

MILD 燃烧条件下掺氢比对甲烷-氢气 湍流扩散火焰的影响

谢 翌¹, 钟 晨¹, 谭传智², 刘校兵²

(1. 重庆大学 汽车工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400023)

摘 要: 采用二维轴对称的仿真方法对 JHC 实验中的第二级 MILD 燃烧进行数值模拟, 研究了燃料体积流量不变时, 掺氢比对甲烷-氢气湍流扩散火焰的影响规律. 结果表明: 随着掺氢比增加, 燃料与氧化剂的混合程度逐渐提高, 混合气体的总流速及其径向分量不断减小, 火焰锋面逐渐向氧化剂侧倾斜, OH 自由基的最大质量分数呈现出先上升后下降的趋势; 在燃烧温度方面, 虽然 MILD 燃烧主要放热反应区域内的燃烧温度随掺氢比的增加不断增大, 但当掺氢比大于 20% 时, 掺氢比的进一步提高对最高燃烧温度影响很小.

关 键 词: MILD 燃烧; 掺氢比; 速度分布; 温度分布; OH 自由基分布

中图分类号: TK 432

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)08-1148-06

Effect of Hydrogen Content of CH₄-H₂ Mixture on Structure of Turbulent Diffusion Flame Under MILD Condition

XIE Yi¹, ZHONG Chen¹, TAN Chuan-zhi², LIU Xiao-bing²

(1. School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Chang'an Automobile Co., LTD, Chongqing 400023, China. Corresponding author: XIE Yi, E-mail: claudexie@cqu.edu.cn)

Abstract: MILD combustion in the second stage of JHC experiment was simulated by using two-dimensional axisymmetric numerical simulation method. The influence of hydrogen content of CH₄-H₂ mixture on the turbulent diffusion flame was studied under the condition of constant volume flux of fuel mixture. The results show that the mixing between fuel and oxidant augments, the velocity magnitude and its radial component falls down with the increase of hydrogen content of fuel mixture. In addition, as the hydrogen content of fuel mixture goes up, the flame front gradually leans to the oxidant side and the max mass fraction of OH free radical goes up firstly and then goes down. As for the combustion temperature, although the combustion temperature in the main exothermic reaction zone increases with increasing the hydrogen content of fuel mixture, the influence of hydrogen content on the temperature is very small when it is over 20%.

Key words: MILD combustion; hydrogen content of fuel mixture; velocity distribution; temperature distribution; distribution of OH free radical

近年来国际燃烧领域提出了许多新兴的燃烧方式, 其中 MILD (moderate & intense low-oxygen dilution) 燃烧方式能在保证高燃烧热利用效率的同时, 实现极低的 NO_x 排放, 被认为是最具发展前景的燃烧技术之一. MILD 燃烧被定义为在中度或极度低氧条件下的温和燃烧方式^[1], 通常为

扩散燃烧, 燃烧过程中不存在局部高温区, 为无焰燃烧. 由于 MILD 燃烧具有反应速率低、局部放热少、热量分布均匀、温度峰值低等特点^[2], 自提出以来, 迅速得到了广泛关注. 近年来, 国内外学者针对 MILD 燃烧开展了一系列的相关研究. 其中, Plessing 等^[3]研究了炉膛内的 FLOX 燃烧器的燃

烧混合过程,结果表明,当燃料与氧化剂化学反应速率低于混合速率时,反应区为低放热率和低 Damkohler 状态. Tsuji 等^[4]研究表明,MILD 燃烧发生在充分搅拌的反应容器中,快速反应模型不再适用. 李鹏飞等^[5]研究了氧浓度对甲烷 - 氢气射流火焰的影响,证明 MILD 燃烧具有稳定、易维持的特点. Mi 等^[6-7]对 MILD 燃烧的研究表明,主流 Re 数对无焰燃烧建立具有重要作用,通过提高射流初始 Re 数,可在无预热空气条件下实现 MILD 燃烧.

对 MILD 燃烧的研究,目前集中在改变燃料以及入口条件方面,关于燃料掺氢对 MILD 燃烧的影响,报道较少. 在这些报道中, Yu, Sabia 等^[8-9]的研究具有一定的代表性. Yu 等^[8]将燃料掺氢与 MILD 燃烧结合,研究了掺氢对排放的影响;Sabia 等^[9]研究了 MILD 条件下掺氢对甲烷燃烧火焰动态特性的影响,发现随着氢气组分增加,反应区内化学震荡幅度显著降低. 为进一步了解 MILD 条件下,燃料掺氢对烃类燃料燃烧特性的影响,本文基于 Dally 等^[10]的 JHC 实验模型,采用仿真方法,研究了掺氢比对 MILD 燃烧条件下甲烷 - 氢气的湍流扩散火焰的影响情况.

1 数值仿真模型

1.1 几何模型

本研究主要基于 Dally 等^[10]的 JHC 实验进行,其中燃烧器的结构如图 1 所示. 本文的研究模型将基于 JHC 实验的第二级 MILD 燃烧. 根据第二级燃烧器结构,本文建立了如图 2 的仿真模型. 图 2 中,轴向为 X 轴,径向为 Y 轴,燃烧器出口截面 $X=0$,计算域下边界 $Y=0$;计算域长 500 mm,宽 210 mm,为二维轴对称结构;燃料入口圆管直径为 4.25 mm,氧化剂入口外圆管直径为 82 mm,两圆管壁厚均为 0.3 mm. 为了更好地模拟第二级 MILD 燃烧,在模型中加入空气入口,其外边界直径为 420 mm.

1.2 物理模型

本文基于二维轴对称的 RANS 模型进行求解. 湍流模型方面,Christo, Mardani 等^[11-12]将标准 $k-\varepsilon$ 模型中的系数 $C_{\varepsilon 1}$ 调整为 1.6 后,CFD 的仿真结果与 JHC 实验的测量结果更加吻合,故本文采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,配合标准壁面函数,并将经验常数 $C_{\varepsilon 1}$ 调整为 1.6,以此来模拟湍流. 化学反应方面,本文拟采用 EDC 涡耗散模型结合 GRI MECH3.0^[13] 化学反应机理模拟掺氢条件下甲烷 -

氢气的 MILD 燃烧过程. 此外,由于辐射传热对 JHC 扩散火焰没有显著影响^[11],所以本文在仿真时忽略火焰辐射传热.

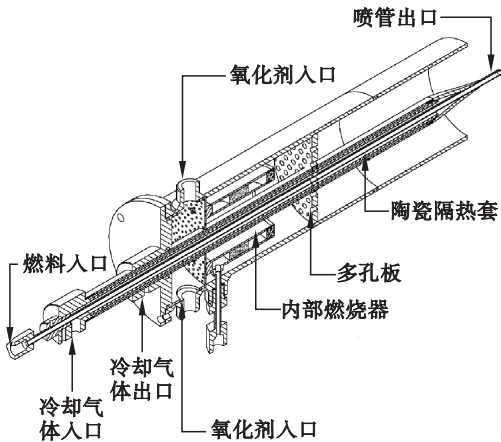


图 1 燃烧系统结构

Fig. 1 Schematic diagram of the combustion system

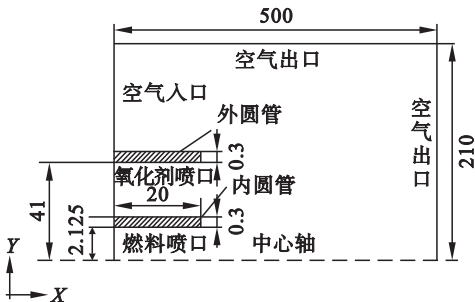


图 2 计算域 (mm)

Fig. 2 Computational domain

1.3 网格划分

本文采用结构化网格对其进行划分. 由网格无关解验证可知,最终计算网格数约为 7 万,壁面最大 $Y+$ 值为 10,网格划分结果如图 3 所示.

1.4 边界条件及计算方法

由 JHC 实验^[10]可知,第二级燃烧装置中心圆管为燃料通道,在本研究中燃料为甲烷和氢气的混合气体;中心管和外圆管之间为氧化剂通道,其组分包括氧气、水蒸气、二氧化碳以及氮气,其质量分数如表 1 所示;外圆管外侧区域为 JHC 实验中空气流通区域. 在边界条件方面,为了与 JHC 实验条件一致,燃料、氧化剂以及外流空气入口均采用速度入口边界条件,三者的速度为 66,3.2,3.2 m/s,静温为 305,1 300,300 K. 气体出口包括计算域的上边界和右边界,由 JHC 实验可知,MILD 燃烧在大气中进行,故计算域出口采用压力出口边界条件,出口静压为标准大气压. 计算域的下边界为整个计算域的对称轴,采用轴边界条件. 此外,各固壁面均采用无滑移壁面边界条件. 本文改变了燃料中氢气的质量分数,使其在 5%

到 25% 之间变化,以此来研究燃料中掺氢比对 MILD 燃烧的影响.

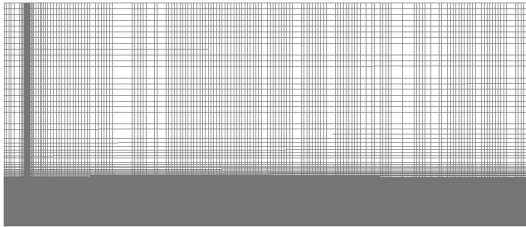


图 3 计算网格
Fig. 3 Computational mesh

表 1 燃料和氧化剂入口组分

Table 1 Composition of fuel and oxidant

工况	燃料组分	氧化剂组分
1	5% H ₂ +95% CH ₄	3% O ₂ +5.5% CO ₂ +6.5% H ₂ O+85% N ₂
2	10% H ₂ +90% CH ₄	3% O ₂ +5.5% CO ₂ +6.5% H ₂ O+85% N ₂
3	15% H ₂ +85% CH ₄	3% O ₂ +5.5% CO ₂ +6.5% H ₂ O+85% N ₂
4	20% H ₂ +80% CH ₄	3% O ₂ +5.5% CO ₂ +6.5% H ₂ O+85% N ₂
5	25% H ₂ +75% CH ₄	3% O ₂ +5.5% CO ₂ +6.5% H ₂ O+85% N ₂

为提高仿真的计算精度,本研究对控制方程各项的离散均采用高阶格式,其中压力项采用二阶格式,速度、湍流等其他项的离散采用 QUICK 格式. 速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法. 在计算收敛判断方面,本研究收敛标准如下: (I) 计算中各项的绝对残差为 10^{-6} 量级; (II) $X=30\text{ mm}$, 60 mm , 90 mm 截面, CO_2 质量分数最大值、温度峰值随迭代步数增加的相对变化量小于 2% .

1.5 实验结果与 CFD 方法对比

为验证仿真方法的可行性,采用本文的计算方法对文献[9]实验中的氧气质量分数 w_{O_2} 为 3% 的工况 (该工况下 MILD 燃烧最为明显) 进行了仿真,并将 $X=30\text{ mm}$ 横截面处的燃烧温度及 OH 质量分数计算值与测试结果进行了对比 (见图 4). 由对比可知,在燃烧器出口垂直于流动方向的截面上,计算值与实验值变化趋势一致,且相差不大. 其中,CFD 计算温度与实验测试温度的平均相对误差为 4.6%,最大相对误差为 16%. 实验测得的 OH 质量分数在燃料射流中心位置附近 ($Y<6\text{ mm}$) 高于 CFD 计算值. 这是因为高温氧化剂通过燃烧器壁面将热量传递给燃料,导致燃料的化学反应提前,从而提高了射流出口附近的 OH 质量分数,而 CFD 仿真没有考虑这一现象. 在 OH 质量分数的计算误差方面,CFD 计算值与实验测试值的平均相对误差为 29.6%. 由此可知,本文的数值仿真方法能够较为精确地模拟 MILD 条件下甲烷-氢气的湍流扩散燃烧.

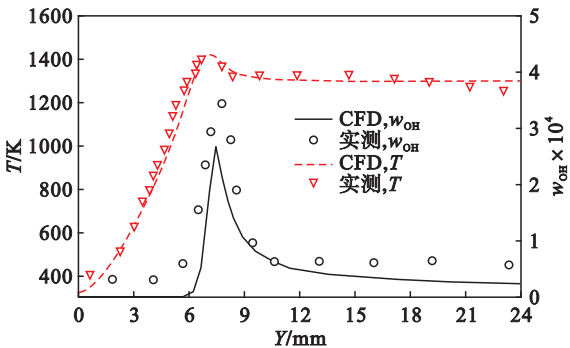


图 4 $X=30\text{ mm}$ 处径向温度和 OH 质量分数径向分布
Fig. 4 Temperature and OH mass fraction distribution along radial direction at the $X=30\text{ mm}$ cross section

2 结果与讨论

2.1 MILD 燃烧扩散火焰分析

当氢气质量分数为 10% 时 MILD 燃烧特征明显,故本文以此为例对掺氢后的 MILD 燃烧进行分析. 10% 掺氢比模型在不同轴向位置处的速度和径向速度沿径向的分布如图 5 所示. 图中,左侧纵坐标为气体的径向速度 v_r ,右侧纵坐标为总速度 v . 由图 5 可知,随着流动的发展,射流剪切层逐渐扩张,燃料逐渐与氧化剂混合反应,速度逐渐降低. 在 $X=30\text{ mm}$ 截面处,燃料射流中心最高速度为 71 m/s ,而在 $X=90\text{ mm}$ 截面位置,射流中心最高速度为 29.5 m/s . 在径向速度方面,气体径向速度的分布呈现出增加—减小—增加—减小的趋势. 在 $X=30\text{ mm}$ 截面处,当 $Y<3.9\text{ mm}$ 时,气体径向速度为正,这表明燃料逐渐向氧化剂侧扩散,其中当 $Y<2.2\text{ mm}$ 时,受燃料浓度梯度逐渐增加的影响,燃料气体的径向速度沿径向逐渐增加,扩散作用逐渐增强, $Y=1.73\text{ mm}$ 时,燃料质量分数沿径向的梯度达到峰值 (其中,甲烷为 0.16 mm^{-1} ,氢气为 0.02 mm^{-1}),此时,气体径向速度为最大,其值为 0.65 m/s . 当径向距离在 $Y>3.9\text{ mm}$ 区间变化时,气体径向速度为负,且在经历增加—减小后,逐渐趋于 0. 这说明在 $Y>3.9\text{ mm}$ 区间,气体的流动状态主要为氧化剂通过剪切层向燃料侧扩散,当 $Y=6.61\text{ mm}$ 时,向燃料侧扩散的径向速度达到最大,其值为 -1.07 m/s . 由此可知,在 $X=30\text{ mm}$ 截面位置处,主要放热反应发生在剪切层中. 随着轴向距离的增加,剪切层逐渐向外扩散,燃料和氧化剂沿径向的浓度梯度逐渐降低,扩散速度逐渐减缓,故径向速度的正、负最大值不仅逐渐减小,且位置也逐渐向氧化剂侧偏斜. 在 $X=60\text{ mm}$, $X=90\text{ mm}$ 位置处,向燃料

侧的径向速度最大值分别为 -0.76 m/s 、 -0.54 m/s ，其径向位置 Y 分别为 10.32 mm 、 14.44 mm 。这表明随着轴向距离的增加，主要放热反应的径向位置穿过剪切层向氧化剂侧偏移（ $X = 60\text{ mm}$ ， $X = 90\text{ mm}$ 位置外剪切层径向距离分别为 10.32 mm 、 14.03 mm ）。

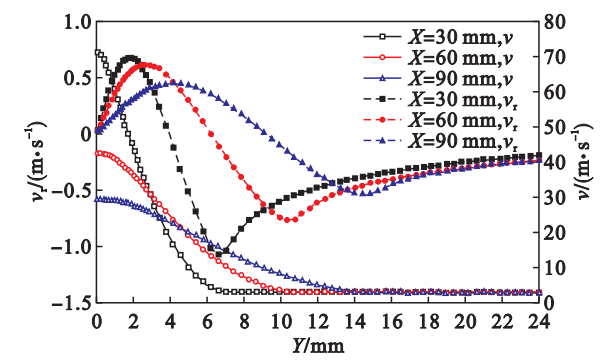


图 5 10% 掺氢比下，不同轴向距离位置气体速度及其径向分量沿径向的分布

Fig. 5 Radial profiles of velocity magnitude and its radial component at different X cross sections under Case 2.

10% 掺氢比模型在不同轴向位置处的温度沿径向分布如图 6 所示。当 $Y < 24\text{ mm}$ 时，在相同截面位置，随着径向距离的增加，气体温度呈现出先增大后减小，最后趋于 $1\,300\text{ K}$ 的分布规律。 $X = 30, 60$ 和 90 mm 位置处，最高温度点的径向位置 Y 分别为 $7.02, 10.73$ 和 14.85 mm ，这再一次表明 MILD 燃烧的主要放热反应位置由射流主体段内部剪切层边界逐渐向氧化剂侧偏移。此外，由于氧化剂中氧气的质量分数仅为 3% ，这有效地控制了燃料的反应速率，限制了燃烧的放热速率，最终导致 MILD 燃烧反应区域内的最高燃烧温度沿轴向变化不大。 $X = 30, 60$ 和 90 mm

位置处，10% 掺氢比模型的最高燃烧温度分别为 $1\,425, 1\,423$ 和 $1\,421\text{ K}$ ，其值变化极小。

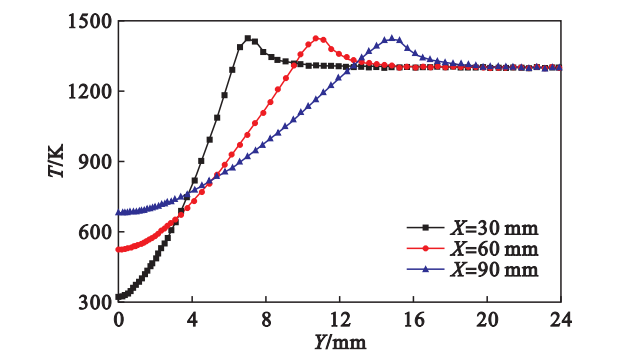


图 6 10% 掺氢比下，不同轴向距离位置温度沿径向的分布

Fig. 6 Radial profiles of temperature at different X cross sections under Case 2.

2.2 掺氢比对 MILD 燃烧流场的影响

不同掺氢比下，MILD 燃烧流场中，气流速度的径向分量在不同流向位置处，随径向距离的变化规律如图 7 所示。由于掺氢比的增加强化了燃料与氧化剂的混合，故射流主体段相同径向位置，气体的径向速度随掺氢比的增加逐渐降低。 $X = 30\text{ mm}$ 截面处， 5% 、 15% 和 25% 掺氢比模型中，燃料向氧化剂的最大径向速度为 $0.73, 0.66$ 和 0.61 m/s ，氧化剂向燃料的最大径向速度为 $-1.14, -1.03$ 和 -0.95 m/s 。此外，在相同轴向位置，随着掺氢比的增加，径向速度负值波峰略向氧化剂侧偏移。 $X = 90\text{ mm}$ 截面位置， 5% 、 15% 及 25% 掺氢比模型中，最大负径向速度的径向位置 Y 分别为 $14.5, 14.6$ 和 14.9 mm 。由此可知，随着掺氢比的增加，MILD 燃烧主要放热反应区域略向氧化剂侧偏移。

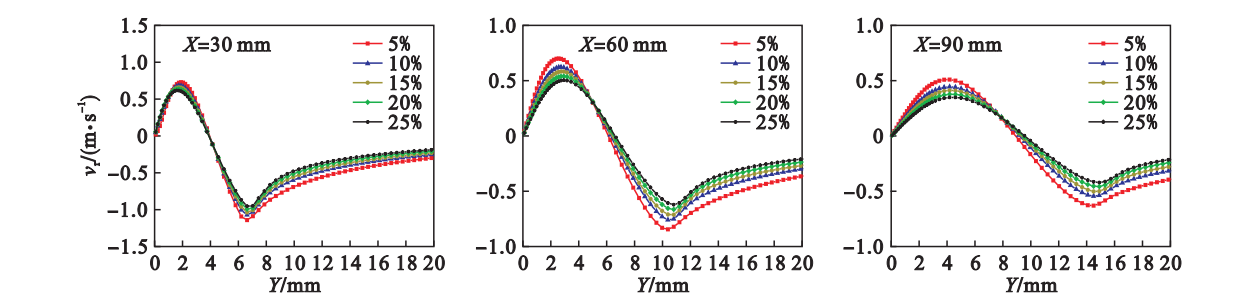


图 7 不同掺氢比下，不同轴向距离处速度的径向分量沿径向的分布

Fig. 7 Radial profiles of radial component of velocity at different X cross sections when the hydrogen content of fuel mixture changes

2.3 掺氢比对 MILD 燃烧温度的影响

不同掺氢比下，MILD 燃烧的温度分布和燃烧温度在不同流向位置处随径向距离的变化规律分别如图 8、图 9 所示。由图 8 可知，随着掺氢比

的增加，燃烧器出口位置附近，燃料射流低温区域逐渐收窄，这表明掺氢比增加使得化学反应逐渐提前。此外，随着掺氢比的增加，燃料向氧化剂的扩散逐渐增加，燃料和氧化剂间剪切层的温度逐

渐增大. 同样受氢气强化混合燃烧的影响,在燃烧区域后段,燃烧高温区(温度大于 1 200 K 的区域)的面积随掺氢比的增加也不断扩大. 如图 9 所示,在最高燃烧温度方面,当氢气的质量分数从 5% 增加到 10% 时,最高燃烧温度随掺氢比的增大迅速增加,在 $X=60\text{ mm}$ 截面处,10% 掺氢比模型的最高燃烧温度较 5% 模型分别增加了 61.9 K;当氢气质量分数在 10% 到 20% 之间变化时,随着掺氢比的增加,最高燃烧温度的上升速度逐渐放缓. 在 $X=60\text{ mm}$ 截面处,20% 掺氢比模型的

最高燃烧温度较 15% 掺氢比模型增加了 16 K;当掺氢比大于 20% 时,最高燃烧温度的上升速度进一步放缓. 在 $X=30\text{ mm}$ 截面处,25% 掺氢比模型的最高燃烧温度较 20% 掺氢比模型仅增加了 5 K. 由此可知,在控制甲烷-氢气总体积流量情况下,当掺氢比过高时,掺氢比的进一步提高对 MILD 燃烧的最高燃烧温度影响很小. 此外,相同轴向位置处,随着掺氢比的增加,最高燃烧温度的径向位置变化不大. 在 $X=60\text{ mm}$ 截面位置,5%、15% 和 25% 掺氢比模型的最大温度所对应的径向位置分别为 $Y=10.7, 11$ 和 11.2 mm . 对于主要放热区域以外的位置,由图 9 可知,气体温度随掺氢比的增加变化很小. 在 $X=30\text{ mm}$ 截面, $Y=6.2\text{ mm}$ 和 $Y=10.3\text{ mm}$ 两位置处,不同掺氢比模型间最高燃烧温差仅为 13 K 和 20 K.

2.4 掺氢比对燃烧产物的影响

不同掺氢比下,在不同流向位置处 OH 的最大质量分数 $w_{\text{OH_max}}$ 及其径向位置 $Y_{\text{OH_max}}$ 随掺氢比 w_{H_2} 的变化规律如图 10 所示:当掺氢比小于 10% 时,OH 自由基的最大质量分数随掺氢比的增加迅速增大. 这是因为当掺氢比从 5% 增加至 10% 时,OH 自由基的主要生成反应 $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$ 的化学反应速率峰值大幅提高. 在 $X=30\text{ mm}$ 截面位置处,10% 掺氢比模型的化学反应速率最大值为 5% 掺氢比模型的 2.4 倍.

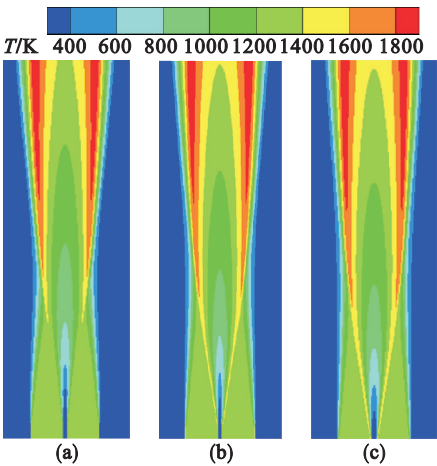


图 8 不同掺氢比下的燃烧温度的分布
Fig. 8 Temperature distribution under different hydrogen content

(a) — $w_{\text{H}_2}=5\%$; (b) — $w_{\text{H}_2}=15\%$; (c) — $w_{\text{H}_2}=25\%$.

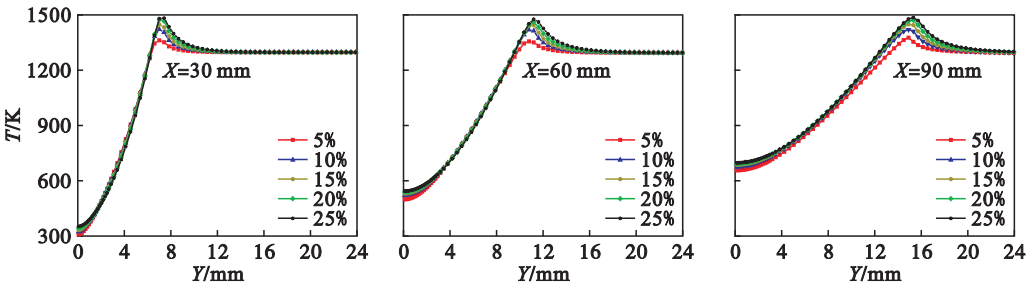


图 9 不同掺氢比下,不同轴向距离处温度径向分布
Fig. 9 Radial profiles of temperature at different X cross sections when the hydrogen content of fuel mixture changes

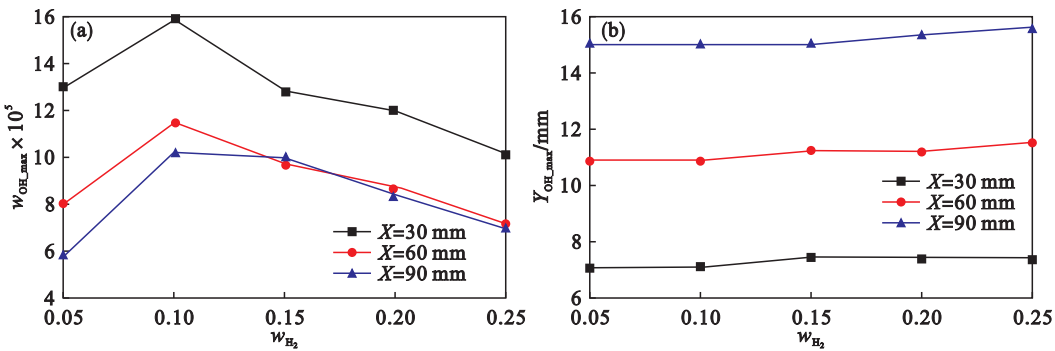


图 10 OH 质量分数峰值及其位置随掺氢比变化规律
Fig. 10 Variation of $w_{\text{OH_max}}$ and $Y_{\text{OH_max}}$ with hydrogen content of fuel mixture

当掺氢比大于 10% 时, $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$ 的反应速率峰值变化很小, 故单个反应中, OH 生成速率变化不大. 与此同时, 由于燃料体积流量不变, 过高的掺氢比会导致燃料中碳氢比过大, 从而导致参与 $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$ 反应的 H 原子总量降低. 故掺氢比大于 10% 时, 随着掺氢比的增加, OH 的生成量降低, 最大质量分数下降. 由图 10b 可知, 随着掺氢比的增加, OH 最大质量分数的径向位置逐渐向氧化剂侧偏移. 在 $X = 30\text{ mm}$ 截面上, 25% 掺氢比模型中 OH 最大质量分数的径向距离为 7.4 mm, 较 10% 掺氢比模型在径向距离上提高了 0.3 mm; 在 $X = 90\text{ mm}$ 截面上, 25% 掺氢比模型中 OH 最大质量分数的径向距离为 15.6 mm, 较 10% 掺氢比模型提高了 0.6 mm. 这表明随着掺氢比的增加, 燃烧火焰锋面向氧化剂侧偏移.

3 结 论

- 1) 在 MILD 燃烧区域内, 随着轴向距离的增加, OH 质量分数峰值下降, 但燃烧温度变化不大. 此外, MILD 燃烧的主要放热反应穿过剪切层逐渐向氧化剂侧偏移.
- 2) 在气体流动方面, 混合气体流速的径向分量随掺氢比的增加均不断减小.
- 3) 虽然 MILD 燃烧主要放热反应区域内的温度随掺氢比的增加而增大, 但当掺氢比大于 20% 时, 提高掺氢比对最高燃烧温度影响很小.
- 4) 在 OH 分布方面, 主要放热反应区域中, OH 的最大质量分数随掺氢比的增加呈现出先上升后下降的趋势, 当氢气质量分数为 10% 时, 其流场中 OH 自由基的最大质量分数最高.
- 5) 在火焰锋面位置方面, 随掺氢比的增加, 在相同流向位置处, MILD 燃烧火焰锋面呈现出向氧化剂侧偏移的趋势.

参考文献:

[1] Cavaliere A, Joannon M D. MILD combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(3): 329 – 366.

[2] 李鹏飞, 米建春, Dally B B, 等. MILD 燃烧的最新进展和发展趋势[J]. *中国科学: 技术科学*, 2011, 41(2): 135 –

149.

(Li Peng-fei, Mi Jian-chun, Dally B B, et al. Progress and recent trend in MILD combustion [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2011, 41(2): 135 – 149.)

[3] Plessing T, Peters N, Wüning J G. Laser optical investigation of highly preheated combustion with strong exhaust gas recirculation[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1998, 27(2): 3197 – 3204.

[4] Tsuji H, Gupta A K, Hasegawa T, et al. High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction [M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.

[5] 李鹏飞, 米建春, Dally B B, 等. 当量比和反应物混合模式对无焰燃烧的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(5): 20 – 27.

(Li Peng-fei, Mi Jian-chun, Dally B B, et al. Effects of equivalence ratio and mixing pattern of reactants on flameless combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(5): 20 – 27.)

[6] Mi J C, Li P F, Dally B B, et al. Importance of initial momentum rate and air-fuel premixing on moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion in a recuperative furnace[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(11): 5349 – 5356.

[7] Li P F, Mi J C. Critical Reynolds numbers for realization of MILD combustion in a recuperative furnace [C]//The 8th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Casification. Poznan, Poland, 2010.

[8] Yu Y, Wang G F, Lin Q Z, et al. Flameless combustion for hydrogen containing fuels [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(7): 2694 – 2697.

[9] Sabia P, Joannon M, Fierro S, et al. Hydrogen-enriched methane MILD combustion in a well stirred reactor [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 31(5): 469 – 475.

[10] Dally B B, Karpets A N, Barlow R S. Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(1): 1147 – 1154.

[11] Christo F C, Dally B B. Modeling turbulent reacting jets issuing into a hot and diluted coflow [J]. *Combustion and Flame*, 2005, 142(1/2): 117 – 129.

[12] Mardani A, Tabejamaat S, Ghamari M. Numerical study of influence of molecular diffusion in the MILD combustion regime[J]. *Combustion Theory and Modeling*, 2010, 14(5): 747 – 774.

[13] Smith G P, Golden D M, Frenklach M, et al. GRI-Mech 3.0 [EB/OL]. [2015 – 10 – 28]. [http://www. me. berkeley. edu/gri_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/).