

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0090

尿素抑制甲烷爆炸过程中爆炸压力与 自由基变化耦合分析*

李孝斌¹, 张瑞杰², 崔沥巍³, 张庆利⁴

1. 中国人民警察大学消防工程系, 河北 廊坊 065000;
2. 陕西省安康市消防支队, 陕西 安康 725700;
3. 中国人民警察大学研究生部, 河北 廊坊 065000;
4. 中国人民警察大学消防指挥系, 河北 廊坊 065000)

摘要: 为建立抑爆过程中, 尿素对甲烷宏观抑爆效果与微观抑爆机理之间的联系, 利用20 L球型爆炸测试装置开展实验, 测量了尿素粉体抑制甲烷爆炸过程中爆炸压力, 利用光栅光谱仪采集火焰发射光谱数据; 采用光谱分析和数据同步分析方法, 分析该抑爆过程中爆炸压力和NO、CN、CHO、HNO、OH等关键自由基或分子的变化, 得出甲烷爆炸压力发展过程与相关自由基含量之间的耦合变化关系。研究表明, 加入尿素能有效地降低甲烷的爆炸压力, 延长甲烷的爆炸感应期; 在尿素的作用条件, NO、HNO含量的升高和CN、CHO、OH含量的降低, 可以抑制甲烷爆炸; NO、CN、CHO、HNO自由基分子与甲烷爆炸升压过程有较大联系; OH自由基一直存在于甲烷爆炸的整个过程中且含量较高; 对以上自由基的干预, 可以在相应阶段发挥抑爆作用。

关键词: 甲烷爆炸; 抑爆; 尿素; 爆炸压力; 自由基; 光谱分析; 耦合分析

中图分类号: O381; TD712.71 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Coupling analysis of explosion pressure and free radical change during methane explosion inhibited by urea

LI Xiaobin¹, ZHANG Ruijie², CUI Liwei³, ZHANG Qingli⁴

1. Department of Fire Protection Engineering, China People's Police University, Langfang 065000, Hebei, China;
2. Ankang City Fire Department of Shaanxi Province, Ankang 725700, Shaanxi, China;
3. Graduate Department, China People's Police University, Langfang 065000, Hebei, China;
4. Department of Fire Commanding, China People's Police University, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: In order to establish the link between macroscopic explosion suppression effect and the mechanism of microscopic explosion suppression during the methane explosion suppression process, we used the 20 L spherical explosion test devices and grating spectrometer to collect data on the pressure and flame emission spectrum, analyzed changes of some key free radicals or molecules such as NO, CN, CHO, HNO and OH with the methods of spectrum analysis and data synchronization analysis during the suppression of methane explosion, and obtained the coupling relationship between the development of methane explosion pressure and related free radicals' content. The research suggests that adding urea can effectively reduce the explosion pressure of methane and extend the explosion induction period of methane. Under urea conditions, the contents of NO and HNO increase while those of CN, CHO and OH are reduced, which lead to the suppression of methane explosion; NO radicals are mainly produced during the stage of pressure increase. CN, CHO, and HNO radicals are mainly produced and

* 收稿日期: 2019-03-26; 修回日期: 2019-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(51774296)

第一作者: 李孝斌(1980—), 男, 博士, 副教授, wjxy_lxb@163.com

peaked during the explosion induction period before pressure rises; OH radicals have always existed throughout the methane explosion and are high in content. The interference on the free radicals above can suppress the methane explosion in relevant reaction stages.

Keywords: methane explosion; explosion suppression; urea; explosion pressure; free radical; spectral analysis; coupling analysis

矿井瓦斯爆炸事故是造成人员伤亡的重要原因。研究甲烷的抑爆,得到效果理想的抑爆剂,对控制瓦斯煤矿事故有深远意义。当前主要研究的抑爆剂,可分为气相、液相、固相和混合相等类型。其中固相粉体抑爆剂因为具有快速高效、成本低、易保存、运输安全等优点,逐渐成为抑制甲烷爆炸的优先选择。当前主要的粉体抑爆剂包括 ABC 干粉、BC 干粉、金属氢氧化物、 SiO_2 及其同类物质、尿素等^[1]。对上述粉体抑爆的研究可大致分为宏观抑爆效果与微观抑爆机理两个方面。

在宏观抑爆效果层面的研究多采用实验、数值模拟或计算机模拟等方法,分析抑爆剂对于爆炸压力、升压速率、火焰传播速度等关键爆炸参数的影响^[2-4]。国内外研究人员从不同粉体粒度、粉体浓度和粉体种类等方面入手,研究分析粉体抑爆剂的抑爆效果。罗振敏等^[5]和程方明等^[6]比较了不同粒度下粉体的抑爆效果,得出纳米级粉体抑爆效果远远好于微米级,抑爆剂粒径越小抑爆效果越好;Ranganathan 等^[7]研究了惰性粉体对甲烷和空气预混火焰的抑制作用,得出当粉体粒径在 $75\sim 90\ \mu\text{m}$,浓度为 $380\sim 520\ \text{g}/\text{m}^3$ 时可以有效抑制火焰;文虎等^[8-9]和王天政^[10]比较了不同种类抑爆剂的抑爆效果,得到尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)的抑爆效果略优于其他单一组分的抑爆剂;Mikhail^[11]通过实验分析和推测,提出了基于尿素、KCl 和改性二氧化硅的“PSE”粉末气溶胶抑爆剂。

在抑爆微观机理层面多采用研究光学特征或计算机模拟等方法^[12-16],分析甲烷抑爆过程中相关自由基的变化过程。早在 20 世纪 70 年代, Gaydon 对各种不同火焰的光谱进行相关的分析,给出了各种不同自由基/分子的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^[17]。Higgins 等^[18]研究了层流预混火焰中 CH 自由基的特征光谱强度的变化规律,分析了火焰拉伸、环境压力和 NO_x 的产生量与 CH、OH 自由基的光谱强度之间的关系。刘奎等^[19]引入频域光谱分析、时域光谱分析的方法对甲烷的爆炸过程进行了自由基/分子的定量和半定量的分析,研究结果表明光谱特征可以作为检测甲烷爆炸火焰的依据。随后,杨剑^[15]、杨翔^[16]在此基础上进一步研究了在不同抑爆粉体作用下甲烷爆炸过程中相关自由基的变化规律,得到了一系列抑爆粉体的抑爆机理。

综合以上研究,从宏观抑爆效果来看,尿素($\text{H}_2\text{N}-\text{CO}-\text{NH}_2$)是单一粉体抑爆剂中抑爆效果最好的。其微观抑爆机理主要为:在 NH_3 和 HNCO 的共同作用下抢夺了大量的 OH,降低了 CH_2O 、 CH_3 、 C_2 、 C_3 等促进甲烷爆炸进程的自由基与 OH 结合发生反应的几率。但总体来说,目前对于尿素抑制甲烷爆炸的研究还较少,且多停留于抑爆效果的研究上,对其微观的抑爆机理研究并不充分,随着爆炸压力的变化,各种自由基的变化过程和作用时间还不能确定,而且结合光谱分析技术对该过程中自由基变化的研究基本空白。

本文采用实验方法,采集尿素粉体抑制甲烷爆炸过程中爆炸压力和火焰发射光谱数据,采用光谱分析和数据同步分析方法,分析该抑爆过程中爆炸压力和 NO、CN、CHO、HNO、OH 等关键自由基或分子的变化,得出甲烷爆炸压力发展过程与相关自由基含量之间的耦合变化关系,以期为进一步研究宏观抑爆效果与微观抑爆机理之间的作用关系打下基础,为有针对性地改进抑爆剂以提高抑爆效果提供参考。

1 实验

1.1 设备

如图 1 所示,实验系统包括 20 L 球形爆炸装置、控制系统、配气系统、粉体释放系统、压力采集系统和点火系统。

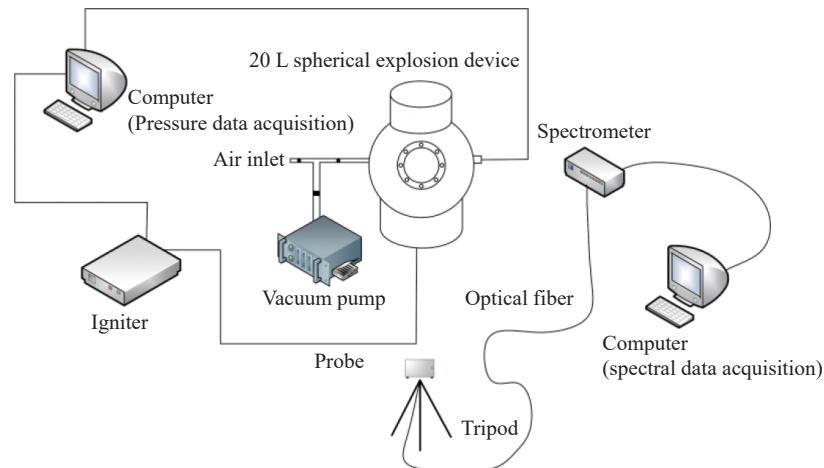


图 1 实验设备示意图

Fig. 1 Experiment device

20 L 球型爆炸测试装置本体由球型的爆炸腔室构成, 其结构为不锈钢双层夹套结构, 最大工作压力 2.5 MPa。其中部正面观察窗采用防爆耐压玻璃, 厚 30 mm、耐压强度为 4 MPa, 由法兰固定, 由窗口可以直观地观察到腔室内的点火和爆炸情况。装置的底部安装有 6 L 的储粉罐和机械两向阀, 用于储存预先加入的粉体并将粉尘在 60 ms 内喷入爆炸腔室。储粉罐内压力达到电节点压力表设置好的压力时(本实验设置 1 MPa)向计算机发送触发信号, 计算机开始采集压力数据并开启机械两向阀, 喷粉完毕后关闭阀门, 并在 40 ms 后启动点火系统。

压力传感器为美国 Dytran 公司制造的压电式高灵敏传感器, 灵敏度为 22.2 mV/psi (3.19×10^{-3} V/kPa), 动态响应频率为 250 kHz, 压力测试范围为 0~1.7 MPa。

光谱采集系统包括光栅光谱仪、光谱采集探头和配套的光谱数据采集软件。光谱仪为英国产 Newton Andor Shamrock 500i 光栅光谱仪光栅, 采用的光栅分辨率为 0.3 nm, 单次拍摄波长宽度为 350 nm, 拍摄频率为 1 000 Hz。本实验将光谱仪的光谱采集探头对准观察窗, 同时对点火和爆炸光谱进行拍摄采集。

1.2 材料

本实验采用的甲烷气体纯度为 99.0% 以上, 尿素粉体的平均粒径为 261 μm , 尿素粉体的粒径使用成都精新粉体测试设备有限公司的显微图像仪(每晶格 400 μm)和 JL-1178 型干激光粒度仪进行测量。

1.3 方案

本实验采用分压法配气, 在加入甲烷之前将装置内压力抽到 -0.04 MPa, 再将甲烷用气囊接在进气口放入爆炸装置内, 使内部达到 -0.03 MPa, 由于爆炸装置为 20 L, 储气罐为 6 L, 将储气罐内 1 MPa 压力气体和粉体一并喷入腔室后爆炸腔内恰为常压状态。由于实验中甲烷爆炸的瞬间极短, 容易产生偶然误差, 故采用重复实验法减少误差, 选取 3 组实验中具有一致变化趋势实验组作为有效组, 由于光谱仪单次拍摄波长范围有限, 所以同一工况需分三个波段进行实验, 每个波段均进行重复实验三次。共完成实验 63 组, 其中体积分数为 10% 的甲烷/空气预混气体爆炸实验 9 组、金属丝空放电点火 9 组、不同浓度尿素抑爆实验 45 组, 实验方案如表 1 所示。

通过多次重复性实验, 发现当尿素浓度上升至 50 mg/L 时, 体积分数为 10% 的甲烷/空气预混气不再发生爆炸。而在 50 mg/L 以下的浓度中, 40 mg/L 的抑爆效果最好。因此采集不加尿素和加入 40 mg/L 的尿素两种工况下的体积分数为 10% 的甲烷/空气预混气爆炸的爆炸压力曲线和爆炸火焰发射光谱数据, 另有点火器的点火光谱数据用于去除爆炸过程中点火丝的光谱的影响。

表 1 实验方案详细表
Table 1 Testing program

光源	点火能量/ J	光栅光谱仪 拍摄波段/nm	甲烷体积分数/ %	粉体浓度/ (mg·L ⁻¹)	实验组数	用途
甲烷爆炸	10	187~537 537~887 887~1 210	10	0	各3组	甲烷爆炸光谱及压力数 据采集
金属丝点火	10	187~537 537~887 887~1 210	0	0	各3组	剔除点火丝火焰对光谱 数据的影响
尿素抑爆火焰	10	187~537 537~887 887~1 210	10	10/20/30/40/50	各3组	尿素粉体抑爆火焰光谱 及压力数据采集

2 分析方法

2.1 光谱分析方法

本文采用光谱比较法对光谱数据进行分析:对得到的原始光谱数据进行波峰的筛选得到光谱峰值数据,然后扣除背景光和点火背景,采用光谱比较法,将爆炸火焰发射光谱与谱图^[17]中提供的各种不同自由基的特征发射光谱的波长进行对比,得到实验中爆炸火焰中存在的部分自由基或分子的发射光谱强度数据。自由基或分子特征光谱的光谱强度与自由基含量成正相关关系,因此由光谱强度曲线即可以分析出自由基含量变化过程。

2.2 爆炸压力与光谱数据时间同步方法

如图 2 所示,当甲烷预混气体在遇到点火丝点火之后,并不会立即发生爆炸,在爆炸之前会经历包

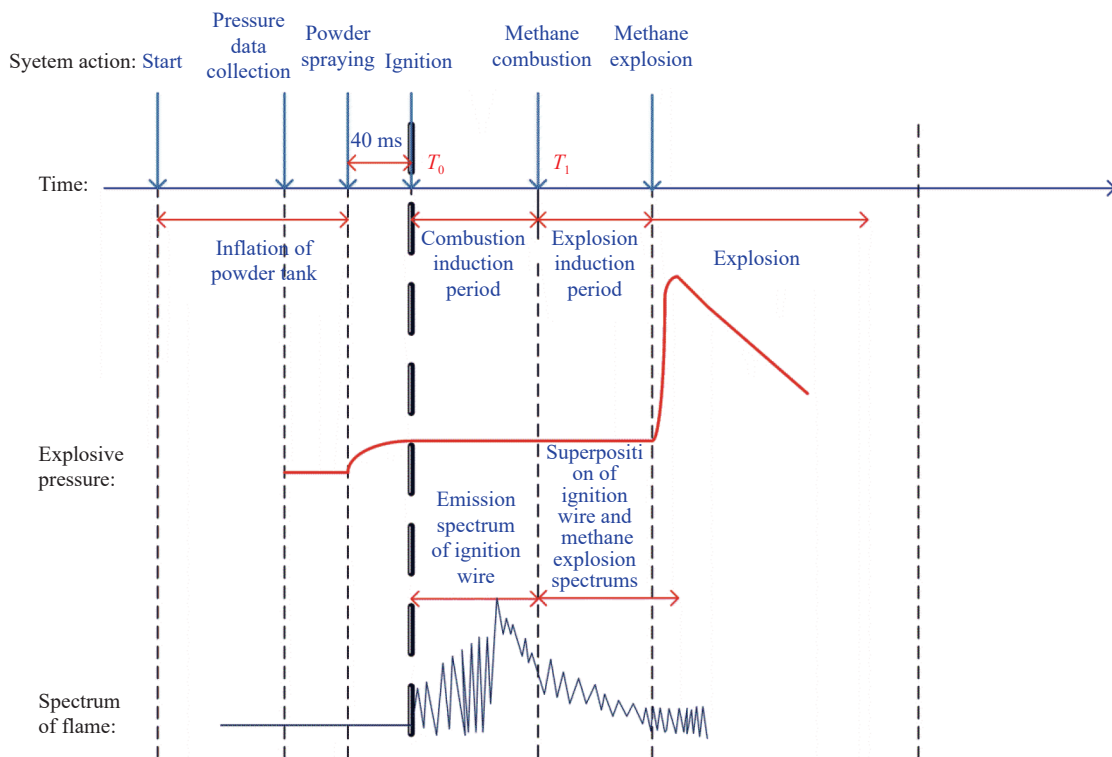


图 2 甲烷爆炸压力与光谱时间分析耦合图

Fig. 2 Time coupling analysis plot of methane explosion spectra and pressure

括燃烧感应期和燃烧转为爆炸的响应时间^[20]。本实验以甲烷燃烧感应期的开始时刻 T_0 为光谱与压力数据的同步时刻, 对于光谱数据, 当开始采集到光谱变化信号的时刻即为甲烷燃烧感应期的开始时刻 T_0 , 对于压力数据, 压力曲线出现第一次上升的过程为喷粉的过程, 此套设备的喷粉时长为 40 ms, 当喷粉结束后, 控制系统在接到压力信号后延迟 40 ms 后向点火系统发出点火指令, 因此, 甲烷燃烧感应期的开始时刻 T_0 应该是在压力曲线发生第一次上升后延迟 40 ms 的时刻。

选取 T_0 时刻作为时间的零点, 将压力曲线与不同自由基的光谱强度变化曲线放在同一坐标中, 通过分析甲烷爆炸早期爆炸压力和不同自由基光谱强度在同一时间段的变化规律, 就可以得到各个自由基与甲烷爆炸压力变化的联系, 建立宏观爆炸压力与微观自由基变化之间的联系。

3 爆炸压力与自由基耦合变化关系

3.1 NO

未加入和加入尿素作用下, 甲烷爆炸过程中, 爆炸压力曲线与 NO 特征光谱的光谱强度曲线时间同步变化关系如图 3 所示, 可以看出, 加入尿素情况下, 甲烷爆炸压力峰值降低, 爆炸感应期变长, 说明起到了抑爆作用。

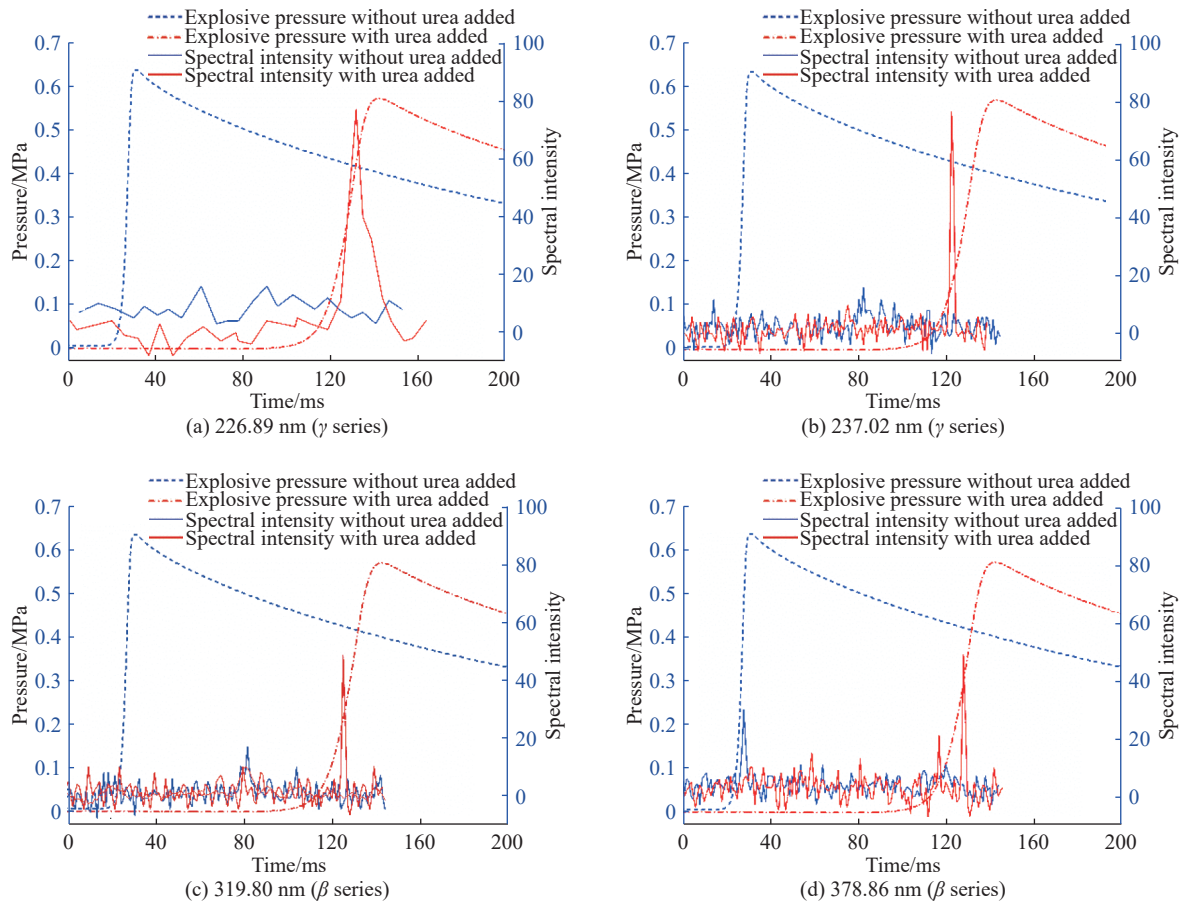


图 3 尿素作用下甲烷爆炸压力与 NO 耦合变化关系

Fig. 3 The coupling relationship plots of methane explosion pressure and the content of NO under urea condition

未加入尿素情况下, NO 含量很低或者出现微弱的峰值; 加入尿素情况下, 探测到 NO 含量在甲烷爆炸的升压阶段出现一个较大的峰值, 但存在时间很短。无论是否加入尿素, NO 含量出现峰值的时间都是在甲烷爆炸升压的过程中产生的, 说明 NO 含量的增加主要发生在甲烷爆炸的升压阶段, 因此其与降低最大爆炸压力和升压速率有较大关系。

3.2 CN

未加入和加入尿素作用下,甲烷爆炸过程中,爆炸压力曲线与CN自由基特征光谱的光谱强度曲线时间同步变化关系如图4所示。加入尿素情况下,CN自由基含量发生明显的降低。无论是否加入尿素,CN自由基含量始终在甲烷爆炸的爆炸感应期内升高并达到峰值,然后随着甲烷爆炸升压过程而迅速降低。CN自由基的产生过程主要集中于甲烷爆炸的感应期内。

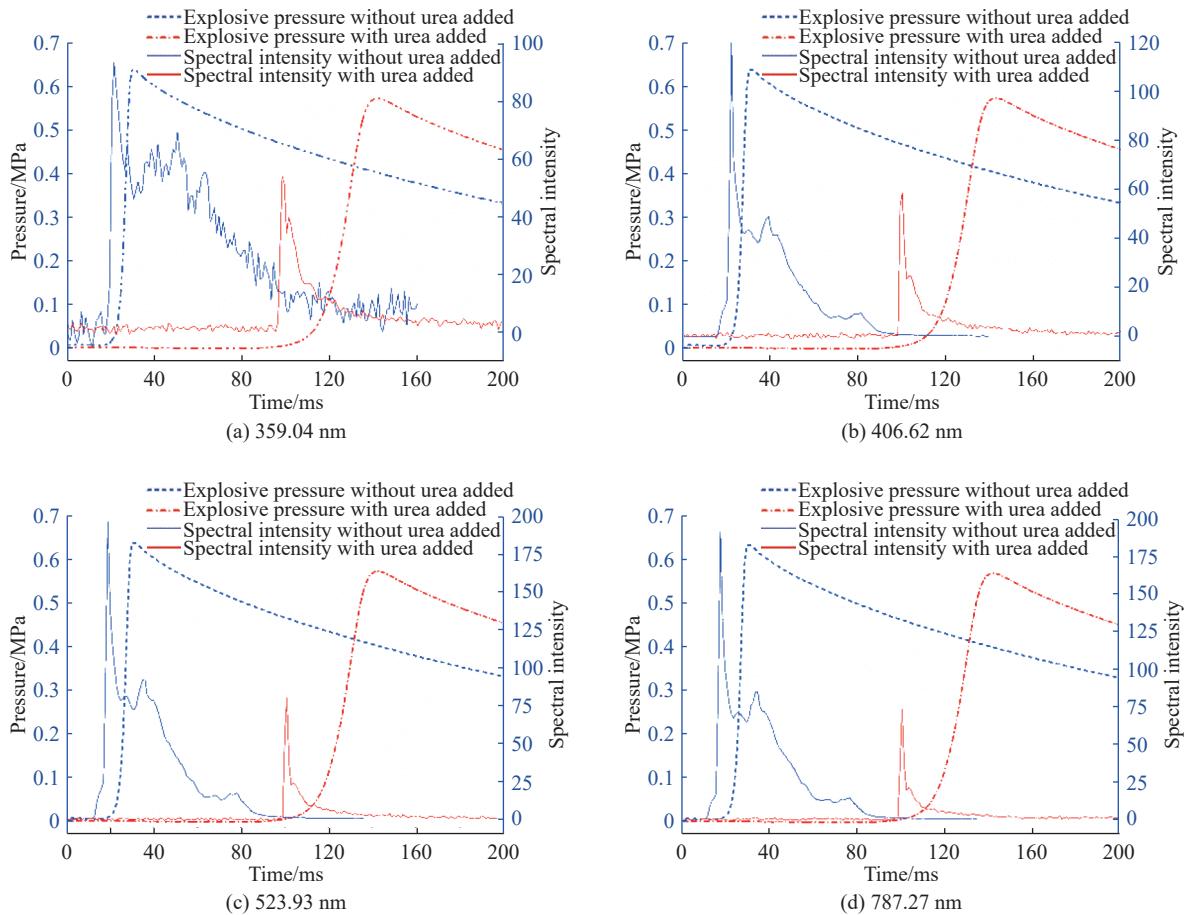


图4 尿素作用下甲烷爆炸压力与CN耦合变化关系

Fig. 4 The coupling relationship plots of methane explosion pressure and the content of CN under urea condition

3.3 CHO

未加入和加入尿素作用下,甲烷爆炸过程中,爆炸压力曲线与CHO自由基特征光谱的光谱强度曲线时间同步变化关系如图5所示。在未加入尿素的情况下,在甲烷爆炸感应期的后半段和甲烷爆炸升压的阶段,光谱强度曲线出现一个持续约5ms的波峰,说明该阶段中产生大量CHO。加入尿素情况下,基本探测不到有CHO自由基的特征光谱强度,说明CHO自由基的产生被抑制或者销毁速度加快,无法维持CHO自由基含量稳定存在。同时,爆炸压力和压力上升速率降低。因此,尿素的加入抑制了甲烷爆炸感应期内CHO自由基的含量,达到了降低爆炸压力的宏观效果。

3.4 HNO

未加入和加入尿素作用下,甲烷爆炸过程中,爆炸压力曲线与HNO自由基特征光谱的光谱强度曲线时间同步变化关系如图6所示。加入尿素情况下,HNO自由基的含量发生显著增加,HNO自由基的含量较高的工况下,表现出对甲烷较好的抑爆效果。无论是否加入尿素,HNO自由基都是在甲烷爆炸的感应期内增长并达到峰值,在甲烷爆炸的升压阶段表现为含量减少的趋势。据此说明,HNO自由基的产

生多集中于甲烷的爆炸感应期内, 在爆炸压力开始升高的过程中伴随着 HNO 自由基的大量消耗; HNO 自由基含量对甲烷爆炸感应期有较大的影响, 其消耗的过程与爆炸压力变化过程有较大的联系。

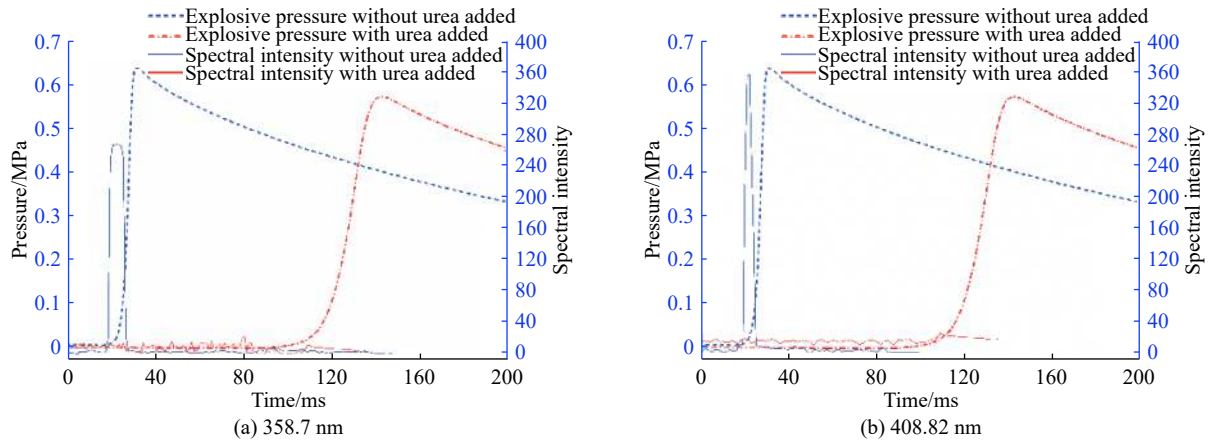


图 5 尿素作用下甲烷爆炸压力与 CHO 耦合变化关系

Fig. 5 The coupling relationship plots of methane explosion pressure and the content of CHO under urea condition

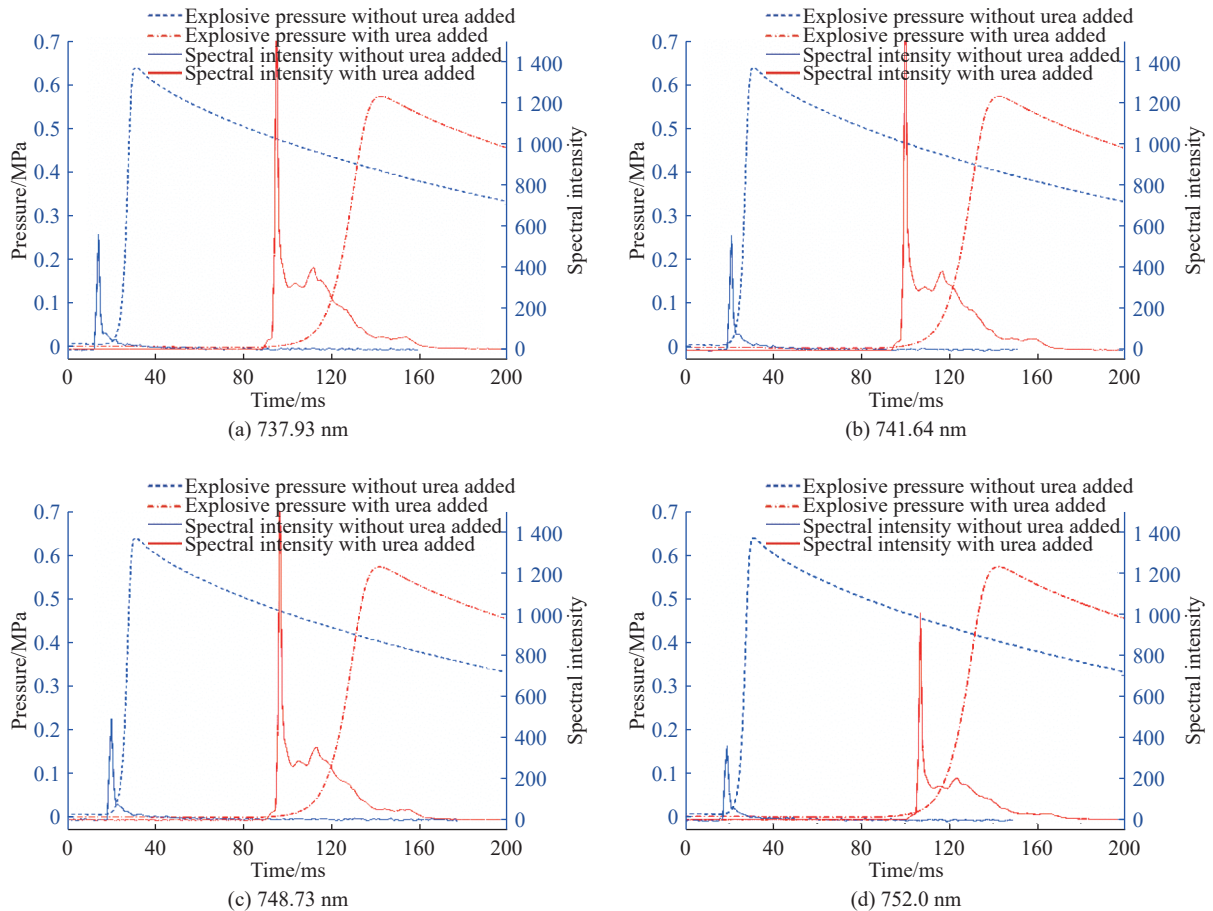


图 6 尿素作用下甲烷爆炸压力与 HNO 耦合变化关系

Fig. 6 The coupling relationship plots of methane explosion pressure and the content of HNO under urea condition

3.5 OH

未加入和加入尿素作用下, 甲烷爆炸过程中, 爆炸压力曲线与 OH 自由基特征光谱的光谱强度曲线时间同步变化关系如图 7 所示。加入尿素情况下, OH 自由基含量在整个爆炸初期整体降低, 说明

OH 自由基的含量的降低与甲烷最大爆炸压力和升压速率的降低有较大关系。无论是否加入尿素, OH 自由基含量都是在某个强度范围内稳定波动, 点火以后, 爆炸发生前后也没有明显的随时间而发生含量的上升或者降低, 说明 OH 含量并没有随着甲烷爆炸过程的进行而发生明显变化, 持续保持在一个相对较高的水平。进一步证明, OH 是甲烷爆炸过程中的关键自由基, 这与前人的研究结果一致; 同时证明, 抑制 OH 产生, 无论是在爆炸感应期还是在升压过程中, 即在甲烷爆炸整个过程中, 都可以发挥较好的抑爆效果。

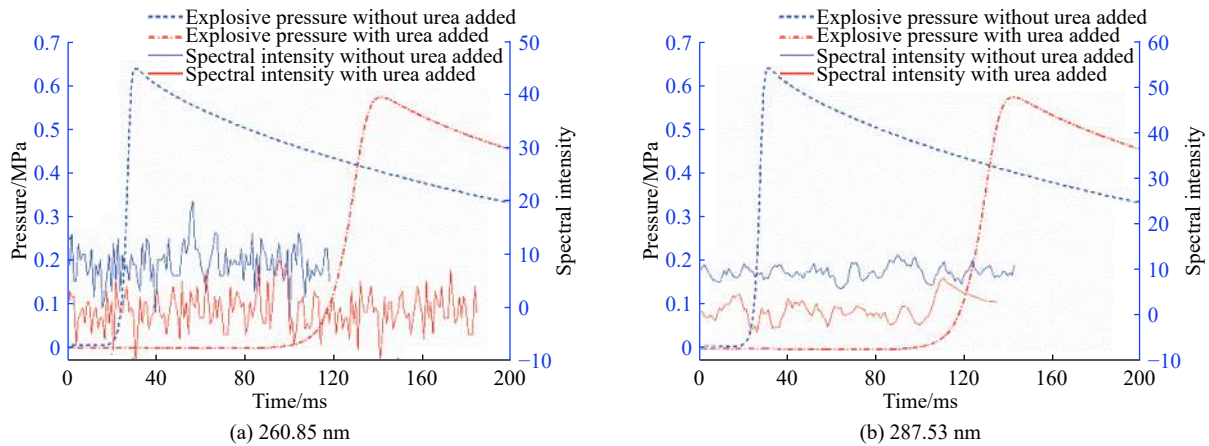


图7 尿素作用下甲烷爆炸压力与OH自由基耦合关系

Fig. 7 The coupling relationship plots of methane explosion pressure and the content of OH under urea condition

3.6 尿素抑制甲烷爆炸机理分析与推理

从加入尿素后爆炸压力的变化与主要自由基的变化具有较强的相关性可以得出, 尿素参与到甲烷的氧化反应中, 对其重要的中间产物自由基和重要的基元反应造成了影响和干扰, 从而实现了抑爆效果。现结合当前相关研究成果对尿素抑制甲烷爆炸的机理进行分析与推理。

当前对于甲烷氧化简化机理的研究较多, 刘合等^[21]、侯金丽等^[22]通过敏感性分析等方法, 提取了甲烷氧化的骨干机理, 提出了甲烷氧化的主要环节, 如图8所示。可以看出在甲烷单碳氧化路径中, CHO是十分重要的中间产物, 对整个链式反应有较大影响。同时近年来的运用分子模拟方法进行甲烷氧化机理的研究^[23]中, 计算了甲烷氧化各主要中间产物转化过程中不同反应路径的转化比例, 从而体现各自由基对反应的影响强弱。研究指出了甲烷氧化的关键路径: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_3\text{O} \rightarrow \text{HCHO} \rightarrow \text{CHO}/\text{HCOOH} \rightarrow \text{CO}_2\text{H} \rightarrow \text{CO}/\text{CO}_2$, 且OH自由基是整个氧化过程中最重要的自由基, 其与 CH_4 的反应是 CH_4 向 CH_3 自由基转化的最重要途径。

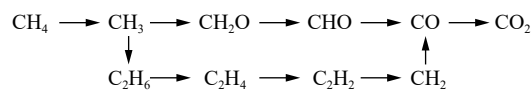
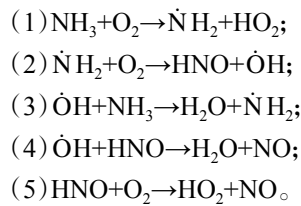


图8 甲烷爆炸反应简化机理图

Fig. 8 The reduced chemical mechanism of methane explosion

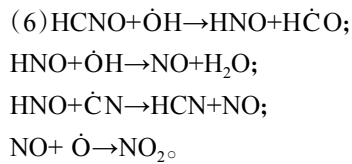
结合实验结果来看, OH和CHO自由基在加入尿素后在爆炸过程中有明显下降。可见尿素参与反应明显消耗了这两种关键自由基, 实现了对爆炸的抑制。NO、CN和HNO自由基的变化可能是尿素及其分解产物参与反应后发生了新的基元反应导致的。

尿素熔点为132.7℃, 受热易分解, 余明高等^[24]研究发现, 尿素热解主要分为3个步骤, 最终生成热解产物 NH_3 和 HNCO , Gaydon^[17]对 NH_3 的抑爆机理做过详细研究, 指出了 NH_3 抑制甲烷爆炸的关键基元反应:



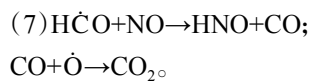
但在 NH_3 抑制甲烷爆炸过程中, OH 始终作为中间体存在, 含量没有明显下降。在加入尿素后, OH 含量出现了明显降低, 因此推测另一种热解产物 HNCN 可能与 OH 发生了新的反应, 消耗了 OH 自由基。现结合当前研究成果和实验结果, 对 HNCN 的反应路径做出如下推测。

HNCN 和 OH 发生反应产生 HNO 和 HCO, 这与当前研究结果^[25]一致, HNO 再次与 OH 反应生成 NO 和 H_2O , NO 消耗 O 生成 NO_2 , 还有一部分 HNO 与 CN 反应, 反应方程式如下:



整个反应过程消耗了大量的 OH, 并且产生的 NO 又进一步消耗了大量的活性自由基 O, 各个自由基含量的变化规律也与实验测得数据分析结果一致。

由于在反应(6)中产生了大量的 HCO 自由基, HCO 自由基作为甲烷爆炸链式反应的促进作用的自由基, 推测其与 NO 自由基反应而被消耗, 具体反应方程式如下:



4 结 论

(1) 加入尿素粉体情况下, 甲烷的最大爆炸压力和升压速率发生明显降低, 爆炸感应期变长, 起到了抑爆作用。

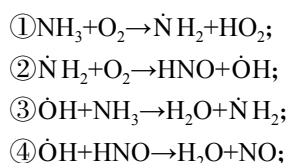
(2) 加入尿素粉体情况下, NO、HNO 含量明显升高, CN、CHO、OH 含量明显降低, 说明 NO、HNO 含量的升高, CN、CHO、OH 含量的降低, 可以抑制甲烷爆炸。

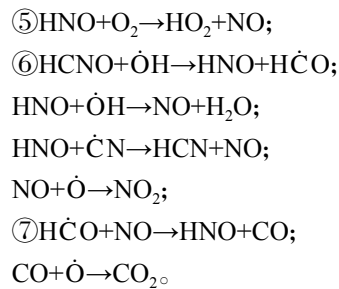
(3) NO 含量在甲烷爆炸升压过程中呈现出增加的规律, 说明 NO 主要在甲烷爆炸升压的阶段产生; 加入尿素粉体情况下, NO 含量在甲烷爆炸升压过程中显著增加, 在甲烷爆炸升压阶段起到抑制作用。

(4) CN、CHO、HNO 含量在甲烷爆炸升压之前的爆炸感应期内升高并达到峰值, 在甲烷爆炸后的升压过程中逐渐减低, 说明 CN、CHO、HNO 在爆炸感应期内大量的产生并达到峰值, 在甲烷爆炸升压过程中被消耗。

(5) OH 自由基的含量较高且一直存在于甲烷爆炸的整个过程中, 说明 OH 含量并没有随着甲烷爆炸过程的进行而发生明显变化, 持续保持在一个相对较高的水平。进一步证明, OH 是甲烷爆炸过程中的关键自由基, 这与前人的研究结果一致; 同时证明, 抑制 OH 产生, 在甲烷爆炸整个过程中都可以发挥较好的抑爆效果。

(6) 尿素抑制甲烷爆炸可能主要是通过消耗了甲烷氧化中的关键自由基 OH 和 CHO 来实现的, 抑爆的主要有效成分是尿素的两种热解产物 NH_3 和 HNCN, 其抑爆的可能反应路径如下:





参考文献:

- [1] 左前明, 程卫民, 汤家轩. 粉体抑爆剂在煤矿应用研究的现状与展望 [J]. 煤炭技术, 2010, 29(11): 78–80.
ZUO Q M, CHENG W M, TANG J X. Current status and prospects of application and research of powder coal mine explosion suppression agent [J]. Coal Technology, 2010, 29(11): 78–80.
- [2] 聂百胜, 杨龙龙, 孟筠青, 等. 基于图像处理的管道瓦斯爆炸火焰传播速度特征 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 884–891. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1106.
NIE B S, YANG L L, MENG J Q, et al. Characteristics of flame propagation velocity of gas explosion in duct based on image processing [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 884–891. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1106.
- [3] 高娜, 张延松, 胡毅亭. 温度压力对瓦斯爆炸危险性影响的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(2): 218–223. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0218-06.
GAO N, YANG Y S, HU Y T. Experimental study on gas explosion hazard under different temperatures and pressures [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(2): 218–223. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0218-06.
- [4] 王宝璐, 额日其太, 李挺. 氧化剂含氧浓度对甲烷反扩散火焰光谱特性影响实验研究 [J]. 煤矿安全, 2017, 38(4): 878–884. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2017.04.019.
WANG B L, ERIQITAL, LI T. Experimental study of effects of oxygen mole fraction in oxidizer on inverse methane/air diffusion flame emission spectrum properties [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(4): 878–884. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2017.04.019.
- [5] 罗振敏, 邓军, 文虎, 等. 纳米粉体抑制矿井瓦斯爆炸的实验研究 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(12): 84–88. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.2008.12.014.
LUO Z M, DENG J, WEN H, et al. Experimental study on the suppression of gas explosion with nanometer powder in coal mines [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(12): 84–88. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3033.2008.12.014.
- [6] 程方明, 邓军, 文虎, 等. SiO₂ 纳米粉体抑制瓦斯爆炸的试验研究 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(8): 73–76.
CHENG F M, DENG J, WEN H, et al. Experiment study on SiO₂ nanometer powder to restrain gas explosion [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(8): 73–76.
- [7] SREENIVASAN R, MINKYU L, V'YACHESLAV A, et al. Suppression of premixed flames with inert particles [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35: 46–51. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.03.009.
- [8] 文虎, 曹玮, 王开阔, 等. ABC 干粉抑制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(6): 9–12. DOI: 10.3969/j.issn.1673-193X.2011.06.002.
WEN H, CAO W, WANG K K, et al. Experiment study on ABC dry powder to repress gas explosion [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(6): 9–12. DOI: 10.3969/j.issn.1673-193X.2011.06.002.
- [9] 文虎, 王秋红, 罗振敏, 等. 超细 Al(OH)₃ 粉体抑制甲烷爆炸的实验研究 [J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(4): 388–390. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9315.2009.04.003.
WEN H, WANG Q H, LUO Z, et al. Experiment on Al(OH)₃ ultrafine powder suppressing methane explosion [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(4): 388–390. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9315.2009.04.003.
- [10] 王天政. 超细粉体抑制管道瓦斯爆炸实验研究 [D]. 河南, 焦作: 河南理工大学, 2012: 10–15.
WANG T Z. Experiment study on the gas explosion suppression by the ultrafine powder in tube [D]. Jiaozuo, Henan: Henan Polytechnic University, 2012: 10–15.
- [11] MIKHAIL K. Prevention and suppression of explosions in gas-air and dust-air mixtures using powder aerosol-inhibitor [J].

- Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(6): 729–735. DOI: 10.1016/j.jlp.2006.05.004.
- [12] 罗振敏, 张群, 王华, 等. 基于 FLACS 的受限空间瓦斯爆炸数值模拟 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(8): 1381–1387.
LUO Z M, ZHANG Q, WANG H, et al. Numerical simulation of gas explosion in confined space with FLACS [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(8): 1381–1387.
- [13] 王涛. 管道内甲烷爆炸特性及 CO₂ 抑爆的实验与数值模拟 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014: 21–26.
WANG T. Experiment and numerical studies on the methane explosion and the suppression effect of CO₂ in vessel [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014: 21–26.
- [14] 李孝斌. 矿井瓦斯爆炸感应期内反应动力学分析及光学特征研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2009: 35–37.
LI X B. Analysis of reaction dynamics and study on optical characteristic of gas explosion in induction period [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009: 35–37.
- [15] 杨剑. 超细粉体作用下甲烷扩散火焰燃烧及辐射光谱特性研究 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2015: 20–45.
YANG J. Study on combustion and spectrum characteristics of methane diffusion flame interacted with superfine powder [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2015: 20–45.
- [16] 杨翔. 甲烷爆炸初期 NH₄H₂PO₄ 粉体抑爆机理及应用研究 [D]. 河北廊坊: 中国人民武装警察部队学院, 2017: 15–39.
YANG X. NH₄H₂PO₄ power explosion suppression mechanism in methane explosion prime and application [D]. Langfang, Hebei: The Chinese People's Armed Police Force Academy, 2017: 15–39.
- [17] PADLEY P J. Flames: their structure, radiation and temperature [J]. *Physics Bulletin*, 1974, 22(3): 10–199.
- [18] 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. DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00040-0.
- [19] 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): 2067–2071. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)08-2067-06.
LIU K, LI X B, ZHENG D. The study about spectrum characteristic analysis method in the induction period of gas explosion flame [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(8): 2067–2071. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)08-2067-06.
- [20] 李孝斌, 李树刚, 林海飞, 等. 矿井瓦斯爆炸感应期确定方法的实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(4): 540–543. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1964.2009.04.015.
LI X B, LI S G, LIN H F, et al. Experiential research on the method of ascertaining the induction period of gas explosion in mine [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2009, 38(4): 540–543. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1964.2009.04.015.
- [21] 刘合, 陈方, 刘洪, 等. 甲烷/空气预混超声速燃烧的 18 步简化机理 [J]. *燃烧科学与技术*, 2012, 18(5): 467–472.
LIU H, CHEN F, LIU H, et al. 18-step reduced mechanism for methane/air premixed supersonic combustion [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, 18(5): 467–472.
- [22] 侯金丽, 金平, 蔡国飙. 基于敏感性分析的氧/甲烷燃烧反应简化机理 [J]. *航空动力学*, 2012, 27(7): 1549–1554.
HOU J L, JIN P, CAI G B. Reduced mechanism for oxygen/methane combustion based on sensitivity analysis [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(7): 1549–1554.
- [23] HE Z, LI X B, LI M L, et al. The intrinsic mechanism of methane oxidation under explosion condition: a combined ReaxFF and DFT study [J]. *Fuel*, 2014, 124: 85–90. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.01.070.
- [24] 余明高, 王天政, 游浩. 粉体材料热特性对瓦斯抑爆效果影响的研究 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(5): 830–835.
YU M G, WANG T Z, YOU H. Study on gas explosion suppression influence of thermal properties of powder [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(5): 830–835.
- [25] 于健康, 张浩, 杨天虹, 等. HCNO 自由基与羟基在气相中反应机理的理论研究 [J]. *分子科学学报*, 2010, 26(3): 149–153. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9035.2010.03.001.
YU J K, ZHANG H, YANG T H, et al. Reaction mechanism of HCNO+OH in the gas phase [J]. *Journal of Molecular Science*, 2010, 26(3): 149–153. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9035.2010.03.001.

(责任编辑 王小飞)