

doi: 10.11799/ce201902020

点火位置对独头巷道瓦斯爆炸火焰参数影响实验

解北京^{1,2}, 王亮¹, 严正¹

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083;

2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地, 河南焦作 454000)

摘要: 在实验室模拟独头巷道的小型方形管道内, 采用微细热电偶、离子电流传感器和火焰光信号传感器, 测试了闭口终端处和距离闭口终端 200mm、400mm、600mm、800mm 位置处五种点火情况下甲烷-空气预混火焰锋面传播过程中温度、离子电流强度及速度的变化情况。实验结果表明: 闭口终端点火时, 火焰锋面向开口端传播过程中各截面的温度先减小后增大; 距离闭口终端 200mm、400mm、600mm、800mm 处点火时, 火焰传播过程中点火处的温度均最高, 火焰向闭口端传播过程中温度有逐渐降低的趋势。不同位置点火时, 火焰向开口端传播速度是闭口端传播速度的 20 倍左右; 闭口终端处、距离闭口终端 200mm 处点火火焰向开口方向传播过程中, 火焰传播速度均呈现先增大后减小再增大的趋势; 火焰向闭口方向传播过程中, 火焰传播速度较小, 但有逐渐增大的趋势; 离子电流峰值的变化趋势与火焰传播的速度基本吻合, 说明火焰向开口端传播比向闭口端传播更剧烈。

关键词: 瓦斯爆炸; 火焰温度; 火焰速度; 离子强度

中图分类号: TD712⁺.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2019)02-0087-05

Influence of Ignition Location on Flame Parameters of Gas Explosion in Single Heading Tunnel

XIE Beijing^{1,2}, WANG Liang¹, YAN Zheng¹

(1. College of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control (Henan Polytechnic University), Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In the laboratory simulation of a small square pipe with a single head, a micro thermocouple, an ion current sensor and a flame optical signal sensor were used to test the change of temperature, ion current intensity and velocity during the five ignition conditions at the closed terminal and the distance closing terminal, 200mm, 400mm, 600mm, and 800mm. The experimental results show that: during the closed end ignition, the temperature of each section decreases first and then increases when the flame front faces the open end. At the ignition of 200mm, 400mm, 600mm and 800mm at the closed terminal, the temperature of the point fire is the highest during the flame propagation process, and the temperature gradually decreases during the propagation of the flame to the closed end. The propagation speed of the flame to the open end is about 20 times that of the closing end, and the flame propagation speed in the closed terminal and the closing terminal 200mm is increased first and then then increases. In the process of flame propagation to the closed direction, the velocity of flame propagation is small, but there is a trend of gradual increase. The variation trend of the peak value of ionic current is basically consistent with the speed of flame propagation, indicating that the propagation of flame to the open end is more intense than that at the closed end.

Keywords: gas explosion; flame temperature; flame velocity; ionic strength

收稿日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51404277); 国家自然科学基金资助项目(51274206); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014QZ05); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(WS2018B08)

作者简介: 解北京(1984—), 男, 安徽来安人, 博士, 讲师, 主要从事瓦斯灾害防治、煤岩动力灾害治理等方面的研究, E-mail: bjxie1984@163.com。

引用格式: 解北京, 王亮, 严正. 点火位置对独头巷道瓦斯爆炸火焰参数影响实验[J]. 煤炭工程, 2019, 51(2): 87-91.

煤巷瓦斯爆炸是矿山安全生产所面临的主要危害之一^[1]。瓦斯爆炸时会产生三个致命的因素：火焰锋面、冲击波和井巷大气成分的变化。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引燃巷道的可燃物造成二次性灾害—火灾^[2]。独头巷道在掘进工作中不断涌出的瓦斯造成了潜在的危险，其瓦斯爆炸发生的可能性及造成的危害往往较大。瓦斯爆炸的影响因素错综复杂，其中点火位置对于瓦斯爆炸具有极大的影响^[3-5]。

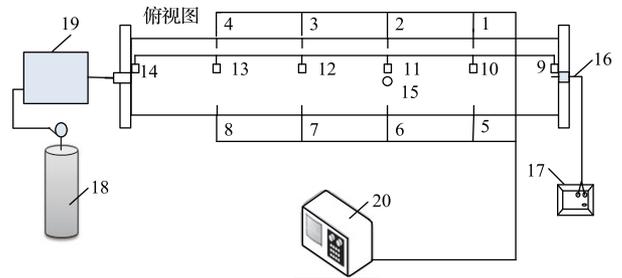
近年来国内学者对于点火位置对独头巷瓦斯爆炸火焰锋面参数开展了相关的研究。冯长根等人运用 AutoReaGas 爆炸仿真模拟器研究了独头巷道中点火位置对瓦斯爆炸后果的影响表明，爆炸静态超压随着距离的增加而减小，爆炸动压随着距离的增大而增大；点火位置对爆炸后果有重要影响，点火位置离闭口端越近，各个测点上所得到的超压越大^[6]。解北京等研究了瓦斯爆炸管道内有无障碍物火焰锋面参数的影响，障碍物存在导致火焰锋面的最高温度略有降低，离子电流强度增大且出现了明显的双峰值，加速了燃烧转爆轰的过程^[7]。罗振敏等测试了在管道点火端封闭，另一端用薄膜弱封闭的实验，其结果表明瓦斯爆炸的火焰传播有一个突变过程，瓦斯浓度越大，达到突变的时间越短^[8,9]。X HE 等利用高速摄像和纹影技术、精细热电偶和离子探针进行了研究，在实验中观察到了特殊的郁金香火焰形成，在转弯处，火焰尖端在管道下部较快速地前进，火焰前部向轴向延伸，发生了稳流火焰向湍流火焰的转变^[10]。

对于不同点火位置独头巷瓦斯爆炸，同时测试瓦斯爆炸火焰锋面温度、速度和离子电流强度等参数的研究比较少。因此，本文目的是采用温度信号、光电信号及离子电流信号传感器对火焰锋面温度、速度和离子电流强度等参数进行测试，分析点火位置对独头巷瓦斯爆炸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 实验设备及装置

采用自行设计搭建的透明瓦斯爆炸实验装置系

统，如图 1 所示。该系统包括瓦斯爆炸方形透明管道，采集记录装置，点火装置，气源，火焰光信号、温度信号和离子电流信号传感器。



1—4—热电偶；5—8—离子探针；9—14—光电传感器；
15—第二截面点火处；16—点火电极（闭口终端点火处）；
17—点火装置；18—甲烷气瓶；19—定容装置；20—采集记录装置

图 1 实验装置图

实验中在同一截面均安装了热电偶、离子探针和光电传感器三种传感器，分别测试火焰阵面温度、传播速度和化学反应强度变化。具体传感器的位置如下：管道距离右端 200mm、400mm、600mm、800mm 处分别定义为第一、第二、第三和第四截面，其中每一截面有三个传感器：热电偶和离子探针分别从管道的两侧深入管道内部，光电传感器附着在管道上侧壁面，9、14 号光电传感器分别布置在管道的两端。在安装离子探针和热电偶时，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。

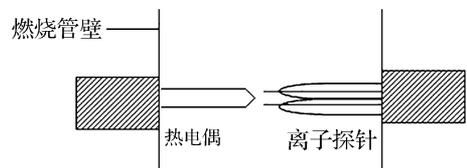


图 2 热电偶和离子探针布置俯视图

瓦斯爆炸方形管道：为全透明的有机玻璃管道，长 1000mm，横截面 80mm×80mm，壁厚 15mm。为模拟独头巷道，其中管道右端封闭，点火时管道左端出口，采用塑料薄膜弱封闭。

采集记录装置：该实验使用 HIOKI 8826 存储记录仪进行数据记录，该记录仪具有 32 个完全隔离通道，可同时进行采样率为 1ms/s 的高速波形采样测量，提供了多种输入单元，可用于各种类型的信号测量。

点火装置：采用的型号为 SFK—300 型发爆器，引爆能力为工业电雷管 200 发（外线电阻总值 ≤

680 Ω , 连接方式: 串并联), 输出电压峰值可达2000V, 为强点火形式。

火焰光信号传感器: 采用光敏二极管模块, 可以检测周围环境的亮度和光强度, 方向性较好可以感知固定方向的光源, 寻光效果好。

温度信号传感器: 采用0.11mm线径的K型铁氟龙极细热电偶, 瞬时测温范围为0~1300 $^{\circ}\text{C}$, 记录时采用HIOKI 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屏蔽信号线的两芯作为电极, 直径为1mm, 两者间距近似为1cm, 保持两电极在同一水平高度。

2 实验结果分析

管道内充入自行配置的浓度为9.5%的甲烷—空气预混气体, 点火位置分别选在闭口端的中心和距离管道闭口端200mm、400mm、600mm、800mm的第一、二、三、四截面的上方5个位置, 带螺纹的点火电极长40mm确保点火处在管道截面的中心位置。测试了在闭口端与各截面处5种不同位置进行点火情况下, 各截面处瓦斯爆炸火焰锋面温度、离子电流强度和光电信号的变化。

2.1 点火位置对火焰温度的影响

不同位置点火时火焰锋面在各截面的温度变化情况, 如图3所示。

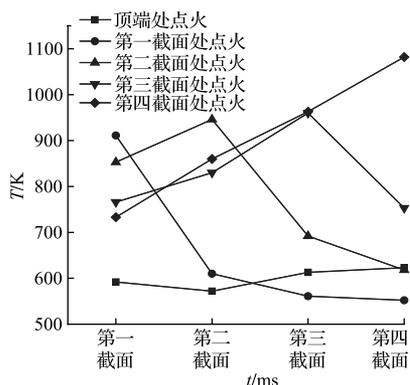


图3 不同位置点火时各截面测点温度曲线

管道内预混气体爆炸所达到的峰值温度是衡量火焰破坏程度的主要参数之一。由图3可知, 闭口终端点火时火焰传播过程中第一、第二、第三和第四截面处热电偶测的峰值温度依次为: 592K、572K、613K和623K。由于实验条件所限, 采用的细热电偶属于接触式测温元件, 测温点大小和火焰接触时间共同决定了温度上升速率和最高幅值, 火焰传播速度较快, 存在着热滞后效应, 最高温度明

显低于瓦斯爆炸火焰理论温度^[11], 但各测点温度变化趋势可以反映相对位置处火焰的温度场变化。预混气体高压脉冲点火爆燃后温度迅速升高, 火焰传播过程中充分燃烧需要一定的时间, 所以火焰传播到第二截面温度出现了轻微下降, 但随着火焰的持续传播, 后方已燃气体产生的温度对前方未燃气体有促进作用, 燃烧更加充分使得第三、第四截面温度不断增高。

在第一、二、三、四截面处点火时, 点火处的温度很高, 分别为911K、946K、960K、1082K, 由于高压脉冲点火后, 火源引爆瓦斯到形成明显的、大强度的火焰传播的时间约为10~30ms, 使得点火处燃烧更为充分, 热量具有一定的积累; 火焰向开口端传播过程中温度下降较快, 向闭口端传播时速度较慢燃烧较为充分, 所以第二截面处点火时, 在距离点火位置均是200mm的第一截面和第三截面, 第一截面比第三截面的温度高161K; 在第四截面点火时, 距离点火位置均是200mm的第二截面比第四截面温度高77K。在第三、四截面处点火时, 火焰向闭口端传播过程中温度有降低的趋势, 这是由于火焰向闭口端传播过程中, 火焰锋面被冲击波反向冲击, 而且锋前未燃混合气体依次经历被火焰锋面压缩—反向拉伸—再压缩的过程, 使得预混气体中甲烷的体积分数被稀释、减少, 导致火焰锋面温度降低^[12]。

2.2 点火位置对火焰传播速度的影响

不同位置处点火时, 各测点间火焰平均速度情况, 见表1。从采集到的光电传感器的数据曲线可知火焰光到达相邻截面处的时间, 由于每个截面处的位置是一定的, 可算出相邻截面的平均速度。

表1 测点间火焰平均速度

点火位置	测点间火焰平均速度 / m/s				
	闭口终端处—第一截面	第一—二截面	第二—三截面	第三—四截面	第四—出口处
闭口终端处点火	—	25	33.33	28.57	33.33
第一截面处点火	0.66	20	25	22.22	28.57
第二截面处点火	0.89	0.49	12.5	15.38	20
第三截面处点火	1.43	0.91	0.4	14	22.22
第四截面处点火	2.16	1.38	0.72	0.29	28.57

由表1可知, 不同位置处点火时, 火焰向两个方向传播时的速度有较大的差异, 向开口端传播的速度是向闭口端传播的速度的20倍左右; 火焰向开口方向传播过程中的速度均在出口处达到最大值, 闭口终端处、第一截面处点火火焰向开口方向传播

过程中,火焰传播速度均呈现先增大后减小再增大的趋势,在出口处的速度分别达到 33.33m/s、28.57m/s,闭口终末端点火时管道内火焰传播的整体速度大于第一截面处点火时传播的速度,第二截面处点火时火焰向开口端传播的整体速度亦小于第一截面处点火时传播的速度;火焰向闭口方向传播过程中的速度均较小,这是由于火焰锋面向闭口端传播时会受到很大的压力,压力波在传播到端头后不断产生的反射压力波会降低火焰传播的速度;随着燃烧产生的气体迅速膨胀使得速度升高,所以第二、

三、四截面处点火时向闭口端传播过程中速度均有逐渐增加的趋势,在闭口端的速度分别为 0.89m/s、1.43m/s、2.16m/s。

2.3 点火位置对火焰离子强度的影响

不同位置点火时火焰锋面在各截面的离子电流信号变化情况,如图 4 所示。采用自制的离子探针探测预混气体燃烧产生的 H^+ 、 OH^- 和 CH_3^- 等中间离子,分析火焰的基本结构及燃烧反应特性,高离子密集区域一般位于反应区偏向燃烧产物的一侧,离子电流的脉动可以反映反应区的火焰特征。

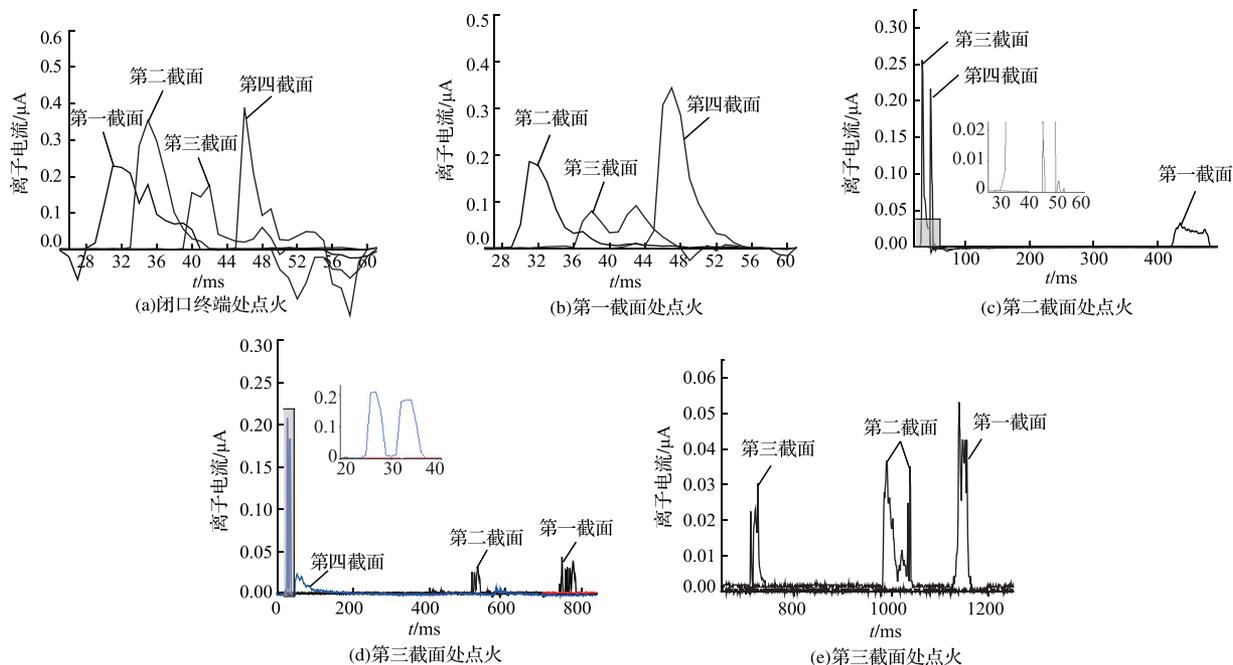


图 4 不同位置点火各截面测离子电流信号变化曲线

由图 4(a)、(b)可见,在闭口终末端点火时各截面离子电流峰值依次为 $0.22\mu A$ 、 $0.35\mu A$ 、 $0.17\mu A$ 和 $0.38\mu A$,第一截面处各截面离子电流峰值依次为 $0.19\mu A$ 、 $0.09\mu A$ 和 $0.34\mu A$,离子电流峰值的大小可以表征火焰燃烧核心区的反应强度,可知闭口终末端点火时各截面火焰燃烧强度先增大再减少再增大,第一截面处点火时第二、三、四截面火焰燃烧强度先减少再增大,变化趋势均与其火焰传播的速度吻合;各截面离子电流曲线在触发上升到峰值这段时间比较平滑陡峭,从峰值下降的过程中较为缓慢且有一定程度的波动,这是由于火焰燃烧核心区经过剧烈燃烧后,火焰尾部的甲烷形状不规则,使离子电流信号在下降过程中存在波动^[13]。

由图 4(c)、(d)、(e)可知,火焰向两个方向传播,第二截面处点火时,第一截面和第三截面的

离子探针触发时间差为 377ms;第三截面处点火时,第二截面和第四截面的离子探针触发时间差为 489ms,第四截面的离子电流曲线有明显的双峰值;火焰向闭口端传播过程中各截面离子电流峰值较小,说明火焰向开口端传播比向闭口端传播更剧烈,离子电流曲线出现明显的震荡,这是由于火焰向闭口端传播过程中速度较小,受到反向压力波的作用锋前未燃混合气体依次经历被火焰锋面压缩—反向拉伸—再压缩,使得离子电流曲线出现不同程度的震荡。

由于离子电流半峰宽度可以表征火焰反应区厚度^[14-16],即火焰燃烧反应区厚度 δ 可以表示为:

$$\delta = V_f \times \Delta t \quad (1)$$

式中, V_f 为瞬时火焰传播速度, m/s; Δt 为离子电流曲线半峰宽度。

2.4 实验结果分析

上述结果可见,不同点火位置对独头巷道瓦斯爆炸火焰锋面参数会呈现不同的传播特征,对于进一步认为巷道瓦斯爆炸火焰传播规律和井下掘进巷道瓦斯爆炸阻隔爆和抑爆措施均有一定参考价值。由掘进头(闭口端)火源导致的瓦斯爆炸火焰易快速向出口(开口端)传播,此类事故应重点考虑采用隔爆水棚等阻隔爆措施防止灾害进一步扩大;由出口端火源导致的瓦斯爆炸火焰温度高,向掘进头传播速度慢,此类事故应采用平时勤洒水的方式沿途吸热,减少火焰热辐射对人体的伤害强度;而由于独头巷中部火源产生的瓦斯爆炸呈现出一部分快速向出口传播,一部分缓慢向掘进头传播的复杂特征,一旦发生危害较大、防治困难,应平时重点沿途检查控制火源,减少此类现象发生几率,从源头上控制。

3 结论

1) 闭口终端点火时,火焰锋面向开口端传播过程中各截面的温度先减小后增大,在第四截面处温度最高达到 623K;距离闭口终端 200mm、400mm、600mm、800mm 处点火时,火焰传播过程中点火处的温度均最高,火焰向闭口端传播过程中温度有逐渐降低的趋势。

2) 不同位置点火时,火焰向开口端传播速度是闭口端传播速度的 20 倍左右;闭口终端处、距离闭口终端 200mm 处点火火焰向开口方向传播过程中,火焰传播速度均呈现先增大后减小再增大的趋势;距离闭口终端 400mm、600mm、800mm 处点火火焰向闭口方向传播过程中,火焰传播速度较小,但有逐渐增大的趋势。

3) 不同位置点火时,各截面离子电流峰值的变化趋势与火焰传播的速度基本吻合,说明火焰向开口端传播比向闭口端传播更剧烈;火焰向闭口方向传播时由于受到方向压力波的作用,离子电流曲线出现明显的震荡。

参考文献:

[1] 徐青云,赵耀江,李永明.我国煤矿事故统计分析及今后预

防措施[J].煤炭工程,2015,47(03):80-82.

- [2] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992:145.
- [3] Ferrara G, Benedetto A D, Salzano E, et al. CFD analysis of gas explosions vented through relief pipes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(2): 654-665.
- [4] 徐景德,周心权,吴兵.瓦斯浓度和火源对瓦斯爆炸传播影响的实验分析[J].煤炭科学技术,2001(11):15-17,12.
- [5] 郑立刚,吕先舒,郑凯,等.点火源位置对甲烷-空气爆燃超压特征的影响[J].化工学报,2015,66(7):2749-2756.
- [6] 冯长根,陈林顺,钱新明.点火位置对独头巷道中瓦斯爆炸超压的影响[J].安全与环境学报,2001(5):56-59.
- [7] 解北京,付玉凯,徐小轩.障碍物对瓦斯爆炸火焰锋面参数的影响[J].重庆大学学报,2013,36(7):108-113.
- [8] 罗振敏,邓军,文虎,等.小型管道中瓦斯爆炸火焰传播特性的实验研究[J].中国安全科学学报,2007(5):106-109.
- [9] 罗振敏,王涛,程方明,等.小尺寸管道内二氧化碳抑制甲烷爆炸效果的实验及数值模拟[J].爆炸与冲击,2015,35(3):393-400.
- [10] X He, S Chen. Flame behaviors of propane/air premixed flame propagation in a closed rectangular duct with a 90-deg bend[J]. the international society for optics and photonics, 2008, 71(26):1-7.
- [11] 陈先锋,张银,许小江,等.不同当量比条件下矿井瓦斯爆炸过程的数值模拟[J].采矿与安全工程学报,2012,29(3):429-433.
- [12] 王涛,文虎,罗振敏,等.敞口端点火条件下甲烷-空气爆炸火焰传播实验[J].西安科技大学学报,2017,37(5):617-622.
- [13] 赵雪林.密闭管道内低浓度甲烷着火及火焰传播特性实验研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [14] Furukawa J, Harada E, Hirano T. Local reaction zone thickness of a high intensity turbulent premixed flame[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1993, 59(1-4):267-280.
- [15] Ju W J. 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.
- [16] Sun J, Dobashi R, Hirano T. Concentration profile of particles across a flame propagating through an iron particle cloud[J]. Combustion & Flame, 2003, 134(4):381-387.

(责任编辑 赵巧芝)