DOI: 10.11883/bzycj-2017-0109
文章编号: 1001-1455(2018)05-1106-09

障碍物对丙烷-空气爆炸火焰加速的影响*

周 宁,王文秀,张国文,宗永迪,赵会军,袁雄军
(常州大学江苏省油气储运技术重点实验室,江苏 常州 213016)

摘要: 研究了障碍物阻塞率、障碍物间距、障碍物空间位置对丙烷-空气爆炸过程及火焰加速效应的影响。采用雷诺平均(RANS)方程和湍流火焰封闭燃烧模型计算非稳态燃烧过程,主要分析障碍物周围复杂流场特性以及湍流涡与火焰面作用的详细机理。结果表明:阻塞率在 0.5~0.7 时,障碍物间距对火焰加速效果的影响较大,其中障碍物间距为一倍管径时火焰加速效应最大;而障碍物的空间位置对火焰传播的影响更为显著,当障碍物位于管道单侧时,湍流涡强度最大,火焰褶皱最明显,火焰传播速度最快。

关键词: 火焰加速;RANS 方程;湍流涡;障碍物
中图分类号: O357.5;TE88 **国标学科代码**: 1302527 **文献标志码**: A

燃气泄漏导致的火灾和爆炸事故层出不穷,尤其当空间内存在障碍物时,爆炸产生的冲击波对周围环境会造成更严重的损坏。

有障碍物管道内火焰传播的研究有:Chapman 等[1]首先对有障碍物存在的管道内火焰传播规律进行研究,发现当火焰传播至障碍物时,火焰速度明显增大;Dobashi[2]、Masri 等[3]、Ibrahim 等[4]定性分析了不同障碍物结构对爆燃压力所产生的影响,发现平板形障碍物导致最高超压,圆柱体导致最低超压;Ciccarelli 等[5]研究了不同障碍物间距对火焰传播速度的影响,障碍物间距与阻塞率比率为 5 时,火焰速度最大。

随着流体力学和数值方法的发展和结合,数值模拟方法开始应用于受限空间的气体爆炸现象[6]。Dunn-Rankin 等[7]、Naamansen 等[8]对障碍物加速火焰传播过程进行二维模拟,发现火焰与障碍物作用后产生明显的超压现象;Gamezo 等[9]对置障管道内火焰传播过程进行二维及三维数值模拟,发现初始加速过程是由燃烧产物的扩散引起的,后期阶段的加速则是由激波与火焰相互作用引起的;Sarli 等[10]采用大涡模拟与亚格子燃烧模型,很好地预测了障碍物附近非稳态火焰的传播过程;Johansen 等[11]对三种阻塞率管道内火焰传播的三维大涡模拟进行研究,得知火焰可以加速到相对于层流火焰速度两个数量级以上的传播速度,而燃烧模式仍处于“层流预混燃烧区”和“薄反应区”。

对于湍流,通常认为大涡模拟比 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)模型计算结果更加精确,但对于高雷诺数流动、壁面湍流流动等问题,需要非常精细的网格,其巨大的计算耗费在工程上应用不切实际[12],RANS 方法的易实现性依然是解决湍流燃烧工程中最实际的方法。

本文中,使用工业上最常见的两方程模型(RNG k-ε、可实现 k-ε 以及 SST k-ω 湍流模型),对无障碍物管道内丙烷-空气预混火焰传播进行模拟,发现可实现 k-ε 模型的计算结果与实验数据最接近,认为该模型在模拟湍流燃烧流场中较为精确。鉴于此,采用可实现 k-ε 模型对不同阻塞率、不同障碍物间距、不同障碍物空间位置对丙烷-空气爆炸火焰加速的效果进行定量分析,重点分析障碍物附近的湍流涡对火焰面作用的详细机理,提供障碍物引发火焰加速现象的理论参考。

* **收稿日期**: 2017-04-05; **修回日期**: 2017-06-27
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51204026);国家重点研发计划重点专项项目(2017YFC0805100,2017YFC0806600);公安部技术研究计划项目(2016JSYJD04);建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题(KFKT2015ZD03)
第一作者: 周 宁(1977—),男,博士,副教授,zhouning@cczu.edu.cn。

1　数值模型及验证

1.1　数学模型

选用基于 C 方程的 Zimont 模型对爆燃过程进行模拟，C 为一个表征反应进程的标量，表达式为：

$$C=\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i}{\sum_{i=1}^{n}Y_{i,\mathrm{e}}} \tag{1}$$

式中：n 代表反应产物种类，Y_i 代表组分 i 的质量分数，$Y_{i,\mathrm{e}}$ 代表完全燃烧时组分 i 的质量分数。$C=0$ 时，表示反应未开始；$C=1$ 时，表示完全反应。

C 方程滤波后表达式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\widetilde{C})+\frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}u_j\widetilde{C})=\frac{\partial}{\partial t_j}\left(-\frac{\mu+\mu_{\mathrm{t}}}{(Sc)_{\mathrm{t}}}\frac{\partial\widetilde{C}}{\partial x_j}\right)+S_{\mathrm{c}} \tag{2}$$

式中：$(Sc)_{\mathrm{t}}$ 代表 Schmidt 数；S_{c} 代表反应源项，其表达式为 $S_{\mathrm{c}}=\rho_{\mathrm{u}}U_{\mathrm{t}}|\Delta c|$，其中，$\rho_{\mathrm{u}}$ 表示预混气体密度，U_{t} 代表湍流火焰速度，湍流燃烧速度采用 Zimont 等[13]提出的经验表达式：

$$U_{\mathrm{t}}=A(u')^{3/4}U_{\mathrm{l}}^{1/2}\alpha^{-1/4}l_{\mathrm{t}}^{1/4} \tag{3}$$

式中：A 为模型常数；u'为湍流脉动速度；α 为反应物分子热传输系数；l_{t} 为湍流特征尺度；U_{l} 为层流燃烧速度。

1.2　实验系统

实验装置如图 1 所示，由管道系统、配气系统、测试系统（包括压力传感器、火焰传感器）、辅助设施组成，管道壁厚 5 mm，外径 135 mm，管道由 316 型无缝不锈钢管构成，总长 12 m，内壁进行抛光处理，设计最大承受压力 6 MPa。为安全起见，在封闭管道末端有自动泄压安全阀。为确保管道密封性，在管道法兰连接处采用聚四氟垫片进行密封。丙烷-空气混合气配置浓度为 4.5%，管道初始温度约 25 ℃，点火装置采用 EPT-6 点火能量试验台，点火能量可调，最小点火能量 50 mJ，最大点火能量 1 J，实验点火能量取 1 J。

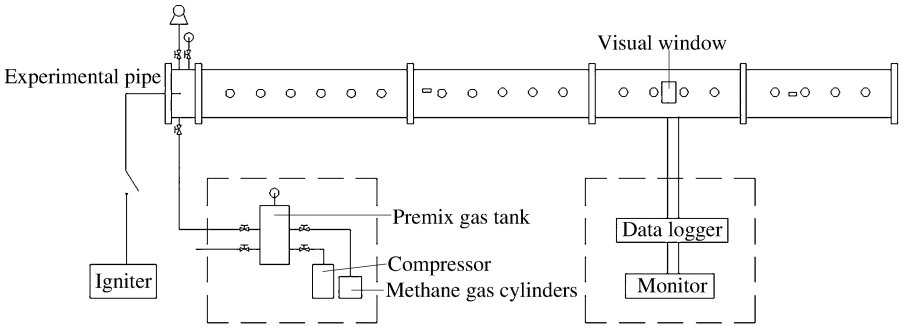


图 1　实验系统

Fig. 1　Schematic illustration of experimental setup

1.3　实验结果与计算结果对比

建立与实验系统对应的物理模型，模型壁面为无滑移、绝热边界条件，丙烷-空气在管道中混合均匀，且处于常温、常压下的静止状态。压力速度耦合采用 PISO 算法，对流项离散化采用二阶迎风格式。

分别选用 RNG k-ε、可实现 k-ε 以及 SST k-ω 湍流模型与湍流火焰封闭燃烧模型对无障碍物管道中丙烷-空气爆炸过程进行模拟，图 2 给出火焰速度实验结果与数值模拟结果的对比。实验结果的最大火焰速度为 195 m/s，可实现 k-ε 计算结果与实验测试结果最接近，且管道轴线上火焰传播速度变化趋势与实验结果基本一致，与实验结果误差的绝对值约为 7%。

图 3 为管道末端压力实验结果与三种湍流模型计算结果的对比。由于管壁边界条件设为绝热，燃烧产生的热量全部用来加热燃烧产物而不能及时扩散出去，因此可实现 k-ε 模拟结果的压力峰值略大于实验结果，压力达到峰值后下降较为缓慢。而另外两种湍流模型，RNG k-ε 和 SST k-ω 的计算结果比较接近，但均与实验数据相差较大。

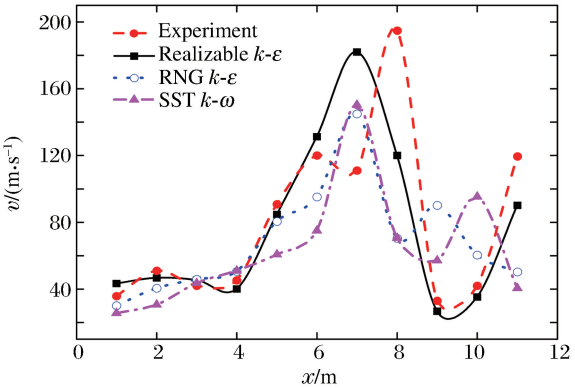


图 2 火焰速度的实验值与计算值的对比

Fig. 2 Comparison of experimental and calculated flame velocities

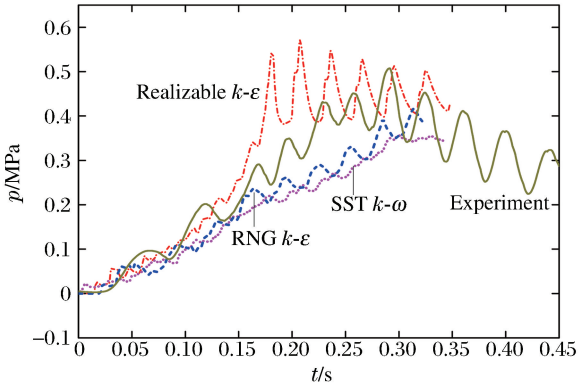


图 3 爆炸压力的实验值与计算值的对比

Fig. 3 Comparison of experimental and calculated pressures

3 种模型所得的计算结果与实验结果详细对比，见表 1。由此可见，可实现 k-ε 模型计算的爆燃压力、火焰传播速度与实验结果吻合较好，因此选用可实现 k-ε 模型。

表 1 湍流模型的计算结果与实验结果的对比

Table 1 Comparison between calculated results of turbulence models and experimental results

方法	p_m/MPa	δ_{p_m}/%	v_m/(m·s^{-1})	δ_{v_m}/%
实验	0.508	—	194.8	—
可实现 k-ε	0.565 0	11.22	182.75	6.59
RNG k-ε	0.412 7	23.09	145.00	34.3
SST k-ω	0.363 7	39.68	150.40	29.52

1.4 数值模拟方案

采用上述物理模型，从距离点火端 2.7 m 处开始布置障碍物，障碍物的数量为 5。模拟方案有 2 种：(1) 在阻塞率不变的前提下，分别选取间距为 0.075、0.15、0.3、0.45、0.6 m(即约为 0.5 倍管径、1 倍管径、2.5 倍管径、3.5 倍管径、5 倍管径)的障碍物，研究间距对火焰传播速度的影响；(2)固定障碍物间距为 0.15 m，在阻塞率不变的前提下，分别将障碍物置于管道单侧、管道两侧、管道中间，研究障碍物的空间位置对爆炸火焰的加速效果，图 4 为阻塞率 0.5 时 3 种障碍物空间位置的截面图。

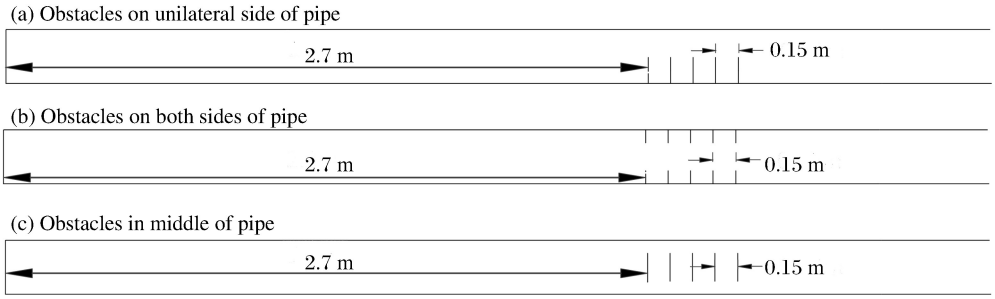


图 4 障碍物空间位置-管道截面图

Fig. 4 Schematic diagram of cross section of pipeline and obstacles spatial positions

2　模拟结果与分析

2.1　阻塞率与障碍物间距对火焰传播特性的影响

图 5 给出 7 种阻塞率下不同障碍物间距对火焰平均加速度的影响，纵坐标的火焰平均加速度是指火焰速度为零至达到峰值这个过程中的平均加速度。显然，火焰平均加速度随着阻塞率的增加呈先增大后减小的趋势。阻塞率小于 0.7 时，火焰平均加速度随阻塞率的增大而增大，障碍物对火焰的激励作用显著；阻塞率大于 0.7 时，火焰平均加速度急剧下降，可认为阻塞率超过一定值后由于障碍物对火焰的阻挡作用较强，火焰难以穿越障碍物，甚至发生淬火，火焰从淬火到复燃所需时间过长，加速度减小。另外，不同阻塞率下的火焰平均加速度随着障碍物间距变化的程度各不相同：障碍物阻塞率较小(0.3)时，各间距下的火焰平均加速度均在 5 000～6 000 m^2/s 之间，障碍物间距对火焰加速影响不大；而对于较高的阻塞率(0.5～0.7)，间距对火焰加速的影响比较明显，其中阻塞率为 0.6 时，障碍物间距为 5 倍管径下的火焰平均加速度为 9 800 m^2/s，间距为一倍管径时的平均加速度达到约 13 000 m^2/s 左右，差别最大；但当阻塞率大于 0.7 时，间距对火焰平均加速度的影响程度有明显减小的趋势。由图 5 中还可以观察到，当障碍物间距为一倍管径时所有阻塞率下的火焰平均加速度最大，意味着火焰加速效果最好。

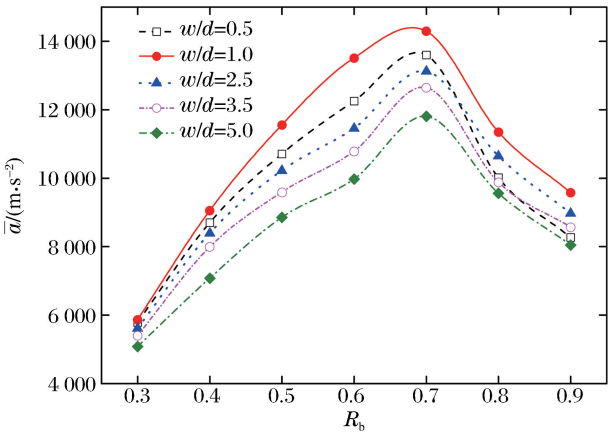


图 5　不同障碍物间距下的火焰平均加速度

Fig. 5　Average flame acceleration under different obstacles spacing

2.2　障碍物空间位置对火焰加速效果的影响

图 6 是阻塞率为 0.5 时 3 种障碍物空间位置下的火焰发展示意图，时间范围为 39～47 ms。不难看出，障碍物位于管道单侧时对火焰的阻挡作用最弱。障碍物位于管道中间时，火焰传播的通道直径仅是障碍物在管道单侧时通道直径的一半，当火焰进入两侧狭小通道，与通道的接触面积增加，由于壁面与火焰的相互作用导致火焰部分熄灭[14-16]，因此通道直径越小，火焰中自由基碰到管壁消亡的机会越

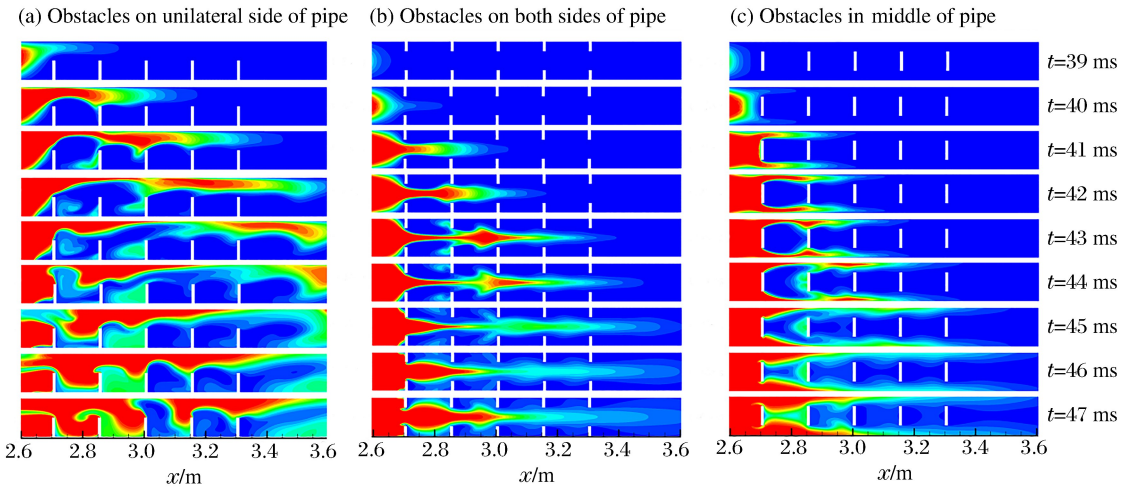


图 6　阻塞率为 0.5 时障碍物空间位置对火焰传播的影响

Fig. 6　Influence of obstacles spatial position on flame propagation when blocking rate is 0.5

多;障碍物位于管道两侧时,当通道截面面积突然扩大,混合气体的气流速度迅速减小,增加了反应时间,火焰开始膨胀,接触到障碍物的火焰熄灭,在经历了周期性的收缩流与膨胀流之后,火焰在传播过程中会损失一部分热量。

图 7~8 是阻塞率分别为 0.3、0.5、0.7 时 3 种障碍物空间位置下的火焰传播速度及火焰到达各测点的时间。由图 7 可以看出,障碍物位于管道单侧时火焰传播速度最大,且明显高于其他两种空间位置。而图 8 中,障碍物位于管道单侧时火焰传播至各测点的时间最短,特别是阻塞率为 0.5 时,火焰传播至管道末端用时约 95 ms,是其他两种空间位置下火焰传播用时的一半。

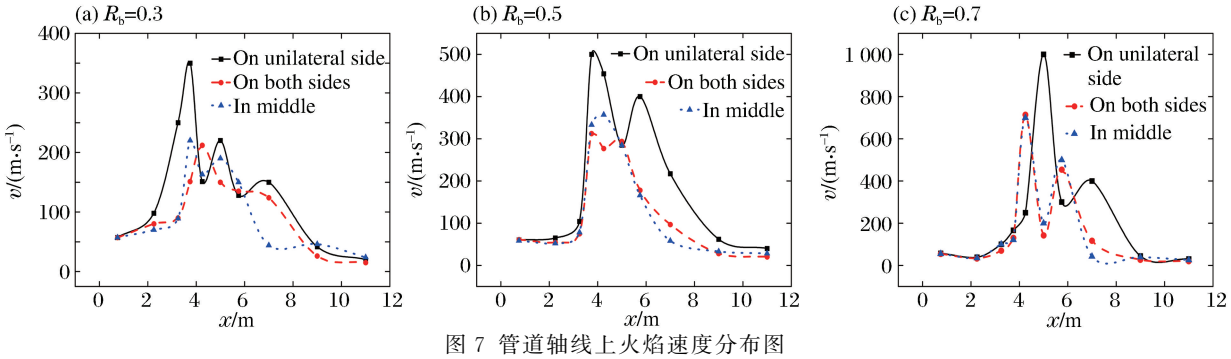


图 7 管道轴线上火焰速度分布图

Fig. 7 Distribution of flame velocity on axis of pipeline

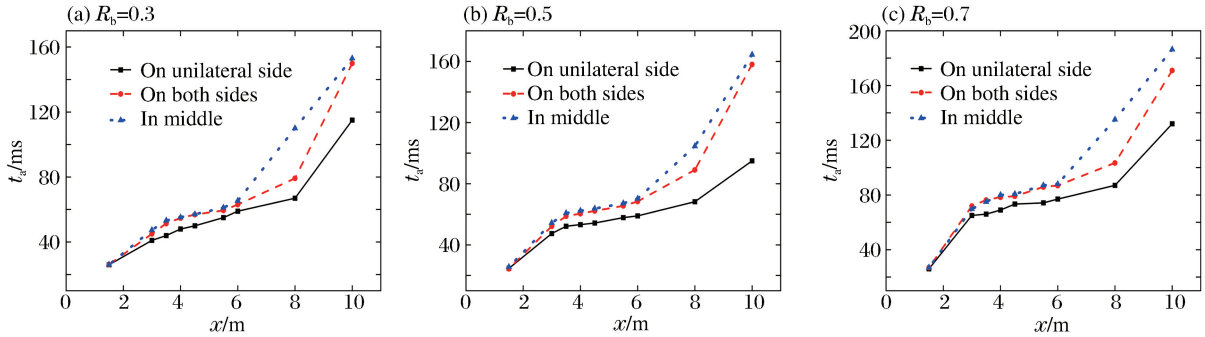


图 8 火焰到达各测点的时间

Fig. 8 Times at which flame reaches monitor points

2.3 障碍物对管道内流场的影响分析

提高火焰传播速度最普遍的方法就是在空间中放置障碍物,火焰推动未燃气体流动时遇到障碍物阻挡使气流方向发生改变[17]。最终形成以障碍物为边界有规则的流体质点,即湍流涡结构,涡量集中的区域具有高强度湍动能[18];随着火焰传播以及压缩波的推动,高温气团使流场中气流黏性系数提高,涡团规模将持续扩大。涡团的形成使火焰锋面两侧形成速度方向相反的剪切层[17,19],涡团中的未燃气体与火焰锋面附近的未燃气体被分隔开,因此火焰传播时不会立即穿透涡团,使得火焰锋面上下两侧形成较大尺度的速度梯度和密度梯度,从而促使火焰在翻越障碍物时,Kelvin-Helmholtz 和 Rayleigh-Taylor 不稳定条件被触发,导致火焰锋面失稳,产生新的涡流,进一步影响火焰传播。图 9 是阻塞率分别为 0.3、0.5、0.7、0.9 时不同障碍物间距下火焰翻越第 1 个障碍物时的流场。结果显示,阻塞率越大湍流涡尺度越大,涡团的扰动大大加剧流场中的湍流,火焰更加不稳定,并且由于障碍物的阻挡导致局部压力快速上升,这时 Richtmyer-Meshkov 不稳定性也会影响火焰结构,压力波与火焰的相互作用,使湍流动能进一步加剧,这就是前驱冲击波对未燃气体压缩和加热作用的正反馈机制,因此阻塞率的增大在一定程度上加速了火焰传播。但阻塞率大于一定程度时,火焰的传播也会受到障碍物的严重阻碍,穿过障碍物的少量热燃烧产物没有得到能量的补充,无法及时点燃未燃气体,可能导致燃烧过程中的局部淬火,有效能量释放率大大降低。因此存在一个合适的障碍物尺度,使火焰加速机制最强,能量释放率达到最高。在本研究工况下,阻塞率为 0.7 时,正反馈效应最大。

图 9 中，障碍物间距大约为 1 倍管径时，流线最密集，涡量集中区恰好“填满”障碍物之间的体积，因此火焰不会过早的进入涡流区并与之相互作用。阻塞率较高时，涡团的规模较大，湍流强度的进一步增加可能导致湍流涡向反应区输运未燃气速度太快，燃料氧化不充分使得火焰淬火，化学反应速率降低；当障碍物间距逐渐加大，流线随着间距的扩大越来越稀疏，涡量集中区在障碍物间距中所占的比例也越来越小，火焰锋面提前进入涡流区，从而加剧了湍流，使部分火焰来不及燃烧，产生火焰“跳跃”现象；当间距增大到一定程度，涡团的尺度远小于障碍物间距，火焰将有可能接触到管壁，与管壁接触的部分火焰熄灭使它表面积减小，不利于火焰加速；另外，障碍物间距过小，涡团虽“填满”了障碍物之间的空隙，但涡团尺度小，湍流强度低，并没有对火焰起到很好的激励作用。阻塞率较低如 0.3 时，图 5 中不同障碍物间距下的火焰加速度相差不大，可认为不同障碍物间距中形成湍流涡尺度均较小，涡流对火焰激励作用较弱，火焰阵面在传播过程中不断与涡流进行相互作用，湍动能增加，增大的火焰面与接触壁面熄灭的火焰面积相抵消。当阻塞率增大到一定程度如 0.9 时，涡量集中区域在不同障碍物间距内所占比例均较大，并且进入涡团的火焰因氧化不充分快速熄灭，因此火焰与管壁接触的概率很小。由此可见，只有当阻塞率在一定范围内，障碍物间距才影响火焰的加速效果。

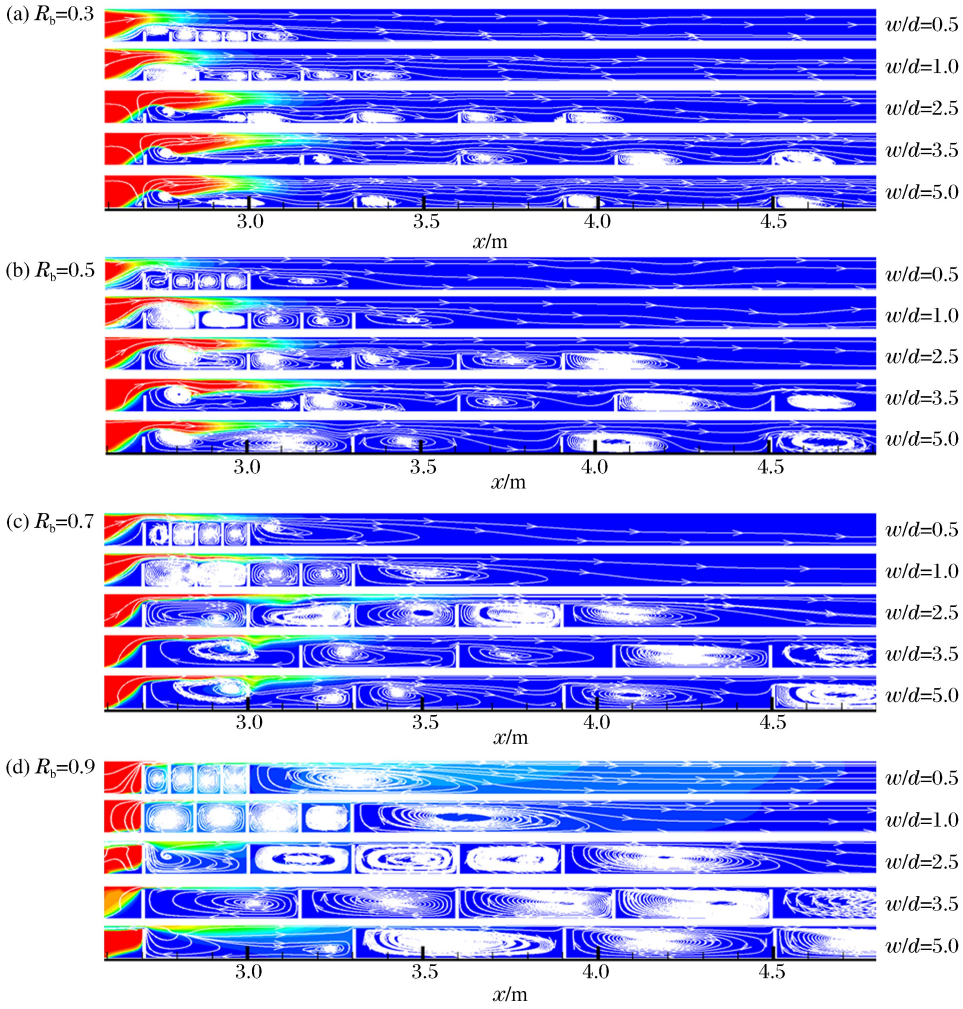


图 9　障碍物不同间距下火焰翻越障碍物时的流场

Fig. 9　Flow field when flame crosses obstacles at different obstacle spacings

以障碍物间距为 1 倍管径为例，分析空间位置对火焰加速的影响。图 10 是阻塞率为 0.5 时障碍物不同空间位置下火焰翻越障碍物的流场。障碍物位于管道中间时，火焰在障碍物两侧形成对称的火焰面，火焰传播的通道直径小，火焰中自由基碰到管壁消亡的机会也越多；同时在障碍物后方形成两个旋

转方向相反的反向涡对，由于初始涡对尺度小、强度低，火焰在与涡团相互作用中没有发生明显的不稳定现象，因此火焰传播速度较低。当障碍物位于管道两侧时，由前面分析可知，火焰在经历周期性的收缩流与膨胀流之后，会损失一部分热量；并且每侧障碍物空隙中形成对称涡旋，与障碍物位于管道中间时的情况类似。而障碍物位于管道单侧时，湍流涡规模最大，火焰在短时间内不会进入涡团内部，随着化学反应进行，火焰锋面前后的速度梯度和燃烧释放形成的压力波促进涡团规模持续扩大，以致 Kelvin-Helmholtz 不稳定和 Rayleigh-Taylor 不稳定的耦合作用较强，最终使火焰产生较大尺度的褶皱；失稳火焰与未燃气体的快速反应又产生新的涡流，进一步提高了预混气团的输运速率，热量从高温区快速转移到低温区，火焰不断加速。

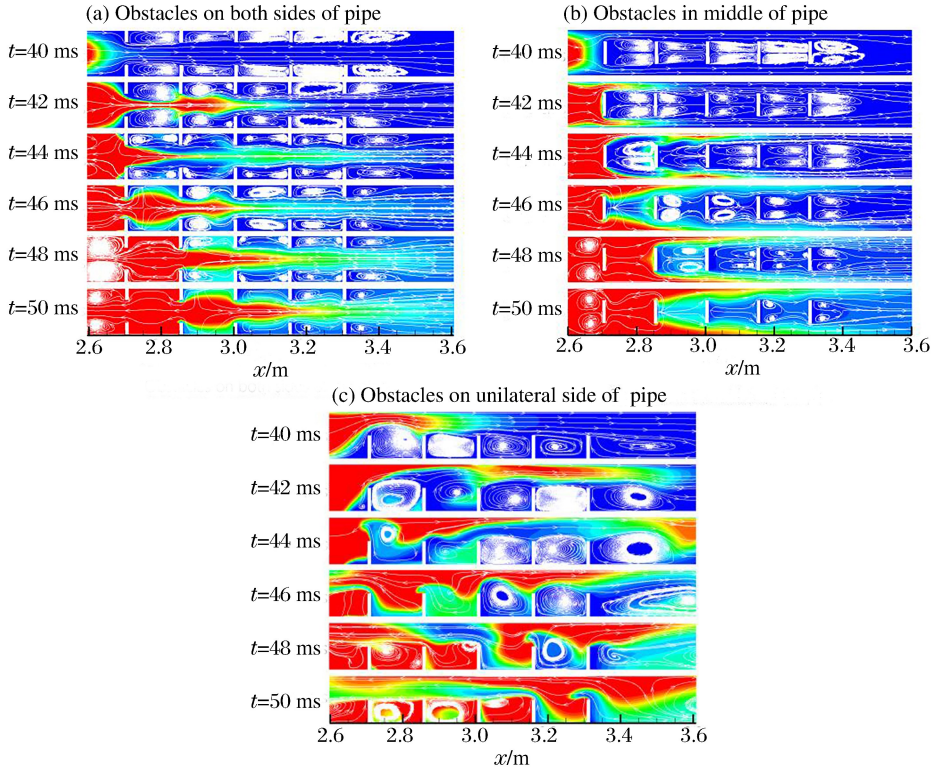


图 10 火焰翻越不同空间位置障碍物时的流场

Fig. 10 Vector velocity field when flame crosses over obstacles at different spatial positions

3 结 论

(1)障碍物对火焰传播的激励作用显著，但随着阻塞率的增加，激励作用呈现先增大后减小的趋势。阻塞率为 0.7 时，火焰加速效果最佳，能量释放率最高；阻塞率大于 0.7 时，障碍物对火焰的阻挡作用较强，导致燃烧过程中局部淬火，有效能量释放率大大降低，不利于火焰加速。

(2)阻塞率在 0.5～0.7 之间，障碍物间距才影响火焰的加速效果。阻塞率较低时，障碍物间距对火焰加速影响较小；阻塞率较高时，障碍物间距对火焰加速影响较大，若涡团的尺度小于障碍物间距，火焰因氧化不充分和与管壁接触而部分熄灭，不利于燃烧反应进行，当障碍物间距为一倍管径，涡团恰好“填满”障碍物的空隙，火焰不会过早进入涡流区，此时火焰加速最快；当阻塞率增大到一定程度，涡团在不同障碍物间距内所占比例均较大，火焰与管壁接触的概率很小。阻塞率为 0.7 时，障碍物间距为一倍管径下的火焰加速度峰值为 14 000 m/s^2。

(3)障碍物的空间位置对火焰加速的影响非常显著。阻塞率相同时，当障碍物位于管道单侧，火焰失稳现象明显，火焰传播速度最高；当障碍物位于管道中间和管道两侧，对火焰的激励作用较弱，火焰面没有明显褶皱，火焰传播较慢。

参考文献：

[1] CHAPMAN W R, WHEELER R V. VI. —The propagation of flame in mixtures of methane and air. Part V. The movement of the medium in which the flame travels[J]. Journal of the Chemical Society (Resumed), 1927:38-46.

[2] DOBASHI R. Experimental study on gas explosion behavior in enclosure[J]. Journal of Loss Prevention in the Progress Industries, 1997,10(2):83-89.

[3] MASRI A R, IBRAHIM S S, NEHZAT N, et al. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000,21(1):109-116.

[4] 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(3):213-221.

[5] CICCARELLI G, FOWLER C J, BARDON M. Effect of obstacle size and spacing on the initial stage of flame acceleration in a rough tube[J]. Shock Waves, 2005,14(3):161-166.

[6] CATLIN C A, FAIRWEATHER M, IBRAIIM S S. Predictions of turbulent, premixed flame propagation in explosion tubes[J]. Combustion and Flame, 1995,102(1):115-128.

[7] DUNN-RANKIN D, MCCANN M A. Overpressures from nondetonating, baffle-accelerated turbulent flames in tubes[J]. Combustion and Flame, 2000,120(4):504-514.

[8] 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(3):189-197.

[9] GAMEZO V N, OGAWA T, ORAN E S. Numerical simulations of flame propagation and DDT in obstructed channels filled with hydrogen-air mixture[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007,31(2):2463-2471.

[10] SARLI V D, BENEDETTO A D, RUSSO G. Sub-grid scale combustion models for large eddy simulation of unsteady premixed flame propagation around obstacles[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,180(1):71-78.

[11] JOHANSEN C, CICCARELLI G. Modeling the initial flame acceleration in an obstructed channel using large eddy simulation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(4):571-585.

[12] 孙明波，汪洪波，梁剑寒. 复杂湍流流动的混合 RANS/LES 方法研究[J]. 航空计算技术，2011,41(1):24-28.
SUN Mingbo, WANG Hongbo, LIANG Jianhan. Evaluation of hybrid RANS/LES method for complex turbulent flow simulations[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011,41(1):24-28.

[13] ZIMONT V L, BATTAGLIA V. Joint RANS/LES approach to premixed flame modeling in the context of the TFC combustion model[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2006,77(1):305-331.

[14] 陈鹏，李艳超，黄福军，等. 方孔障碍物对瓦斯火焰传播影响的实验与大涡模拟[J]. 爆炸与冲击，2017,37(1):21-26.
CHEN Peng, LI Yanchao, HUANG Fujun, et al. LES approach to premixed methane/air flame propagation in the closed duct with a square-hole obstacle[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(1):21-26.

[15] SHEN Xiaobo, HE Xuechao, SUN Jinhua. A comparative study on premixed hydrogen-air and propane-air flame propagations with tulip distortion in a closed duct[J]. Fuel, 2015,161:248-253.

[16] LV Xianshu, ZHENG Ligang, ZHANG Yugui. Combined effects of obstacle position and equivalence ratio on overpressure of premixed hydrogen-air explosion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016,41(39):17740-17749.

[17] 王公忠，张建华，李登科，等. 障碍物对预混火焰特性影响的大涡数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2017,37(1):68-76.
WANG Gongzhong, ZHANG Jianhua, LI Dengke, et al. Large eddy simulation of impacted obstacle's effects on premixed flame's characteristics[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(1):68-76.

[18] 张欣，王涛，侯效森，等. 低热值气体发动机涡团与火焰面相互作用[J]. 内燃机学报，2016,34(6):537-542.
ZHANG Xin, WANG Tao, HOU Xiaosen, et al. Flame-vortex interaction of lower heating value gases fueled engine[J]. Transaction of CSICE, 2016,34(6):537-542.

[19] JOHANSEN C, CICCARELLI G. Modeling the initial flame acceleration in an obstructed channel using large eddy simulation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(4):571-585.

Effect of obstacles on flame acceleration of propane-air explosion

ZHOU Ning, WAND Wenxiu, ZHANG Guowen,
Zong Yongdi, ZHAO Huijun, YUAN Xiongjun
(*Jiangsu Key Laboratory of Oil-Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou* 213016, *Jiangsu, China*)

Abstract: The effects of blockage ratio, obstacles spacing and obstacles spatial position on the flame acceleration and explosion process of propane-air were studied in this paper. The unsteady combustion process was calculated by using the Reynolds averaged (RANS) equation and turbulent flame closure combustion model. The complex flow field around obstacles and the detailed mechanism of the interaction between the turbulent vortex and the flame surface were analyzed. The results showed that if the vortex zone is short compared to obstacles spacing, one portion of the flame would get in touch with the tube wall and some flame area would be reduced. For the higher blockage ratio, the flame area is the most important factor affecting the flame acceleration and the optimum flame acceleration can be achieved at the obstacles spacing of roughly one tube diameter. In contrast, the obstacles spacing shows little effect on the flame acceleration at lower value of blockage ratio. The flame interacted with vortex steadily during the process of flame propagation result in flame area enhancement that was counteracted by flame area extinction resulting from flame-wall interactions. However, as the blockage ratio increases to a critical value, the vorticity concentration area occupied most of the space between obstacles, therefore, the probability of contact between the flame and the tube wall became very small. In addition, the influence of the spatial position of the obstacles on the flame propagation was more significant. When the obstacles located on both sides of the pipe or in the middle of the pipe, the initial vortex intensity was too small to consume easily and there was no obvious flame folding. The most rapid flame propagation was observed when the obstacles was located on the unilateral side of the pipe, the turbulence vortex intensity in the flow field was the largest, the flame folding was also the most obvious with the process of chemical reaction.

Keywords: flame acceleration; Reynolds averaged Navier-Stokes equation; turbulence vortex; obstacle

(责任编辑 丁 峰)