2023年 3月

煤尘云对瓦斯爆炸6种中间产物相对辐射强度的影响

王秋红1,潘 婷1,罗振敏1,代爱萍2,蒋夏夏1

(1.西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054;2.西安科技大学 化学与化工学院,陕西 西安 710054)

摘 要:煤矿井下瓦斯煤尘共存爆炸是典型的气固两相化学反应。为了突出了解含煤尘瓦斯爆炸 过程中反应中间产物的发展规律,采用瞬态火焰传播实验系统从微观火焰光谱探测角度进行含煤 尘瓦斯爆炸现象研究,揭示煤尘云加入后对瓦斯爆炸中间产物光谱特性的影响。体积分数为7%、 8%、9%、10%、11%瓦斯分别与130g/m³煤尘质量浓度的长焰煤、焦煤、无烟煤煤尘云形成混合体 系,分析混合体系爆炸过程中关键中间产物的相对辐射强度。实验结果表明,130g/m³煤尘质量浓 度的长焰煤/焦煤/无烟煤煤尘云与不同体积分数瓦斯形成的混合体系爆炸,与瓦斯中间产物辐射 强度峰值相比,中间产物辐射强度增强,下部光纤峰值增强幅值比上部光纤的峰值增幅幅度大,6 种反应中间产物相对辐射强度峰值由大到小排序为 C₂·>O·>CH₂O>CH·>O₂>CHO·。煤种变 质程度对中间产物相对辐射强度峰值的影响幅度从大到小排序为:长焰煤>焦煤>无烟煤煤尘云。煤 尘云参与瓦斯爆炸,增强了瓦斯爆炸体系6种中间产物的相对辐射强度,煤尘云对低浓度瓦斯爆炸 中间产物相对辐射强度峰值影响幅度从大到小排序为:长焰煤>焦煤>无烟煤煤尘云。煤 全参与瓦斯爆炸,增强了瓦斯爆炸体系6种中间产物的相对辐射强度,煤尘云对低浓度瓦斯爆炸 中间产物相对辐射强度峰值的影响比高浓度瓦斯强烈,不同变质程度煤尘云对 CH₂O、O·、C₂·的 累积速率影响作用大于 CHO·、O₂。可以在后期研发针对瓦斯爆炸的新型抑爆剂时,综合考虑将 CH₂O、O·、C₂·三种反应中间产物作为靶向抑制目标之一,提升新型抑爆剂的抑爆效率。 关键词:爆炸压力;爆炸温度;自由基;发射光谱;相对辐射强度

中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2023)03-1280-10

Influence of coal dust cloud on relative radiation intensity of six intermediates in gas explosion

WANG Qiuhong¹, PAN Ting¹, LUO Zhenmin¹, DAI Aiping², JIANG Xiaxia¹

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi' an University of Science and Technology, Xi' an 710054, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi' an University of Science and Technology, Xi' an 710054, China)

Abstract: The gas and coal dust hybrid explosion in coal mines is a typical gas-solid two-phase chemical reaction. To highlight the development law of reaction intermediates in the process of explosion of gas containing coal dust, using the transient flame propagation experimental system, the phenomenon of explosion of gas containing coal dust was studied from the perspective of microscopic flame spectrum detection, and the influence of coal dust cloud addition on the spectral characteristics of gas explosion intermediates was revealed. Spectrometer was used to capture the emission spectral signal radiation intensity of the key intermediates generated in the mixed system explosion of 7%, 8%, 9%, 10%, 11% gas concentration and long-flame coal, charred coal, anthracite coal dust cloud at the concentration of 130 g/m³ coal dust. The results show that in the mixed system formed by the same concentration 130 g/m^3 of long-

作者简介: 王秋红(1984—), 女, 陕西西安人, 教授, 博士。 E-mail: wangqiuhong1025@126.com

引用格式:王秋红,潘婷,罗振敏,等.煤尘云对瓦斯爆炸 6 种中间产物相对辐射强度的影响[J].煤炭学报,2023, 48(3):1280-1289.



移动阅读

WANG Qiuhong, PAN Ting, LUO Zhenmin, et al. Influence of coal dust cloud on relative radiation intensity of six intermediates in gas explosion [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3):1280–1289.

收稿日期:2022-01-29 修回日期:2022-04-02 责任编辑:王晓珍 DOI:10.13225/j.enki.jccs.2022.0152 基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174208,51504190);陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2021JQ-565)

王秋红等:煤尘云对瓦斯爆炸6种中间产物相对辐射强度的影响

flame coal/charred coal/anthracite coal dust cloud and different concentrations of gas explodes, compared with the radiation intensity peak of intermediates of pure gas, the radiation intensity is enhanced, and the enhancement amplitude of the lower fiber peak is larger than that of the upper fiber peak, the relative radiation intensity peaks of the six reaction intermediates are in the order of $C_2 \cdot > O \cdot > CH_2O>CH \cdot >O_2>CHO \cdot$. The influence of the degree of coal metamorphism on the peak relative radiation intensity of intermediate products is ranked from large to small: longflame coal > charred coal > anthracite coal dust cloud. The coal dust cloud participates in the gas explosion, which enhances the concentration of the six intermediates in the gas explosion system. The coal dust cloud has a stronger influence on the relative radiation intensity peak of the low-concentration gas explosion intermediates than the high-concentration gas. The cumulative rates of $CH_2O, O \cdot$, and $C_2 \cdot$ are more affected by coal dust clouds with different metamorphic degrees than CHO \cdot , and O_2 . When researching and developing new detonation suppressors for gas explosions in the later stage, the three reaction intermediates of $CH_2O/O \cdot / C_2 \cdot$ can be comprehensively considered as one of the targeted inhibition targets, to improve the detonation suppression efficiency of new detonation inhibitor.

Key words: explosion pressure; explosion temperature; free radicals; emission spectrum; relative radiation intensity

煤炭作为我国非常重要的战略物资,在国民经济 中占有举足轻重的地位。在煤炭资源开采过程中,除 了有气态瓦斯爆炸,因巷道底部沉积煤尘受到初始瓦 斯爆炸,会造成巨大的经济损失和人员伤亡,2者简 称为瓦斯爆炸,在事故调查中会深入调查是否有煤尘 参与爆炸。针对瓦斯爆炸开展主动式抑爆技术研究 是瓦斯爆炸防控的主要攻关方向之一,瓦斯爆炸化学 反应体系中针对基于关键自由基的抑爆材料研发是 主动式抑爆技术跨越发展的重要基础,对现代煤矿瓦 斯爆炸事故防控有着重要意义。

近年来国内外学者对瓦斯爆炸、含煤尘瓦斯爆炸 现象开展了大量的实验研究,如点火能量[1]、煤尘粒 径^[2-3]、煤尘含水率^[4]等因素对共存爆炸中压力^[5]、 火焰温度[6]、预混湍流火焰[7]、火焰结构[8]和火焰传 播距离^[9-11]等影响。同时,也有部分学者结合现代测 量技术开展了对瓦斯(甲烷)火焰的光谱研究。其 中,HIGGINS 等^[12]研究了甲烷层流预混火焰中随当 量比递减和压力增大时 CH · 光谱强度单调递 减。LIU 等^[13]利用积分球均匀光源获取了甲烷层流 扩散火焰中 OH · 和 CH · 辐射的空间分布图像。HE 等^[14]表明甲烷-氧层流扩散火焰中有2个OH·分配 区域并且 OH · 可作为贫氧火焰的热释放速率标志, 不适用富氧火焰。GAYDON^[15]给出了不同自由基/ 分子发射光谱的特征波长及谱带,为通过火焰光研究 自由基变化提供了理论基础。WANG 等^[16]揭示了瓦 斯爆炸过程中7种中间产物光谱特性与爆炸最大压 力、温度峰值等参数的关系;刘奎等[17]研究发现甲烷 爆炸火焰光谱在 550~900 nm 内密集程度较强;罗振 敏等^[18-20]研究 C₂H₄/C₂H₆/CO/H₂等多元混合气体 对甲烷爆炸自由基发射光谱的影响;李孝斌等^[21-22]分析了瓦斯爆炸感应期内多种自由基及分子发射光 谱的出现频率及相对强弱。陈晓坤等^[23]对比分析了 瓦斯爆炸传播火焰中 C₂ ·、CH ·、CHO ·关键自由 基的信号时间。

从文献调研发现,在利用光谱技术开展了甲烷燃 烧火焰光谱特征测量研究较多,而从微观光谱探测角 度对瓦斯与空气预混可燃气瞬态爆炸火焰光谱特性 研究较少,对瓦斯煤尘共存爆炸的研究也非常有限。 笔者利用瞬态火焰传播实验系统对比测量瓦斯爆炸、 含煤尘瓦斯爆炸过程中的中间产物相对辐射强度变 化规律,从微观揭示煤尘云对瓦斯爆炸中间产物光谱 特性的影响,对于煤矿井下主动抑爆系统中新型抑爆 剂研发的推进具有重要的基础研究价值。

1 实 验

1.1 实验材料与测试

采集3种不同变质程度的煤样,采集来源见表1。

表 1 采集煤样种类和地点 Table 1 Types and locations of coal samples

煤样种类	煤样采集地点
崔木长焰煤	陕西省宝鸡市麟游县东岭集团崔木煤矿
丁集焦煤	安徽省淮南市丁集煤矿
白胶无烟煤	四川省宜宾市珙县川煤集团芙蓉公司白皎煤矿

采用球磨机研磨煤样,取 200 目(75 µm)筛网筛 下的煤粉在 50 ℃ 真空干燥箱中干燥 12 h。采用 5E-MAG6700 型全自动工业分析仪对煤粉进行工业 分析和元素分析,见表 2。

1282	煤	炭	学	报	2023 年
1202	^木	庆	4	4K.	2023 4

表 2 深初上亚方列和几条方列 Table 2 Proximate analysis and ultimate analysis of coal power %											
$M_{\rm ad}$	$A_{\rm ad}$	$V_{\rm ad}$	FC _{ad}	C _{ad}	H_{ad}	N _{ad}					
崔木长焰煤	低	13.67	29.14	33.75	23.44	42.50	3.08	0.58			
丁集焦煤	中	5.58	10.89	11.53	72.00	70.02	4.06	0.60			
白皎无烟煤	声同	2.04	6.70	6.84	84.42	75.70	3.65	1.01			

分析表2知,随煤种变质程度由低到高,崔木长焰 煤、丁集焦煤、白胶无烟煤的水分、灰分和挥发分呈递减 趋势,固定碳含量和碳、氢、氮元素质量分数呈递增趋势。

1.2 实验系统与实验步骤

瞬态火焰传播实验系统由爆炸管道、配气系统、 高压点火系统、火焰图像采集系统、压力测量系统、温 度测量系统、光学测量系统和同步控制系统、数据采 集系统等组成,如图1所示。其中,爆炸管道尺寸为 80 mm(长)×80 mm(宽)×600 mm(高),管壁两侧为 石英玻璃。点火电极、压力传感器测点、泄爆口圆心 分别距管道底部 50、540 和 550 mm;2 个直径 25 μm 的 R 型微细热电偶分别距离管道底部 250 mm 和 400 mm,与热电偶同一水平面上的管道玻璃外侧安 装有光纤(SMA905 型深紫外石英光纤,光纤探头直 径 1 000 μm,波长测量范围 200~1 100 nm),光纤顶 端距管道玻璃视窗的距离为 1 mm。

第48卷







实验步骤:将制备好的煤样平整均匀地摊铺在管 道底部的托粉皿上,对爆炸管道进行抽真空,使管道 内压力降为-0.09 MPa,在配气罐中配置好瓦斯-空 气混合气体,保证在暗室条件下,按下触发开关,同步 控制器发送信号开启电磁阀,预混气体将煤粉喷入爆 炸管道中,同步控制器触发高压点火器、数据采集仪、 示波器和高速摄像仪,实验仪器自动记录实验数据; 实验结束后将残留的瓦斯气体排出室外,待排气结 束,清理管道内残留煤渣,拆卸泄爆孔更换新的泄爆 膜,重复以上步骤;相同实验重复5次,以减少实验带 来的误差。 本实验仪器参数设定如下,电极放电电压: 30 kV,点火延迟时间:200 ms;高速摄像仪拍摄速度: 2 000 帧/s,分辨率:1 280×800,曝光时间:30 µs;数 据采集仪采集时间为1 s,10 µs 采集1 个数据点;示 波器每秒采集 100 万个点,时间量程为0~1.2 s。实 验室内温度:25~27 ℃。

2 实验结果与分析

实验中瓦斯体积分数测试范围为:7%~11%,煤 尘质量浓度为130 g/m³。根据 GAYDON^[15]的论著, 选择公认权威的发射光谱波长,实验中检测 6 种爆炸

反应过程中间产物的波长分别为: λ (CHO·)= 318.6 nm, λ (O₂)=323.2 nm, λ (CH·)=431.42 nm, λ (CH₂O)=466 nm, λ (O·)=470.5 nm, λ (C₂·)= 516.52 nm_o

- 2.1 含煤尘瓦斯混合体系爆炸中间产物光谱信号强度与爆炸参数耦合关系
- 2.1.1 爆炸中间产物相对辐射强度随时间变化规律 长焰煤煤尘云与体积分数 9%的瓦斯混合体系



爆炸中间产物 CH·在下部光纤和上部光纤2 处光纤 光谱信号随时间变化曲线和火焰传播,如图 2 所示。 可以看到在下部光纤 CH·光谱信号曲线达到第1 个 波峰的时间正是火焰锋面经过下部光纤时,上部光纤 CH·光谱信号曲线达到第1 个波峰的时间也是火焰 锋面经过上部光纤时,故下文分析的中间产物相对辐 射强度峰值均取值为光谱信号曲线上的第1 个波峰 峰值。





Fig.2 Curves of spectral signal of CH $\cdot\,$ and time-series diagram of flame propagation

以质量浓度 130 g/m³长焰煤与体积分数 9% 瓦 斯混合体系爆炸为例,对比上、下 2 个光纤测点处 6 种中间产物相对辐射强度随时间变化曲线,如图 3 所示。

分析图 3(a)、(b)得到,9%瓦斯爆炸,在上部光 纤测点得到 CHO・、O2相对辐射强度峰值为 60、 62 V,在下部光纤测点得到 CHO ·、O,相对辐射强度 峰值 27、33 V;当 130 g/m3长焰煤煤尘云加入到 9% 瓦斯体系后,上部光纤 CHO · 、O,相对辐射强度峰值 为 64、70 V,下部光纤 CHO ·、O2为 61、58 V。由此可 知添加了长焰煤煤尘云后,上部光纤测点处 CHO・、 O,的相对辐射强度峰值增强了 6.7%、12.9%,下部光 纤测点处 CHO ·、O2的相对辐射强度峰值增强了 125.9%、75.76%。同理分析图 3(c)~(e)知,加入长 焰煤煤尘云后,上部光纤处 CH ·、CH,O、O ·、C,· 相对辐射强度峰值增幅分别为100%、320%、219%、 340%,下部光纤处 CH・、CH₂O、O・、C₂・相对辐射 强度峰值增幅分别为 106.9%、1 400%、1 025%、 6416%。以上可以说明:① 煤尘云参与瓦斯爆炸,增 强了瓦斯爆炸体系6种中间产物的相对辐射强度。 煤尘云在燃烧过程中发生脱挥发分反应,生成的碳氢 化合物参与到整个体系中,造成中间产物辐射强度增

强。② 加入煤尘云后,下部比上部光纤的峰值增幅 幅度大,考虑原因是在点爆前有煤尘沉降现象,导致下 部光纤比上部光纤附近的悬浮煤尘云体积分数不同。

2.1.2 爆炸中间产物相对辐射强度与压力峰值/温 度峰值耦合关系

分析上部光纤测到的 3 种煤尘云与瓦斯混合体 系爆炸过程中,6 种中间产物相对辐射强度峰值 (*I*_{max})与爆炸压力峰值(*P*_{max})、火焰温度峰值(*T*_{max}) 的耦合关系,如图 4 所示。

分析图 4(a)可知:① 对 130 g/m³长焰煤煤尘云 与不同体积分数瓦斯混合体系爆炸,随着瓦斯体积分 数的增大,整体趋势上 6 种中间产物的 *I*_{max}呈先减小 后增大趋势,对应的 *P*_{max}和 *T*_{max}均呈先增大后减小趋 势,且质量浓度 130 g/m³长焰煤煤尘云与体积分数 9%瓦斯混合体系爆炸的 *I*_{max}、*P*_{max}和 *T*_{max}最大。② 6 种中间产物的 *I*_{max}由大到小排序为 C₂·>O·>CH₂O> CH·>O₂>CHO·,前 4 种中间产物 *I*_{max}相差幅度较 小,变化范围为 75~97 V,但整体小于后 2 种中间产 物,说明 C₂·、O·、CH₂O、CH·在爆炸过程中的相 对辐射强度峰值高于 O₂与CHO·。③ 瓦斯体积分 数为 9%,对应的 6 种中间产物的相对辐射强度峰值 加和后的平均值为 86.5 V。







从图 4(b)、(c)得到:① 对 130 g/m³焦煤或无烟 煤煤尘云与不同体积分数瓦斯混合体系爆炸, *I*_{max}、 *P*_{max}和 *T*_{max}随瓦斯体积分数增大而改变的趋势与长焰 煤煤尘云的趋势相同, 都是质量浓度为 130 g/m³煤 尘云与体积分数为 10% 瓦斯混合体系爆炸时的 *I*_{max}、 *P*_{max}和 *T*_{max}最大。② 焦煤煤尘云、无烟煤煤尘云参与 混合体系的 6 种中间产物 *I*_{max}排序与长焰煤尘云参 与混合体系的排序整体趋势相同。③ 不同点在于, 当瓦斯体积分数为 10%, 焦煤煤尘云、无烟煤煤尘云 参与的 6 种中间产物的相对辐射强度峰值加和后的 *I*_{max}平均值分别为 84.81、82.50 V。

1284

整体得到,煤种变质程度对中间产物相对辐射强 度峰值影响幅度从大到小排序为:长焰煤>焦煤>无 烟煤煤尘云,煤尘云在高温爆炸过程中快速热解产生 的挥发分(C_nH_m基团)^[24]含量对中间产物相对辐射 强度峰值的影响显著。

2.2 爆炸中间产物相对辐射强度峰值随瓦斯浓度、 煤尘种类变化规律

2.2.1 煤尘云加入后对爆炸中间产物相对辐射强度 峰值的影响

由于在燃烧爆炸链式反应过程中中间产物易受 到各种化学附加物的影响,挥发分含量不同的煤尘加

王秋红等:煤尘云对瓦斯爆炸6种中间产物相对辐射强度的影响



图 4 中间产物相对辐射强度峰值与爆炸压力峰值、火焰温度峰值关系 Fig.4 Relationship between the *I*_{max}, *P*_{max} and *T*_{max} of intermediates

人往往会使得整个链式反应过程受到强烈影响,对比分析在上部和下部光纤探头位置处瓦斯-煤尘混合体系爆炸、瓦斯爆炸产生的不同中间产物相对辐射强度峰值(*I*_{max})与瓦斯体积分数的关系,如图5所示。

分析图 5(a)、(b)得到:①体积分数 7%~11% 瓦斯爆炸,CHO・、O2、CH・比 CH2O、C2・、O・的相 对辐射强度峰值强 10~20 V,并且 6 种中间产物的相 对辐射强度峰值在当量比体积分数附近(9%、10%) 最强(这与文献[25]有相同结论),变化范围为30~ 60 V。② 对于体积分数 7% 瓦斯爆炸, 加入质量浓度 130 g/m³长焰煤煤尘云后,上部光纤处测得 CHO・、 O2、CH・、CH2O、O・、C2・六种中间产物相对辐射强 度峰值分别增强 3.6、12.5、6.7、79.7、15.1 和 41.2 倍, 增强倍数的加和平均值为 26.52 倍,下部光纤处增强 倍数的加和平均值为51.11倍。同理得到,对体积分 数 8%、9%、10%、11% 瓦斯爆炸, 加入质量浓度 130 g/m³长焰煤煤尘云后,在上部光纤和下部光纤处 CHO·、O₂、CH·、CH₂O、O·、C₂·六种中间产物相 对辐射强度峰值增强倍数的加和平均值分别为 11.41、1.59、0.45、0.51 倍和 30.87、3.9、1.33、1.67 倍。 分析表明长焰煤煤尘云对低体积分数瓦斯爆炸中间 产物的影响比高体积分数瓦斯强烈。解析可能原因 是瓦斯燃烧向周围扩散的同时,煤尘在高温下吸收热 量解吸出挥发分气体[26],当燃烧传递到焦炭表面后,

煤尘颗粒也开始参与反应,热量不断积累,自由基数 量大量增长:相比低体积分数瓦斯气氛下的煤尘云体 系,高体积分数瓦斯气氛下的煤尘云体系更缺乏持续 反应所需的氧气。同理分析,也发现焦煤、无烟煤与 低体积分数瓦斯混合体系爆炸的中间产物相对辐射 强度峰值数倍强于与高体积分数瓦斯混合。③体积 分数 7%~11% 瓦斯分别与质量浓度 130 g/m3长焰煤 煤尘云形成的5种含煤尘瓦斯混合体系爆炸中间产 物 CHO・、O₂、CH・、CH₂O、O・和 C₂・相对辐射强 度峰值在上部光纤处平均增强了 1.38、3.79、2.20、 20.70、7.08 和 13.30 倍,在下部光纤处的光谱信号峰 值辐射强度参数平均增强了 0.44、3.45、6.08、42.49、 19.50和 34.70 倍。长焰煤的加入对 6 种中间产物的 影响幅度由强到弱为 CH₂O>C₂ · >O · >O₂>CH · > CHO ·;同理分析知加入焦煤和无烟煤煤尘云对 6 种 中间产物的影响幅度由强到弱为 CH₂O>C₂·>O·> $O_2 > CHO \cdot > CH \cdot \ CH_2O > C_2 \cdot > O \cdot > CHO \cdot > CH \cdot >$ O₂。煤尘云的加入对 CH₂O、C₂・和 O・相对辐射强 度峰值影响幅度总是强于 O,、CH · 和 CHO ·。 ④ 无论是瓦斯还是含煤尘瓦斯混合体系爆炸,图中 蓝色色块显示的 CH · 的相对辐射强度峰值都很强 烈,这与文献「27]证明甲烷燃烧火焰中CH·是热释 放重要指标的结论吻合。同时 O,分子在链反应的一 开始就分解为其他自由基,因此O2分子在瓦斯爆炸

1285



图 5 瓦斯/含煤尘瓦斯爆炸中间产物 Imax 与瓦斯体积分数的关系对比

Fig.5 Relationship between I_{max} of intermediates of the gas or gas-coal dust explosion and gas volume fraction

过程中体积分数较小,因此相对辐射强度较弱。

2.2.2 煤尘云加入后对爆炸中间产物光谱信号强度 累积速率的影响

以质量浓度 130 g/m³长焰煤煤尘云与体积分数 9%瓦斯形成的含煤尘瓦斯爆炸体系为例说明光谱信 号强度积累速率的定义。下部光纤处含煤尘瓦斯爆 炸体系爆炸中间产物 CH・的相对辐射强度(也称为 光谱信号强度)随时间变化曲线,如图 6 所示。

由于爆炸中间产物在体系中处于不断生成和消耗的动态过程中,光谱相对辐射强度 I 作为表征含煤 尘瓦斯混合体系爆炸瞬时状态的反应物含量,引入平 均上升速率 v^[18],分析煤尘加入后对中间产物光谱信 号强度积累速率影响,见式(1)。



$$v = \frac{I_{\max} - I_0}{t_i - t_0}$$
(1)

其中, t_i 为 I_{max} 的对应时刻; I_0 为中间产物开始快速累 积时对应的光谱信号强度(初始I的110%); t_0 为 I_0 的对应时刻。光谱信号强度累积速率是指在一定时 间内,中间产物光谱信号产生的辐射量。

结合图 6 和式(1),得到 CH · 的平均累积速率 为 6 186 V/s。7%~11% 瓦斯分别与长焰煤、焦煤、无 烟煤煤尘云形成的 33 种工况混合体系爆炸中间产物 的光谱信号强度累积速率,如图 7 所示。



图 7 煤尘云加入后对瓦斯爆炸中间产物光谱信号强度累积速率的影响

Fig.7 Effects of coal dust cloud on the accumulation rate of the spectral signal intensity of intermediates

分析图 7 可知,① 体积分数 7%~11% 瓦斯加入 不同变质程度煤尘云后,中间产物的光谱信号强度累 积速率都有所增强。相比体积分数 7%~11% 瓦斯爆 炸,加入长焰煤煤尘云后混合体系爆炸的 CHO · 的 光谱信号强度累积速率分别增强了 1.65、3.75、0.74、 0.01、0.05 倍(增强倍数范围为 0.05~1.65 倍),同理 得到 0₂、CH · 、CH₂O、O · 、C₂ · 的光谱信号强度累

积速率分别增强了 0.3~25.3、0.91~21.7、8.13~416、 4.5~311、17.7~233 倍。含焦煤煤尘云的瓦斯混合体 系爆炸 CHO・、O₂、CH・、CH₂O、O・、C₂・的光谱信 号强度累积速率分别增强了 0.03~4.30、0.2~47.2、 0.7~8.4、7.09~236、3.8~153、17.0~143 倍;加入无烟 煤煤尘云则分别增强了 0.02~0.68、0.2~3.61、1.8~ 16.5、3.8~382、5.5~137、19.4~144 倍。以上也可以 www.chinacaj.net 中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.net 中国煤炭行业知识服务平台

报

1288

煤

CHO・>CH・、CH₂O>C₂・>O・>CHO・>CH・>O₂。 煤尘云的加入对 CH₂O、C₂・和 O・相对辐射强度峰

2023 年第 48 卷

值影响幅度总是强于 O₂、CH・和 CHO・。 (3)煤尘云加入后体系中的 CH₂O、O・、C₂・产 生浓度从低变高,不同变质程度煤尘云对 CH₂O、 O・、C₂・的累积速率影响作用大于 CHO・、O₂、 CH・,不同变质程度煤尘云对贫氧状态混合体系爆 炸的中间产物光谱信号强度影响最强烈。

煤矿瓦斯爆炸常伴有煤尘云参与爆炸,综合 I_{max} 排序和不同变质程度煤尘云对 CH₂O、O·、C₂·的快 速累积速率结论,在井下新型抑爆剂研发的攻关工作 中,可以在兼顾 OH·自由基的同时,综合考察 C₂·、 O·、CH₂O 三种中间产物的靶向抑爆,提升新型抑爆 剂对瓦斯煤尘共存爆炸的抑爆效率。

参考文献(References):

- [1] AJRASH M J,ZANGANEH J,MOGHTADERI B. Methane-coal dust hybrid fuel explosion properties in a largescale cylindrical explosion chamber[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 40:317-328.
- [2] XIE Y X, RAGHAVAN V, RANGWALA A S. Study of interaction of entrained coal dust particles in lean methane-air premixed flames [J]. Combustion and Flame, 2017, 159(7):2449-2456.
- [3] AMYOTTE P R, MINTZ K J, PEGG M J, et al. The ignitability of coal dust-air and methane-coal dust-air mixtures [J]. Fuel, 1993, 72(5):671-679.
- [4] NIU Y H,ZHANG L L,SHI B M. Experimental study on the explosion-propagation law of coal dust with different moisture contents induced by methane explosion [J]. Powder Technology, 2020, 361: 507-511.
- [5] TAN B, LIU H, XU B, et al. Comparative study of the explosion pressure characteristics of micro-and nano-sized coal dust and methane-coal dust mixtures in a pipe [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2020, 7(1):68-78.
- [6] MINKOV L, MOISEEVA K. Effect of coal dust on the air-methane mixture combustion in the Swiss-roll burner [J]. Thermal Science, 2019,23(2):537-544.
- [7] ROCKWELL S R, RANGWALA A S. Influence of coal dust on premixed turbulent methane-air flames [J]. Combustion and Flame, 2013, 160(3):635-640.
- [8] CLONEY C T, RIPLEY R C, PEGG M J. Laminar combustion regimes for hybrid mixtures of coal dust with methane gas below the gas lower flammability limit[J]. Combustion and Flame, 2018,198:14-23.
- [9] KUNDU S K,ZANGANEH J, ESCHEBACH D, et al. Explosion severity of methane-coal dust hybrid mixtures in a ducted spherical vessel[J]. Powder Technology,2018,323:95-102.
- [10] AJRASH M J,ZANGANEH J,MOGHTADERI B. Impact of suspended coal dusts on methane deflagration properties in a large-scale straight duct [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 338:

率影响作用大于 CHO・、O,、CH・。② 瓦斯爆炸的 中间产物光谱信号强度累积速率从高到低排序为 CHO·>CH·>O,>O·>CH,O>C,·,瓦斯中加入了 煤尘云后的中间产物光谱信号强度累积速率从高到 低排序为 CH₂O>O・>C₂・>CH・>O₂>CHO・,说明 煤尘云加入后体系中的 CH2O、O ·、C2 · 相对辐射强 度从低变高。③随着瓦斯体积分数增大,CHO ·、 CH•、0•光谱信号强度累积速率先增大后减小, O,、CH,O、C,·光谱信号强度累积速率不断增大。 ④ 当瓦斯体积分数处于贫氧状态(7%)时,无论有无 加入煤尘云,6种中间产物的光谱信号强度累积速率 都是最低的,无煤尘云时的6种中间产物光谱信号强 度累积速率加和平均值为 29.2 V/s,分别加入长焰 煤、焦煤、无烟煤煤尘云时的6种中间产物光谱信号 强度累积速率平均值分别为1 173.02、720.23、 728.75 V/s,比无煤尘云时分别增强了 39.17、23.66、 23.95 倍。当瓦斯体积分数接近当量比(9%)、富氧 状态(11%)时,分别加入长焰煤、焦煤、无烟煤煤尘 云时的6种中间产物光谱信号强度累积速率平均值 比无煤尘云时分别增强了 3.37、2.0、4.52 倍和 2.12、 1.71、2.4 倍,表明不同变质程度煤尘对贫氧状态混合 体系爆炸的最后中间产物光谱信号强度影响最强烈, 这与2.2.1节3种煤尘云对低体积分数瓦斯中间反应 物的影响比高体积分数瓦斯强烈的规律一致。⑤长 焰煤煤尘云对 O,的累积速率明显强于焦煤与无烟煤 煤尘云,是因为长焰煤煤尘云挥发分含量大,煤尘热 解会吸收更多氧气进行反应。

看出不同变质程度煤尘对 CH₂O、O・、C,・的累积速

3 结 论

(1)同质量浓度长焰煤/焦煤/无烟煤煤尘云与 不同体积分数瓦斯形成的含煤尘瓦斯混合体系爆炸, 整体趋势上随着瓦斯体积分数的增大,CHO・、O₂、 CH・、CH₂O、O・、C₂・六种中间产物的*I*_{max}呈先减小 后增大趋势,对应的*P*_{max}和*T*_{max}呈先增大后减小趋 势,且*I*_{max}排序为C₂・>O・>CH₂O>CH・>O₂> CHO・。煤种变质程度对中间产物相对辐射强度峰 值影响幅度从大到小排序为:长焰煤>焦煤>无烟煤 煤尘云。

(2)煤尘云参与瓦斯爆炸,增强了瓦斯爆炸体系 6种中间产物的相对幅射强度,煤尘云对低体积分数 瓦斯爆炸中间产物相对辐射强度峰值的影响比高体 积分数瓦斯强烈。长焰煤、焦煤、无烟煤煤尘云参与瓦 斯爆炸对6种中间产物的影响幅度为CH₂O>C₂·> O·>O₂>CH·>CHO·、CH₂O>C₂·>O·>O₂>

334-342.

- [11] LI Q Z, LIN B Q, DAI H M, et al. Explosion characteristics of H₂/ CH₄/air and CH₄/coal dust/air mixtures[J]. Powder Technology, 2012,229:222-228.
- [12] HIGGINS B, MCQUAY M Q, LACAS F, et al. An experimental study on the effect of pressure and strain rate on CH chemiluminescence of premixed fuel-lean methane/air flames [J]. Fuel, 2001, 80(11):1583-1591.
- [13] LIU Y, TAN J G, WAN M G, et al. Quantitative Measurement of OH * and CH * Chemiluminescence in Jet Diffusion Flames[J].
 ACS Omega, 2020, 5(26):15922-15930.
- [14] HE L, GUO Q H, GONG Y, et al. Investigation of OH * chemiluminescence and heat release in laminar methane-oxygen co-flow diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 2019, 201:12-22.
- [15] GAYDON A G. Flames-their structure, radiation and temperature
 [M]. Chapman & Hall LTD, London, 1974; 10-199.
- [16] WANG Q H, YANG S P, JIANG J C, et al. Flame propagation and spectrum characteristics of CH₄-air gas mixtures in a vertical pressure relief pipeline[J]. Fuel, 2022, 317:123413.
- [17] 刘奎,李孝斌,郑丹. 甲烷爆炸感应期内火焰光谱特征分析方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(8):2067-2072.
 LIU Kui,LI Xiaobin,ZHENG Dan. The Study about spectrum characteristic analysis method in the induction period of gas explosion Flame [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(8): 2067-2072.
- [18] 罗振敏,王涛,文虎,等. CO对 CH₄爆炸及自由基发射光谱特性的影响[J]. 煤炭学报,2019,44(7):2167-2177.
 LUO Zhenmin, WANG Tao, WEN Hu, et al. Explosion and flame emission spectra characteristics of CH₄-Air mixtures with CO addition[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(7):2167-2177.
- [19] 罗振敏,高帅帅,李逵,等. 多元可燃性气体爆炸压力与中间产物发射光谱特性的耦合研究[J].中国安全生产科学技术, 2020,16(1):11-17.

LUO Zhenmin, GAO Shuaishuai, LI Kui, et al. Coupling research on explosion pressure of multi-component combustible gas and emission spectrum characteristics of intermediate products [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(1):11-17.

[20] 罗振敏,王子瑾,苏彬,等. 多元可燃气体对 CH4爆炸及其自由

基发射光谱影响试验[J]. 中国安全科学学报,2020,30(4): 1-7.

LUO Zhenmin, WANG Zijin, SU Bin, et al. Influence of multi-component combustible gases on explosion characteristics and free radical emission spectrum of CH_4 [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(4):1–7.

[21] 李孝斌,李会荣,何昆,等. 瓦斯爆炸感应期内 CO/H₂O/O₂/CO₂
 特征光谱实验[J]. 辽宁工程技术大学学报,2013,32(10):
 1314-1318.

LI Xiaobin, LI Huirong, HE Kun, et al. Experimental on $CO/H_2O/O_2/CO_2$ and its characteristic spectrum in the induction period of gas explosion [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2013, 32(10):1314-1318.

- [22] 李孝斌,李会荣,何昆,等.甲烷爆炸感应期内 C₂自由基及其特 征光谱分析[J].西安科技大学学报,2015,35(2):248-252.
 LI Xiaobin,LI Huirong,HE Kun, et al. Analysis of C₂ and its characteristic spectrum in the induction period of methane explosion
 [J]. Journal of Xi' an University of Science and Technology,2015, 35(2):248-252.
- [23] 陈晓坤,刘著,王秋红. 瓦斯爆炸 CH/CHO/C₂自由基光谱特征 研究[J]. 西安科技大学学报,2019,39(5):745-752.
 CHEN Xiaokun,LIU Zhu,WANG Qiuhong. Spectral characteristics of CH/CHO/C₂ radical in gas explosion[J]. Journal of Xi' an University of Science and Technology,2019,39(5):745-752.
- [24] MOLINA A, SHADDIX C R. Ignition and devolatilization of pulverized bituminous coal particles during oxygen/carbon dioxide coal combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007,31(2):1905-1912.
- [25] TATIANA G A, BALLESTER J, SMOLARZ A. Chemiluminescence-based sensing of flame stoichiometry: Influence of the measurement method[J]. Measurement, 2013, 46(9):3084-3097.
- [26] ADUEV B P,NURMUKHAMETOV D R,KOVALEV R Y, et al. Spectral-kinetic characteristics of laser ignition of pulverized brown coal[J].Optics & Spectroscopy, 2018, 125(2):293-299.
- [27] WANG K L, LI F, WU Y, et al. Quantitative measurements of chemiluminescence in a laminar methane-air premixed flame and comparison with numerical methods [J]. Energy and Fuels, 2018, 32(4):5536-5543.