

半开口管道中的氢 / 空气火焰加速 和压力发展过程

余立新 孙文超 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 本文研究了氢 / 空气预混火焰在半开口管道中的火焰加速现象和压力发展过程。结果表明, 重复布置的障碍物对火焰速度和压力提升产生显著的影响。火焰传播状态随着氢气当量比的变化而发生改变, 在氢气当量比约为 0.34 时, 火焰速度出现第一次跃变; 随着氢气当量比进一步提高, 火焰速度发生第二次跃变, 即由爆燃转为爆轰。发生爆轰时氢气当量比的范围随着阻塞比的不同而发生变化。

关键词 氢 / 空气混合物; 当量比; 障碍物阻塞比; 火焰加速; 压力提升

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2001)05-0637-04

FLAME ACCELERATION AND PRESSURE DEVELOPMENT OF H₂-AIR IN A SEMI-OPEN TUBE

YU Li-Xin SUN Wen-Chao WU Cheng-Kang

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

Abstract An investigation on flame acceleration and pressure development in H₂-air mixtures has been carried out in a semi-open obstructed tube. The results indicate that repeated obstacles have a dramatic influence on the flame speed and overpressure, and there exist clear transitions in the regime of flame propagation with variation of equivalence ratio of hydrogen-air mixtures due to obstructions. The first transition of flame speed appears at about equivalence ratio of 0.34. The second transition from deflagration to detonation is observed with the increment of equivalence ratio. The range of equivalence ratio depends on variation of blockage ratio when transition to detonation occurs.

Key words H₂-air mixtures; equivalence ratio; blockage ratio; flame acceleration; overpressure

1 引言

70 多年前, Chapman 和 Wheeler 率先开创了有障碍物管道中的火焰传播研究工作, 其结果表明, 当火焰穿过管道中周期排列的圆环片时, 由于这种节流障碍物对速度的扰动, 火焰不断加速, 甲烷 / 空气预混火焰速度可超过 400 m/s, 而在光管中其相应的速度只有 6 m/s。Evans 等^[1] 在实验中发现, 当火焰穿过金属丝网时, 也发生火焰加速现象。Moens 等^[2] 指出, 即使是较小的障碍物, 由于障碍物扰动引起的火焰加速导致管内压力急剧上升, 管内超压是无障碍物时的 8.8 倍。此后, 火焰加速现象引起了广泛的关注^[3~5]。由于障碍物引起的火焰加速现象

有时会产生意外的爆炸事故, 因此必须采取有效的安全措施减少事故隐患, 这就需要了解障碍物对火焰的加速机制。

近年来, 环保问题正日益受到人们的重视。碳氢化合物燃烧后都会释放出 CO 和 CO₂, 从而加重大气的污染并产生温室效应。氢气作为一种清洁能源, 有关其在半开口管道中的火焰传播方面的研究工作还少有文献报道。本文在一半开口的长管中 ($L/D > 50$), 研究了氢 / 空气火焰加速和压力发展过程。

2 实验方案

实验系统如图 1 所示。氢气和空气按要求比例

收稿日期: 2001-01-04; 修订日期: 2001-06-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目 (No.G1999022305)

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

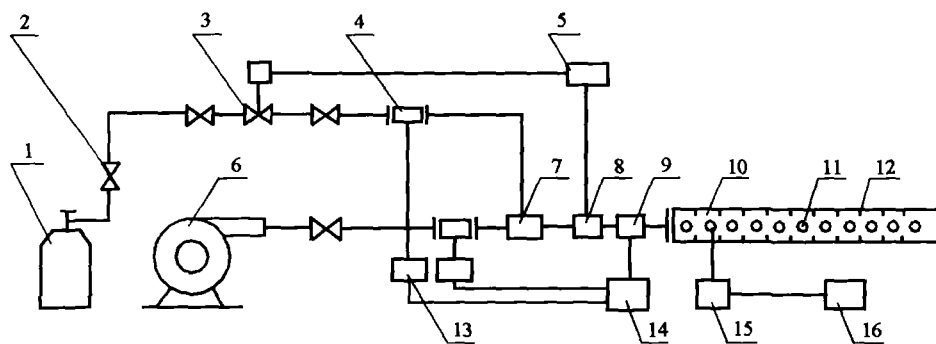


图1 实验系统图

- 1 气瓶 2 调节阀 3 电磁阀 4 流量系统 5 温控仪 6 风机
7 预混系统 8 温度传感器 9 点火器 10 火焰传播管 11 测孔
12 障碍物 13 差压变送器 14 控制仪 15 火焰/压力探头 16 数据采集仪

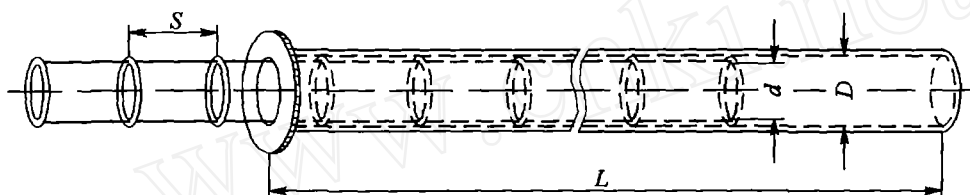


图2 火焰传播管与障碍物排列示意图

在预混系统经过充分混合后充满整个管道，由点火控制系统点燃混合气体形成初始火焰，进入火焰传播管。

数据采集采用 DH5932 高速记录分析仪。

火焰传播管为一端接近封闭、一端敞开的钢管，内径为 $D=80\text{ mm}$ ，长度为 $L=4.5\text{ m}$ 。障碍物在管道中的布置见图 2。障碍物间距 $S=200\text{ mm}$ ，阻塞比 $BR=1-(d/D)^2$ 分别为 0.315，0.438，0.609，0.75。

3 实验结果和分析

本文中，当量比定义为 $\Phi = \text{实际燃料空气比} / \text{化学当量比}$ 。

3.1 障碍物对管道中火焰传播的影响

3.1.1 障碍物对火焰加速的影响 导致火焰传播加速的主要因素有：(1) 由于火焰传播区的气体比容的上升而导致的未燃气体的流动；(2) 由于边界层和 / 或障碍物的存在而引起的流体微团的畸变和扰动；(3) 火焰与流体微团的畸变和扰动的相互作用。

如果在火焰所到之处预先重复设置障碍，障碍物的存在使湍流强度增强，从而导致火焰阵面发生畸变，火焰进一步加速，加速火焰又增强湍流。由于这种火焰燃烧速率和气体动力学流动结构之间的正

反馈机制，同时考虑到火焰与壁面的摩擦及管道的散热损失，在火焰传播距离足够长时，火焰加速的结果，将趋于准稳态传播，此时火焰速度达到最大值，见图 3。

从图中可以看出，火焰的传播在经过 $20 \sim 25D$ 的加速距离后达到准稳定状态，火焰以匀速传播。在有障碍物的条件下 (图中 $BR=0.315$)，火焰的加速度远远大于光管时 ($BR=0$) 的加速度，导致最大火焰速度显著上升，如在 $\Phi=0.34$ 时，最大火焰速度是光管时的 4 倍多。随着氢气当量比的上升，火焰速度越来越快，火焰到达准稳态传播所需的距离也越来越短。

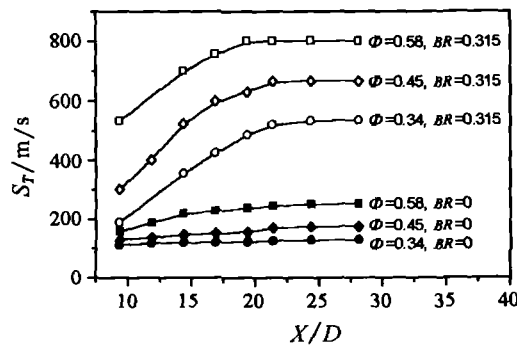


图3 火焰速度的加速过程

3.1.2 氢气当量比和障碍物阻塞比对火焰传播状态的影响 实验中发现, 预混火焰在管道中加速时, 随着当量比的不断提高, 火焰传播状态发生两次跃变见图 4。第一次在 $\Phi = 0.34$ 处, 由于化学反应机制发生变化, 混合物中 OH 急剧增加, 由缓慢燃烧向快速燃烧 (本文称之为“爆燃”) 转变。随着氢气当量比进一步提高, 爆燃速度达到临界速度, 由爆燃转为爆轰, 产生第二次跃变, 但在不同阻塞比条件下, 发生爆轰时氢气当量比各不相同, 对应于 $BR=0.315, 0.438, 0.609$ 三种情况, 相应的氢气当量比分别为 0.69, 0.81, 0.98。由于障碍物引起的动量损失, 导致爆轰速度低于 C-J 爆轰值, 且爆轰速度随着障碍物阻塞比的增大而降低。

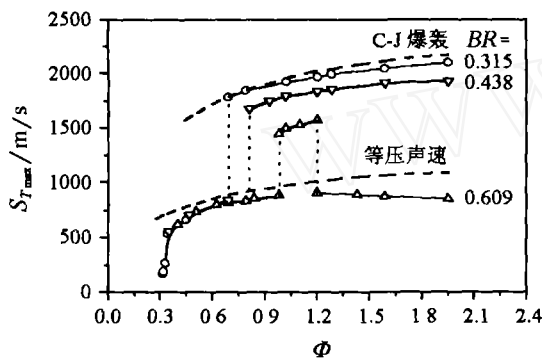


图 4 火焰传播状态随当量比和阻塞比的变化

从图 4 可以明显地看出, 尽管在不同的阻塞比下都发生了爆轰, 但爆轰时氢气的浓度范围各不相同。随着阻塞比的增大, 火焰穿过阻塞板时, 压力损失增大, 爆轰波不能自持地向前传播, 从而使爆燃转爆轰的浓度范围变小。

3.1.3 障碍物对最大火焰速度的影响 由图 5 可以看出, 在爆燃态, 障碍物阻塞比对最大火焰速度的影响很小, 考虑到实验测量误差, 可以认为, 最大

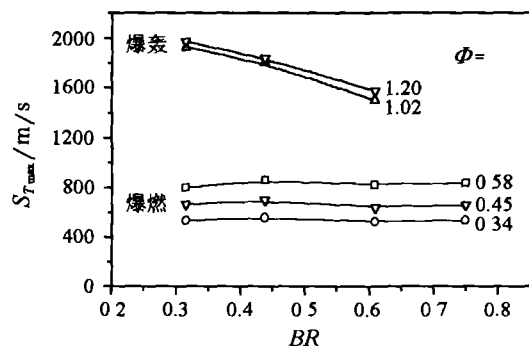


图 5 阻塞比对最大火焰速度的影响

火焰速度基本不受阻塞比变化的影响。此时流动已处于“壅塞”状态^[6], 根据可压缩流体理论, 摩擦和反应放热将驱动流体以声速流动, 但由于障碍物引起的动量损耗和管道壁面的热损失, 导致火焰速度略低于燃烧产物的声速。但在爆轰态, 随着阻塞比的增大, 火焰速度呈单调下降, 最后爆轰又被抑制。由此我们可以推断存在某一临界值, 当障碍物阻塞比超过此临界值时, 任何当量比的氢 / 空气混合物都将不再发生爆轰。

3.2 障碍物对管道压力发展的影响

3.2.1 管道中的压力发展 图 6 显示了火焰传播处于三种不同状态 (缓燃、爆燃、爆轰) 时管道内的压力发展过程。在缓燃态, 火焰速度很低, 可近似认为是不可压流动, 此时管道中各处的压力基本相同。在爆燃态或爆轰态, 火焰以接近声速或超声速传播, 此时压力的传递呈现出单向的特性, 必须考虑可压缩效应; 随着压力波的向前推移, 压力逐渐上升, 经过一段距离后达到准稳态。

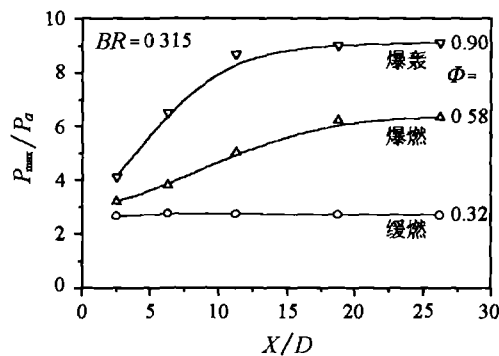


图 6 压力在管道中的变化 (Pa 为大气压)

3.2.2 管内压力随当量比的变化 图 7 显示了管内压力随氢气当量比的变化。结果表明, 在缓燃态, 最大压力小于等容爆炸压力, 在当量比 $\Phi=0.34$ 处, 压

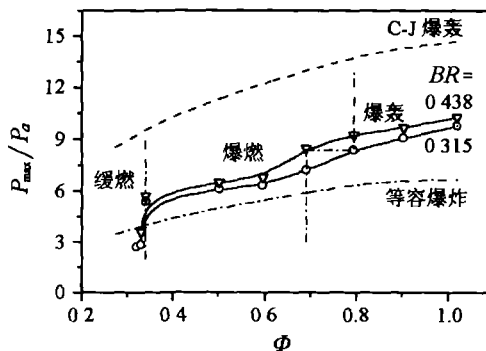


图 7 当量比对管内最大压力的影响

力发生跃变;在整个爆燃态,最大压力略大于等容爆炸压力,但远小于 C-J 爆轰压力;当火焰传播状态从爆燃转变为爆轰时,压力只略有上升,没有出现类似火焰速度一样的跃变现象(测点在管道壁面,由于障碍物扰动的影响,所测压力小于实际波后压力)。文献 [7] 指出,当爆轰速度达到 99% 的 C-J 值时,此时的波后压力仅为 C-J 爆压的四分之三左右。在此之后,爆轰波还要传播一段相当长的距离,压力才达到 C-J 值,此过程称为爆轰增长过程。

3.2.3 障碍物阻塞比对管内最大压力的影响 在缓燃和爆燃态,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,见图 8。而在爆轰态,冲击波阵面和火焰阵面合二为一,以超声速向前传播,随着阻塞比的增大,由于障碍物的节流作用,火焰穿过障碍物时压力损失增大,压力随之降低。

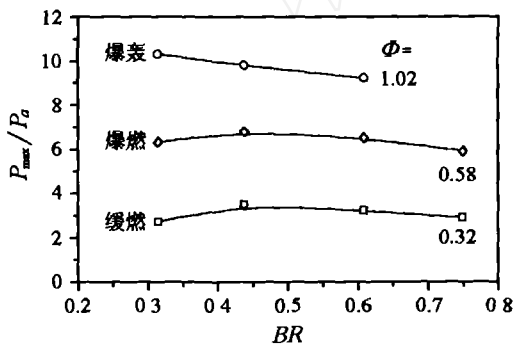


图 8 阻塞比对最大压力的影响

4 结 论

本文针对氢/空气混合物,研究了其预混火焰在半开口光管和有障碍管道中的火焰加速现象和压力发展过程。实验结果表明:

(1) 管道中的预混气被点燃后,火焰在管道中不断加速,并最终到达一准稳态传播。在有障碍物的情况下,火焰加速度远远大于光管时的加速度,导致最大火焰速度上升,如在 $\Phi = 0.34$ 时,最大火焰速度是光管时的 4 倍多。

(2) 随着氢气当量比的上升,火焰传播状态发生两次跃变,第一次火焰由缓燃向爆燃转变;随着氢气当量比进一步上升,火焰速度出现第二次跃变,即由爆燃转为爆轰。且不同阻塞比下发生爆轰时氢气当量比的范围不同,阻塞比增大,当量比的范围减小。

(3) 在爆燃态,最大火焰速度基本不受阻塞比变化的影响,略低于燃烧产物的声速;而在爆轰态,随着阻塞比的增加,最大火焰速度逐渐降低。

(4) 在缓燃态,管道中各处的压力基本相同;而在爆燃态和爆轰态,随着压力波的向前推移,压力逐渐上升,经过一段距离后达到准稳态。

(5) 在缓燃态,最大压力小于等容爆炸压力,在爆燃态,最大压力略大于等容爆炸压力;而在爆轰态,最大压力介于等容爆炸压力和 C-J 爆轰压力之间。

(6) 在缓燃和爆燃态,压力随障碍物阻塞比的变化并不呈现单调规律。而当燃烧处于爆轰态时,随着阻塞比的增大,压力逐渐降低。

参 考 文 献

- [1] Evan M W, Scheer M D, Schoen L J, et al. A Study of High Velocity Flames Developed by Grids in Tubes. In: Proc. of 3rd Symposium (International) on Combustion, the Combustion Institute, Pittsburgh, 1949. 168-185
- [2] Moen I O, Lee J H S. Pressure Development Due to Turbulent Flame Propagation in Large-Scale Methane-Air Explosions. Combustion and Flame, 1982, 47: 31-52
- [3] Lee J H S, Knystautas R, Freiman A. High Speed Turbulent Deflagrations and Transition to Detonation in H₂-Air Mixtures. Combustion and Flame, 1984, 56: 227-239
- [4] Moen I O. The Influence of Turbulence on Flame Propagation in Obstacle Environments. In: Proc of First International Specialist Meeting on Fuel-Air Explosions, Montreal, 1982. 101-135
- [5] Hjertager B H, Fuher K, Parker S J, et al. Flame Acceleration of Propane-Air in a Large-Scale Obstructed Tube. Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations, 1984, 94: 504-522
- [6] Lee J H, Knystautas R, Chan C K. Turbulent Flame Propagation in Obstacle-filled Tubes. In: Proc. of 20th Symposium (International) on Combustion, the Combustion Institute, Pittsburgh, 1984. 1663-1672
- [7] 孙锦山, 朱建士. 理论爆轰物理. 北京: 国防工业出版社, 1995. 262-263