

文章编号: 1003-1480 (2008) 03-0040-04

# 置障下火焰传播速度及其超压的实验研究

罗伟, 吴红波, 王学兵, 谢兴华

(安徽理工大学化工学院, 安徽 淮南, 232001)

**摘要:** 通过增加有机玻璃管的长度, 在布置障碍物的情况, 研究了不同的长径比 ( $L/D$ ) 处火焰传播速度、超压的变化情况。研究表明: 障碍物的存在使火焰的传播速度、超压提高, 在长径比  $L/D=20$  时火焰传播速度急剧增加; 浓度越接近化学计量比, 障碍物对火焰的加速作用越显著、超压越大。研究结果对于如何防治瓦斯和其它可燃气体爆炸, 减轻爆炸威力具有一定的指导意义。

**关键词:** 爆炸物; 障碍物; 火焰速度; 超压

中图分类号: TQ560.72 文献标识码: A

## Experimental Study on the Flame Propagation Speed and Overpressure under Obstacles

LUO Wei, WU Hong-bo, WANG Xue-bing, XIE Xing-hua

(Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001)

**Abstract:** By prolonging the transparent organic glass tube, the flame propagation velocity and overpressure are researched under obstacles. The result shows that obstacles increase the flame propagation velocity and overpressure, the velocity increases quickly at 20 times  $L/D$  ratio. The closer the gas concentration to the stoichiometrical ratio, the more obvious the accelerating effect of the obstacles on the flame velocity and overpressure. These results may be useful in the field of preventing and controlling combustible gas explosion.

**Key words:** Explosive material; Obstacle; Flame velocity; Overpressure

生活中常见的可燃气体有甲烷、乙炔、氢气等, 它们都是易燃易爆危险品。可燃气体爆炸与凝聚相炸药爆炸相比, 有其自身特点。可燃气体爆炸具有压力上升速度慢、能量释放时间长、超压作用时间长等特点。很多事实表明: 如果不是强起爆源, 如炸药等引爆, 对于弱点火造成的可燃气体爆炸事故的发生并不是一蹴而就的, 而是经历着从燃烧到爆燃再到爆轰这样一个过程<sup>[1]</sup>。在这个过程中, 可燃气体在传播方向上受到的障碍物约束对燃气能否发生爆炸起到相当关键的作用。Dag.Bjerketvedt<sup>[2]</sup>等人研究了障碍物的填充

率(障碍物与可燃气体体积百分比)及几何形状对超压和火焰速度的影响。Ristu<sup>[3]</sup>、Masri<sup>[4]</sup>对管道内可燃气体爆燃强度进行了研究, 定性描述了障碍物形状对爆燃压力的影响。Ibrahim<sup>[5]</sup>介绍了1套新的实验装置, 综合研究了障碍物尺寸和阻塞比(火焰传播方向上障碍物最大横截面积与管道的截面积之比)对预混火焰爆燃过程超压的影响。本文主要针对置障下不同的长径比 ( $L/D$ , 障碍物距点火处的距离与管道直径之比) 处火焰传播速度、超压的变化情况进行了初步的研究。

收稿日期: 2008-04-02

作者简介: 罗伟(1982-), 男, 在读硕士研究生, 从事爆破技术及器材研究。

## 1 实验系统和方法

实验系统由5个部分组成,即输配气系统、火焰加速管、火焰速度测量系统、点火系统以及动态数据采集分析系统<sup>[6]</sup>。火焰速度超压测试系统如图1所示。

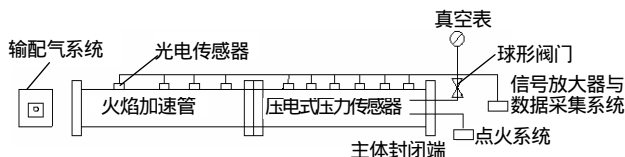


图1 火焰速度超压测试系统示意图  
Fig.1 The test system of flame propagation velocity and overpressure

火焰加速管采用全透明 12mm 厚有机玻璃板制成。全透明的火焰加速管便于观察火焰传播全过程,更有利于光电传感器对火焰传播速度的测量。管道为方管,两方管连接共长 3 000mm,截面积 100mm×100mm。此火焰加速管安放在水平实验台上,一端封闭,一端开口,封闭端采用法兰连接,中间有密封垫密封。法兰板中心位置开有一个螺纹孔,从这里插入点火电极,然后加上密封圈,涂上凡士林后旋紧,保证不漏气。开口端用 8mm 厚玻璃挡板挡住,上面安装有抽排气口,抽真空的时候封上盖子。火焰速度测量系统采用光电二极管作为火焰速度传感器,光电二极管的响应时间为  $10^{-7}$ s,光电流大于 2.0mA,暗电流小于 0.3 $\mu$ A。该系统即使在低浓度甲烷燃烧的淡蓝色火焰下也能够准确地采集到火焰信号,其采集速度为微秒级,完全能够满足实验精度需要。在实验过程中,根据实验条件和该光电二极管的光电流要求,特设计每个光电二极管与 1 个电阻串联,利用电阻限流来控制电路中电流不超过光电二极管的最大光电流。动态数据采集分析系统采用日本 HIOKI 公司的 8841 型 MEMORY HICOREDER 数字记录仪,共有 16 个模拟通道,4 个逻辑通道,带有 1 个软驱,1 个 MO 光驱,1 个 SCSI 接口,另外它还带有 1 个内部打印机。其采样速率为 1M,即每  $10^{-6}$  秒采 1 个点,能满足微秒级数据采集速度的要求。该数字记录仪具有自动采集、储存、数据处理和波形显示以及打印输出的功能,能同时将 16 个通道的测试结果显示在屏幕上,具有

将曲线压缩、拉伸、放大和缩小的功能,还能进行网络通信,是一台多功能的仪器。点火系统采用简易操作型的电容储能电火花点火装置,输出能量在 250~500 mJ。点火电极的两极相距 1.5mm。当储能电容器充电完毕后将开关旋到放电档位时,电容器在点火电极间放电,点燃火焰加速管里的预混甲烷气体。

输配气系统根据静态简易压力配比法及实验各项参数的具体要求,选用标准高压气瓶、精度高的压力表和真空表,闸阀设计成混合气配制系统。实验时先在管道底部放上障碍物,然后将火焰加速管两端封闭,再将管内抽成真空(真空度达 0.098 MPa 以上)。此时调试动态数据采集分析系统,根据需要设定相应的采样频率、采样长度及相关参数,使之处于等待采集状态。然后打开手阀,把预先配置好的一定浓度的甲烷气体充入火焰加速管,当达到 1.033kg/cm<sup>2</sup>(1atm)时,开口端轻质堵头自动脱离,此时表示充气完毕,接着利用高压电火花点火装置点火引燃,测定甲烷燃烧过程中的有关参数。

本次实验采用的障碍物用铜材料做成,有 5 个,每个高 2cm,每个之间相距 30cm,第 1 个障碍物放在两节管子的接口处,离点火端 1 500mm,其布置如图 2 所示。

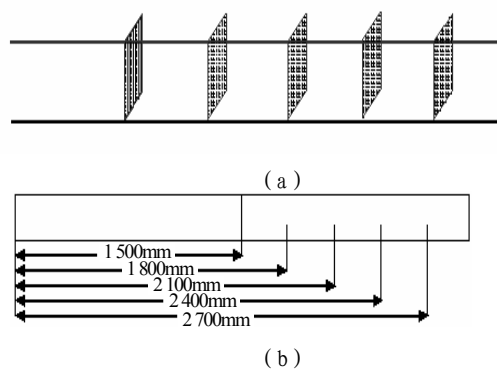


图2 障碍物布置示意图

Fig.2 The arrangement of obstacles

## 2 实验结果及分析

### 2.1 实验结果

为了考察障碍物对火焰传播速度与超压的影响,进行了 3 种不同甲烷浓度下的实验,浓度分别为

8.04%、9.22%、10.86%。甲烷火焰传播的速度与超压随长径比（长径比 $L/D$ ，其中 $L$ 为距点火处的距离， $D$ 为管子的直径）的变化而产生变化，具体情况如图3~8所示。

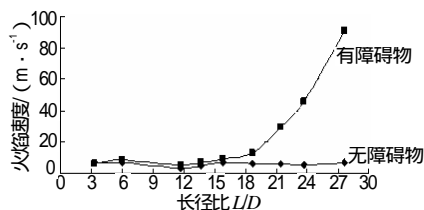


图3 浓度 8.04%的甲烷火焰传播速度

Fig.3 The flame propagation velocity of methane with 8.04% concentration

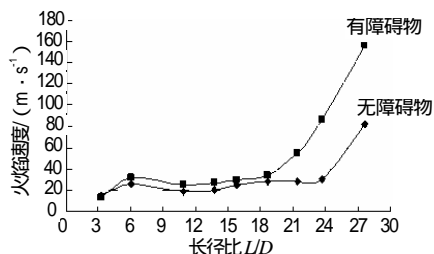


图4 浓度 9.22%的甲烷火焰传播速度

Fig.4 The flame propagation velocity of methane with 9.22% concentration

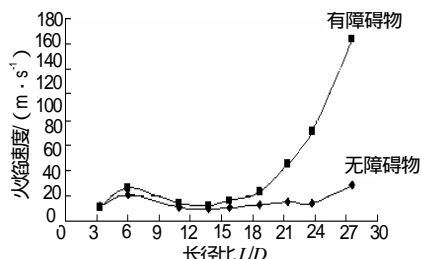


图5 浓度 10.86%的甲烷火焰传播速度

Fig.5 The flame propagation velocity of methane with 10.86% concentration

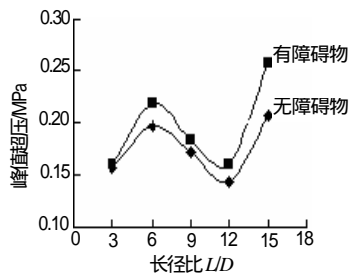


图6 浓度 8.04%的甲烷火焰超压

Fig.6 The flame overpressure of methane with 8.04% concentration

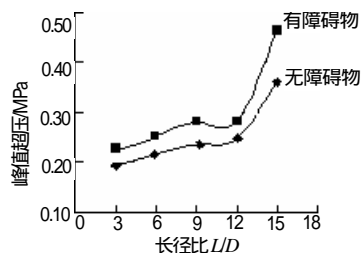


图7 浓度 9.22%的甲烷火焰超压

Fig.7 The flame overpressure of methane with 9.22% concentration

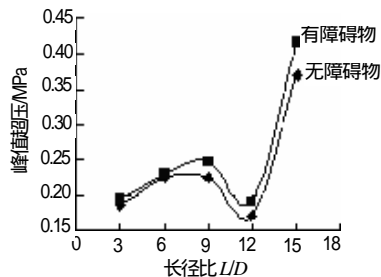


图8 浓度 10.86%的甲烷火焰超压

Fig.8 The flame overpressure of methane with 10.86% concentration

## 2.2 障碍物对火焰传播速度的影响

图3~5为不同浓度、不同长径比时，甲烷气体燃烧过程中火焰传播速度的实验测定结果。从中可以看出：无障碍物时火焰传播速度较小，不超过 $100\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，尤其是低浓度（8.04%）的甲烷气体的火焰传播速度基本没什么变化；障碍物为5个时火焰传播速度明显增加，中间浓度（9.22%）的甲烷气体甚至接近 $200\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可见有障碍物时，火焰传播速度迅速提高，尤其在20倍长径比后，火焰传播速度迅速增加。

分析原因认为：当甲烷被点燃后，甲烷推着前方的未燃气体向前运动，火焰在加速管中传播时，火焰阵面与管壁会产生一定的剪切作用（这与容器壁的粗糙程度有关），并形成一定的速度梯度，且会在未燃气体的流场中发展。当存在障碍物（第2节方管）时，流场会发生进一步的变形。火焰到达障碍物（长径比 $L/D=15$ ）时，火焰的表面被迅速拉伸并在剪切的作用下发生褶皱，大大提高了火焰的燃烧面积，火焰内部湍流强度增强，化学反应速度与热释放速率都增加；从而导致在长径比 $L/D=20$ 时，火焰的传播速度明显加快，湍流进一步加剧，提高了火焰前面的未燃气体的移动速度，又会引起流场梯度的进一步增大，导致更强烈的火焰阵面的拉伸和褶皱，湍流程度进一步提

高。速度梯度场中拉伸和褶皱的这种正反馈作用导致火焰传播速度将不断增大,因此,障碍物对甲烷气体燃烧过程中火焰传播速度有重要影响。

对于同一特征尺寸的障碍物,甲烷浓度越接近化学计量比,障碍物对火焰的加速作用越显著。甲烷浓度过高或过低,都会造成甲烷气体或空气的大量过剩,过量的甲烷气体或空气在火焰传播过程中起到冷却作用,导致火焰传播速度都有不同程度的下降。

### 2.3 障碍物对火焰传播过程中超压的影响

图6~8为不同浓度、不同长径比时,甲烷气体燃烧过程中火焰超压的实验测定结果。由图6~8可见,对于甲烷火焰传播过程中的峰值超压,当有障碍物存在时,其峰值超压都有所增加。甲烷气体浓度越接近化学计量比,其峰值超压也越大。

分析原因认为:管道中气体一旦被加热,其体积膨胀,气体向前运动,形成压力波。在甲烷预混气燃烧初始时,化学反应速度较低,释放的化学能较小,有热量损失,用于加热气体的能量更小,形成的压力也比较小,加上膨胀作用,测试点峰值超压很小。随着反应进行,热量增多,压力增加。由于障碍物对管道内气体流动有阻碍作用,压力形成的梯度会使火焰阵面运动更快,使火焰传播速度增加明显,测试点峰值超压不断变大。过量的甲烷气体或空气在火焰传播的过程中起到冷却作用,因而甲烷浓度越接近化学计量比,用于加热气体的相对有效热量越多,压力越大。

## 3 结论

(1) 障碍物对甲烷气体燃烧过程中的火焰传播

速度和超压有重要影响,障碍物能够使火焰传播速度迅速提高,超压变大。

(2) 障碍物的这种布置方式使得火焰在20倍长径比后,火焰传播速度迅速增加。

(3) 甲烷浓度对火焰传播速度和超压有重要的影响。对于同一特征尺寸的障碍物,甲烷浓度越接近化学计量比,障碍物对火焰的加速作用越显著,超压越大。

### 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.
- [2] Dag Bjerketvedt, Jan Raor Bakke, Kees Van Wingerden. Gas explosion handbook[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997 (52): 1-150.
- [3] Ritus Dobashi. Experimental study on gas explosion behavior in enclosure[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1997, 10 (2): 83-89.
- [4] A Masri, S Ibrahim, N Nehiat, et al. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000 (21): 19-116.
- [5] Ibrahim S, Masri AR. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001 (14): 213-221.
- [6] 吴红波, 颜事龙, 张立. 障碍物对瓦斯火焰传播过程的影响[J]. 煤矿爆破, 2006 (1): 1-3.