

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2013.07.019

障碍物对瓦斯爆炸火焰锋面参数的影响

解北京, 付玉凯, 徐小轩

(中国矿业大学(北京), 资源与安全技术工程学院, 北京 100083)

摘要:在实验室小型模拟巷道的方形管道内, 采用自制的微细热电偶和离子电流传感器、压电式压力传感器, 测试了有/无障碍物 2 种情况下在不同位置处浓度为 10.17% 甲烷-空气预混火焰锋面的传播过程中温度、离子电流强度及压力变化情况。实验结果表明, 障碍物存在导致火焰锋面的最高温度值略有降低, 由靠近点火端位置的 1 303.7 °C 下降到 1 234.4 °C, 远离点火端位置的 1 198.7 °C 下降到 902.5 °C; 离子电流曲线出现了明显的双峰值, 强度明显增大, 由靠近点火端的 146.25 nA 上升到 160 nA, 远离点火端的 432.5 nA 上升到 605 nA; 火焰锋面前方过早的产生前驱压力波, 加速燃烧转爆轰 (DDT) 过程的提前实现。因此, 巷道内应避免障碍物的存在。

关键词:瓦斯爆炸; 火焰温度; 前驱压力波; 微细热电偶; 离子探针

中图分类号:TD712.72 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2013)07-108-06

Influence of obstacles on the parameters of flame front in gas explosion

XIE Beijing, FU Yukai, XU Xiaoxuan

(Faculty of Resources & Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The temperature, ion current, overpressure and photoelectric signal of flame front at the same cross-section in square tube of laboratory simulation of tunnel are recorded by homemade thermocouple, homemade ion probe, pressure transducer and photoelectrical transducer at the same time. The parameters' changes of flame front with the same gas concentration of 10.17% are compared with obstacles or without obstacles. The results show that, when the obstacles exists, the value of temperature is slightly lower, the temperature is from 1 303.7 °C down to 1 234.4 °C by close to ignition position and from 1 198.7 °C down to 902.5 °C away from ignition position. The value of ion current is slightly higher and the double peak values occur obviously in the signals of ion current, the peak value of ion current is from 146.25 nA up to 160 nA in the vicinity and from 432.5 nA up to 605 nA in the distance. The precursor compression wave in flame propagation tube is appeared ahead to further promote the gas explosion process in DDT. Therefore, roadway should minimize the presence of obstacles.

Key words: gas explosion; flame temperature; precursor pressure wave; subtle thermocouple; ion probe

煤矿瓦斯爆炸事故的预防和控制, 始终是煤炭工业需要认真解决的一个重大问题。瓦斯爆炸时会产生 3 个致命的因素: 火焰锋面、冲击波和井巷大气成分的变化。其中火焰锋面是瓦斯爆炸时沿巷道运

收稿日期: 2013-02-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50834005); 国家科技支撑计划(2009BAK54B03); 中央高校基本科研业务费专项资金(2010YZ05)

作者简介: 解北京(1984-), 男, 中国矿业大学(北京)博士研究生, 主要从事矿井瓦斯灾害防治方面的研究, (E-mail) bjxie1984@163.com。

动的化学反应带和烧热的气体总称。火焰锋面好像沿巷道运动的活塞一样,把甲烷-空气混合气体收集起来并点燃。火焰锋面通过时,可使人的衣服被扯下来,造成大面积皮肤的深度烧伤、呼吸器官甚至食道和胃的粘膜烫伤;烧坏电气设备与电缆,当电缆有电时可能引起二次性的电气火灾;引燃巷道的可燃物造成二次性灾害——火灾^[1]。

近年来,国内外学者对于障碍物对瓦斯爆炸火焰锋面参数影响进行了大量有益的研究。Moen 等人利用火焰速度测试系统对甲烷-空气可燃气体进行的实验表明,重复性障碍物及合适的障碍物高度和间距,化学计量浓度的甲烷-空气混合物的湍流火焰速度很容易达到 $103 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。火焰在螺旋形通道中的传播速度是没有放置障碍物时的 25 倍^[2]。Kuznetsov 利用高速摄影系统和压力测试系统对化学计量浓度的氢-氧混合物在长 1.05 m 的光滑管内传播的 DDT 过程进行了实验研究,研究表明 DDT 转化距离与此压力有关,流动超前于火焰导致形成湍流边界层,而它影响着流动中湍流运动的尺度^[3-4]。

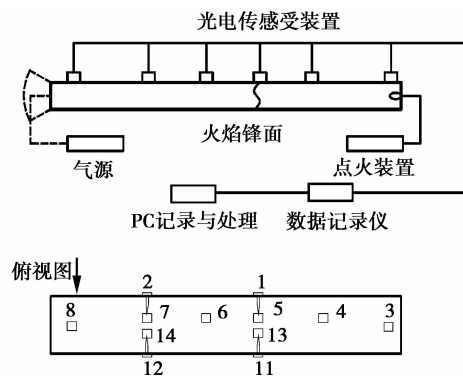
Parsinejad 等和 Elicer-Cortes 等分别采用阴影法和纹影法拍摄了火焰阵面结构的变化过程,从而得到了燃烧速度、温度及压力和化学当量比之间的函数关系^[5-6]。何学秋等通过高速摄影和纹影方法从细观角度研究了网状障碍物对管道内瓦斯爆炸火焰细微结构的影响,认为障碍物的存在引起火焰褶皱度增大,提高了火焰前方未燃气体以及火焰内部流场的湍流强度,促进火焰加速^[7]。桂晓宏等利用压力测试系统和速度测试系统在实验的基础上,讨论了火焰速度与超压之间的关系,研究结果表明瓦斯爆炸的过程中,冲击波阵面的强度与火焰速度有关^[8]。侯万兵等同样利用压力测试系统和速度测试系统研究了障碍物对水平管道气体爆炸影响,得出障碍物的存在对瓦斯爆炸压力具有激励作用,加大了瓦斯的爆炸威力的结论^[9-11]。林柏泉等利用火焰速度测试系统和瓦斯爆炸压力测试系统,比较系统地研究了管内瓦斯爆炸过程中火焰传播状况,结果表明障碍物的存在加剧了火焰传播过程中的湍流现象,而湍流又加速了火焰传播速度,认为火焰阵面前附近区域与管封闭端附近区域温度变化较为陡峭,而火焰阵面后一段区域的温度变化较平缓,且火焰阵面附近温度较高;并且认为有障碍物时火焰厚度常常小于无障碍物情形^[12-13]。王从银、何学秋利用离子探针测试了管内火焰的电离变化情况,认为管内瓦斯爆炸火焰传播具有高内聚力特性,火焰传播

过程中沿管道横断面分布不均匀,主要反应区(发光体)是沿管子底部向前传播的^[14]。刘暄亚等用 K 型热电偶(温度响应时间为 1 ms)测量了 7.5% 甲烷-空气火焰在水雾作用前和水雾作用后的温度,通过温度变化分析了水雾抑制火焰机理^[15]。秦文茜利用压力测试系统和温度测试系统,发现,甲烷爆炸最大压力、上升速率、最高温度和温升速率都随着超细水雾施加量的增加而降低,说明超细水雾能够有效抑制甲烷爆炸^[16]。

但由于测试技术和认识上的限制,对于有障碍物存在时,同时测试瓦斯爆炸火焰锋面温度、压力和离子电流强度参数变化的研究比较少。因此,本文目的是采用压力信号、温度信号及离子电流信号传感器对火焰锋面温度、压力及离子电流强度参数进行测试,分析了障碍物对火焰锋面参数的影响。以期对矿井瓦斯爆炸机理研究有所裨益,对矿井瓦斯爆炸的防治有所帮助。

1 实验方法及实验装置

实验装置及测试系统如图 1 所示。该系统包括瓦斯爆炸火焰实验管道,点火装置,气源,火焰光信号、压力信号、温度信号、离子电流信号传感器及采集记录装置。



1、2—热电偶;3~8—光电传感器;11、12—离子探针;
13、14—压力传感器

图 1 实验装置图

综合运用了光电传感器、微细热电偶、离子探针和压力传感器。具体传感器的位置如下:光电传感器测点布置在点火电极水平距离 0、319、589、862、1 130、1 405 mm 处;在管道 589 mm 与 1 130 mm 处分别布置热电偶、离子探针与压力传感器。其中每一截面处有四个传感器:光电传感器与压力传感器并列在管道的上方,热电偶与离子探针分别从管道的两侧深入管道内部。距点火端 589 mm 处定义

为 1# 位置,距点火端 1 130 mm 定义为 2# 位置。在安装离子探针和热电偶时,要使热电偶的接点和离子探针的探测部位保持在同一平面上,其放置的俯视图,如图 2 所示。

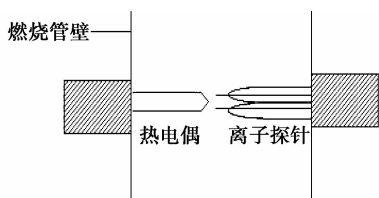


图 2 热电偶和离子探针布置俯视图

瓦斯爆炸火焰实验管道:为全透明的有机玻璃管道,长 1 440 mm,横截面 100 mm×100 mm,壁厚 12 mm。其中点火端封闭,出口采用塑料薄膜弱封闭。

点火装置:采用简易操作型电容储能高压电火花点火装置,其输出能量为 20~100 J。

实验中的预混甲烷-空气混合气气源是用纯甲烷气体(纯度达到 99.99%)和压缩空气配制而成的。

火焰光信号传感器:采用光敏三极管,通过放大电路,可以准确采集到火焰光信号,采集速度达到了 1 μ s。

压力信号传感器:为 CY-YD-203 型压电式压力传感器,具有较高的压力-电荷灵敏度、频率范围宽、工作寿命长等优点,可用于管道压力和爆炸压力的测量。当压力波掠过压力传感器受压面时,产生电荷,经 YE5853A 型电荷放大器进行转换和放大后,由 Hoiki8841 存储记录仪存储。

温度信号传感器:采用 25 μ m 直径的铂铑 13-铂 R 型微细热电偶,测温范围为 0~1 600 $^{\circ}$ C^[17]。配用美国 Omega 公司生产的 EXTT-R/S-24 补偿导线,记录时采用 8937 温度/电压模块。

离子电流信号传感器:自制的离子电流信号传感器采用导电性好的铜丝作为电极,直径为 0.3 mm,两者间距近似为 1 mm。安装时,铜丝要穿过内径为 1 mm 的陶瓷管并露出端部 3 mm,并要保持两电极在同一水平高度。信号处理部分由一个电阻、直流电压源和数据采集仪组成。实验中采用的电阻值为 1 M Ω ,电压源为 18 V 的直流电源,由 Hoiki8841 存储记录仪存储。离子探针结构示意图,如图 3 所示。

采集记录装置:实验采用日置 Hioki8841 存储记录仪对信号进行动态采集,该记录仪器具有 16 个完全隔离通道,采样速率最大为 1 M/s。

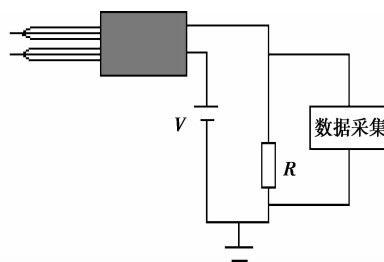


图 3 离子探针的结构示意图

2 实验结果及分析

采用浓度为 10.17% 甲烷-空气预混可燃气,障碍物由 4 个金属薄片组成,每片高 10 mm,间距 200 mm,第一片距点火电极的距离为 589 mm 处。分别测试了管道内有无障碍物两种情况下,不同位置处,瓦斯爆炸火焰锋面温度、压力和离子电流信号变化情况。

2.1 障碍物对火焰锋面温度的影响

无障碍存在时,火焰锋面在两测点处的温度变化情况,如图 4 所示。

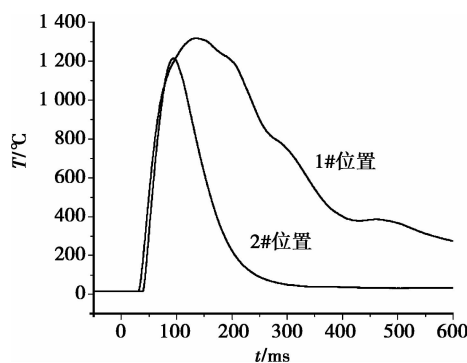


图 4 无障碍物时测点温度曲线

由图 4 可知,安设在 1# 位置与 2# 位置的热电偶所记录的温度值分别为 1 303.7 $^{\circ}$ C 与 1 198.7 $^{\circ}$ C。在 1# 位置的热电偶传感器先触发记录,达到最大值后,缓慢下降,而在 2# 位置的热电偶传感器后触发,达到最大值后迅速下降,且 1# 位置热电偶所测温度略高于 2# 位置所测温度。这是因为火焰点燃后经历了成长、加速到消失三个阶段^[18]。在 1# 位置处的传播火焰处于成长加速期,瓦斯燃料的充分燃烧需要一定的时间,所以温度上升的速率较慢,但是随着火焰向前传播,前方新鲜燃料燃烧产生热量向前传递用来推进加速火焰传播,同时部分热量向后传递,此处热电偶所测温度稳步升高到达最大值后,由于点火端密闭同时距出口端较远,热量散失稍慢一些,温度值缓慢降低,直到火焰消失,温度信号值亦下降为零。由于火焰的加速,到达 2# 位置处

后,部分燃料被带出管道,部分可燃气被带出管口才进一步燃尽,管道中瓦斯燃料的浓度相对降低,反应产热随着泄压迅速降低。

有障碍物存在时,火焰锋面在两测点处的温度变化情况,如图 5 所示。

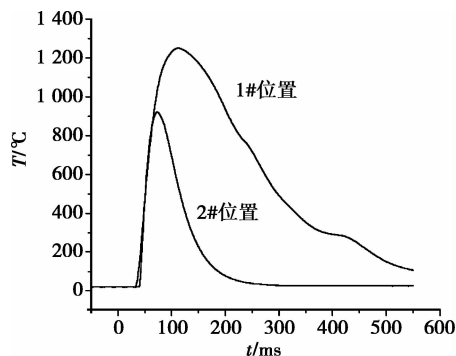


图 5 有障碍物时测点温度曲线

由图 5 可见,有障碍物存在时,在 1# 位置与 2# 位置所记录的温度值分别为 1 234.4 °C 与 902.5 °C。同样在 1# 位置的热电偶传感器先触发记录,达到最大值随后缓慢下降;而在 2# 位置的热电偶传感器后触发,先达到最大值随后迅速下降,主要由于障碍物的存在加速了火焰的湍流化,同时湍流加速了火焰的传播速度,火焰在管道内滞留的时间明显缩短,更多的燃料没有燃尽就被带出了管道。所以两处所测的温度整体略低于无障碍物的情况,靠近出口端 2# 位置更为明显。

2.2 障碍物对火焰锋面离子电流强度的影响

无障碍物存在时,火焰锋面离子电流强度在两测点处的变化情况,如图 6 所示。

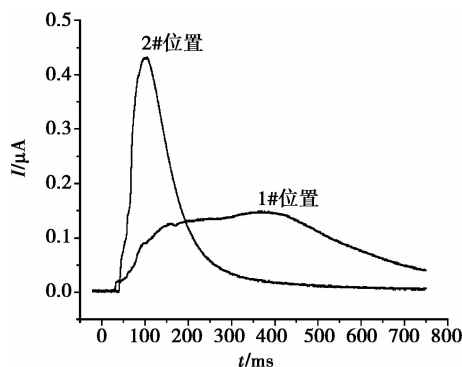


图 6 无障碍物时测点离子电流强度曲线

由图 6 可以看出,离子电流与热电偶趋势上一致,1# 位置的离子电流信号持续时间较长,而 2# 位置处的离子电流信号呈现出明显的突越。但是

1# 位置的离子电流峰值为 146.25 nA 明显小于 2# 位置处的离子电流峰值 432.5 nA。这主要是由于火焰加速后 2# 位置处火焰传播湍流加剧,瓦斯燃气反应过程中产生大量的中间反应离子;与此同时,由于出口处的泄压现象,传播火焰进一步加速。而 1# 位置相对而言火焰传播过程中处于发展加速阶段,火焰向前传播的同时后方火焰并没有熄灭而是维持一种相对缓和燃烧反应状态,所以离子电流信号持续相对较长的时间。

有障碍物存在时,火焰锋面离子电流强度在两测点处的变化情况,如图 7 所示。

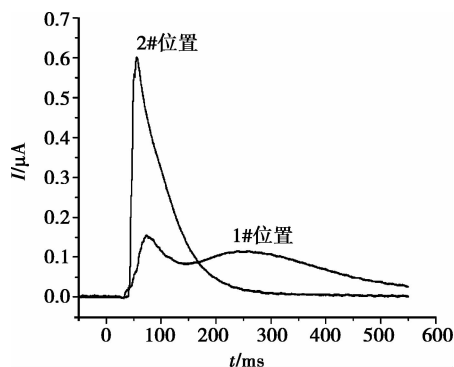


图 7 有障碍物时测点离子电流曲线

由图 7 可见,1# 位置离子探针信号出现了两个明显的峰值,2# 位置离子电流信号在到达最大值前也出现了一个小的突跃。1# 位置离子电流第一个峰值为 160 nA,然后降到 82.5 nA,又升到 112.5 nA,最后才缓慢的降为零值;2# 位置离子电流第一个峰值最大为 560 nA,随后降到 550 nA,然后立即上升到 605 nA,最后快速的降为零值。由于障碍物的存在火焰阵面沿管道传播过程中发生了严重的卷曲变形,湍流加强,速度不断增加导致了离子浓度的急剧变化,反映为离子电流曲线的双峰值现象。且两处所测的离子电流值,明显大于无障碍物情况,尤其是 1# 位置离子电流值。

2.3 障碍物对火焰锋面超压的影响

管内设有重复障碍物的可燃气体爆炸过程往往容易形成爆燃,爆燃是一种带有压力波的燃烧,那么当燃烧阵面后边界有约束或障碍时,燃烧产物就可以建立一定的压力,波阵面两侧就建立起一个压力差,由压力差形成的压力波,习惯上也称之为“前驱压力波”,火焰锋面是在已扰动的介质中传播的^[19]。爆燃波在行进中形成“两波三区结构”^[20]。爆燃是由前驱压力波和火焰阵面共同构成的,是一种不稳定状态的燃烧波,在实际密闭容器中,由于边界约束

增强,压力波强度增大,火焰加速,直至火焰阵面追赶上前驱压力波阵面,此时火焰阵面和压力波阵面合而为一,形成为带有化学反应的冲击波,就是我们通常称的爆轰波。这一过程就是爆燃转爆轰(DDT过程)。

将试验中的有/无障碍物存在下的两个 2# 位置的压力曲线作图。图 8 为无障碍物存在是 2# 位置的压力曲线不同的分布区域图;图 9 为有障碍物存在时 2# 位置的压力曲线不同的分布区域图。

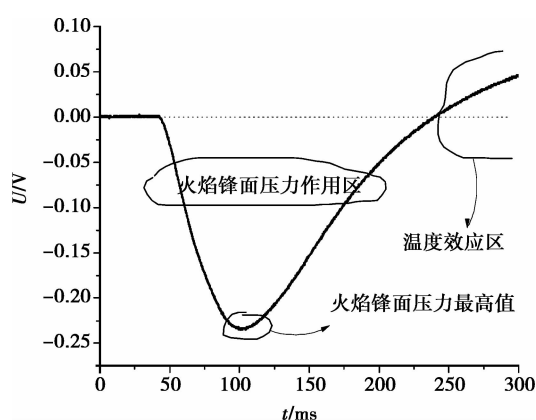


图 8 无障碍物时 2# 位置压力信号区域分布图

由图 8 可见,压力信号仅分为 2 个区域:火焰锋面压力作用区和火焰锋面过后温度效应区。理论上讲,前驱压力波与火焰锋面同时产生并传播,随着距离增大压力波与火焰燃烧锋面分离并将超前与火焰锋面向前传播,压力信号应存在 3 个区域:前驱压力波作用区、火焰阵面压力作用区和火焰锋面过后的温度效应区。而无障碍物存在实验中均未测得前驱压力波,这可能是实验采用的管道不够长,火焰加速不够大,火焰经过压力传感器时,两者还未分离等所致。

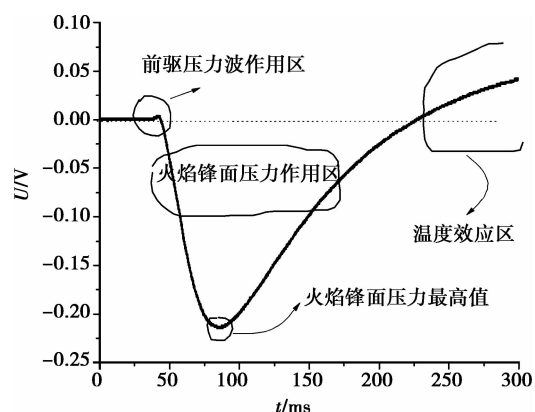


图 9 有障碍物时 2# 位置压力信号区域分布图

由图 9 可见,压力信号可以分为 3 个区域:前驱压力波作用区、火焰阵面压力作用区和火焰锋面过后的温度效应区。有障碍物时,由于火焰湍流的加剧,火焰在出口端附近速度最大,在火焰锋面作用区前方,测得了一个微小的前驱压缩波作用区,障碍物使得前驱压缩波过早的出现。由于实验中所使用的压电式压力传感器的最大量程为 50 MPa,线性度为 1%,所测的前驱压力波值,超出压力传感器的线性范围,其数值的大小不能用仪器的灵敏度来计算。

3 结 论

通过上述实验研究可得出以下结论:

1)障碍物的存在导致瓦斯爆炸火焰湍流程度加大,火焰加速传播,火焰锋面与前驱压力波分离,火焰锋面参数发生明显的变化。

2)管道内浓度为 10.17% 甲烷-空气预混火焰锋面,由于障碍物存在导致微细热电偶所测火焰锋面最高温度值略有降低,分别由靠近点火端位置的 1 303.7 °C 下降到 1 234.4 °C,远离点火端位置的 1 198.7 °C 下降到 902.5 °C。

3)管道内浓度为 10.17% 甲烷-空气预混火焰锋面,由于障碍物的存在,导致离子探针所测的火焰锋面离子电流曲线出现了明显的双峰值,强度明显增大,最高峰值分别由靠近点火端的 146.25 nA 上升到 160 nA,远离点火端的 432.5 nA 上升到 605 nA。

4)由于障碍物的存在,导致火焰锋面前方过早的产生前驱压力波,进一步促进瓦斯爆炸的燃烧转爆轰(DDT)过程的提前实现。

致谢:感谢中国科技大学火灾国家重点实验室孙金华教授、丁以斌博士提供的指导和帮助,特别是对于微细热电偶的无私馈赠。

参考文献:

- [1] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1992.
- [2] Moen I O, Knystautas D R, Lee J H. Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles[J]. Combustion and Flame, 1980, 39(1): 21-32.
- [3] Kuznetsov M, Alekseev V, Matsukov I, et al. DDT in a smooth tube filled with a hydrogen-oxygen mixture[J]. Shock Waves, 2005, 14(3): 205-215.
- [4] Kuznetsov M, Ciccarelli G, Dorofeev S, et al. DDT in methane-air mixtures[J]. Shock Waves, 2002, 12(3): 215-220.

- [5] Parsinejad F, Arcari C, Metghalchi H. Flame structure and burning speed of JP-10 air mixture[J]. *Combust Science and Technology*, 2006, 178: 975-1000.
- [6] Carlos E C J, Ruz C, Hernández R H, et al. Observation of preferred instability modes in a mechanically excited thermal plume using Schlieren visualizations [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2005, 32(3/4): 360-370.
- [7] 何学秋, 杨艺, 王恩元, 等. 障碍物对瓦斯爆炸火焰结构及火焰传播影响的研究[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(2): 186-189.
HE Xueqiu, YANG Yi, WANG Enyuan, et al. Effects of obstacle on premixed flame microstructure and flame propagation in methane/air explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(2): 186-189.
- [8] 桂晓宏, 林伯泉. 火焰速度与超压关系[J]. *淮南工业学院学报*, 1999, 19(4): 14-18.
GUI Xiaohong, LIN Boquan. The relationship between flame speed and superpressure[J]. *Journal of Huainan Institute of Technology*, 1999, 19(4): 14-18.
- [9] 侯万兵, 谭迎新, 袁宏魁. 障碍物影响下瓦斯爆炸压力传播规律研究[J]. *中国煤层气*, 2009, 6(6): 43-46.
HOU Wanbing, TAN Yingxin, YUAN Hongsu. Study on propagation rule of gas explosion under the conditions of barrier [J]. *China Coalbeo Methane*, 2009, 6(6): 43-46.
- [10] 袁宏魁. 管道内障碍物对气体爆炸的影响研究[D]. 太原: 中北大学, 2009.
- [11] 潘鹏飞. 复杂障碍物对瓦斯爆炸影响研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [12] 林柏泉, 张仁贵, 吕恒宏. 瓦斯爆炸过程中火焰传播规律及其加速机理的研究[J]. *煤炭学报*, 1999, 24(1): 56-59.
LIN Boquan, ZHANG Rengui, Lü Henghong. Lvhenghong. Research on accelerating mechanism and flame transmission in gas explosion[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(1): 56-59.
- [13] 林柏泉, 周世宁, 张仁贵. 障碍物对瓦斯爆炸过程中火焰加速和爆炸波的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 1999, 28(2): 104-107.
LIN Boquan, ZHOU Shining, ZHANG Rengui. Influence of barriers on flame transmission and explosion wave in gas explosion[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 28(2): 104-107.
- [14] 王从银, 何学秋. 瓦斯爆炸传播火焰高内聚力特性的试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2001, 30(3): 218-220.
WANG Congyin, HE Xueqiu. Experimental study on cohesive force property of flame from gas explosion[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2001, 30(3): 218-220.
- [15] 刘暄亚, 陆守香, 秦俊, 等. 水雾作用下气体爆炸火焰传播的实验研究[J]. *中国安全科学学报*, 2003(1): 11-17.
LIU Xuanya, LU Shouxiang, QING Jun, et al. The experimental study of the propagation of gas explosion flame influenced by water sprays [J]. *China Safety Science Journal*, 2003(1): 11-17.
- [16] 秦文茜. 超细水雾抑制含障碍物甲烷爆炸的实验研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2011.
- [17] 陈先锋. 丙烷-空气预混火焰微观结构及加速传播过程中的动力学研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2007.
- [18] 汪泉. 管道中甲烷-空气预混气爆炸火焰传播的研究[D]. 安徽: 安徽理工大学, 2006.
- [19] Bjerketvedt D, Bakke J R, Wingerden K V. Gas explosion handbook [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 52(1): 1-150.
- [20] 谢兴华, 李寒旭. 燃烧理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.

(编辑 王维朗)