

障碍物结构对预混火焰压力发展的影响

余立新 尤 寒 盛宏至 孙文超 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 本文针对不同的可燃气体混合物, 研究了由于障碍物引起的火焰加速而导致的管内压力上升现象。在实验中, 使用了三种不同形状的障碍物, 同时改变障碍物的间距 W 和阻塞比 BR 。结果表明, 障碍物的存在对管内压力的影响是十分巨大的, 即使是较小的阻塞面积, 也能导致压力大幅度上升。在障碍物阻塞比 $BR=0.5$ 、障碍物间距约等于管道内径 ($W/D \approx 1$) 时, 管内的峰值压力达到最大值。本实验所用的三种障碍物产生的管内峰值压力并不相同, 以圆环型的障碍物产生的压力最高, 这说明, 存在某一种最优化的障碍物, 在相同的阻塞比条件下, 该障碍物能最大地提高管内的峰值压力。

关键词 火焰传播; 障碍物结构; 管内压力

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2003)03-537-03

INFLUENCE OF OBSTACLE CONFIGURATIONS ON OVERPRESSURE DEVELOPMENT IN PREMIXED FLAME

YU Li-Xin YOU Han SHENG Hong-Zhi SUN Wen-Chao WU Cheng-Kang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract An investigation of overpressure development due to flame acceleration induced by obstacles has been studied with various gas mixtures. The experiments have been carried out with three different shapes of obstacles by changing their spaces W and blockage ratio BR . It was observed that the obstacle plays a dramatic role on the overpressure development in the tube, even relatively small blockage area leading to a high increase in the overpressure. The peak overpressure reaches the top value when the blockage ratio is about 0.5 and the space of obstruction corresponds to the inner diameter of tube. The peak overpressures produced by three obstacles are different from to another, where the overpressure induced by orifice is head and shoulders. Thus it can be referred that there exists an optimum obstacle under which the maximum peak overpressure may be obtained.

Key words flame propagation; obstacle configuration; overpressure

1 前 言

在一个完全封闭的容器(管道)中, 不管预混气的燃烧速度有多大、火焰传播处于何种状态(爆燃或爆轰), 其最终的平衡压力(最大压力)不变, 即为定容爆炸压力 P_{cv} 。对于大多数处于化学当量比的碳氢化合物/空气的混合物而言, 定容爆炸压力量级为 0.7~0.8 MPa, 仅取决于混合物的热力学性质, 而与混合气的流动状态无关。而在开口容器(管道)中, 则不存在一最终的平衡压力, 瞬态压力的发展取决于容器(管道)的几何结构、开口面积及混合气的燃烧速度。对于自由传播火焰, 由于火焰区比容

的增加而导致未燃气体流动, 致使燃烧过程和火焰前沿产生强烈的相互耦合关系。在有障碍物的管道中, 障碍物产生的扰动使火焰发生毁灭性畸变。基于 Taylor-Markstein 界面不稳定性机理, 火焰将皱折成漏斗状, 形成冲击波和火焰的相互作用, 其结果使燃烧速率增大, 最终形成一个极其扭曲的火焰阵面, 这不仅增大了火焰面积, 也相应增加了能量释放速率, 从而导致压力波进一步增强。大量的实验表明, 如果在管道中重复布置障碍物, 则不仅可以导致火焰速度加速, 甚至发生爆燃转爆轰现象, 同时管内压力也急剧上升, 在适当的条件下, 其最终压力会远大于等容爆炸压力^[1~5]。然而, 在现有的文献报

收稿日期: 2002-10-25; 修订日期: 2003-01-03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (No.G1999022305)

作者简介: 余立新 (1968-), 男, 江西上饶人, 博士, 副研究员, 主要从事煤粉燃烧和锅炉受热面除灰技术的研究。

道中, 几乎所有的实验都仅仅局限于圆环型障碍物对火焰速度和压力发展的影响。

在本文的实验中, 使用了三种不同形状的障碍物, 同时改变障碍物的间距及阻塞比, 研究了在预混火焰在半开口管道传播时, 障碍物结构的变化对管内压力的影响。

2 实验方案

如图 1 所示, 火焰传播管为一端接近封闭、一端敞开的钢管, 内径为 $D=80$ mm, 长度为 $L=5$ m。管内均匀布置障碍物, 阻塞比 BR 分别为 0.212, 0.315, 0.438, 0.609, 0.75。图 2 为障碍物形状示意图。

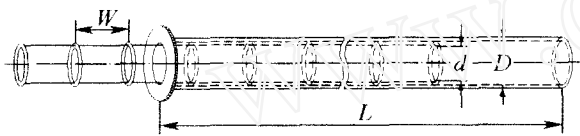


图 1 火焰传播管与障碍物排列示意图

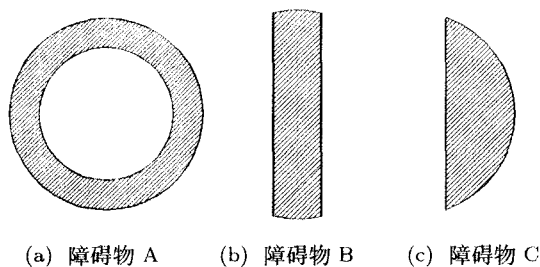


图 2 障碍物形状示意图

初始预混火焰进入火焰传播管后, 由于障碍物产生的扰动, 火焰由封闭端沿着管道向开口端加速传播。为了测量管内压力的变化, 在管道壁面的不同位置布置了高温应变式压力传感器 (频率响应时间可达到 10^{-7} s), 当火焰经过时, 通过 8 通道高速数据采集仪 (最高采样频率为 400 kHz) 采集的压力信号, 即可得到管道中的瞬态压力。

3 实验结果和分析

本文中, 当量比定义为 $\Phi = \text{实际燃料空气比} / \text{化学当量比}$; 阻塞比定义为 $BR = \text{障碍物的阻塞面积} / \text{火焰传播管的横截面积}$ 。

3.1 管内压力随障碍物阻塞比的变化

图 3 是当量比 $\Phi = 0.58$ 的乙炔 / 空气预混火焰在管内传播时, 管道两端 (A 点: 闭口端, 位于 $x/L = 0.08$ 处; B 点: 开口端, 位于 $x/L = 0.92$ 处) 的压力随时间的变化曲线。可以看出, B 点的压力峰值明显大于 A 点, 同时前者的压力脉冲半峰宽度 (4.2 ms) 小于后者 (7.4 ms), 这表明, 障碍物的存在导致了火焰加速, 同时使管道峰值压力上升。图 4

是甲烷 / 空气火焰产生的压力随时间的变化曲线。结合图 3 可以看出, 由于甲烷的燃烧速度比乙炔的低, 火焰向前传播时引起的未燃气预压缩也较弱, 压力上升比乙炔平缓。

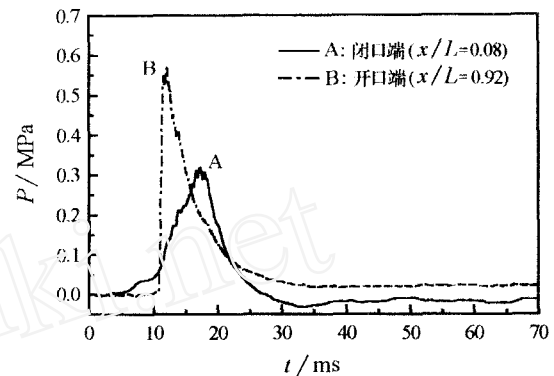


图 3 管道两端的压力随时间的变化
(乙炔: $\Phi = 0.58, BR = 0.315$)

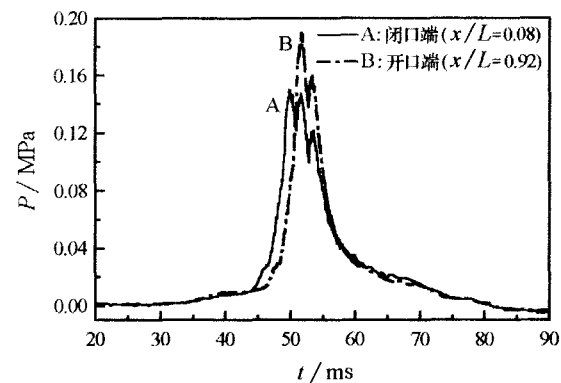


图 4 管道两端的压力随时间的变化
(甲烷: $\Phi = 0.58, BR = 0.315$)

图 5 显示了四种不同燃料的管内最大压力随阻塞比的变化。图中 $BR = 0$ 表示光管。可以看出, 障碍物的存在对压力发展的影响是十分巨大的。在光管中, 在混合气当量比 $\Phi = 0.58$ 时, 甲烷、水煤气、乙炔和氢气的最大压力分别为 0.03 MPa、0.1

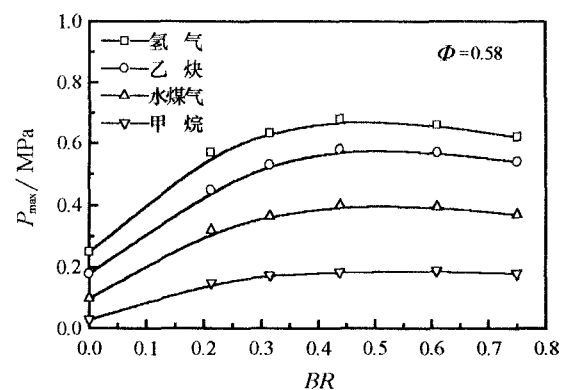


图 5 管内最大压力随阻塞比的变化

MPa、0.18 MPa、0.25 MPa, 在管中布置障碍物后, 即使是较小的阻塞面积, 也能导致压力大幅度提升, 如, 在阻塞比 $BR=0.212$ 的条件下, 上述四种气体混合物的压力依次上升到 0.15 MPa, 0.32 MPa, 0.45 MPa, 0.57 MPa, 分别增大了 5 倍、3.2 倍, 2.5 倍及 2.28 倍。在阻塞比 $BR=0.438$ 的条件下, 其管内最大压力分别是光管时的 6.6 倍、4 倍、3.2 倍及 2.72 倍。

图 5 同时表明, 压力随障碍物阻塞比的变化并不呈现单调规律。在阻塞比小于 0.5 时, 随着阻塞比的增大, 最大压力有所上升, 但当阻塞比大于 0.5 时, 压力反而下降, 在阻塞比 $BR=0.5$ 附近, 压力达到最大值。

3.2 障碍物形状对管内压力发展的影响

图 6 是管道中布置不同形状的障碍物时, 管内爆炸压力的发展过程。

实验结果表明, 在障碍物间距和阻塞比相同的条件下, 改变障碍物的形状, 压力波上升的趋势基本相同, 但各点的压力值略有变化, 其中障碍物 A 引起的压力最高, 障碍物 B 最低。由图 2 可知, 障碍物 A 的阻塞部分在壁面上, 而障碍物 B 的阻塞部分则是流场中心, 显然, 当压力波穿过障碍物时, 后者的节流影响大于前者, 从而导致压力损失增大, 相应的波后压力降低。由此可以推断, 存在某一种最优化的障碍物, 在相同的阻塞比条件下, 该障碍物能最大地提高管内的峰值压力。

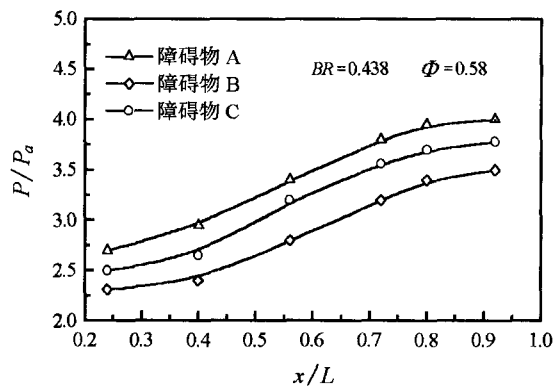


图 6 障碍物的形状对压力发展的影响

3.3 障碍物间距对管内压力的影响

图 7 反映了管内最大压力随障碍物间距的变化。可以看出, 在相同的阻塞比条件下, 障碍物间距的变化对压力的影响非常明显。随着障碍物间距的增大, 管内峰值压力先上升后下降, 在障碍物间距约等于与管道内径 (即 $W/D \approx 1$) 时, 与速度的变化规律^[6]相似, 管内压力达到最大值, 这与文献^[7]的结果 $W/D = 0.8$ 基本相同。

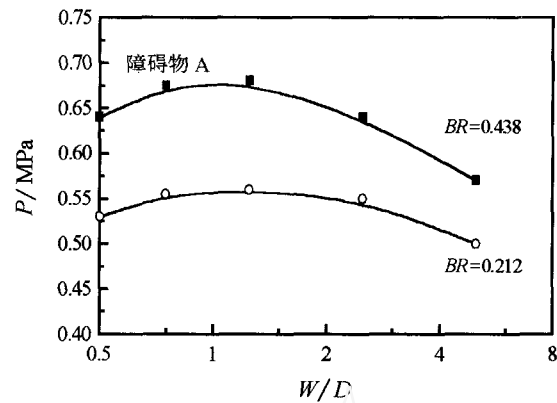


图 7 障碍物间距对最大压力的影响

4 结 论

在本文中, 针对不同结构的障碍物, 研究了火焰传播过程中管内压力的变化规律。结果表明:

- (1) 障碍物的存在对压力发展的影响十分明显, 即使是较小的阻塞面积, 也能导致压力大幅度上升。
- (2) 在阻塞比 $BR=0.5$ 附近, 压力达到最大值。而当燃烧处于爆轰态时, 随着阻塞比的增大, 压力逐渐降低。
- (3) 障碍物形状的变化对管内压力有一定的影响, 在本实验所用的三种障碍物中, 以园环型的障碍物产生的压力最高。
- (4) 随着障碍物间距的增大, 管内峰值压力先上升后下降, 在障碍物间距约等于管道内径 (即 $W/D \approx 1$) 时, 管内的峰值压力达到最大值。

参 考 文 献

- [1] Lee J H, Knystautas R, Chan C K. Turbulent Flame Propagation in Obstacle-filled Tubes. In: Proc. of the 20th Symposium (International) on Combustion, the Combustion Institute. 1984. 1663-1672
- [2] Lee J H, Knystautas R, Freiman A. High Speed Turbulent Deflagrations and Transition to Detonation in H₂-Air Mixtures. Combustion and Flame, 1984, 56: 227-239
- [3] Chan C, Lee J H S, Moen I O, et al. Turbulent Flame Acceleration and Pressure Development in Tubes. In: Proceedings of the First Specialist Meeting of the Combustion Institute. Bordeaux, France, 1981. 479-487
- [4] Moen I O, Lee J H S, Hjertager B H, et al. Pressure Development Due to Turbulent Flame Propagation in Large-Scale Methane-Air Explosions. Combustion and Flame, 1982, 47: 31-52
- [5] 余立新, 孙文超, 吴承康. 半开口管道中的氢/空气火焰加速和压力发展过程. 工程热物理学报, 2001, 22(6): 637-640
- [6] 余立新. 障碍物扰动对半开口管道中火焰传播特性的影响: [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2001
- [7] Hjertager B H, Fuher K, Parker S J, et al. Flame Acceleration of Propane-Air in a Large-Scale Obstructed Tube. Dynamics of Shock Waveä, Explosions anä Detonations, 1984, 94: 504-522