

单管微混燃烧器燃料/空气掺混规律研究

仇园¹, 张哲巅², 雷福林², 张永生¹

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 2. 中国科学院先进能源动力重点实验室(工程热物理研究所), 北京 100190)

摘要: 为了使应用于燃气轮机的单管微混燃烧器实现清洁燃烧, 达到降低污染的效果, 采用数值模拟的方法, 从影响单管微混燃烧器燃/空掺混均匀性的几何参数入手, 分析了几何参数与掺混均匀性的问题, 研究了微混燃烧器中非反应流动以及燃/空分配对掺混均匀性的影响, 形成了单喷嘴微混设计方案。三维模拟模型基于如下设计参数建立: 空气孔径 D_a 为 2~5 mm、空气孔间距 S 为 5~11 mm、第 1 排空气孔与燃料主流入口平面距离 L_1 为 3~35 mm、流速 V 为 50~70 m/s。结果表明: 混合质量并不直接取决于空气孔直径 D_a 的大小, 而是与燃空射流动量比有关; 空气孔间距 S 对均匀度的影响较小, 且与最短预混段长度 L 呈三次多项式的关系; L_1 的长度与预混段长度在给定区间内呈现四次多项式的关系; 流速 V 、空气孔直径 D_a 、射流深度 H 三者可呈现出一个函数关系, 可由已知量推测未知量的范围。基于上述研究结果, 在合适的几何尺寸下, 单管微混燃烧器可以得到较高的混合质量, 压损较小的情况下, 使燃/空掺混均匀性更好。

关键词: 燃气轮机; 微混燃烧器; 燃料/空气掺混均匀性; CH_4 ; 均匀性指数

中图分类号: TK471 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.05.009

[引用本文格式] 仇园, 张哲巅, 雷福林, 等. 单管微混燃烧器燃料/空气掺混规律研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(5): 62-71. QIU Yuan, ZHANG Zhe-dian, LEI Fu-lin, et al. Study on fuel/air mixing law of single tube micro mixing burner[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 62-71.

Study on Fuel/Air Mixing Law of Single Tube Micro Mixing Burner

QIU Yuan¹, ZHANG Zhe-dian², LEI Fu-lin², ZHANG Yong-sheng¹

(1. College of Energy and Power Machinery Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206; 2. Key Laboratory of Advanced Energy and Power of CAS(Institute of Engineering Thermophysics), Beijing, China, Post Code: 100190)

Abstract: In order to make the single tube micro mixing burner used in gas turbine realize clean combustion and reduce pollution, starting with the geometric parameters affecting the fuel/air mixing uniformity of single tube micro mixing burner, the problems of geometric parameters and mixing uniformity were analyzed, and the effects of non-reactive flow and fuel/air distribution on mixing uniformity in micro mixing burner were studied, and the single nozzle micro mixing design scheme was formed by numerical simulation method. The three-dimensional simulation model was established based on the following design parameters: air hole diameter D_a of 2 mm to 5 mm, air hole spacing S of 5 mm to 11 mm, plane distance L_1 of 3 mm to 35 mm between the first row of air holes and the fuel mainstream inlet, and flow velocity V of 50 m/s to 70 m/s. The results show that the mixing quality does not directly depend on the diameter D_a of the air hole, but on the momentum ratio of fuel/air jet flow; the air hole spacing S has little effect on the uniformity, and has a cubic polynomial relationship with the shortest premixed section length L ; the rela-

收稿日期: 2021-05-19; 修订日期: 2021-08-13

基金项目: 国家科技重大专项(2019-III-0018-0062)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2019-III-0018-0062)

作者简介: 仇园(1997-), 女, 河北石家庄人, 华北电力大学硕士研究生。

tionship between the lengths of L_1 and premixed section is a quartic polynomial in a given interval; there is a functional relationship among velocity V , air hole diameter D_a and jet flow depth H , and the range of unknown quantity can be inferred from the known quantity. Based on the above research results, the single tube micro mixing burner with the appropriate geometric size can obtain higher mixing quality, so that the fuel/air mixing uniformity is better under the condition of small pressure loss.

Key words: gas turbine, micro mixing burner, fuel/air mixing uniformity, CH_4 , uniformity index

引言

微混燃烧是近年来针对富氢燃料燃烧提出的一种燃烧技术,该技术的发展使得燃气轮机体积更小,混合效率更高。其原理是通过几个简化的微喷嘴来代替传统的大直径喷嘴结构,通过减少混合尺度来减少混合时间。由于单个喷嘴的尺寸小,内部预混过程被加强和加速,并且可在喷嘴出口处形成均匀的预混气体^[1]。流体的高质量混合在流体系统中起至关重要的作用,研究燃料与空气的掺混均匀性,保证燃料和空气被均匀地分配到每个微喷嘴中进行预混,从而实现低排放的目的。

许多学者和机构从不同的角度对各自的微混燃烧器进行了研究。Chen 等人^[2]通过增加流体的接触面积和混合持续时间来改善微混燃烧器的混合性能和混合效率。Chen 等人^[3]对挡板位置、间距、数量和角度对混合效率的影响进行数值研究。Lee 等人^[4]和 Bau 等人^[5]分别通过增加压力扰动和周期扰动将流体分成多股细丝,从而改善流体间的接触,减少混合路径,实现均匀混合。Araoye 等人^[6]研究了几何参数对微混管中 CO_2 和 O_2 掺混混合质量的影响,通过改变混合物的成分和流速,获得最佳混合质量。并从几何参数对掺混的影响入手,证明了混合质量与主流、射流动量比有关。Mishra 等人^[7]研究全尺寸环形燃烧室不同几何参数、旋流结构对出口形状因子的影响,结果表明,存在最佳的稀释孔尺寸和间距,使出口达到理想条件。Sun 等人^[8]研究了几何设计参数对含氢微混燃烧的影响,结果表明混合距离、喷射器间距等都可影响掺混效果。Long 等人^[9]通过增加角度增加微混燃烧的混合均匀度。邢畅等人^[10]通过对微混燃烧器进行加湿,实现高温高压下的稳定低排放。孙宝成等人^[11]通过数值模

拟的方法研究干式低氮燃烧室燃料/空气掺混规律,得到各参数间的相互关系,从而预测其他条件下的混合不均匀度。邵卫卫等人^[12]通过实验与数值模拟相结合的方法来研究 R0110 预混燃烧器内的燃料/空气掺混均匀性,对比不同当量比情况下 OH 分布和 NO_x 排放,从而获得较好的设计方案。

对此,本文通过数值模拟的方法研究单管微混燃烧器中燃料/空气的掺混规律,以期得到各参数之间的相关性,实现微混技术的创新和突破,从而达到减少污染物排放的效果。

1 CFD 建模及评估

1.1 CFD 建模

为了研究 CH_4 进料和空气在单管微混燃烧器内的混合,建立单管微混燃烧器模型,该模型是一个有多孔进气的圆柱形区域,计算域如图 1 所示。单管燃烧器内径 D 为 12 mm,燃料入口直径 D_f 为 4 mm 均匀间隔的空气喷射孔,高度为 1 mm。 CH_4 燃料通过顶部孔实现射流供应,空气从侧壁孔流入内部。燃料进入预混管内要达到充分发展阶段,需在上游增加一段湍流充分发展段,管内流动充分发展后,流体的流动形态不再随流动距离变化。其长度需要根据雷诺数来估算,雷诺数定义为:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

式中: ρ —流体密度, kg/m^3 ; D —管内径, mm; V —流体平均流速或主流速, m/s ; μ —动力粘度 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

研究的单管微混掺混情况为高雷诺数流动, $Re \approx 9\,000$,充分发展段长度 L_e 计算公式为:

$$L_e = 1.4 Re^{1/4} D \quad (2)$$

由于湍流时边界层增长较快,故进口段比层流时短,近似计算得 $L_e = 50 D$ 。

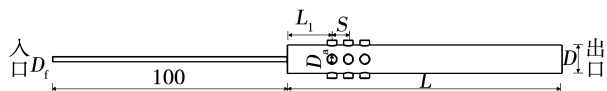


图 1 单管微混燃烧器流体域 (mm)

Fig. 1 Fluid domain of single tube burner (mm)

分别使用 ANSYS SCDM 软件和网格划分建立并离散管域的三维模型,使用 Fluent 19.5 作为计算流体力学 (CFD) 求解器。由于流体在垂直方向流动,重力也被考虑在内。

1.2 评估指标

1.2.1 预混不均匀度 (SMD)

Danckwerts 等人^[13]提出利用统计学方法来衡量掺混效果,经过 Thomas 等人^[14]和冯冲等人^[15]完善、修正和评估后,得出公式:

$$SMD = \sigma \sqrt{f} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f - \bar{f})^2} \quad (4)$$

式中: f —燃料质量分数; $\bar{f}$ —特征平面内燃料的平均质量分数; N —平面上的单元数; σ —质量分数标准偏差。

预混不均匀度的表示方法有两种,一种是通过数值积分来衡量, Lyons^[16]针对空间上燃/空混合不均匀度对 NO_x 生产的影响进行理论研究,用 SMD 来量化各截面点处的化学当量比相对平均当量比的偏离程度。得出公式如下:

$$SMD = \sqrt{\frac{\int_0^R (\phi - \bar{\phi})^2 r dr}{\int_0^R r dr}} \quad (5)$$

式中: ϕ —截面的当量比, mol/L; $\bar{\phi}$ —平均当量比, mol/L; R —燃烧器喷嘴半径, m; r —所选圆形截面半径, m。

另一种是利用积分计算的方法对不均匀度进行计算,公式如下:

$$SMD = \frac{\iint |f - \bar{f}| dA}{A \bar{f}} \quad (6)$$

式中: A —所选截面的面积, m^2 。

Firc 等人^[14]对简化的圆柱形射流进行研究,将

时间上的不均匀度 SMD 定义为:

$$SMD = \frac{c'^2}{\bar{c}(1 - \bar{c})} \quad (7)$$

式中: c' —截面上某点处燃料质量分数在时间上的波动值; $\bar{c}$ —同位置处燃料质量分数的时均值。SMD = 0, 则为完全混合均匀, 此时 $c' = 0$ 。

1.2.2 均匀性指数 (Uniformity Index)

Liu 等人^[17]定义了均匀性指数来量化混合质量。通过计算量化的均匀性指数 γ_a 的方法来确定混合质量:

$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(|\varphi_i - \bar{\varphi}_a|) A_i]}{2 \bar{\varphi}_a \sum_{i=1}^n A_i} \quad (8)$$

式中: φ_i —拥有 i 个网格的网格面变量; $\bar{\varphi}_a$ —特征截面的变量平均值; A_i —截面面积, m^2 。

整个表面的变量平均值 $\bar{\varphi}_a$ 为:

$$\bar{\varphi}_a = \frac{\sum_{i=1}^n [(\varphi_i | \rho_i \bar{V}_i A_i |)]}{\sum_{i=1}^n [(|\rho_i \bar{V}_i A_i |)]} \quad (9)$$

式中: φ_i —拥有 i 个网格的网格面变量; ρ_i —一面上的燃料密度, kg/m^3 ; $\bar{V}_i$ —特征表面的流速平均值。

均匀性指数值为 1.0 意味着完全均匀, 当均匀性指数衰减在 1% 以内时, 认为掺混均匀, 选取出口截面作为衡量燃料与空气掺混性能的参考截面。

1.2.3 混合指数

Zhang 等人^[18]用混合指数来衡量了两种混合物的混合质量, 公式为:

$$M = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N \bar{x} (1 - \bar{x})} \quad (10)$$

式中: x_i —混合物组分的质量分数, $\bar{x}$ —混合物在平面上的平均质量分数。当 $M = 0$ 时, 表示完全混合。

1.2.4 湍流度

充分发展段中心处的湍流强度可用下式估算:

$$I = \frac{V'}{V_{\text{avg}}} = 0.16 (Re)^{-1/8} \quad (11)$$

式中: I —湍流强度; V' —速度波动的均方根, m/s ; V_{avg} —平均流速, m/s 。

定义湍流度 T_u 为湍流强度与平均流速的比值, 公式为:

$$T_u = \frac{I}{V_{avg}}$$

(12)

湍流度越强,在燃烧器内发生的动量交换也越强,掺混效果更好。

2 边界条件和网格无关性验证

2.1 边界条件

通过 ANSYS-Fluent 19.5 软件对单管微混燃烧器进行三维模拟。在高温高压的条件下,给定压力为 2.1 MPa。在燃料入口处增加 1 个上游段来施加湍流强度或速度分布,使燃料达到充分发展,可获得考虑流动的精确数据。边界条件规定为质量流量入口,压力出口条件在管道出口处指定,方向采用垂直于边界,背压为 0 Pa。单管微混燃烧器工况如表 1 所示。

表 1 单管微混燃烧器工况

Tab. 1 Working condition of single tube micro mixing burner

燃料	当量比	空气流量/ kg · s ⁻¹	空气温 度/K	燃料流量/ kg · s ⁻¹	燃料温 度/K
CH ₄	0.6	0.070 6	743	0.002 46	500

无滑移和绝热边界条件在壁面上指定,使用基于压力的求解器,使用组分输运模型模拟。采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型计算,包含标准化 (Standard) 模型、重整化 (RNG) 模型和可实现 (Realizable) 模型^[19]。Standard 模型不适用于曲率、压力梯度及旋流较大的模拟^[20];RNA 模型可以更好地模拟流线弯曲度较大的流动,但是在涡旋各向同性假设方面有一定的限制^[21];Realizable 模型适合的流动类型宽,适用于湍流、旋流流动,还可更好地模拟圆形射流^[22]。

图 2 为单管部分流体域剖面。如图 2 所示,使用四面体和六面体网格的组合 (poly-hexcore) 来离散三维计算域,空气入口距壁面 1 mm 的高度,在空气入口处采用了更细的网格实现网格控制,从而达到有效的离散化和更短的收敛时间。

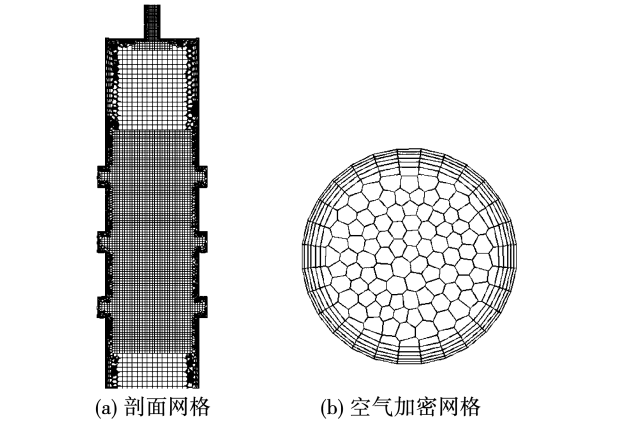


图 2 单管部分流体域剖面
Fig. 2 Section of partial fluid domain of single tube

采用压力 - 速度耦合的压力关联方程半隐式方法 (SIMPLE) 获得压力场;使用基于最小二乘单元的方法评估梯度,以适应网格的混合特性;采用全二阶迎风格式,所有方程的收敛标准是所有残差为 10^{-4} ,能量残差为 10^{-6} ;监控出口流速等参数;选取相同均匀性指数的预混通道出口截面作为衡量燃料/空气掺混性能评估的参考截面。

2.2 模型分析及网格无关性验证

Liu 等人^[23]通过对微混燃烧器进行实验,验证掺混的影响。通过对实验模型进行简化分析,与模拟结果进行对比。实验简化计算域模型如图 3 所示,其中 D_f 为燃料入口直径, d 为空气入口处弧型半圆直径。

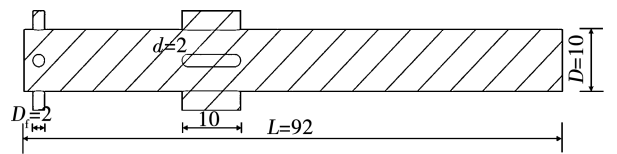


图 3 实验简化计算域 (mm)
Fig. 3 Experimental simplified computational domain (mm)

对微混燃烧器出口的流速进行监测,获得出口处不同位置的轴向速度分布。实验与模拟结果对比如图 4 所示。其中纵坐标表示截面速度的无量纲化,横坐标 r/D 表示径向半径的无量纲化。由图 4 可知,燃烧室喷嘴出口速度分布具有对称性,模拟结果很好地表示了实验中速度边界层的位置,但整体低估了喷嘴间的平均速度。边界层内的速度表现出较大的差异,是由微混燃烧器上游的复杂结构导致

的。但模拟结果总体上与实验数据吻合较好,从而证明了模型的可靠性。

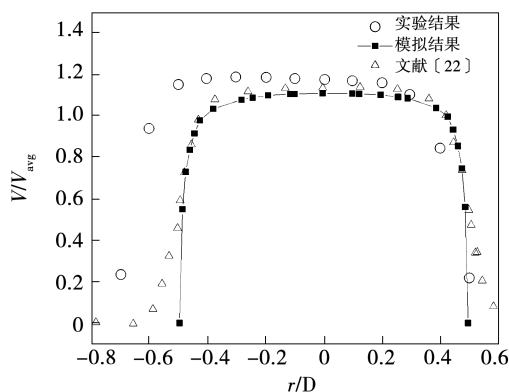


图4 实验与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and simulated results

用 Fluent-Meshing 软件绘制结构化网格,在 $D_a = 3 \text{ mm}$ 的情况下,分别采用 24 万、34 万和 46 万网格尺寸进行无关性验证,选择对计算结果影响忽略不计的网格尺寸,使用管道中心线流速的最短收敛时间,如图 5 所示。取径向截面中心线上轴向速度对比,在相差不超过 5% 的情况下,即可认为网格无关。

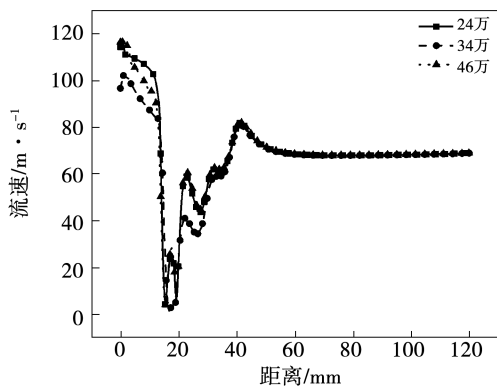


图5 网格无关性验证

Fig. 5 Grid independence verification

而对于速度来说,3 种网格结构计算出的速度分布差别不大,说明网格密度对计算结果影响不大。考虑实际计算时间及精度,故采用 34 万的网格。

3 结果与讨论

3.1 空气孔径对混合均匀性的影响

在固定空气孔间距 $S = 9 \text{ mm}$,第 1 排空气孔与燃料主流入口面间距 $L_1 = 19 \text{ mm}$ 的条件下,分析不

同空气孔径的燃烧器对掺混特性的影响,采用空气多孔垂直喷射,空气孔径取 2,3,4,5 mm,研究其对混合的影响。在检测 D_a 变化对混合的影响时,保持其他孔径不变,空气质量流量为 0.0706 kg/s ,考虑了 3 排空气孔,单排 4 个周向等距(90° 间隔)空气入口,选择适合的空气孔径尺度降低预混不均匀度。

图 6 为不同 D_a 值空气入口附近径向剖面 CH_4 质量分数着色速度矢量图。由图 6 可知,随着 D_a 的增大,燃料/空气射流速度差异越大,在相同空气质量流量的情况下,空气不能有效地渗透并在射流横流附近与燃料进行水力混合,更多的空气被限制在壁面区域,空气射流过浅,导致燃料与空气无法进行充分混合。在较低 D_a 时混合效果较好,因为较低的 D_a 使空气的射流速度增加,燃料/空气动量比较小,射流更深。而过小的 D_a 会使燃料与空气难以在有限区域内进行充分混合,导致预混段长度增加,压损增大。选择合适的 D_a 使得空气与燃料在喷射点附近有更好的流体动力混合,下游分子动力扩散更强。

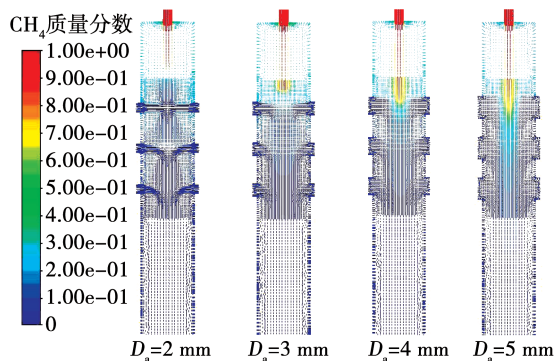


图6 径向剖面 CH_4 着色速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector diagram of CH_4 coloring in radial section

图 7 为湍流度、相对压损、最短预混段长度和射流深度随空气孔径的变化。由图 7 可知,在考虑的所有 D_a 值中,3 mm 附近显示出更好的混合效果,这表明在管径为 12 mm 的微混管中,最佳掺混空气孔径为 3 mm 左右,此时射流深度达到半径的 $1/3$ 。

通过设置微混管的平均偏差来量化混合的均匀性,采用了 10% 的偏差值。同样,温度的变化也反映了混合均匀的程度。图 8 为在相同均匀性指数处的 CH_4 质量分数及温度分布云图。

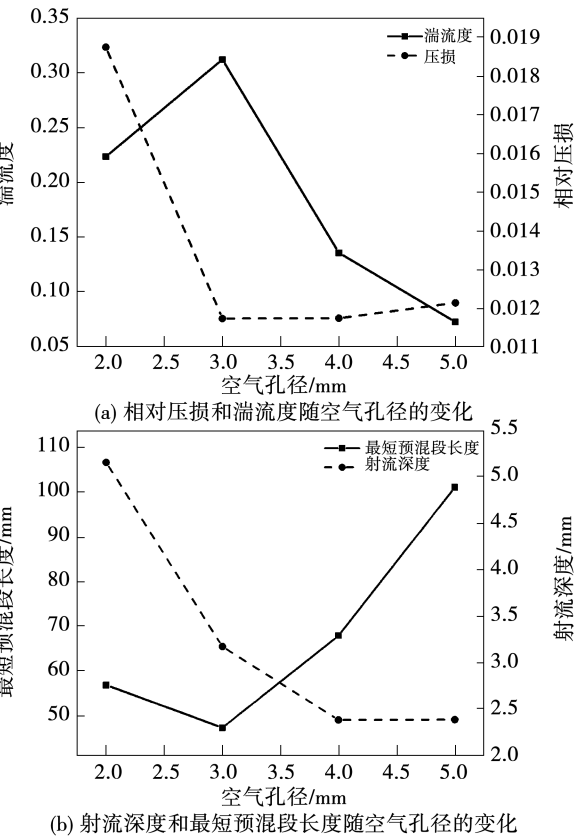


图 7 参数随空气孔径的变化
Fig. 7 Variation of parameters with air hole diameter

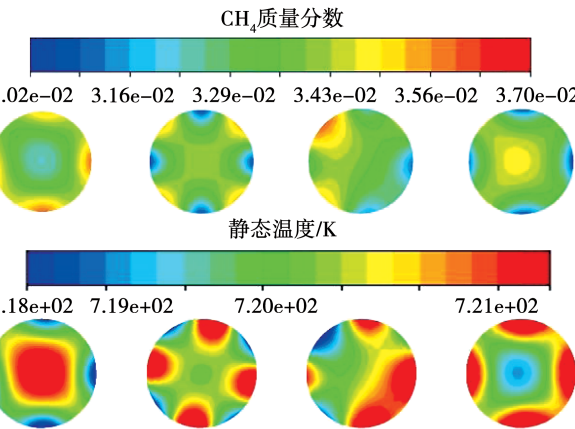


图 8 相同均匀性指数处的 CH_4 质量分数及温度分布
Fig. 8 Mass fraction and temperature distribution of CH_4 under the same uniformity index

图 8 仅显示 CH_4 质量分数在规定偏差范围内的部分。从轮廓变化范围和趋势来看,在 $D_a=3\text{ mm}$ 附近 CH_4 质量分数分布及温度分布不对称偏差较小,不对称偏差越小,混合效果越好。这说明混合质量的好坏不是入口空气孔径的直接函数,因为 $D_a=$

3 mm 时比 $D_a=2\text{ mm}$ 时的混合质量高。

3.2 空气孔间距对混合均匀性的影响

在 $L_1=19\text{ mm}$,空气孔径分别为 3 和 4 mm 时,改变空气孔间距,间距设定为 5,7,9,11 mm,其余各量均保持不变。图 9 表示两种空气孔间距下预混段长度的变化。

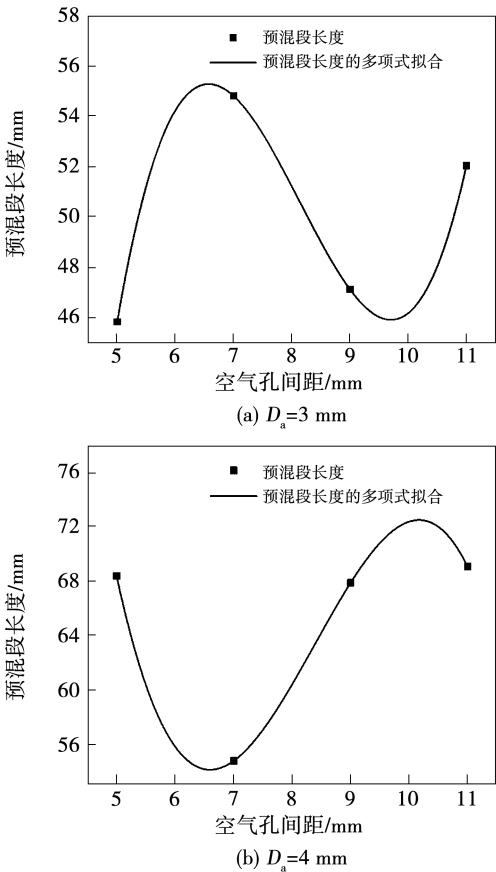


图 9 不同空气孔间距下预混段长度的变化
Fig. 9 Variation of premixed section lengths under different air hole spacings

由图 9 可知,在 $D_a=3\text{ mm}$ 时,在 $S=9\text{ mm}$ 附近达到最佳预混效果;而 $D_a=4\text{ mm}$ 时,在 $S=7\text{ mm}$ 附近的掺混效果更好。故当空气孔径增大时,其最佳空气孔间距会减小。因为随着空气孔径的增大,流速减小,各排空气孔间的相互作用力减小,则孔间距减小。

3.3 第 1 排空气孔与燃料主流入口平面间距对混合均匀性的影响

固定空气孔径 $D_a=4\text{ mm}$,采用单排孔空气入口,空气孔高度为 1 mm,空气质量流量选取为原来的 $1/3$,其余条件不变,研究第 1 排空气孔与主流燃

料入口平面的距离 L_1 对掺混效果的影响。取 L_1 为 3, 11, 19, 27, 35 mm, 研究在相同均匀性指数情况下的预混段长度变化对掺混的影响, 计算域如图 10 所示。

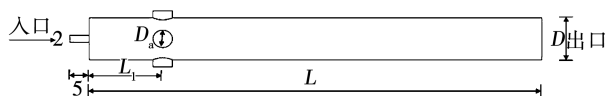


图 10 单管单排空气孔微混管计算域 (mm)

Fig. 10 Calculation domain of micro mixing tube with single tube and single row of air holes (mm)

图 11 为相同均匀性指数条件下的预混段长度变化。 L_1 越大, 空气与燃料混合越晚, 燃料流速降低, 空气与燃料掺混较好, 所需预混段越短。但 L_1 不能无限增大, 过长的 L_1 会导致燃料与空气混合过晚, 燃料的流速降低, 燃料与空气的动力混合较低, 导致达到均匀时预混段长度增加, 压损增大。故存在一个最佳间距, 使得达到掺混均匀时的混合距离较短。在 $L_1 = 3$ mm 处预混段长度较短, 因为过短的 L_1 使得燃料与空气几乎同时进入, 空气与燃料掺混过早, 预混段长度相对较短。由图 11 可知, 在计算区间内, L_1 与预混段长度呈现出四次多项式的趋势。在所选区间范围内, $L_1 = 27$ mm 附近时可达到最短的预混段长度。

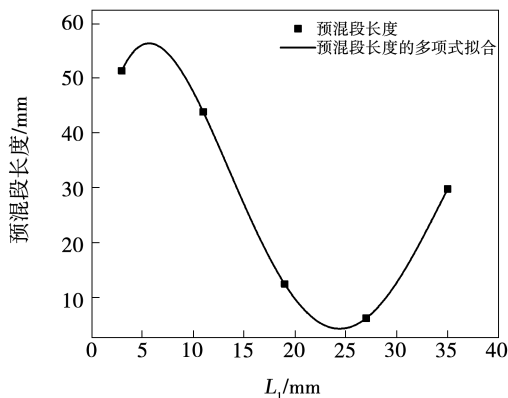


图 11 相同均匀性指数情况下的预混段长度

Fig. 11 Length of premixed section under the same uniformity index

图 12 为在相同出口均匀性指数的情况下, 各个最短预混短长度出口处以及轴向剖面的 CH_4 质量分数分布云图。图 13 为湍流度和相对压损随 L_1 的变化趋势图。

由图 12 和图 13 可知, 在所选参数 $L_1 = 27$ mm 附近, 能够获得最佳参数范围以及最优掺混结构。上文针对单排孔的 L_1 进行了研究, 而对于 3 排孔的结构来说, 在固定 $D_a = 3$ mm 的前提下, 取不同的 L_1 参数, 确定最佳空气孔间距 S , L_1 仍取 3 ~ 35 mm 中的 5 个参数。

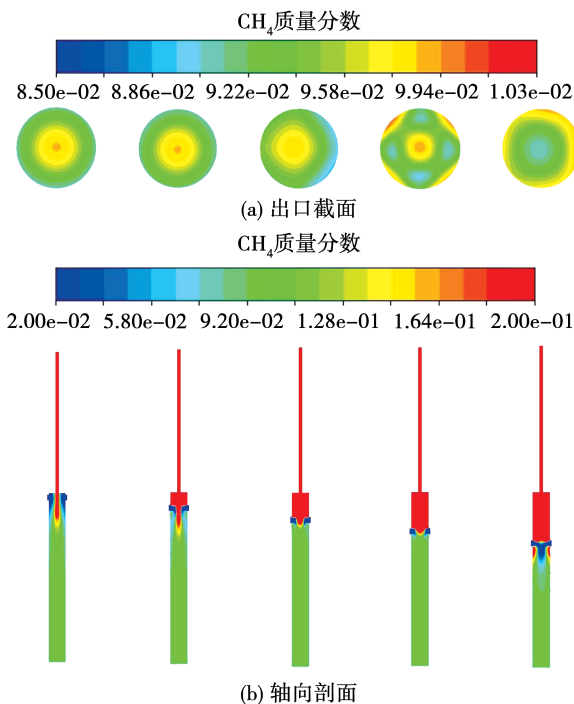


图 12 出口及轴向剖面 CH_4 质量分数分布

Fig. 12 Mass fraction distribution of CH_4 at outlet and axial section

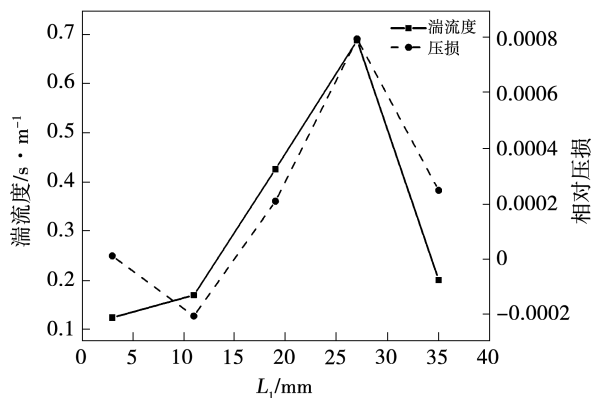


图 13 湍流度和相对压损随 L_1 的变化趋势

Fig. 13 Change trend of turbulence intensity and relative pressure loss with L_1

图 14 为固定 D_a 时空气孔间距随 L_1 的变化趋势。由图 14 可知, 当固定 $D_a = 3$ mm 时, 在给区

间内压损和湍流度大致趋势是随着 L_1 的增加而减小。由于压损、预混段长度的相对变化影响较小,故湍流度为主要影响因素,即在 $L_1 = 3\text{ mm}$ 处, $S = 5\text{ mm}$ 时可取得最佳混合效果;在 $L_1 = 11\text{ mm}$ 处, $S = 7\text{ mm}$ 时混合效果较好;在给定范围内 $L_1 > 11\text{ mm}$ 时, $S = 9\text{ mm}$ 时混合效果较好。较小的 L_1 和 S 可取得更好的混合效果,因为较小的 L_1 和 S 可以在保证燃料流速的情况下使空气与燃料较早的混合。

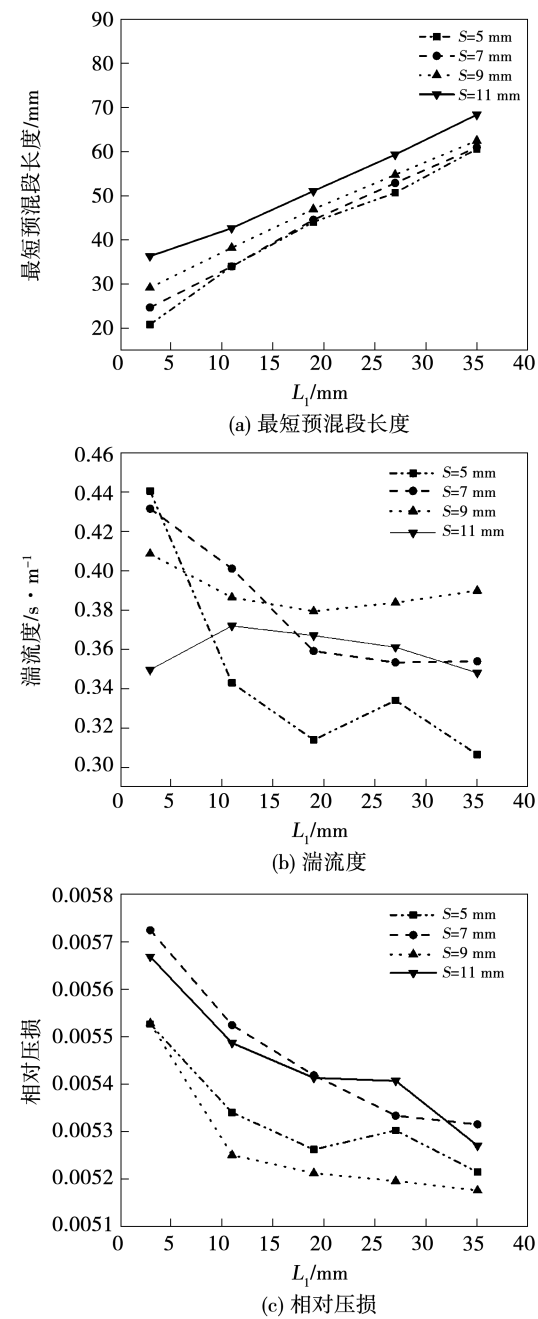


图 14 固定 D_a 时在不同空气孔间距下各参数随 L_1 变化
Fig. 14 Change trend of each parameter with L_1 under different air hole spacings at fixed D_a

3.4 D_a, H 和 V_a 对混合均匀性的影响

给定空气入口速度为 60 m/s ,在空气孔数量一定的条件下,改变空气孔径为 $2, 3, 4, 5\text{ mm}$,研究均匀性指数衰减 1% 时,预混段长度及评估指标的变化趋势,结果表明,在 $D_a = 3\text{ mm}$ 处的参数指标较好。

图 15 为相同流速下参数随空气孔径的变化。由图 15 可知,在相同空气流速 ($V = 60\text{ m/s}$) 的条件下,随着 D_a 的增大,达到相同均匀性指数处所需的预混段长度越长,从而增大了压损的沿程损失,导致总压损增大。在 $D_a = 3\text{ mm}$ 处,达到预混的最佳效果。

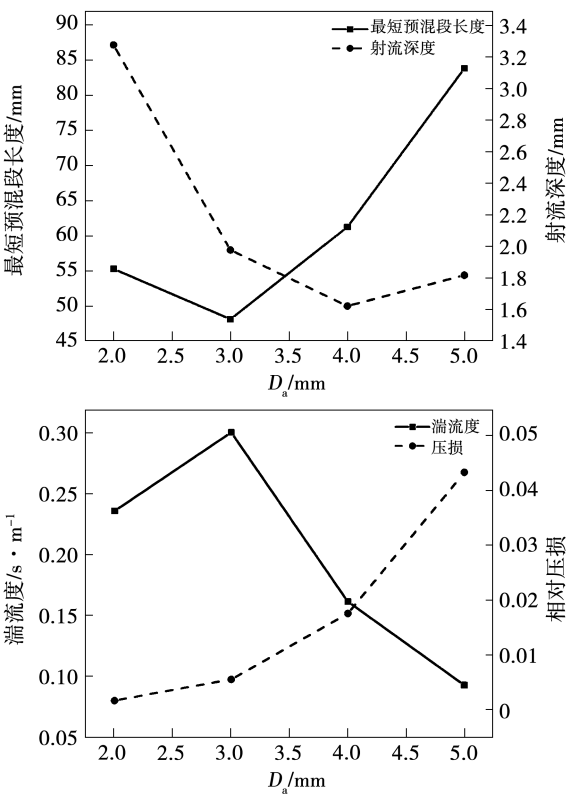


图 15 相同流速下空气孔径对混合质量的影响
Fig. 15 Effect of air hole diameter on mixing quality at the same flow rate

设定空气孔直径为 3 mm ,改变空气孔流速,研究其对混合质量的影响,空气孔流速为 $50, 55, 60, 65, 70\text{ m/s}$ 。图 16 为相同空气孔径下不同流速对混合质量的影响。由图 16 可知,在 $V_a = 70\text{ m/s}$ 时,可达到最佳掺混效果,此时射流深度达到 2.4 mm 。

参数间的关系可用图 17 表示。通过函数关系

来预测不同工况下各参数的关系,实现结构的最优化。

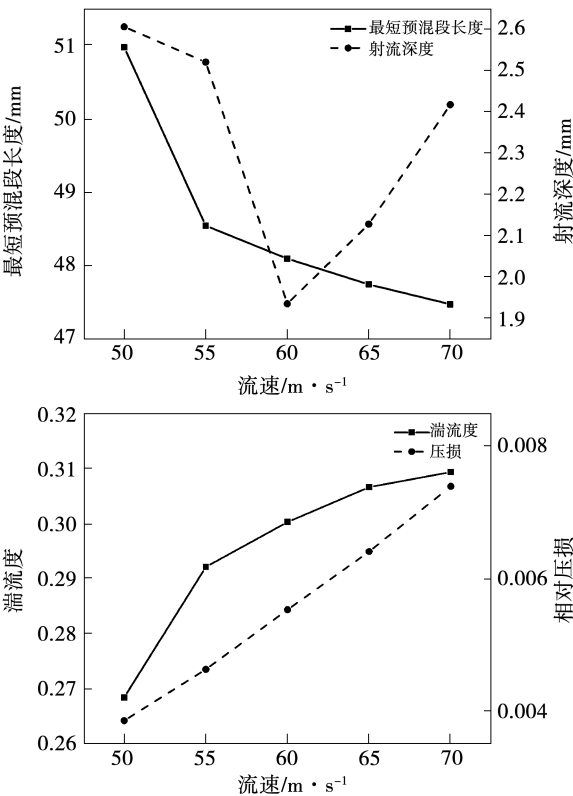


图 16 相同孔径下不同流速对混合质量的影响
Fig. 16 Effect of different flow velocities on mixing quality under the same aperture

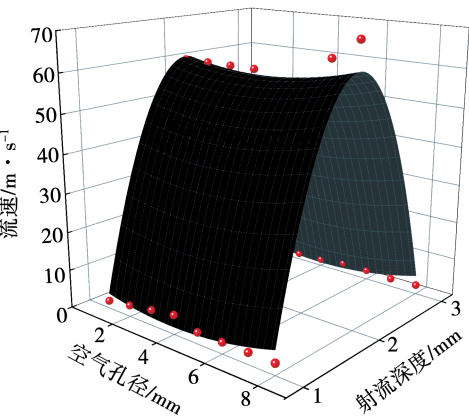


图 17 射流深度、空气孔径、空气流速的关系图
Fig. 17 Relational graph of jet depth, air hole diameter and air velocity

由图 17 可得某正区内的射流深度 H 与空气孔径 D_a 、空气流速 V_a 的函数关系式:

$$V_a = h_0 + a D_a + b H + c D_a^2 + d H + f D_a H \quad (13)$$

式中: a, b, c, d, f —系数, h_0 —流速为 0 时关于空气孔径的常数,取值为 -165 。

式(13)函数中各系数取值如表 2 所示。为保证函数的准确性与精度,函数中的系数取值均保留小数点后 4 位有效数字。

表 2 函数关系中的系数取值
Tab. 2 Coefficient value in function relation

系数	取值
a	-1.9886 ± 1.6049
b	228.5356 ± 6.2725
c	0.2568 ± 0.1537
d	-57.2298 ± 1.4944
f	-0.0214 ± 0.3765

4 结 论

(1) 在单管微混燃烧器中,空气孔径会影响燃料和空气的掺混,掺混效果随着直径的减小而改善。因为空气入射速度增加,与燃料主流渗透更好,两种流体相互作用增强,从而改善混合质量。但在 3 mm 附近获得最佳的混合效果,这表明掺混均匀度与燃空动量比有关,不是空气孔径的直接函数。

(2) 空气孔间距的改变可影响预混段长度,孔间距过近,会使空气之间影响增强,导致空气无法充分扩散,影响与燃料的混合,若孔距过远会使相互间影响逐渐减弱,导致预混段长度过长,压损增大。结果表明,空气孔间隙在 9 ~ 11 mm 范围内可实现更好的掺混效果。

(3) 改变空气孔与燃料主流入射面之间的距离,其与最短预混段长度存在一个四次多项式的函数关系, L_1 在 27 mm 处掺混效果较好。因为 L_1 达到燃料质量流量区间的 70% 处,在空气射入之前可使燃料达到充分扩散,从而增强与燃料的混合。

(4) 空气孔径、空气流速、空气射流深度所呈现的函数关系可以由已知量推测某区间内的未知量。在流速不变的情况下,随着 D_a 的增大,空气质量流量增大,所需预混段长度越长,从而增大了压损,故表明在较小 D_a 条件下掺混更好。同时,在 $D_a = 3$ mm 附近,实现较为均匀的混合。在最佳 D_a 的条件下,改变空气入口流速,结果表明,在 $V = 70$ m/s 时达到更好的掺混效果。

参考文献:

[1] YUNOKI K,MUROTA T,ASAI T,et al. Large eddy simulation of a multiple-injection dry low NO_x combustor for hydrogen-rich syngas fuel at high pressure[C]//Turbo Expo:Power for Land,Sea,and Air. American Society of Mechanical Engineers,2016,49767:V04BT04A056.

[2] CHEN X,TIAN Y,ZHANG S. CO₂ laser ablation microchannel based on koch fractal principle[J]. Surface Review and Letters, 2020,27(5):1950141.

[3] CHEN X,TIAN Y. Passive micromixer with baffles distributed on both sides of microchannels based on the koch fractal principle [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2020,95 (3): 806–812.

[4] LEE Y K,DEVAL J,TABELING P,et al. Chaotic mixing in electrokinetically and pressure driven micro flows[M]. Microreaction Technology. Springer, Berlin, Heidelberg,2001:185–191.

[5] BAU H,YI M,HU H H. A peristaltic meso-scale mixer [C]// ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2000, 19005: 367–374.

[6] ARAOYE A A,ABDELHAFEZ A,BEN M R,et al. On the quality of micromixing in an oxy-fuel micromixer burner for gas turbine applications;a numerical study[J]. Chemical Engineering and Processing,2021,162: 108336.

[7] MISHRA R K,NAVINDGI R D,SINGH K. Effect of geometrical parameters on the exit pattern factors of an annular combustor;an experimental study[J]. Journal of Aerospace Sciences & Technologies,2008,60(1): 77.

[8] SUN X,AGARWAL P,CARBONARA F,et al. Numerical investigation into the impact of injector geometrical design parameters on hydrogen micromix combustion characteristics[C]// ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition,2020.

[9] LONG P,SHE Y,CHEN H. Research on gas mixing characteristics and combustion performance of micro burner with different channel angle[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,IOP Publishing,2020,555(1): 012034.

[10] 邢畅,邱朋华,刘栗,等. 一种加湿微混燃烧器[P]. 中国: 202110038649. 2. 2021. 05. 28.
XING Chang, QIU Peng-hua, LIU Li, et al. A humidified micro mixing burner[P]. China:202110038649. 2. 2021. 05. 28.

[11] 孙宝成. 燃气轮机燃料/空气掺混规律的数值研究[D]. 北京: 清华大学热能工程系,2007.
SUN Bao-cheng. Numerical study of fuel/air unmixedness in a nonreacting gas turbine combustor [D]. Beijing: Departmen of Thermal Engineering of Tsinghua University,2007.

[12] 邵卫卫,赵岩,刘艳,等. 燃气轮机燃烧室预混燃烧器天然气燃料/空气掺混均匀性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017 37(3):795–802.

[13] SHAO Wei-wei,ZHAO Yan,LIU Yan,et al. Study on mixing uniformity of natural gas fuel and air in premixed burner of gas turbine combustor [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017,37(3):795–802.

[14] DANCKWERTS P V. The definition and measurement of some characteristics of mixtures[J]. Applied;Scientific Research;Section A,1952,3(4): 279–296.

[15] FRIC T F. Effects of fuel-air unmixedness on NO_x emissions[J]. Journal of Propulsion & Power,1993,9(5):708–713.

[16] 冯冲,祁海鹰,谢刚,等. 干式低 NO_x 燃气轮机燃烧室的燃料/空气预混均匀性问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(17): 9–19.

[17] FENG Chong,QI Hai-ying,XIE Gang,et al. Analysis of fuel/air premixed uniformity in dry low NO_x gas turbine combustor[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2011,31(17):9–19.

[18] LYONS V J. Fuel/air nonuniformity-effect on nitric oxide emissions[J]. AIAA Journal,1982,20(5):660–665.

[19] ZHANG T H,LIU F G,YOU X Y,et al. Optimization of gas mixing system of premixed burner based on CFD analysis[J]. Energy conversion & management,2014,85: 131–139.

[20] ZHANG F,ERRIGUIBLE A, MARRE S. Investigating laminar mixing in high pressure microfluidic systems[J]. Chemical Engineering Science,2019,205: 25–35.

[21] 赵岩. 天然气贫预混燃烧器燃空掺混与燃烧特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所),2016.

[22] ZHAO Yan. Study on the mixing and combustion characteristics of lean premixed natural gas burners[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2016.

[23] SMITH L M. Renormalization group analysis of turbulence[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,1998,30(1): 275–310.

[24] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社,2004.

[25] WANG Fu-jun. Computational fluid dynamics analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2004.

[26] 崔凯,张海,王卫良,等. 旋流燃烧器数值模拟中 Realizable *k*– ε 和 RSM 模型的比较[C]// 中国工程热物理学会,2011.

[27] CUI Kai,ZHANG Hai,WANG Wei-liang,et al. Realizable in numerical simulation of swirl burner *k*– ε comparison with RSM model[C]. Chinese Society of Engineering Thermophysics,2011.

[28] LIU X W,SHAO W W,LIU Y,et al. Cold flow characteristics of a novel high-hydrogen micromix model burner based on multiple confluent turbulent round jets[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(7):5776–5789.

(刘颖 编辑)