

文章编号: 1001-1455(2000)04-0303-10

# 高炉喷吹用烟煤煤粉爆炸特性的实验研究<sup>\*</sup>

浦以康, 胡俊, 贾复

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 从工业安全角度出发, 在四种不同形状与体积的封闭容器、三种开口燃烧管中, 对高炉喷吹用烟煤的燃烧爆炸特性和传播特性进行了全面、系统的实验研究。详尽地给出了煤粉浓度、粒度及气体介质中含氧量、扬尘湍流强度和初始点火能量对爆炸后最大压力升值、最大爆炸压力上升率、以及最大等效燃烧速度和爆炸火焰传播最小熄火间距的影响。用最大等效燃烧速度来表征的爆炸强度数值已不再依赖于实验容器。

**关键词:** 煤粉; 等容燃烧; 等效燃烧速度

**中图分类号:** O389 **文献标识码:** A

## 1 引 言

煤粉爆炸及火焰传播特性历来是粉尘爆炸研究<sup>[1~3]</sup>的焦点之一, 过去主要是为了防治煤矿中粉尘爆炸事故。近十几年来, 人们对煤粉燃烧与爆炸特性的关注却是出于一个全新的视角。高炉喷煤工艺实现以煤代焦已成为国际炼铁行业的发展趋势, 由此要求对各类煤种的燃烧爆炸特性进行系统研究。高炉喷煤工艺常采用烟煤, 在本文中, 我们以国内高炉喷煤工艺典型煤种(神府煤)为对象, 从高炉喷煤工艺安全的角度出发, 对其爆炸特性进行了全面的实验测定和分析:

介绍了不同实验容器中神府煤煤粉浓度、粒度以及气体介质中含氧量、扬尘湍流强度和初始点火能量等参数对煤粉爆炸特性(最大爆炸压力升值、最大爆炸压力上升率)和火焰最小熄火管径的影响。实验测定的粉尘爆炸特性对实验容器的依赖性长期以来工业部门在使用爆炸特性数据时遇到的最大困难, 对此给予特别的关注并提出解决的办法。

煤粉爆炸特性的测定安排在两组特定的封闭实验装置内进行。一组是两个形状不同(球与柱)但容积基本相同(20、22dm<sup>3</sup>)的封闭容器; 另一组是两个形状相同(柱)但容积不同(7、22dm<sup>3</sup>)的封闭容器。实验研究结果表明: 如果采用文中给出的最大等效燃烧速度的概念来表征粉尘爆炸强度, 则不同容器内所得到的数据的散布度大大减低, 能清晰、自恰地描述神府煤粉的爆炸强度及其与各种外界因素的关系。

除了提供神府煤种的粉尘爆炸特性(最大爆炸压力升值、最大爆炸压力上升率)和强度(最大等效燃烧速度)的基本数据外, 文中所采用的实验方法和最大等效燃烧速度概念对于其他煤粉及工业粉尘的爆炸特性研究和测定还应具有参考意义。

\* 收稿日期: 1999-12-14; 修回日期: 2000-06-05

基金项目: 宝山钢铁(集团)公司技术开发合同(95110100040535)

作者简介: 浦以康(1938—), 女, 博士, 研究员。

## 2 实验装置及测量系统

### 2.1 实验装置

实验中采用五种实验装置,分别是:

(1) 20dm<sup>3</sup> 国际标准球形容器(简记为 GS20L)。该容器系直径为 0.34m 的球形燃烧室,实验在德国食品工业安全与防护研究中心进行。扬尘系统由对称的两根半环形小孔射流型扬尘管、电磁阀和粉尘室组成,具体结构可参见文献[4]。

(2) 20dm<sup>3</sup> 宝钢球形容器(简记为 BS20L)。该容器也是直径为 0.34m 的高压球形燃烧室,系宝钢钢研所的煤粉爆炸实验装置,其扬尘系统是平板反射型,具体结构可参见文献[5]。

(3) 7.22dm<sup>3</sup> 柱形燃烧管(L/D=2.4,6,简记为 YK7L、YK22L)。它们是中科院力学所自行设计的内径为 0.165m、长度分别为 0.4、1.0m 的封闭垂直燃烧室。扬尘系统是由两套相向放置的小孔射流型扬尘管、电磁阀、粉尘室和高压气室组成,具体结构可参见文献[6]。

(4) 44dm<sup>3</sup> 开口燃烧容器。此容器系由两个 YK22L 柱形燃烧管垂直串联而成。在两管连接处嵌入一个 0.1m 长的隔板器,用以考察煤粉火焰的传播能力。隔板器是由数块间距可调节、沿轴向平行放置的金属板组成。燃烧容器底端封闭,而顶端在完成扬尘后开启。

(5) 5、10m 水平燃烧管,为力学所的专用实验装置,结构可参见文献[7]。

### 2.2 实验样品的制备

粒度小于 38、66 $\mu$ m 的煤粉样品由机械筛分机提供,粒度小于 30 $\mu$ m 的则由自行研制的气动分级机提供。为了提高扬尘的均匀性和改善细颗粒易结团的现象,实验用的煤粉样品均加入 0.5% 的流化剂(CAB-O-Si1)。煤粉的粒度分布由自行研制的显微图象计算机处理粒度计测得。

### 2.3 测量内容及方法

封闭容器或水平燃烧管内的压力测量,采用压力传感器(ETSU2100 应变式或 PCH113A27 压电式)通过信号放大器后由计算机进行采集。采样频率为 1kHz。

封闭容器内沿轴线上定点的湍流脉动速度随时间的衰减规律,采用热线风速仪直接测量,然后通过系统平均法求得,可参见文献[8]。

扬尘后实验容器内不同截面上粉尘云悬浮的持续时间,采用光透射法来确定。光透射法测得的结果表明了,在封闭容器内粉尘云悬浮的时间约为 0.5s。

实验容器内火焰阵面到达时间,采用自制的电离探头或型号为 2CU2A 的光电二极管进行捕捉,并用计算机直接进行采集。

实验中的点火由电阻丝加热一定量的黑火药来完成。在粉尘爆炸特性实验中所用的黑火药总量在 0.6~1.2g 范围内;在粉尘火焰传播特性实验中药量在 6~12g 范围内。对应的点火能量前者约为 1.8~3.6kJ,后者则为 18~36kJ。

为能精确地在指定的湍流强度时刻进行点火,实验中采用自制电子延时器来控制扬尘系统开启与点火之间的时间间隔。

粉尘浓度是采用放入粉尘室的粉尘重量和燃烧室容积计算而得的名义粉尘浓度。气体介质中所需的氧含量是通过在干燥空气瓶中充氧或充氮来实现。不同比例的氧或氮充入空气瓶后至少须待二十四小时后才交付使用,以保证其充分混合。

### 3 实验内容与结果

实验内容主要考察煤粉浓度与粒度、扬尘湍流强度、气体介质中氮气(或氧气)含量、点火能量等因素对煤粉等容爆炸特性的影响,同时测量了煤粉火焰在不同含氧量的气体介质中的传播特性。

#### 3.1 煤粉浓度的影响

实验在球形与柱形,体积分别为 20、22 和 7dm<sup>3</sup> 的四个封闭容器内进行。表征爆炸特性的两个主要参数 ( $p_{\max}$  与  $(dp/dt)_{\max}$ ) 的测量结果见图 1。

为考察最强烈等容燃烧情况,实验中采用了小粒度煤粉(33~66 $\mu\text{m}$  范围,属于工业应用中偏细的粒度)与实验容器能提供的最短点火延迟时间(20、60ms)的情形(对应的扬尘湍流强度约为 3~4m/s)。

图 1(a)表明,在高湍流强度条件下( $t_{\text{di}} = 20, 60\text{ms}$ ),煤粉在四个封闭容器内爆炸后产生的最大压力  $p_{\max}$  大致在 0.65MPa(YK22L)至 0.95MPa(YK7L)的范围内。最大爆炸压力随实验容器而异,是因其爆炸过程长短不同导致向外散热不同之故。实验结果还给出了煤粉最大爆炸压力随煤粉浓度增加的变化规律,即开始有较明显的上升,在浓度为 300g/m<sup>3</sup> 附近达到峰值,其后缓慢地下降。

图 1(b)表明,煤粉在四个封闭容器内爆炸后产生的最大爆炸压力上升速率  $(dp/dt)_{\max}$  在高湍流条件下( $t_{\text{di}} = 20, 60\text{ms}$ ) 约在 5MPa/s(YK22L)至 45MPa/s(GS20L)的范围内。随着煤粉浓度的增加,  $(dp/dt)_{\max}$  在起始时呈上升趋势,在浓度为 300~400g/m<sup>3</sup> 的范围内达到峰值,其后随着浓度的增加逐渐下降。

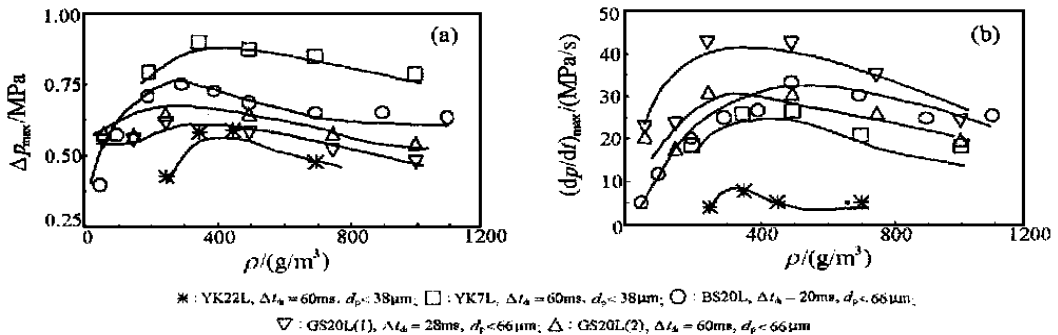


图 1 煤粉质量浓度对爆炸特性的影响

Fig. 1 The influence of coal dust concentration on the explosion characteristics

#### 3.2 煤粉粒度的影响

为考察粒度影响,实验中选用了平均粒度  $d_{50}$  为 6~90 $\mu\text{m}$  的多种煤粉样品。在两个封闭柱形容器内得到的实验结果见图 2。结果表明:煤粉粒径的变化对于煤粉的最大爆炸压力和最大压力上升速率的影响不大,高湍流强度条件( $t_{\text{di}} = 60\text{ms}$ )下除外。

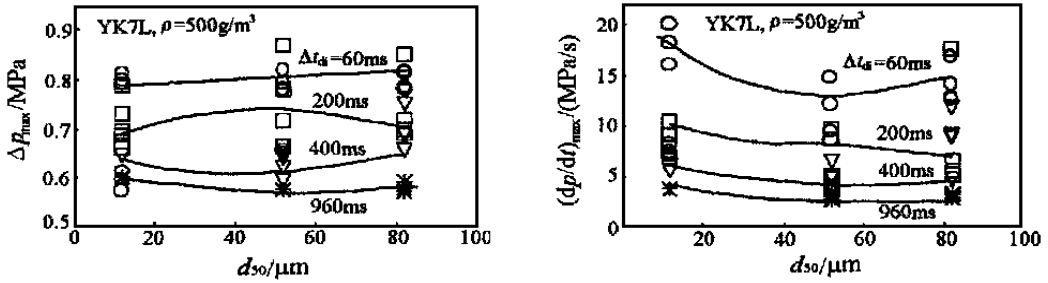


图 2(a) 封闭容器 YK7L 内煤粉粒度对爆炸特性的影响

Fig. 2(a) The influence of coal-dust particle size on the explosion characteristics

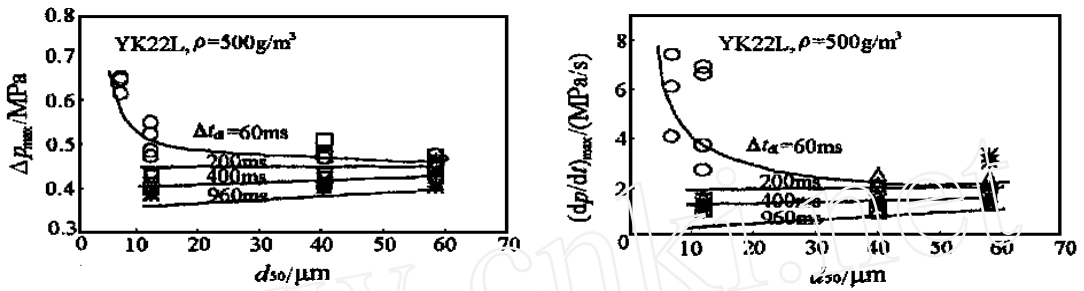


图 2(b) 封闭容器 YK22L 内煤粉粒度对爆炸特性的影响

Fig. 2(b) The influence of coal-dust particle size on the explosion characteristics

### 3.3 点火延迟时间的影响

在等容燃烧实验中一般均采用不同的点火延迟时间来控制实验中所对应的扬尘诱导湍流强度。短的延迟时间对应强的湍流强度,反之亦然。已有实验结果<sup>[6,8]</sup>表明,扬尘诱导湍流强度在封闭容器内随时间迅速衰减,它与点火延迟时间之间的定量关系在本文第四节中涉及。实验结果(图 3(a))表明,在四个封闭容器内,点火延迟时间由 20ms 或 60ms 增至 400~1000ms 时,煤粉的最大爆炸压力  $p_{max}$  随点火延迟时间  $t_{di}$  大致呈如下的递减变化规律:当  $t_{di}$  从 20ms 或 60ms 增至 100ms 时较急速地下降;当  $t_{di}$  从 100ms 继续增加时,下降则大大趋缓;在

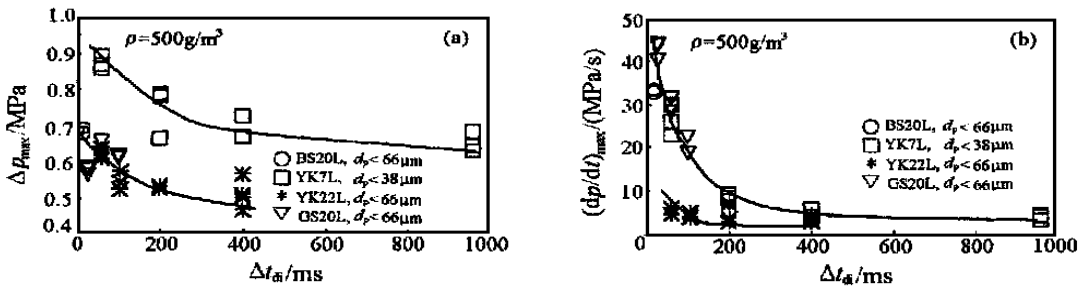


图 3 点火延迟时间对煤粉爆炸特性的影响

Fig. 3 The influence of ignition delay time on the explosion characteristics

$t_{di} > 400\text{ms}$  以后则基本不变;其最大值分别约为  $0.88\text{MPa}$  (YK7L) 和  $0.6 \sim 0.7\text{MPa}$  (YK22L, BS20L, GS20L)。实验结果(图 3(b))还表明,在四个封闭容器中煤粉最大爆炸压力上升速率  $(dp/dt)_{\max}$  随点火延迟时间增加而递减的变化曲线也呈与以上类似规律。但从图 3 中还可看到,在 YK7L 中获得的最大爆炸压力比其余三个容器中的高;在 GS20L 与 BS20L 两个容器中的  $(dp/dt)_{\max}$  却与容积小得多的 YK7L 的值相当,而比容积相当的 YK22L 的值高得多。这些均与容器的形状和容积有关,简称粉尘爆炸特性对实验容器的依赖性。这也清楚地表明,采用  $p_{\max}$ 、 $(dp/dt)_{\max}$  作为表征粉尘爆炸特性给用户带来的问题。

### 3.4 气体介质中氮气含量的影响

在球柱两种形状的容器(BS20L, YK7L)内对气体介质中氮气含量对煤粉爆炸特性  $p_{\max}$  与  $(dp/dt)_{\max}$  的影响进行了全面考察。在球形容器(BS20L)内的实验是在强湍流条件下( $t_{di} = 20\text{ms}$ )进行的<sup>[5]</sup>,结果见图 4(a)。结果清楚表明,随着气体介质中氮气含量从 79%增至 94% 时,  $p_{\max}$  与  $(dp/dt)_{\max}$  从  $0.7\text{MPa}$  与  $30\text{MPa/s}$  急剧下降至  $0.35\text{MPa}$  与  $20\text{MPa/s}$ 。

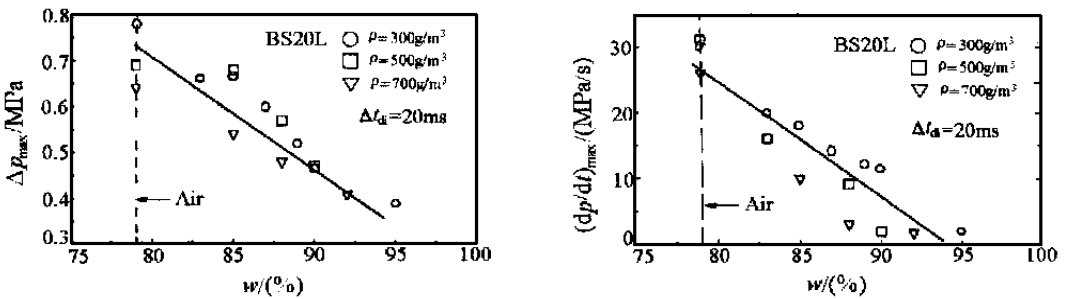


图 4(a) 封闭容器 BS20L 内氮气含量对煤粉爆炸特性的影响

Fig. 4(a) The influence of  $\text{N}_2$  concentration on the explosion characteristics

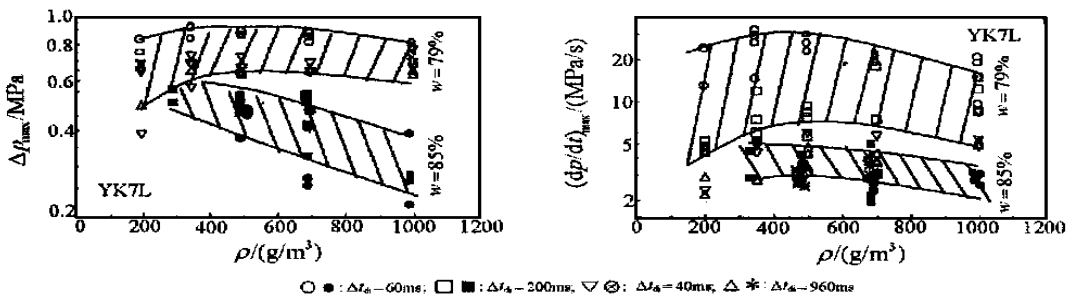


图 4(b) 封闭容器 YK7L 内氮气含量对煤粉爆炸特性的影响

Fig. 4(b) The influence of  $\text{N}_2$  concentration on the explosion characteristics

图 4(b)是在柱形容器(YK7L)内,各种点火延迟时间条件下,当气体介质中氮气含量分别为 85%和 79%时,煤粉爆炸特性  $p_{\max}$  与  $(dp/dt)_{\max}$  随煤粉浓度变化规律的比较。结果清楚地表明,在氮含量为 85%的气体介质中,在浓度与点火延迟时间的很大范围内,煤粉的爆炸特性(不论是  $p_{\max}$  还是  $(dp/dt)_{\max}$ ) 都远远地低于含氮量为 79%时的数值。其最大爆炸压力由

0.9MPa 降到 0.5MPa 以下,最大爆炸压力上升率则由 30MPa/s 降至 4MPa/s 以下。以上结果重要的实际含义是,可以认为在空气中充入 6% 的氮气后,煤粉的爆炸特性已得到实质性的抑制。

### 3.5 封闭容器内点火能量的影响

为了规范煤粉爆炸特性的测定,必须确定实验中点火能量对等容燃烧特性的影响。柱形容器(YK7L)内煤粉爆炸特性  $p_{\max}$  与  $(dp/dt)_{\max}$  随点火能量的变化规律,见图 5。点火能量由点火头的黑火药量代表,实验中黑火药量由 0.4g(1.2kJ) 增至 2g(6kJ)。从实验结果可看出:黑火药量在 0.4~1g 范围内,对煤粉的最大爆炸压力几乎无影响;当火药量增至 1.5~2.0g 时,  $p_{\max}$  略呈上升状。点火能量对  $(dp/dt)_{\max}$  的影响比对  $p_{\max}$  要明显些,特别是当火药量从 1.5g 增至 2.0g 时,  $(dp/dt)_{\max}$  显著上升。这个结果表明:在所有煤粉爆炸实验中,所采用的黑火药量(0.6~1.2g) 是适宜的。图 5 所示数据中对应 0.4g 火药量的散布度较大,这是因为点火能量不敷煤粉预热所需之故。这说明火药量的确定要适当。其实对于任何新物料爆炸特性的测定,首先作点火能量影响的考察都是有益的。

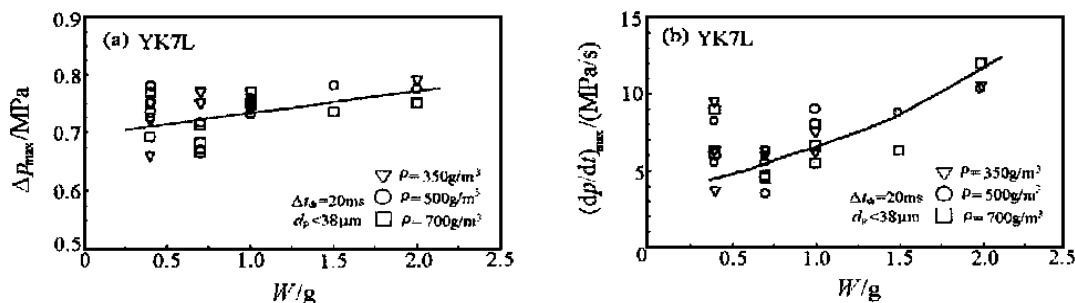


图 5 封闭容器 YK7L 内点火能量对煤粉爆炸特性的影响

Fig. 5 The influence of ignition energy on the explosion characteristics

### 3.6 煤粉火焰在氧含量为 21%、22%、24% 的气体介质中的传播特性

就工业安全而言,一旦发生爆炸,火焰能否传播至关重要。就管道而言,关键的参数是管径。反过来说,能阻断火焰的管径大小,常用来表征物料的爆炸特性,称之为熄火间距。对神府煤粉的火焰传播特性在直径为 16.5cm 的燃烧管中进行了考察。实验中参数变化范围为:浓度 = 200~700g/m<sup>3</sup>;湍流强度对应的  $t_{di} = 60, 105, 200, 400 \text{ ms}$ ;氧含量是 21%~24%。粉尘火焰在开口燃烧管内传播的强度按以下方法判断并分为三个档次:用电离探头能测量到火焰到达信号者为强,无电离信号但从开口端可看见完整火焰者为中,在开口端仅可观察到火焰苗头者为弱。

实验观察结果如下:对于内径为 16.5cm 的顶端开口燃烧管,当气体介质为空气时,从封闭底端点火的煤粉火焰不能穿过 2m 管长而到达顶部开口处;在 1m 管长开口顶端处也仅能见到火焰苗头。因此,煤粉火焰在空气介质中属于不易传播类型。

考虑到高炉富氧喷吹的实际情况,需着重考察气体介质中氧含量增加时对火焰传播的影响。图 6 给出了在内径为 16.5cm 及长为 2m 的开口燃烧器中煤粉火焰的熄火间距随气体介质中氧含量变化的规律。由图可见:当气体氧含量为 22% 时,煤粉火焰传播能力有了很大的增

强,不仅可以顺利通过内径为 16.5cm 和 2m 长顶端开口燃烧管,而且其熄火间距可达 10cm (即火焰可通过的最小间距),从 2m 管顶端可看到完整的火焰通过,但火焰不触发电离探头(能否触发电离头取决于火焰面温度)。在 24% 含氧条件下,火焰传播能力进一步提高,不仅在实验选定的任何粉尘浓度及湍流条件下,熄火间距都降至 0.4cm,而且火焰均可令电离探头触发。由此得到的重要结果:煤粉火焰传播能力对气体介质中的氧含量非常敏感,氧含量的稍许增加可使煤粉火焰温度显著提高,从而传播能力大大加强。

为了考察在富氧条件下煤粉火焰在更长管道中的行为,还观察了煤粉火焰在内径为 14cm,长度分别为 5、20m 的燃烧管中的传播特性。实验用的燃烧管具体结构见文献[6]。实验是在煤粉粒度小于 38 $\mu\text{m}$ ,煤粉浓度从 200g/m<sup>3</sup> 增至 700g/m<sup>3</sup>,点火能量为 6~12g 黑火药(对应 18~36kJ)的条件下进行的。实验结果表明,在氧含量为 22%、24% 的条件下,煤粉火焰均无法在以上两种燃烧管中形成并传播。

## 4 分析

### 4.1 煤粉的最大等效燃烧速度

我们曾详细讨论过使用最大爆炸升压  $p_{\text{max}}$  与最大爆炸压力上升速率  $(dp/dt)_{\text{max}}$  来表征粉尘爆炸的静动载荷特性以及由此产生的实验数据对所采用的实验容器的依赖性问题。同时也提出了最大等效燃烧速度  $u_{\text{eff,max}}$  的概念,用它作为表征煤粉爆炸时动载荷特性(简称爆炸强度)的参数<sup>[9]</sup>。用  $u_{\text{eff,max}}$  来刻画等容爆炸强度可望在表征的客观性和普遍性上有所改进。应用  $u_{\text{eff,max}}$  的概念可重新表述以上的煤粉实验数据。对于等容燃烧的绝热阶段结束时刻  $t^*$ ,煤粉的最大等效燃烧速度可表达为<sup>[9]</sup>

$$u_{\text{eff,max}} = \frac{D_0^{1/2}}{p_{\text{max}}} \cdot \frac{V_0}{A(t^*)} \cdot \frac{1}{p^{1/2}(t^*)} \cdot \left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{max}} \quad (1)$$

式中: $t^*$  对应了  $(dp/dt)_{\text{max}}$  的瞬间, $p(t^*)$  和  $A(t^*)$  分别为  $t^*$  时刻的压力值和等效火焰面的表面积。

对于球形容器

$$\frac{V_0}{A(t^*)} = \frac{(3/4) R^3(t^*)}{4 R_0^2} = 0.52 R_0 \quad (2)$$

对于柱形容器

$$\frac{V_0}{A(t^*)} = \frac{(D/2)^2 L}{D(7L_{\text{eff}}^2 + 6L_{\text{eff}}D - D^2)/6L_{\text{eff}}} \quad (3)$$

式中: $L$  与  $D$  分别为柱形容器的长度和内径, $L_{\text{eff}}$  可从实验中确定的经验关系式<sup>[9]</sup>给出。

这样,对于给定物料在给定容器上的等容爆炸,都可以根据其压力历史  $p-t$  关系和容器特

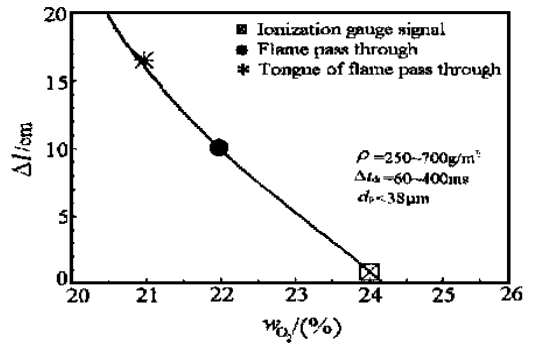


图 6 气体介质中氧含量对煤粉火焰传播熄火间距的影响

Fig. 6 The influence of O<sub>2</sub> concentration on the quenching distance of coal-dust flame propagation

征得到对应的  $u_{\text{eff,max}}$ 。

#### 4.2 封闭容器内点火延迟时间与扬尘湍流强度之间的定量关系

上述结果已清楚表明,煤粉的爆炸特性强烈地受容器内在点火时刻残存的扬尘湍流强度的影响。分析对比测量结果时,必须计及每次爆炸实验点火时所对应的扬尘湍流强度。封闭容器内扬尘湍流随时间衰变规律的测定已成为粉尘爆炸研究的必要部分。引用文献[6~8]中给出的在 GS20L、YK7L 与 YK22L 三个实验容器中扬尘湍流强度随时间衰减规律的测量结果,见图 7。可用它们建立以上三个封闭容器中点火延迟时间  $t_{\text{di}}$  和湍流强度  $u$  之间的定量关系。

#### 4.3 采用最大等效燃烧速度表征煤粉爆炸强度,讨论封闭容器内爆炸过程中诸参数的影响

##### 4.3.1 $u_{\text{eff,max}}$ 已不再依赖实验容器

首先采用  $u_{\text{eff,max}}$  来分析比较不同封闭容器内的实验结果。图 8(a) 给出了在同一粒度条件下,煤粉在四个实验容器内所获得的最大等效燃烧速度随煤粉浓度的变化规律。偏高的一组燃烧速度为  $2 \sim 3 \text{ m/s}$ , 对应于 GS20L 在  $t_{\text{di}} = 28 \text{ ms}$  时的部分数据;另一组燃烧速度则落在  $0.8 \sim 1.5 \text{ m/s}$  范围内,对应了 BS20L ( $t_{\text{di}} = 20 \text{ ms}$ )、YK22L、YK7L、GS20L ( $t_{\text{di}} = 60 \text{ ms}$ ) 中的全部数据,和 GS20L ( $t_{\text{di}} = 28 \text{ ms}$ ) 的部分数据。对于以上四个封闭容器的  $u_{\text{eff,max}}$  实验结果,若将湍流的作用考虑(即与图 7 对照)后,可以发现偏高的这组数据对应于 GS20L 点火延迟时间极短的条件,其相应的湍流强度可能已超过了  $3 \text{ m/s}$  的测量结果;而较低的这组数据则是对应于各容器内的湍流强度在  $1 \sim 2 \text{ m/s}$  范围。看来高端流强度是造成高燃烧速度的原因;至于其它三个封闭容器中当它们处于湍流强度大致相同时,所对应的燃烧速度实际上落在同一范围内。因而,下面若用扬尘湍流强度作为横坐标将各个实验容器中的  $u_{\text{eff,max}}$  联系起来,最大等效燃烧速度将不再依赖实验装置。

图 8(b) 给出了在四个不同封闭容器中延迟点火时间对  $u_{\text{eff,max}}$  的影响。实验结果表明,延迟点火时间在  $20 \sim 100 \text{ ms}$  的范围内变化时,其所对应的湍流强度的变化对煤粉最大等效湍流燃烧速度有十分明显的影响,而且四个不同容器的数据均落在同一条变化规律的曲线上。在  $60 \text{ ms}$  之前燃烧速度几乎直线地由  $2.7 \text{ m/s}$  降至  $0.5 \sim 1 \text{ m/s}$ ;而在  $100 \sim 200 \text{ ms}$  之间,燃烧速度保持较缓慢的下降趋势,直到  $400 \text{ ms}$  之后燃烧速度才基本上不再变化。

引入图 7 给出的三个封闭容器内扬尘湍流强度随时间的衰变规律后(图 8(c)),由四个实验容器分别提供的四组扬尘湍流强度与其对应的煤粉最大等效燃烧速度的实验数据大致落在了一条直线上。图中数据有一定的散布,这可能由于各容器扬尘湍流强度衰变规律的测量条件不同所致。从实验结果可得出以下结论:煤粉最大等效燃烧速度强烈依赖容器内的湍流强度,而且大致地与湍流强度的变化成线性关系。以上实验结果还清楚地表明,采用  $u_{\text{eff,max}}$  来表征煤粉爆炸强度随湍流强度的变化规律时对实验装置已不再有依赖性。

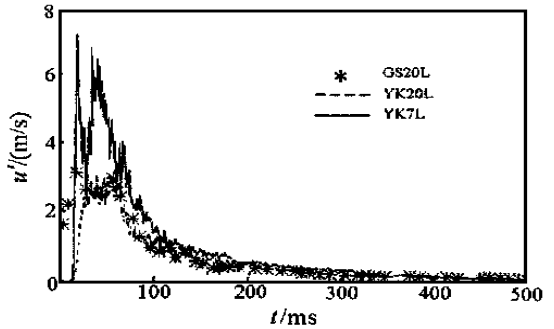


图 7 三种封闭容器内初始扬尘湍流强度的衰减规律

Fig. 7 The dispersion-induced turbulence intensity of three vessels as a function of time



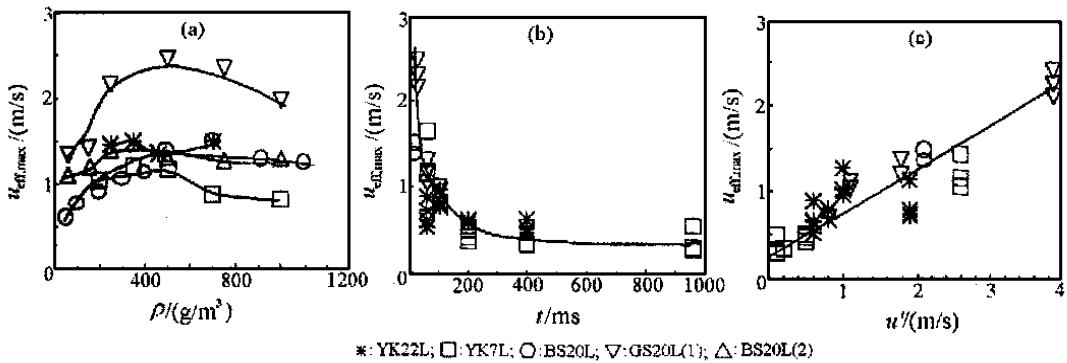


图 8 最大等效燃烧速度随煤粉浓度、延迟时间、扬尘湍流强度的变化  
 Fig. 8 Variation of maximum effective burning velocity with the coal dust concentration, ignition delay time and dispersion-induced turbulence intensity

4.3.2  $u_{eff,max}$  的精度高且散布度小

在同一个实验用的封闭容器内,也可以采用  $u_{eff,max}$  来讨论各种参数对其影响,如煤粉浓度、煤粉粒度、扬尘湍流强度、气体介质中氮气含量、点火能量等。将这些结果(图从略)与图 2、图 4、图 5 等进行比较后,会发现用  $u_{eff,max}$  来表征煤粉爆炸强度时其数据的精度和散布度比用  $(dp/dt)_{max}$  时有明显提高。

5 讨论

5.1 神府烟煤煤粉在空气中的等容爆炸特性和强度及其受氮气含量的影响

(1) 7、20dm<sup>3</sup> 的封闭容器中获得的煤粉在空气介质中最大爆炸压力的最高值不超过 1MPa,最大爆炸压力上升速率的最高值约为 50MPa/s,与实验装置无依赖关系的煤粉爆炸强度(最大等效燃烧速度)不超过 3m/s。这些最高值所对应的扬尘湍流强度(RMS 速度)约为 3.5m/s。

(2) 煤粉在空气介质中的爆炸特性和强度基本上不受煤粉粒度的影响,极限浓度范围除外。

(3) 煤粉在空气介质中的爆炸强度  $u_{eff,max}$  随着扬尘系统所诱导的小尺寸湍流强度线性增加。当湍流强度由 0.5m/s 增至 4m/s 时,最大等效湍流燃烧速度也相应由 0.5m/s 增至 2.6m/s。

(4) 煤粉爆炸特性和强度主要受气体介质中氧含量的影响。氧含量由在空气中的 21% 充 N<sub>2</sub> 后降至 15% 时,煤粉的爆炸特性显著地下降;如果继续降至 6%,则煤粉的爆炸特性达到了不爆炸的下限。

(5) 煤粉火焰在空气为气体介质(即氧含量为 21%)的条件下,不能在内径为 14cm、长度为 5、20m 的水平管中传播;也不能穿过内径为 16.5cm、长 2m 的垂直管道;仅能在内径为 16.5cm、长为 1m 的管道中窜出火苗。

(6) 在气体介质的氧含量增至 22% 的煤粉火焰的传播能力有明显提高,火焰能全部通过内径为 16.5cm、长 2m 的垂直管道;并能穿过间隔为 10cm 的平板栅。当氧含量增至 24% 时,烟煤火焰可穿过 0.4cm 间隔的平板栅。

## 5.2 对神府烟煤煤粉在空气介质中的爆炸特性不受煤粉浓度及初压影响的解释

原因可以归结为此种煤粉的挥发性强,而且内部结构呈多孔状,煤粉在点火与初步形成火焰时由挥发得到的可燃气体在空气介质中的氧含量的比值很容易超过当量比而处于贫氧状态。在封闭容器内富余的燃气含量对燃烧不仅发挥不出作用,反因远离当量比而降低了燃烧的强烈程度。这个原因也可以用来解释为什么降低氧含量会有效地减弱煤粉的爆炸性,以及在空气中增加 1%~3% 的氧含量会明显改善煤粉火焰传播特性。最后应该提醒注意的是,在空气为介质的条件下煤粉燃烧与爆炸过程中产生了大量未燃的燃气,它们对于防爆是潜在的威胁。因为,一旦它们有机会与氧气接触就会发生严重的爆炸事故。

研究工作引用宝山钢铁(集团)公司科技报告中的有关实验数据;德国食品工业安全与防护研究中心对部分实验提供了支持与帮助。在此一并表示感谢。

### 参考文献:

- [1] Magy J, Verakis C. Development and Control of Dust Explosions [M]. New York:Marcel Dekker, Inc, 1985.
- [2] Bartknecht W. Explosions-course Prevention and Protection [M]. New York:Springer Verlag, 1981.
- [3] Eckhoff R K. Current Dust Explosion Research at the CMI [A]. Proceeding of International Conference on Fuel Air Expl [C]. Montreal:McGill University, 1981.
- [4] Siwek R, Cesana C. Operating Instruction for KSEP-20L Apparatus [M]. Borg H. Switzerland:Swiss Association for Pressure Vessel Control, 1984.
- [5] 浦以康,沈红标. 烟煤爆炸特性研究 [R]. 上海:宝山钢铁(集团)公司炼铁室, 1996.
- [6] 浦以康,袁生学,丁大玉,等. 微细铝粉爆炸特性的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(3):193—204.
- [7] 浦以康,胡山,李可意. 粉尘火焰加速现象的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2):97—106.
- [8] PU Yr-kang, Li Y C, Kauffmann C W, et al. The Determination of Turbulence Parameters in Closed Explosion Vessels [J]. AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, 1989, 132:107—123.
- [9] Lee H S J, PU Yr-kang, Knystautas R. Influence of Turbulence on Closed Volume Explosion of Dust Air Mixtures [J]. Arcivum Combustions, 1986, 7(3/4):279—297.

## Experimental Studies of Explosion Characteristics of Bituminous Coal Dust-Air Mixtures Injected in Blast Furnace

PU Yr-kang, HU Jun, JIA Fu

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

**Abstract:** A systematic experimental studies were carried out to determine the explosion and propagation characteristics of the bituminous coal dust-air mixtures in vessels with different volume and shapes. The influence of the dust concentration, dust particle size, dispersion-induced turbulence and the content of O<sub>2</sub> in the air on the explosion characteristics has been discussed comprehensively.

**Key words:** coal dust; constant volume combustion; equivalent burning velocity