DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0068-09

障碍物对预混火焰特性影响的大涡数值模拟*

王公忠[1,2],张建华[2],李登科[2],陈先锋[2]
(1.河南工程学院安全工程学院,河南 郑州 451191;
2.武汉理工大学安全科学与工程系,湖北 武汉 430070)

摘要:障碍物在预混气体火焰传播过程中对其结构及传播特性造成较大影响,对火焰的加速和爆燃转爆轰过程(deflagration-to-detonation transition, DDT)起到直接的促进作用。通过障碍物条件下可视管道中甲烷/空气预混火焰传播实验,捕获其火焰微观结构变化。采用三维物理模型,采用壁面自适应局部涡黏模型(wall-adapting local eddy-viscosity, WALE)的大涡模拟(large eddy simulation, LES),并用火焰增厚化学反应模型(thickened flame model, TFM)对实验过程进行重现。分析开口管道中预混火焰翻越障碍物后的复杂流场变化,并分析层流向湍流转变过程的特点。揭示了在障碍物影响下预混火焰扰动失稳现象的直接原因,是由障碍物引发的 3 个气流涡团同时作用而形成 Kelvin-Helmholtz 不稳定及 Rayleigh-Taylor 不稳定现象耦合作用所导致。

关键词:爆炸力学;火焰增厚模型;大涡模型;预混火焰;障碍物
中图分类号:O383 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在火灾或爆炸灾害现场常有不同形式的障碍物,这些障碍物不但会影响火焰传播的途径还会对火焰的传播速度、温度及环境压力造成一定的影响。由 G. Ciccarelli 等[1]、Chen Xianfeng 等[2]的研究表明,DDT 过程的主要促成因素是粗糙壁面的影响和爆燃波的诱导作用,而 DDT 过程则是气体爆炸中危害最大的形式。因此研究障碍物对可燃气体爆燃影响,对降低灾害造成的破坏和损失有着重要的意义。

甲烷/空气预混火焰在障碍物控制条件下在开口管道的燃烧实验可以初步了解到由于障碍物的作用,使预混火焰在管道中传播过程变得更加复杂,特别是管道内的一些特性参数例如管内流场等特性参量无法在实验中观测到。随着流体力学数值计算精度和准确性的大幅提高,数值模拟已成为普遍的研究手段。S. Sklavounos 等[3]、B. J. Arntzen[4]基于 CFD 软件,对可燃气云的扩散模型及气体爆炸过程进行了模拟研究,得到与实验相符合的数据,验证了数值模拟方法的可行性。而对障碍物对火焰影响的数值模拟研究,大多利用雷诺平均模型(Reynolds average Navier-Stokes, RANS),其中 k-ε 模型应用最为广泛。但在应用 RANS 方法计算时,所得的火焰形状与实验中的火焰形状不能很好吻合。利用 LES 模型能够更清晰地反映出火焰及流场的大涡结构,特别是在受限空间中模拟火焰的传播,可以得到较好的火焰精细结构和火焰内外部流场特性。V. D. Sarli 等[5]、A. R. Masri 等[6]、S. R. Gubba 等[7]应用 LES 模型进行了大量的三维模拟,结果与实验十分相似,并且得出不同亚网格选择对模拟结果影响较大的结论。另外,障碍物影响对预混火焰 DDT 过程有着明显的促进作用,在对障碍物诱发的 DDT 过程的数值模拟研究也做了大量的工作。D. A. Kessler 等[8]、V. N. Gamezo 等[9]、T. Ogawa 等[10]利用数值模拟研究在障碍物作用下 DDT 的形成过程及危害影响。预混火焰发生的火焰微观结构变形及火焰失稳的流场特性对预混火焰后期的加速及 DDT 过程的影响较大。本文中通过实验发现并捕捉低压环境下预混火焰通过障碍物的过程,并利用 LES 方法结合 TFM 模型对实验过程进行重现,以揭示预混火焰在障碍物影响下发生的复杂流场变化。

* **收稿日期**:2015-05-12;**修回日期**:2015-11-18
基金项目:国家自然科学基金项目(51174153,51374164);国家重点研发计划项目(2016YFC0802801);
建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题项目(KFKT2014ZD03)
第一作者:王公忠(1978—),男,博士,副教授;**通信作者**:陈先锋,cxf618@whut.edu.cn。

1　实　验

采用高速纹影拍摄技术和高频压力传感器对开口管道中甲烷/空气预混火焰在障碍物影响下传播过程中的火焰结构及传播特性进行捕捉，如图 1 所示。开口管道是为预混火焰传播提供低压环境的受限空间，设计为尺寸是 8 cm×8 cm×50 cm 的长方体不锈钢管道，尾端中心设有正方形泄压口。任少锋[11]认为泄压口比率为 30%可作为有效泄爆设计的重要参考值，因此为了有效泄爆和便于实验的操作，这里设计泄压口的尺寸为 4 cm×4 cm，泄压口比率为 25%。实验中障碍物设置于距管道首端 30 cm处，其尺寸为（即阻塞比为 50%）。甲烷/空气预混气的体积比＝ 1∶0.42，初始压力为 p_0＝1.0×10^5 Pa，初始温度 T_0＝ 273 K。

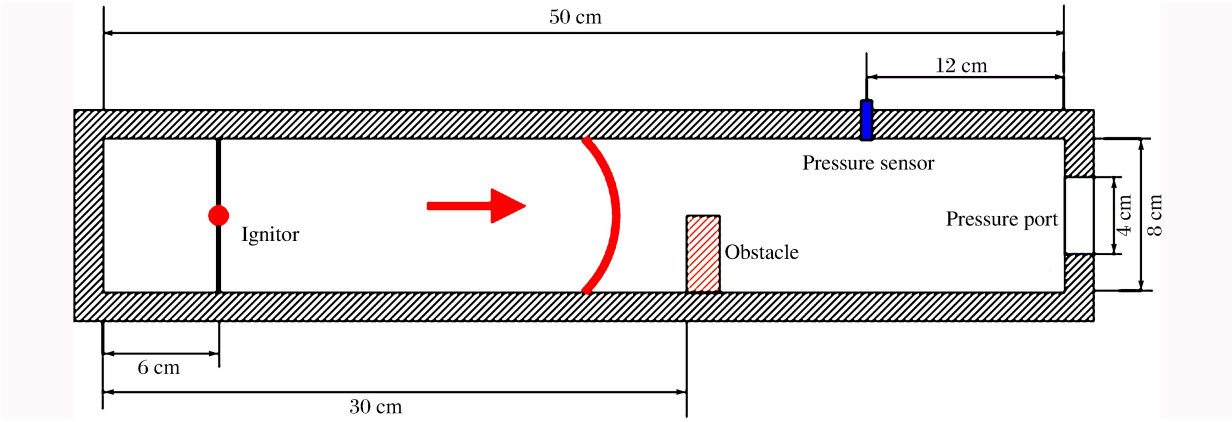

图 1　管道中心轴切面结构图

Fig. 1　Pipe axis structure in cross-section

2　物理模型

物理模型的建立主要考虑甲烷/空气的层流预混火焰厚度 ，通过对模型局部做了 0.5、1.0、2.0 和 4.0 mm 的网格尺寸独立性分析，模型选用网格尺寸为 2 mm×2 mm×2 mm 的 submap 格式的六面体网格布置障碍物设计放置在 x＝30 cm 处。三维物理模型的单元格数量为 726 628。

3　数学模型

3.1　大涡模型控制方程

在预混气体燃烧中大涡模拟的基本原理是对其控制方程通过滤波方程在流场中区别出的大尺度涡团和 Kolmogorov 尺度涡团，然后把相关的流场变量区分成大尺度量和小尺度量。对大尺度量通过直接数值模拟方法计算，而对小尺度量采用亚网格模型(sub-grid scale model，SGS model)进行模型假设来模拟。大涡模型的控制方程为[12]：

连续性方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{u}_i)=0 \tag{1}$$

动量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{u}_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j)=\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}-\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i}-\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

式中：LES 滤波的参量标注为横线上标，质量权重滤波的参量标注为波浪线上标；ρ 为密度，u_i、u_j 为速度分量，t 为时间，应力张量 σ_{ij} 由分子黏度 μ 决定，可表示为 $\sigma_{ij}=\mu\left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu\frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k}\delta_{ij}$ ，τ_{ij} 为亚网格尺度应力，将其定义为 $\tau_{ij}=\rho\widetilde{u_i u_j}-\rho\tilde{u}_i\tilde{u}_j$ ，下标 k 表示为 Kolmogorov 尺度。

能量方程为：

$$\frac{\partial(\rho\widetilde{h}_s)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\widetilde{u}_i\widetilde{h}_s)}{\partial x_i}-\frac{\partial\overline{p}}{\partial t}-\overline{u}_j\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda\frac{\partial\widetilde{T}}{\partial x_i}\right)=-\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho(\widetilde{u_ih}_s-\widetilde{u}_i\widetilde{h}_s)\right] \tag{3}$$

式中：h_s 为显焓，λ 为热导率。亚网格热焓通量可通过梯度假设近似为：

$$\rho(\widetilde{u_ih}_s-\widetilde{u}_i\widetilde{h}_s)=-\frac{\mu_{SGS}c_p}{Pr_{SGS}}\frac{\partial\widetilde{T}}{\partial x_j} \tag{4}$$

式中：μ_{SGS}为亚网格黏度，Pr 为亚网格的普朗特数，c_p 为定压比热，T 为温度。

亚网格模型选用 WALE(wall-adapting local eddy-viscosity, WALE)，WALE 模型增强了大涡计算中的壁面处理，而且在计算层流流动状态时，湍流黏度的返回值为零，比较适合本文中所研究的工况。

在 WALE 模型中将涡流黏度定义为：

$$\mu_t=\rho L_s^2\frac{(S_{ij}S_{ij})^{\frac{3}{2}}}{(\overline{S}_{ij}\overline{S}_{ij})^{\frac{5}{2}}+(S_{ij}S_{ij})^{\frac{5}{4}}} \tag{5}$$

式中：L_s 为亚网格尺寸和应变率张量的混合长度量，可以定义为 $L_s=\min(\kappa d,C_wV^{\frac{1}{3}})$，$V^{\frac{1}{3}}$ 表示网格尺寸，S_{ij} 可定义为 $S_{ij}=\frac{1}{2}(\widetilde{g}_{ij}^2+\widetilde{g}_{ji}^2)-\frac{1}{3}\delta_{ij}\widetilde{g}_{kk}^2$，$\widetilde{g}_{ij}=\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_j}$，为 von Kármán 常数，$d$ 为流体质点离最近壁面的距离，C_w 为 WALE 常数。

3.2 增厚火焰模型

甲烷/空气层流预混火焰厚度约为 0.26 mm，对网格尺寸要求苛刻。为降低计算成本，选用增厚火焰模型(TFM)，它适用于较粗的网格来模拟预混火焰的传播，且与 LES 模型配合计算结果较好[13]。

增厚火焰模型是通过层流火焰在不改变层流火焰传播速度的情况下被人为加厚，通过增加物质扩散率和降低反应速率来实现。用 u_l 表示层流预混火焰传播速度，u_l 与 $\sqrt{DR}$ 成比例，D 为分子扩散系数，R 为平均反应速率。层流火焰厚度与 D/u_l 成比例。在 ANSYS Fluent 软件中，增厚因子 $F=\frac{N\Delta}{\sigma}$，其中火焰内指定的网格单元数 $N=5$，层流火焰厚度 $\sigma=0.26$；Δ 为为网格尺寸，由 $V^{\frac{1}{d}}$ 定义，V 为单元体积，d 为空间维度。层流火焰厚度 σ 可为常数、也可自定义函数，或由 D/u_l 计算得到。其中热扩散系数 D，由 $\frac{k}{\rho c_p}$ 决定，k 为未燃混合气体导热系数。

所有组分扩散系数，包括导热系数，均乘以增厚因子 F；所有反应速率均除以 F。然而，远离火焰的区域会由于扩散率增加而出现混合及热传导错误，因此，火焰增厚区域应限制在火焰前锋附近的狭窄区域。火焰增厚区域还要乘以系数 Ω：

$$\Omega=\tanh\left(\beta\frac{|\overline{R}|}{\max(|\overline{R}|)}\right) \tag{6}$$

式中：$|\overline{R}|$ 为平均化学反应速率绝对值；β 为常数取值为 10，控制增厚区与非增厚区之间的过渡区域的厚度；$\max(|\overline{R}|)$ 为反应区内平均化学反应速率的最大值；Ω 取值范围 0 到 1，远离火焰面处为 0。

3.3 化学反应机理

偏重研究火焰在受限空间内的传播行为和流场特性，为了减少计算成本，并保证计算准确性，因此化学反应机理选用简化后的甲烷/空气两步反应机理。其反应机理步骤如下：

$$CH_4+1.5O_2\xrightarrow{R}CO+2H_2O$$

$$2CO+O_2\xrightarrow{R}2CO_2$$

3.4 Spark 点火模型

为了更精准地模拟实验中的电击点火过程，模拟中使用的是 Spark 点火模型，它是根据网格的尺寸，假设一个完美的球形火焰面，球形火焰面的半径 r 随着时间轴的推移而逐渐增大。控制方程如下：

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=\frac{\rho_u}{\rho_b}S_t \tag{7}$$

式中：ρ_u、ρ_b 分别为未燃区和已燃区气体密度，S_t 为湍流火焰速度。为了控制火星的大小，给出了 r 的限制条件：$r=\max(r_0+3\Delta,3r_0,\min(\frac{1}{2}l_t,r_0+10\Delta))$，$\Delta$ 为网格尺度，l_t 为湍流尺度，初始火星半径 r_0 设定为 0.5 mm。

4　结果分析

实验通过高速摄影对预混火焰在开口管道中传播和翻越障碍物过程的纹影图像进行拍摄。图 2 所示为预混火焰翻越障碍物过程纹影图片。纹影图片记录了从点火后 $t=32\sim42$ ms 火焰锋面的传播过程。从图可以看出 $t=32\sim38$ ms 的过程中预混火焰处于层流气泡膨胀状态。在 $t=36$ ms 的纹影图像中，球形火焰锋面由于障碍物的阻碍作用球心开始向上倾斜，下部火焰锋面开始拉伸。在 $t=38$ ms 时火焰锋面到达块状障碍物的横轴坐标 $x=30$ cm 处，但是火焰锋面并未接触障碍物壁面，而是因为诱导气流的作用下，越过障碍物从障碍物上部的狭窄通道穿过。此时，火焰的锋面弯折成约 45°的锐角，尖端仍是直径为 1 mm 的半球火焰锋面。当 $t=39$ ms 时，火焰上端锋面越过障碍物，而且从图中可以发现在其下表面层流火焰厚度明显增大。接着在 $t=40$ ms 时，红色标记的火焰增厚处其火焰锋面开始出现失稳，并伴随有细小的涡团出现，同时在标记处出现挤压褶皱现象，这里称之为“诱导褶皱”。其后涡团随时间扩大，逐渐发展成湍流状态。

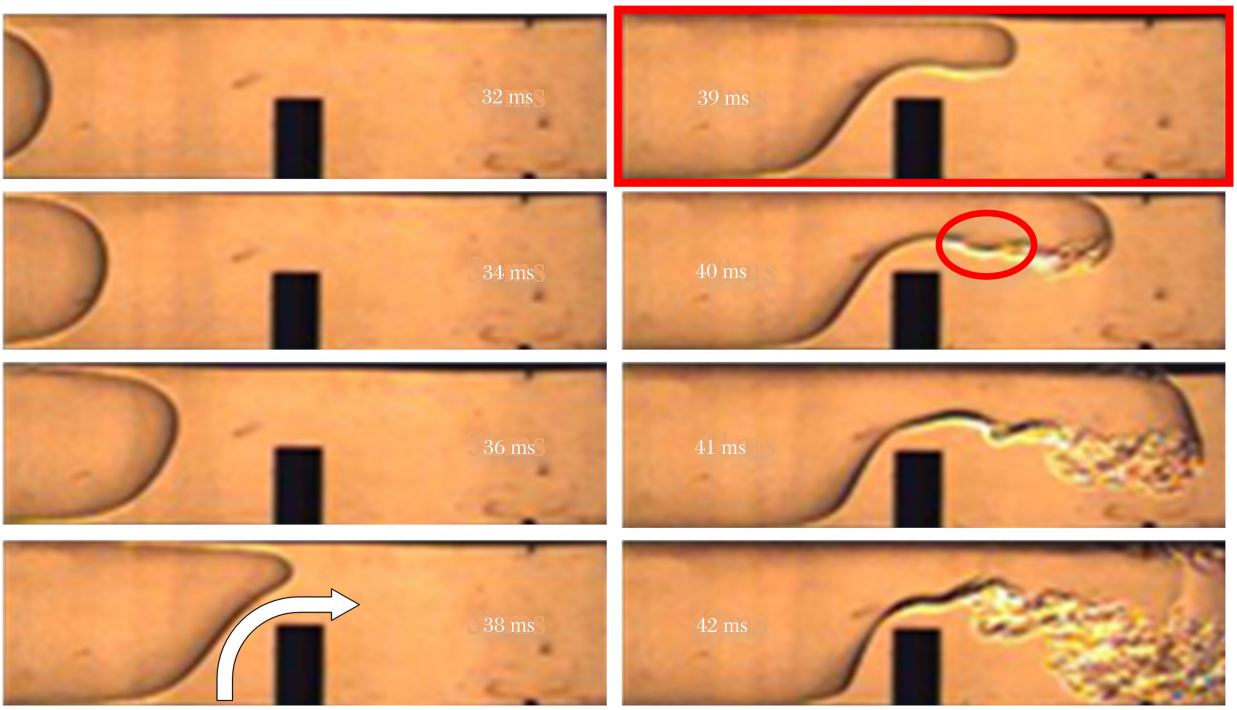

图 2　甲烷/空气预混火焰传播过程纹影图片

Fig. 2　High-speed schlieren images of premixed methane/air flame propagation

为了观察三维预混火焰结构，选用 $T=1\,800$ K 的温度等值面近视作为预混火焰锋面，得到 LES 模型计算三维预混火焰结构时间序列图，如图 3 所示。将图 3 与图 2 进行比较，可以看出 LES 的计算结果与实验的纹影图像是比较吻合的。在 $t=5\sim10$ ms 时，认为是火焰形成初期，火焰呈球形火焰成长，当火焰继续成长阶段，因受管道壁面挤压，火焰形态拉长转而向管道两端传播。对于预混火焰翻越障碍物后层流向湍流转变的过程，LES 模型的计算结果表现出色，可以很明显地观察到处在 $t=37$ ms 时火焰失稳并在火焰锋面前段出现向内卷曲，同时可以看到“诱导褶皱”的出现。而在 $t=42$ ms 时可以清楚

的看到,此时的预混火焰一部分已经从泄压口泻出,另一部分则不断向内卷吸,最终形成 1 个 C 字形的火焰结构,火焰翻越障碍物时管道内流场结构示意图可参考图 4。

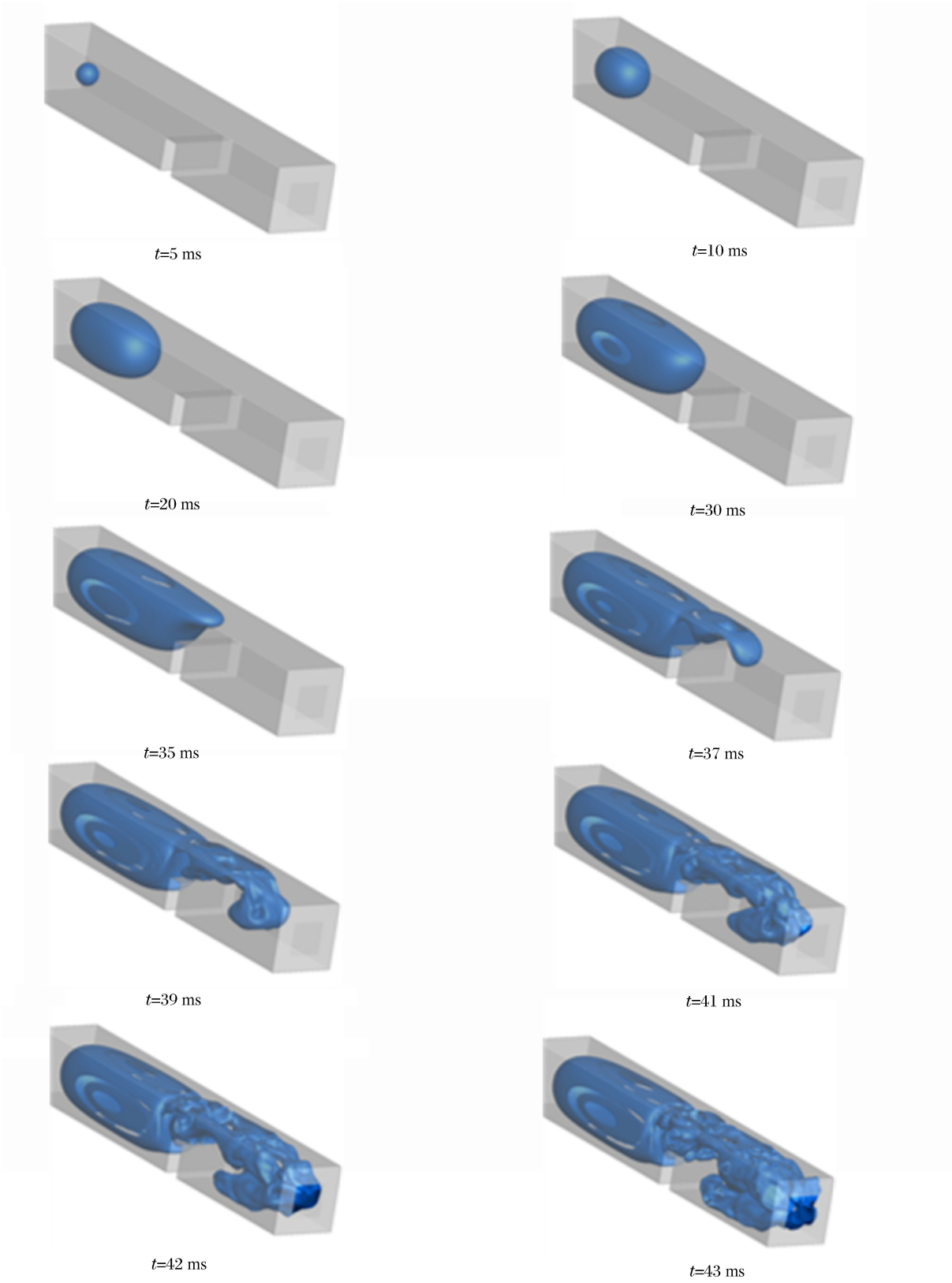

图 3 LES 模型计算三维预混火焰结构时间序列图

Fig. 3 Sequence diagram three-dimensional premixed flame structure by LES model

另一方面从图 3 中可以观察到预混火焰的三维结构中 z 轴的火焰结构特点，而这是实验的纹影图片捕捉不到的火焰结构特征。其中在 $t=30$ ms 时看出在火焰遇到障碍物之前，火焰锋面锐角化变形并向上偏移，而同时火焰锋面下端，即面对障碍物的火焰锋面出现向内凹陷的现象。在 $t=39$ ms 时发现在火焰越过障碍物后，火焰的失稳造成的湍流使火焰头部产生较大的扭曲变形，湍流强度有明显增大的趋势。另外从图 3 中发现在开口管道中，障碍物的作用还会影响 z 轴方向的火焰锋面形状。

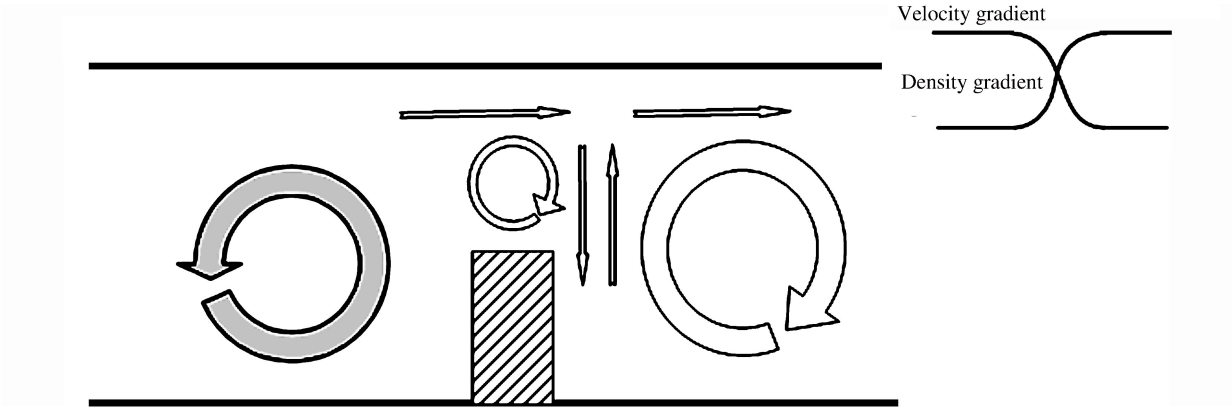

图 4　火焰翻越障碍物时管道内流场结构示意图

Fig. 4　The pipe flow field structure diagram when the flame climb over the obstacle

图 5 所示为传感器所在位置点(图 1 中所示)的压力时程曲线与 LES 模型计算值的对比，从图中可以看出 LES 的计算结果与实验值相当吻合，其上升趋势和数据基本一致，但其峰值略高于实验值 20.8%。结合图 3 中 $t=37$ ms 时“诱导褶皱”效应也强于实验值，其原因可以认为是 LES 模型运用 WALE 亚网格滤波，对壁面效应有所增强，使其对预混火焰翻越障碍物的过程中障碍物通道空间内的壁面受冲击压力后的反作用压力较真实值偏高，产生一定的放大效应。由此可以认为预混火焰传播压力 LES 数值模拟与实验结果较为吻合。

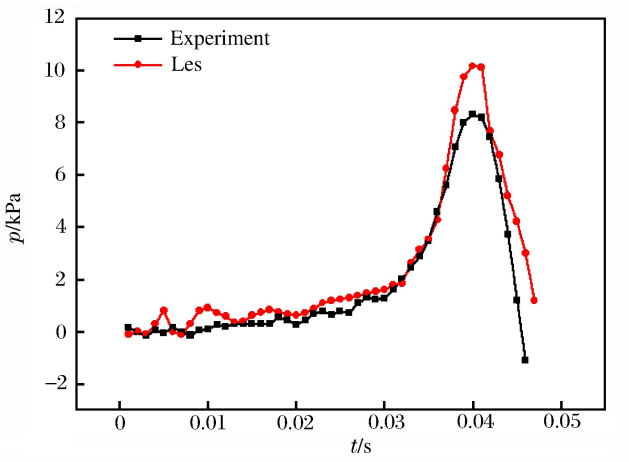

图 5　特征点处压力时程曲线实验与 LES 模型计算值对比

Fig. 5　Comparison of pressure histories at characteristic point between experiment and LES

截取 y 轴上截面对开口管道内的流场进行分析。图 6 展示的是在 $t=35,37,39$ ms 时刻开口管道内的气体速度矢量以及流场情况。其中图 6(a)所示为管道内的速度矢量图，为了更好观察管道内流场变化，将图 6(a)中的速度矢量通过 $u=\sqrt{u_x^2+u_y^2}$ 计算得到图 6(b)。

可以清楚的看到当 $t=35$ ms 时火焰锋面前部有较强的引导气流绕过障碍物向 x 轴正向流动，同时对火焰锋面有法向的挤压作用，以致火焰锋面向上移动并发生锐角化变形。在 $t=37$ ms 时可以发现由于引导气流作用下火焰锋面通过障碍物通道时，障碍物后方形成回流气流向 x 轴负方向翻越障碍物，与引导气流形成对流，因此在障碍物台阶上方形成小涡团，对火焰锋面形成挤压与拉伸，并导致“诱导褶皱”的形成。同时这个小涡团使障碍物上方空间内产生较大的速度梯度，从而促使预混火焰锋面在翻越障碍物时，满足 Kelvin-Helmholtz 不稳定的条件导致火焰锋面失稳引发湍流。同时火焰锋面的向右传播和火焰气泡膨胀的作用下，高温低密度的燃烧产物流以火焰的传播速度流入低温高密度的未燃气体，使火焰锋面上形成了特定的密度梯度，同时在火焰锋面与障碍物壁面之间的引导气流的挤压作用下，出现如图 2 中火焰锋面的小幅振动，引起 Rayleigh-Taylor 不稳定现象。其流场结构如图 4 所示，由于 2

个同向的涡流之间的挤压,再加上火焰锋面的切向移动速度,致使“诱导褶皱”的产生。而在 2 个涡流作用的同时,使障碍物后方的火焰锋面上产生足够大的速度与密度梯度,以致 Rayleigh-Taylor 不稳定和 Kelvin-Helmholtz 不稳定的耦合作用,使预混火焰锋面失稳,失稳火焰锋面的扰动随时间逐渐增大,火焰锋面与未燃气体快速卷吸,促使涡流形成,直至涡流破碎形成湍流。

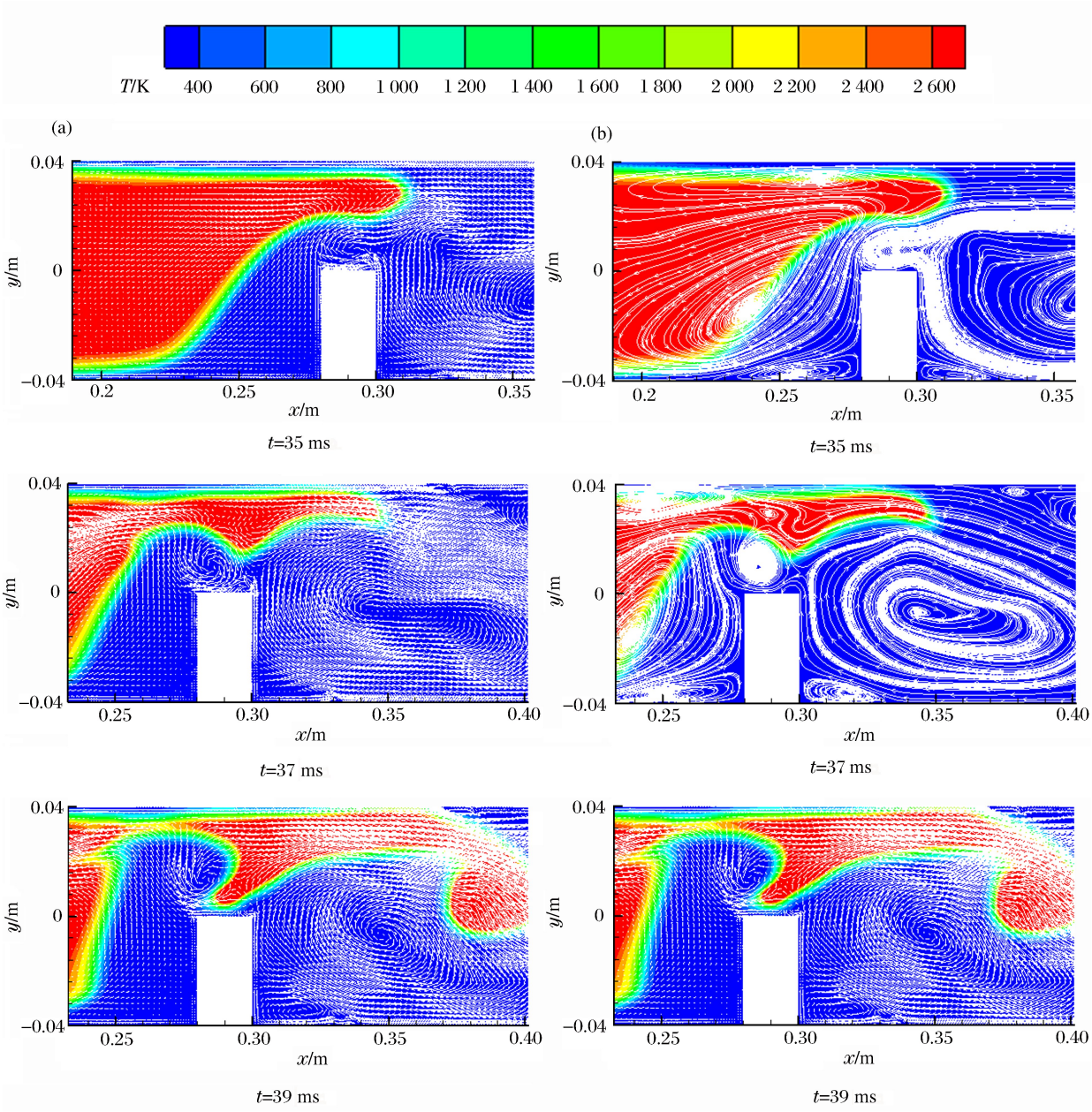

图 6 预混火焰翻越障碍物过程中管道内的速度矢量及流场变化图

Fig. 6 Velocity vector and the flow field when premixed flame climbed over obstacle

在 LES 的计算结果中选取管道的截面上 $x=30$ cm 处的截面进行分析得到图 7。从图 7 中发现预混火焰在 z 轴方向上即火焰传播的法向方向上也会出现挤压、拉伸褶皱。可以从 $t=39$ ms 的火焰温度云图中发现火焰形态在法向方向上出现 2 道向内的折痕。其产生原因则是由于陡坡的上升气流,即前文中的提到的引导气流在 y 轴上的速度矢量对预混火焰下端锋面造成的挤压。同时由于火焰处于受限空间中,侧面壁面对火焰存在限制,以致于造成火焰在法向方向上出现褶皱变形。此现象对火焰的失稳也存在促进作用。

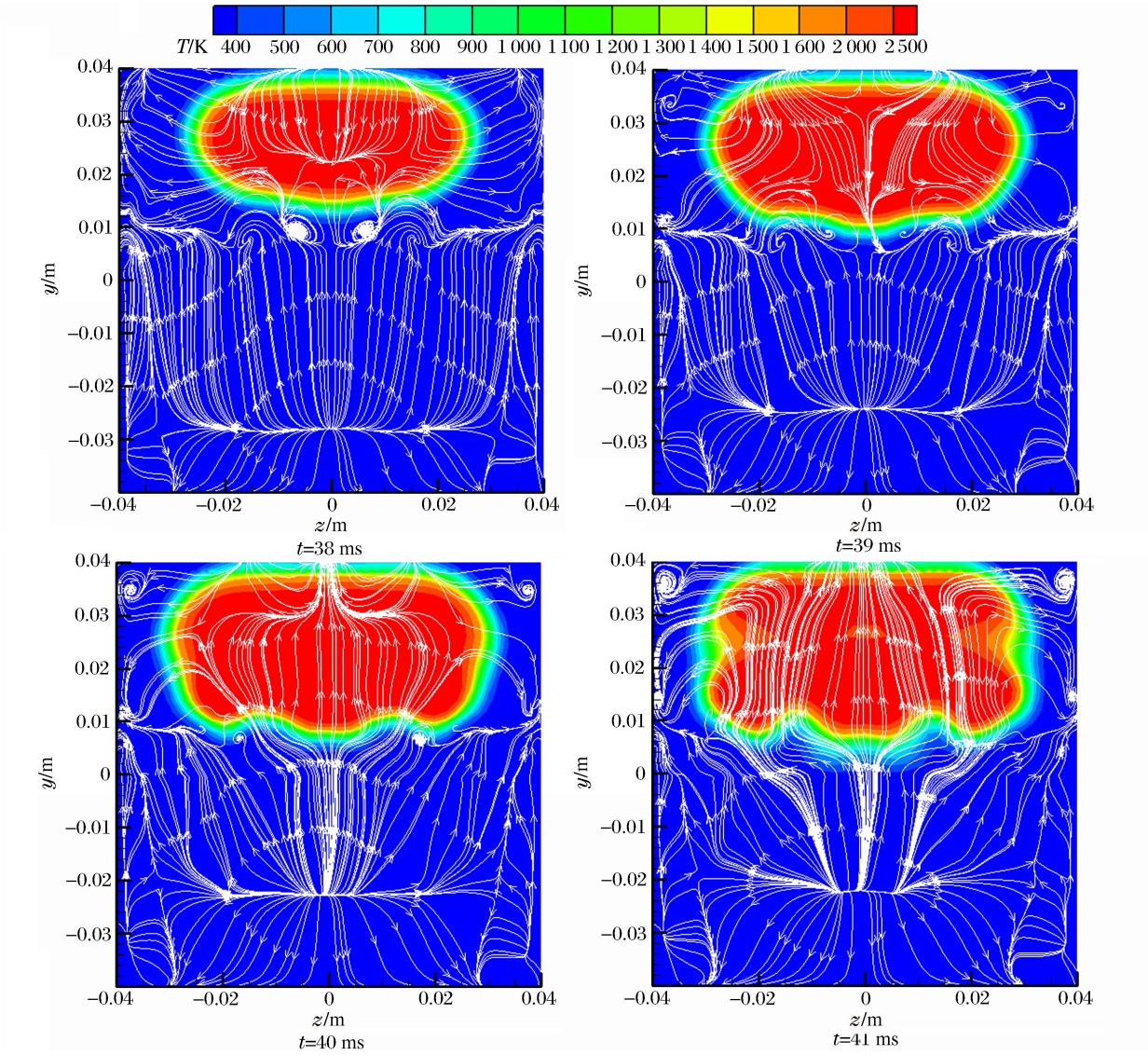

图 7　预混火焰法向截面的温度云图及流场结构

Fig. 7　Temperature contours and the flow field structure of premixed flame normal section

5　结　论

利用大涡模型的数值模对障碍物影响预混火焰的实验进行了重现，通过实验所得到的预混火焰微观结构的纹影图像及火焰传播的压力数据验证了模拟的可靠性。由大涡模型的数值模拟结果揭示了预混火焰在障碍物条件下的传播过程中发生的火焰结构变化及火焰失稳直接原因，并得到以下结论：

(1)通过大涡模拟的流场分析，在实验现象中发现“诱导褶皱”是预混火焰翻越障碍物后有规律性的火焰褶皱，而非火焰锋面随机的扰动的结果；

(2)气体预混火焰在遇障碍物后发生火焰失稳的直接原因是由障碍物引发的 3 个气流涡团同时作用而形成 Kelvin-Helmholtz 不稳定及 Rayleigh-Taylor 不稳定现象耦合作用，导致火焰的失稳变形；

(3)在障碍物引发的上升气流的拉伸、挤压影响下，预混火焰在传播的法向方向也会产生褶皱变形。

参考文献：

[1]　Ciccarelli G, Johansen C, Kellenberger M. High-speed flames and DDT in very rough-walled channels[J]. Combustion and Flame, 2013,160(1):204-211.

[2]　Chen Xianfeng, Zhang Yin, Zhang Ying. Effect of CH_4-Air ratios on gas explosion flame microstructure and propa-

gation behaviors[J]. Energies, 2012,5(10):4132-4146.
[3] Sklavounos S, Rigas F. Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles[J]. Journal of hazardous materials, 2004,108(1):9-20.
[4] Arntzen B J. Modelling of turbulence and combustion for simulation of gas explosions in complex geometries[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1998,18(4/5/6):225-237.
[5] Sarli V D, Benedetto A D, Long E J, et al. Time-resolved particle image velocimetry of dynamic interactions between hydrogen-enriched methane/air premixed flames and toroidal vortex structures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37(21):16201-16213.
[6] Masri A R, Ibrahim S S, Cadwallader B J. Measurements and large eddy simulation of propagating premixed flames[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2006,30(7):687-702.
[7] Gubba S R, Ibrahim S S, Malalasekera W, et al. Measurements and LES calculations of turbulent premixed flame propagation past repeated obstacles[J]. Combustion and Flame, 2011,158(12):2465-2481.
[8] Kessler D A, Gamezo V N, Oran E S. Simulations of flame acceleration and deflagration-to-detonation transitions in methane-air systems[J]. Combustion and Flame, 2010,157(11):2063-2077.
[9] Gamezo V N, Ogawa T, Oran E S. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: Effect of obstacle spacing[J]. Combustion and Flame, 2008,155(1/2):302-315.
[10] Ogawa T, Gamezo V N, Oran E S. Flame acceleration and transition to detonation in an array of square obstacles [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(2):355-362.
[11] 任少峰. 可燃性气体泄爆动力学机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
[12] Lesieur M. Large-eddy simulations of turbulence[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
[13] 肖华华. 管道中氢/空气预混火焰传播动力学实验与数值模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2013.

Large eddy simulation of impacted obstacles' effects on premixed flame's characteristics

Wang Gongzhong[1,2], Zhang Jianhua[2], Li Dengke[2], Chen Xianfeng[2]
(1. *School of Safety Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou* 451191, *Henan*, *China*;
2. *Department of Safety Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *Hubei*, *China*)

Abstract: In the process of the premixed gas flame propagation, obstacles have vital influence on the flame's structure and propagation, and will enhance the flame acceleration and the DDT process. Through the methane/air premixed flame propagation experiment with obstacles in the visual pipe, the flame microstructure changes and the propagation characteristics were captured. By means of the three-dimensional physical model, a large eddy simulation mode (LES) with the WALE sub-grid scale models, and the thickened flame model (TFM) were used to repeat experiment process. The complex changes of the flow field were obtained when the premixed flame climbed over the obstacle, and the characteristics of the flow turbulence transition were analyzed. Finally, the direct cause of the premixed flame disturbance instability under the influence of the obstacles was revealed. It was induced by the coupling effect of the Kelvin-Helmholtz instability and the Rayleigh-Taylor instability, which in turn was affected by three vortexes as a result of the obstacle.

Keywords: mechanics of explosion; thickened flame model; large eddy simulation; premixed flame; obstacles

(责任编辑 王易难)