

DOI: 10.7652/xjtuxb201311003

# CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/air 预混湍流火焰前锋面结构探测

张猛, 王金华, 谢永亮, 卫之龙, 金武, 黄佐华

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 为了研究掺氢对天然气预混湍流火焰与流场的耦合作用, 利用平面激光诱导荧光探测了CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/air 预混湍流火焰前锋面结构。采用不同孔径和开孔比的湍流产生板在本生灯出口产生不同的湍流流场, 定量测量了湍流流场的特征尺度, 并计算了实验条件下的层流火焰特征参数, 分析了掺氢和湍流强度、湍流尺度对CH<sub>4</sub>/air 混合气预混湍流火焰中流场与火焰相互作用的影响。结果表明, 掺氢明显地增强了火焰前锋面褶皱, 火焰褶皱程度随湍流强度的增大而增强。火焰高度随掺氢比的增加而略有降低, 随湍流强度增大而增加。掺氢引起火焰自身不稳定性增强, 导致火焰前锋面受湍流扰动影响增强, 引起预混湍流火焰前锋面褶皱增强。

**关键词:** 平面激光诱导荧光; 预混湍流火焰; 火焰前锋面结构; 掺氢

中图分类号: TK16 文献标志码: A 文章编号: 0253-987X(2013)11-0014-05

## Measurement of Flame Front Structure of Turbulent Premixed Flames for CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Air Mixtures

ZHANG Meng, WANG Jinhua, XIE Yongliang, WEI Zhilong, JIN Wu, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The measurement of the flame front structure of CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/air flames was conducted using planar induced laser fluorescence (OH-PLIF) to study the effects of hydrogen blending on the premixed turbulence-flame interaction of natural gas. Various turbulence conditions were generated by perforated plates with different hole diameters and opening ratios. The scales of the turbulent flow were measured and the properties of laminar flames were calculated. The effects of hydrogen addition, turbulence intensity and turbulence scales on the flame-turbulence interaction of CH<sub>4</sub>/air turbulent premixed flames were discussed. The results show that the hydrogen addition significantly promoted the wrinkle intensity of the flame front, and the wrinkle intensity of the flame front increased with an increase in turbulence intensity. The flame height decreased slightly with an increase in hydrogen fraction and increased with an increase in turbulence intensity. The hydrogen addition facilitated the flame intrinsic instability, leading to the active response of laminar flame to turbulence and the highly wrinkled OH-PLIF flame front structure.

**Keywords:** planar induced laser fluorescence; turbulent premixed flame; flame front structure; hydrogen addition

随着能源需求的增长和日益严峻的环境问题, 清洁高效燃烧技术的研究引起越来越广泛的关注

注<sup>[1]</sup>。天然气作为清洁燃料大量应用在燃气轮机、内燃机和锅炉上。由于天然气的主要成分CH<sub>4</sub>中

收稿日期: 2013-03-15。 作者简介: 张猛(1988—), 男, 博士生; 王金华(通信作者), 男, 讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51006080); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

网络出版时间: 2013-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130723.1156.003.html>

C—H 键能较大,导致天然气火焰传播速率低,稀燃时燃烧不完全,失火率高,燃烧不稳定。氢气是一种清洁可再生燃料,燃烧速率快,通过向天然气中掺混少量氢气可以提高天然气混合气的燃烧速率,同时提高天然气稀燃稳定性。由于氢气制备成本和基础设施方面的原因,掺氢碳氢燃料是未来氢能经济的最有潜力的过渡技术。

作者所在课题组系统开展了天然气掺氢混合燃料燃烧特性基础研究,包括发动机实验研究<sup>[2-3]</sup>、层流燃烧特性基础研究和化学反应动力学机理研究<sup>[4]</sup>。结果表明,掺混少量氢气会提高发动机燃烧效率,降低排放。掺氢对天然气层流火焰特性有非线性的影响,掺氢会扩展天然气稀燃极限和提高天然气稀燃稳定性。众所周知,实际燃烧器是湍流燃烧,掺氢对发动机燃烧和排放性能的影响是通过影响层流火焰特性来影响层流火焰与流场的相互作用,进而影响燃烧器内湍流燃烧过程,最终影响燃烧性能和排放性能。目前,掺氢对天然气层流燃烧特性和天然气发动机燃烧和排放特性的影响规律已初步掌握,而掺氢对天然气预混湍流燃烧中火焰与流场耦合作用的影响机理还不十分清楚。

预混湍流燃烧的火焰前锋面表征燃烧的反应区域,研究火焰前锋面结构,可以获得不同条件下的湍流燃烧尺度、流场和火焰的相互作用以及湍流燃烧速度等信息<sup>[5]</sup>,对于认识预混湍流燃烧基础现象、构建和验证湍流燃烧模型、设计和优化燃烧器具有重要的指导意义。随着测量手段和计算机技术的不断发展,激光测量技术成为探测火焰的主要手段,其中主要包括激光诱导荧光(PLIF: Planar Laser Induced Fluorescence)<sup>[6-7]</sup>和激光层析<sup>[8]</sup>。

本文的主要工作是探测不同掺氢比和湍流强度下 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/air 混合气预混湍流火焰前锋面结构,给出湍流流场和层流火焰的参数,分析掺氢和湍流强度对火焰前锋面结构与湍流尺度和层流火焰尺度之间耦合作用的影响。

## 1 平面激光诱导荧光(OH-PLIF)实验系统和预混湍流燃烧本生灯

OH-PLIF 测量系统如图 1 所示,整个系统分为燃料空气供应系统、PLIF 系统和预混湍流燃烧本生灯。燃料空气供应系统包括气瓶、管路、调节阀、质量流量计和混合器。PLIF 系统由激光光源、光路调节反射镜、透镜、荧光探测、软件控制和数据采集系统等组成。激光光源包括 Nd: YAG 泵浦激光器

(Quanta-Ray Pro-190)和染料激光器(SirahPRSC-G-3000)。泵浦激光波长为 355 nm、脉宽为 10 ns、功率为 2 W、脉冲频率为 10 Hz。经过染料激光器中染料光栅调谐以及 BBO 倍频晶体倍频,最终波长为 282.769 nm,并且单脉冲能量可以维持在 8 mJ,用以激发火焰中 OH 自由基  $A^2\Sigma^-\leftarrow X^2\Pi(1,0)$  跃迁中的  $Q_1(8)$  线。激光束通过透镜组转换为高 50 mm 左右、厚 1 mm 的激光薄片。OH 荧光信号的波长大约在 308 nm 附近,由包含带通滤波片和信号放大器的 ICCD 相机捕捉,计算机软件控制端通过纳秒级的同步控制使激光脉冲、增强器和 ICCD 相机同步,实验中快门速度为 200 ns、延迟为 2 000 ns、频率为 10 Hz。

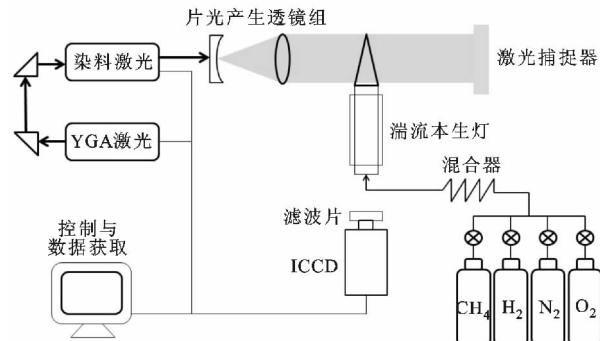
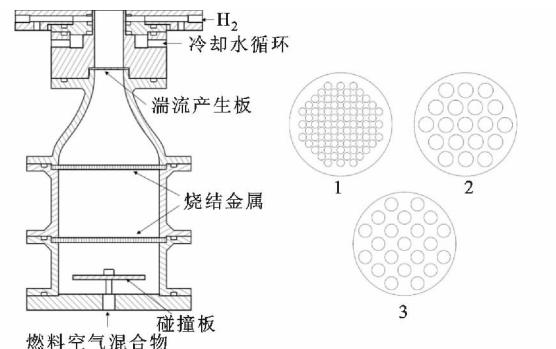


图 1 OH-PLIF 实验台架示意图

实验采用预混湍流燃烧本生灯产生连续燃烧的稳定 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/air 预混湍流火焰,供 OH-PLIF 激光测量技术测量。本生灯剖面图如图 2 所示,出口直径为 20 mm。湍流产生板安装在出口上游 40 mm 处,用以在本生灯出口处产生湍流流场。湍流产生板包括 3 种不同孔径、开孔方式和开孔比,都以六边形或轴对称布置,小孔均匀分布,以保证产生范围广泛的各向同性的湍流流场。孔板参数如表 1 所示。本生灯喷嘴外围设计了宽度为 0.5 mm 的狭缝,实



(a)湍流本生灯剖面图 (b)湍流发生器结构示意图

图 2 湍流本生灯剖面图及湍流发生器结构示意图

验之前预先通入旁路引燃氢气点燃,再通入主混合气,从而保证安全点火,实验中引燃氢气也可以防止吹熄。适当温度的循环冷却水可以防止燃烧器喷嘴处温度过高和火焰生成物中的水冷凝在喷嘴处,另外在燃烧器中下部安装了两片间隙尺度为  $100 \mu\text{m}$  的烧结金属用来整流和防止回火,为了充分混合燃料和空气,在进口  $10 \text{ mm}$  下游装有碰撞板。

表 1 孔板参数

孔板编号	孔径/mm	开孔比/%
1	2.1	60
2	4.0	40
3	3.5	55

## 2 湍流特性和层流火焰特性

预混湍流火焰是湍流流动对层流火焰扰动,同时层流火焰对湍流流动响应的相互耦合作用。分析湍流火焰应该从湍流流场特性、层流火焰特性和湍流火焰 3 方面着手。图 3 为 3 种不同湍流产生板的标定曲线,即湍流强度  $u'$  随本生灯出口处平均速度的变化关系。湍流流场利用热线风速仪(Dantec, Streamline 90N)测量,并采用各向同性湍流假设计算获得<sup>[9]</sup>。3 种不同的湍流产生板分别用以产生在不同湍流强度区域的流场,从而保证产生稳定的预混湍流燃烧火焰。

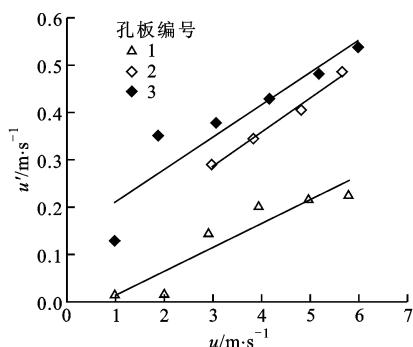
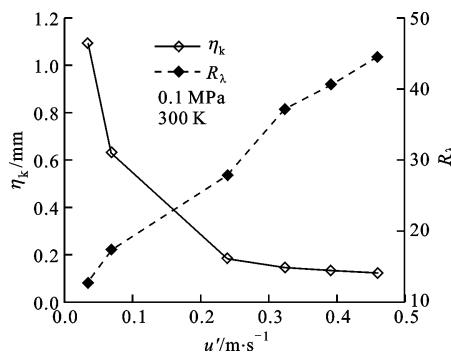


图 3 湍流产生板湍流强度随出口平均速度的变化关系

图 4 给出了流场的 Kolmogorov 尺度  $\eta_k$  和基于 Taylor 尺度<sup>[9]</sup>与湍流脉动速度均方根  $\nu_{\text{rms}}$  的湍流雷诺数  $R_\lambda$  随  $u'$  的变化关系,可以看出,随着湍流强度增强, Kolmogorov 尺度变小,而湍流雷诺数变大。各向同性假设下 Kolmogorov 尺度的计算方法如下

$$\eta_k \approx (\nu^3 / \epsilon_0)^{1/4} \quad (1)$$

式中:  $\nu$  为分子运动黏性系数;  $\epsilon_0$  为耗散率<sup>[9]</sup>。最新的湍流直接数值模拟(DNS)表明,各向同性湍流场

图 4  $\eta_k$ 、 $R_\lambda$  随  $u'$  的变化关系

中湍流涡的平均直径为  $\eta_k$  的 10 倍左右,表明随着湍流强度的增强,流场中湍流涡变小。

表 2 给出了 3 种不同实验条件下的层流火焰参数,为了对比研究掺氢对  $\text{CH}_4/\text{air}$  预混湍流火焰的影响,调整不同掺氢比时混合气的当量比  $\phi$ ,使层流火焰速率基本保持不变。定义掺氢比  $\varphi(\text{H}_2)$  为氢气在燃料混合物中的体积分数,并计算获得了火焰特征参数,包括有效路易斯数  $Le_{\text{eff}}$ <sup>[10]</sup>、最大湍流增长率  $\sigma_{\text{max}}$ <sup>[11]</sup> 和火焰不稳定性特征尺度  $l_i$ <sup>[12]</sup>。

表 2 层流火焰特征参数

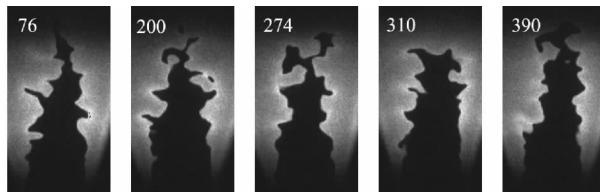
$\varphi(\text{H}_2)/\%$	$\phi$	$S_L/\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$T_b/\text{K}$	$\sigma_{\text{max}}$	$Le_{\text{eff}}$	$l_i/\text{mm}$
0	0.90	34.03	2133.8	81	0.96	1.36
10	0.87	34.29	2100.6	125	0.79	0.98
20	0.83	33.62	2051.4	162	0.68	0.74

注:  $S_L$  为层流燃烧速度;  $T_b$  为绝热火焰温度。

## 3 预混湍流火焰线等面结构

图 5 给出了预混湍流火焰的瞬时 OH-PLIF 图像,可以看出利用 OH-PLIF 激光测量技术可以清晰地获得预混湍流火焰凹凸褶皱形状的火焰前锋结构。图 5 中火焰锋面虽然为在相同条件下测得的结果,但前锋面结构位置具有很大的随机性。OH-PLIF 的优势是能捕捉到瞬时随机的火焰锋面,通过瞬时火焰面结构来分析流动和燃烧的耦合机理。

图 6 给出了不同掺氢比和湍流强度下预混湍流火焰的直接摄像图片。该图片获得的是投影信息,



图片中的数字为该图在 500 张拍摄图像中的序号

图 5 相同条件下不同时刻湍流火焰前锋面

不能获得火焰的边界, 同时由于曝光时间长, 图片也无法展示随机脉动的预混湍流火焰前锋面结构。图 7 给出了图 6 对应条件下的 OH-PLIF 图片, 可以看出, OH-PLIF 采用平面激光可以获得剖面信息, 同时由于脉冲激光的强能量和极短的曝光时间, 可以捕捉到清晰的湍流火焰前锋面结构。

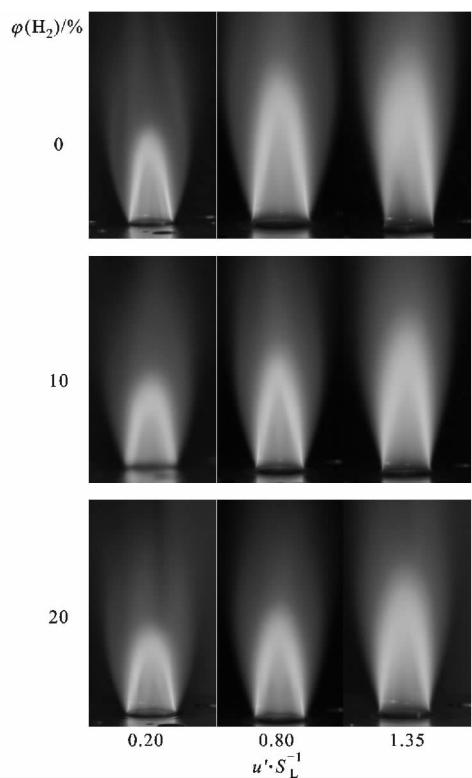


图 6 不同掺氢比和湍流强度下的火焰直接数码照片

在不同的条件下, 预混湍流火焰前锋面的褶皱程度不同, 火焰锋面的褶皱程度随着湍流强度的增大而明显增强。在湍流强度较小的区域, 由于湍流微观尺度比较大, 流场较弱, 不足以在火焰里形成涡燃烧区域, 火焰只是一个极薄的薄层, 流场只能影响层流火焰的形状, 所以火焰面扭曲褶皱不明显。随着湍流强度的增大, 流场尺度变小, 雷诺数变大, 流场增强, 流场的尺度和火焰的尺度接近, 这时在火焰里形成涡, 增强燃烧, 从 OH-PLIF 图片上来看, 形成了更为褶皱的火焰前锋面。

由图 7 还可以看出, 预混湍流火焰前锋面的褶皱程度随掺氢比的增加而增强。由表 2 给出的层流火焰的尺度和参数可以看出, 随掺氢比的增加, 混合气的  $Le_{\text{eff}}$  降低, 最大增长率  $\sigma_{\max}$  变大, 火焰自身不稳定性尺度  $l_i$  显著减小。这说明掺氢增强了火焰自身不稳定性, 导致火焰对湍流扰动的响应更积极, 引起掺氢后火焰前锋面结构更加褶皱, 表明火焰自身不稳定性对湍流与火焰相互作用有重要影响。从直

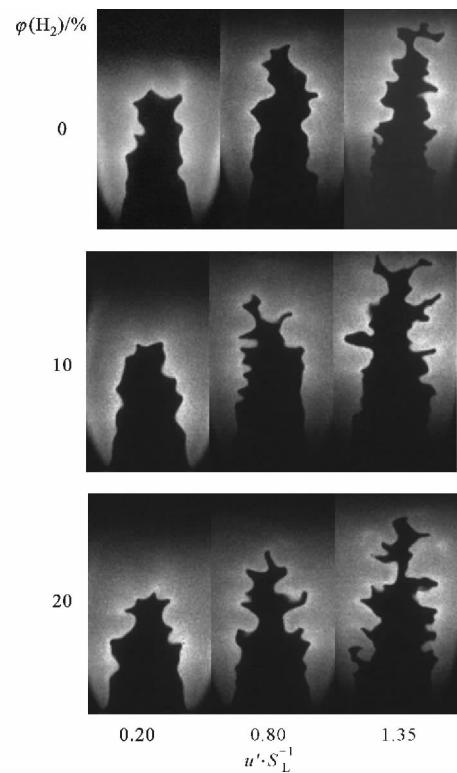


图 7 不同掺氢比和湍流强度下的 OH-PLIF 图片

接摄像图片和 OH-PLIF 图片可以看出, 火焰高度随掺氢比的升高略有下降, 随湍流强度的增加而明显升高。图 8 给出了不同掺氢比下 500 张瞬时火焰图片的火焰高度  $H$  的平均值随湍流强度的变化关系, 图 7 也表现了这一规律。

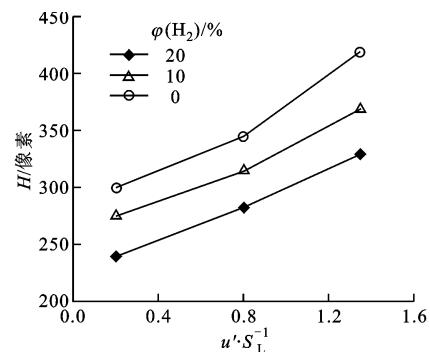


图 8 500 张瞬时火焰高度平均值随湍流强度的变化关系

#### 4 结 论

(1) 预混湍流火焰前锋面是湍流流场和层流火焰相互作用形成的褶皱结构。

(2) 掺氢增强火焰自身不稳定性, 从而影响层流火焰对湍流流动的响应, 增强火焰前锋面褶皱。随着湍流强度的增加, 火焰前锋面褶皱程度明显增强。

(3) 火焰高度随掺氢比的升高略有下降, 随湍流

强度的增加明显升高。

(4) 后续将开展火焰前锋面定量计算, 以获得火焰前锋面尺度参数, 从而研究预混湍流火焰中火焰前锋面尺度与湍流尺度和层流火焰尺度之间的耦合作用规律机理。

### 参考文献:

- [1] SHRESTHA S O B, KARIM G A. Hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1999, 24(6): 577-586.
- [2] WANG Jinhua, HUANG Zuohua, YU Fang, et al. Combustion behaviors of a direct-injection engine operating on various fractions of natural gas-hydrogen blends [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(15): 3555-3564.
- [3] HUANG Zuohua, WANG Jinhua, LIU Bin, et al. Combustion characteristics of a direct-injection engine fueled with natural gas-hydrogen blends under various injection timings [J]. Energy & Fuels, 2006, 20(4): 1498-1504.
- [4] HU Erjiang, HUANG Zuohua, HE Jiajia, et al. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane-hydrogen-air flames [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(11): 4876-4888.
- [5] SMALLWOOD G J, SNELLING D R, DESCHAMPS B M, et al. Characterization of flame front surfaces in turbulent premixed methane/air combustion [J]. Combustion and Flame, 1995, 101: 461-470.
- [6] 王岳, 雷宇, 张培元, 等. 用 OH-PLIF 研究浮力对预混 V 形火焰的作用 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3): 382-385.  
WANG Yue, LEI Yu, ZHANG Peiyuan, et al. A study of buoyancy influence on premixed V-flames by using OH-PLIF [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(3): 382-385.
- [7] 郭培卿, 藏述升, 葛冰, 等. 合成气扩散燃烧的 OH-PLIF 测量 [J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 842-847.  
GUO Peiqing, ZANG Shusheng, GE Bing, et al. The measurement of syngas diffusive combustion by OH-PLIF [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 842-847.
- [8] BOYER L. Laser tomographic method for flame front movement studies [J]. Combustion and Flame, 1980, 39(3): 321-323.
- [9] SWAMINATHAN N. Turbulent premixed flames [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011: 450-475.
- [10] YUAN Jiao, JU Yiguang, LAW C K. On flame-front instability at elevated pressures [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 1267-1274.
- [11] DINKELACKER F, MANICKAM B, MUPPALA S P R. Modelling and simulation of lean premixed turbulent methane/hydrogen/air flames with an effective Lewis number approach [J]. Combustion and Flame, 2011, 158(9): 1742-1749.
- [12] SIVASHINSKY G I. Instabilities, pattern formation and turbulence in flames [J]. Fluid Mechanics, 1983, 15: 179-199.

### [本刊相关文献链接]

- 王金华, 张猛, 谢永亮, 等. 合成气纯氧高压预混湍流火焰结构研究. 2013, 47(10): 87-90. [doi: 10.7652/xjtuxb201310015]
- 卢勇, 裴普成. 配气正时对工质移缸类非常规循环内燃机性能的影响规律. 2013, 47(9): 41-48. [doi: 10.7652/xjtuxb201309007]
- 孟祥文, 杨星, 康婵, 等. 直流电场对预混  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$  火焰传播特性影响的试验研究. 2013, 47(7): 13-17. [doi: 10.7652/xjtuxb201307003]
- 孙璐, 刘亦夫, 周磊, 等. 排气再循环下柴油引燃天然气发动机循环变动特性研究. 2013, 47(3): 36-41. [doi: 10.7652/xjtuxb201303007]
- 李东昌, 汪映, 孟庆斌, 等. 二甲醚预混比对预混压燃发动机性能影响的试验研究. 2013, 47(3): 48-52. [doi: 10.7652/xjtuxb201303009]
- 周竹杰, 魏若男, 周蓉芳, 等. 离子电流法在不正常点火中的实验模拟. 2013, 47(1): 43-47. [doi: 10.7652/xjtuxb201301009]
- 唐安东, 孟祥文, 周蓉芳, 等. 非均匀电场对火焰传播速率的影响. 2012, 46(9): 16-20. [doi: 10.7652/xjtuxb201209004]
- 周蓉芳, 魏若男, 周竹杰, 等. 点火能量对天然气空气预混合气层流燃烧的影响. 2012, 46(7): 21-25. [doi: 10.7652/xjtuxb201207005]
- 赵伟, 舒歌群, 张伟, 等. 富氧燃烧对柴油机低温燃烧反应机理影响的数值分析. 2012, 46(3): 69-74. [doi: 10.7652/xjtuxb201203013]
- 刘德新, 刘斌. 二次喷油优化直喷汽油机冷启动排放特性的研究. 2012, 46(1): 13-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201201003]
- 刘亦夫, 刘兵, 刘亮, 等. 天然气缸内直喷发动机在不同喷射和点火时刻下的排放与燃烧特性. 2011, 45(5): 12-16. [doi: 10.7652/xjtuxb201105003]

(编辑 荆树蓉)