文章编号: 1001-1455(2006)03-0208-06

方形管内楔形障碍物对火焰结构与传播的影响*

陈志华,叶经方,范宝春,姜孝海,归明月
(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 通过实验与数值模拟方法对 CH_4/空气预混火焰在有楔形障碍物的卧式燃烧方管内的传播进行了研究。采用多镜头 Cranz & Schardin 高速摄像机和压力传感器等实验设备获得了高清晰度的障碍物诱导火焰失稳的分幅时序照片以及障碍物背风表面压力变化曲线。数值模拟则基于 RANS 方法与 EDU-Arrhenius 燃烧模型,计算结果与实验结果基本相符,反映了火焰在管内传播与变形的详细过程。通过综合分析实验与计算结果,得到了由楔形障碍物导致的火焰加速与变形的内在机理,揭示了火焰传播过程中由层流燃烧向湍流燃烧转捩的本质。

关键词: 爆炸力学;火焰传播;火焰结构;楔形障碍物
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 130·3510 **文献标志码**: A

1 引 言

密闭容器内气体燃烧爆炸以及障碍物对火焰传播的影响因具有极其重要的应用背景而一直受到重视[1~12]。大量的实验与理论研究表明,除燃料浓度外,火焰阵面的变形同样会影响管内燃料的燃烧速率。一般情况下,层流燃烧的火焰阵面规整,其燃烧速率不及湍流燃烧快。密闭容器内燃料预混燃烧时,其湍流主要来源于火焰阵面容器内壁面的剪切作用,因而火焰能在燃烧管内加速传播[1~3]。若容器内存在障碍物,因障碍物壁面及其本身的阻塞等,能使管内湍流强度快速提高,从而进一步加速火焰在管内的传播[4~12]。然而障碍物的大小(阻塞比)、形状与分布方式对湍流的产生与成长等各有其独自不同的作用与影响规律,其具体细节目前还在进一步研究当中[7]。

关于火焰传播以及与障碍物相互作用的早期实验研究许多是在大型管道及建筑物内进行的。这有利于现场模拟工程实际中发生的爆炸灾害,但由于实验经费巨大,且实验中包括测试在内的许多技术方面的困难,使研究仍停留在压力与火焰速度的表观现象方面,不能全面反映火焰燃烧传播过程中由障碍物导致的变形以及湍流增长等内在本质过程,因而已不能满足当代工程设计技术的安全要求。近年来,关于火焰与障碍物之间相互作用的实验研究开始在实验室尺寸范围内进行[6~11],这为实验测试提供了便利条件,除可得到压力与火焰速度外,还能提供流场速度脉动及火焰传播过程中形状的变化等诸多信息,便于进行综合分析与探讨。如 A. R. Masri 等[9]在 545 mm×195 mm×195 mm 的末端加膜密封方形管中,分别对距点火端 150 mm 的圆柱体、长方体及三角体三组障碍物在各自不同的障塞比条件下对火焰形状与传播的影响进行了实验研究,拍摄的彩色数码照片虽不清晰,但仍能基本反映火焰翻越各不同障碍物时的不同形状,并且通过对比还发现长方体障碍物引起的火焰加速最大,圆柱体最小,且长方体的阻塞比对火焰的加速影响较圆柱体和三角体大。另外,他们对各不同形状的障碍物所引起的管内超压进行的研究,表明容器内最大超压一般随障碍物阻塞比增加而增高,且最大超压值还依赖于障碍物的形状和尺寸,在相同的阻塞比条件下,圆柱体障碍物引起的超压最小,断面形状为矩形的长方体引起的超压最大。K. H. Oh 等[10]则分别在 1000 mm×600 mm×450 mm 和 900 mm×200 mm×200 mm

* **收稿日期**: 2005-03-02; **修回日期**: 2005-07-04
基金项目: 爆炸灾害预防、控制国家重点实验室开放基金项目(KFJJ03-3);国家重点基础研究专项基金项目(2001CB409600)
作者简介: 陈志华(1967—),男,博士,副教授。

末端用膜封闭的方管中，对长方形障碍物取不同高度与管内位置情况下，火焰传播的影响进行了实验研究，通过对火焰在管内的传播过程的高速摄像记录，发现当火焰刚翻越方形障碍物时，其传播速度由于障碍物尾流作用而下降，然后由于尾部旋涡破碎以及火焰阵面的褶皱所导致的湍流与热耗散增加导致火焰燃烧传播迅速加速，还得到了障碍物阻塞比在泄爆过程中是火焰传播与爆炸压力的一个重要影响因素。另外，S. S. Ibrahim 等[7,11]对湍流预混火焰与安置在容器截面中央的方形障碍物之间的相互作用进行了实验研究，同时用高速数码相机进行了记录，但由于数码相机本身的局限性，其照片仍不够清晰，仅能反映火焰与障碍物相互作用过程中的整体变形过程。由于火焰燃烧本身的复杂性，目前对于火焰与管壁和各种障碍物的相互作用以及由此引起的火焰结构的发展变化、火焰传播速度和容器内超压的出现等现象的详细机理则仍在探索之中，对能体现火焰与障碍物相互作用过程中所导致的火焰结构变形整个过程的具有层次感和高清晰度系列照片的需要显得尤为迫切[11]。

火焰在密闭容器内（包括容器内存在障碍物时）传播的数值模拟近年来也受到越来越多的重视。本课题组曾先后对管内均相与两相湍流火焰燃烧加速[2~3]以及管内方形障碍物所导致的湍流火焰加速[5~6]进行了数值模拟，揭示了管内火焰传播时因管壁导致的湍流而使火焰加速的正反馈机理以及因方形障碍物引起的湍流加剧而使火焰燃烧与传播加速的三维变化过程。P. Naamansen 等[12]则利用剑桥大学开发的 McNEWT 程序对末端开口的方形容器中预混火焰在各不同障碍物中的传播进行了二维数值模拟，显示了火焰分别翻越圆形、正方形及三角形障碍物后，火焰阵面的变形以及燃烧加速的过程。

本文中以实验室卧式方管内楔形障碍物对火焰结构及其传播影响为目的，通过 YA-16 多镜头 Cranz & Schardin 高速摄像机，捕捉到了火焰在装有楔形障碍物方形管内的传播以及与障碍物相互作用而变形加速的详细过程，其阴影照片层次感强，清晰度高，为分析方形管内火焰与楔形障碍物之间的复杂作用机理和障碍物末端尾流旋涡的生成、扩展与破碎，以及由此产生的层流向湍流转捩与湍流火焰燃烧变形加速的细节提供了重要依据。压力传感器所测得的障碍物背风表面压力变化曲线，反映了火焰燃烧变形过程中管内压力的变化情况。另外，基于雷诺平均方法（RANS）对上述过程进行了数值模拟，揭示了楔形障碍物与火焰之间的相互作用以及火焰结构的演变过程。

2　实验系统与测试结果

2.1　实验系统

实验在 320 mm×58 mm×54 mm 的小型卧式方形管内进行。管的装置如图 1 所示。管的一端用法兰密封；另一端实验时用纸膜封闭。法兰壁面中央位置装有一个点火头，用于点火；而纸膜可承受一定的压力，当管内压力因燃烧膨胀而超过其承受极限（约 150 kPa）时，纸膜破碎泄压。另外在管两侧装有可用于高速摄影的石英玻璃观察窗，其尺寸为 120 mm×48 mm 。管内在距点火端 60 mm 处的底部位置装有楔形障碍物，其阻塞比为 52%，障碍物尾部背风面有测压点 P1。楔形障碍物尺寸及其测压点以及玻璃窗具体位置如图 1 所示。

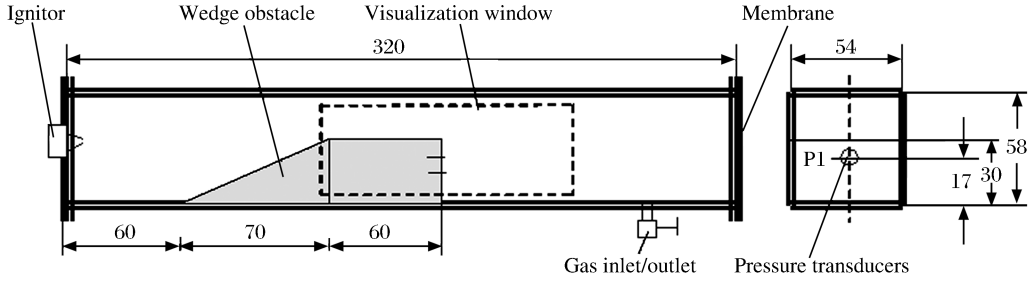

图 1　方管装置示意图

Fig. 1　Schematic of the combustion vessel

实验系统的工作原理如图 2 所示。实验系统由卧式方管、点火器、压力测试系统(传感器、信号放大器和瞬态记录仪)、摄像系统(时序控制器、触发器、多闪光光源、高压发生器和多镜头 Cranz & Schardin 相机)组成。实验开始前,先将方管抽成真空,然后将当量比为 1.05 的甲烷与空气完全预混气体灌入管内至 100 kPa。实验时,由点火器同时触发点火头和时序控制器。点火头点燃管中的预混气体,而时序控制器在经过预先设定的延迟时间后,驱动触发器和高压发生器,使多闪光光源在 YA-16 控制系统的外控触发下依次闪光,各路光线经凹面反射镜反射后,通过测试流场以及与之对应的相机镜头,使底片曝光。YA-16 多镜头 Cranz & Schardin 高速摄像机的最高拍摄速度可达 10^6 s^{-1},可把管内观察窗内火焰传播及其结构变化发展的时序瞬间状态清晰地记录下来。管内压力测量则采用内触发,即预先设定一压力值,当管内压力达到预定值时触发得到压力信号,经信号放大器放大后由瞬态记录仪记录。

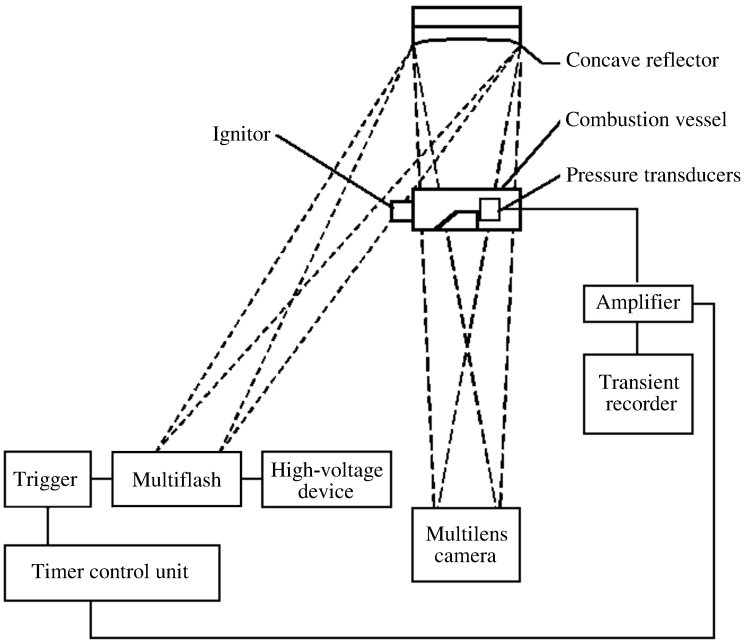

图 2 实验系统原理图

Fig. 2 Schematic of the experimental set-up

2.2 测试结果

在火焰向管尾端传播过程中,方管内障碍物背部测压点的压力时间曲线如图 3 所示。另外,用 YA-16 多镜头 Cranz & Schardin 高速摄像机抓拍了如图 4 所示的火焰在方管内传播与变形过程的清晰时序分幅阴影照片。综合图 3~4,可知障碍物背部所受压力随火焰的传播而增加,当压力增大到纸膜的破膜压力时,纸膜破碎并开始泄压,其破膜时间大约在压力记录后的 0.39 s。

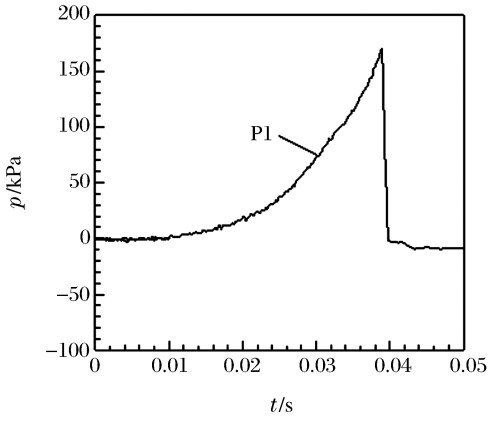

图 3 楔形障碍物背部测压点的压力时间曲线

Fig. 3 Pressure history of a measuring point at the backside of the wedge obstacle

因楔形障碍物的阻塞作用,使火焰在其与方管上壁构成的紧缩通道内加速向管末端传播,并且在障碍物上表面形成剪切边界层,在到达障碍物尾部后,火焰阵面前端开始出现湍流,并且其强度迅速增加(图 4(c)、(d))。此类火焰阵面的变形一般可认为是由 Taylor-Markstein 不稳定引发[13]。另外由

图 4(c)、(d)，障碍物上表面邻近区域在壁面边界层剪切作用同样可诱发湍流的产生。火焰阵面附近湍流的产生导致其燃烧面前端的褶皱和变形加大(见图 4(b)～(d))，燃烧速率增加以及火焰阵面变形，在障碍物尾部卷曲呈“象鼻子”形状(见图 4(e)～(h))，然后火焰继续沿障碍物背风面向上进入紧缩通道中(见图 4(g)～(i))，从而在楔形障碍物尾部形成一个大的涡旋。图 4 所示的系列照片清晰地反映了火焰传播过程中与楔形障碍物的相互作用及其变形过程。

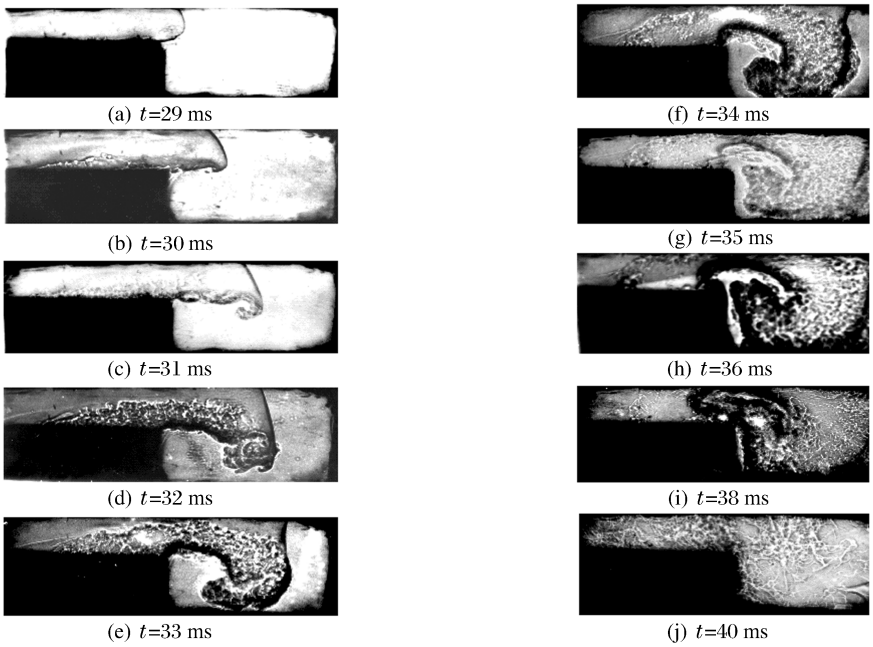

图 4　火焰在方管内传播时，翻越障碍物时的分幅阴影照片

Fig. 4　Shadow photograph of flame propagation in the tube

3　数值计算结果

基于均相反流守恒方程，湍流 κ-ε 模型和 EBU-Arrhenius 燃烧模型对管内火焰的传播以及与方形障碍物的相互作用进行数值模拟。其具体方程组型与数值计算方法已在文献[2,5]中详细描述，在此不再赘述。计算时，由于火焰在管内的燃烧传播时间很短，因此可取所有边界为绝热壁面，并设管内甲烷与氧气的当量比为 1。刚点火时，火焰在管初始端中部位置呈半球形，其内部约 50% 的 CH4 燃料消耗。管末端破膜条件依实验取 150 kPa。

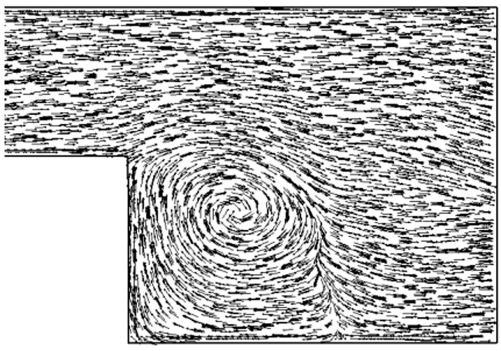

图 5　火焰翻越障碍物时其尾部速度矢量图

Fig. 5　Velocity vector of flow when flame propagates near the tube end

图 5 为火焰翻越障碍物时，管剖面所显示的尾部速度矢量的二维分布。由此可知，火焰在翻越障碍物后在其可知楔形障碍物背部存在一个大的顺时针方向的涡旋。

图 6 为点火不久，火焰传播与变形过程中管内密度的等值分布。由以上计算结果可知，点火后，火焰在管内以层流燃烧向末端方向传播。当火焰阵面传播到障碍物附近时，由于障碍物迎风面为斜面，没有出现象方形障碍物等与火焰正面撞击所带来的火焰的大变形[10]，因而楔形障碍物的斜面具有缓冲作用，对刚开始接触的火焰阵面变形影响不大，并且由于斜面的紧缩作用，使火焰以加速方式传播。在火焰经斜面进入障碍物上壁面与方管壁面所构成的紧缩通道后，火焰仍以一定的加速度向前传播。在翻

越障碍物后,火焰以射流方式进行管末端与障碍物尾部,形成与高速摄影所得照片相同的尾部旋涡。综合以上实验与数值计算结果,不难得到火焰在管内从点火端开始到管末端整个传播过程中与楔形障碍物相互作用以及所导致的火焰变形与湍流燃烧加速的整个过程与内在机理。

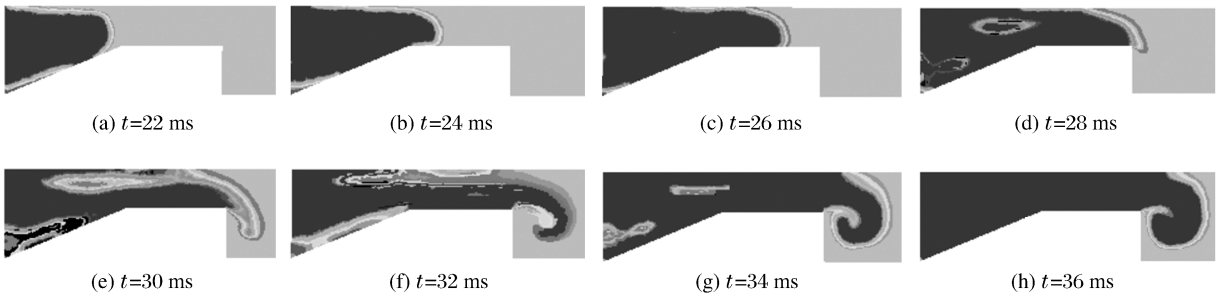

图 6 火焰翻越障碍物时各不同时间段管内密度等值面分布的计算结果

Fig. 6 Density contours inside the tube at different times when flame propagates inside the tube

4 结 论

通过以上实验与数值模拟研究,得到了在装有楔形障碍物的卧式燃烧方管内的火焰传播与结构变形的整个过程。利用 YA-16 多镜头 Cranz & Schardin 高速摄像机首次清晰地捕捉到了能准确反映火焰与障碍物相互作用以及火焰变形过程的时序阴影照片,并发现楔形障碍物末端上壁面的剪切作用及障碍物尾流是管内湍流产生的主要影响因素,并由此导致火焰阵面变形以及层流燃烧向湍流燃烧转捩与火焰燃烧的加速。数值模拟结果补充了管内火焰在障碍物前端传播的过程,揭示了楔形障碍物斜面的缓冲作用,证实了楔形障碍物尾流的涡旋形状,进一步反映了楔形障碍物对管内火焰结构与传播影响的内在机质。

参考文献:

[1] 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[J]. 爆炸与冲击,2000,20(2):137－142.
ZHOU Kai-yuan, LI Zong-fen. Flame front acceleration of propane-air deflagration in straight tubes[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(2):137－142.

[2] 陈志华,范宝春,李鸿志. 管内均相湍流燃烧加速的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2003,23(4):337－342.
CHEN Zhi-hua, FAN Bao-chun, LI Hong-zhi. Numerical simulation of the flame acceleration for homogeneous turbulent in a large tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(4):337－342.

[3] CHEN Zhi-hua, FAN Bao-chun. Flame acceleration and its induced shock wave in a mixture of air and aluminum powder[J]. Journal of Loss Prevention in Process Industries, 2005,18(1):13－19.

[4] 林柏泉,周世宁,张仁贵. 障碍物对瓦斯爆炸过程中火焰和爆炸波的影响[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(2):104－107.
LIN Bai-quan, ZHOU Shi-ning, ZHANG Ren-gui. Influence of barriers on flame transmission and explosion wave in gas explosion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999,28(2):104－107.

[5] 杨宏伟,范宝春,李鸿志. 障碍物和管壁导致火焰加速的三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2001,21(4):259－264.
YANG Hong-wei, FAN Bao-chun, Li Hong-zhi. Numerical investigation on three-dimensional flame acceleration by an obstacle and tube internal walls[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(4):259－264.

[6] 谢波,范宝春,王克全,等. 挡板障碍物加速火焰传播及其超压变化的实验研究[J]. 煤炭学报,2002,27(6):627－631.
XIE Bo, FAN Bao-chun, WANG Ke-quan, et al. Experimental study of flame acceleration and overpressure induced by baffle-obstacle[J]. Journal of China Coal Society, 2002,27(6):627－631.

[7] Ibrahim S S, Masri A R. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14:213－221.

[8] Fairweather M, Hargrave G K, Ibrahim S S, et al. Studies of premixed flame propagation in explosion tubes[J]. Combustion and Flame, 1999,116:504－518.

[9] Masri A R, Ibrahim S S, Nehzat N, et al. Experimental study of premixed fame propagation over various solid obstructions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000,21:109－116.

[10] Oh K H, Kim H, Kim J B, et al. A study on the obstacle-induced variation of the gas explosion characteristics [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14:97－602.

[11] Ibrahim S S, Hargrave G K, Williams T C. Experimental investigation of flame/solid interactions in turbulent premixed combustion[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001,24:99－106.

[12] Naamansen P, Baraldi D, Hjertager B H, et al. Solution adaptive CFD simulation of premixed flame propagation over various solid obstructions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2002,15:189－197.

[13] Takashi T, Toshisuke H. Growth of flame turbulence during lame propagation across an obstacle[J]. Combustion Science and Technology, 1986,4:323－328.

Effects of a wedge obstacle on flame propagation and its structure

CHEN Zhi-hua*, YE Jing-fang, FAN Bao-chun,
JIANG Xiao-hai, GUI Ming-yue
(*National Key Laboratory of Transient Physics,*
Nanjing University of Science & Technology,
Nanjing 210094, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: Experimental and numerical investigations were performed on the CH_4/Air mixture premixed flame propagation in a horizontal rectangle tube with a wedge obstacle mounted at the bottom. The multiple-lens, Cranz & Schardin high speed video system and pressure transducer etc experimental equipment were adopted to visualize the interaction between the wedge block and flame and to measure the flow parameters. Sequences of high-speed images with high definition showing the process of a flame losing its stability under the action of the wedge obstacle and pressure history on the backside of the obstacle were gained. Based on RANS method and EBU-Arrhenius combustion model, a numerical simulation was carried out to simulate the above complex physical phenomenon. Both experimental and numerical results are in good agreement, which show the inherent mechanism of flame acceleration and its front distortion, as well as the nature of a transition from laminar combustion to turbulence during its propagation.

Key words: mechanics of explosion; flame propagation; flame structure; wedge obstacles

* Corresponding author: CHEN Zhi-hua
E-mail address: zhchen@mail.njust.edu.cn
Telephone: 025-84303236