

管道内障碍物形状对瓦斯爆炸影响的试验研究

秦 涧，谭迎新，王志青，潘鹏飞

(中北大学 化工与环境学院，山西 太原 030051)

摘要：为了预防和降低瓦斯爆炸造成的危害，利用自制的水平管道式可燃气体 – 粉尘爆炸装置模拟矿井巷道，在常温常压下，使用4种不同形状的障碍物，研究瓦斯爆炸压力和火焰传播速度的变化规律。结果表明：障碍物的存在对瓦斯爆炸具有显著影响，增大了爆炸压力和火焰传播速度，改变了爆炸压力变化规律。障碍物形状对瓦斯爆炸影响程度不同，即挡板障碍物使得爆炸压力和火焰传播速度最大，4孔圆环影响最小。

关键词：瓦斯爆炸；障碍物形状；爆炸压力；火焰传播速度

中图分类号：TD712；X932 文献标志码：A 文章编号：0253–2336(2012)02–0060–03

Experiment Study on Obstacle Shape in Pipeline Affected to Gas Explosion

QIN Jian, TAN Ying-xin, WANG Zhi-qing, PAN Peng-fei

(School of Chemical and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to prevent and reduce the damages caused by mine gas explosions, the self made horizontal pipeline type flammable gas – dust explosion device was applied to simulate the mine roadway. Under the normal atmospheric temperature and constant pressure, there were four different shape obstacles applied to study the variation laws of the gas explosion pressure and flame spreading velocity. The results showed that the obstacle existed would have obvious influences to the gas explosion, would increase the explosion pressure and flame spreading velocity and would change the variation law of the explosion pressure. The obstacle shape could have the different degree influence to the gas explosion. The dam board obstacle could make the highest explosion pressure and flame spreading velocity. The four bore ring would have a min influence.

Key words: gas explosion; obstacle shape; explosion pressure; flame spreading speed

在煤矿开采中，瓦斯爆炸、煤尘爆炸、瓦斯突出、中毒、窒息、火灾、透水等多种事故时有发生。尤其是瓦斯爆炸^[1]事故给矿工生命安全和煤矿生产带来了极大的危害：首先是瓦斯不完全燃烧产生CO致使井下人员中毒，其次就是爆炸产生的压力波和火焰波会造成人员伤亡及破坏井下设备。在实际环境中会有许多大小不同、形状不一的设备（通风机、瓦斯抽放泵、巷道灯等），这些障碍物的存在会对爆炸的压力及火焰传播速度产生极大的影响^[2]。因此，研究障碍物形状对瓦斯爆炸的影响，可以更好地理解瓦斯爆炸的规律，预测其爆炸范围及造成的损失，以便采取有效的防爆和抑爆措

施，具有十分重要的意义。

近年来，国内外许多学者加强了瓦斯或其他可燃气体在放置障碍物条件下，其爆炸压力及火焰传播速度的研究^[3–6]。笔者利用自制的水平管道式可燃气体 – 粉尘爆炸试验装置模拟矿井巷道，研究密闭空间内障碍物形状对甲烷 – 空气混合气体的爆炸压力及火焰传播速度的影响，分析出它们的变化规律，以期能够不断补充和完善瓦斯爆炸的相关研究，对矿井瓦斯爆炸的防治有所帮助。

1 试验装置

试验系统由水平管道、点火控制系统和数据采

收稿日期：2011–09–17；责任编辑：王晓珍

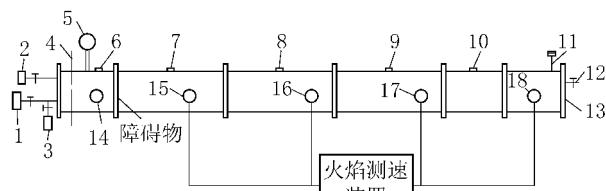
基金项目：山西省回国留学人员基金资助项目（2010075）

作者简介：秦 涧（1986—），男，天津人，硕士研究生。Tel：15034175764，E-mail：qinjian0904@163.com

网络出版时间：2012–02–15 11:28；网络出版地址：<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120215.1128.017.html>

引用格式：秦 涧，谭迎新，王志青，等. 管道内障碍物形状对瓦斯爆炸影响的试验研究 [J]. 煤炭科学技术，2012，40 (2): 60–62.

集系统组成。试验装置如图 1 所示。



1—甲烷气瓶; 2—真空泵; 3—空压机; 4—点火电极;
5—压力表; 6、7、8、9、10—压力传感器; 11—安全阀;
12—排气孔; 13—盲法兰; 14、15、16、17、18—观察窗

图 1 试验装置

1) 水平管道式试验装置。水平管道内径 139 mm、壁厚 10 mm、总长 9.7 m, 由 6 段无缝钢管连接而成, 长度分别为 1 节 0.7 m, 2 节 1.2 m 和 3 节 2.2 m, 中间用法兰连接, 螺栓紧固, 末端用盲法兰封闭, 总长径比为 70 (长径比为传感器距点火处的距离与管道内径的比值)。

2) 点火控制系统。点火控制系统由电极、电源、电压互感器和控制箱组成。电极两端加上 8 kV 电压, 击穿空气产生电火花, 点燃甲烷 - 空气预混合气体。

3) 数据采集系统。数据采集系统由压力采集系统和火焰传播速度测试系统组成。压力采集系统: 在管道上安装型号为 CY-YD 的压电式压力传感器 (图 1 中 6—10), 将采集到的信号经 YE 型电荷放大器放大, 最后由 TST3125 动态测试分析仪记录。火焰传播速度测试系统: 由安装在观察窗上 (图 1 中 15—18) 的火焰探测器和单片机组成。当火焰波传到第 1 个探测器, 计时开始; 到第 2 个探测器时, 计时停止; 同时下一个探测器计时开始, 记录了火焰传播时间。探测器距点火电极距离分别为 2.3、4.5、6.7 和 9.0 m, 通过计算得到火焰传播时的平均速度。

4) 试验用障碍物。障碍物形状如图 2 所示, 均由厚度为 2 mm 的钢板制成, 阻塞比为 0.6 (阻塞比为障碍物阻塞面积与水平管道的横截面积的比值), 放置在距点火电极 0.5 m 处。

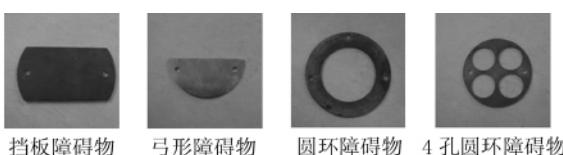


图 2 障碍物形状

2 试验结果与分析

试验在常温常压下进行, 甲烷体积分数 10%, 分别放置 4 种不同形状的障碍物, 数量为 1 片, 爆炸压力和火焰传播速度为 5 次试验的平均值。

2.1 障碍物形状对爆炸压力的影响

障碍物形状对爆炸压力的影响如图 3 所示。

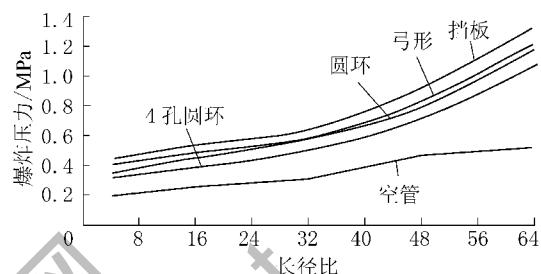


图 3 障碍物形状对爆炸压力的影响

将图 3 中数据进行拟合, 得出长径比 s 对爆炸压力 P 影响规律的经验公式(表 1), 相关系数 R 为

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

式中: y_i 为试验结果; \bar{y} 为试验结果平均值; \hat{y}_i 为拟合结果。

表 1 长径比 s 对爆炸压力 P 影响规律的经验公式

障碍物形状	拟合方程	R^2
空管	$P = -1.344 \times 10^{-6} s^3 + 1.511 \times 10^{-4} s^2 + 0.001506 s + 0.1899$	0.9802
挡板	$P = 2.366 \times 10^{-6} s^3 - 2.185 \times 10^{-5} s^2 + 0.005832 s + 0.417$	0.9972
弓形	$P = 3.055 \times 10^{-6} s^3 - 9.426 \times 10^{-5} s^2 + 0.006646 s + 0.378$	0.9998
圆环	$P = 4.088 \times 10^{-6} s^3 - 2.356 \times 10^{-4} s^2 + 0.01194 s + 0.3034$	0.9999
4 孔圆环	$P = 2.384 \times 10^{-6} s^3 - 5.648 \times 10^{-5} s^2 + 0.005934 s + 0.291$	0.9998

多数拟合方程的相关系数大于 0.99, 表明在一定范围内, 该拟合方程是可信的, 对实践和理论有一定的意义。由图 3 可知, 无障碍物时, 爆炸压力随长径比的增加而增大, 且增加较平缓。最大值为 0.5198 MPa, 出现在长径比 64 处, 即距点火端最近。当管道内存在挡板、弓形、圆环和 4 孔圆环

障碍物时，各测试点的爆炸压力明显增大，且在长径比64处达到最大值： $P_d = 1.3168 \text{ MPa}$ ； $P_g = 1.2171 \text{ MPa}$ ； $P_y = 1.1735 \text{ MPa}$ ； $P_4 = 1.0633 \text{ MPa}$ 。在长径比小于32时，变化规律与空管时基本相同；长径比大于32时，爆炸压力大幅度增大。其中，4孔圆环障碍物对爆炸压力影响最小，各个测试点的爆炸压力依次是空管的1.65、1.48、1.60、1.56和2.05倍；挡板障碍物对爆炸压力影响最大，各个测试点的爆炸压力依次是空管的2.29、2.05、2.06、2.02和2.53倍。因此障碍物的存在使管道内爆炸压力增大。

无障碍物时，由于混合气体爆炸释放的能量不断增加，以及管道内壁对压力波有反射作用，因此爆炸压力逐渐增大。存在障碍物时，对爆炸压力变化十分明显，由于障碍物使压力波发生扰动，从而加强了爆炸传播过程中的湍流程度，促进了燃烧反应的进行，使得爆炸压力增大。障碍物形状不同，对爆炸影响程度不同，但不改变爆炸压力的总体变化规律。影响程度从大到小依次为：挡板、弓形、圆环、4孔圆环。由图2可知，挡板障碍物阻塞部分位于流场中心，导致气体流动扭曲最强，从而湍流效应增强，而圆环障碍物阻塞部分位于流场边缘，因此前者对压力波影响比后者大。弓形障碍物阻塞部分位于流场底部，具有挡板和圆环两者特性，所以影响效果处于两者之间。由于4孔圆环障碍物孔数多、孔径小，反射作用强，导致能量损耗增大，因此其影响效果最小。

2.2 障碍物形状对火焰传播速度的影响

由图4可知，无障碍物时，随着距离增加，火焰传播速度由22.4 m/s减小到1.9 m/s，最终熄灭。放置挡板、弓形、圆环和4孔圆环障碍物后，火焰传播速度分别为 $V_d = 202.1 \text{ m/s}$ 、 $V_g = 187.6 \text{ m/s}$ 、 $V_y = 131.1 \text{ m/s}$ 、 $V_4 = 92.5 \text{ m/s}$ ，因此障碍物对火焰波有加速作用。其中，4孔圆环障碍物对火

焰加速作用最弱，是空管的4.1倍；挡板障碍物对火焰加速作用最强，是空管的9倍。

火焰在传播过程中产生热辐射造成能量衰减，以及受管道内壁的冷却作用，速度随着距离的增加而减小，最终熄灭。火焰波遇到障碍物后，火焰波产生扭曲和变形，燃烧面积增加，引起火焰加速，加速的火焰波又造成了湍流的增强和扰动，湍流和火焰之间相互作用，因此火焰传播速度也随之增加。其中挡板障碍物阻塞部分位于流场中心，造成火焰波产生褶皱和变形的程度最大，因此其对火焰传播的加速作用最强。又因为没有连续放置障碍物，所以火焰通过障碍物后，没有能量的补充，火焰传播速度迅速减小。

3 结 论

与无障碍物管道相比，障碍物的存在改变了瓦斯爆炸规律，增大了爆炸压力，加大了火焰传播速度。障碍物阻塞比相同时，改变障碍物的形状，爆炸压力和火焰传播速度变化规律基本相同。障碍物的形状对瓦斯爆炸压力和火焰传播速度影响程度不同：挡板障碍物引起的爆炸压力和火焰传播速度最大，其次是弓形障碍物和圆环障碍物，4孔圆环障碍物最小。

参考文献：

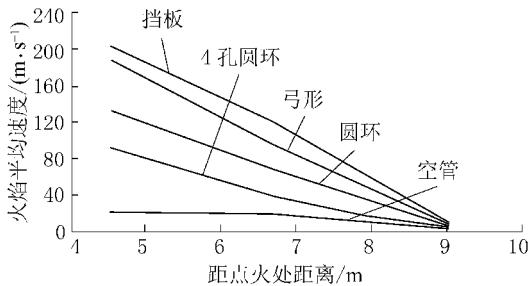


图4 障碍物形状对火焰传播速度的影响

- [1] 张景林. 气体、粉尘爆炸灾害及其安全技术 [J]. 中国安全科学学报, 2002, 12 (5): 9-14.
- [2] 林柏泉, 周世宁, 张仁贵. 障碍物对瓦斯爆炸过程中火焰和爆炸波的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28 (2): 104-107.
- [3] 谢波, 范宝春, 王克全, 等. 挡板障碍物加速火焰传播及其超压变化的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2002, 27 (6): 627-631.
- [4] Masria A R, Ibrahim S S, Nehzat N. Experimental Study of Premixed Flame Propagation over Various Solid Obstructions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 21 (1/3): 109-116.
- [5] Ibrahim S S, Masria A R. The Effects of Obstructions on Overpressure Resulting from Premixed Flame Deflagration [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001, 14 (3): 213-221.
- [6] Naamansen P, Baraldi D, Hjertager B H. Solution Adaptive CFD Simulation of Premixed Flame Propagation over Various Solid Obstructions [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2002, 15 (3): 189-197.