

# 稀疏波对预混火焰影响规律的试验研究\*

陈先锋 孙金华\*\* 陆守香 褚冠全 姚礼殷 刘义

中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026

**摘要** 为揭示稀疏波与层流传播火焰的相互作用规律, 以管道中传播的丙烷-空气预混火焰为研究对象, 利用高速纹影摄像和压力测试等手段对稀疏波与火焰的干涉过程进行了研究. 实验过程中采用不同的点火方案, 分别对同向稀疏波和逆向稀疏波与火焰的干涉作用进行了研究. 实验结果表明, 稀疏波的干涉作用均能使火焰阵面结构发生变化、火焰产生明显震荡, 并导致火焰由层流向湍流燃烧的迅速转变; 但在稀疏波对火焰的作用的初始阶段, 同向稀疏波会明显降低火焰传播速度, 而逆向稀疏波则迅速增大火焰传播速度, 并伴随着剧烈的震荡.

**关键词** 稀疏波 气体爆炸 火焰结构 层流火焰 湍流燃烧

作为主要的工业、生活能源之一的可燃气体, 在贮运、加工和使用过程中, 经常发生火灾、爆炸事故, 这是工业生产和生活领域的主要灾害形式之一, 它常造成巨大的人员伤亡和财产损失<sup>[1,2]</sup>. 气云爆炸通常发生层流向湍流燃烧的转变及其加速过程, 湍流燃烧能在燃烧瞬间增大燃烧面积, 急剧加大能量释放速度, 加速火焰传播, 使压力升高, 最终造成严重的爆炸灾害<sup>[3,4]</sup>. 因此, 为防止可燃燃气云爆炸事故的发生, 有效控制爆炸燃烧过程, 必须充分认识层流火焰向湍流燃烧转变的微观动力过程和本质规律.

火焰与流动的相互作用, 涉及火焰结构、火焰传播、火焰不稳定性等基本环节, 因此一直是燃烧研究的重点课题之一<sup>[5,6]</sup>. 影响可燃燃气燃烧过程的因素很多, 其中压力波和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<sup>[7]</sup>. 在工业灾害中, 压力波作用于火焰会进一步加快燃烧速度, 同时火焰会失稳而诱发湍流, 甚至可能出现燃烧转爆轰现象<sup>[8]</sup>. 因此, 压力波与火焰的相互作用会改变整个燃烧过程和燃烧特性, 这已

引起了人们广泛的关注. 叶经方等<sup>[9]</sup>拍摄了激波与球形火焰相互作用的阴影照片, 实验结果显示了火焰在激波作用下, 发生 Richtmyer-Meshkov 不稳定现象. 张孝谦等<sup>[10,11]</sup>对火焰的不稳定性及 V 型火焰的动态特性进行了研究. Kristoffersen 等<sup>[12]</sup>对丙烷-空气混合气体在圆形管道内的火焰传播进行了研究, 结果表明火焰的传播非常强烈地依赖于管道中声波的扰动, 特别是从出口反射回来的稀疏波的扰动. Thomas 等<sup>[13]</sup>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, 其实验结果得到了 Gamezo 等<sup>[14]</sup>的理论验证. 但是在火焰发展初期, 压力波与火焰的作用过程, 特别是对稀疏波与层流燃烧火焰相互作用内在规律的研究相对较少<sup>[15,16]</sup>. 总体来讲, 压力波与火焰的相互作用是一个比较复杂的过程, 对稀疏波导致火焰结构的变化过程还需要作进一步的研究. 本文以丙烷-空气预混火焰为研究对象, 运用自制的燃烧管道, 通过高速纹影摄像系统等对稀疏波与火焰结构的相互作用规律进行了实验研究.

2006-06-13 收稿, 2006-08-22 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 50536030; 50576093)

\*\* 通信作者, E-mail: cxf618@mail.ustc.edu.cn

## 1 实验方案

### 1.1 实验装置

实验系统结构如图 1 所示, 由燃烧管道、数据采集系统、高速摄像机、纹影摄像系统和同步控制系统等组成。燃烧容器由断面为正方形的管道组成, 其内部尺寸为  $80\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 550\text{ mm}$ 。为便于观测燃烧管道内火焰的传播特性及火焰的加速成长等过程, 整个管道均由全透明的高强度有机玻璃材料制成, 燃烧管道剖面图如图 2 所示。燃烧容器分为主燃烧室和左侧的附加腔室, 主燃烧管道长度为  $500\text{ mm}$ , 附加腔室的长度为  $50\text{ mm}$ ; 其中, 主燃烧室和附加腔室用一定强度的膜片隔开, 并且在主燃烧室和附加腔室部分分别安装高频动态压力传感器, 以探测稀疏波与传播火焰互作用的整个过程的压力变化。为了研究火焰传播过程中同向稀疏波和逆向稀疏波与火焰的干涉作用, 分别在燃烧管道两端设置了两个点火装置。同时为保证实验过程的安全性, 在主燃烧管道端部设置了泄压口。

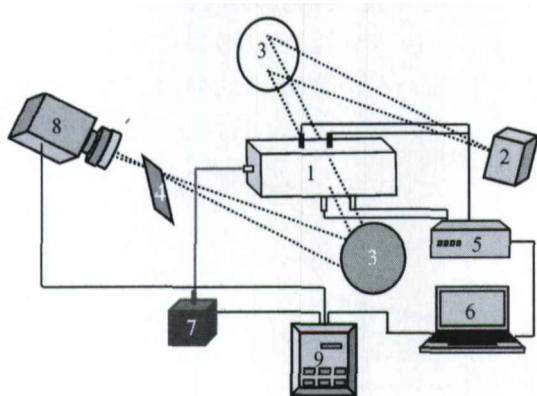


图 1 实验系统结构图

- 1 实验管道; 2 碘钨灯; 3 纹影凹面镜; 4 纹影刀口;  
5 数据采集仪; 6 计算机; 7 高压点火器; 8 高速摄像机;  
9 同步控制器

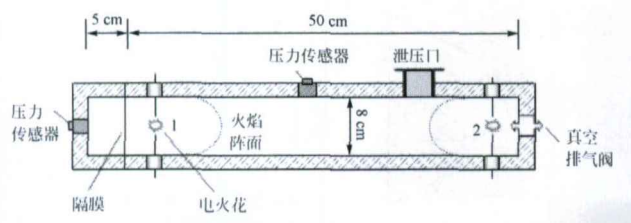


图 2 实验管道剖面图

### 1.2 实验过程

对实验管道进行抽真空, 然后充入按一定化学计量比配制并已混合均匀的丙烷-空气预混可燃气, 使其内部压力达到一个大气压; 同时在左侧腔室输入同等压力空气。

本实验中分别采用两种不同点火位置的试验方案, 即点电极 1 和电极 2。当电火花点燃预混气后, 火焰便会在管道中传播; 当燃烧室内的压力升高到一定程度时主燃烧室和左端的附加腔室间的隔膜迅速破裂并产生向右传播的稀疏波, 当稀疏波与燃烧波相遇后两者相互干涉叠加, 从而影响火焰传播特性。

高速摄像机 (Photron, Fastcam Ultima APX) 和高速数据采集器 (HIOKI, 8826 Memory Recorder) 的启动时间, 以及高压点火器的点火开始及持续时间均由同步控制装置来实现。具体的实验条件如下:

丙烷-空气混合当量比:  $\Phi = 1$ ; 点火电压:  $25\ 000\text{ V}$ ; 高速摄像机拍摄频率:  $8\ 000\text{ frame/s}$ ; 数据采集频率:  $100\text{ kHz}$ ; 隔膜材料: 质地均匀的 PE 覆膜牛皮纸。

## 2 实验结果分析

本实验针对丙烷-空气预混火焰的传播过程中, 稀疏波与火焰的相互作用进行了研究; 主要运用高速纹影及压力测试等手段对稀疏波对火焰的干涉作用、火焰阵面结构与流场特性的变化过程进行了探测和分析。实验过程分别按两种不同的点火方案进行。

### 2.1 同向稀疏波对火焰的干涉作用

本实验过程采用电极 1 点火的实验方案。点火后, 燃烧室内火焰阵面向右传播, 当左侧的附加腔室破膜后产生右行稀疏波; 当稀疏波赶上火焰面时, 便会与火焰阵面相互作用。其作用过程将运用高速纹影图像和压力测试结果来分析。

#### 2.1.1 基于高速纹影图片的稀疏波对火焰干涉作用分析

图 3 是一组典型的同向稀疏波与火焰干涉作用的高速纹影图片。从图中可以清晰看到, 在火焰发展初期, 火焰阵面以中部凸起、规则的球面波向右传播, 且未燃区和产物区被这层很薄的火焰面隔开。当  $t = 41\text{ ms}$  时, 火焰开始受到附加腔室破膜

后产生的稀疏波影响，火焰结构发生变化，即火焰阵面球面波曲率逐渐变小；到  $t=42.5\text{ ms}$  时，火焰阵面变成了平面波形状，表明此时的火焰表面积达到最小。随后火焰阵面在传播方向上进行拉伸，导致火焰阵面厚度迅速变大。从  $t=44.5\text{ ms}$  开始，在火焰被拉伸的同时，火焰面逐渐被撕裂成多触角延伸的齿状结构，呈现许多不规则的褶皱面，大大增加了火焰面的表面积，表明此时已经形成了明显的湍流。随着火焰与稀疏波的作用，从  $t=45.5\text{ ms}$  后，火焰阵面还出现了分层现象，并进一步增大火焰厚度和湍流强度。从纹影图片的结果看，后期的湍流燃烧并不像层流火焰传播那样集中在很薄的火焰前沿内，而是弥散在一个宽广的区域内，此反应区的厚度可达层流火焰前沿厚度的数十倍。从  $t=48\text{ ms}$  开始，火焰阵面轮廓变得模糊，已经整体形成强烈的湍流火焰向前传播。从高速纹影记录的火焰结构变化的微观过程可以清晰看到，同向稀疏波对火焰的干涉作用，直接导致了火焰由层流向湍流燃烧的转变。相同实验条件下的结果均显示了类似的实验过程和现象。

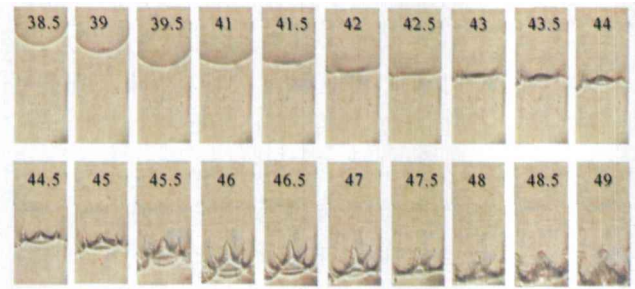


图3 高速纹影图片结果  
单位: ms

图4为根据高速纹影图片解析得到的火焰阵面位置、火焰传播速度随时间变化的曲线关系图。从图中可以看到，在  $t=40.5\text{ ms}$  以前，层流火焰尚未受到稀疏波的影响，火焰传播速度随着时间是不断增大的。当稀疏波传到火焰阵面时，火焰速度呈现震荡下降趋势；在  $t=47.4\text{ ms}$  前后还出现了反向传播现象。在稀疏波与火焰相互作用过程中，火焰传播速度不断降低，但湍流强度逐渐加强；当  $t=49\text{ ms}$  时，湍流得到充分发展，从而使火焰传播速度随时间的增大迅速加快。

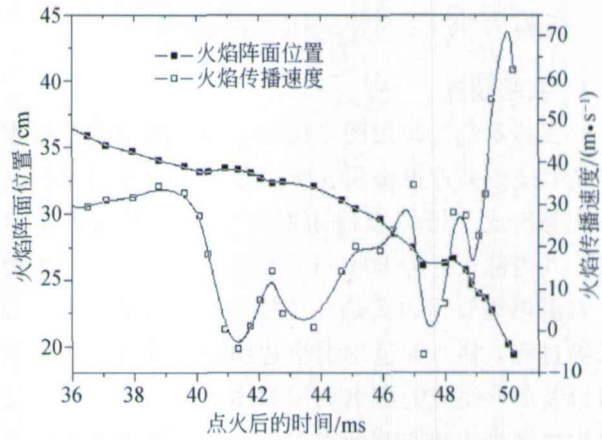


图4 火焰阵面位置及火焰传播速度随时间的变化规律

2.1.2 基于压力波测试结果分析 图5(a)为实验中测得的附加腔室中压力随时间的变化曲线图。在  $t=41\text{ ms}$  以前，压力值变化很小；在  $t=41\text{ ms}$  后  $0.38\text{ ms}$  时间内，其压力值迅速从  $16\text{ kPa}$  增加到  $32\text{ kPa}$ ，并产生剧烈的震荡现象；由此可判断，在  $t=41\text{ ms}$  时，燃烧室与腔室间隔膜破裂，并在附加腔室中产生向左传播的压缩波，在  $t=41.38\text{ ms}$  时，压缩波到达传到压力传感器，从而使压力迅速升高。另外，在腔室破膜的同时，在主燃烧室

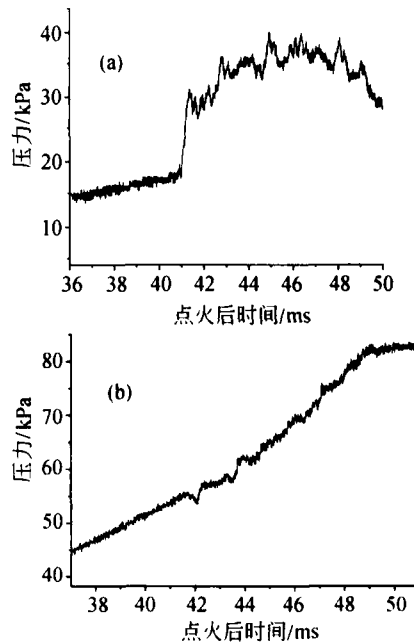


图5 实验管道内压力随时间的变化

(a) 左侧腔室压力随时间的变化关系；(b) 主燃烧室压力随时间的变化关系

产生一个向右传播的稀疏波，当稀疏波赶上火焰时，便会相互叠加，从而使层流火焰迅速向湍流燃烧转变。

图5(b)为主燃烧室中压力与时间的曲线图。从图中可以看出，主燃烧室中压力随时间的增加是不断增大的，在火焰发展初期，基本呈线性增大趋势。当 $t=41.4\text{ ms}$ 时，压力曲线上出现了明显的波动，表明稀疏波已经到达该传感器处并开始产生作用。结合此时的纹影图片可知，稀疏波到达火焰面时与之相互作用，促使层流向湍流转变过程中，压力也不断升高，并伴随着明显的震荡。

### 2.2 逆向稀疏波对火焰的干涉作用

本实验过程采用电极2点火的实验方案。点火后，燃烧室内火焰阵面向左传播，当左侧的附加腔室破膜后产生右行稀疏波，稀疏波与火焰面相向而行；当稀疏波与火焰面相遇时，便会相互叠加，从而影响火焰传播结构和流场特性。

**2.2.1 高速纹影图片结果分析** 图6为逆向稀疏波与火焰相互作用的高速纹影图片。从图中可以看出，火焰发展初期，层流火焰以规则、光滑的球面波阵面向前传播。在 $t=50\text{ ms}$ 之后，火焰与迎面而来的稀疏波相遇并相互叠加，结果使得火焰阵面发生变化，即火焰面先变为平面形状( $t=50\text{ ms}$ )，然后向内凹陷( $t=51.5\text{ ms}$ )。随着稀疏波与火焰的作用，火焰面被不断拉伸，火焰表面积也逐渐加大。当 $t=52.5\text{ ms}$ 时，火焰面整体变成楔状结构，且出现明显的褶皱，此时整个火焰面已形成湍流燃烧，但火焰面轮廓较为清晰，表明为中小尺度湍流燃烧。随着湍流强度的加大，当 $t=53\text{ ms}$ 时，楔形火焰面宽度达到最大，此后楔形火焰面宽度逐渐减小，火焰轮廓面也逐渐变弱。从 $t=55\text{ ms}$ 到 $t=$

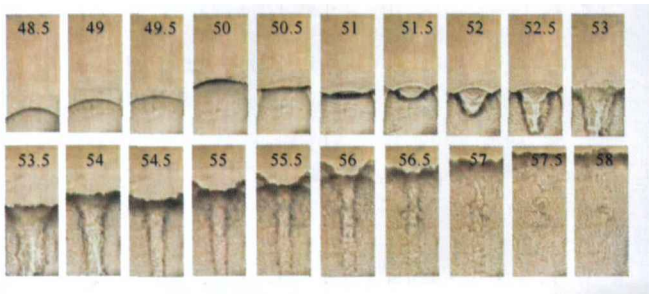


图6 逆向稀疏波与火焰作用的高速纹影图片  
单位: ms

56.5 ms时间内，湍流火焰面形成了V形结构。此后，火焰前沿变成平面状，整个火焰面以均匀、强烈的湍流燃烧向前传播。

图7为逆向稀疏波对火焰作用过程中，火焰阵面位置和传播速度随时间的变化关系图。从图中可以看出，在火焰发展初期，层流火焰未受到稀疏波的影响，火焰传播速度变化不大。当 $t=50\text{ ms}$ 时，火焰与稀疏波相遇，由于稀疏波的叠加作用，火焰传播速度迅速上升，最高达到 $75\text{ m/s}$ ，而后下降再上升，形成明显的震荡。结合纹影图片结果可知，正是稀疏波与火焰的叠加作用，使火焰速度增大并产生波动，从而导致了层流火焰向湍流的转变。

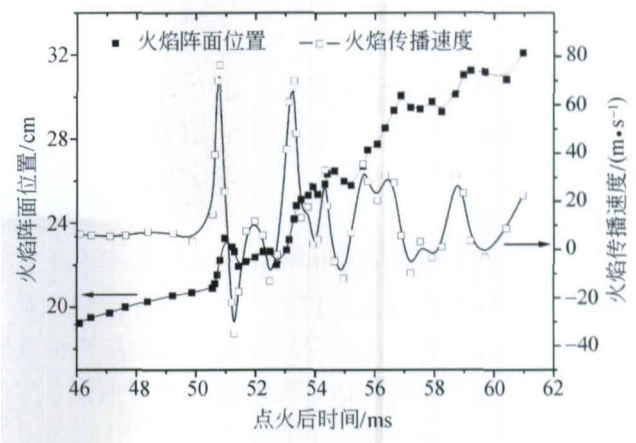


图7 火焰阵面位置及火焰传播速度随时间的变化

**2.2.2 压力测试结果分析** 图8为主燃烧室和附加腔室中的压力随时间的变化曲线图。图中曲线a为附加腔室的压力曲线，曲线b为主燃烧室中的压

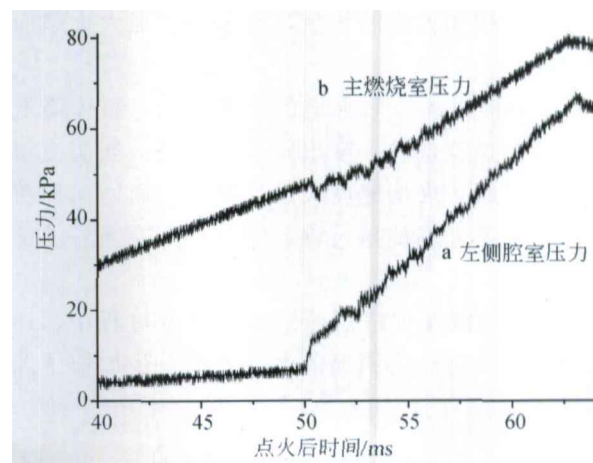


图8 腔室及主燃烧室压力随时间的变化关系



力-时间关系图。由图可知,在火焰发展初期,腔室压力值基本不变,当 $t=50\text{ ms}$ 时,腔室与燃烧室间的隔膜破裂,压缩波达到腔室底部使压力信号迅速增大; $t=50.3\text{ ms}$ 后,压力增大趋势变缓,并伴随着明显的压力波动。

在破膜以前,主燃烧室的压力值基本上随时间线性增大;腔室破膜的同时,诱导的稀疏波在主燃烧室向右传播。当 $t=50.39\text{ ms}$ 时,火焰阵面与稀疏波相遇而叠加,结果使得压力值开始产生明显波动。结合纹影图片分析,压力值的波动促使火焰阵面结构发生变化,并最终导致层流火焰向湍流的转变。

### 3 结论

本研究利用高速纹影摄像、压力测试等实验手段对同向和逆向稀疏波与管道内传播的丙烷-空气预混火焰的相互作用过程进行了详细的实验研究。得到了以下结论:

(1) 稀疏波对火焰结构和火焰传播过程产生重要影响。当稀疏波与火焰相遇时,火焰阵面和稀疏波会发生相互叠加,结果导致火焰迅速由层流向湍流转变。随着火焰的传播,湍流燃烧不断加强,大约 $6\text{ ms}$ 后湍流燃烧得到了充分的发展。

(2) 不同方向传播的稀疏波对火焰结构会产生不同影响。同向稀疏波对与火焰的作用,首先使火焰阵面变成齿状结构,在火焰面形成局部强湍流,然后发展为整体湍流火焰面;而逆向稀疏波与火焰阵面的叠加使得火焰阵面呈楔形状湍流结构,随着稀疏波的作用和火焰的传播,逐步整体加大火焰面湍流强程度。

(3) 同向稀疏波对火焰的干涉作用,整体降低了火焰传播速度,并一度出现反向传播;当湍流得到充分发展时,火焰速度又迅速增大。而逆向稀疏波则整体加速火焰传播过程,同时伴随着强烈的震荡。

(4) 稀疏波在促进层流向湍流转变过程中,还使燃烧室的压力产生明显的波动,进一步加快了湍流的形成。

### 参 考 文 献

1 Prugh RW. Quantitative evaluation of fireball hazards. *Process*

*Safety Progress*, 1994, 13(2): 83-91

- 2 Gulder OL, Smallwood GJ, Wong R, et al. Flame front surface characteristics in turbulent premixed propane/air combustion. *Combustion and Flame*, 2000, 120 (4): 407-416
- 3 Dobashi R. Experimental study on gas explosion behavior in enclosure. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1997, 10(2): 83-89
- 4 Ibrahim SS, Masri AR. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14: 213-221
- 5 Bradley D, Sheppard CGW, Woolley R, et al. The development and structure of flame instabilities and cellularity at low Markstein numbers in explosions. *Combustion and Flame*, 2000, (122): 195-209
- 6 Christoph Kersten, Hans Forster. Investigation of deflagrations and detonations in pipes and flame arresters by high-speed framing. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2004, (17): 43-50
- 7 Sun JH, Liu Y, Wang QS, et al. Experimental study on interference effect of rarefaction wave on laminar propagating flame. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(9): 919-922
- 8 范宝春, 江 强, 董 刚, 等. 激波与火焰的相互作用过程. *爆炸与冲击*, 2003, 23(6): 488-492
- 9 叶经方, 贾正望, 董 刚, 等. 激波与火焰作用的实验与理论研究. *工程热物理学报*, 2005, 26(3): 511-514
- 10 孔文俊, 张培元, 张孝谦. 微重力环境下V形层流预混火焰锋面不稳定性分析. *工程热物理学报*, 1999, 20(3): 378-382
- 11 Zhang XQ, Lei Y, Wang BR, et al. Turbulence in laminar premixed V-flames. *Science in China*, 2003, 46(6): 574-580
- 12 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
- 13 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
- 14 Gamezo VN, Khokhlov AM, Oran ES. Effects of wakes on shock-flame interactions and deflagration-to-detonation transition. In: Chen JC, Colket MD eds. *Proceedings of the Combustion Institute 29th*. Sapporo: Combustion Institute, 2002, 2803-2808
- 15 Dobashi R, Hirano T, Tsuruda T. Detailed structure of flame front disturbance. *Combustion Science and Technology*, 1994, 96: 155-167
- 16 Santosh H, Sujith RI. Acoustic nearfield characteristics of a wrinkled premixed flame. *Combustion Science and Technology*, 2006, 78: 1263-1295