

文章编号: 1001-1986(2008)03-0023-04

活化水蒸气控制瓦斯爆炸的实验

罗振敏

(西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 在自行设计的内径 88 mm、总长 1 600 mm 的小型瓦斯爆炸控制实验装置上, 采用高速摄影分析系统, 对活化水蒸气控制瓦斯爆炸进行了实验研究。普通水经过高能物理方法处理后, 可转变成比普通水分子团直径小一半的由 5~8 个水分子组成的小分子团活化水, 然后通过水蒸气发生器转化成活化水蒸气, 在瓦斯爆炸过程中起到了均相等径抑制作用和纳米活化控制作用。实验结果表明, 加入活化水蒸气后的瓦斯爆炸感应期明显延长, 火焰在管道中的传播时间延长, 火焰平均传播速率减小, 控爆效果明显提高。

关 键 词: 活化水蒸气; 爆炸感应期; 速率; 控制

中图分类号: TD712.72 文献标识码: A

Experiment study on controlling gas explosion by active steam

LUO Zhen-min

(School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The detonation propagation of active steam controlling gas explosion has been studied on a small-sized experimental installation with 88 mm in inner diameter and 1 600 mm in length. And character of flame propagation was monitored by high speed photographic instrument. Treated by high-power physical methods, common water can change into active water with small molecules group; the active water, whose diameter is half as that of common water molecule, is composed of five to eight water molecules, then it turns to active steam after going through steam generator, functions as homogeneous-phase, equal-diameter inhibitor and nanometer-active controller during procedure of gas explosion. The result shows that when activation steam is injected into experimental pipe, induction period and flame propagation time in the pipe of gas explosion was prolonged, and mean rate of flame propagation were reduced remarkably. The effect of controlling explosion of activation steam is high in comparison with that of common steam.

Key words: active steam; induction period; rate; controlling

瓦斯, 主要成份为 CH_4 , 是一种能够燃烧和爆炸的气体, 以吸附和游离两种形态存在于煤层和煤系岩层中。从热力学模型^[1]角度看, 瓦斯爆炸原因在于采矿活动, 岩石膨胀等导致气—煤体中能量的增加。从化学动力学^[2]角度观察, 瓦斯爆炸的化学本质是甲烷和空气组成的可爆混合气体在火源诱发下发生的一种剧烈的自由基氧化链式反应。整个瓦斯爆炸化学过程的关键是形成了活性极强的自由基 $[\text{O}]$ 、 $[\text{H}]$ 、 $[\text{CH}_3]$ 、 $[\text{OH}]$ 、 $[\text{HO}_2]$ 、 $[\text{HCO}]$ 等。目前国内外学者对瓦斯爆炸过程、传播规律及防治对策进行了大量研究工作, 在一定程度上为指导瓦斯爆炸预防工作奠定了基础^[3-5]。

实验研究表明, 超细水雾具有较高的吸热效率

和吸收、阻隔辐射热的作用^[6-8], 而且水在瓦斯爆炸中不仅可以起到冷却降温的物理抑制作用, 还能作为第三体直接干预爆炸反应区的化学反应, 与爆炸过程中产生的自由基反应, 起到化学抑制的作用^[9]。水具有对人体无害, 来源广, 成本低, 不造成环境污染的优点, 因此以水为主要载体的抑爆剂是一种清洁的瓦斯爆炸抑制剂。作者所在课题组曾就超细清水雾及一定浓度的超细 NaHCO_3 、 NaCl 、 KCl 水雾对瓦斯爆炸的控制作用进行了实验研究^[10], 取得了较好的控爆效果。这里是在前期实验研究基础上, 采用高速摄影分析系统, 在自行设计的小型瓦斯爆炸实验装置上进行的活化水蒸气对瓦斯爆炸控制的实验研究。

1 实验系统构成

实验系统主要由点火控制系统、石英玻璃爆炸管道、多通道数据采集系统、活化水蒸气发生系统等 4 部分组成。其构成方式见图 1。

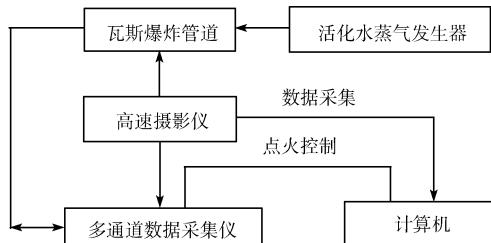


图 1 瓦斯爆炸控制实验系统

Fig.1 Experiment system of gas explosion control

1.1 瓦斯爆炸实验管道

实验管道采用内径 88 mm, 壁厚 6 mm, 总长 1 600 mm 的石英玻璃管。高速摄影仪对管道的拍摄长度为 1 430 mm, 管道的有效容积为 8 860 mL。管道点火端封闭, 另一端用聚乙烯薄膜封闭, 在甲烷空气混合气体爆炸时作为泄压口泄压。应用 SP3430 高精度气相色谱分析仪测出不同浓度实验的气体组成情况。

1.2 多通道数据采集系统

实验过程通过多通道数据采集仪实现同步控制, 在点火的同时启动高速摄影仪进行同步拍摄。高速摄影仪为日本生产的 FASTCAM Super 10 K Series 高速摄影机。拍摄速度最高可达 1 000 fps, 能精确拍摄到瓦斯爆炸火焰传播过程的系列图像, 充分表现出火焰在爆炸管道中传播速率的变化和火焰强度的变化。实验中采用的拍摄速度为 500 fps。

1.3 点火控制系统

包括点火装置、控制器和软件控制系统, 高速摄影机连接到控制器上。当点火起爆时, 控制器会自动触发高速摄影机, 在起爆的同时进行拍摄。点火器的能量 3 J, 点火器操作后其反应时间为 20 ms。

1.4 活化水蒸气发生系统

包括水蒸气发生器和活水器, 用高能物理方法通过特定的频率和磁场对水进行充分良好的处理, 将自

来水的 13 个以上水分子组成的大分子团, 变成由 5~8 个分子组成的小分子团水, 甚至单个水分子。

2 实验条件及过程

2.1 爆炸极限的确定

爆炸容器的材质、形状和尺寸影响着瓦斯爆炸极限。在标准条件下甲烷爆炸极限是 5%~14%^[1]。根据实际条件对标准数据进行了适当修正, 得到了自制实验装置的甲烷爆炸极限为 4.95%~10.65%。爆炸下限与理论值吻合比较好, 但爆炸上限有一定差距。究其原因, 主要有二, 一是由于容器尺寸小, 反应中的游离基碰撞器壁丧失活性的机会多, 这样会使反应速度降低, 反应时间延长, 热损失增大, 最终导致混合气爆炸范围缩小; 二是由于火花塞较短, 火花塞靠近管道的壁面, 此时的壁面散热作用会影响到点火能量。点火能量越低, 爆炸极限范围越小。

2.2 实验条件及过程

实验室的环境温度为 19~22 ℃, 湿度为 70%~85%, 实验管道中甲烷的体积浓度为 9.5%。

实验过程中先以 200 mL/min 的速率通入甲烷气体, 循环后, 再通入一定量的活化水蒸气, 然后采用高速摄影机拍摄爆炸火焰在实验管中的传播过程。通过对拍摄的图片进行先期编辑和处理后, 分析活化水蒸气对瓦斯爆炸感应期及火焰传播速率的影响。

3 实验结果与分析

3.1 爆炸感应期

表 1 中的数据为减掉点火系统点火延迟时间 20 ms 后的时间。可以看出, 加入活化水蒸气后的瓦斯爆炸感应期明显大于未加入水蒸气的瓦斯爆炸感应期, 并且随着通入水蒸气量的增加, 瓦斯爆炸感应期也有明显增加。不同实验条件下瓦斯爆炸感应期由大到小的次序是: 8 mL 活化水蒸气 > 8 mL 普通水蒸气 > 4 mL 活化水蒸气 > 4 mL 普通水蒸气蒸气 > 2 mL 活化水蒸气 > 2 mL 普通水蒸气 > 无水蒸气。

表 1 不同水蒸气下瓦斯的爆炸感应期

Table 1 Induction period of gas explosion with different kinds of steam

水蒸气 类型	无水蒸气	2 mL 普通水蒸气	4 mL 普通水蒸气	8 mL 普通水蒸气	2 mL 活化水蒸气	4 mL 活化水蒸气	8 mL 活化水蒸气
爆炸感应期 /ms	24	40	58	105	54	72	116

3.2 火焰平均传播速率

实验测得的爆炸火焰在管道中的传播时间和平均传播速率如表2所示。由表2可以看出，加入水蒸气后，火焰在管道中的传播时间延长，速率有所减小。

表2 不同水蒸气下瓦斯爆炸火焰平均传播速率

Table 2 Mean rate of flame propagation of gas explosion with different kinds of steam

水蒸气类型	火焰在管道内的传播时间/ms	火焰平均传播速率/m·s ⁻¹
无水蒸气	56	25.9
2 mL 普通水蒸气	64	24.8
4 mL 普通水蒸气	66	24.6
8 mL 普通水蒸气	66	24.2
2 mL 活化水蒸气	70	24.6
4 mL 活化水蒸气	74	23.5
8 mL 活化水蒸气	82	21.1

3.3 火焰速率变化趋势

根据高速摄影机拍摄的图片，由拍摄频率500fps，可以知道每张照片之间的时间间隔。通过实际火焰锋面之间的距离比上时间间隔，就可以知道这段时间的平均速率。根据采用的频率，确定时间间隔为4 ms。

$$\text{各个时段传播速率} = \frac{\text{火焰长度像素数} \times \text{爆炸管道实际长度}}{\text{爆炸管道长度像素数} \times \text{传播时间} 2\text{ms}}$$

由表3、图2、图3可见，不同实验条件下瓦斯爆炸火焰传播速率由小到大的次序是：8 mL活化水蒸气<8 mL普通水蒸气<4 mL活化水蒸气<4 mL普通水蒸气<2 mL活化水蒸气<2 mL普通水蒸气<无水蒸气，这与相应实验条件下瓦斯爆炸感应期的变化规律基本一致。

在瓦斯浓度相同(通气时间4 min, 流量0.02 L/m)和点火能量不变的情况下，分别通入8 mL的普通

表3 不同水蒸气下瓦斯爆炸火焰传播速率

Table 3 Rate of flame propagation of gas explosion with different kinds of steam

时间/ms	无水蒸气	2 mL 普通水蒸气	4 mL 普通水蒸气	8 mL 普通水蒸气	2 mL 活化水蒸气	4 mL 活化水蒸气	8 mL 活化水蒸气
40	3.5	18.6	7.9	6.7	8.1	7.9	6.4
44	7.2	23.4	19.5	14.3	25.8	21.5	15.2
48	8.3	25.7	12.8	19.3	23.4	17.5	14.3
52	10.2	37.5	36.2	21.3	42.3	28.5	21.9
56	13.6	44.2	11.3	18.7	16.2	16.9	15.8
60	15.5	38.5	32.4	30.1	12.3	12.8	17.2
64	21.1	48.6	32.5	39.2	10.5	15.6	12.8
68	24.4	37.1	34.5	29.8	13.5	19.8	20.9
72	31.2	18.2	37.2	28.6	14.8	26.5	20.4
76	36.1	38.9	33.5	39.1	35.6	29.5	16.5
80	43.6	59.8	48.7	56.7	38.9	40.3	25.6
84	54.2	69.5	70.5	58.4	45.2	35.1	32.1
88	69.5	57.2	42.3	49.7	57.2	48.2	35.3
92	80.2	69.6	75.1	48.2	67.2	58.3	39.8

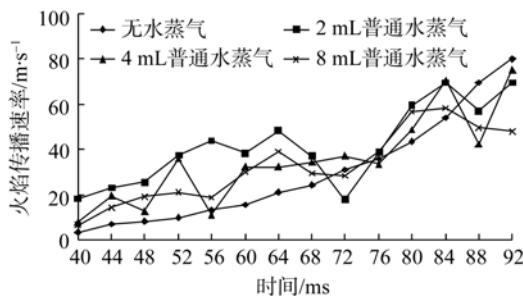


图2 普通水蒸气中瓦斯爆炸火焰速率变化趋势

Fig. 2 The diagram of curve about rate of flame propagation of gas explosion with common steam

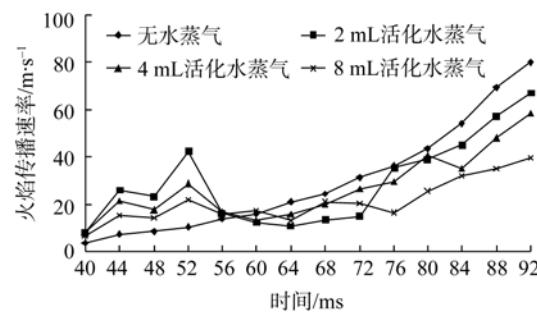


图3 活化水蒸气中瓦斯爆炸火焰速率变化趋势

Fig. 3 The diagram of curve about rate of flame propagation of gas explosion with active steam

水蒸气和活化水蒸气进行抑爆实验，所拍得在爆炸触发后，在相同时间点的火焰传播过程见图 4。

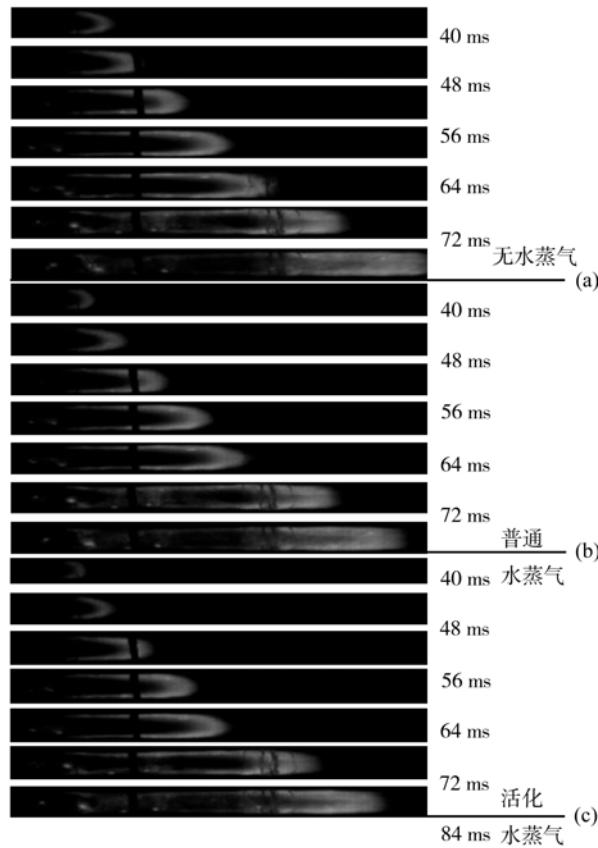


图 4 不同水蒸气下瓦斯爆炸过程中的火焰传播

a——无水蒸气；b——普通水蒸气；c——活化水蒸气

Fig. 4 The flame propagation of gas explosion with different kinds of steam

3.4 活化水蒸气对瓦斯爆炸的控制作用

大自然中的水是由许许多多水分子缔合而成的链式簇团。水分子中氧原子的电负性很强，原子半径较小，水分子间存在氢键。用高能物理方法通过特定的频率和磁场对水进行充分良好的处理，将自来水的 13 个以上水分子组成的大分子团，变成了由 6 个分子组成的小分子团水，甚至单个水分子，从而改变了天然水的结构(图 5)，成为弱碱性小分子团活化水。碱性活化水的水分子团直径比普通分子团直径小一半，是分子团最小的水。分子团小的水，带有大量动能，运动速度快，渗透及溶解能力强。小分子团水能比大分子团水更好更快地与爆炸时产生的自由基结合，使自由基销毁，进而使瓦斯爆炸的链反应终止，降低反应能力。

活化水通过水蒸气发生器转化为活化水蒸气，体积急剧增大(1 700 倍)，能够大大稀释可燃气体和助燃的空气在燃烧区内的浓度，且与爆炸时产生的自由基的碰撞机率增加，从而增加了反应几率。另

外，水蒸气分子的直径小于水分子直径，与甲烷的分子直径接近。这样，纳米活化水蒸气对瓦斯爆炸的控制作用除了文献[6–9]的研究结论之外，这里的实验研究结果还表明，活化水蒸气在瓦斯爆炸过程中还起到了均相等径抑制作用、纳米活化控制作用，使得瓦斯爆炸感应期明显延长，火焰在管道中的传播时间延长，火焰平均传播速度变小，并且随着水蒸气浓度的增加，控爆效果也有所提高。

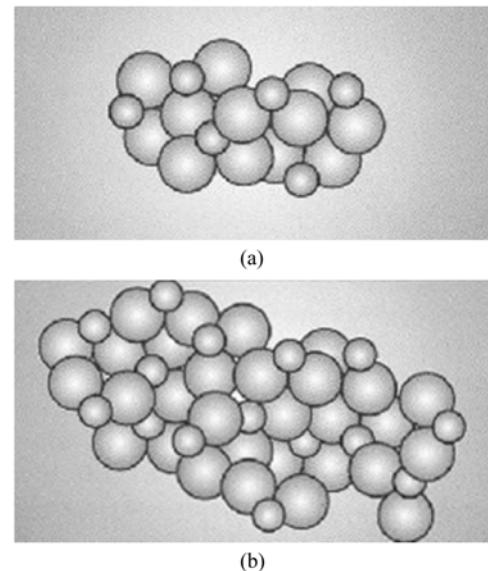


图 5 活化水分子团(a)与普通水分子团(b)

Fig. 5 Active water cluster and common water cluster

4 结论

a. 加入活化水蒸气后的瓦斯爆炸感应期明显延长，并且随着通入水蒸气量的增加，瓦斯爆炸感应期也有明显增加。普通水蒸气与活化水蒸气在相同加入量的条件下瓦斯爆炸感应期由大到小的次序是：活化水蒸气>普通水蒸气>无水蒸气。

b. 加入活化水蒸气后，瓦斯爆炸火焰在管道中的传播时间延长，平均传播速率有所减小，并且随着加入量的增加，控爆效果也有所提高。普通水蒸气与活化水蒸气在相同加入量的条件下瓦斯爆炸火焰传播速率由小到大的次序是：活化水蒸气<普通水蒸气<无水蒸气。

c. 将普通水用高能物理方法处理成小分子团活化水，比普通水分子团直径小一半，带有大量动能，运动速度快，渗透能力强，比大分子团水能更好更快地与爆炸时产生的自由基结合，使自由基销毁，进而使瓦斯爆炸的链反应终止，降低反应能力。

(下转第 30 页)

向钻进的多分支井更有利于煤层气的产出。

由于模型未考虑其摩阻的影响,使预测产能与实际产量之间存在一定偏差,但应用所建模型进行的产能预测趋势与实际产量趋势基本吻合,说明了所建模型具有一定实用价值。

4 结论

根据多分支煤层气井沿倾斜煤层不同钻进方式建立的产能预测模型,具有以下特点:

- a. 回避了煤层气从煤基质表面解吸、扩散及复杂的气-水两相流状态下的复杂计算,方法简便,能对现场排采情况实时预测,指导排采;
- b. 对于倾斜煤层,沿煤层上覆方向钻进,在储层条件、构造地质和水文地质等条件相似的情况下,易降压、且可降低排采成本、提高采收率;
- c. 由于未考虑气、水流过程中的管壁摩阻、流动压降和界效应,以及构造地质等因素对排采的影响,所建模型有待进一步完善。

(上接第 26 页)

d. 活化水通过水蒸气发生器转化为活化水蒸气,在瓦斯爆炸过程中起到了均相等径抑制作用、纳米活化控制作用,使得瓦斯爆炸感应期明显延长,火焰平均传播速率变小,控爆效果明显提高。

参考文献

- [1] 张锡英. 瓦斯爆炸的热力学模型图[J]. 煤炭技术, 1996(1): 45-48.
- [2] 张守中. 爆炸基本原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [3] KENNETH L C, ISAAC A Z, GREGORY M G. Flammability of methane, propane, and hydrogen gases[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000, 13(5): 327-340.
- [4] 林柏泉. 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, 28(1): 104-107.
- [5] 徐景德. 矿井瓦斯爆炸传播规律及影响因素研究[D]. 北京:

参考文献

- [1] 鲜保安, 高德利, 李安启, 等. 煤层气定向羽状水平井开采机理与应用分析[J]. 天然气工业, 2005(1): 114-116.
- [2] 席长丰, 吴晓东, 王新海. 多分支井注气开发煤层气模型[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 402-406.
- [3] 张冬丽, 王新海. 煤层气羽状水平井开采数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(4): 47-51.
- [4] 翟云芳. 渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 13-20.
- [5] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 81-93.
- [6] 倪小明, 王延斌, 接铭训, 等. 煤层气井排采初期合理排采强度的确定方法[J]. 西南石油大学学报, 2007(6): 101-104.
- [7] 黄洪春, 卢明, 申瑞臣. 煤层气定向羽状水平井钻井技术研究[J]. 天然气工业, 2004(5): 76-78.
- [8] 刘想平, 张兆顺, 刘翔鹏, 等. 水平井筒内与渗流耦合的流动压降计算模型[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(2): 36-38.
- [9] 曹立刚, 郭海林, 顾谦隆. 煤层气井排采过程中各排采参数间关系的探讨[J]. 中国煤田地质, 2000(1): 31-35.
- [10] 陈兆山, 路爱平. 煤层气小井网排采试验中各参数间关系的研究[J]. 中国煤田地质, 2003(2): 23-25.

中国矿业大学, 2003.

- [6] 杨立军. 水喷雾雾滴在灭火过程中的蒸发吸热分析[J]. 消防技术与产品信息, 1998(12): 14-15.
- [7] PRINZ B, BAMBERGER M. Determination of heat transfer coefficient of mist air sprays[J]. Mater Sci Technology, 1989, 5(4): 389-393.
- [8] ABBUD M A, RIEDEL E P, MCKINNON J T. A study of flame propagation on water mist laden gas mixtures in microgravity[C] // First Internationl Symposium on Microgravity Research & Applications in Physical Sciences and Biothchnology, 2001, 1 & 2: 313-320.
- [9] 陆守香, 何杰, 于春红, 等. 水抑制瓦斯爆炸的机理研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(4): 417-421.
- [10] 陈晓坤, 林灌, 罗振敏, 等. 水系抑制剂控制瓦斯爆炸的实验研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 603-606.
- [11] 王海福, 冯顺山. 防爆学原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.