

密闭管内甲烷-煤粉复合爆炸火焰传播规律的实验研究

毕明树 李江波

(大连理工大学 化工学院 辽宁 大连 116024)

摘 要: 在 1.2 m 长竖直爆炸管内对不同初始条件下的甲烷-煤粉混合物进行了弱点火火焰传播实验。分别考察了甲烷浓度、煤粉浓度、煤粉粒径以及点火延迟时间对复合爆炸火焰传播特性的影响。结果表明,煤粉的存在使得纯甲烷在空气中爆炸火焰传播速度显著增大,最大火焰传播速度出现在距离点火端 0.425 m(长径比等于 6)处;火焰传播至长管末端壁面后,爆炸压力达到最大值;甲烷浓度越接近化学当量比,火焰传播速度越快;火焰传播速度随煤粉浓度和点火延迟时间的变化趋势为先增大后减小,最佳煤粉浓度为 500 g/m³,最佳点火延迟时间为 500 ms;在一定粒径范围内,火焰传播速度随着煤粉粒径的增大而减小。

关键词: 甲烷;煤粉;复合爆炸;火焰传播

中图分类号: TD712.7; TD714.5

文献标志码: A

Flame propagation of methane-coal dust explosion in closed vessel

Bi Ming-shu, Li Jiang-bo

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Flame propagation of methane-coal dust compound explosion in different initial conditions in a 1.2 m long vertical pipe was quantitatively investigated. The effect of methane concentration, coal dust concentration, coal dust particle diameter and ignition delay on the flame propagation characterization was experimentally researched. The experimental results show that the flame velocity significantly increases in methane-coal dust explosion compared with methane-air explosion. The maximum flame velocity appears at the distance of 0.425 m from ignition position. Explosion pressure rises with the flame propagation and reaches the maximum pressure when the flame propagates to the end of the pipe. Flame propagation velocity is faster when the methane concentration closes to chemical equivalence ratio. Flame propagation velocity increases first and then decreases with the coal concentration and ignition delay time. The most dangerous condition of flame propagation is 500 g/m³ for dust concentration and 500 ms for ignition delay time. The flame velocity decreases when dust size increases.

Key words: methane; coal dust; compound explosion; flame propagation

煤矿中重大爆炸事故往往是由瓦斯、煤尘共同参与爆炸引起的,相比纯瓦斯爆炸和煤尘爆炸威力更大。关于气体爆炸和粉尘爆炸的火焰加速现象前人已经进行了大量研究,取得了丰硕成果^[1]。罗振敏^[2]采用高速摄录分析系统,研究了不同浓度瓦斯爆炸初期火焰传播特性,指出瓦斯浓度越大,爆炸感

应期越短,火焰传播突变时间越短。T. Johansen^[3], Masri^[4]和 Andrews^[5]和何学秋^[6]通过实验发现有障碍物存在时,瓦斯爆炸火焰传播速度迅速提高,且障碍物位置、阻塞比不同,加速效果不同。浦以康^[7]通过实验给出了扬尘湍流强度、粉尘粒度与浓度、点火能量及方式对粉尘火焰加速过程中所起的作用。刘

晓利^[8]在火焰传播通道上重复设置障碍物,发现障碍物对铝粉火焰有加速作用,加速机理可归因于障碍物诱导的湍流区对燃烧过程的正反馈。近几年,国内外学者开始对气体粉尘复合爆炸过程进行研究。司荣军^[9-10]对瓦斯煤尘爆炸传播规律及影响因素的国内外研究现状进行了综合评述,同时通过不同浓度瓦斯与煤尘共存条件下爆炸实验研究,得到了矿井瓦斯对煤尘的最低着火温度、最小点火能量、爆炸下限浓度、最大爆炸压力和最大压力上升速度等爆炸特性影响的规律。张引合^[11]通过实验揭示了瓦斯煤尘爆炸下限浓度的相互影响关系,指出瓦斯参与情况下煤尘爆炸下限明显降低。秦友花^[12]对障碍物和煤尘对瓦斯燃烧过程中火焰速度的影响进行了研究,结果表明,障碍物和煤尘对管内火焰有明显的加速作用。陈东梁^[13]等利用高速摄像机、超细热电偶、离子电流探针、光电二极管对管道内甲烷 - 煤尘复合体系火焰传播特征和火焰结构进行了分析。费国云^[14]在独头巷道中进行了瓦斯爆炸引起沉积煤尘爆炸试验,从火焰速度和爆炸强度两方面说明煤尘参与爆炸,指出气固两相流爆炸过程复杂,重现性差,为定量分析带来困难。笔者在 1.3 L 密闭容器中进行了甲烷 - 煤尘复合爆炸威力实验,研究了甲烷 - 煤尘配比、煤尘粒径、点火延迟时间对爆炸的影响,在实验条件下找到了甲烷 - 煤尘爆炸的最危险条件^[15]。由于实验装置建立和测试上的困难,人们对于气 - 固两相火焰在管道中传播与加速机理认识还处于探索阶段,对管内甲烷 - 煤粉复合爆炸火焰传播规律还未进行过系统研究。

本文通过改进的实验装置,研究密闭长管内甲烷 - 煤粉复合体系火焰传播过程,探讨两相火焰传播规律及加速机理,获得火焰速度与甲烷浓度、煤粉浓度、煤粉粒径、点火延迟时间之间的相互关系。

1 实验装置与测试系统

实验系统由爆炸管、扬尘系统、点火系统、控制系统、测试与数据采集系统组成。爆炸管内径为 0.068 m,长 1.2 m,竖直放置,底部装有扬尘系统。扬尘系统由储气室、电磁阀、止回阀、扬尘喷嘴、扬尘槽及气路组成,如图 1 所示。其中储气室体积为 0.68 L。

为了在爆炸管内形成相对均匀的甲烷 - 煤粉混合物,储气室内按分压原理预先配置相应浓度的甲烷空气,扬尘前,爆炸管内抽真空,通过电脑控制电磁阀开关,可燃气体吹起粉尘一起进入爆炸管内。

实验测试系统分为两组:一组是火焰信号测试,一组是压力信号测试。其中火焰测点 10 个,压力测

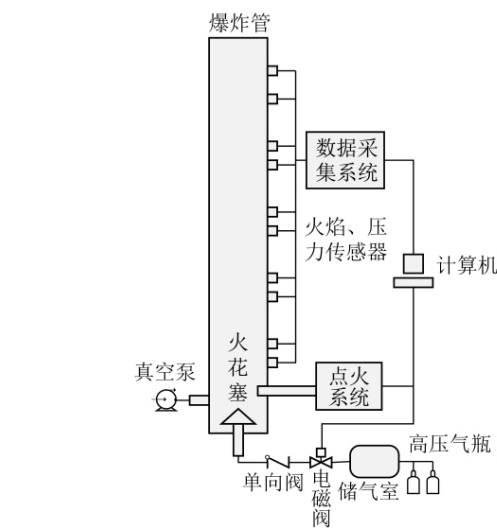


图 1 爆炸实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of explosion system

点 2 个。火焰信号测量采用光敏二极管探测,传感器前方无火焰通过时,二极管不导通;火焰到达时,二极管导通。压力测量选用 MD - HF 压阻式传感器,量程 2 MPa。

矿井下甲烷煤粉爆炸事故一般都是由弱点火引起的,所以本实验点火系统采用 12 V 蓄电池通过点火线圈在火花塞两端产生高压放电,点火能量小,实现了实验室条件下的弱点火,摆脱强点火方式对管内初始爆炸参数的影响。

2 实验结果与讨论

2.1 火焰信号测试结果

表 1 是火焰传感器测得的甲烷空气爆炸与甲烷 - 煤粉复合爆炸火焰传播轨迹的一组典型结果,表中 L 为火焰传感器到点火端面的距离, t 为火焰面到达火焰传感器的时间, v_f 为火焰传播的平均速度。

表 1 火焰信号测试结果
Table 1 Test results of flame signals

火焰测点	L/m	甲烷空气爆炸		甲烷 - 煤粉复合爆炸	
		t_1/ms	$v_f/(m \cdot s^{-1})$	t_2/ms	$v_f/(m \cdot s^{-1})$
1	0.175	20.1	3.4	18.5	15.2
2	0.225	34.8		20.1	
3	0.400	53.2		29.5	
4	0.450	59.5	7.9	31.9	20.9
5	0.625	82.8		37.9	
6	0.675	93.8	4.6	43.2	9.4
7	0.850	167.3		56.5	
8	0.900	190.5	2.2	62.7	8.1
9	1.075	352.7		89.8	
10	1.125	395.3		113.6	

图 2 和图 3 分别给出了甲烷空气爆炸、甲烷-煤粉复合爆炸的火焰轨迹和火焰速度沿管长变化情况。由图 2、3 可知,低浓度甲烷添加煤粉后,由于煤粉参与爆炸,放热速率增大,火焰到达各测点的时间大大提前,火焰传播速度也显著增大。在密闭长管内,甲烷空气爆炸与甲烷煤粉复合爆炸火焰传播规律相似,爆炸初期,火焰加速很快,达到速度峰值后,又以很大的速率衰减,末端火焰速度降低到 1 m/s (层流火焰速度) 以下。火焰速度峰值总是出现在距离点火端 0.425 m ($L/D=6$, D 为长管内径) 左右,与爆炸管内混合物的初始状态无关。分析原因:混合物被点燃后,火焰面呈球形向外扩展,火焰面不断扩大,层流火焰很快变成湍流火焰,火焰加速明显,高速火焰又增强火焰前端未燃气体的流动速度和湍流度,速度达到最大值后,由于壁面散热效应及压力波抑制作用,火焰速度迅速下降。

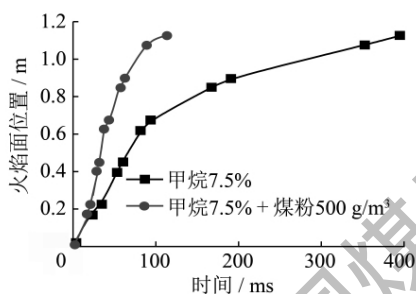


图 2 火焰面移动轨迹

Fig. 2 Flame front location at different times

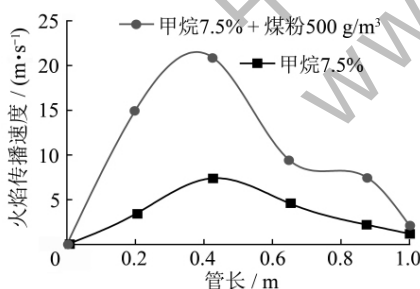


图 3 火焰速度沿管长变化情况

Fig. 3 Variation of the flame velocity with tube length

2.2 管内爆炸压力与火焰传播的关系

图 4 是在甲烷浓度 7.5% 、煤粉浓度 500 g/m^3 、粒径 $50 \mu\text{m}$ 、点火延迟时间 500 ms 条件下火焰面位置和爆炸压力随时间的变化曲线。由图可知,甲烷-煤粉被点燃后,火焰向上传播,压力迅速上升,经过大约 150 ms ,火焰传播至管末端壁面 1.2 m 处,此时爆炸压力基本达到最大值。爆炸前期,火焰加速明显,压力上升加快,火焰传至管末端壁面时,速度很小,压力上升也变的缓慢,压力最终达到最大值。

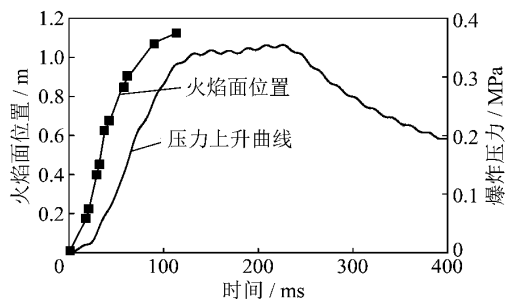


图 4 火焰面位置和爆炸压力随时间的变化曲线

Fig. 4 The change curves of flame front location and explosion pressure with time

2.3 甲烷浓度对复合爆炸火焰传播特性的影响

图 5 给出了在煤粉浓度 500 g/m^3 、粒径 $50 \mu\text{m}$ 、点火延迟时间 500 ms 条件下不同甲烷浓度对管内复合爆炸火焰传播的影响。图中每个数据点均为 3 次相同条件下实验结果的平均值。由图 5 可知,保持煤粉浓度、粒径和点火延迟时间不变条件下,甲烷浓度越小,复合爆炸火焰传播速度越小。甲烷浓度为 6% 时,火焰速度最大为 8 m/s ; 甲烷浓度越接近化学当量比,火焰传播速度越大,甲烷浓度为 9.5% 时,火焰速度最大达到 35 m/s 以上。这主要是由于弱点火条件下,爆炸初期气相燃烧占主导作用,甲烷浓度越低,放出热量有限,无法点燃更多的煤尘参与爆炸,所以无法维持火焰加速传播,各测点火焰速度相对较小。

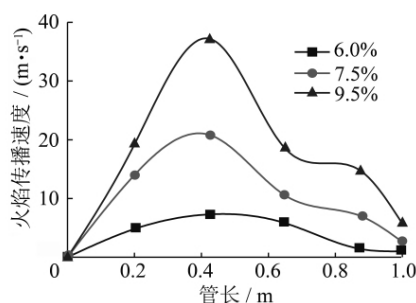


图 5 甲烷浓度对管内火焰速度的影响

Fig. 5 The effect of CH_4 concentration on the velocity of flame propagation

2.4 煤粉浓度对复合爆炸火焰传播特性的影响

图 6 和图 7 给出了在煤粉粒径 $50 \mu\text{m}$ 、点火延迟时间 500 ms 条件下煤粉浓度对管内火焰传播速度及最大火焰速度的影响。

由图 6 可知,在甲烷浓度为 7.5% 条件下,煤粉浓度为 300 g/m^3 时,火焰沿管道传播虽有加速趋势,但加速有限,到 0.425 m 处速度为 10 m/s 左右;当煤粉浓度增加到 500 g/m^3 时,火焰加速至 20 m/s 以上;煤粉浓度继续增加,加速效果反而下降。说明粉尘浓度超过特定值时,其对火焰传播有削弱作用,因为煤

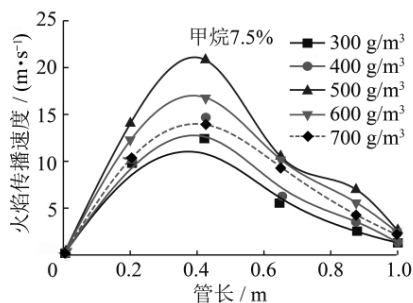


图6 煤粉浓度对管内火焰传播速度的影响

Fig. 6 The effect of dust concentration on the velocity of flame propagation

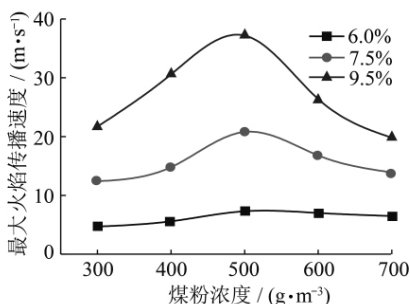


图7 煤粉浓度对最大火焰传播速度的影响

Fig. 7 The effect of dust concentration on the maximum flame velocity

粉浓度越高,煤尘粒子必须吸收更多的热量分解产生气体才能参与爆炸,而空气量一定,导致煤粉不完全燃烧,放热量减少。

由图7可知,不同甲烷浓度条件,煤粉浓度对最大火焰传播速度的影响存在一定差异。在贫燃范围内($<9.5\%$),甲烷浓度越接近化学当量比(9.5%),煤粉浓度变化对最大火焰速度的影响越大;甲烷浓度越小,煤粉浓度变化对火焰传播影响越小。

2.5 煤粉粒径对复合爆炸火焰传播特性的影响

图8和图9给出了在煤粉浓度 500 g/m^3 、点火延迟时间 500 ms 条件下,3种煤粉粒径对管内火焰传播及最大火焰速度的影响。由图可知,粉尘粒径对火焰传播加速现象作用十分明显。由图8可知,甲烷浓度、煤粉浓度一定时,煤粉粒径越小,火焰传播速度的增大越显著。因为粒径越小,煤粉粒子数目越多,粒子总表面积增大,当煤粉被点燃后,煤粉粒子与氧气接触更为充分,加速了粒子与氧的反应,增加了煤粉化学活性,使煤粉燃烧更快。由图9可知,在不同甲烷浓度条件下,甲烷-煤粉复合爆炸各测点火焰速度均随粒径的增大而减小。

2.6 点火延迟时间对复合火焰传播特性的影响

点火延迟时间是扬尘系统的开关与点火之间的延迟,对粉尘爆炸影响体现在两方面:一是初始湍流

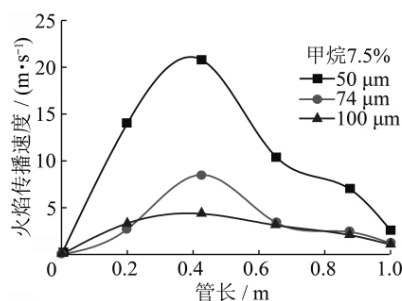


图8 煤粉粒径对管内火焰传播速度的影响

Fig. 8 The effect of dust size on the velocity of flame propagation

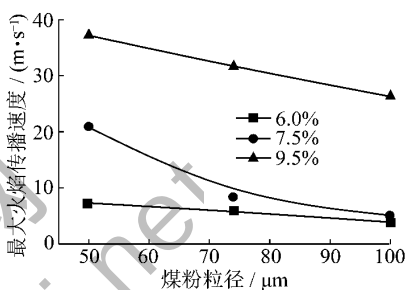


图9 煤粉粒径对最大火焰速度的影响

Fig. 9 The effect of dust size on the maximum flame velocity

强度不同;二是管内粉尘分散均匀度不同。

图10和11给出了在煤粉浓度 500 g/m^3 、粒径 50 μm 条件下点火延迟时间对管内火焰传播速度及最大火焰速度的影响。

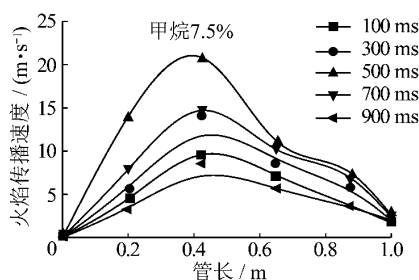


图10 点火延迟时间对管内火焰速度的影响

Fig. 10 The effect of ignition delay time on the velocity of flame propagation

由图可知,在该实验条件下,甲烷-煤粉复合爆炸点火延迟时间为 500 ms 时火焰速度达到最大值。其原因可能在于,扬尘过程中,粉尘经高压气体喷撒入密闭空间,粒子由于重力作用而发生沉降,因此粉尘浓度只能维持很短时间。本实验条件下,爆炸管较长,点火延迟时间低于 500 ms ,煤粉粒子无法有效充满整个爆炸空间,颗粒分布不均匀。点火延迟时间高于 500 ms ,煤尘粒子则由于重力作用,无法维持颗粒悬浮状态,整体均匀度和初始湍流度迅速下降,影响煤粉颗粒的燃烧。

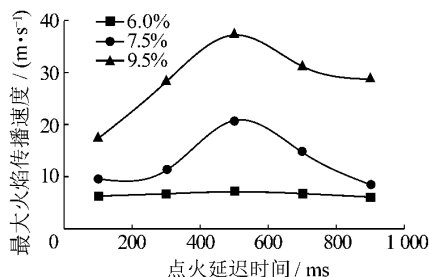


图 11 点火延迟时间对最大火焰速度的影响

Fig. 11 The effect of ignition delay time on the maximum flame velocity

3 结 论

(1) 低浓度甲烷添加煤粉后,复合爆炸火焰传播速度相比纯气体爆炸加速明显。本实验条件下,在距离点火端 0.425 m (长径比 $L/D=6$) 处火焰速度达到最大值。

(2) 管内爆炸压力上升与火焰传播有关。火焰速度越快,压力上升越快;火焰传播至管末端壁面后,爆炸压力达到最大值。

(3) 甲烷浓度、煤粉浓度、煤粉粒径、点火延迟时间对复合爆炸火焰传播影响显著。甲烷浓度越接近化学当量比,火焰传播速度越快;煤粉浓度越接近 500 g/m^3 ,火焰传播速度越快;在一定煤粉粒径范围内,粒径越小,火焰传播速度越快;点火延迟时间越接近 500 ms,火焰传播速度越快。

参考文献:

- [1] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
Zhao Hengyang. Gas and dust explosion theory [J]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.
- [2] 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, 17(5): 106–109.
Luo Zhenmin, Deng Jun, Wen Hu, et al. Experimental study on flame propagation characteristics of gas explosion in small-scale duct [J]. China Safety Science Journal 2007, 17(5): 106–109.
- [3] Craig T Johansen, Gaby Ciccirelli. Visualization of the unburned gas flow field ahead of an accelerating flame in an obstructed square channel [J]. Combustion and Flame 2009, 116(2): 405–416.
- [4] Masri A R, Ibrahim S S, Nehzat N, et al. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 21(1–3): 109–116.
- [5] Andrews G E, Herath P, Phylaktou H N. The influence of flow blockage on the rate of pressure rise in large L/D cylindrical closed vessel explosions [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1990, 3(3): 291–302.
- [6] 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 of premixed flame microstructure and flame propagation in methane/air explosion [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 186–189.
- [7] 浦以康, 胡 山, 李可意. 粉尘火焰加速现象的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2): 97–106.
Pu Yikang, Hu Shan, Li Keyi. Experimental studies of the phenomena of dust flame acceleration [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(2): 97–106.
- [8] 刘晓利, 李鸿志, 叶经方, 等. 障碍物对铝粉火焰加速作用的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(1): 11–19.
Liu Xiaoli, Li Hongzhi, Ye Jingfang, et al. An experimental study on the accelerating effect of the aluminum dust flame with obstacles [J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(1): 11–19.
- [9] 司荣军, 王春秋, 张延松, 等. 瓦斯煤尘爆炸传播研究综述及展望[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(1): 67–69.
Si Rongjun, Wang Chunqiu, Zhang Yansong, et al. Review of fire damp explosion propagations [J]. Coal Science and Technology, 2007, 34(1): 67–69.
- [10] 司荣军, 王春秋. 瓦斯对煤尘爆炸特性影响的实验研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(12): 86–91.
Si Rongjun, Wang Chunqiu. Research on emulator system of mine gas and coal dust explosion propagation [J]. China Safety Science Journal 2006, 16(12): 86–91.
- [11] 张引合, 张延松, 任建喜. 煤尘对低浓度瓦斯爆炸的影响研究[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(6): 20–21.
Zhang Yinhe, Zhang Yansong, Ren Jianxi. Effect of coal dust on fire damp explosions [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2006, 33(6): 20–21.
- [12] 秦友花, 陆守香, 于春红, 等. 障碍物与煤尘对气体火焰传播过程影响的实验研究[J]. 煤矿安全, 1999(10): 41–43.
Qin Youhua, Lu Shouxiang, Yu Chunhong, et al. The experimental study of influence of obstacles and coal on the flame propagation [J]. Safety in Coal Mines, 1999(10): 41–43.
- [13] 陈东梁, 孙金华, 刘 义, 等. 甲烷-煤尘复合体系燃烧特性及火焰结构的实验研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(4): 494–499.
Chen Dongliang, Sun Jinhua, Liu Yi, et al. Experimental research on combustion characteristics and flame structures of methane-coal dust system [J]. Natural Science Process, 2007, 17(4): 494–499.
- [14] 费国云. 独头巷道中瓦斯爆炸引爆沉积煤尘的试验[J]. 煤炭工程师, 1997(4): 16–20.
Fei Guoyun. Experiments on detonation of deposited coal dust by gas explosion in a blind roadway [J]. Coal Engineer, 1997(4): 16–20.
- [15] 毕明树, 王洪雨. 甲烷-煤尘复合爆炸威力实验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 784–788.
Bi Mingshu, Wang Hongyu. Experiment on methane-coal dust explosions [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 784–788.