

# Investigation of Influence of Solid Obstacle on Methane-Air Flame Propagation in Tube

Guo Ziru<sup>1</sup>, Wang Quan<sup>1</sup>, Ding Yibin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei, China

Email: zrguo@aust.edu.cn

**Abstract:** Based on square transparent experimental tube with 1.5m long, photoelectrical transducer, pressure transducer and high-speed video camera was used to set up optical and pressure signal testing system. The obstacles are of 4 types (i.e. plates, triple prisms, cuboids and cylinders) and three kinds of blockage ratios (i.e. 20%, 40% and 60%). The results in the experiment show that: (1) plates and triple prisms increase flame speed and overpressure much larger, and cuboids are intermediate, while effects of cylinders are comparatively limited. (2) The obstacles can remarkably accelerate the flame velocity and pressure, and the irregularities of their surface are the main factor contributing to the flame turbulence. (3) There is a small difference in the initial stage of flame acceleration, and the flame speed and overpressure are increased obviously when the flame comes across the obstacles. The research has some effect on preventing and controlling explosion disaster of methane in mine and other combustible gases in pipelines.

**Keywords:** solid obstacle; flame propagation; gas explosion; high-speed video camera; tube

## 障碍物形态对瓦斯爆燃火焰传播影响的研究

郭子如<sup>1</sup>, 汪泉<sup>1</sup>, 丁以斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>安徽理工大学化学工程学院, 淮南, 中国, 232001

<sup>2</sup>中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥, 中国, 230026

Email: zrguo@aust.edu.cn

**摘要:**在自行设计的 1.5m 长全透明火焰加速管道中, 采用高速摄像机、光电传感器和压力传感器等, 测试了四种形态障碍物(即平板、正三棱柱、长方体、圆柱体), 三种阻塞比(即 20%、40%、60%)下, 浓度为 8.62% 瓦斯气体爆燃火焰的高速摄像照片、火焰传播速率及测点处峰值超压分布等情况。实验结果表明: (1)在相同条件下, 平板型、正三棱柱型障碍物诱导火焰加速程度较大, 长方体次之, 而圆柱体影响最小; (2)障碍物能显著加速火焰传播, 而其表面的不平整性或曲率突变是火焰湍流化的重要原因; (3)不同形态障碍物对火焰传播初期影响较小, 而火焰绕过障碍物后传播速率和压力有明显的增加。实验结论对矿井瓦斯爆炸灾害的预防和控制及其它工业管道可燃气体储运安全具有一定的参考价值。

**关键词:** 立体障碍物; 火焰传播; 瓦斯爆炸; 高速摄像机; 管道

### 1 引言

煤矿井下瓦斯爆炸灾害频繁发生<sup>[1]</sup>, 对瓦斯爆炸现象的研究, 大多借助于模拟巷道或实验管道进行。由于实验管道布设测点方便、成本相对较低, 并可采用数字化电测和光测技术综合研究火焰传播过程, 因此更多学者愿意在小型管道内深入研究瓦斯爆炸问

题。管道内瓦斯及其它可燃气体火焰传播是一个涉及气体流动、热交换和辐射的复杂过程, 其影响因素主要有障碍物尺寸及数量、气体种类、管道材质等。早在 1926 年, Chapman<sup>[2]</sup>等就发现障碍物能加速管内火焰传播, 此后, 由障碍物诱导的管内火焰加速问题国内外大量的研究<sup>[3]-[7]</sup>, 主要集中在布设平面型障碍物(如障碍片、薄圆环、薄扇形板等)与布设立体障碍物(如楔形体、长方体等)。前者研究较多, 但后者更具有实际意义。本文在火焰加速管内布设三种

安徽省高校自然科学基金项目(KJ2010B313), 安徽理工大学青年基金项目(12058), 安徽理工大学硕博士基金项目(2007yb10), 国家科技支撑计划项目(2007BAK28B01)

阻塞比、四种不同形态共 12 种障碍物，在此情形下，对比分析了障碍物形态对管内瓦斯爆燃火焰传播的影响程度。本文实验结果与分析对预防矿井瓦斯及其它可燃气体爆炸事故具有一定的参考价值。

## 2 实验系统<sup>[8]</sup>

实验管道为自行设计的有机玻璃材质全透明火焰加速管道 (1500 mm × 100 mm × 100 mm)，点火端封闭，另一端弱封闭。整个实验系统由配气装置、点火装置、光信号测试系统、压力信号测试系统及数据采集系统 5 个部分组成。如图 1 所示：

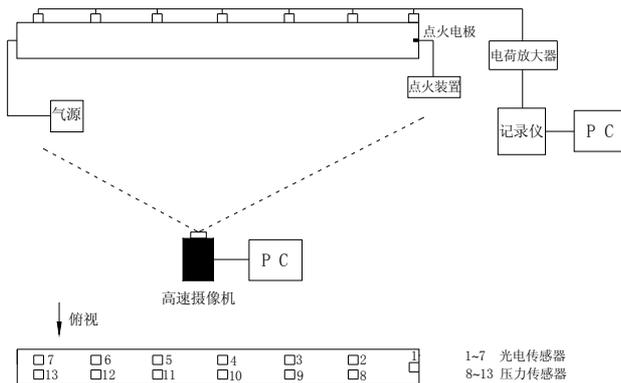


Figure1. Experimental rig

图 1. 实验装置图

### 2.1 配气装置

根据 Dalton 分压原理在专门的配气装置中粗略配置所需浓度的预混气，再用甲烷浓度测定仪测出其精确值为 8.62%，文中瓦斯气体浓度均为此值。

### 2.2 点火装置

采用简易电容储能电火花点火装置，输出能量控制在 250~500 mJ 可调。其点火电极间距为 1.5 mm。

### 2.3 光信号测试系统

采用高速摄像结合光电传感器对火焰传播过程进行测试。高速摄影仪为 FastCAM Super 10KC 型，最大拍摄速率为 10000 f/s，实验拍摄速率为 1000 f/s；光电传感器由红外感光光电二极管制成，响应时间  $<10^{-7}$  s，测点布置在点火电极水平距离 0、51 mm、319 mm、589 mm、862 mm、1130 mm、1405 mm 处。

### 2.4 压力信号测试系统

采用 CY-DY-203 型压电式压力传感器测量火焰传播产生的压力。测点布置在光电传感器同一坐标位置，即距点火电极 51mm、319mm、589mm、862mm、1130mm、1405mm 处。

### 2.5 数据采集系统

压力传感器信号经 YE5853A 型电荷放大器放大后，由 HIOKI8841 数字存储记录仪采集记录，该记录仪具有 16 个独立通道，采样速率达  $10^6 \text{s}^{-1}$ ；而光电传感器信号电压值较大，直接由记录仪采集。

四种形态障碍物放置截面图如图 2 所示（为方便观看将障碍物画在图中不同处，实际各障碍物放置距点火端均为 190 mm），各障碍物横卧于管道内，长度均为 100 mm，其中 a 取 20 mm、40 mm、60 mm，即障碍物阻塞比为 20%、40%、60%。

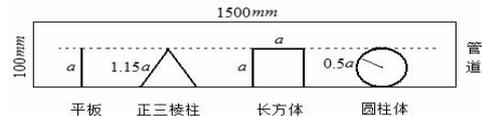


Figure2. Placement of four types of obstacles

图 2. 四类障碍物放置方式

## 3 实验结果与分析

### 3.1 火焰跨越障碍物的高速摄影照片

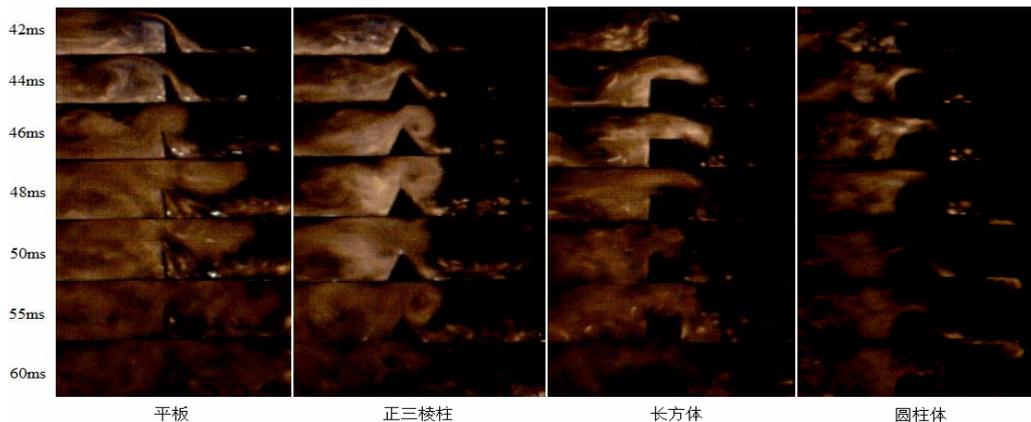


Figure3. Picture of high-speed camera when flame comes across the obstacles (blockage ratio is 40%)

图 3 火焰跨越障碍物过程的高速摄影图片 (40%阻塞比)

火焰跨越障碍物的时间段在 40 ms~60 ms 之间，不妨截取 42 ms、44 ms、46 ms、48 ms、50 ms、55 ms、60 ms 时刻高速摄像照片将其等比例叠合成图 3。分析图 3 可以看出，不同形态障碍物下火焰开始跨越障碍物的时间近似相同，在 40 ms 左右，说明障碍物形态对火焰传播初期影响程度较小，可从图 4 中火焰速率曲线的前段看出。对于平板和正三棱柱而言，在障碍物前后分别形成两个方向相反的涡团，而正三棱柱由于两个外表面向上或向下倾斜，相当于两个导流面，

气流受壁面粘滞作用很容易形成尺度较大的涡团，高速摄影照片显示其涡团轮廓清晰，这些较大尺度涡团的存在能增加湍流程度，加速火焰传播速率。相对而言，长方体和圆柱体形成的涡团尺度较小，对火焰加速影响相对较小。从图像还可以看出，火焰跨越不同形态障碍物经历的时间基本相同，只有当火焰经障碍物绕流后传播速率才会有一定程度的差异。

### 3.2 障碍物形态对火焰传播速度的影响

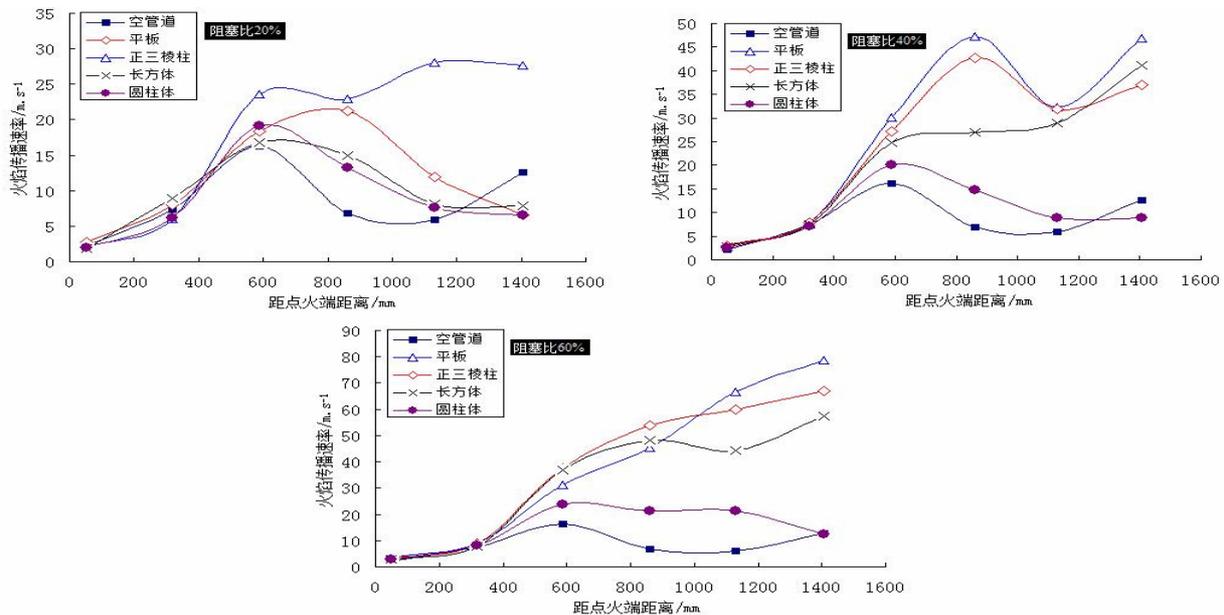


Figure4. Influence of flame speed due to different types of obstacles  
图 4. 不同形态障碍物对火焰传播速率的影响

分析图 4，管内有障碍物存在时能显著增加火焰传播速率，但不同形态障碍物加速火焰传播的程度有所不同。在三种阻塞比下，均呈现出平板及正三棱柱障碍物加速火焰程度较大，长方体次之，而圆柱体较小。导致上述现象的原因：首先，由于障碍物对火焰面前方的气流有一定的阻碍作用，在火焰尚未传至障碍物时，就已在障碍物两侧形成很高的压力梯度，会使火焰运动经障碍物后得到一定的加速；其次，由于火焰面传至障碍物时，在障碍物表面形成高粘性边界层作用，使得火焰面扭曲变形，增加了有效燃烧面积，导致甲烷在单位时间内燃烧放出更多热量，促使管内压力升高，从而更快地推动火焰面向前运动。当然，不同形态障碍物所形成的表面高粘性边界层形状不同，使火焰扭曲程度也不一样。对于平板、正三棱柱其外表面曲率变化较大，长方体次之，圆柱体较小，而不同形态障碍物对火焰传播速率影响程度与曲率变化相对应。据此可以推测：对于同阻塞比下同材质障碍物来说，障碍物表面曲率变化越大，其对火焰传播速率影响越大；障碍物表面越不规则，导致的气体流

动湍流化程度越严重，对火焰的加速越明显。从图 4 还可看出，随着障碍物阻塞比的增加，火焰传播速率增加幅度增大，在 60% 阻塞比下，火焰传播速率增加逐渐呈线性趋势。

### 3.3 障碍物形态对火焰传播过程中超压的影响

分析图 5，在相同阻塞比下，障碍物形态对火焰传播过程中管内峰值压力的影响与对火焰传播速率的影响规律基本一致，表现为平板、正三棱柱障碍物影响较大，长方体次之，圆柱体较小。同时，测点峰值超压曲线呈现出“M”状，位于开口端的超压值下降明显，而峰值超压最大值出现在管道的中后端，说明管内甲烷燃烧存在一定的振荡性，从而导致压力的波动，而在开口端泄放作用下，将导致压力显著下降。从图 5 还可看出，有障碍物相对空管道管内峰值超压约增加一倍，在 2 atm 左右，但由障碍物形态或阻塞比不同而造成管内超压差异要小于相同条件下火焰传播速率之间的差异。

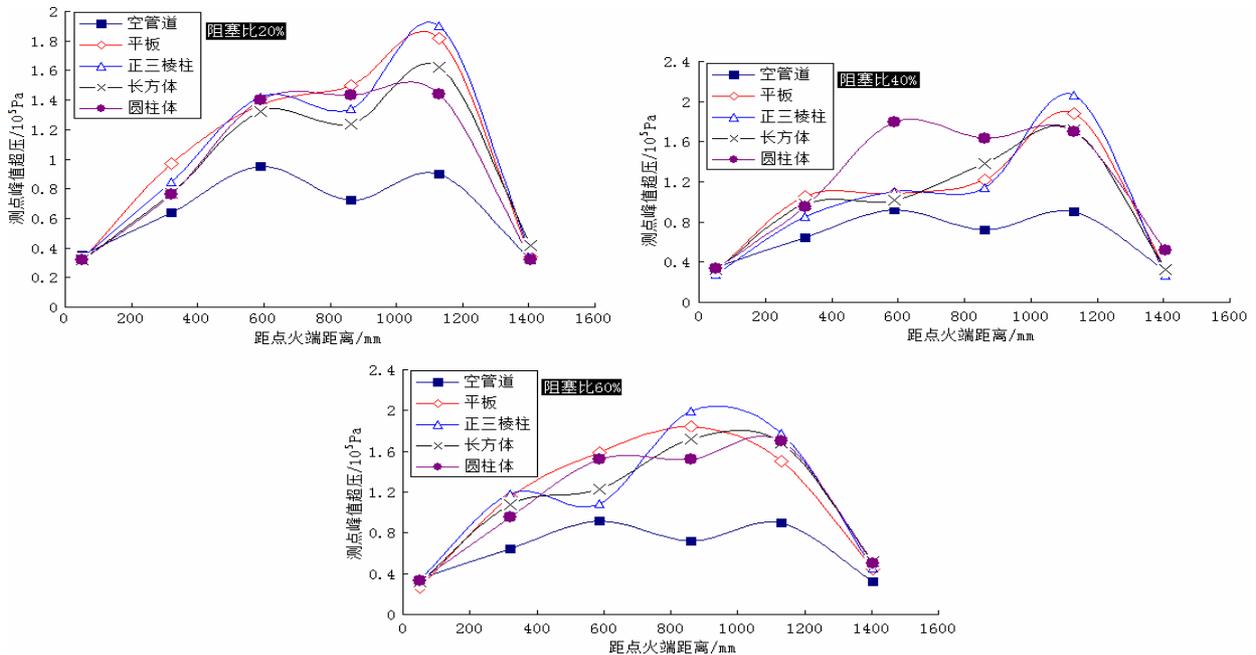


Figure5. Influence of flame propagating overpressure due to different types of obstacles  
图 5. 不同形态障碍物对火焰传播过程中超压的影响

#### 4 结论

(1) 不同形态障碍物对火焰传播影响程度不同, 从火焰传播速度及超压数值来看, 平板、正三棱柱影响较大, 长方体次之, 而圆柱体影响最小。

(2) 从实验结果分析得出: 在相同阻塞比条件下, 障碍物表面曲率变化越大, 其对火焰传播速度影响越大; 障碍物表面越不规则, 导致的气体流动湍流化程度越严重, 对火焰的加速越明显。

(3) 障碍物存在对火焰传播初期影响较小, 只有当火焰经障碍物绕流后传播速率才会有明显的增加, 而障碍物形态不同对管内最大超压的影响差异不明显。

#### References (参考文献)

[1] Net of State Administration of Work Safety. <http://www.chinasa-fety.gov.cn> 国家安全生产监督管理总局网. <http://www.chinasa-fety.gov.cn>

[2] Chapman W R, Wheeler R V. The propagation of flame in mixtures of methane and air, Part IV: The effect of restrictions in the path of the flame[J]. J Chem Soc, 1926, 21: 39-47.

[3] Moen I O, donato M. Flame Acceleration due to Turbulence Produced by Obstacles. Combustion and Flame, 1980, 39: 21-32

[4] Ibrahim S S, Masri A R. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001, 14: 213-221

[5] YE Jingfang, Chen Zhihua, Fan Baochun. Interaction between the wedge obstacle and flame [J]. Fire Safety Science, 2005, 10: 246-249  
叶经方, 陈志华, 范宝春. 楔形障碍物与火焰的作用[J]. 火灾科学, 2005, 10: 246-249

[6] Yu Lixin, You Han, Shen Hongzhi et.al. Influence of obstacle configurations on overpressure development in premixed flame[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(3): 537-539  
余立新, 尤寒, 盛宏至等. 障碍物结构对预混火焰压力发展的影响[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 537-539

[7] Ding Yibin. Master degree of Anhui University of Science & Technology [D], 2007  
丁以斌. 安徽理工大学硕士学位论文[D], 2007

[8] Wang Quan, Guo Ziru, Li Zhimin, Ding Yibin. Test on flame spreading characteristics of premixed methane-air in tube[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(11): 95-97  
汪泉, 郭子如, 李志敏, 丁以斌. 甲烷与空气预混管内爆炸火焰传播特性的试验[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(11): 95-97