}] \sim (u'_0)$

图9 在20立升标准球形容器中, 铝粉爆炸特性参数 $[\Delta p_{max}, (dp/dt)_{max}]$ 随点火延迟时间 (Δt_d) (a)及随扬尘湍流均方根速度 (u'_0) (b)的变化曲线

Fig. 9 The maximum rate of pressure rise and the maximum pressure rise of explosion in the 20 liter spherical bomb as a function of

(a) Ignition delay time, (b) Ensemble average rms turbulent velocity

扬尘湍流强度在封闭燃烧容器中是随点火延迟时间而衰减的。因此,在实验中一般均采用点火延迟时间来定性表征扬尘湍流度。短的点火延迟时间对应了强的扬尘湍流强度,反之长的点火延迟时间对应了弱的扬尘湍流强度。本研究中用热线风速仪测定了扬尘过程中瞬态速度随时间的变化律,再用系综平均法确定扬尘湍流强度随时间的变化律,见图7。从而定量给出了不同点火延迟时间所对应的扬尘湍流强度。

在22立升柱形燃烧室中,对三种粒度(7, 11.9, 21.8 μm)的球形铝粉,在粉尘浓度为1000g/m³条件下,对点火延迟时间从60ms增至580ms时对爆炸特性的影响进行了系统

的研究。其时所对应的初始扬尘湍流强度约从 0.6m/s 降至小于 0.1m/s。图 8 给出的实验结果表明:在封闭燃烧室的铝粉爆炸过程,扬尘湍流强度对最大压力上升率有较明显的影响,而对最大压力升值影响不大,而且粒度小比粒度大的影响大。

在 20 立升球形燃烧室中,对粒度为 15 μm 的球形铝粉,在粉尘浓度为 500g/m³ 条件下,对点火延迟时间从几乎零至 800ms 时对爆炸特性的影响进行了系统的研究,见图 9(a)。其时对应的初始扬尘湍流强度约从 3m/s 降至小于 0.1m/s。图 9(a),(b) 给出的实验结果表明:扬尘湍流强度对最大压力上升率和最大压力升值的影响规律与在 22 立升柱形燃烧室中相似。

2.3 粉尘粒度对球形铝粉在封闭燃烧室中爆炸特性的影响,见图 10 及图 6

在 22 立升柱形燃烧室中,对五种粒度(3, 7, 11, 9, 21, 8, 30 μm) 的球形铝粉,在粉尘浓度为 1000g/m³,点火延迟时间为 60ms 的条件下的爆炸特性进行了系统研究,所对应的初始扬尘湍流强度为 0.6m/s。图 10 给出的实验结果表明:粒度大于 20 μm 的球形铝粉对应了较低的最大压力升值和最大压力上升率。在粒度为 3 μm 至 10 μm 的球形铝粉对应的最大压力升值随粒度变化不大,但对应的最大压力上升率却随着粒度的减小而急剧增大。比如粒度为 3 μm 的最大压力上升率为粒度为 7 μm 的一倍半左右。最小点着粉尘浓度也随粒度的减小而明显减少。

在 20 立升球形燃烧室中,对三种不同粒度(5, 15, 30 μm) 的球形铝粉,在粉尘浓度为 1000g/m³ 至 150g/m³ 的范围内,点火延迟时间为 100ms(所对应的初始扬尘湍流强度为 1.0m/s) 时的爆炸特性进行了系统研究。图 6 给出了实验结果。实验结果所显示的球形铝粉粒度对爆炸特性的影响的规律与在 22 立升柱形燃烧室中的相似。但实验结果还表明了粒度的影响在高浓度的条件下更为显著。

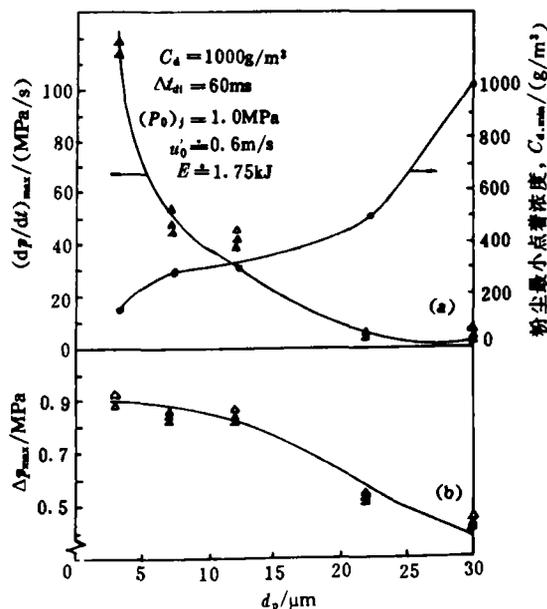


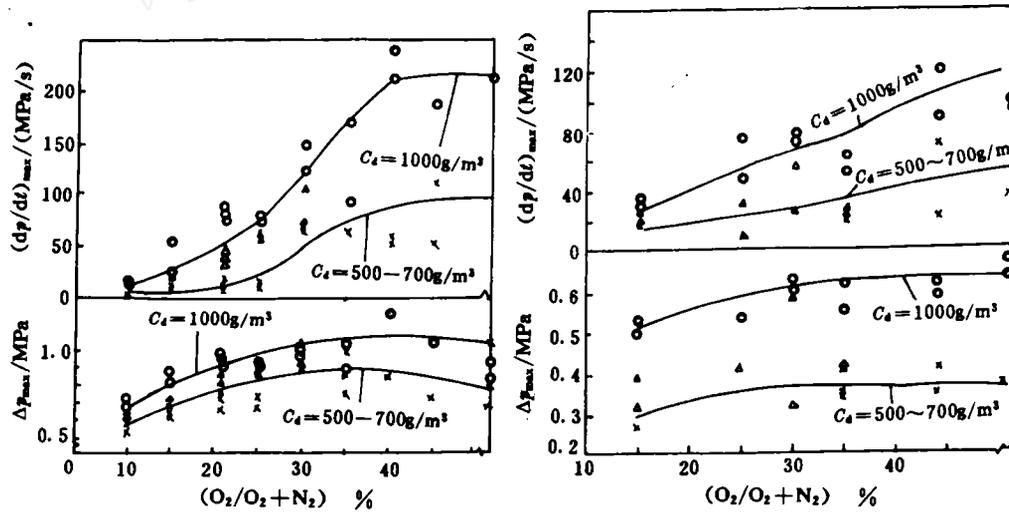
图 10 在 22 立升圆柱形封闭燃烧管中,铝粉爆炸特性参数 $[\Delta p_{\max}, (dp/dt)_{\max}]$ 随铝粉粒度 (d_p) 的变化曲线

Fig. 10 The influence of particle diameter of aluminum dust on the maximum rate pressure rise and the maximum pressure rise of explosion in the 22 liter closed tube

2.4 球形铝粉在(O₂+N₂)混合气体中燃烧时,气体介质中含 O₂ 量及含 N₂ 量对铝粉爆炸特性的影响,见图 11 及图 12

在 22 立升柱形燃烧室中,对两种粒度(7, 21.8μm)的球形铝粉,在粉尘浓度为 500, 700, 1000g/m³三种条件下,点火延迟时间为60ms(所对应的初始扬尘湍流强度为 0.6m/s)时,气体介质中含 O₂ 量由 21%(空气)增至 55%,和含 N₂ 量由 79%(空气)增至 90%所对应的爆炸特性进行了系统研究。图 11a,b 分别给出了两种不同铝粉粒度情况下的实验结果。实验结果表明,含 O₂ 量增加将导致最大压力升值和最大压力上升率的增加;反之,含 N₂ 量的增加则导致最大压力升值和最大压力上升率的减少,但它们对最大压力上升率的影响比最大压力升值要急骤得多。实验结果还表明:当含 O₂ 量增至 40%以后到 55%,爆炸特性趋于—极限值,不再随之增加;含 N₂ 量增至 90%时,铝粉将不再发生爆炸。

在 20 立升球形燃烧室中,用增加扬尘总压的手段来增加扬尘湍流强度,但同时也增加了燃烧室的初始压力(p₀)。这将增加燃烧时的含 O₂ 量,因而提高铝粉爆炸参数。图 12 给出了在粒度为 15μm 时,点火延迟时间为 100ms,粉尘浓度为 150g/m³ 至 1000g/m³ 范围内,燃烧室内部初始压力为 131.7226, 149.951, 189.479kPa(1.3, 1.48 和 1.87 大气压)时的铝粉爆炸特性。



○ $C_d = 1000g/m^3$, $\Delta C_d = 700g/m^3$, $\times C_d = 500g/m^3$, $(p_0)_{ms} = 1.0MPa$, $(u') \approx 0.6m/s$, $\Delta t_{ms} = 60ms$

(a) 铝粉粒度 $d_p = 7\mu m$ (b) 铝粉粒度 $d_p = 21.8\mu m$

(a) Diameter of aluminum particle 7μm (b) Diameter of aluminum particle 21.8μm

图 11 在 22 立升圆柱形封闭燃烧管中,铝粉爆炸特性参数 $[\Delta p_{max}, (dp/dt)_{max}]$ 随气体介质中氧含量 (O_2/O_2+N_2) 的变化曲线

Fig. 11 The influence of oxygen and nitrogen content on the maximum rate of pressure rise and the maximum pressure rise of explosion in the 22 liter closed tube with the aluminum dust particle

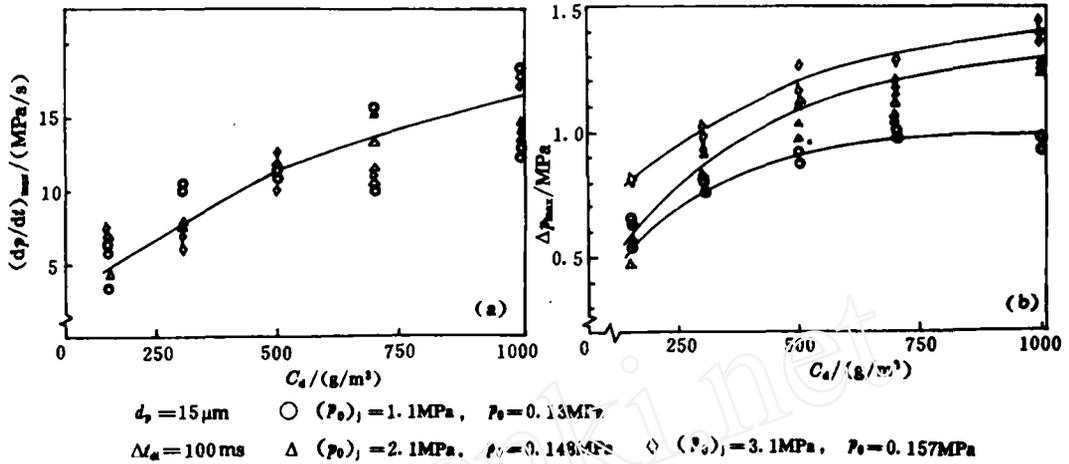


图 12 在 20 立升球形容器中, 铝粉爆炸特性参数 $[\Delta p_{max}, (dp/dt)_{max}]$ 随铝粉浓度 (C_d) 的变化曲线

Fig. 12 The influence of aluminum dust concentration on maximum rate of pressure rise and the maximum pressure rise of explosion in the 20 liter spherical bomb

2.5 球形铝粉粒度为 7 和 11.9 μm 时, 粉尘最低爆炸极限浓度系按如下实验步骤确定: 在开口哈特曼管中, 点火能量 (E) 在 10 焦耳和扬尘总压为 0.6MPa 的条件下, 根据粉尘云是否产生火焰及火焰高度是否超过哈特曼管高度的三分之二来判断粉尘是否被点燃。由粉尘云着火与不着火的次数来确定最低爆炸极限。图 13 给出实验结果表明: 在上述条件下, 球形铝粉粒度为 7, 11.9 μm 时的最低爆炸极限浓度分别为 33.33 g/m^3 和 41.66 g/m^3 。

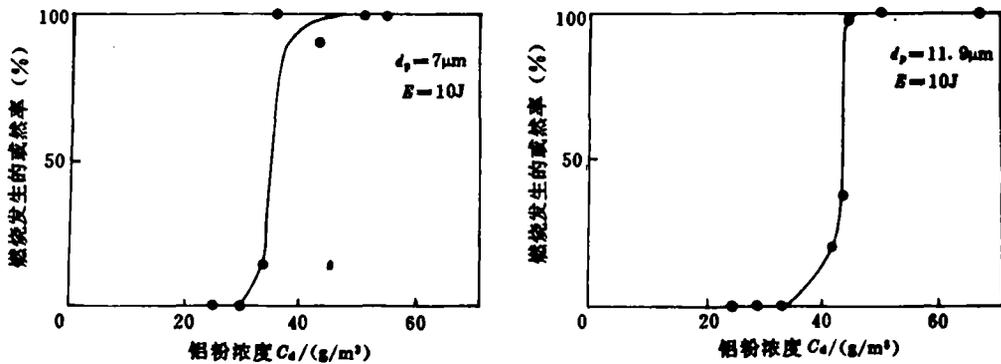


图 13 在点火能量为 10 焦耳的条件下, 粉尘爆炸概率与粉尘浓度的关系曲线

Fig. 13 The relationship of the explosion probability with dust concentration

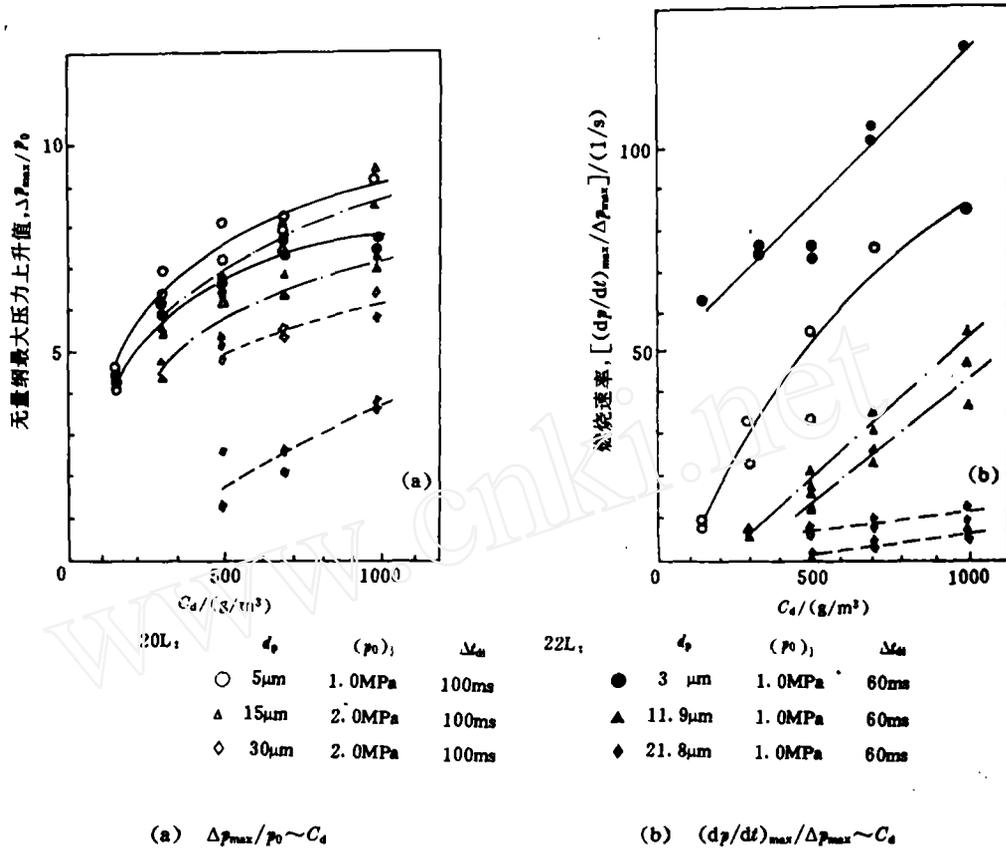


图 15 在 20 立升球形容器与 22 立升圆柱形容器中,无量纲化后的铝粉爆炸特性参数的比较

fig. 15 The comparison of non-dimensional maximum rate of pressure rise and non-dimensional maximum pressure rise of explosion between the same two closed vessels as in the figure 14

图 15(a,b) 分别给出了相同球形铝粉粒度和浓度条件下无量纲化后的爆炸参数 $\Delta p_{max}/p_0$ 与 $(dp/dt)_{max}/\Delta p_{max}$ 随粉尘浓度变化的规律。与图 14 相比较,前者仍代表了爆炸过程中的压力升值,但已与燃烧室的初始压力无关。后者代表了爆炸过程中最大能量释放率,但已与燃烧室的初始压力和扬尘湍流强度所形成的粉尘云初始状态无关。图 15 表明:无量纲化后的爆炸参数能有效地消除不同实验装置在确定粉尘爆炸特性时引起的差异。

2. 本研究中所有的实验结果都表明:在铝粉粉尘爆炸中,球形铝粉的粒度是影响爆炸特性的最关键因素。粉尘浓度及扬尘湍流强度都是在小粒度时($d_p < 11.9\mu\text{m}$)对最大压力升值和最大压力上升率有显著的影响。在粒度大于 $21.84\mu\text{m}$ 以后,粉尘浓度与扬尘湍流强度对爆炸特性基本上不再有影响,而且这时对应的爆炸特性已经相当低。实验结果还表明:在粉尘浓度为 $1000\text{g}/\text{m}^3$,点火延迟时间为 60ms 时,粒度为 $3\mu\text{m}$ 的铝粉其最大压力上升率比粒度为 $7\mu\text{m}$ 的要大一倍半左右。最后,粒度的增大,对最小点着浓度的提高有明显影响。

3. 球形铝粉在 $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 混合气体中燃烧时,气体介质中的含 O_2 量由 21% 增加至 40% 时使最大压力升值和最大压力上升率急剧增加;但再由 40% 增至 55% 时,则爆炸特性将

趋于极限,不再明显增加。

4. 球形铝粉在 O_2+N_2 混合气体中,含 N_2 量大于 90% 以后,将不再发生爆炸。

5. 在点火能量为 10 焦耳和扬尘湍流强度为 0.3m/s 的条件下,粒度为 $7\mu m$ 的球形铝粉的爆炸下限浓度为 $33.33g/m^3$,而粒度为 $11.9\mu m$ 的球形铝粉的爆炸下限浓度为 $41.66g/m^3$ 。

参 考 文 献

- 1 Siwek R, Cesana C. Operating Instructions for KSEP-20 L Apparatus, 1984. (Translated by Burg H.). Manufacturer: Adolf Kuhner AG, Dinkelbergstr, 1, CH-4127, Birsfelden, Switzerland.
- 2 Bartknecht W. Explosions-Course, Prevention, and Protection, Translated by Burg H and Almond T. Springer-Verlag, New York, 1981
- 3 Pu Y K, Li Y C, Kauffman C W, Bernal L P. The Determination of Turbulence Parameters in Closed Explosion Vessels, Progress in Astronautics and Aeronautics, 1989, 132, 117~123
- 4 Pu Y K, Jarosinski J, Tai C S, Kauffman X W, Szalai M. The Investigation of the Feature of Dispersion Induced Turbulence and Its Effects on Dust Explosions in Closed Vessels, 22th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh PA, 1988, 1777~1787

INVESTIGATION OF EXPLOSION CHARACTERISTICS IN FINE ALUMINUM DUST-AIR MIXTURES

Pu Yikang, Yuan Shengxue

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Ding Dayu Wang Boliang Tang Mingjun

(Dept. of Chem. Engineering, East China Institute of Technology, Nanjing 210014)

ABSTRACT This paper is concerned with the experimental determination of the explosion characteristics in the aluminum dust-air mixtures. The aluminum dust particles with a size in the region of 3 to 30 μm in diameter, the dust concentration of 150 to 1500 g/m^3 , were tested in the present study. Experiments were carried out in two closed combustion vessels with almost the same volume (~ 20 liter) but with different shapes for the vessel and locations for the igniter. A dispersion system with two linear perforated pipes which can uniformly spread the dust in the tube was developed. A systematic study of the influence of the dust particle size, dust concentration, dispersion-induced turbulence and the content of O_2 and N_2 in the air on the explosion characteristics in aluminum dust-air mixtures was conducted. Experimental results demonstrate that the particle size and the content of O_2 are the two factors which effect the explosibility in aluminum dust-air mixtures sharply. Some mechanisms of explosion in aluminum dust-air mixtures have been discussed.

KEY WORDS heterogeneous combustion, dispersion-induced turbulence, aluminum dust explosion