

# 铝粉爆炸特性的实验研究

丁大玉 浦以康\* 袁生学\*

汤明钧 王伯良

(华东工学院化工学院, 南京210014)

(\*中国科学院力学研究所, 北京100080)

**摘要** 本文研究了扬尘湍流、铝粉浓度、颗粒度和气相中氧浓度等因素对铝粉爆炸特性的影响。研究表明,铝粉颗粒度对铝粉爆炸有十分明显的影响。颗粒度越小,其它因素对铝粉爆炸的影响也越明显。在粉尘爆炸中,较强的扬尘湍流能够使更多粉尘悬浮,有利于粉尘的燃烧并且加快了其燃烧速率。

**关键词** 粉尘爆炸 燃烧 铝粉

粉尘爆炸是一种破坏力较大的灾害。由于铝粉燃烧较为迅速,因此铝粉爆炸危险性更大。近年来,国内外不断有关于铝粉爆炸事故的报道<sup>[1,2]</sup>。本文主要从工业安全角度出发,对铝粉爆炸特性进行比较系统的实验研究。实验结果给出了影响铝粉爆炸特性的一些主要因素及其规律。这些结果对工业粉尘爆炸灾害的防治具有一定的参考价值。

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置

实验装置如图1所示。爆炸容器是长度为1.07m、内径为0.165m的封闭的圆柱形容器。扬尘(即喷粉)系统主要由扬尘管、粉尘室、电磁阀和贮气室等组成。两根内径为10mm的完全相同的扬尘管在爆炸容器中沿壁面对称安装。沿扬尘管轴线开有许多孔径在1mm至2mm间的小孔。这些小孔的直径、位置和数量沿扬尘管壁的适当分布保证了喷出的粉尘分布均匀。为了防止粉尘或燃烧产物将小孔堵塞,最小孔径为1mm。扬尘管与内径为10mm、体积为8cm<sup>3</sup>的粉尘室相连,粉尘室则经电磁阀与高压贮气室相通。整个扬尘通路具有相同的内径,扬尘后,扬尘系统中的粉尘剩余量不超过5%。

本文通过大量的实验,证明距扬尘管正前方5mm处放置一根直径8mm的圆棒作为阻挡物,能够避免从扬尘管喷出的粉尘混合物形成沿某一特定方向上的流动,实验数据的重复性较好。

### 1.2 爆炸压力参数的测量

在本文实验中,用应变式压力传感器测量粉尘爆炸压力。传感器安装在爆炸容器的内壁上,压力传感器的灵敏度为0.5V/MPa。实验时先将1MPa的压缩气体充入贮气室中,在粉尘室中装入一定量的粉尘(根据实验需要的粉尘浓度确定)。接通电源后,电磁阀动

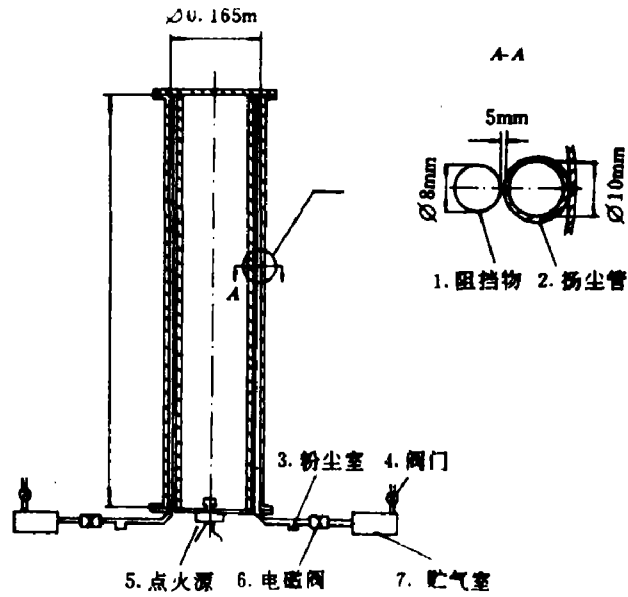


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental set-up

1. Bar 2. Dispersion pipe 3. Dust vessel 4. Valve 5. Ignitor 6. Solenoid valve 7. Air reservoir

作, 贮气室中压缩气体携带粉尘从扬尘管壁小孔喷入爆炸容器中, 形成一定浓度的粉尘云。经过预定的点火延迟时间(电磁阀动作至点火源点燃的时间间隔)后, 置于爆炸容器底端中心处的点火源将粉尘云点燃。

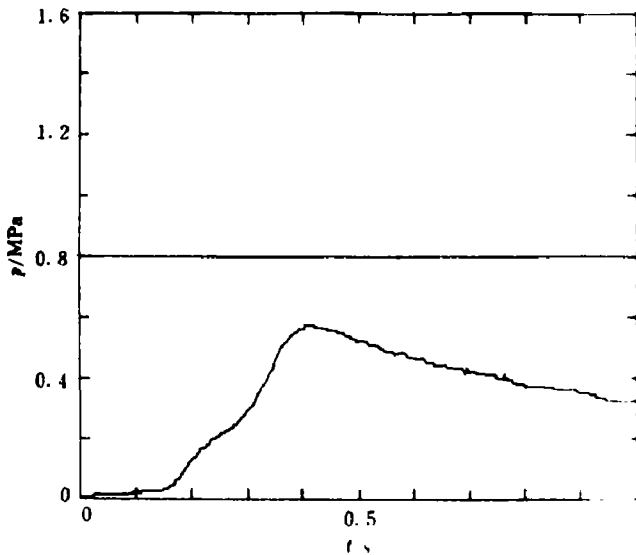


图 2  $p-t$  曲线

Fig. 2  $p-t$  curve

图 2 给出了用压力传感器测出的爆炸压力时间曲线即  $p-t$  曲线。由该曲线可求得评估粉尘爆炸特性的两个重要参数: 最大爆炸压力  $p_{max}$  和最大压力上升速率  $(dp/dt)_{max}$ 。

### 1.3 扬尘湍流参数的测量

扬尘湍流是影响粉尘爆炸的一个重要参量。通常用热线探针测量湍流。由于热线极细, 易被粉尘颗粒撞断, 故难以用热线探针直接测量含粉尘气流的湍流。本文仅测量不含粉尘气流吹入爆炸容器中产生的扬尘湍流, 以此定性地说明确扬尘湍流变化规律及其对粉尘爆炸压力参数的影响。

本文用系综平均统计方法来

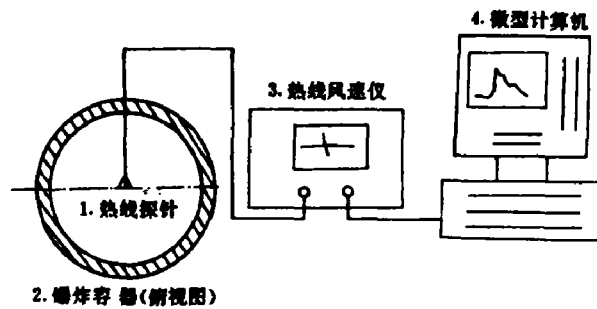


图3 扬尘湍流测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental arrangement for measuring the dispersion-induced turbulence,

1. Hot wire probe 2. Explosion container 3. Anemometer 4. Computer

确定扬尘湍流参数。图3是测量系统示意图。将热线探针置于爆炸容器中心,测量信号经热线风速仪由数据采集系统输出。在相同实验条件下,每次测量0.9s内扬尘湍流随时间的变化。共进行 $N$ 次相同实验,取其统计平均值。

设第 $i$ 次测量的瞬态流动速度在 $t$ 时刻为 $U_i(t)$ ,那么 $N$ 次相同实验的系综平均为

$$\langle U(t) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i(t) \quad (1)$$

式中 $N$ 指测量次数。

扬尘湍流均方根速度 $u'(t)(r, m, s)$ 亦称扬尘湍流强度,按下式计算

$$u'(t) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U_i(t)]^2 - \langle U(t) \rangle^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

统计平均值的精度取决于实验测量次数。增加测量次数可以提高统计平均值的精度,但也易损坏热线探针。一般地,测量次数在30~50次范围内,可以获得比较满意的结果。

图4给出了在贮气室充气压力为1MPa的条件下,测得的扬尘湍流统计平均值 $\langle U(t) \rangle$ 和 $u'(t)$ 。由图可见,扬尘湍流速度 $u'$ 在扬尘后约30~50ms的时间内达到最大值(约为

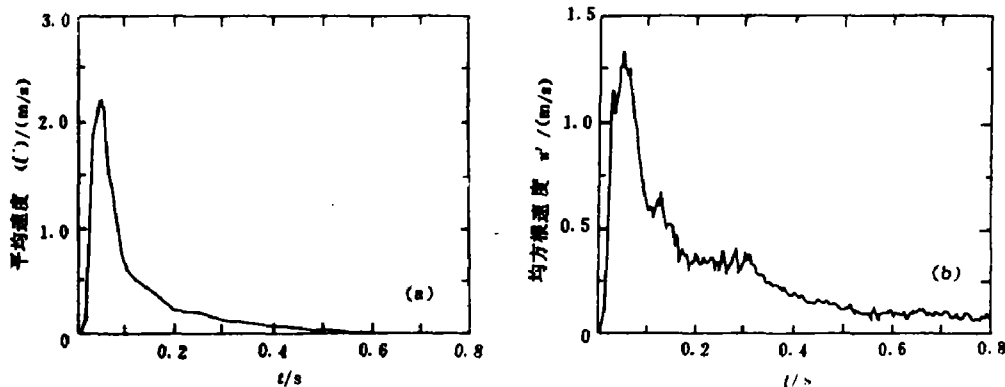


图4 扬尘湍流参数的统计平均值

Fig. 4 The ensemble average r. m. s. turbulent velocity  $\langle u' \rangle$  and average turbulent velocity  $\langle U \rangle$

1.2m/s)。约 300ms 以后,  $u'$  衰减至最大值的 10% 左右。

由于粉尘颗粒较细, 粉尘量较少, 因此颗粒对扬尘湍流的影响不很显著。对于含有粉尘气流产生的扬尘湍流的测量, 有待我们进一步的研究。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 扬尘湍流

本文实验所用铝粉在显微镜下观察呈球形状。我们首先测量了在不同点火延迟时间下, 浓度为  $1000\text{g}/\text{m}^3$ 、颗粒度分别为  $7\mu\text{m}$ ,  $11.9\mu\text{m}$  和  $21.8\mu\text{m}$  的铝粉爆炸压力。图 5 给出了实验结果。当点火延迟时间大于 60ms 后, 爆炸压力参数随着点火延迟时间增加而减小。铝粉颗粒越细, 点火延迟时间对  $(dp/dt)_{\text{max}}$  的影响越明显。

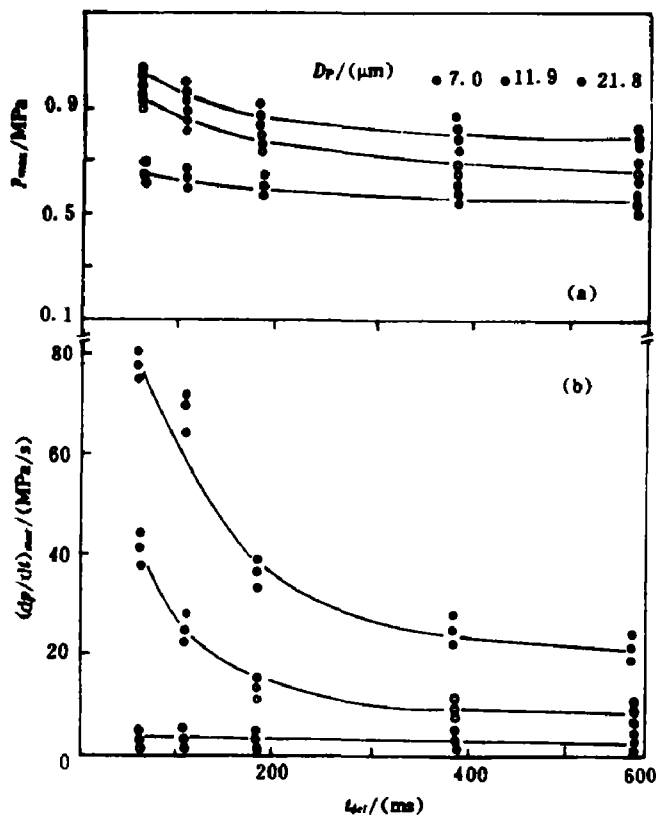


图 5  
 (a)  $p_{\text{max}}$ —点火延迟时间  $t_{\text{del}}$  曲线  
 (b)  $(dp/dt)_{\text{max}}$ —点火延迟时间  $t_{\text{del}}$  曲线  
 Fig. 5  
 (a)  $p_{\text{max}}$ —delay time  $t_{\text{del}}$  curve  
 (b)  $(dp/dt)_{\text{max}}$ —delay time  $t_{\text{del}}$  curve  
 ·  $D_p$  为颗粒直径, Particle size

某一点火延迟时间所对应的扬尘湍流  $u'$  可由图 4 的实验结果确定。为了说明扬尘湍流的影响, 我们将图 5 中的点火延迟时间改用对应的扬尘湍流度  $u'$  来表示, 如图 6 所示。

图 6(a) 给出了扬尘湍流对  $p_{\text{max}}$  值的影响。如果爆炸容器绝热, 那么  $p_{\text{max}}$  值应该与扬尘湍流无关。这是因为一定量粉尘燃烧释放的总能量是一定的。但是实际上爆炸容器壁面上有热量损失, 同时有部分粉尘因沉积于容器底部而未燃烧或燃烧不完全。较强的扬尘湍流使粉尘处于更好的悬浮状态, 减少粉尘的结团或沉积; 并且加快颗粒燃烧速率, 缩短爆炸时间, 使器壁热损失减少。因此,  $p_{\text{max}}$  值随扬尘湍流  $u'$  增加而增大。

图 6(b) 的结果则表明扬尘湍流对  $(dp/dt)_{\text{max}}$  有很明显的影响。但是这种影响与铝粒大

小有很大关系。铝粒很细,  $(dp/dt)_{max}$  随扬尘湍流  $u'$  的变化十分明显。若铝粒很粗,  $(dp/dt)_{max}$  则几乎不随扬尘湍流度  $u'$  变化。 $(dp/dt)_{max}$  随粉尘燃烧速率增加而增大, 粉尘燃烧速率既与粉尘混合物的物理化学性质有关, 又与粉尘混合物初始湍流度有关。本文的实验结果充分说明扬尘湍流对加快粉尘燃烧速率有很明显的作用。

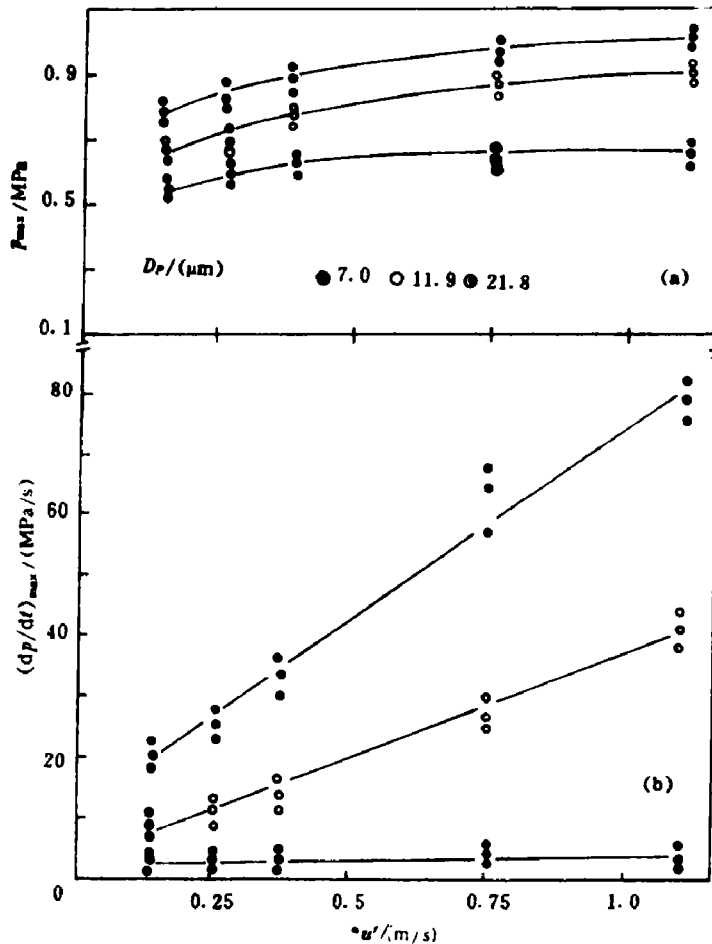


图6

(a)  $p_{max}-u'$  曲线,  
(b)  $(dp/dt)_{max}-u'$  曲线

Fig. 6

(a)  $p_{max}-u'$  curve,  
(b)  $(dp/dt)_{max}-u'$  curve

\* Intensity of dispersion  
— induced turbulence

## 2.2 铝粉浓度和颗粒度

图7给出了粉尘浓度和颗粒度对铝粉爆炸压力参数  $p_{max}$  和  $(dp/dt)_{max}$  的影响。由图7(a)可以看出, 随着粉尘浓度的改变,  $p_{max}$  存在一最大值。当铝粉浓度较小 ( $< 330g/m^3$ ) 时, 混合物中相对氧气含量较高(富氧), 即使粉尘完全燃烧, 其总放热量也较少, 因此  $p_{max}$  值较小; 当铝粉浓度较高时, 混合物中相对氧气含量较低(贫氧), 铝粉颗粒因供氧不足而不能完全燃烧。粉尘发生不完全燃烧将导致  $p_{max}$  减小。在富氧情况下, 随着粉尘浓度增加, 参加燃烧的粉尘量增多, 因而  $p_{max}$  随着粉尘浓度增加而增大; 而在贫氧情况下, 随着粉尘浓度的增加, 将有更多的粉尘燃烧不完全, 因而导致  $p_{max}$  不再随粉尘浓度增加而增大, 还可能减小。

由图7(a)还可以看出, 在相同粉尘浓度下, 粉尘颗粒度越小,  $p_{max}$  越大。本文应用 X 射

线粉末衍射仪对铝粉爆炸产物的化学成份做了初步分析。铝粉爆炸产物主要是由未燃尽的铝和燃烧生成的三氧化二铝组成的。表1给出的分析结果表明,铝粉燃烧不完全程度与铝粉颗粒度有很大关系。铝粉越细,燃烧越完全,  $p_{max}$  值就越大。

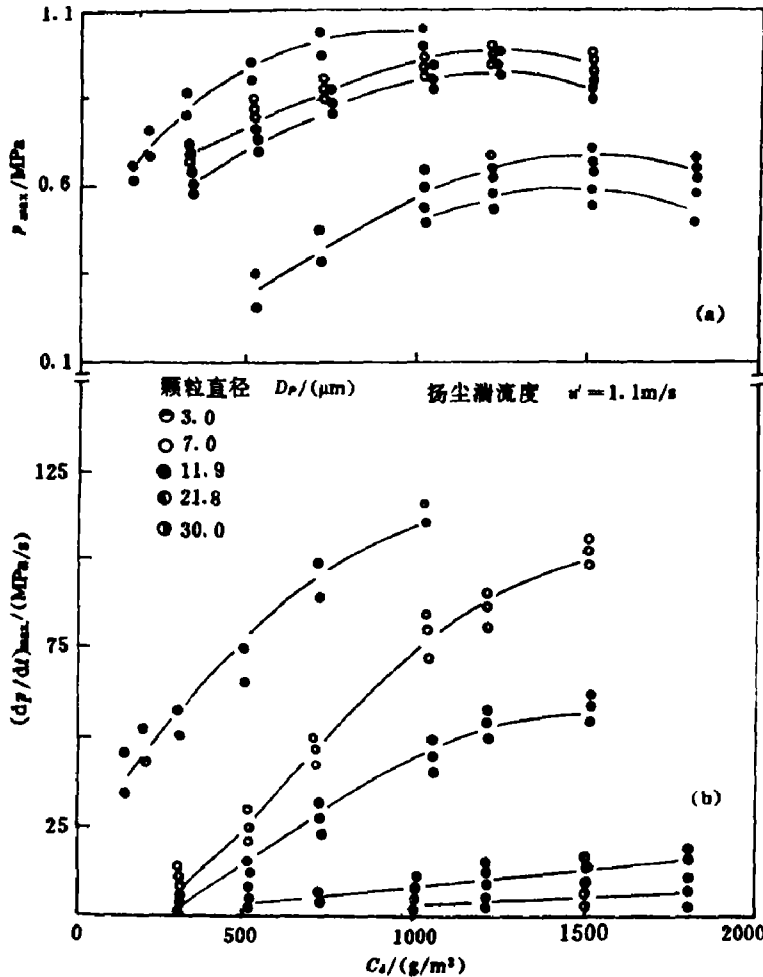


图7  
(a)  $p_{max}$ —粉尘浓度  $C_d$  曲线  
(b)  $(dp/dt)_{max}$ —粉尘浓度  $C_d$  曲线

Fig. 7  
(a)  $p_{max}$ —dust concentration curve  
(b)  $(dp/dt)_{max}$ —dust concentration curve

表1 几种铝粉燃烧产物 X 光衍射分析结果  
Table 1 Analysis results of X-ray diffraction spectrograph for burnt residues of aluminium dusts

铝粉爆炸的条件			产物中铝的相对含量(质量百分比)
铝粉颗粒度/ $(\mu\text{m})$	粉尘浓度/ $(\text{g}/\text{m}^3)$	点火延迟时间/ $(\text{ms})$	
3.0	1000	60	19%
7.0	1000	60	26%
21.8	1000	60	33%

图7(b)的实验结果表明,铝粉浓度对 $(dp/dt)_{max}$ 的影响与铝粒大小密切相关。当铝粉颗粒度较小( $3\mu\text{m}$ )时, $(dp/dt)_{max}$ 随铝粉浓度的变化非常明显。在铝粉浓度为 $1000\text{g}/\text{m}^3$ 条件下, $(dp/dt)_{max}$ 达到 $115\text{MPa}/\text{s}$ 。当铝粒较粗( $30\mu\text{m}$ )时, $(dp/dt)_{max}$ 随铝粉浓度的变化很小。即使在粉尘浓度很高( $1800\text{g}/\text{m}^3$ )的条件下, $(dp/dt)_{max}$ 也只有 $3.4\text{MPa}/\text{s}$ 。由此可见,颗粒度为 $3\mu\text{m}$ 的铝粉爆炸时,最大压力上升速率 $(dp/dt)_{max}$ 大约比颗粒度为 $30\mu\text{m}$ 的铝粉爆炸产生的 $(dp/dt)_{max}$ 高1至2个数量级。这表明铝粉颗粒度对铝粉爆炸有很大的影响。铝粉愈细,对铝粉爆炸压力的发展及其火焰的传播愈有利。

### 2.3 气相中氧浓度

图8和图9给出了在 $500\text{g}/\text{m}^3$ 至 $1000\text{g}/\text{m}^3$ 粉尘浓度范围内,气相中氧浓度对铝粉爆炸压力参数 $p_{max}$ 和 $(dp/dt)_{max}$ 的影响。实验中在气相中掺入氧气( $\text{O}_2$ )或氮气( $\text{N}_2$ ),以改变氧浓度。

由图8(a)和图9(a)可见,铝粉最大爆炸压力 $p_{max}$ 随气相中氧浓度的增加而增大。在氧浓度较低的条件,提高气相中氧浓度能够使更多铝粉与氧气反应, $p_{max}$ 值明显地增大。但

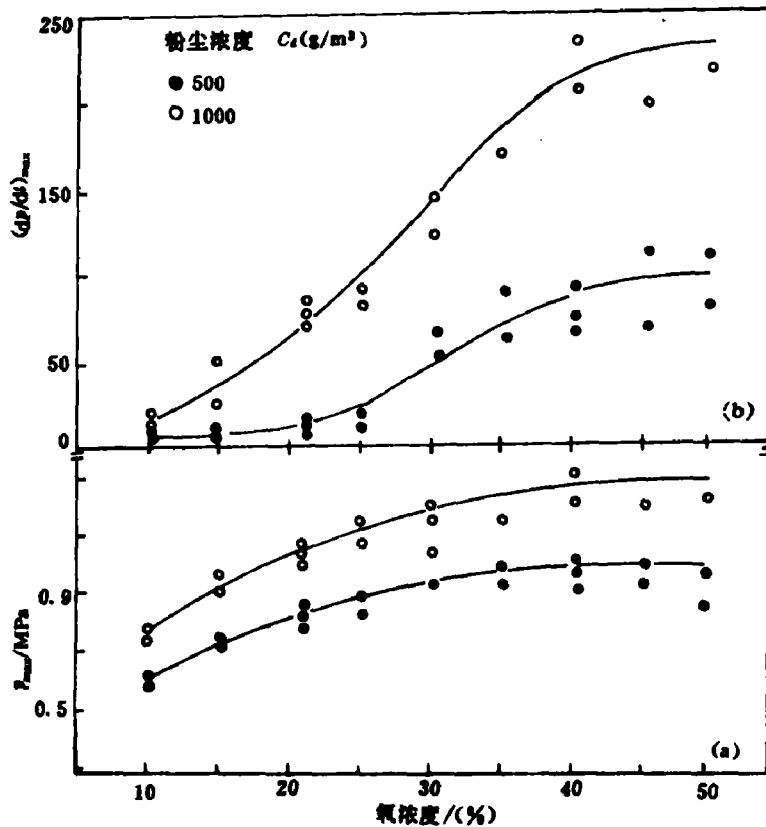


图8 (a) $p_{max}$ —氧浓度曲线 (b) $(dp/dt)_{max}$ —氧浓度曲线( $7\mu\text{m}$ )

Fig. 8 (a) $p_{max}$ —Oxygen concentration curve

(b) $(dp/dt)_{max}$ —Oxygen concentration curve for  $7\mu\text{m}$  aluminium powder

是当氧浓度增加到一定的值时,进一步提高氧浓度仅仅改变气相中氧气(O<sub>2</sub>)与氮气(N<sub>2</sub>)的比例,参加燃烧的粉尘量无明显增多, $p_{max}$ 值也无明显增大。

图 8(b)和图 9(b)的实验结果表明,气相中氧浓度值对铝粉最大爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{max}$ 的影响程度与铝粉颗粒度具有密切关系。对于颗粒度为 7 $\mu\text{m}$  的铝粉,在粉尘浓度为 1000g/m<sup>3</sup> 和氧浓度增加至 55%(摩尔百分比)的条件下,其 $(dp/dt)_{max}$ 值高达 240MPa/s。对于颗粒度为 21.8 $\mu\text{m}$  的铝粉,在相同的粉尘浓度和氧浓度的条件下,其 $(dp/dt)_{max}$ 的最大值为 11MPa/s。对实验结果进行分析可知,在粉尘浓度相同的条件下,气相中氧浓度的增加将使粉尘颗粒周围的氧浓度值增大,从而导致氧气在铝粒表面的扩散速率和反应速率都显著加快;同时,这些过程明显地与颗粒比表面积有关。颗粒比表面积越大(颗粒度越小),越有利于这些过程的进行。因此,提高气相中氧浓度和减小铝粉颗粒度,将会导致铝粉爆炸的猛烈程度显著提高。

在气相中掺入氮气(N<sub>2</sub>)可以明显地降低粉尘爆炸压力参数  $p_{max}$ 和 $(dp/dt)_{max}$ 。当气相中氧浓度低于一定的值时,粉尘不再会发生爆炸。该氧浓度值即为最小氧浓度值。该值主要与粉尘颗粒度有关。粉尘颗粒度愈小,最小氧浓度值愈低。本文实验测得,7 $\mu\text{m}$  和 21.8 $\mu\text{m}$  铝粉的最小氧浓度值分别为 7%和 10%(摩尔百分比)。

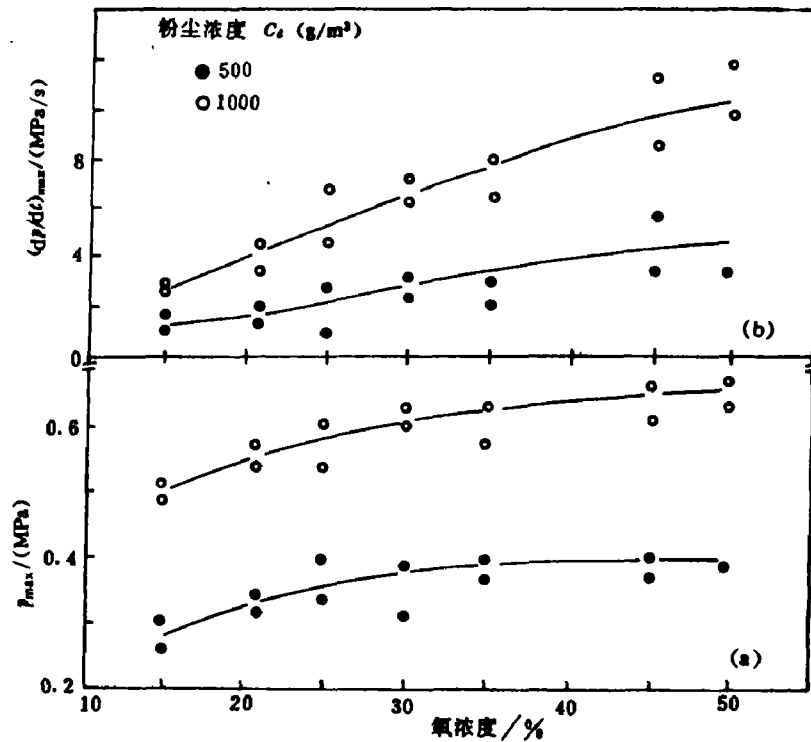


图 9 (a) $p_{max}$ —氧浓度曲线 (b) $(dp/dt)_{max}$ —氧浓度曲线(21.8 $\mu\text{m}$ )

Fig. 9 (a) $p_{max}$ —Oxygen concentration curve (b) $(df/dt)_{max}$ —Oxygen concentration curve for 21.8 $\mu\text{m}$  aluminium powder



本项研究获国家自然科学基金的资助(项目编号 18972036),在此表示感射。

### 参 考 文 献

- 1 涂光备等. 全国工业粉尘防爆与治理学术讨论会论文集, 中国科学技术出版社, 1990
- 2 David C M, et al. *J Hazardous Mater* 1987. 17: 81-88

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF ALUMINIUM DUST EXPLOSIONS

Ding Dayu\* Pu Yikang\*\* Yuan Shenxue\*\*  
Tang Mingjun\* Wang Boliang\*

(\* *Department of Chemical Engineering, East China Institute of Technology, Nanjing 210014*)

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

**ABSTRACT** Influence of dispersion-induced turbulence, aluminium dust concentrations, particle sizes and oxygen concentrations in gas phase on the characteristics of aluminium dust explosions in a closed tube has been investigated in this paper. The results show that the influence of particle sizes on the aluminium dust explosions is very notabale. The smaller the particle sizes are, the more significant the influence of other factors on the explosions is. The higher intensity of turbulence increases the amount of the dust particles in suspension and available for combustion in the dust explosions. It also increases the particle burning rate.

**KEY WORDS** dust explosion, combustion, aluminium dust