氢/空气火焰在半开口有障碍管道中的传播特性*

余立新, 孙文超, 吴承康
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘　要: 针对氢/空气混合物, 通过实验研究了其预混火焰在半开口管道中的火焰传播加速现象。结果表明, 火焰传播状态随着氢气当量比的变化而发生改变。当氢/空气混合物被点燃后, 由于障碍物的扰动, 火焰在管道中不断加速传播, 并最终到达一准稳态传播。在氢气当量比 0.34 附近时, 火焰速度发生跃变。当氢气当量比足够大时, 火焰传播由爆燃态转变为爆轰态。在本实验条件下, 爆燃转准爆轰的临界条件是 $d/\lambda \geq 2.6$(d 是圆环形障碍物内径, λ 是爆轰格胞尺度)。障碍物阻塞比的变化对最大火焰速度和压力提升的影响不明显。

关键词: 氢/空气混合物; 半开口管道; 火焰传播; 阻塞比; 压力提升
中图分类号: O 382　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1006-8740(2002)01-0027-04

Flame Propagation of H_2-Air in a Semi-Open Obstructed Tube

YU Li-xin, SUN Wen-chao, WU Cheng-kang
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The turbulent flame acceleration experiments with H_2-air mixture have been carried out in a semi-open obstructed tube with an 80 mm diameter and 2.5 m length. Circular orifice plates spaced 200 mm apart with blockage ratios of $BR = 0.315$, 0.438 and 0.609 were used as flow obstructions. The results indicate that there exist clear transitions in the regime of flame propagation with the variation of equivalence ratio of hydrogen-air mixtures. When the H_2-air mixture is ignited, the flame accelerates and eventualy reaches a quasi-steady state due to obstructions. A sharp transition occurs at an equivalence ratio about 0.34. The second transition from deflagration to detonation occurs if the equivalence ratio is sufficiently high. In the present study, for the semi-open tube, one criterion of transition to detonation is that the ratio of orifice diameter d to detonation cell size λ is $d/\lambda \geq 2.6$. The magnitude of the maximum flame speed and the overpressure is insensitive to the blockage ratios.

Keywords: H_2-air mixture; semi-open tube; flame propagation; blockage ratio; overpressure

在管道中排列一系列障碍物, 预混火焰的火焰速度沿着管道方向加速上升[1]。由于障碍物引起的火焰加速可能导致爆轰现象的发生。人们相继进行了一系列的研究工作[2~4]。但大部分的研究工作要么是在密闭容器中进行, 要么实验局限在非常狭窄的工况范围内。而对敏感气体, 如氢气、乙炔等, 其在半开口管道中的火焰传播, 很少见到文献报道。

对于燃烧气体燃料的半开口系统, 如电力系统的一种燃气除灰装置[5], 既要使喷出口的燃气有一定的冲击压力, 以保证良好的除灰性能, 同时又不能产生爆轰, 以免破坏电力系统的设备。本文针对氢/空气混合物, 进行了不同工况下的火焰传播实验。

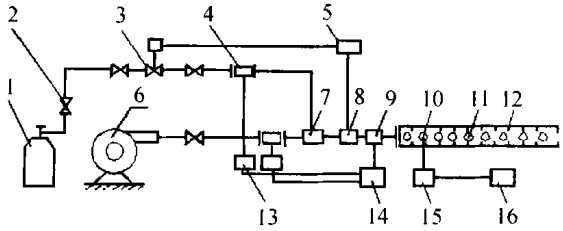
1　实验方案

为了能系统地观测预混气燃烧波在管道中的传播

* 收稿日期: 2000-10-16。
基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999022305)。
作者简介: 余立新(1968-), 男, 博士, 副研究员。E-mail: yulixin@imech.ac.cn。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

过程, 建立的实验系统如图1所示。



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—实验段;
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1　实验系统

其中, 实验段为一端接近封闭、一端敞开的钢管, 内径D = 80 mm, 长度L = 2.5 m。为了增加管内流动的扰动强度, 在管中均匀布置了不同内径d的圆环型障碍物, 相邻间距为200 mm, 阻塞比$BR = 1 - (d/D)^2$分别为0.315, 0.438, 0.609。

实验时, 由点火器点燃经过充分预混后的氢/空气混合气, 火焰由封闭端沿着管道向开口端传播。通过火焰离子探针测得不同位置火焰阵面到达的时间, 即可得到管道中的火焰速度, 同时用压力传感器测得管道中的压力分布。数据采集用DH5932高速数据采集仪, 其最高采样频率为400 kHz。

2　实验结果和分析

本文中, 当量比Φ定义为

Φ= 实际燃料空气比/化学当量比

实验中采用的氢气当量比Φ= 0.24～2.0。

2.1　火焰传播的加速机制

燃气流团燃烧时, 因体积膨胀而对周围介质作功, 在火焰前方形成压缩波, 诱导并加速前方质点的流动。如果在火焰所到之处预先重复设置障碍物, 这种流动将在障碍物附近形成高梯度的粘性边界层, 导致湍流, 火焰阵面发生畸变, 使火焰加速, 加速火焰又增强湍流, 因此这是一种正反馈的过程。这种畸变火焰引起体积燃烧速率的升高, 也增大了有效燃烧速度, 而较高的燃烧速度又赋予火焰前面气体更大的位移速度, 最终形成一个极其扭曲的火焰阵面, 不仅增大了火焰面积, 也增大了能量释放速率, 导致压力波进一步增强。随着火焰阵面的向前推移, 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2。

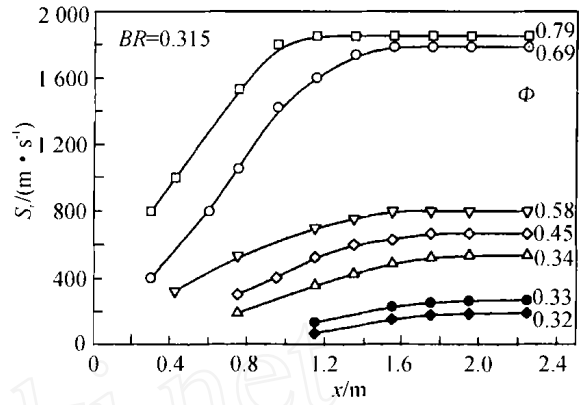


图2　火焰速度沿着管道的变化

从图中可以看出, 火焰的传播在经过1.2～2.0 m (15～25D)的加速距离后达到准稳定状态, 火焰以匀速传播。随着氢气当量比的上升, 火焰到达准稳态传播所需的距离越来越短。

图3是不同氢气浓度下的最大火焰速度。当Φ从0.33上升至0.34时, 最大火焰速度从272 m/s猛然上升到536 m/s。这种跃变与化学反应机制的变化有关, 氢与氧的反应主要由反应Ⅰ: H + O ⇌ + O 和反应Ⅱ: $H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$ 控制, 其中反应Ⅱ在温度低于～1 350 K时起主导作用[6]。在氢气当量比Φ= 0.34时, 火焰温度约为1 400 K, 此时, 反应Ⅰ取代反应Ⅱ占主导地位, 混合物中OH急剧增加, 最大火焰速度发生跃变。当氢气当量比上升至0.69时, 火焰经过一段连续加速传播后, 到达一临界速度, 在此速度下, 化学反应传播机理突然产生跃变, 从扩散、输运模式转变为冲击加热自着火模式, 反应阵面和冲击波阵面合二为一, 火焰传播状态由爆燃转为爆轰, 最大火焰速度从860 m/s突然跃升到1 786 m/s, 此时, 障碍物间的激波反射强烈影响其传播机制。

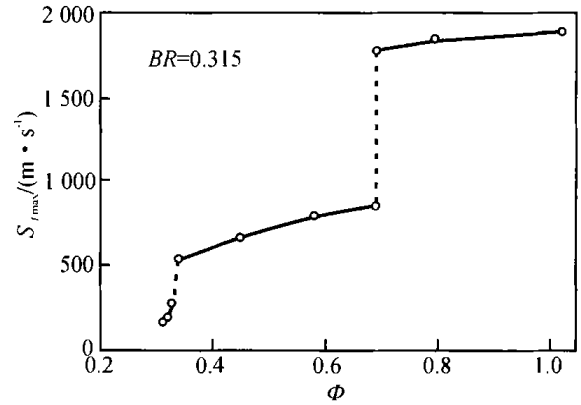


图3　不同当量比下的最大火焰速度

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2　管道中的压力变化

管道中预混气被点燃后, 气体急剧膨胀, 管内压力急速上升, 随着火焰的传播, 压力的变化见图 4。压力随着氢气浓度的增大而上升。当氢气当量比很低时(如 $\Phi=0.32$), 火焰速度远远低于当地声速, 此时管道中各处的压力基本相同。当氢气当量比 $\Phi\geq0.34$ 时, 火焰以接近声速或超声速传播, 此时压力波以火焰速度的量级传播, 和火焰速度的变化趋势相似, 压力波传播一段距离后达到准稳态。

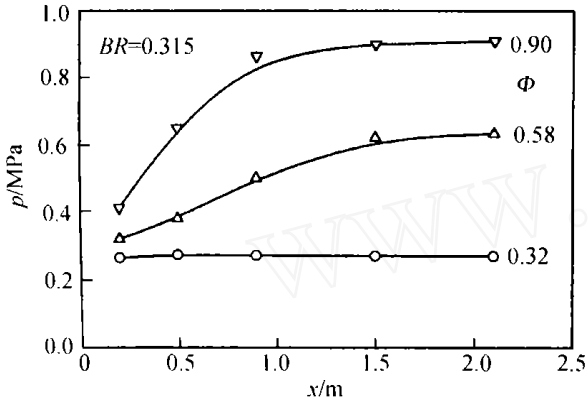


图 4　距点火源不同距离的最大压力

2.3　障碍物对爆燃转爆轰的影响

当火焰穿过障碍物时, 由于障碍物引起的湍流扰动, 火焰沿着管道逐渐加速, 并最终到达一稳态速度。在这种情况下, 火焰传播可看作是管道中的准稳态的一维可压缩流动。根据可压缩流体理论, 摩擦和反应放热将驱动流体最终以声速流动。由此可以推断, 如果火焰不熄灭, 则其最终的火焰速度应等于燃烧产物的声速, 这种状态称之为"壅塞态"。实际上, 由于障碍物引起的动量损耗和管道壁面的热损失, 火焰速度将小于燃烧产物的声速。从图 5 可以明显看出, 在壅塞态, 实测的火焰速度比相应的等压声速小 100 m/s 左右, 且作为混合物当量比的函数, 和等压声速线的趋势基本一致。同时, 火焰速度基本上不随障碍物阻塞比的变化而变化, 这和壅塞状态下的流动特性相吻合。当氢气当量比进一步提高时, 火焰传播由爆燃转变为爆轰。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, 且不同障碍物阻塞比下的爆轰速度各不相同, 如, 当 $BR=0.609$ 时, 爆轰速度只有 Chapman-Jouguet 值的 80% 左右, 这样一种火焰传播状态称之为"准爆轰态"。

图 5 的另一特点是, 尽管阻塞比不同, 但发生爆轰前三者的火焰速度差别很小, 分别为 860 m/s, 880 m/s, 890 m/s, 这说明只有在火焰加速达到足以弥补热耗散效应的临界值时, 火焰传播才能发生爆燃转爆轰现象。随着阻塞比的增大, 火焰穿过阻塞板时, 压力损失增大, 导致爆轰速度降低, 如在 $\Phi=1.02$ 时, 对应于 $BR=0.315, 0.438, 0.609$ 的爆轰速度分别为 1 900 m/s, 1 800 m/s, 1 480 m/s, 降幅达 420 m/s 之多。同时, 爆轰的范围也相应缩小。如, 在 $BR=0.609$ 时, 当氢气当量比 $\Phi\geq1.2$ 时, 爆轰又被抑制, 在这种工况下, 爆燃转爆轰只在 $0.98\leq\Phi\leq1.2$ 很窄的范围发生。而对于 $BR=0.438$ 这种工况, 爆燃转爆轰的范围则大得多: $0.81\leq\Phi\leq2.0$。由此可见, 随着阻塞比的减小, 爆燃转爆轰的范围变大。

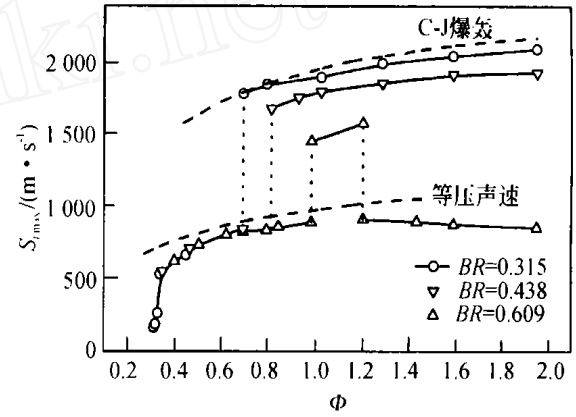


图 5　不同障碍物阻塞比条件下的最大火焰速度

当预混火焰在光管内传播时, 只有当管径 D 大于或等于爆轰格胞的尺度 λ(即 $D/\lambda\geq1$) 时, 燃烧才有可能由爆燃转为爆轰[7]。Vasilie 也得到了相似的结论, 其实验表明, 在方型通道中, 只有当通道宽度 $W\geq\lambda$ 时, 爆轰波才能自持地向前传播。由此可以推出, 如果在有障碍物的管道中发生爆燃转爆轰的现象, 则其障碍物圆环内径至少应不小于相应的格胞尺度(即 $d/\lambda\geq1$)。文献[8]针对不同的气体燃料在管道发生爆轰时, 实测了爆轰格胞尺度 λ 和混合物浓度的关系。对于不同内孔径 d 的环形障碍物, 实验发现, 当火焰传播由爆燃向爆轰转变时, 尽管氢气当量比各不相同, 但 d/λ 非常接近, 分别约等于 2.6、3.3 和 3.3, 见图 6。因此, 在本实验条件下, 针对半开口管道, 只有在 $d/\lambda\geq2.6$ 的条件下, 氢气才发生爆燃转爆轰现象。

2.4　障碍物的扰动对管内压力的影响

在贫燃料区, 随着氢气当量比的增大, 反应放热增加, 引起局部压力上升。图 7 显示了距点火源 2.1 m 处的压力。

图 7 表明, 在当量比 $\Phi=0.34$ 处, 压力发生了跃变。但当火焰从爆燃转为爆轰时, 压力只略有上升, 小于 C-J 爆压值。如, 在 $\Phi=0.9$ 时, 对应于 BR 为 0.315

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和 0. 438 的爆轰压力分别为 0. 91 MPa 和 0. 95 MPa, 而相应的 C-J 爆轰值 p_{C-J} = 1. 44 MPa。文献[9]指出, 当爆轰速度达到 99% 的 C-J 值时, 此时的波后爆压仅达到 3/4 的 C-J 爆压。在此之后, 爆轰波还要传播一段相当长的距离之后, 压力才达到 C-J 值, 此过程称为爆轰增长过程。同时, 障碍物阻塞比和压力的关系并不呈现单调规律, 且阻塞比对压力的变化影响不大。当阻塞比足够大时(图中 BR = 0. 438), 由于火焰穿过障碍物时压力损失很大, 对壅塞态和准爆轰态而言, 二者的压力差别很小(图中未显示 BR = 0. 609 时相应于爆轰的压力)。

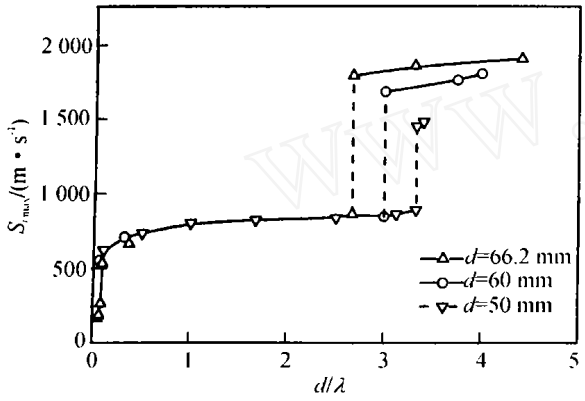


图 6　火焰传播的转戾点和障碍物孔径的关系

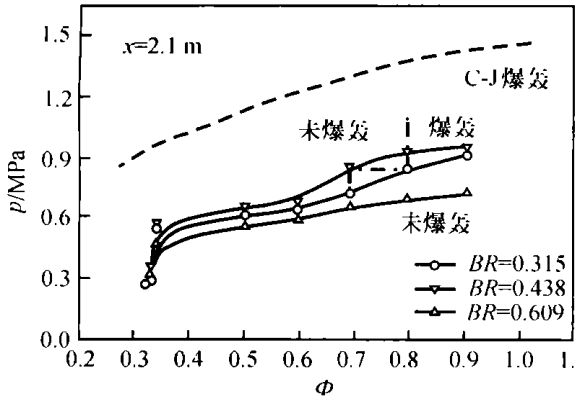


图 7　最大压力随氢气浓度的变化曲线

3　结　论

1) 氢/空气混合物被点燃后, 由于障碍物的扰动, 火焰在管道中不断加速传播, 最终到达一准稳态传播。

2) 在氢气当量比 0. 34 附近, 化学反应机制发生变化, 导致最大火焰速度发生跃变, 由 272 m/s 猛然上升至 536 m/s, 火焰传播进入壅塞态。

3) 火焰传播由爆燃向爆轰转变时, 爆轰前火焰速度必须满足一最小临界值, 在本实验中, 该临界值为 860 m/s; 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; 在本实验中, 爆燃转爆轰的临界条件是 $d/\lambda \geq 2.6$。

4) 在壅塞态, 火焰速度不受阻塞比变化的影响, 火焰以略低于已燃气等压声速的速度传播。随着阻塞比的增大, 爆轰时火焰穿过障碍物引起的压力损失越来越大, 从而导致火焰速度越来越低, 最后被抑制不再发生爆轰。

5) $\Phi \leq 1$ 时, 随着氢气当量比的增大, 燃烧波压力呈上升趋势, 但不像火焰速度一样发生跃变, 且压力和障碍物阻塞比的变化关系并不呈现单调规律。总的来说, 阻塞比对压力的变化影响不大, 且当阻塞比足够大时, 对壅塞态和准爆轰态, 二者的压力差别很小。

参考文献:

[1] Wagner H Gg. Some experiments about flame acceleration[R]. *First International Specialist Meeting on Fuel-Air Explosions*, Montreal, 1982, 77- 99

[2] Moen I O. The influence of turbulence on flame propagation in obstacle environments[R]. *First International Specialist Meeting on Fuel-Air Explosions* Montreal, 1982, 101- 135

[3] Hjertager B H, Fuher K, Parker S J *et al*. Flame acceleration of propane-air in a large-scale obstructed tube[J]. *Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations*, 1984, 94: 504- 522

[4] Lee J H, Knystautas R, Chan C K. Turbulent flame propagation in obstacle-filled tubes[R]. 20th *Symposium (International) on Combustion*, the Combustion Institute, 1984, 1663- 1672

[5] 孙文超, 詹焕青, 陈丽芳, 等. 燃烧气脉冲除灰技术的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(1): 8- 13

[6] Atkinson R, Bull D C, Shuff P J. Initiation of spherical detonation in hydrogen/air[J]. *Combustion and Flame*, 1980, 39: 287- 300

[7] Lee J H, Knystautas R, Freiman A. High speed turbulent deflagrations and transition to detonation in H_2-air mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 1984, 56: 227- 239

[8] Knystautas R, Guirao C, Lee J H *et al*. Measurements of cell size in hydrocarbon-air mixtures and predictions of critical tube diameter, critical initiation energy, and detonability limits[J]. *Dynamics of Shock Waves, Explosions and Detonations*, 1984, 94: 23- 37

[9] 孙锦山, 朱建士. 理论爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995, 262- 263

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net