# 稀疏波对层流传播火焰干涉作用实验研究

孙金华 刘 义 王青松 陈 鹏

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026. E-mail: sunjh@ustc.edu.cn)

摘要 为了揭示稀疏波对甲烷空气预混气中层流传播火焰结构及压力特性等的影响规律, 利用高速纹影摄像、压力测试等实验手段对小型密闭燃烧容器内甲烷-空气预混气中传播的层流火焰与稀疏波的相互作用规律进行了实验研究. 研究结果表明, 当稀疏波作用于层流传播火焰后, 在数毫秒内火焰就由层流燃烧充分发展成湍流燃烧, 其结果使得燃烧面积迅速增大, 压力上升速度加快.

关键词 稀疏波 层流火焰 干涉作用 湍流燃烧

在工农业生产、交通运输等行业, 绝大部分是通过燃烧获取能量, 支撑人类的现代文明. 但是在各类产业和人民的现实生活中由于由燃烧现象的失控而导致的火灾、爆炸灾害事故也频繁发生, 这就要求我们对工农业生产及人民生活中的一切燃烧现象能够进行有效的控制, 在确保安全的前提之下有效利用能源, 为国民生产和经济建设服务.

由可控燃烧的失控而导致火灾、爆炸的发生通常需经过湍流燃烧及其加速过程. 湍流燃烧的发生能在瞬间内增大燃烧面积, 使得单位时间内的能量释放速度大大增加, 压力升高, 最终导致燃烧失控并引发火灾、爆炸等事故[1,2]. 因此, 有效地控制燃烧过程, 充分认识由层流燃烧向湍流燃烧发展的条件及其成长的过程, 对防止火灾、爆炸等灾难事故的发生非常重要.

引起燃烧失控的因素很多, 既有内在的原因, 又有外在的因素. 其中压力波和层流燃烧火焰的相互干涉作用就是最典型的诱发湍流燃烧发生及成长的因素之一. 国内外关于可燃混合气在管道中的加速燃烧现象已经有了很多的研究报告[3~8]. 夏昌敬等人对在丙烷与氧气、空气的混合物中传播火焰通过不同角度的弯管后的火焰传播速度和压力进行了测试, 实验得到通过弯管后火焰的传播速度和压力都有很大程度的提高[1]. Kristoffersen等人对不同配比的丙烷一空气混合气体在内径为 22 毫米的圆形钢管内的火焰传播进行了研究, 研究结果表明火焰的传播非常强烈地依赖于管道中声波的拢动, 特别是从出口反射回来的稀疏波的拢动[6]. Thomas等人就入射激波及反射激波对火焰的干涉作用进行了实验研究, 实验结果表明在很多情况下入射激波及反射激波能明显地加速火焰传播[7], 其实验结果得到了Gamezo等人的理论验证[8]. 但是在点火初期, 关于稀疏波与层流燃烧火焰相互作用内在规律的研究却相对较少[9], 不清楚的地方还比较多. 本研究以甲烷和空气的预混火焰为研究对象, 利用自制的小型密闭燃烧容器、压力测试系统、高速纹影摄像系统就稀疏波对甲烷和空气可燃混合气中传播的层流火焰结构、火焰传播特性及压力特性等的影响规律进行了研究.

## 1 实验装置及实验过程

### 1.1 实验装置

本研究所用实验系统的结构简图如图 1 所示, 实验系统由密闭燃烧容器、点火系统、数据采集系统、纹影摄像系统、高速摄像仪、控制系统等组成. 纹影摄像系统是由一个功率为 250 W 的水银灯和两个焦距为 2 米的凹面镜组成, 其光路系统见图 1. 燃烧容器是一个断面为正方形的长管状容器, 内部尺寸长×宽×高为 500 mm×80 mm×80 mm. 为了便于观察燃烧容器内火焰的传播特性及火焰的加速成长等过程, 容器的两个侧面为玻璃, 上下为不锈钢, 燃烧容器的剖面图如图 2 所示. 为了研究稀疏波对层流传播火焰的干涉作用, 将燃烧容器分成主燃烧室和附加小室, 主燃烧室的长度是 460 mm, 附加小室的长度为 40 mm, 主燃烧室与附加小室之间根据实验需要用一定厚度的纸或薄膜分割, 在主燃烧室尾部的上方及附加小室的底部分别安装了两个压力传感器用以测量稀疏波与层流传播火焰互作用的整个过程的压力变化. 同时为确保实验过程的安全性, 在主燃烧容器的

1) 夏昌敬. 可燃气体爆轰波在弯曲管道中的传播特性研究. 中国科学技术大学博士论文, 2003

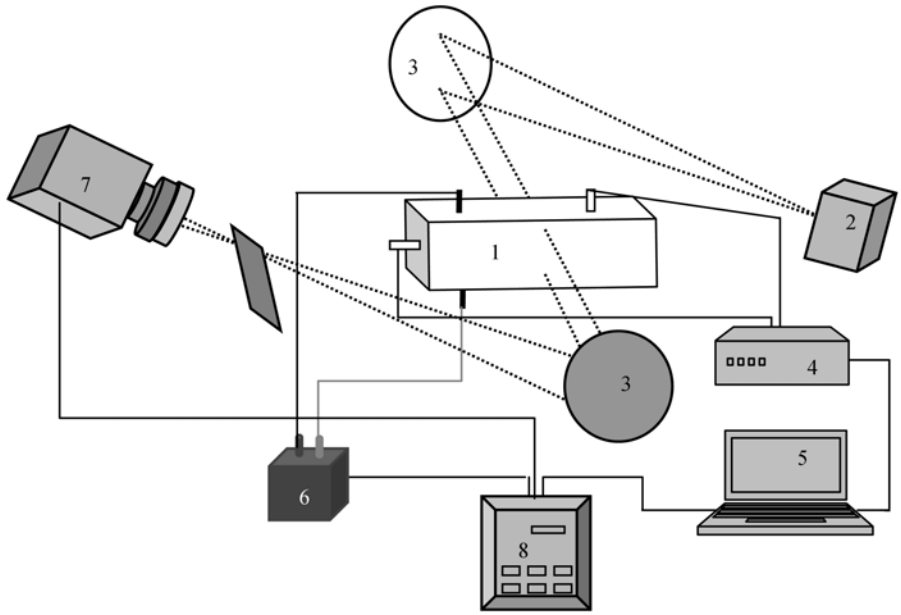


图 1 实验系统结构简图

1——燃烧室; 2——汞灯; 3——凹面镜; 4——记录仪; 5——计算机; 6——点火器; 7——高速摄像机; 8——控制器

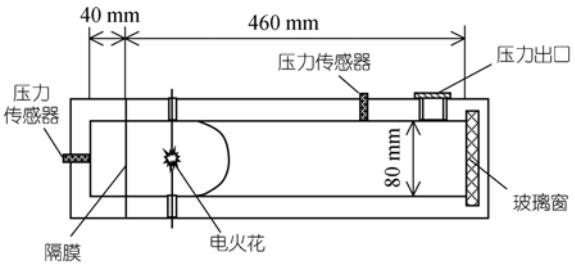


图 2 燃烧容器

顶端设置了一个泄爆口.

### 1.2 实验过程及条件

首先按图 1 所示将实验系统的各仪器设备调整好, 然后把当量比为 1 的甲烷与空气的预混气充入燃烧容器的主燃烧室的同时将附加小室内充以等压力的空气(主燃烧室和附加小室的压力均与外压相等, 即表压为 0 大气压). 打开高压点火器的电源, 用电火花点燃预混气后, 火焰在燃烧室内传播, 当燃烧室内的压力升高到一定程度时主燃烧室和小室的隔膜迅速破裂并产生稀疏波, 当稀疏波追上燃烧波后两者相互叠加, 结果使得层流燃烧火焰将向湍流燃烧发展. 燃烧波阵面变化的整个微观过程和燃烧室内的压力变化规律将分别用高速纹影摄像系统和压力传感器进行记录和测量. 高速摄像仪和高速数据采集器的启动时间, 高压点火器的点火开始和持续时间均由控制器来控制. 具体实验条件如下:

空气、甲烷混合当量比: $\phi$=1;

点火电压: 15,000 V;

点火时间: 0.03 s;

高速摄像仪拍摄速率: 2,000 帧/s;

压力数据采样频率: 10,000Hz/s;

隔膜材料: 厚度为 50 g/m$^2$ 的质地均匀牛皮纸.

## 2 实验结果及分析

图 3 是用高速纹影摄像系统拍摄到的一组典型照片, 它充分展示了稀疏波与层流燃烧火焰波相互干涉并发生湍流燃烧的微观过程. 由图 3 的高速纹影图片可知, 当主燃烧室内的甲烷空气混合气被点燃后, 火焰开始以点火中心为圆心以一定的加速度沿着燃烧室向右传播, 此时的火焰可以认为是层流火焰. 当点火开始后的时间 $t$ = 25 ms 时, 层流传播火焰首先受到来自于附加小室的稀疏波的影响, 火焰前锋的形状由球面开始变形向内部弯缺, 燃烧的性状开始由层流燃烧向湍流燃烧转变. 当时间 $t$ = 26 ms 时, 已经可以清楚地观察到火焰面的弯缺和皱褶, 湍流燃烧得到了进一步的发展. 当 $t \geq$ 27 ms, 且随着时间的推移, 湍流燃烧不断得到加强. 从拍摄得到的纹影图片来看, 当点火开始后时间 $t$ = 30 ms 时, 火焰由于受到稀疏波等的影响, 其湍流燃烧已经得到了

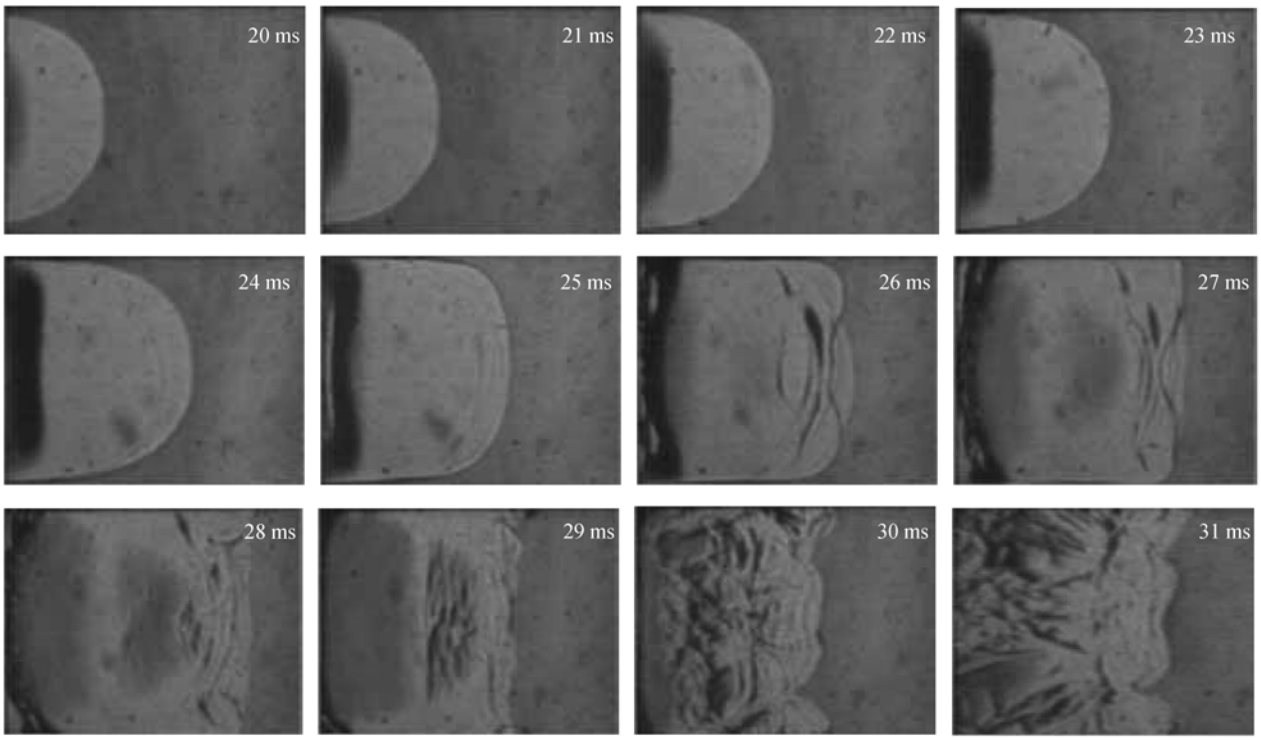


图 3 高速纹影图片

充分的发展. 相同条件下的其它实验结果虽然在火焰传播速度、湍流开始发生的时间及成长时间等略有差异，但火焰在稀疏波作用下从层流向湍流转变的微观过程却基本类似.

图 4 是根据图 3 的高速纹影图像解析得到的从火焰波阵面到点火中心的距离与时间、火焰的瞬时传播速度与时间的关系图. 由图 4 可知，当点火开始后的时间 $t \leq 24$ms 时，层流传播火焰尚未受到来之稀疏波的影响，在该时间段内，火焰传播速度随时间的增大而加快. 当时间 $t > 24$ms 时，层流传播火焰受到稀疏波作用，其传播速度出现震荡现象，但总体趋势是火焰传播速度下降，并且一度出现了反向传播(在 $t$ = 29 ms 前后). 当 $t$ = 30 ms，湍流燃烧得到了充分发展，

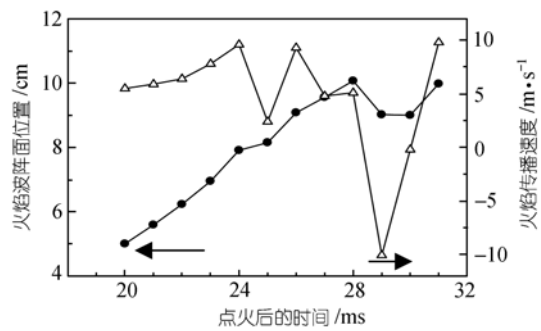


图 4 火焰波阵面位置和火焰瞬时传播速度与时间的关系

火焰传播速度再度随时间的增大而迅速加快.

图 5 和图 6 分别是由安装在燃烧容器的上壁面和附加小室底部的压力传感器测得的压力随时间变化的关系曲线. 由图 5 安装在附加小室底部的压力传感器测得的压力时间图可知，从点火开始到 $t$ = 24.1 ms 的时间段内，测得的压力曲线虽有微小的波动但基本为一定值. 从 $t$ = 24.2 ms 到 $t$ = 24.4 ms 这短短的 0.2 ms 内，从初始压力值的 2 kPa 迅速上升到 45 kPa 左右. 由此可以判断，在点火开始后的时间 $t$ = 24.2 ms 之前的某一很短瞬间，主燃烧室与附加小室间的隔膜已经破裂，并由此在附加小室内产生一个压缩波向附加小室的底部传播，当压缩波到达小室底部时(到达底部的时间为点火后 24.2 ms)，安装在底部的压力传感器接收到该压缩波信号，如图 5 所示表现出压力的突然增加. 与此同时，由于隔膜的破裂，将在主燃烧室内产生一个与火焰传播方向相同的稀疏波，并且很快追上燃烧波并产生叠加，使火焰由层流燃烧迅速转变为湍流燃烧.

图 6 是由安装在主燃室上壁面(接近端部)的压力传感器测得的压力时间曲线. 从点火开始到 $t$ = 25.1 ms 的时间段内，压力随时间的增长而增大. 当 $t$ = 25.2 ms 时，压力开始出现剧烈波动. 压力出现剧烈

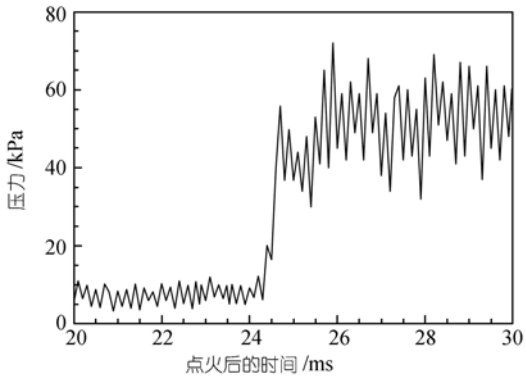


图 5 压力与时间的关系(附加小室)

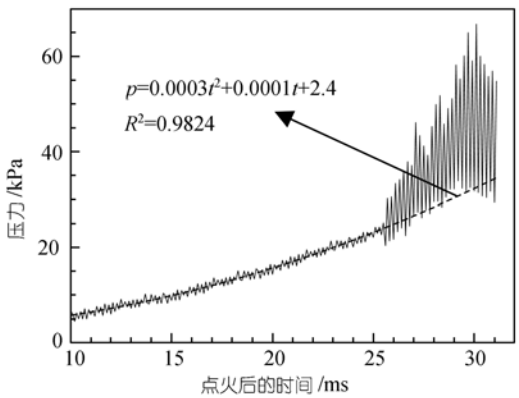


图 6 压力与时间的关系(主燃烧室)

波动的时间比图 3 的纹影图片开始出现湍流燃烧的时间大约晚了 0.2 ms, 这是因为该压力传感器距火焰面有一定的距离, 压力传感器感知到由湍流燃烧产生的压力波动将要滞后一定的时间. 图 6 中的虚线是将从 $t$ = 0 ms 到 $t$ = 25.2 ms 时间段内的压力测试结果进行数学拟合, 并将拟合结果延长到 $t$ = 31 ms 得到的曲线. 拟合结果表明, 在该时间段内的实测压力几乎随时间平方的增加而增加. 比较拟合曲线和实测曲线可知, 当点火开始后的时间为 25.2 ms 时, 首先由于稀疏波的影响, 压力出现向下扰动, 然后出现较大的震荡, 但总体结果压力上升速度高于未出现扰动前的拟合值. 该现象表明, 当稀疏波作用于燃烧波后, 使得原来的层流燃烧火焰发生湍流燃烧, 燃烧面迅速增加, 压力上升速度加快. 比较图 3 和图 6 可知, 当 $t$ = 30 ms 时, 湍流燃烧已经得到了充分的发展, 此时的压力震荡最为剧烈.

## 3 结论及建议

本研究利用高速纹影摄像, 压力传感器等试验手段对小型密闭燃烧容器内甲烷-空气预混气中传播的层流火焰与稀疏波的相互作用规律进行了研究, 得到了如下的结论:

当管道内以球面传播的层流燃烧火焰受到稀疏波的影响时, 火焰前锋的形状由球面开始向内部弯缺, 进而发生皱褶, 火焰开始由层流燃烧向湍流燃烧转变. 随着时间的推移, 湍流燃烧不断加强, 约 5 ms 后湍流燃烧已经得到了充分的发展.

当稀疏波作用到层流燃烧火焰面时, 其传播速度出现震荡和下降, 并且一度出现了反向传播(在 $t$ = 29 ms 前后). 数毫秒后, 湍流燃烧得到了充分发展, 火焰传播速度再度随时间的增大而迅速加快.

稀疏波作用于燃烧波并发生湍流燃烧后, 燃烧面积将迅速增加, 燃烧室内压力出现剧烈震荡的同时上升速度加快.

本研究仅就一种点火方式, 在固定点火能量下进行了实验, 点火条件对该过程的影响尚需进一步研究.

致谢 本工作为中国科学院“百人计划”和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2001CB409606)资助项目.

## 参 考 文 献

1 Dobashi R. Experimental study on gas explosion behavior in enclosure. J. Loss Prevention in the Process Industries, 1997, 10(2):83~89[DOI]
2 Tsuruda T, Hirano T. Local flame front disturbance development under acceleration. Combustion and Flame, 1991, 84(1-2): 66~72[DOI]
3 周凯元, 李宗芬. 丙烷-空气爆燃波的火焰面在直管道中的加速运动. 爆炸与冲击, 2002, 20(2): 137~142
4 Stamps D W, Tieszen S R.The influence of initial pressure and temperature on hydrogen-air-diluent detonations. Combustion and Flame, 1991, 83(3-4): 353~364[DOI]
5 Ciccarelli G, Boccio J L, Ginsberg T. The influence of initial temperature on flame acceleration and deflagration to detonation transition. In: Burgess A R, Dryer F L, Peters N, et al eds. 26th Symposium (international) on combustion. Naples: Combustion Institute, 1996. 2973~2979
6 Kristoffersen K, Vaagsaether K, Bjerketvedt D, et al. Propane-air pipe explosion experiments. Data for estimation of 1-D burning velocity in slow regimes. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28(7): 723~728[DOI]
7 Thomas G, Bambrey R, Brown C. Experimental observations of flame acceleration and transition to detonation following shock-flame interaction. Combustion Theory and Modeling, 2001, 5(4): 573~594[DOI]
8 Gamezo V N, Khokhlov A M, Oran E S.Effects of wakes on shock-flame interactions and deflagration-to- detonation transition. In: Chen J C, Colket M D eds.Proceedings of the Combustion Institute 29th. Sapporo: Combustion Institute, 2002, 2803~2808
9 Dobashi R, Hirano T, Tusruda T. Detailed structure of flame front disturbance. Combustion Science and Technology, 1994, 96: 155~167

(2005-01-05 收稿, 2005-03-10 收修改稿)