

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0064

## 甲烷/煤尘复合爆炸火焰的传播特性\*

周永浩, 甘 波, 姜海鹏, 黄 磊, 高 伟

(大连理工大学化工学院精细化工国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为揭示甲烷/煤尘复合爆炸火焰的传播机理, 利用气粉两相混合爆炸实验系统, 在低于甲烷爆炸下限条件下, 采用高速摄影机记录火焰传播图像, 通过热电偶采集火焰温度, 研究了煤尘种类以及甲烷体积分数对甲烷/煤尘复合火焰传播特性的影响。结果表明: 挥发分是衡量煤尘燃烧特性的主导因素; 随着煤尘挥发分的升高, 燃烧反应增强, 火焰传播速度升高, 火焰温度升高; 挥发分含量差异较小时, 水分含量越低, 燃烧反应越剧烈; 在相同条件下, 焦煤的燃烧反应强度最高, 其次为长焰煤, 最后为褐煤; 随着甲烷体积分数的增加, 煤尘颗粒的燃烧可由释放挥发分的扩散燃烧转变为气相预混燃烧, 燃烧反应增强, 火焰传播速度和火焰温度显著升高; 热辐射和热对流作用促进煤尘颗粒热解, 释放挥发分进行燃烧反应, 维持复合火焰的持续传播; 随着混合体系中甲烷体积分数的增加, 混合爆炸机制由粉尘驱动型爆炸转为气体驱动型爆炸, 燃烧反应增强; 甲烷/煤尘复合爆炸火焰可由未燃区、预热区、气相燃烧区、多相燃烧区和焦炭燃烧区 5 部分组成, 湍流扰动导致燃烧介质空间分布存在差异, 使得燃烧区无规则交错分布。

**关键词:** 甲烷/煤尘复合爆炸; 火焰传播速度; 火焰温度; 火焰传播机理

中图分类号: O389; X932

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Investigations on the flame propagation characteristics in methane and coal dust hybrid explosions

ZHOU Yonghao, GAN Bo, JIANG Haipeng, HUANG Lei, GAO Wei

(State Key Laboratory of Fine Chemicals, Department of Chemical Machinery and Safety Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** To reveal the flame propagation mechanisms in the methane/coal dust hybrid explosions, the effects of coal type and methane concentration on the propagation characteristics of methane/coal dust hybrid explosion flame were experimentally investigated. Experiments were performed in a gas-solid hybrid explosion apparatus with methane concentrations below the lower explosive limit. The flame propagation images were captured by a high-speed camera and the flame temperature was recorded by a high-accuracy thermocouple. The results show that the volatile component is the dominant parameter in measuring the combustion characteristics of a certain coal type. With the increase of the volatile component, the combustion of the methane/coal dust flame gets enhanced. As a result, the flame propagation velocity increases and the flame temperature goes up. When the difference of the volatile component is small, due to the heat loss of the water evaporation, the combustion reaction of coal dust with lower water component is severer, the flame propagates more quickly. With the increase of the methane concentration, the combustion of the coal dust particle gradually transforms from the diffusion combustion of the released volatile components to the premixed combustion. The heat radiation and convection promotes the pyrolysis of the coal particle and the combustible substances are released, which maintains the continuous propagation of the hybrid flame. With the increase of the methane concentration, the hybrid explosion mechanism is transformed from the dust-driven type to the gas-driven type, and the combustion reaction gets enhanced. The methane/coal dust hybrid flame could be composed by five zones:

\* 收稿日期: 2021-02-10; 修回日期: 2021-05-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0807900)

第一作者: 周永浩(1995—), 男, 博士研究生, [rambozhou@mail.dlut.edu.cn](mailto:rambozhou@mail.dlut.edu.cn)

通信作者: 高 伟(1984—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, [gaoweidlut@dlut.edu.cn](mailto:gaoweidlut@dlut.edu.cn)

unburned zone, preheated zone, gas combustion zone, multi-phase combustion zone and char combustion zone. Behind the flame front, large or the agglomerated particles could continue the combustion reaction, which is the multi-phase combustion zone. In addition, the combustion of the char develops the char combustion zone. The turbulent disturbance results in the distribution difference of the combustion materials, which leads to the interlacement of the different combustion zones.

**Keywords:** methane/coal dust hybrid explosion; flame propagation velocity; flame temperature; flame propagation mechanisms

长久以来, 煤矿爆炸事故严重危害人民生命和财产安全<sup>[1]</sup>。研究显示, 我国超过 80% 的重要煤矿存在安全风险<sup>[2]</sup>。煤矿作业过程中产生的大量煤尘颗粒分散于空气中形成可燃粉尘云, 若遇明火极易引发爆炸。此外, 矿井中的煤层气含有大量甲烷等烃类可燃物质, 与煤尘颗粒共同形成甲烷/煤尘混合物。二者相互作用促进燃烧反应的增强, 使得爆炸威力显著提高。因此, 开展甲烷/煤尘混合爆炸火焰传播特性研究对于揭示爆炸火焰传播机理具有重要意义, 有助于煤矿爆炸事故预防和减灾技术的发展。

在此前的研究中, 研究人员重点关注了煤尘单相爆炸特性, 并通过实验测定了其关键特性参数<sup>[3-7]</sup>, 例如最大爆炸压力、最大升压速率、爆炸极限和最低点火能。此外, Cao 等<sup>[8]</sup>、Ajrash 等<sup>[9]</sup>和 Mishra 等<sup>[10]</sup>针对煤尘粒径和浓度对最低点火温度和爆炸强度的影响开展了研究。煤尘颗粒的点燃过程可分为两种类型<sup>[11]</sup>: 由挥发分引燃颗粒被称为各向同性燃烧, 颗粒直接与氧气反应被称为各向异性燃烧。在煤尘单相爆炸过程中, 颗粒间的热传递是维持火焰传播的关键环节<sup>[12-13]</sup>。

然而, 在实际爆炸事故中, 混合物中甲烷气体的燃烧反应使得爆炸过程更为复杂。除了以自由气体悬浮于空气中, 甲烷还可被煤尘颗粒的多孔表面吸收, 并成为颗粒分子结构的一部分<sup>[14]</sup>。近年来, 研究人员针对混合爆炸过程开展了一系列研究。甲烷的参与使得煤尘颗粒的最低点火温度降低, 并缩短了点火延迟时间<sup>[11]</sup>。此外, 甲烷/煤尘混合爆炸的压力峰值和最大升压速率相较于单相物质爆炸均有显著提高<sup>[15]</sup>。冯永安<sup>[16]</sup>和 Dufaud 等<sup>[17]</sup>通过实验研究发现, 甲烷等可燃气体的加入使得煤尘爆炸浓度下限显著下降。平洋<sup>[18]</sup>研究发现, 煤尘颗粒的存在使得瓦斯气体的最低着火温度显著降低。除了上述内部物质特性, 外部爆炸条件也会影响混合爆炸火焰过程。Ajrash 等<sup>[15]</sup>在圆柱形爆炸容器内研究了起始能量对爆炸特性的影响, 结果表明, 提高点火能量会加快火焰前锋和压力波的传播速度。此外, 障碍物的存在也会极大增强粉尘爆炸强度<sup>[19]</sup>。

气粉两相混合爆炸是一种复杂的带有热传导和化学反应的流体力学过程。可以发现, 此前研究主要集中在爆炸特性参数的测定, 以及初始条件对于爆炸行为的影响, 而对混合体系爆炸火焰传播过程鲜有研究。此外, 由于甲烷分子与煤尘颗粒燃烧反应的相互作用, 使得混合体系在低于甲烷爆炸下限的条件下即可发生爆炸, 因此, 本实验均在低于甲烷爆炸下限(5%)的条件下进行, 重点关注煤尘种类和甲烷体积分数对甲烷/煤尘混合爆炸火焰传播过程的影响, 并对混合爆炸火焰传播机理进行分析。

## 1 实验系统及材料

### 1.1 实验系统

图 1 所示为自主搭建的气粉两相混合爆炸火焰传播实验系统, 主要包括: 燃烧室、配气及喷粉系统、高压点火系统、热电偶测温系统、高速摄影系统、数据采集系统和时序控制系统。燃烧室为上端开口、下端封闭的竖直方形管道, 高度为 500 mm, 横截面尺寸为 72 mm×72 mm。管道左右两侧为不锈钢板, 前后两侧为无色透明亚克力板。喷粉装置位于燃烧室底部, 由锥形分散器、弧形样品皿和气流喷嘴组成。点火电极距离底面高度为 50 mm, 由两个 0.4 mm 的钨丝组成, 点火电压为 15 kV。R 型热电偶由 0.025 mm Pt-Pt/Rh13% 丝焊接而成, 与点火电极距离为 250 mm。实验流程如下: (1) 基于分压法, 在 1 L 预混罐内配置压力为 0.7 MPa 的一定体积分数的甲烷/空气预混气体; (2) 将一定量的煤尘均匀铺于弧形样品皿; (3) 触发 PLC 时序控制器, 喷粉持续时间为 500 ms, 点火延迟时间为 100 ms, 点火持续时间为 200 ms; (4) 记录实验数据。

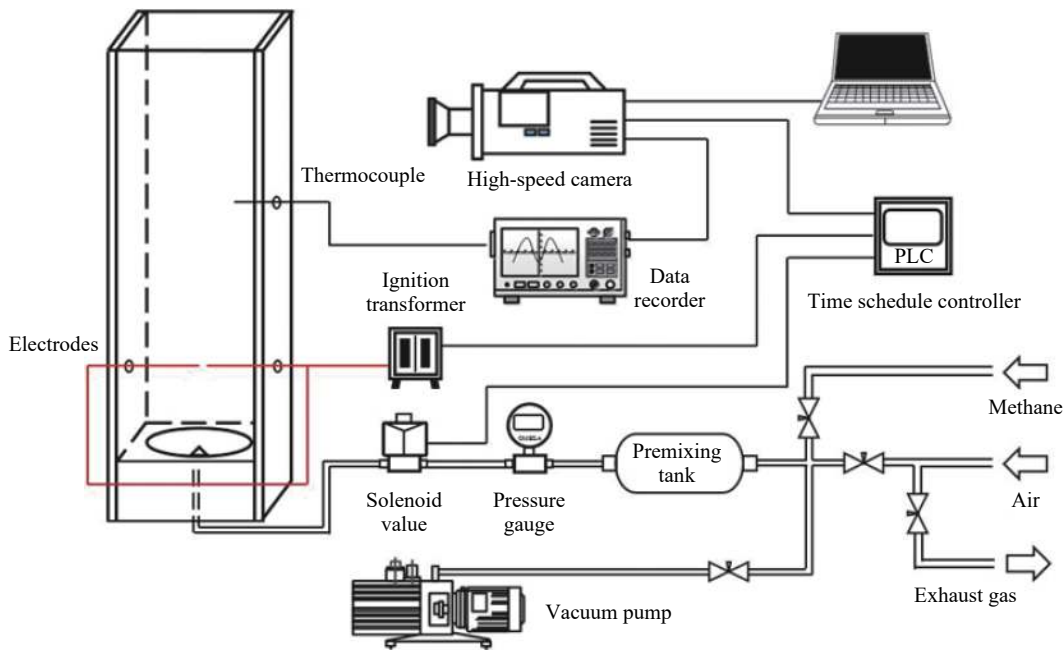


图 1 气粉两相混合爆炸火焰传播实验系统

Fig. 1 Experimental system for flame propagation of gas-dust hybrid explosion

### 1.2 煤尘物化特性

采用焦煤、长焰煤和褐煤 3 种不同煤种, 对煤样进行工业分析和元素分析, 其各组分与所含元素的质量分数如表 1 所示。挥发分为煤尘颗粒在高温环境下释放的  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}$  等可燃气体组分, 其含量决定了煤样的燃烧性能。

表 1 煤样工业分析和元素分析结果

Table 1 Proximate and ultimate analysis of different coal species

煤尘种类	各组分质量分数/%				各元素质量分数/%				
	挥发分	水分	灰分	固定碳	C	H	O	N	S
焦煤	34.04	1.55	11.75	52.66	66.97	4.12	14.04	1.29	0.29
长焰煤	32.22	9.32	9.74	48.72	65.81	4.79	8.93	0.92	0.49
褐煤	26.50	5.14	6.78	61.59	71.73	4.00	10.39	0.73	1.24

实验采用的煤尘粒径均为  $0\sim 75\ \mu\text{m}$ 。实验前, 煤尘均在  $45\ ^\circ\text{C}$  烘箱内存存 24 h, 以保持良好的分散性。借助马尔文激光粒度仪测量粒径分布与特性, 并利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对煤尘样本进行扫描, 结果如图 2 和表 2 所示。其中:  $D_{[4,3]}$  为粉尘粒子的体积平均直径,  $D_{[3,2]}$  为粉尘粒子的索特直径,  $S$  为粉尘粒子的比表面积,  $d_{(0.1)}$ 、 $d_{(0.5)}$  和  $d_{(0.9)}$  为粉尘粒子达到的百分比粒度。可以看出, 煤尘样本的粒径特性均满足实验需求, 煤尘颗粒表面粗糙, 形状不规则。

在空气环境, 升温速率为  $10\ \text{K/min}$  条件下, 基于热重分析法(thermogravimetric analysis, TGA)和差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)测试煤尘样本的热解特性, 如图 3 所示, 其中  $\omega$  曲线表示被测物质的质量分数变化情况。由图 3 可以看出, 煤尘颗粒在受热过程中经历了 3 个阶段: (1) 部分化学键断裂释放小分子物质; (2) 官能团分解, 化学键断裂, 产生气体、焦油和焦炭; (3) 释放  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$  等气体。对于所有的煤尘样品, 质量损失开始于  $300\ ^\circ\text{C}$ , 结束于  $500\sim 600\ ^\circ\text{C}$ , 在上述温度范围内, 煤尘颗粒质量快速下降, 这是由于分子间官能团分解, 分子键断裂, 煤尘颗粒释放大量气体分子, 焦煤在热解结束后遗留的焦炭物质较多。DSC 曲线结果显示, 煤尘颗粒在热解过程中吸收较多热量。

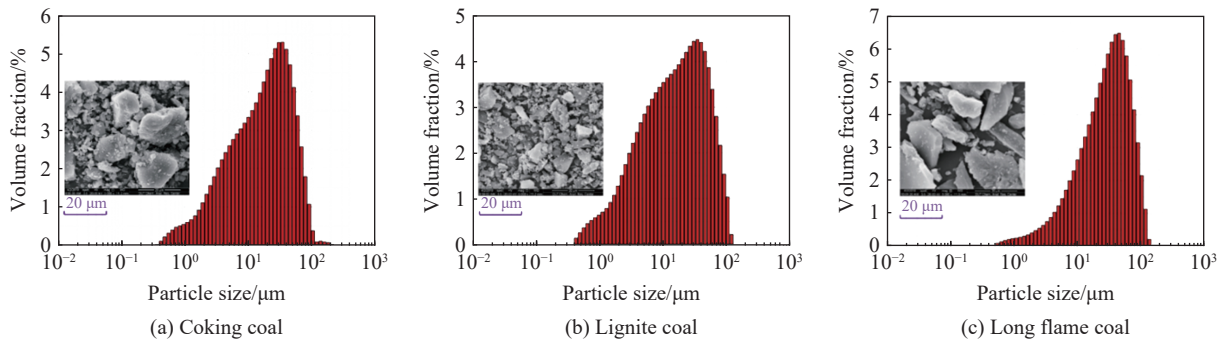


图 2 粒径分布与扫描电子显微镜图像  
Fig. 2 Particle size distributions and SEM images

表 2 煤尘粒径特性

Table 2 Characteristic parameters of the coal samples

煤尘种类	粒径/ $\mu\text{m}$	$D_{[4.3]}$ / $\mu\text{m}$	$D_{[3.2]}$ / $\mu\text{m}$	$S/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	$d_{(0.1)}$ / $\mu\text{m}$	$d_{(0.5)}$ / $\mu\text{m}$	$d_{(0.9)}$ / $\mu\text{m}$
焦煤	0~75	22.745	6.138	0.978	2.604	16.665	51.655
褐煤	0~75	22.482	5.567	1.080	2.318	14.652	54.871
长焰煤	0~75	33.946	11.899	0.504	6.016	28.208	70.885

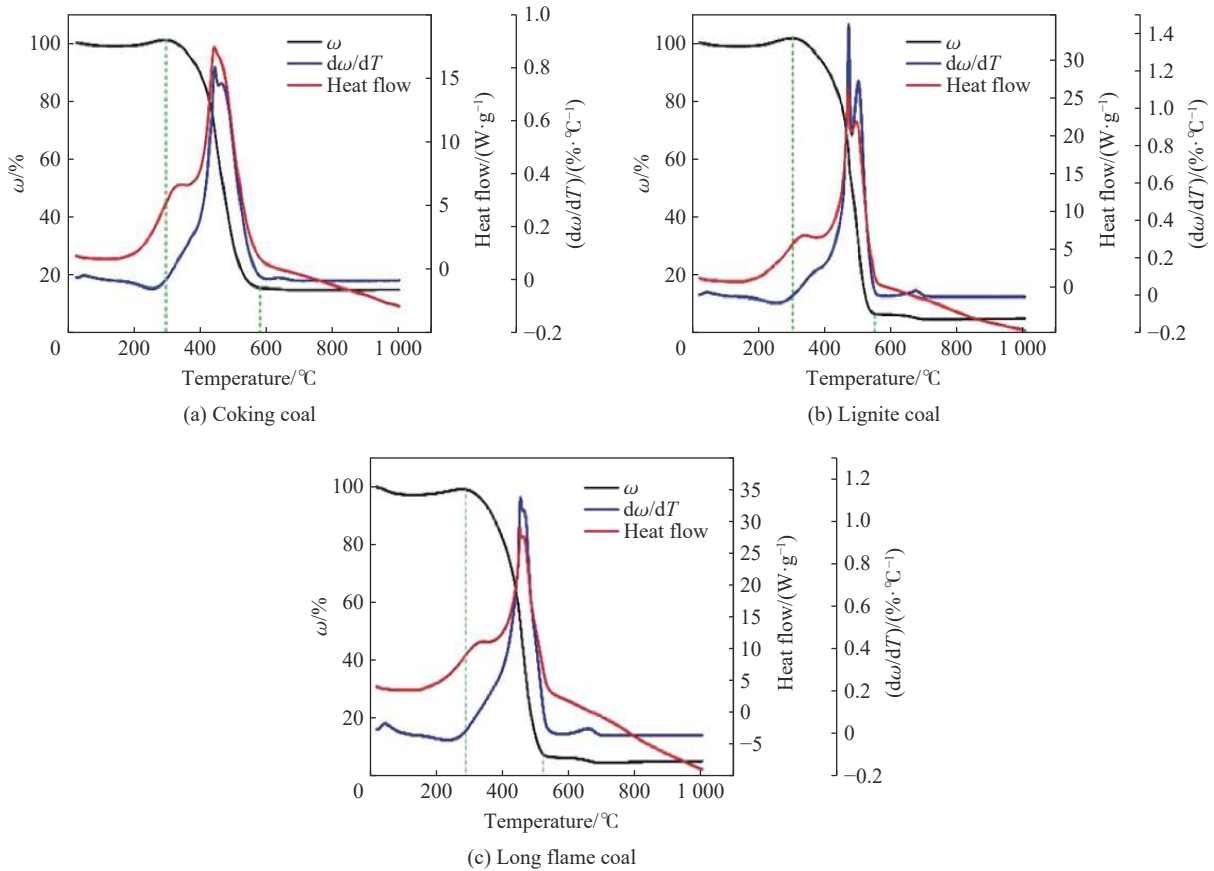


图 3 煤尘热解特性

Fig. 3 Pyrolysis characteristics of the coal samples



## 2 结果与讨论

### 2.1 煤尘种类对火焰传播行为的影响

不同煤种组分存在明显差异,使得混合爆炸火焰特性各不相同。图 4 对比了相同煤尘质量浓度 ( $200 \text{ g/m}^3$ ) 和甲烷体积分数 ( $\varphi=4.1\%$ ) 条件下,不同煤种火焰的传播图像。由图 4 可以看出,点火后,火焰由初始燃烧核向外传播,在接触壁面后,火焰呈长条状向上方管口快速发展。由于煤尘质量浓度受湍流扰动而分布不均,使得火焰前锋形状不规则。较大直径或团聚颗粒以及产生的焦炭燃烧反应周期较长,在火焰前锋后可继续反应,由于其在不均匀分布,导致呈现明暗火焰交错分布的特点。

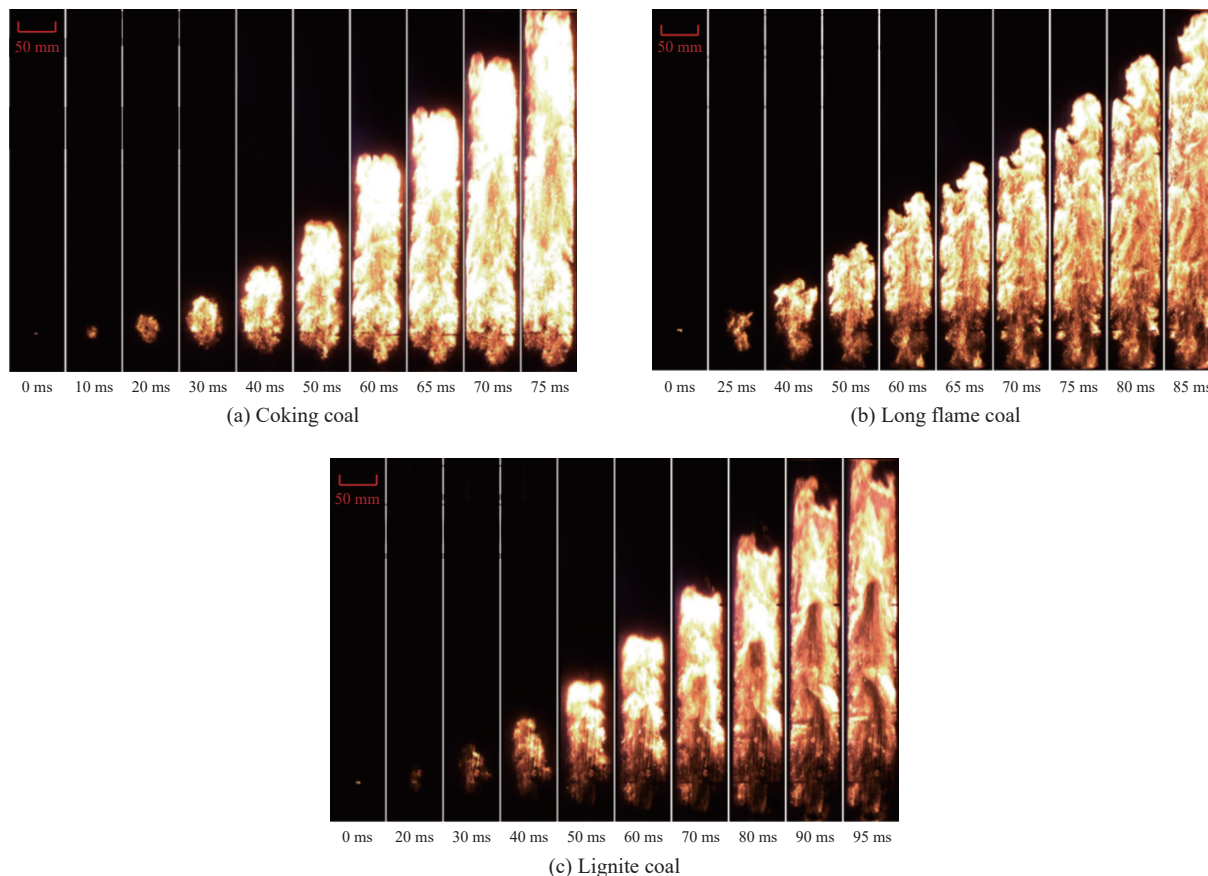


图 4 甲烷体积分数为 4.1% 时 3 种煤样复合火焰传播图像

Fig. 4 Flame propagation images of the hybrid flame of three coal species at 4.1% methane volume fraction

总体来看,焦煤产生的火焰最明亮,其次为长焰煤和褐煤。此外,焦煤火焰传播至顶部管口所需时间最短,为 75 ms,而长焰煤和褐煤所需时间分别为 85 和 95 ms。上述现象主要是由于焦煤的挥发分含量相对较高,在热解过程中焦煤颗粒可释放更多的可燃气,促进了燃烧反应的进行。同时,由于水分挥发会吸收大量燃烧产生的热量,而焦煤的水分含量较少,因而有助于增强燃烧反应。长焰煤中挥发分含量与焦煤相差较小,但水分含量显著高于焦煤,使得长焰煤火焰较暗淡。褐煤挥发分含量最低,尽管水分含量低于长焰煤,但褐煤燃烧反应明显弱于长焰煤,说明挥发分含量是影响煤尘燃烧特性的主导因素。

图 5 为 3 种煤样复合爆炸火焰的传播速度和火焰温度。可以看出,焦煤火焰传播速度最快,其次为长焰煤,最后为褐煤。在初始传播阶段,3 种煤样的速度曲线几乎重叠,这是由于在起始阶段,火焰温度较低,煤尘颗粒热解速率较低。约 30 ms 后,不同煤样的火焰速度曲线逐渐分离,且均出现了速度振荡。这是由于一方面挥发分的释放增强了燃烧反应,提高了反应速率;另一方面,煤尘颗粒热解过程吸收大量热量,使得反应速率降低。两种作用的相互竞争使得火焰传播速度出现振荡特性。点火后不久,火焰温度迅速上升,而后缓慢振荡下降。焦煤火焰温度峰值最高 ( $1409 \text{ }^\circ\text{C}$ ),其次为长焰煤 ( $1160 \text{ }^\circ\text{C}$ ),最低为

褐煤(985 °C)。由于气体分子燃烧时间尺度显著低于煤尘颗粒热解时间尺度, 因此急速升温过程主要是由于可燃气体的燃烧。由于挥发分含量较高而水分含量较低, 焦煤燃烧反应剧烈, 最高火焰温度较大。

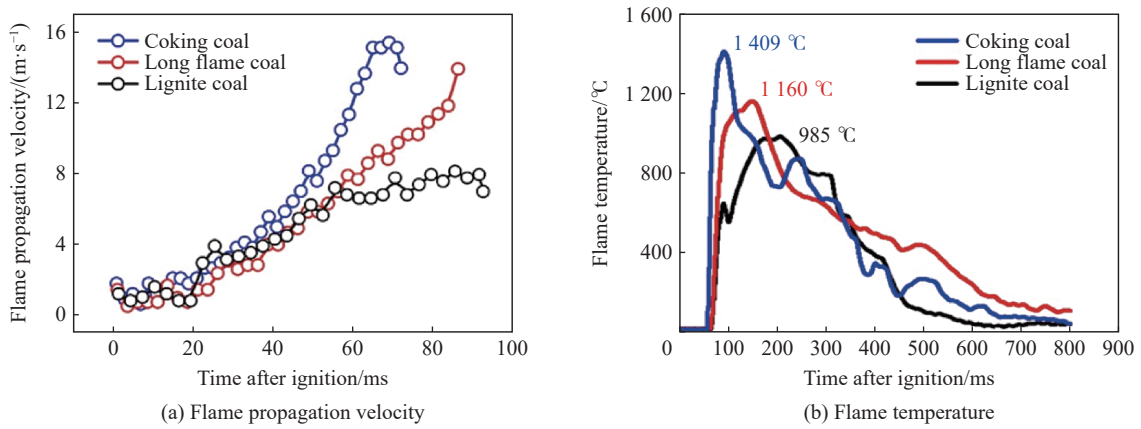


图 5 甲烷体积分数为 4.1% 时 3 种煤样复合火焰传播速度和火焰温度

Fig. 5 Flame propagation velocity and flame temperature of three coal species at 4.1% methane volume fraction

## 2.2 甲烷体积分数对火焰传播行为的影响

图 6 对比了 3 种体积分数的甲烷的复合火焰传播图像, 可以看出, 随着甲烷体积分数的增加, 复合爆炸火焰发光强度逐渐增强, 传播至上方出口所用时间逐渐降低, 说明燃烧反应程度逐渐增强, 甲烷气体的参与使得爆炸强度显著增强。

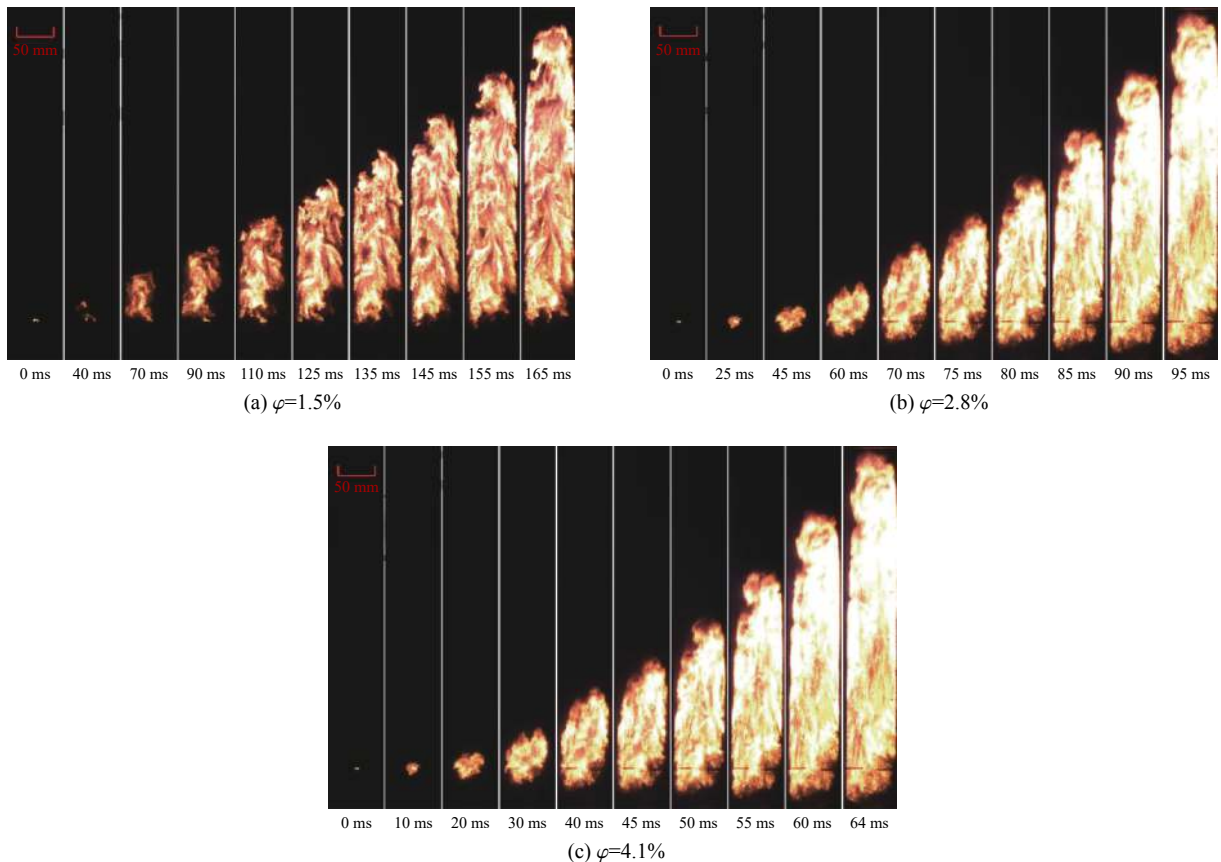


图 6 三种不同甲烷体积分数的复合火焰传播图像

Fig. 6 Flame propagation images of the hybrid flame at different methane volume fractions

图 7 为含不同体积分数甲烷的复合火焰传播速度和火焰温度。甲烷体积分数较高时, 燃烧反应强度较高, 热解速率较快, 使得甲烷体积分数为 4.1% 时的火焰传播速度显著高于甲烷体积分数为 1.5% 和 2.8% 时的火焰传播速度。随着甲烷体积分数的升高, 燃烧反应强度和热解速率增加, 最大火焰温度显著升高。当甲烷体积分数为 1.5% 时, 最大火焰温度为 1 081 °C; 甲烷体积分数为 2.8% 时, 最大火焰温度为 1 156 °C; 甲烷体积分数为 4.1% 时, 最大火焰温度为 1 198 °C。当火焰温度达到峰值开始下降, 甲烷体积分数较高时, 火焰温度较低。这是由于甲烷体积分数较高时, 燃烧反应较充分, 火焰前锋后方的火焰区域内继续进行反应的煤尘颗粒较少。

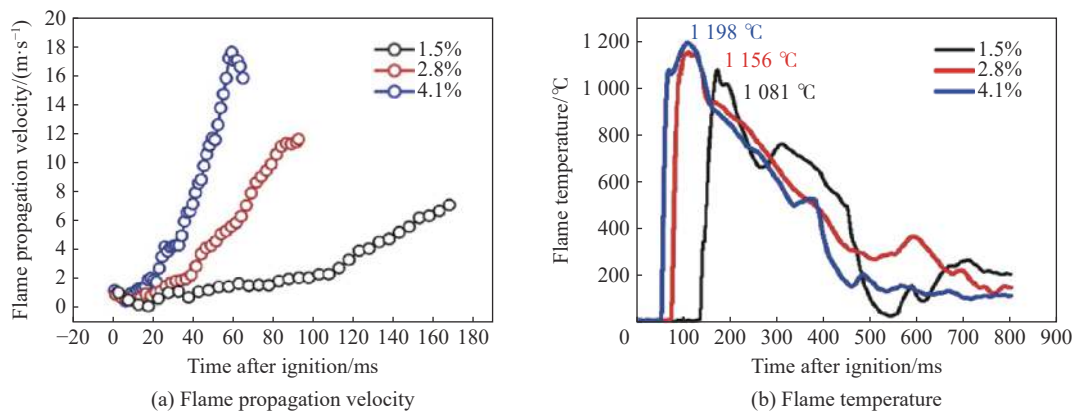


图 7 三种不同体积分数甲烷的复合火焰传播速度和火焰温度

Fig. 7 Flame propagation velocity and flame temperature at different methane volume fractions

### 3 甲烷/煤尘混合爆炸火焰传播机理

甲烷/煤尘混合爆炸火焰的传播主要依赖于火焰前锋与未燃区的热量和物质交换。根据煤尘颗粒运动特性和燃烧机制, 甲烷/煤尘混合火焰可分为 5 部分: 未燃区、预热区、气相燃烧区、多相燃烧区和焦炭燃烧区, 如图 8 所示。混合爆炸火焰传播过程中, 单个煤尘颗粒主要受重力、黏性阻力和热泳力影响。其中, 黏性阻力由颗粒与环境气体的速度差产生, 热泳力由流场中的温度梯度产生。在距离火焰前锋较远的未燃区内, 流动阻力与温度梯度的影响较低, 颗粒因重力影响向下运动。当颗粒靠近火焰前锋到达预热区, 向上流动的气流速度逐渐增大, 温度梯度逐渐升高, 黏性阻力和热泳力逐渐增大, 颗粒向下的运动加速度逐渐降低。因此, 大直径颗粒或团聚颗粒因具有较大的质量, 在预热区内分布于下方。由于预热区内的热辐射和热对流作用, 煤尘颗粒温度迅速上升至热解温度(约 300 °C)。相较于大直径颗粒或团聚颗粒, 小直径颗粒拥有较高的比表面积和较低的表面热容量, 热解速率较快。大量的可燃气体的裂解和分子键的断裂而被释放, 可燃气体的体积分数逐渐升高, 当温度达到燃点时, 燃烧反应发生, 形成气相燃烧区。大直径颗粒或团聚颗粒由于热解速率较慢, 在经过火焰前锋后, 可继续热解, 释放挥发分进行燃烧反应, 形成多相燃烧区, 为火焰前锋后的亮黄色区域。煤尘颗粒热解后形成的大量焦炭物质发生燃烧反应, 形成焦炭燃烧区。在火焰传播过程中, 燃烧介质受湍流扰动影响, 空间分布不均, 使得不同燃烧区交错分布。

当煤尘挥发分含量较高时, 煤尘颗粒在预热区热解释放的挥发分较多, 使得环境中甲烷总体积分数较高, 燃烧模式由颗粒表面的扩散燃烧转为气相预混燃烧, 有助于燃烧反应的进行, 促进火焰前锋的快速传播。煤尘含水量较高时, 水分蒸发消耗较多热量, 不利于燃烧反应的进行。当混合体系中煤尘含量较高, 甲烷体积分数较低时, 混合爆炸机制为粉尘驱动型爆炸<sup>[20]</sup>, 随着甲烷初始体积分数逐渐升高, 煤尘颗粒在预热区内释放较少挥发分即可将周围环境中的甲烷体积分数提高至可燃范围内, 煤尘颗粒的燃烧可由释放挥发分的扩散燃烧转变为气相预混燃烧, 混合爆炸机制为气体驱动型爆炸, 有助于燃烧反应的快速发生, 火焰传播速度显著升高。



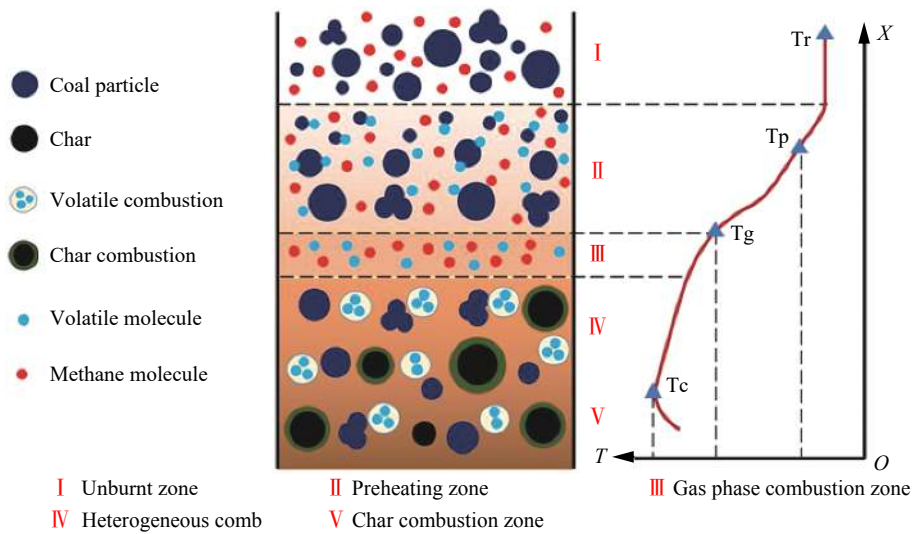


图 8 甲烷/煤尘复合爆炸火焰传播机理

Fig. 8 Methane/coal hybrid flame propagation mechanisms

## 4 结 论

基于气粉两相混合爆炸实验系统,对甲烷/煤尘混合爆炸火焰传播行为进行了实验研究,分析了煤尘种类和甲烷体积分数对混合爆炸火焰传播行为的影响,揭示了混合爆炸火焰传播机理,得出以下结论。

挥发分是煤尘燃烧特性的主导因素。随着挥发分含量的升高,燃烧模式逐渐由扩散燃烧转为气相预混燃烧,燃烧反应增强,火焰传播速度增大,火焰温度升高。挥发分含量差异较小时,水分含量越低,燃烧反应越剧烈。在相同条件下,焦煤的燃烧反应强度最高,其次为长焰煤,最后为褐煤。随着甲烷体积分数的升高,煤尘颗粒的燃烧由挥发分的扩散燃烧转为气相预混燃烧,燃烧反应增强,火焰传播速度及火焰温度均显著升高。

热辐射与热对流作用促进煤尘颗粒热解,释放挥发分进行燃烧反应,维持复合火焰的持续传播。随着混合体系中甲烷体积分数的升高,混合爆炸机制由粉尘驱动型爆炸转为气体驱动型爆炸,燃烧反应增强。根据燃烧模式的不同,甲烷/煤尘复合爆炸火焰可由未燃区、预热区、气相燃烧区、多相燃烧区和焦炭燃烧区 5 部分组成。气相燃烧区主要由热解释放的挥发分以及初始甲烷燃烧形成。大直径颗粒和团聚颗粒在火焰前锋后方继续热解燃烧形成了多相燃烧区。煤尘颗粒热解后形成的焦炭物质继续燃烧,形成了焦炭燃烧区。由于火焰传播过程中湍流扰动,燃烧物质空间分布不均,导致火焰呈现不同燃烧区交错分布的特点。

## 参考文献:

- [1] YAN X Q, YU J L. Dust explosion incidents in China [J]. *Process Safety Progress*, 2012, 31(2): 187–189. DOI: 10.1002/prs.11482.
- [2] ZHENG Y P, FENG C G, JING G X, et al. A statistical analysis of coal mine accidents caused by coal dust explosions in China [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(4): 528–532. DOI: 10.1016/j.jlp.2009.02.010.
- [3] MEDINA C H, MACCOITIR B, SATTAR H, et al. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m<sup>3</sup> dust explosion equipment [J]. *Fuel*, 2015, 151: 91–101. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.009.
- [4] SERAFIN J, BEBČAK A, BERNATIK A, et al. The influence of air flow on maximum explosion characteristics of dust-air mixtures [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(1): 209–214. DOI: 10.1016/j.jlp.2012.11.002.
- [5] MITTAL M. Limiting oxygen concentration for coal dusts for explosion hazard analysis and safety [J]. *Journal of Loss*

- [Prevention in the Process Industries](#), 2013, 26(6): 1106–1112. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.04.012.
- [6] LI Q Z, WANG K, ZHENG Y N, et al. Experimental research of particle size and size dispersity on the explosibility characteristics of coal dust [J]. [Powder Technology](#), 2016, 292: 290–297. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.01.035.
- [7] TURKEVICH L A, DASTIDAR A G, HACHMEISTER Z, et al. Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: explosion parameters of selected materials [J]. [Journal of Hazardous Materials](#), 2015, 295: 97–103. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.03.069.
- [8] CAO W G, QIN Q F, CAO W, et al. Experimental and numerical studies on the explosion severities of coal dust/air mixtures in a 20-L spherical vessel [J]. [Powder Technology](#), 2017, 310: 17–23. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.01.019.
- [9] AJRASH M J, ZANGANEH J, MOGHTADERI B. The effects of coal dust concentrations and particle sizes on the minimum auto-ignition temperature of a coal dust cloud [J]. [Fire and Materials](#), 2017: e2437. DOI: 10.1002/fam.2437.
- [10] MISHRA D P, AZAM S. Experimental investigation on effects of particle size, dust concentration and dust-dispersion-air pressure on minimum ignition temperature and combustion process of coal dust clouds in a G-G furnace [J]. [Fuel](#), 2018, 227: 424–433. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.04.122.
- [11] BAYLESS D J, SCHROEDER A R, JOHNSON D C, et al. The effects of natural gas cofiring on the ignition delay of pulverized coal and coke particles [J]. [Combustion Science and Technology](#), 1994, 98: 185–198. DOI: 10.1080/00102209408935404.
- [12] GAO W, DOBASHI R, MOGI T, et al. Effects of particle characteristics on flame propagation behavior during organic dust explosions in a half-closed chamber [J]. [Journal of Loss Prevention in the Process Industries](#), 2012, 25(6): 993–999. DOI: 10.1016/j.jlp.2012.05.015.
- [13] JU W J, DOBASHI R, HIRANO T. Reaction zone structures and propagation mechanisms of flames in stearic acid particle clouds [J]. [Journal of Loss Prevention in the Process Industries](#), 1998, 11(6): 423–430. DOI: 10.1016/S0950-4230(98)00027-8.
- [14] LI Q Z, LIN B Q, WANG K, et al. Surface properties of pulverized coal and its effects on coal mine methane adsorption behaviors under ambient conditions [J]. [Powder Technology](#), 2015, 270: 278–286. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.10.020.
- [15] AJRASH M J, ZANGANEH J, MOGHTADERI B. Methane-coal dust hybrid fuel explosion properties in a large scale cylindrical explosion chamber [J]. [Journal of Loss Prevention in the Process Industries](#), 2016, 40: 317–328. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.009.
- [16] 冯永安. 基于 20 L 球形爆炸装置的甲烷对煤尘爆炸影响实验研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.  
FENG Y A. Experimental study of methane effects on coal dust explosion in 20 L spherical hermetic device [D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [17] DUFAUD O, PERRIN L, TRAORE M, et al. Explosions of vapour/dust hybrid mixtures: a particular class [J]. [Powder Technology](#), 2009, 190: 269–273. DOI: 10.1016/j.powtec.2008.04.046.
- [18] 平洋. 煤粉瓦斯耦合体系着火机理和实验研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.  
PING Y. Ignition mechanism and experimental research on coal & gas coupling system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [19] ZHOU Y H, BI M S, QI F. Experimental research into effects of obstacle on methane-coal dust hybrid explosion [J]. [Journal of Loss Prevention in the Process Industries](#), 2012, 25(1): 127–130. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.07.003.
- [20] CLONEY C T, RIPLEY R C, PEGG M J, et al. Evaluating regime diagrams for closed volume hybrid explosions [J]. [Journal of Loss Prevention in the Process Industries](#), 2017, 49: 912–918. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.03.004.

(责任编辑 曾月蓉)