爆炸波除灰器中火焰传播及压力波形研究

樊未军¹, 孙文超², 吴承康²

(1. 北京航空航天大学 动力系, 北京 100083; 2 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 燃烧气脉冲发生器应用于电站锅炉除灰。其工作原理是预混可燃气体在右端部分开口, 内部有障碍物的容器中快速燃烧, 形成一定的压力脉冲, 并产生作用于积灰表面的射流和冲击波。火焰在湍流扰动装置的作用下不断加速, 容器中的压力不断上升。火焰传播愈快, 压力波形愈陡, 压力锋值愈高。针对这些现象, 主要研究了乙块、水煤 气、液化石油气和甲烷四种燃料, 在不同燃料浓度、不同阻塞比时对火焰传播的影响, 分析了不同燃料浓度下对压力波形的影响。

关键词:爆炸;火焰传播;有障碍物容器 中图分类号:○643_2⁺21 **文献标识码**:A

文章编号: 1006-8740(2001)04-0217-04

A Study on Flame Propagation in a Gas-Explosion Ash Remover

FAN W ei-jun¹, SUN W en-chao², WU Cheng-kang²

(1. Department of Power, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083;

2 M echanics Institute of Chinese A cademy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Gas-explosion generators are used for ash removal in utility boilers The operating principle involves pressure pulse being produced when a premixtured combstible gas burns quickly in a tube with inside obstructions and a partially open end The propagation of flame in the combustion chamber with four kinds of fuel (acetylene, water gas, liquefied petroleum gas and methane) was measured in the experimental apparatus Flame speeds and pressure development were compared at various fuel/air equivalence ratios Effects of blockage ratios on flame velocity were investigated The experimental results are useful in providing some guidance for industrial application

Keywords: explosion; flame propagation; chamber with obstructions

中国电站锅炉因燃烧大量的劣质煤不可避免地普 遍存在着严重影响锅炉安全和经济运行的积灰问题。 国内外发展起来的新一代除灰技术——气脉冲技术, 用爆燃方法产生的冲击波及高速气流作用于锅炉受热 面以达到除灰的目的。图1所示的实验装置说明了气 脉冲技术燃烧部分的原理。可燃气体与空气在经过各 自的流量测控系统后均匀混合,然后在有湍流产生装 置的容器中燃烧,火焰不断加速,燃烧产生的压力不断 上升。压力峰值愈高,除灰能力愈强,但是为安全起见, 燃烧产生的压力峰值必须被限制在一定的范围之内,

并防止燃烧向爆轰转变。

在有障碍物的管道内火焰传播的特性国外已有过 不少研究。文献[1]首先发现了甲烷空气混合物火焰在 直径 5 cm 管道内因一系列环形孔板的作用可以很快 加速到 420 m/s, 而在没有孔板的光滑管内与之相对 应的火焰速度是 6 m/s。文献[2]在直径 2 5 m, 长 10 m, 一端开口的圆筒形大型管道内进行了火焰加速实 验, 研究了 4 种阻塞比 *R*_B = 0 16, 0 3, 0 5, 0 84 的环 形孔板对火焰面速度和压力峰值的影响, 并且也研究 了管道内填充不同数目的孔板对火焰速度和压力波形

^{*} 收稿日期: 2000-04-06; 修回日期: 2001-04-05。 基金项目:攀登B计划资助项目(85-39-16)。

作者简介: 樊未军(1965-), 男, 博士。

的影响。文献[3]在 1. 22 m 长, 127 mm × 203 mm 的 矩形通道内进行了爆炸实验, 矩形阻塞板固定于通道 下方。文献[4]在矩形通道内通过高速摄影技术观察了 氢作燃料时快速爆燃区的火焰速度介于 400~ 1 200 m/s 之间。文献[5]的实验装置为燃烧管, 直径 5 cm, 长 11 m, 长径比大于 200。在燃烧管前部 3 m 的管道内 装螺旋式阻塞条, 其余部分为光管, 研究了高速爆燃以 及爆燃转爆轰的规律。文献[6]研究了气体粉尘火焰在 50 mm × 50 mm 矩形截面 1 m 长, 一端封闭另一端开 口的通道内的爆炸特性, 阻塞板的 R_B 分别为 0 2, 0 4 和 0 6, 得到了火焰在不同时刻的照片。本文的工作是 针对气脉冲技术的具体应用进行研究。燃烧管结构 组 织燃烧的方式, 测试手段均与文献介绍不相同, 因此需 要重点研究它的特殊性。

1 实验系统

实验装置及测试系统布置如图 1, 火焰离子探针 安置位置见表 1。火焰探针放于燃烧管的轴心线上。火 焰离子探针是测量火焰传播速度常见的手段。它主要 由两个电极组成, 当碳氢燃料的火焰面经过两个电极 板时, 由于火焰中存在有大量的离子, 可以使电极瞬时 导通, 而后通过数据采集仪记录下这个信号, 对应的时 间就是火焰面到达的时间。燃烧管是内径 98 mm, 壁 厚 5 mm 的无缝钢管。火焰面传播到探针 1 的时间设 定为火焰传播曲线的 0 点。在 1, 6 所在的截面上安装



两个 0~ 20 M Pa 应变式压力传感器A 和B,用来测量 燃烧管首末两端的压力波形。燃料气分别为乙炔 液化 石油气、甲烷和水煤气,经转子流量计与空气预混后注 入燃烧管。点火器连接火花塞,点火动作和点火时间由 控制器控制。点火器前装有截止阀,用来控制点火前混 合气体的流动状态。燃烧管内安装有 5 个孔板,出口截 面有收缩。测试中使用的是DH 5932 数据采集系统。它 有 8 条通道可同时采集 6 个火焰离子探针和两个压力 传感器送来的电信号。

表1 探头布置尺寸

探头编号	The second secon	2	3	4	5	6
探头位置/mm	0	130	290	450	610	770

2 实验结果及分析

2.1 不同燃料浓度对火焰传播曲线的影响

燃烧管内布置 5 块孔板, 内径均为 83 mm, 出口 直径也为 83 mm, 即 $R_{B} = 0.28$ 。 测量 4 种燃料与空气 预混燃烧的火焰传播曲线。图 2~ 图 5 分别是乙炔 水 煤气、石油液化气和甲烷与空气预混燃烧的火焰传播 曲线。在燃烧管结构不变, 点火条件不变, $R_B = 0.28$, 际燃料/空气)÷(当量比燃料/空气)),火焰的加速度 过程基本满足二次曲线方程。各条曲线都清楚地显示 了火焰加速的情况,从拟合曲线的方程来看可以设x $(t)_{f} = at^{2}$ 。由于实验的浓度是从贫燃料点火极限逐渐 提高的,因此燃料浓度的变化对火焰速度的影响比较 明显。在这种条件下,乙炔的燃烧速度随 φ 的变化是最 为敏感的, φ 愈大火焰速度愈快。甲烷和液化气随 φ 的 变化较弱,但是4种燃料都有类似的变化规律。另外在 燃烧管长径比较小的实验条件下,火焰加速可以看作 是匀加速过程。从中也可看出, 加速度 2a 的数值随 φ 的增加而增加。火焰的加速度大小不仅与燃料种类有 关,而且与燃烧室结构、长径比、阻塞比、阻塞板的排列 形式等因素有关,是一个非常复杂的物理量,现在只能 从实验中得到。

从图 2~ 图 5 中还可以计算出, 在 9~ 0 4 时乙炔 平均火焰速度已经达到 300 m/s, 水煤气次之为 250 m/s, 液化石油气为 170 m/s。在低 97的情况下, 乙炔 液化石油气、甲烷等碳氢燃料的火焰速度越来越接近, 而水煤气的火焰速度则略高于它们。这可能与水煤气 里氢的含量高有关。



2 2 不同阻塞比对火焰速度的影响

图 6 为乙炔-空气火焰速度随阻塞比的变化情况。 从图中可看出,在同一个燃料浓度 9之下,当R_B < 0 49 时燃烧速度随阻塞比的增加而不断增加,这主要





7



图 5 甲烷/空气火焰传播曲线

由于阻塞比的增加提高了孔板对未燃气体的扰动,也 即提高了未燃气体的湍流度,气流湍流度的增加必然 导致湍流燃烧速度的快速提高。此时,火焰速度增加的 幅度大于因阻塞而减少的幅度,因此火焰速度随阻塞 比的增加而不断增加。

当*R*_B> 0 49 以后, 阻塞比的增加反而使火焰速 度有所降低, 随着阻塞比的增加, 火焰传播曲线有一个 最大值。这可以解释为: 阻塞比增加, 燃烧波前气流速 度由于受到阻塞而减小, 火焰速度因此也减小。此时阻 塞比的增加, 湍流燃烧速度尽管有所增加, 但其增加的 幅度小于波前气流减少的幅度, 最终使火焰速度随阻 塞比的增加而逐渐减少。

2 3 燃烧管中压力波形的发展

图 7~ 图 9 是乙炔/空气在不同当量比条件下,压力波形随时间的变化。首先可以看出火焰在燃烧管内 传播的初始阶段,燃烧管内A 点的压力开始上升,B 点的压力保持常压。火焰在向前传播的过程中,在火焰 面两边会不断诱导出一系列压缩波。当压缩波传播到 B 点时,B 点的压力开始上升。当火焰面到达B 点时,B 点的压力达到最大值, 然后B 点的压力开始下降,此 时燃烧管内仍有一系列压缩波向A 点传播, 当最后一 道压缩波传播到A 点时,A 点的压力达到最大值, 然 后在出口传播来的膨胀波作用下压力开始下降。从压 力峰值达到的时间来看,B 点要早于A 点, 这与文献 [2]介绍的结果是一致的。从压力存在的时间来看,A 点明显长于B 点。这是由于, 一方面B 点远离点火源.



感受到压力波的时间较晚。另一方面B 点为燃烧管的 出口,泻压时B 点的压力首先开始降低。因此B 点的 压力脉冲时间较短。

在不同当量比条件下,随着 φ 的增加,A 和B 点的 压力峰值不断增大。当 φ 从0 298 上升到0 407 时, φ 增加了 1/3,压力峰值增加了近1倍; φ 从0 298 上升 到0 456 时, φ 增加了1/2,压力峰值增加了3 2 倍。在 稀薄混合气中,增加 φ 可以使压力峰值显著增加,即增 加了除灰能力。

3 结 论

本文工作主要从实验方面对有障碍物管道内燃烧 过程进行了研究和探讨。研究结果对气脉冲装置设计 和运行提供了理论基础。

实验研究了乙炔、水煤气、液化石油气和甲烷4种 燃料在有阻塞板作用下与空气预混燃烧的火焰加速曲 线,得出规律。在所用的稀薄混合范围内,当量比(9)增 加时火焰速度都有较大幅度的提高;研究了乙炔在不 同阻塞比下的火焰传播。阻塞比(R_B)较小时,随着阻 塞比的增加,火焰速度有较大的提高;研究了乙炔火焰 的压力波形,当量比(9)增加时压力峰值显著增加。

参考文献:

- [1] Lee J H S, Knystautas R, Chan C K. Turbulent Flam e Propagation in Obstacle-Filled Tubes [A]. Twentieth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute [C], 1984. 1663-1672.
- [2] Moen IO, Lee J H S. Pressure Development due to Turbulent Flame Propagation in Large-Scale Methane-A ir Explosion [J]. Combustion and Flame, 1982, 47: 31-52
- [3] Chan C K, Moen IO, Lee J H S Influence of Confinement on Flame Acceleration due to Repeated Obstacles [J] Combustion and Flame 1983, 49: 27-39.
- [4] Teodoczyk A, Lee J H, Knystautas R. The Structure of Fast Turbulent Flames in Very Rough, Obstacle-Filed Channels [A]. Twenty-Third Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute[C], 1990 735-741.
- [5] Lee J H S, Knystautas R, Frein an A. High speed Turbulence Deflagrations and Transition to Detonation in H2-A ir M ixtures [J]. Combustion and Flame, 1984, 56, 227-239.
- [6] Pu Yikang Comparative Study of the Influence of Obstacles on the Propagation of Dust and Gas Flames [A] Twenty-Second Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute [C], 1988–1789-1797.