

预混燃烧中火焰长度的变化规律研究*

徐琼辉, 詹杰民

(中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 通过采用不同的组合模型进行湍流燃烧数值模拟的研究, 筛选出能与实验结果相吻合的模型, 给出了适合该模型系统的网格密度。探讨预混燃烧中火焰长度的影响因素, 结果表明: 要控制火焰长度应全面考虑空气消耗系数的影响。

关键词: 湍流燃烧; 网格密度; 火焰长度

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 05-0037-07

湍流燃烧过程中伴随着剧烈的化学反应, 湍流量随时间和空间的变化十分迅速, 气相燃烧过程中平均化学反应速率同时受到湍流流动、分子输运和化学动力学三个方面的影响。按快速反应的观点, 反应速率大大超过燃料和氧化剂之间混合的速率, 假设同一时刻在同一地点燃料和氧化剂不能共存, 但是实验取样分析得到的结果却与之相反^[1]。造成二者差异的原因在于瞬时值和平均值的不同, 快速反应关注瞬时值, 取样分析得到的却是平均值。网格的大小有如实验中取样的多少, 网格越密则取样空间越小, 更能精确地反应当时当地的真实情况; 网格太粗则让平均值与瞬时值之间的差异加大。

近年来, 计算机水平的不断提高推动着数值方向向前发展, 然而数值模拟的可靠性一直是人们关注的焦点, 网格对数值结果可信度的影响越来越受到大家的重视, 人们在这方面做了大量的工作。例如文献[2]用网格收敛指标系统地指出了网格细化效果的一种统一的度量方法, 网格密度会影响用 Euler 方程计算 M_0 机翼的人工耗散和计算结果, 也会影响薄层 Navier-Stokes 方程计算解的精度和可靠性^[3]。网格对湍流燃烧计算结果的影响是本文所关注的内容, 其结果也从侧面反映了用 Fluent 做湍流燃烧数值研究的可靠性。

在前面工作的基础上, 本文还探讨了预混燃烧中火焰长度的影响因素, 如气流速度、喷口尺寸、空气消耗系数等。

1 数学模型和方法

本文研究选用标准 K- ϵ 双方程湍流模型, 通用

的有限速率化学反应模型, 数值方法选用 SIMPLE 算法和二阶迎风格式^[4], 非稳态计算。

通用的有限速率模型同时考虑了化学组分的混合、输运和反应等问题^[5], 应用范围非常广泛, 包括预混、部分预混和非预混燃烧。反应速率以源项形式出现在组分输运方程中^[6], 计算反应速率的方法有: 从 Arrhenius 速率表达式计算, 从 Magnussen 和 Hjertager 的涡耗散 (Eddy-Dissipation) 模型计算或者从涡耗散概念 (EDC) 模型计算^[7-8]。其中的涡耗散模型认为反应速率由湍流控制, 每个反应有同样的湍流速率, 主要用于单步或双步反应; 还可以避开代价高昂的 Arrhenius 化学动力学计算。本文选用的燃气甲烷分子中只含有一个碳原子, 忽略燃烧中间产物, 因此涡耗散模型比较适合。

涡耗散模型是旋涡破碎模型 (Eddy break up) 在湍流扩散火焰中的延伸^[9]。模型认为在湍流燃烧区域充满了已燃气团和未燃气团, 化学反应在这两种气团的交界面上发生, 平均化学反应率取决于未燃气团在湍流作用下破碎成更小气团的速率, 且破碎速率与湍流脉动动能的衰变速率成正比。旋涡破碎模型给出的计算二维边界层问题湍流燃烧速率的公式为

$$\bar{R}_{fu,T} = -C_{EBU}\bar{\rho}m_{fu}\left|\frac{\partial u}{\partial y}\right| \quad (1)$$

式中常数通常取为 0.35 ~ 0.4; R 为燃烧速率, m_{fu} 是燃料的质量分数, ρ 是密度, u 为速度。

在涡耗散模型中, 反应 r 中物质 i 的产生速率 $R_{i,r}$ 由下面两个表达式中较小的一个给出:

* 收稿日期: 2007-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40476012)

作者简介: 徐琼辉 (1978 年生), 女, 博士研究生; 通讯联系人: 詹杰民: E-mail: stszjm@mail.sysu.edu.cn

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{\omega,R}} \right) \quad (2)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{\omega,j}} \quad (3)$$

式中 Y_p 是产物 P 的质量分数, Y_R 是反应物 r 的质量分数, A 和 B 是经验常数, 分别等于 4.0 和 0.5。

涡耗散模型的整体反应速率由湍流混合控制。在非预混火焰中, 燃料和氧化剂通过对流和混合慢慢的进入反应区, 并在反应区内快速燃烧。通常认为这种燃烧是受混合速率限制的, 因此复杂的、不为人所知的化学动力学速率可以安全的忽略掉。

2 湍流燃烧数值计算的可靠性研究

本文计算所用的是商业软件, 在流体力学数值模拟方面功能强大, 已经得到大家的广泛认可, 但如今湍流模型和数值方法的发展仍存在诸多缺陷, 因而在其基础上开发的商业软件也存在局限性。为了保证研究能真实反映事实的原貌, 本文先验证了该软件在湍流燃烧数值计算方面的可靠性。

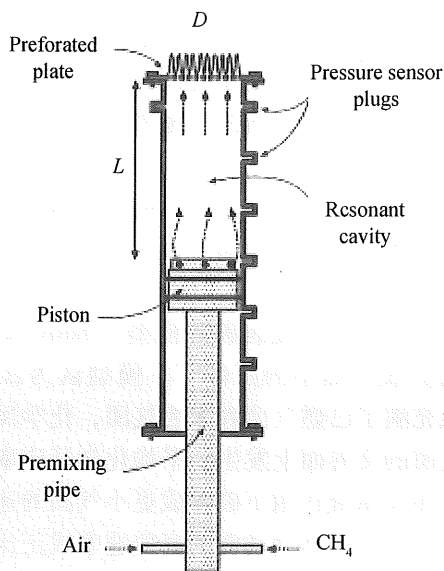


图1 多孔板燃烧器结构图

Fig. 1 Burner geometry for perforated plate

文献 [10 - 11] 用实验方法研究多孔板位置固定时预混火焰的不稳定性, 实验装置如图 1 所示。实验中, 燃气穿过直径为 22 mm, 厚度 3 mm, 钻有 37 个孔的多孔板后开始燃烧, 作者测量了孔板以上 0.007 m 处中心孔的速度分布曲线。本文按照文献 [6 - 7] 的实验装置在 FLUENT 里面建立了完全相同的物理模型, 并根据实验条件确定了相应的边界条件和初始条件, 计算结果和实验结果的

比较如图 2 所示。

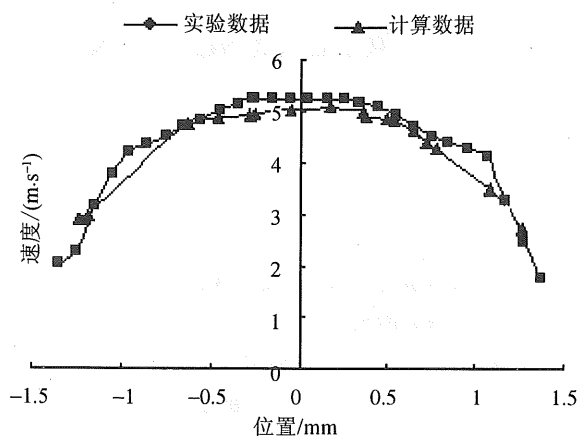


图2 实验数据与计算数据比较曲线

Fig. 2 Comparison of experimental data and calculation data

从图 2 可以看到, 计算曲线和实验曲线的趋势基本吻合, 只是数值上有些差异, 最大误差小于 10%, 基本满足工程应用的要求。由此说明选取该软件中的标准 $K-\varepsilon$ 双方程模型和涡耗散模型做湍流燃烧模拟, 其结果与客观事实相符, 能够反映事物的基本规律, 因此可以把他作为研究湍流燃烧现象的一种有效手段, 利用其得到的研究结果真实可靠。用数值模拟解决湍流燃烧问题, 与实验相比具有成本低、效率高等特点, 且实验中难以测量的数据用数值模拟的方法很容易解决。

计算结果和实验结果之间的差别无法避免, 原因在于:

(1) 随着计算机技术的不断发展, 数值模拟技术虽然已经日趋完善, 但以现有的水平, 数值方法和模式理论本身的局限性无法克服, 误差在所难免;

(2) 由于实验条件和实验装置等因素的影响, 实验过程中的误差也不可避免。

误差虽然无法完全消除的, 但只要在可以接受的范围之内, 仍然认为计算结果是可靠的, 在科学研究和工程应用方面有重要价值。

3 网格密度对湍流燃烧结果的影响

3.1 物理模型

取一边长为 0.1 m 的二维空间作为研究对象, 计算区域相对于周围环境是敞开的, 只在左侧有一块挡板, 温度为 300 K 的甲烷以 0.1 m/s 的速度从挡板中间大小为 0.02 m 的小孔流入并与大气中的氧气发生剧烈的化学反应, 物理模型如图 3 所示。整个计算区域采用结构化网格, 50×50 , $100 \times$

100, 200 × 200, 400 × 400 四种不同密度的网格分别用于计算。

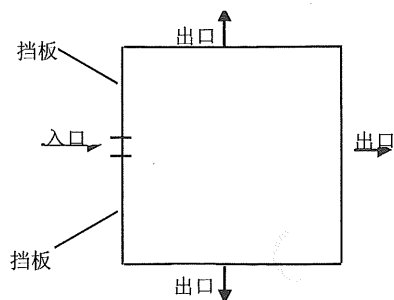


图3 用于研究网格密度影响的物理模型

Fig. 3 Physical model for studying the influence of grid density

3.2 计算结果及分析

图4显示了三种不同网格密度下,与入口垂直的中轴线上温度最高点随时间的变化规律,图5显示了中轴线上甲烷完全燃烧的点随时间变化情况,图6显示了中轴线上反应速率最大的点随时间变化情况。

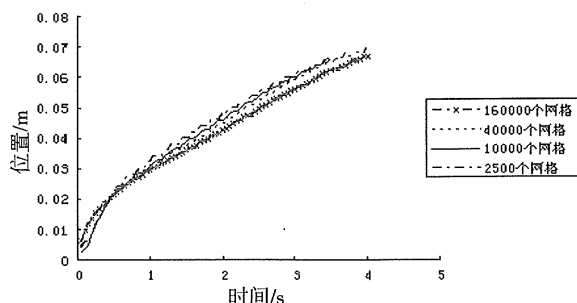


图4 中轴线上温度最高点随时间变化曲线

Fig. 4 Positions of highest point for temperature changing with time on central axis

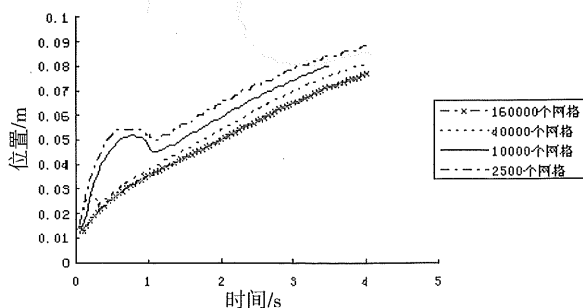


图5 中轴线上甲烷浓度变化最大点随时间变化曲线

Fig. 5 Positions of largest point for methane concentration variety changing with time on central axis

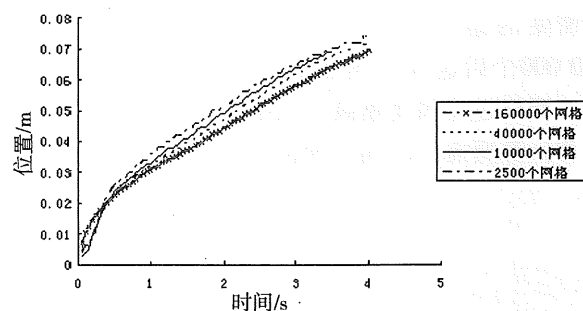


图6 中轴线上燃烧速率最大的点随时间变化曲线

Fig. 6 Positions of highest point for combustion rate changing with time on central axis

从图4-6的一系列曲线可以得出以下结论:

(1) 采用不同密度网格的计算结果基本吻合,说明了数值模拟结果的可重复性,也证明了用标准K- ϵ 双方程模型、涡耗散模型和数值计算方法的组合做湍流燃烧模拟时具有相当的稳定性,不会因为网格的疏密变化而使计算结果产生很大的偏差。

(2) 比较不同网格密度下的计算曲线,发现不论是温度,还是甲烷浓度和燃烧速率,2,500个网格计算得到的曲线一直是曲曲折折,波浪式前进,而加密到10,000个网格后曲线则平滑得多,波浪起伏的振幅明显减小,再加密到40,000和160,000个网格时则变成一条光滑的曲线。为什么网格密度不同会在细节上造成如此大的差别呢?因为数值计算是以网格作为最小的计算单位,而网格内的参数是以网格平均值为基准,网格内存在化学反应的这段时间内,整个网格的参数变化不大。网格尺度越大,网格中包含的物质就越多,在非预混燃烧中网格内所有物质完全反应所需要的时间就越长。由于网格是离散数值方法的基本空间单位,网格内更小尺度的物理过程无法进一步被分辨出来,波浪式曲线可以看成是误差的某种表现形式。随着网格密度的增加,这种波浪式的前进会渐渐消失。

(3) 从计算的结果分析,网格大小对湍流燃烧计算结果的另一个重要影响是时滞:燃烧达到稳定状态以后,网格密度越大,同一位置达到相同燃烧状态所需要的时间就越长。原因在于涡耗散模型认为化学反应只在已燃气团和未燃气团的交界面上发生,当交界面到达某一位置时,交界面所处的整个网格都会因为交界面的到来而开始燃烧;网格越密,计算区域内的点与交界面处于同一网格的时间会越晚,开始燃烧的时间也会比网格稀疏时推迟一些。因此,燃烧达到稳定后的计算结果会因为网格的加密而出现时滞现象。

(4) 从图5分析,在入口处甲烷的浓度受网

格密度的影响非常大, 而网格加密到 40 000 和 160 000 个后这种影响逐渐消失。从计算的精度来说, 网格越密精度越高, 但顾及到当前的计算机水平和计算所需的时间, 网格的密度是不能无限增加

的。上面的曲线说明当网格加密到 40 000 个时其计算结果已经能真切地反映事实的本质, 达到了数值模拟精度的要求。图 7 给出了网格数为 160 000 时的计算结果。

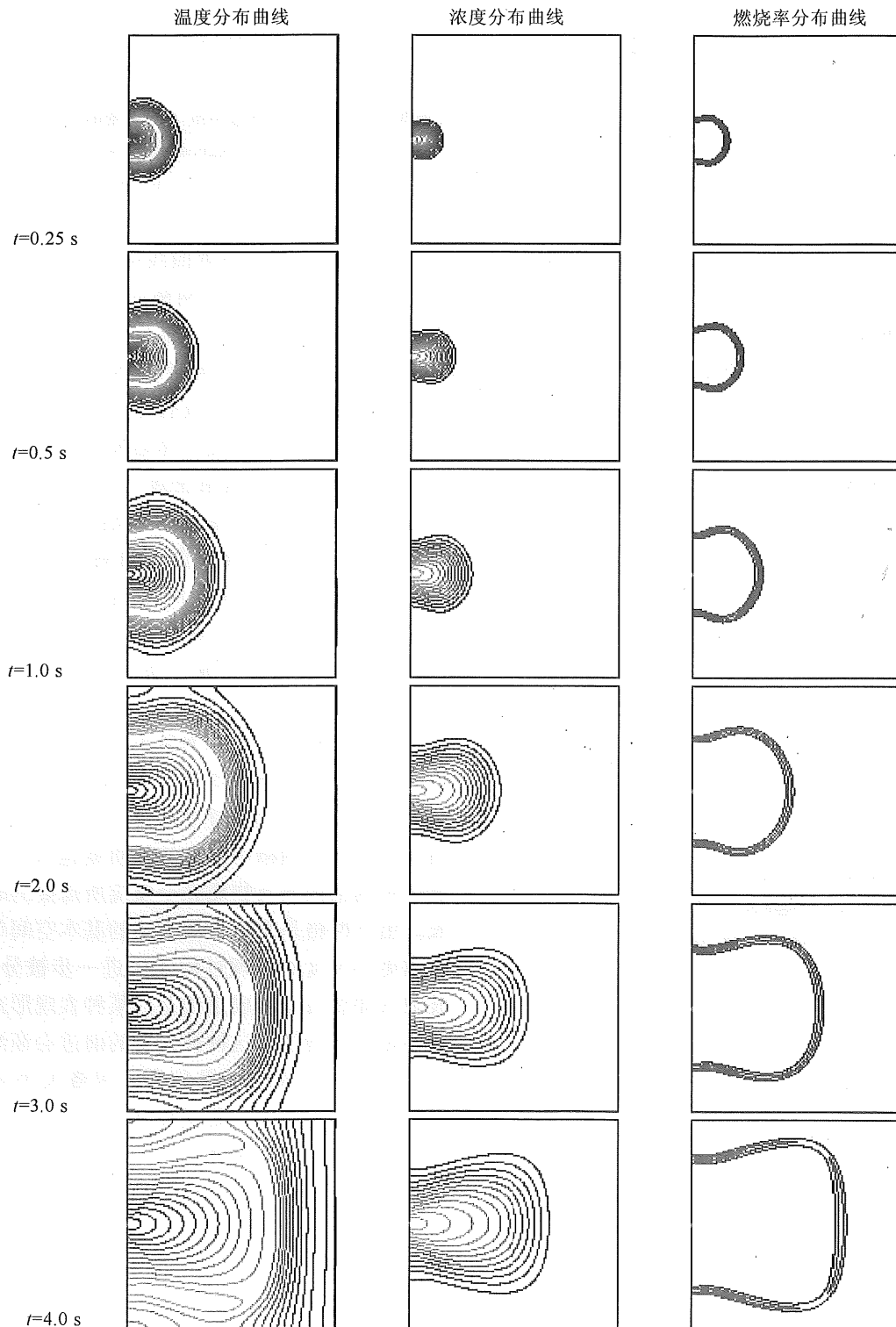


图 7 网格为 160 000 个时不同时刻的温度、甲烷浓度、燃烧速率分布图

Fig. 7 Contour maps of temperature, methane concentration, combustion rate at different time for 160 000 grids

4 预混燃烧火焰长度的研究

预混合气体火焰问题研究着火前燃料与氧化剂已均匀混合的可燃混合气中的火焰传播机理, 化学反应速度、扩散、流动、传热等在火焰传播过程中都起着重要的作用。

在燃烧过程中, 火焰的长度会随着气流速度的增加而增加, 随着燃烧传播速度的增加而减少; 当燃烧喷嘴尺寸变大时, 如果气流速度不变, 则流量必然增加, 因而火焰长度也将增加。在如图8所示

的两端开口的二维管道中, 当气流速度和喷嘴尺寸变化时, 火焰长度的变化见图9和图10。

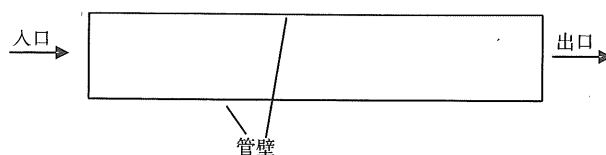


图8 火焰长度研究二维管道示意图

Fig. 8 Sketch of the 2D conduit for study on length of flame

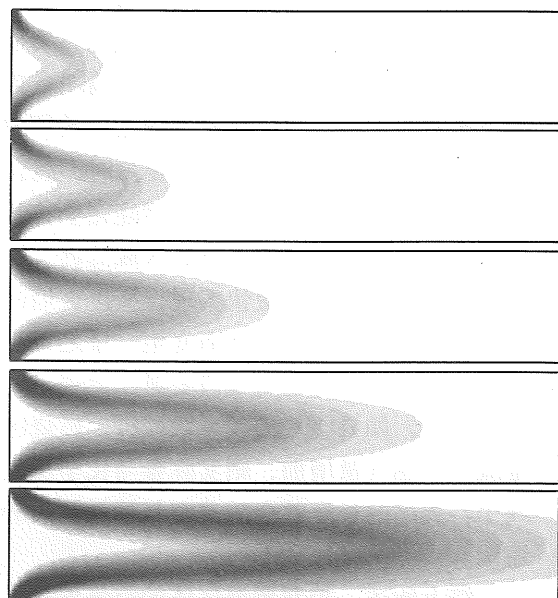


图9 气流速度影响火焰长度变化 (从上往下速度依次为 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 m/s)

Fig. 9 Length of flame changing due to the of the gas velocity

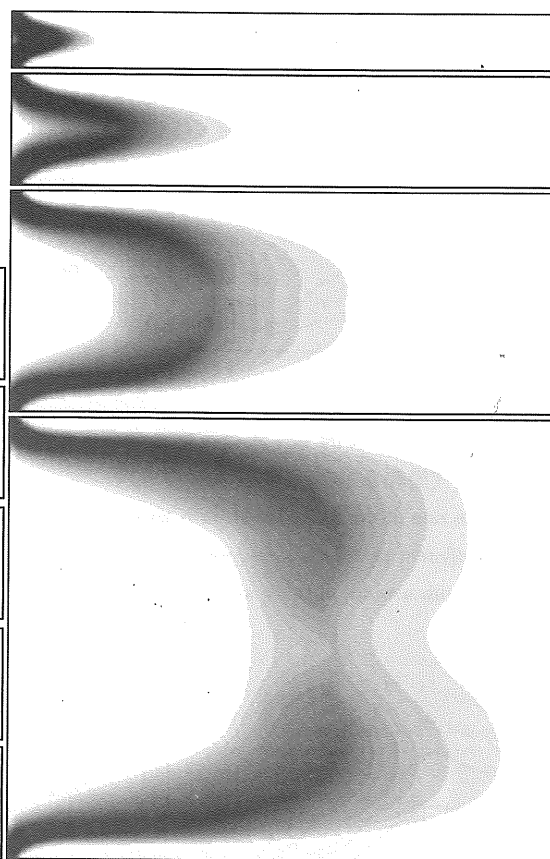


图10 喷嘴尺寸影响火焰长度变化 (从上往下喷嘴尺寸依次为 0.01, 0.02, 0.04, 0.08 m)

Fig. 10 Length of flame changing due to the influence of spouts size

火焰的长度对于燃烧设备的效率、安全运行等具有十分重要的意义, 不同的燃烧设备对火焰长度的要求也不相同。如家用燃气炉要求火焰能够短一些, 这样火力会更加集中, 提高燃烧效率; 而许多大型的燃烧设备如锅炉等, 则希望火焰能够长一些, 避免出现局部温度过高, 影响设备的安全运行。在预混燃烧中, 影响火焰长度的另一个重要因素是预混合气体的空气消耗系数:

$$n = L_n / L_0 \quad (4)$$

式中 L_0 表示理论空气需要量, L_n 表示实际空气消耗量。

在其他条件不变的情况下, 空气消耗系数的变化会对火焰长度产生不同程度的影响; 当二维管道宽度和入口燃气速度改变时, 这种影响的大小也会相应变化。图11-14给出了组合不同的管道宽度和燃气速度, 火焰长度随空气消耗系数的变化。

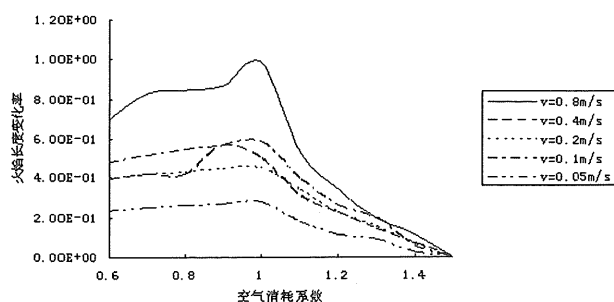


图 11 二维管道宽度 $d=0.08$ m, 入口速度改变, 火焰长度随空气消耗系数的变化率

Fig. 11 Variance rate of the flame length with air consumption coefficient at different gas velocity in 2D conduit with a width of 0.08 m

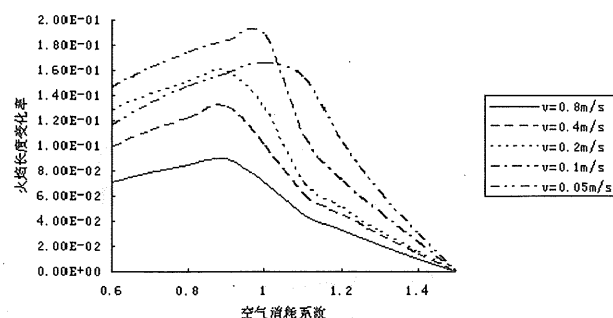


图 14 二维管道宽度 $d=0.01$ m, 入口速度改变, 火焰长度随空气消耗系数的变化率

Fig. 14 Variance rate of the flame length with air consumption coefficient at different gas velocity in 2D conduit with a width of 0.01 m

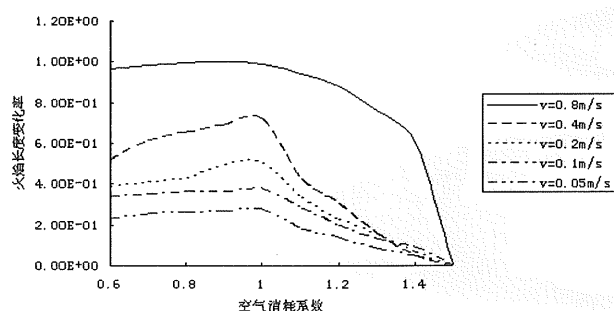


图 12 二维管道宽度 $d=0.04$ m, 入口速度改变, 火焰长度随空气消耗系数的变化率

Fig. 12 Variance rate of the flame length with air consumption coefficient at different gas velocity in 2D conduit with a width of 0.04 m

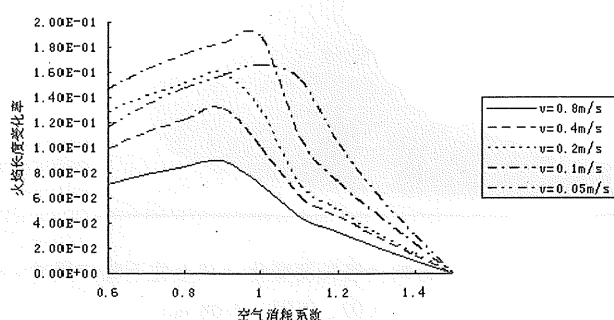


图 13 二维管道宽度 $d=0.02$ m, 入口速度改变, 火焰长度随空气消耗系数的变化率

Fig. 13 Variance rate of the flame length with air consumption coefficient at different gas velocity in 2D conduit with a width of 0.02 m

从这些曲线可以看出, 不论管道宽度和入口速度如何变化, $n=1$ 或在 1 附近时火焰长度达到最大。本文共计算了 20 种不同宽度和速度的组合, 其中 $n=1$ 时火焰最长的有 11 种情况, $n=0.9$ 时火焰最长的有 9 种:

(1) 在火焰长度达到最大值以前, 随着空气

消耗系数的增大, 火焰长度也会增加, 但长度的变化受空气消耗系数的影响比较小。

(2) 火焰长度达到最大值以后, 随着空气消耗系数的增加, 火焰长度将快速缩短, 这一点在管道宽度为 0.08 m 和 0.04 m 时表现尤为明显。

其原因在于预混燃烧中, 空气消耗系数会影响燃烧速率的大小。当实际提供的空气量和理论空气需要量相当或大于理论空气需要量时, 混合均匀的气体一进入燃烧区域很快就会燃烧完全, 此时空气消耗系数越大意味着进入燃烧区域的燃气越少, 空气越多, 完全燃烧就更快实现, 所以火焰的长度也就随空气消耗系数的增加而变短。反之, 当实际提供的空气量少于理论空气需要量, 燃气不能完全燃烧, 此时, 如果空气消耗系数减少, 燃烧区域空气量减少, 燃气量增加, 则实际参与化学反应的燃气减少, 火焰的长度就会随着空气消耗系数的减少而缩短。

综上所述, 控制预混气体的空气消耗系数可以调节火焰长度, 但是在实际操作中, 空气消耗系数不是可以任意选择的。空气系数的变化首先必须保证燃气在燃烧区域内能够完全燃烧, 以免造成浪费; 若未燃烧完全的燃气与废气一同排入大气会造成大气污染, 严重时还会危及人的生命, 因此空气消耗系数一般取大于 1 为宜。但空气消耗系数过大又会使排入大气的热量增加, 降低燃烧设备的效率, 因此操作中应综合考虑各方因素, 选取适当的空气消耗系数。

5 小 结

(1) 验证了的标准 $K-\varepsilon$ 双方程湍流模型、通用的有限速率化学反应模型、SIMPLE 方法和二阶迎风格式等模型的组合形式在湍流燃烧计算中是可

靠的。

(2) 讨论了网格的疏密程度对计算结果的影响,为进一步的研究提出了一种比较合适的网格密度。

(3) 在前面讨论的基础上,研究了预混燃烧中的火焰长度与各操作参数之间的关系,认为实践中应该全面考虑选择合适的空气消耗系数。

参考文献:

- [1] 范维澄,万跃鹏. 流动及燃烧的模型与计算[M]. 合肥:中国科技大学出版社,1992.
FAN Weicheng, WAN Yuepeng. Model and calculation for flow and combustion [M]. Hefei: University press of Science and Technology of China, 1992.
- [2] ROACHE P. J Perspective. A method for uniform metric of grid refinement studies [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, September 1994, 116 - 413.
- [3] ZING D W. Grid studies for thin-layer Navier-Stokes computations of airfoil flow field [J]. AIAA Journal 1993, 30(10):2561 - 2564.
- [4] ZHU Qingyong, CHAN C K. High-order upwind compact scheme and simulation of turbulent premixed V-flame [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids 2005, 49:701 - 720.
- [5] JIANG L Y, CAMPBELL I, SU K. Combustion modeling in a model combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(5): 694 - 703.
- [6] LIU Zhaomiao, HAO Haizhou, JIN Yanmei, et al. Influence of finite chemistry reaction rate model on high temperature air combustion [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 22(4):1
- [7] 邹春. 湍流扩散火焰模型[J]. 数值计算与工程仿真, 2005(4):42 - 57.
ZOU Chun. Model of turbulent non-premixed flame[J]. Numerical Calculation and Engineering Simulation, 2005 (4):42 - 57.
- [8] STEFANIDIS G D, MERCI B, HEYNDERICKX G J. CFD simulations of steam cracking furnaces using detailed combustion mechanisms [J]. Computers and Chemical Engineering, 2006, 30(4):635 - 649.
- [9] NICOLLEAU F, MATHIEU J. Eddy break-up model and fractal theory: Comparisons with experiments[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37 (18): 2925 - 2933.
- [10] NOIRAY N, DUROX D, SCHULLER T, et al. Passive control of combustion instabilities involving premixed flames anchored on perforated plates [J]. Proceedings of the Combustion Institute 2007, 31(1):1283 - 1290.
- [11] NOIRAY N, DUROX D, SCHULLER T, et al. Self-induced instabilities of premixed flames in a multiple injection configuration [J]. Combustion and Flame, 2006, 145(3):435 - 446.

Research for Length Variation of Flame in Premixed Combustion

XU Qiong-hui, ZHAN Jie-min

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Numerical simulation of turbulent combustion is performed by using different model combinations. The model combinations are chosen by comparing experimental results. Suitable grid spacings of the numerical system are investigated. Factors influencing on flame length in premixed combustion are discussed, and it is indicated that the influence of air consumption coefficient should be comprehensively considered to control length of flame.

Key words: turbulent combustion; grids density; length of flame