文章编号：1000-5773(2012)04-0455-07

甲烷-煤尘爆炸物火焰传播特性*

牛　芳，刘庆明，白春华，何学秋，官广东

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081）

摘要：在10 m^3 的爆炸罐中对体积分数为8%的甲烷和75 g/m^3 煤尘的混合物进行了系统的燃烧爆炸实验。分别利用光测方法和压力方法得到了爆炸物的层流燃烧速度、火焰传播速度、火焰厚度、马克斯坦长度以及爆炸特征值的变化规律。结果表明，在常温常压下，当点火能为40 J时：利用光测法得到的8%甲烷与75 g/m^3 煤尘混合物的燃烧速度为0.437 m/s，而根据压力-时间关系得到的混合物燃烧速度为0.459 m/s，两者符合较好；用火焰厚度与马克斯坦长度判定的火焰发展趋势相同，即向外传播的火焰趋于稳定；爆炸物的爆炸特征值最大值出现在0.5 m处，壁面的爆炸特征值偏小。

关键词：燃烧速度；爆炸特征值；火焰稳定性；火焰传播速度

中图分类号：O382.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

在工业生产过程中，可燃悬浮物的产生非常常见。这些直径很小的悬浮物悬浮在空气中形成粉尘云，在一定条件下发生爆炸，导致巨大的财产损失和人身伤亡。据国家安全生产监督管理局统计，2005年～2009年我国发生的20起特别重大安全事故中，煤矿爆炸事故占19起，而在煤矿爆炸安全事故中，瓦斯、煤尘爆炸的次数及死亡人数占85%左右。爆炸传播过程中火焰、爆炸波的发展变化特性决定了爆炸事故的破坏程度，因此，研究瓦斯、煤尘的爆炸火焰及冲击波传播规律尤显重要。

对气体和可燃粉尘混合体系的研究主要集中在激波对可燃粉尘的卷扬与点火、混合爆炸的特性参数（如爆炸下限、最小点火能、最大爆炸压力、最大压力上升速率）、气体的存在对粉尘爆炸特性指标的影响以及粉尘的存在对气体爆炸特性指标的影响等。然而，对可燃性气体和粉尘共存体系下的火焰是如何形成的，火焰如何在可燃性粉尘和气体中传播，以及燃烧反应区结构的研究甚少[1]。

对于特定的粉尘云，层流燃烧速度是粉尘云的基础燃烧属性[2]，可以通过多种方法测量，如停滞平面火焰法[3-4]、热通量法[5-6]和球形燃烧法[7-8]。其中：停滞平面火焰法可以建立不同的火焰配置，但是确定火焰阵面以及在高压下稳定火焰比较困难；热通量法需要确定一个关于入口速度和热损失的函数，进而确定零热量损失时的绝热燃烧速度；球形燃烧法是典型的球形火焰传播装置，结构简单，可以明确地定义火焰拉伸率，较好地控制实验。

测量粉尘云层流火焰燃烧速度的方法与气体的相同，但是获得的实验结果却因测量方法的不同而不同。事实上，粉尘颗粒的大小和质量比气体分子大得多，所以粉尘颗粒有很大的沉降速度。在实际测量中，必须保证粉尘悬浮在空气中。对于定体积容器中的粉尘，点火前需要有一个很强的气流使其悬浮

* **收稿日期**：2010-10-24；**修回日期**：2011-01-31

基金项目：国家自然科学基金(10772032)

作者简介：牛　芳(1986－)，女，博士，主要从事多相混和物火焰传播特性研究. E-mail：nf37@163.com

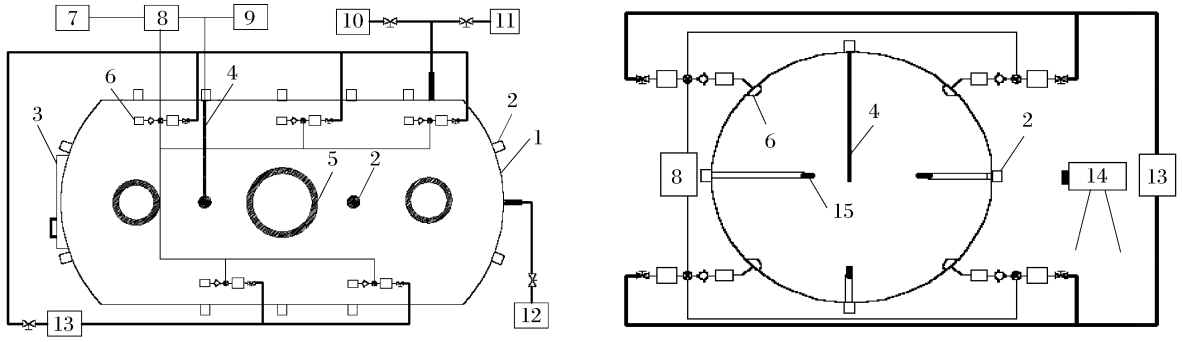
通讯作者：刘庆明(1963－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事多相云雾燃烧爆炸与爆轰理论与应用研究. E-mail：qmliu@bit.edu.cn

在空气中。粉尘云在高湍流下产生，燃烧速度即为湍流燃烧速度。增大点火延迟时间，可使湍流度减少，层流燃烧速度就是零湍流燃烧速度[9]。

针对粉尘燃烧存在的问题，本研究采用球形燃烧法，利用 10 m^3 多相燃烧爆炸罐，由测量的光测数据和压力数据计算粉尘燃烧爆炸的基础参数，分析其变化规律。

2 实验系统

本研究的实验系统主要包括：10 m^3 多相燃烧爆炸罐、喷粉扬尘系统、点火系统、测试系统、控制系统、配气系统以及其它设备。整个实验系统的示意图如图 1 所示。



1. Explosion tank; 2. Text hole; 3. Valve; 4. Spark lever; 5. Optical window; 6. Dispersion system; 7. Test system; 8. Control system; 9. Ignition system; 10. Valve system; 11. Ventilating and purifying air system; 12. Vacuum pump; 13. High pressure making system; 14. High speed photography

图 1 多相燃烧爆炸实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system for multi-phase combustion and explosion

10 m^3 多相燃烧爆炸罐为圆角圆柱体，内径为 2.0 m，长度为 3.5 m。爆炸罐上方与通风除尘系统连接，也可与其它容器连接，向罐内输送气体。爆炸罐的一端由两扇双向开门的密封门密封，两扇门之间由螺杆连接，并在门的边缘安装密封圈，以保证整个系统的气密性；另一端与抽真空系统连接。爆炸罐内布置点火杆，用来点燃混合气。点火系统采用 DX 高能点火系统，发火电压约 2 kV，单次储能 40 J。在罐体两侧装有石英玻璃窗，为高速摄像仪提供光学通道。实验中采用的高速摄像机的拍摄速度为 250 幅/秒，曝光时间为 3 997 μs，光圈系数采用 1.4，分辨率为 1024×768。为了更好地了解中心点火火焰发展过程，在罐体内部安装了 5 个传感器，分别距中心点火点 0.25、0.50、0.75 m，距壁面 1.3、1.8 m 处。整个爆炸罐安放在一套大型减震装置上，用以减轻由爆炸产生的震动对周围环境的影响。

压力测试系统由 Kistler 压电式传感器、适配器、数据采集系统、传感器连接件组成。实验时，由控制系统输出电压信号，触发数据采集系统开始记录。在实验过程中，当爆炸波传至压电传感器时，传感器将压力信号转换成电荷信号，再经过适配器转换为相应的电压信号，最后经数据采集系统采集存储，通过计算机对数据分析处理后，得到相应的压力-时间曲线。

考虑到在喷粉、喷液过程中，粉末和液滴会因重力作用而发生自由沉降，为了能在爆炸罐中形成更加均匀弥散的多相混和物，在爆炸罐上半部和下半部分别均匀布置了 3 套和 2 套喷粉扬尘系统，喷粉扬尘系统间距为 0.8 m。气室中的高压空气夹带粉尘喷射进入爆炸罐体中产生湍流。实验过程中，希望获得适当的湍流强度，以减少外部湍流对云雾固有燃烧爆炸特性的影响。本研究利用热线风速仪对爆炸罐中心扬尘湍流强度进行测定。当喷射介质为空气、喷射压力为 0.8 MPa 时，罐体中心测点获得的湍流强度随时间的变化如图 2 所示。从图 2 中可以看出：在 1.2 s 后，爆炸罐中心的湍流强度基本趋于稳定，且湍流强度很低，几乎为零，因此在进行粉尘燃爆实验时，点火延迟时间为 1.2 s。

实验选用的煤样为原煤,产地为铜川玉华煤矿,煤样的挥发分质量分数为 41.11%。将原煤块经密封式粉碎研磨加工,制成细煤粉。由激光粒度测试可知:实验用煤尘粒径大多分布在 20～70 μm,其中 35～55 μm 的比例最大,粒径大于 80 μm 的煤尘约占 5%。为了防止煤颗粒在喷粉过程中聚结成团,将制得的细煤粉置于电热恒温干燥箱中,在 105 ℃条件下烘干 2 h,去除水分。将充分烘干的煤粉经标准筛振筛机筛分,得到实验所需的粒度为 45～75 μm 的样品。

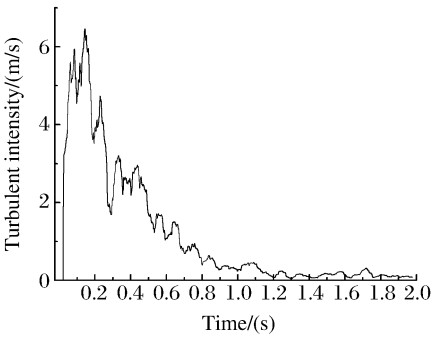


图 2 甲烷-煤尘-空气混合物的湍流强度变化曲线

Fig. 2 Variation of the turbulent intensity with time for the methane-coal dust-air mixture

3 实验数据分析方法

3.1 光测方法

火焰传播速度 v_n 是指火焰相对于静止燃烧壁面的运动速度,可用高速摄影仪直接测出。在球形扩散火焰中,拉伸火焰传播速率 v_n 可从火焰半径与时间的关系式中得到,即

$$v_n = \mathrm{d}r_b/\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中:r_b 为纹影照片中火焰的半径,t 为从电火花点火到计算时刻的时间。

火焰拉伸率 α 定义为火焰前锋面无限小面积的对数值对时间的导数,即

$$\alpha = \frac{\mathrm{d}(\ln A)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{A}\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中:A 为火焰前锋面积。对于一个向外传播的球形火焰,火焰的拉伸率可表示为

$$\alpha = \frac{1}{A}\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t} = \frac{2}{r_b}\frac{\mathrm{d}r_b}{\mathrm{d}t} = \frac{2}{r_b}v_n \tag{3}$$

在火焰传播初期,拉伸火焰传播速率 v_n 与火焰拉伸率 α 之间存在线性关系,即

$$v_l - v_n = L_b\alpha \tag{4}$$

式中:L_b 为马克斯坦长度,v_l 为无拉伸火焰传播速度。v_l 对应 v_n-α 关系中当 $\alpha=0$ 时 v_n 的值。

在火焰传播初始阶段,火焰经历了一个等压过程。无拉伸层流燃烧速度 S_l 和无拉伸层流传播速度 v_l 通过火焰前锋的质量守恒联系起来,即 $A\rho_u S_l = A\rho_b v_l$,则

$$S_l = \rho_b v_l/\rho_u = (p_i/p_e)^{1/\gamma}v_l \tag{5}$$

式中:ρ_u 和 ρ_b 分别为未燃和已燃气体的密度,p_i 和 p_e 分别为容器中最初压力和定容燃烧的最大压力,γ 为绝热指数。

3.2 压力方法

Manton 等人提出,根据压力曲线可以精确地计算层流燃烧速度。Bradley 等人[10]给出了压力上升速率与燃烧速度的关系式,即

$$S_l = \frac{r}{3}\left(\frac{p_i}{p}\right)^{1/\gamma}\frac{1}{(p_e-p_i)}\left[1-\left(\frac{p_i}{p}\right)^{1/\gamma}\left(\frac{p_e-p}{p_e-p_i}\right)\right]^{-2/3}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

式中:r 为容器半径,p 为 t 时刻的压力。

假设体积分数为 8%的甲烷和 75 g/m^3 煤尘混合物符合理想气体模型,即 $\rho_b/\rho_u=(p_i/p)^{1/\gamma}$。对于气-固两相的绝热指数 γ,可以通过下式计算

$$\gamma = \frac{m_g\gamma_g + m_s\gamma_s}{m_g + m_s} \tag{7}$$

式中:m 为质量,下标 g 和 s 分别代表气体和固体。对于甲烷,$\gamma_g=1.33$;对于固体煤尘粉末,$\gamma_s=1$。由(7)式可知,8%甲烷-75 g/m^3 煤尘的绝热指数 $\gamma=1.143$。

4 结果与分析

在 10 m^3 的爆炸罐体中，当容器中充入体积分数为 8%的甲烷和 75 g/m^3 煤尘燃烧物时，得到的纹影照片如图 3 所示。Cassel 将粉尘火焰分为两种类型：一种是 Nusselt 类型，这种类型的火焰被固体颗粒表面的氧扩散控制，为非均相反应；另一种是挥发分火焰，这种类型火焰的反应进度由汽化、高温分解或热解速率控制，为均相气体的化学反应。Nusselt 型火焰比预混气体燃烧火焰有着更大的燃烧区厚度，这是因为与预混气体燃烧相比，Nusselt 型火焰的分子扩散速度更慢。由于挥发分火焰在燃烧过程中存在预热区，因此与预混气体燃烧火焰相比，挥发分火焰厚度比较大。在预热区中气体从固体颗粒中挥发或因高温热解出来，然后与空气混合，形成预混气；而剩余的固体焦炭颗粒以较慢的速度在火焰尾部燃烧。煤和有机粉尘实际上是综合了这两种燃烧。图 3 中的火焰就是综合了这两种燃烧，其中外火焰阵面（红色亮圈）是甲烷气体和挥发分火焰，内圈火焰阵面（黄色光圈）是剩余的固体焦炭颗粒以较慢的速度在火焰尾部燃烧，是 Nusselt 型火焰。

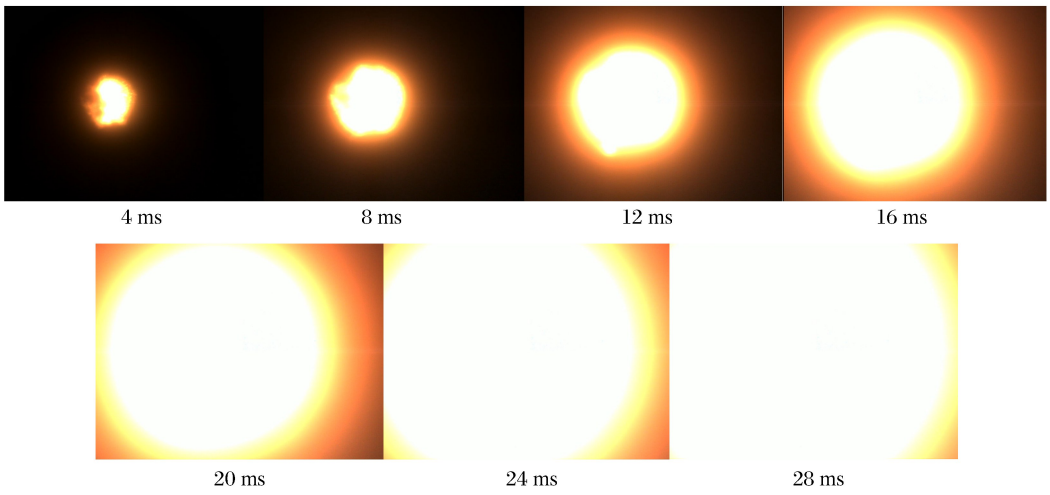


图 3 8%甲烷-75 g/m^3 煤尘混合物燃烧火焰光测图

Fig. 3 Flame photographs of the 8% methane-75 g/m^3 coal dust-air mixture

图 4 给出了火焰传播速度随时间的变化关系。从图 4 可以看出：对于爆炸罐中甲烷-煤尘-空气预混火焰，传播初期火焰的传播速度有一个小幅下降，这主要是由于在点火燃烧时放电火花使临近的预混燃烧物积累了一定的热量，并且放电火花还起到了推动火焰向前传播的作用；随着火焰持续向前传播，火焰的传播速度持续增大，这是由燃烧放热导致燃烧产物膨胀，进而引起气流速度增加造成的；在虚线 a、b 之后，内圈和外圈火焰传播速度迅速降低，这是由于在实验条件下随着火焰向外传播，已燃区域的气体产物不断膨胀，压力逐步增加，推动着火焰阵面向前传播，同时未燃区域的压力也逐步增大，促使气流速度降低，最终导致火焰的传播速度降低。

由图 2 可知，当点火延迟时间为 1.2 s 时，湍流强度很低，几乎为零。从图 3 中的高速摄影照片可以看出：点火后 12 ms 时，外火焰轮廓是非常光滑的；点火后 16 ms 时，无论是外火焰轮廓还是内火焰轮廓，火焰阵面均是非常光滑的。对比图 4 可以得出如下结论：在虚线 a 和 b 之后的过程中，火焰以层流火焰形式向前传播，混合物的燃烧速度基本不变，为层流燃烧速度。相应地，对于曲率与拉伸火焰燃烧速度（见图 5），从直线 a_1 和 b_1 之前，火焰以层流火焰形式向前传播，将这些点拟合成直线，即可求出内、外圈无拉伸火焰传播速度。结合(4)式和图 5 得到内、外火焰无拉伸火焰传播速度，分别为 2.0 m/s 和 3.4 m/s。取内火焰和外火焰无拉伸火焰传播速度的平均值为甲烷-煤尘爆炸混合物的无拉伸火焰传播速度，根据(5)式即可计算层流燃烧速度 S_l，即

$$S_l = \left(\frac{p_i}{p_e}\right)^{1/\gamma} v_l = \left(\frac{1}{7.98}\right)^{1/1.143} \times \frac{2.0+3.4}{2}\ \mathrm{m/s} = 0.437\ \mathrm{m/s} \tag{8}$$

由(4)式可知,马克斯坦长度 L_b 是拉伸火焰传播速率-火焰拉伸率关系式中的负斜率。由图 5 的拟合直线可知,外火焰的 L_b 为 0.051,内火焰的 L_b 为 0.046。马克斯坦长度 L_b 是表征火焰对拉伸响应稳定与否的参数。对于小尺寸火焰:L_b 为正值时,表明火焰传播速率随拉伸率的增加而减少,当火焰锋面出现突起时,凸起部分的火焰传播速率得到抑制,使火焰趋于稳定;L_b 为负值时,表明火焰传播速率随拉伸率的增加而增加,当火焰锋面出现突起时,凸起部分的火焰传播速率将进一步增加,使火焰的不稳定性增加。因为内、外圈火焰的 L_b 均为正值,说明对于此条件下煤尘-甲烷爆炸物的火焰传播是趋于稳定的。

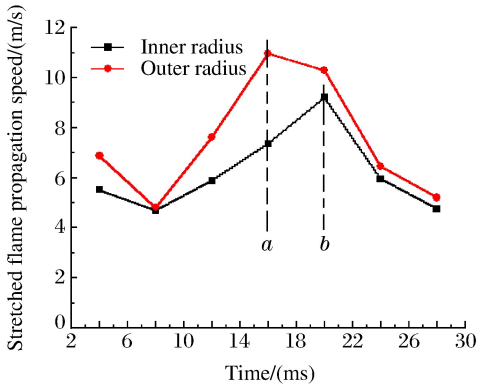


图 4　8%甲烷-75 g/m³ 煤尘混合物的火焰传播速率随时间的变化

Fig. 4　Variation of the flame speed with time for the 8% methane-75 g/m³ coal dust-air mixture

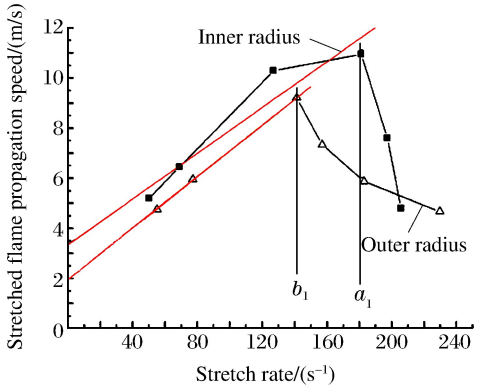


图 5　8%甲烷-75 g/m³ 煤尘混合物的拉伸火焰传播速率随拉伸率的变化

Fig. 5　Variation of the flame speed with stretch rate for the 8% methane-75 g/m³ coal dust-air mixture

火焰厚度是衡量热扩散不稳定性的重要参数,火焰厚度越大,火焰越趋于稳定[11]。图 6 为火焰半径与火焰厚度随着火焰传播时间的变化关系。从图 6 可以看出,火焰厚度随着时间的增加逐渐增加,表明火焰趋于稳定,与 L_b 得到的结论一致。

根据(3)式,利用压力-时间曲线,可以得到火焰传播的层流燃烧速度随压力的变化关系,如图 7 所示。从图 7 可以看出,在火焰传播初期,火焰随着压力的增大近似呈直线变化。这种现象不仅与压力增加有关,更主要是由于在拐点(压力上升速率最大时刻对应的压力点)前未燃混合物的熵增大引起的。

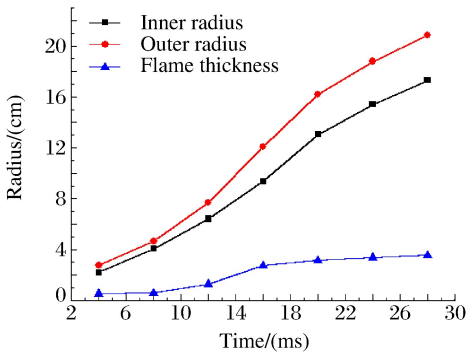


图 6　8%甲烷-75 g/m³ 煤尘混合物的火焰半径与火焰厚度随火焰传播时间的变化

Fig. 6　Variations of the flame radius and flame thickness with time for the 8% methane-75 g/m³ coal dust-air mixture

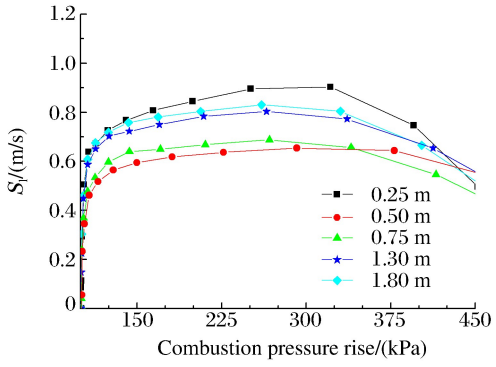


图 7　8%甲烷-75 g/m³ 煤尘混合物的层流燃烧速度随压力的变化

Fig. 7　Variation of the laminar burning velocity with pressure for the 8% methane-75 g/m³ coal dust-air mixture

层流燃烧速度是等压阶段的火焰燃烧速度(等压阶段指压力上升值不超过初始压力的 10%),所以等压燃烧阶段燃烧速度的平均值为层流燃烧速度。由图 7 可知,随着火焰向外传播,混合物的燃烧速度呈现先减少后逐渐增大的趋势。由于 0.25 m 和 0.50 m 处,火焰燃烧速度受点火能量的影响,而 1.3 m 和 1.8 m 处火焰传播到冷的容器壁,存在能量损失,所以取 0.75 m 处的层流燃烧速度值为甲烷-煤尘-空气混合物的层流燃烧速度,即 0.459 m/s。

大量实验表明,当容器体积大于等于 0.04 m^3 时,爆炸压力上升速率与容器体积 V 之间存在 3 次方定律:$(dp/dt)_{max}V^{1/3}=K_{st}$,其中爆炸特性值 K_{st} 是分析爆炸物质危险性的重要参数。根据测得的压力信号,得到甲烷-煤尘混合物爆炸特性值 K_{st} 随传播距离的变化规律,如图 8 所示。由图 8 可知,K_{st} 随传播距离增加先升高后降低,最大值出现在距离点火位置 0.5 m 处,壁面处的 K_{st} 偏小。产生这种现象的原因在于:随着火焰传播,容器中的压力和温度逐渐增加,可燃物反应剧烈,能量释放速率加快,因而表现出 K_{st} 随距离增加而增大;随着火焰继续向前传播,温度逐渐增加,由于热辐射损失能量与温度的 4 次方成正比[12],因此热辐射损失的能量大幅度增加,K_{st} 在火焰传播过程中达到某值后逐步降低,然后趋于平衡;当火焰接触冷管壁时,会损失部分燃烧反应热,破坏了这种热平衡,所以当火焰传播到容器壁时,K_{st} 有一个下降过程。从以上分析可知,由于存在热辐射以及火焰碰到冷管壁时的热损失,以往采用各种球形罐体壁面压力曲线求得的爆炸特性值偏小,不能准确体现爆炸物质的危险性。

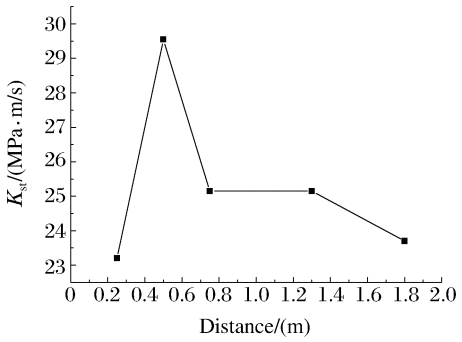


图 8 8%甲烷-75 g/m^3 煤尘混合物的爆炸特性值与传播距离的关系

Fig. 8 Relationship between explosibility index and distance for the 8% methane-75 g/m^3 coal dust-air mixture

5 结 论

(1) 常温常压下,点火能为 40 J 时,利用光测法得到体积分数为 8%的甲烷-75 g/m^3 煤尘-空气混合物的层流燃烧速度为 0.437 m/s,根据压力-时间关系,得到此混合物的燃烧速度为 0.459 m/s,两者吻合得比较好。

(2) 根据拉伸火焰传播速度与拉伸率的关系式,得到的马克斯坦长度为正值,表明向外传播的火焰趋于稳定。根据火焰厚度随传播距离的变化关系可知,向外传播的火焰趋于稳定。火焰的基础参数对火焰发展趋势的预测一致。

(3) 获得了爆炸特性值的发展规律:爆炸特性值的最大值出现在距离点火点 0.5 m 处,壁面的爆炸特性值偏小。

References:

[1] Sun J H, Dobashib R, Hirano T. Structure of flames propagating through aluminum particles cloud and combustion process of particles [J]. J Loss Prev Process Ind, 2006, 19(6): 769-773.

[2] Eckhoff R K. Current status and expected future trends in dust explosion research [J]. J Loss Prev Process Ind, 2005, 18: 225-237.

[3] Kolbe M. Laminar burning velocity measurements of stabilized aluminum dust flames [D]. Montreal, Quebec, Canada: Concordia University, 2001.

[4] Yu G, Law C K, Wu C K. Laminar flame speeds of hydrocarbon-air mixtures with hydrogen addition [J]. Combust

Flame,1986,63(3):339-347.

[5] Bosschaart K J,de Goey L P H,Burgers J M. The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method [J]. Combust Flame,2004,136(3):261-269.

[6] Bosschaart K J,de Goey L P H. Detailed analysis of the heat-flux method for measuring burning velocities [J]. Combust Flame,2003,132:170-180.

[7] Miao H Y,Ji M,Jiao Q,et al. Laminar burning velocity and Markstein length of nitrogen diluted natural gas/hydrogen/air mixtures at normal,reduced and elevated pressures [J]. Int J Hydrogen Energy,2009,34(7):3145-3155.

[8] Burke M P,Chen Z,Ju Y G,et al. Effect of cylindrical confinement on the determination of laminar flame speeds using outwardly propagating flames [J]. Combust Flame,2009,156(4):771-779.

[9] Bradley D,Chen Z,Swithenbank J K. Burning rates in turbulent fine dust-air explosions [A]//Proceedings of the 22nd International Symposium on Combustion [C]. Pittsburgh,US,1989:1767-1775.

[10] Bradley D,Mitcheson A. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels [J]. Combust Flame,1976,26:201-217.

[11] Kwon O C,Rozenchan G,Law C K. Cellular instabilities and self-acceleration of outwardly propagating spherical flames [J]. Proc Combust Inst,2002,29(2):1775-1783.

[12] Eckhoff R K. Dust Explosions in the Process Industries [M]. 3rd ed. Oxford,UK:Gulf Professional Publishing,2003:268.

Flame Propagation and Combustion in Methane-Coal-Air Mixture

NIU Fang,LIU Qing-Ming,BAI Chun-Hua,
HE Xue-Qiu,GONG Guang-Dong

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,*
Beijing Institute of Technology,Beijing 100081,*China*)

Abstract:Combustion and explosion experiments are carried out in an explosion tank of 10 m^3 for the mixture of 8% methane-75 g/m^3 coal dust-air. Optical method and pressure method are adopted to obtain the laminar burning velocity, flame speed, flame thickness, Markstein length as well as the explosibility index of the mixture when the flame spread. The results show that the burning velocity of the mixture of methane-coal dust-air is 0.437 m/s, while the value is 0.459 m/s according to the relationship between pressure and time, and the results from the two methods are coincide. The flames trends determined by flame thickness and Markstein length are the same, and both tend towards stability. The maximum of explosibility index occurs at 0.5 m, and the explosibility index at the wall of explosion chamber is a bit small.

Key words:burning velocity;explosibility index;flame stability;flame speed