

小型天然气锅炉低氮燃烧技术的数值模拟和实验研究

刘效洲, 朱光羽

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006)

摘 要:为实现小型天然气锅炉低氮排放,针对 0.2 MW 天然气锅炉,开发出一种以烟气再循环和燃料预混贫氧燃烧技术为基础的小型天然气锅炉专用低氮燃烧器。对此燃烧技术的排放特性进行了数值模拟研究,分析了烟气再循环率、预混段长度以及多孔板孔径等因素对 NO_x 排放量的影响,搭建了相应的实验台进行热态实验并对其设计合理性进行了验证。被热态实验证实的小型天然气锅炉低氮燃烧器较佳结构参数为:烟气再循环率为 20%,相应烟气速度为 35 m/s,预混段长度为 100 mm,多孔板孔径为 5 mm,燃料喷孔孔径为 3 mm。研究表明:小型天然气锅炉低氮燃烧器采用贫氧预混燃烧技术和烟气再循环技术能够显著降低 NO_x 排放量,与传统燃烧器相比, NO_x 排放量减少 68%。

关 键 词:烟气再循环;贫氧预混燃烧;冷热态实验;低 NO_x 排放;数值模拟

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdgc.2022.01.018

[引用本文格式]刘效洲,朱光羽. 小型天然气锅炉低氮燃烧技术的数值模拟和实验研究[J]. 热能动力工程,2022,37(1):132-142. LIU Xiao-zhou, ZHU Guang-yu. Numerical simulation and experimental research on low nitrogen combustion technology of small scale natural gas boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1):132-142.

Numerical Simulation and Experimental Research on Low Nitrogen Combustion Technology of Small Scale Natural Gas Boiler

LIU Xiao-zhou, ZHU Guang-yu

(School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510006)

Abstract: Aiming at 0.2 MW natural gas boiler, based on flue gas recirculation and lean oxygen fuel premixed combustion technology, a special low nitrogen burner for small-scale nature gas boiler was developed for the purpose of realizing low nitrogen emission of small-scale natural gas boiler. Compared with the exhaust characteristics of the combustion technology, the numerical simulation study was carried out, the effects of flue gas recycling rate, the length of premixed section and the aperture of porous plate on the NO_x emission were analyzed, and the corresponding experimental bench was constructed to conduct the hot state experiment and verify the rationality of the design. The optimum structural parameters of low nitrogen burner of small-scale natural gas boiler confirmed by the hot state experiment were as follows: the flue gas recycling rate was 20%, the relevant speed of flue gas was 35 m/s, the length of premixed section was 100 mm, the aperture of porous plate was 5 mm, and the fuel injection hole diameter was 3 mm. The research results show that low nitrogen burner of small-scale natural gas boiler can significantly reduce NO_x emission by using lean oxygen premixed combustion technology and flue gas recirculation technology, compared with traditional burners, NO_x emission is reduced by 68%.

Key words: flue gas recirculation, lean oxygen premixed combustion, cold and hot state experiments, low NO_x emission, numerical simulation

引 言

如今全球各国共同面临的两大问题是能源和环境,对能源消耗所产生排放物成分及数量的要求越发严格,用天然气逐步替代煤炭等化石燃料成为我国能源发展的主题之一^[1]。随着燃气锅炉大量投入工业生产,其排放污染物中 NO_x 的特性成为众多学者的研究对象^[2]。NO_x 是天然气燃烧过程中污染较为严重的排放物,是一种具有刺激性气味且毒性强的气体^[3],会对居民的生命造成严重危害,甚至导致各种传染性疾病的产生,影响国民经济的发展。而小型天然气锅炉数量多、应用广,随着环保要求的日益严格,如何降低 NO_x 排放量已经成为亟待解决的环保问题。解决这个问题的主要手段是采用烟气再循环和贫氧预混燃烧技术。因此,本文使用数值模拟与实验结合的方法,对小型天然气锅炉低氮燃烧技术进行了理论和实验研究,为小型天然气锅炉低氮燃烧设备的开发和优化设计提供了参考依据^[4]。

1 设计原理

采用烟气再循环和贫氧预混燃烧技术是目前实现天然气低氮燃烧的主要手段^[5-10]。其中,烟气再循环技术是通过在火焰区域加入尾部烟气的方式来降低生成物中 NO_x 的质量分数^[11-12]。通入烟气可以使燃料与空气充分混合,从而减少快速型 NO_x 的生成。另外,烟气的温度相对较低,通入到火焰区域可以降低燃烧时的温度,使氧气的温度和压力都降低,O₂ 和 N₂ 发生反应生成热力型 NO_x 的反应速率降低,所以生成物中的 NO_x 的质量分数降低。但是,目前烟气再循环技术主要应用于大型天然气锅炉燃烧器^[13-14],在小型锅炉燃烧器上的应用未查询到相关文献。再循环烟气的引入会降低燃烧温度,容易产生燃烧不稳定的现象,这一点在小型天然气锅炉的应用上格外突出。解决这一问题的有效手段之一是使用贫氧预混燃烧技术,即通过控制燃气/空气当量比的数值对燃烧温度进行控制。其采用预混燃烧的方式,可以在较低燃烧温度下使火焰趋于稳定,是一项能够有效降低 NO_x 排放量的燃烧技术。因此,

可以采用烟气再循环技术和预混贫氧燃烧技术相结合的方法设计小型天然气锅炉低氮燃烧器。

2 燃烧器结构

低氮燃烧器的工作原理是将锅炉排出的烟气抽出后再切向送入燃烧器的外壳,经高速旋转后喷出,进入燃烧器的头部缩口空腔内;部分燃烧所需空气经过多孔板 1 整流后与天然气充分预混,然后经多孔板 2 均匀喷出后进入燃烧器的头部缩口空腔内,与高速旋转的再循环烟气进一步混合燃烧,形成高温低氧的弥散燃烧环境,可以有效降低 NO_x 的生成量。因此,此燃烧器主要采用了烟气再循环和贫氧预混燃烧相耦合的技术来实现低氮燃烧。

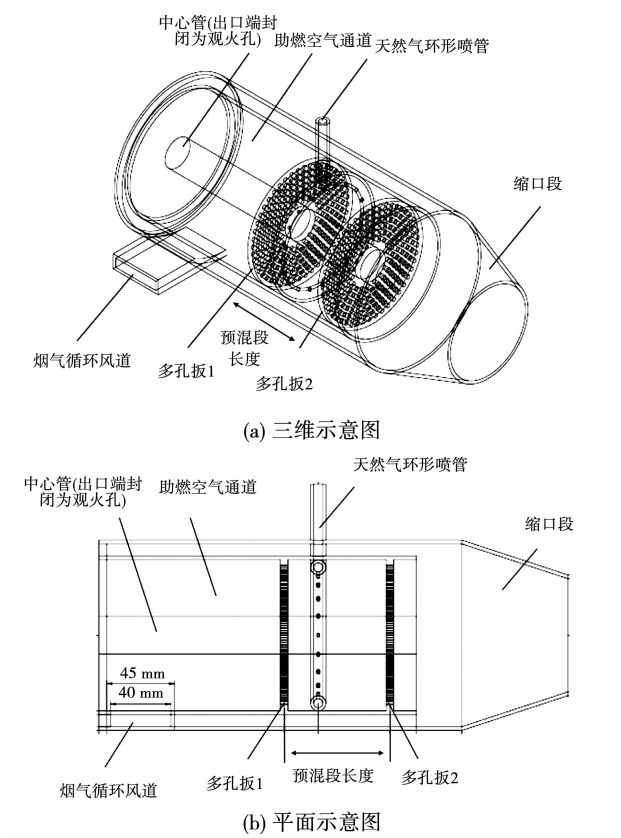


图 1 天然气低氮燃烧器结构简图
Fig. 1 Schematic diagram of the structure of natural gas low-nitrogen burner

3 数值模拟

3.1 模型选择

使用 Fluent 仿真软件对小型天然气锅炉进行数值模拟,在数值模拟中使用预混燃烧模型。因为在

小型低氮燃烧器内的流动状况为湍流,炉内气体的流动模型将采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型。考虑到标准 $k-\varepsilon$ 流动模型在湍流流动中应用范围较广,计算量适中,且有较多的数据积累和精度,因此使用 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型计算流动场。锅炉内的复杂燃烧过程会产生热辐射,需要选择适合的热辐射模型进行计算。离散坐标辐射模型(DO 模型)适用于所有光学厚度的场合,同时考虑半透明介质中的辐射(折射和反射)应用场合较多,非常适用于计算燃烧等复杂工况,因此使用 DO 模型计算辐射传热。在 NO_x 的数值计算中采用扩展 Zeldovich 模型,只考虑热力型 NO_x 和快速型 NO_x 对 NO 生成的影响。Zeldovich 模型主要描述燃烧过程中 NO_x 的生成机理,具体过程为空气中的氮气在高温状况下氧化生成 NO_x ,通过一组不分支的链式反应进行。由于热力型 NO_x 占比较大,因此选用 Zeldovich 模型计算更为合适。燃烧过程的数值计算将采用基于概率密度函数(PDF)的 β 函数形式。燃烧器网格划分如图 2 所示。

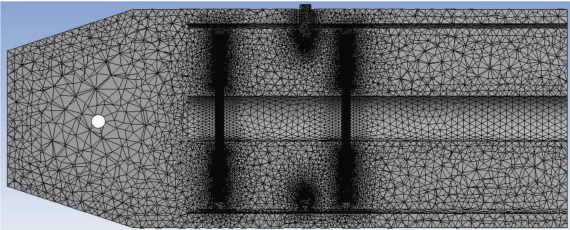


图 2 燃烧器网格划分
Fig.2 Mesh division of the burner

3.2 模拟工况

影响炉内燃烧空气动力工况的因素主要有烟气再循环流速(决定烟气再循环率的高低)、预混段长度和多孔板孔径。根据相关经验,烟气再循环风道中的烟气流速分别取 35 m/s 和 50 m/s,预混段长度取 65 mm 和 100 mm,多孔板孔径分别取 3 mm 和 5 mm。

这 3 个因素中,每个因素各取 2 个水平。如果采取全组合试验,则要安排 8 个工况,计算工作量较大。按照正交实验^[15]的试验组织原则安排,既获得了典型工况的计算结果,又将工况的数量控制在可以接受和实现的合理范围之内。不考虑各因素的交互作用,设计出一个 3 因素、2 水平的正交表,按照

此正交表确定的模拟工况具体参数如表 1 所示。

表 1 模拟工况参数表
Tab.1 Parameter list under simulation working conditions

工况	烟气速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	混合段长度/mm	多孔板孔径/mm
1	35	65	3
2	35	100	5
3	50	65	5
4	50	100	3

模拟工况参数表中烟气速度、混合段长度和多孔板孔径等因素的选取依据以往进行过的大型低氮燃烧器实验。

在大型低氮燃烧器实验中,发现烟气再循环率低于 20% 时,火焰非常稳定。当烟气再循环率超过 28% 时,火焰状态会发生过多跳动,出现不稳定现象,因此选取烟气再循环率的正常值上限为 20%,相对应的烟气再循环管中的烟气流速为 35 m/s。同样,选取烟气再循环率的临界值为 28%,由于再循环烟气管道的直径不变,相对应的烟气流速为 50 m/s。在大型低氮燃烧器实验中还发现预混段长度越大,空气与燃料预混越充分,对燃烧越有利。但是过长的预混段会导致燃烧器体积庞大,造价成本高。本文研究对象是小型低氮燃烧器,考虑到造价和现场安装情况,选取的预混段长度最大值不应超过 100 mm,因此选取 65 mm 和 100 mm 作为预混段长度。此外,在大型低氮燃烧器实验中还发现,多孔板的孔径越小,空气均流效果越好,空气-燃料混合特性越好,但同时也会带来较大的阻力,增加电耗,而且更容易堵塞喷孔。多孔板的孔径也不宜过大,否则空气均流效果将会变差。为了避免产生较大的阻力并防止发生堵塞喷孔现象,维持较好的空气均流效果,因此选取 5 mm 和 3 mm 作为多孔板孔径。

3.3 边界条件

在求解器中设置进口条件为质量流量进口,质量流量可根据进气量与管道截面积计算。出口条件设置为压力出口,压力值设置为等于大气压力。同时需要考虑水力直径和湍流强度。湍流强度 I 计算式为:

$$I = 0.16 Re^{-\frac{1}{8}}$$

(1)

燃烧器中燃气和空气的速度与湍流强度可根据天然气和空气的物性参数及消耗量得出。其边界条件设置如表 2 所示。

表 2 边界条件参数
Tab.2 Boundary condition parameters

参 数	燃气入口	空气入口
水力直径/m	0.037	0.091
运动粘度/mm ² ·s ⁻¹	17.071	15.787
密度/kg·m ⁻³	0.747 1	1.293
质量流量/kg·s ⁻¹	0.151 2	0.008
雷诺数 Re	20 234.6	48 688.3
湍流强度 I	0.046	0.041

在求解过程中,由于研究对象是稳态模型,因此使用适用性更好的 SIMPLE 算法 (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)。其原理是假设计算开始时,初始压力值和速度值是设定的,将初始压力值和速度值代入方程进行求解,将解出的预测值重新代入方程求解,直至收敛(即求出压力速度的真值)为止。

在数值计算中,所有壁面条件均设定为无速度滑移,燃烧器内的空气及燃料管道壁面传热条件设定为绝热。锅炉运行时,由于燃烧器入口处混合气体温度较低,火焰及高温区域主要集中在燃烧器的后半部,壁面温度随位置而变化,因此后段壁面使用温度变化函数的边界条件进行计算。在数值模拟研究中,燃烧器负荷设定为 100%。

主要对表 1 所示 4 种不同工况下的 NO_x 排放量、甲烷质量分数进行了数值模拟研究。

4 数值模拟结果及分析

4.1 燃烧器坐标系的建立

燃烧器整体截面如图 3 所示。为了进一步详细分析燃烧器各种模拟参数的变化趋势,对计算结果进行了部分提取,并生成相应的坐标曲线图,测点位置如图 4 所示,图中 x 轴代表对称轴, x' 轴代表非对称轴。由于燃烧器呈对称结构,只在中部和上部选取测点。

在划分云图区域时,考虑到燃料通过多孔板后点火开始燃烧(由于多孔板直径较小,不会发生回火现象),中间流动区域对结果的影响并不大,为了更清晰地表述,只选取缩口段作为展示区域,如图 3 所示。

4.2 可行性分析

为说明数值模拟的可行性,进行了网格无关性

验证与模拟-实验对比两种验证方式。

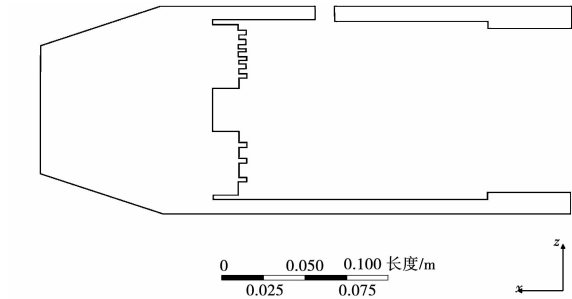


图 3 燃烧器整体截面图
Fig.3 Overall cross-sectional view of the burner

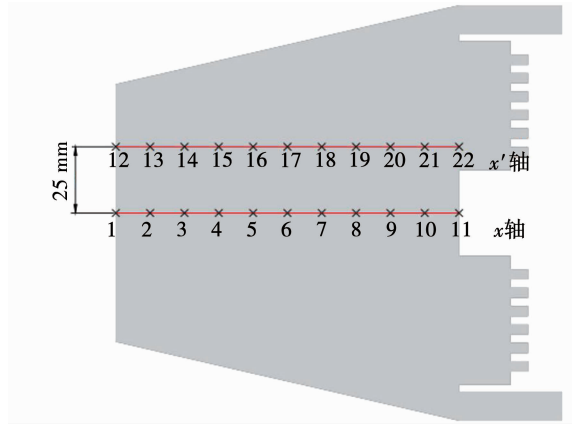


图 4 测点局部放大图
Fig.4 Partial enlarged view of the measuring point

网格无关性验证计算点的位置如图 2 中白点所示,以工况 2 中 6 号测点的甲烷摩尔分数分布为计算内容进行验证。验证结果表明,当网格达到 400 万个的时候甲烷摩尔分数不再随网格数量的变化而变化,所以在数值模拟中采用的网格合理数量为 400 万个,如图 5 所示。其次,还需要对模拟结果与实验结果做初步验证,取工况 1 的 12,16 和 20 号测点轴向速度进行对比分析,如图 6 所示。结果表明,模拟结果与实验结果误差在 10% 以内,说明后续的模拟计算是可行的。

4.3 NO_x 模拟计算结果

工况 1,2,3,4 的 NO_x 质量分数计算结果如图 7 所示。对称轴(x 轴)和非对称轴(x' 轴)上的 NO_x 质量分数分布如图 8 和图 9 所示。

从 NO_x 的数值模拟结果来看,工况 2 的排放质量分数最低。所有工况 NO_x 的排放质量分数都遵循一个规律,即 NO_x 在中间对称轴上呈现低-高-

低的分布规律,而在非对称轴上,呈现高 - 低的分布规律。

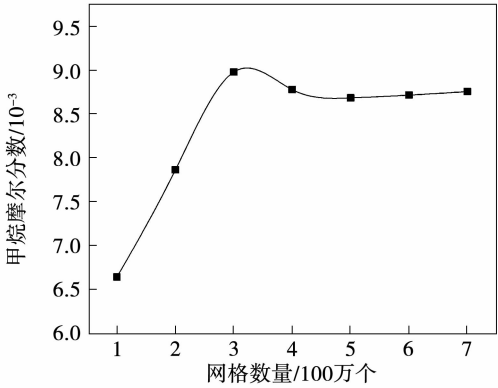


图 5 网格无关性验证

Fig.5 Mesh independent verification

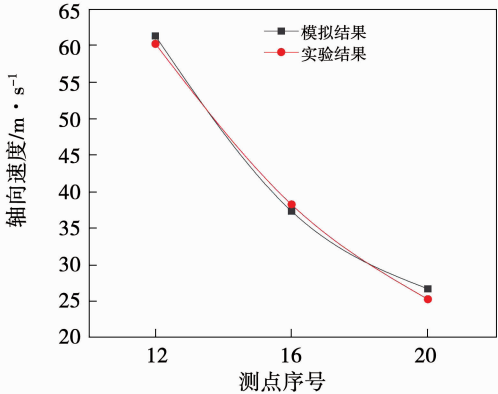


图 6 测点轴向速度比较 (工况 1)

Fig.6 Comparison of axial velocities at measuring points (under working condition I)

原因分析如下:就燃烧器轴向上测点而言,由于烟气回流卷吸的影响,燃烧器对称轴出口处烟气回流量最大,因此温度偏低,NO_x 质量分数较小;中间部分由于没有烟气回流的影响,燃料燃烧温度较高,因此 NO_x 质量分数变高;再向后测点位置处,由于燃料还未充分燃烧,温度也比较低,因此 NO_x 质量分数再次变低,所以呈现一种低 - 高 - 低的分布规律。而在非对称轴上,情况有所不同。由于烟气回流主要是集中在轴线方向,对非对称轴方向影响不大,而且还有再循环烟气的剩余氧量补充进来,燃烧器出口位置燃料燃烧极其充分,温度最高,NO_x 排放质量分数也比较高。而在沿着非对称轴方向向右的测点位置处,由于燃料还未充分燃烧,因此温度相对

偏低,NO_x排放质量分数也比较低,所以呈现高 - 低的分布规律。

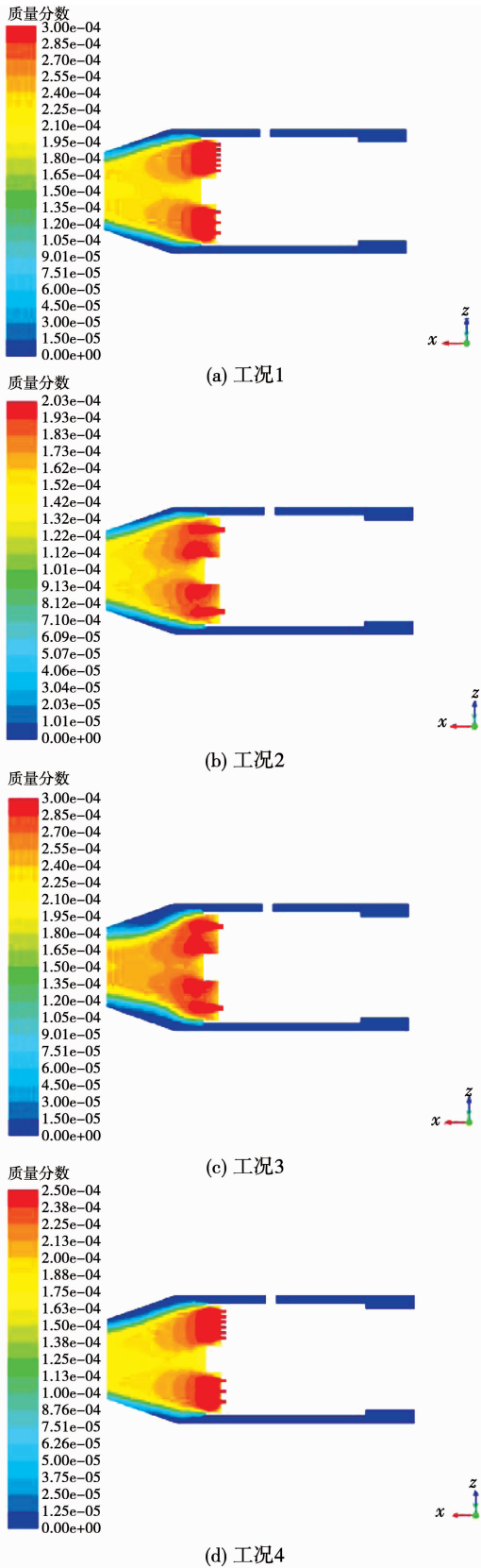


图 7 NO_x 质量分数

Fig.7 NO_x mass fraction

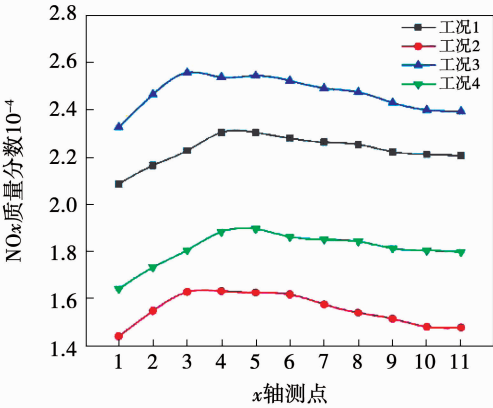


图 8 对称轴上 NO_x 质量分数分布

Fig.8 Distribution of NO_x mass fraction for the symmetric axis

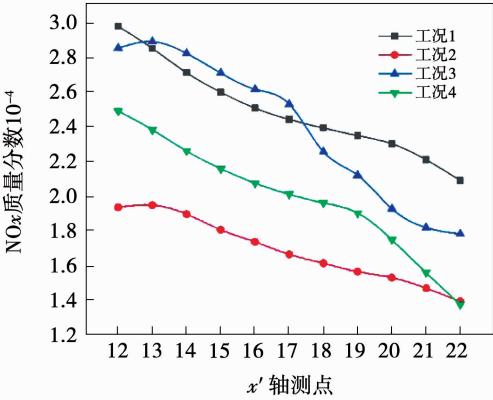


图 9 非对称轴上 NO_x 质量分数分布

Fig.9 Distribution of NO_x mass fraction for the asymmetric axis

从轴向上所有测点来看,靠近燃烧器出口处烟气回流量较大,导致温度偏低,可能会影响燃烧状况。但由于采用了预混燃烧技术,保证助燃空气能够事先均匀混合,因此在燃烧器出口处燃烧极为强烈,远高于传统的扩散燃烧方式。同时,在燃烧器出口处设计有缩口段,受到缩口结构的影响,燃气、再循环烟气和助燃空气迅速混合并聚拢压缩,发生强烈的燃烧反应,能够保证燃料的正常燃烧。

4.4 甲烷摩尔分数场模拟结果

工况 1,2,3,4 的甲烷摩尔分数计算结果分别如图 10 所示。

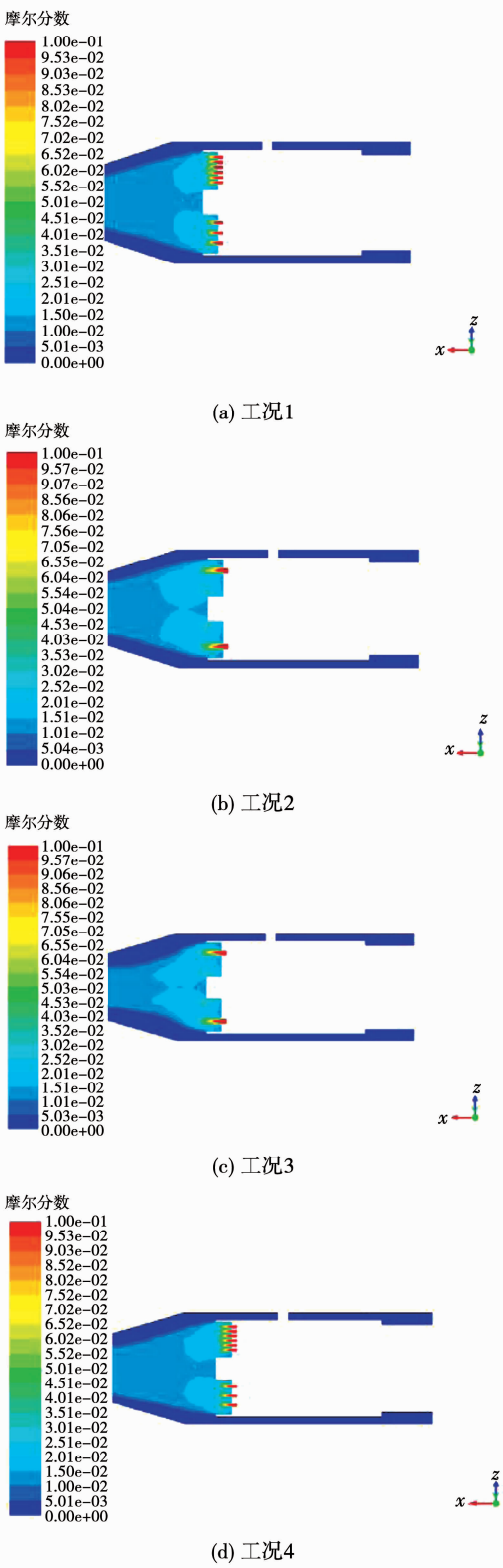


图 10 甲烷摩尔分数

Fig.10 Methane mole fraction

对称轴上甲烷摩尔分数场分布如图 11 所示。天然气主要成分甲烷的摩尔分数达到 95% 以上。

对称轴区域的甲烷摩尔分数分布与氧气质量分数分布类似,因为甲烷摩尔分数高说明燃烧反应较弱,相应的氧气质量分数也高;同理,反应剧烈时,甲烷摩尔分数急剧下降,氧气参与反应,氧气质量分数也会相应的急剧下降。

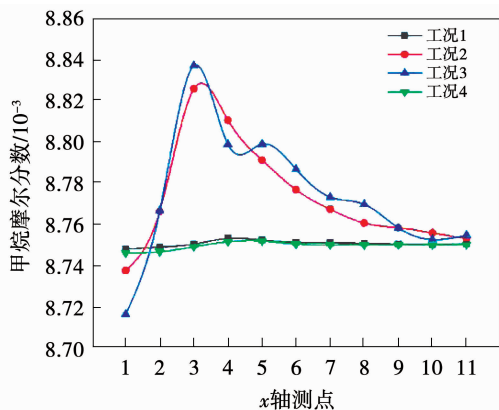


图 11 对称轴上甲烷摩尔分数分布

Fig. 11 Distribution of methane mole fraction for the symmetric axis

工况 1,4 混合效果比较好,甲烷摩尔分数很低,基本已经燃尽;而工况 2,3 混合效果比较差,直到燃烧器出口时燃烧过程才完成,因此在燃烧器出口处甲烷含量较低。工况 2,3 在 3~6 号点之间出现的高峰区是由于循环烟气的混入,降低了燃烧速度及氧气质量分数,导致局部缺氧,甲烷摩尔分数出现了峰值。

随着气体混合的不断加强,燃烧程度也在不断加强,在燃烧器出口处甲烷摩尔分数急剧下降,燃烧彻底完成,说明此燃烧器能够确保燃料燃尽,功能良好。

非对称轴上甲烷摩尔分数场分布如图 12 所示。非对称轴上甲烷摩尔分数分布呈现一种高-中-低的分布趋势,20~22 号测点区甲烷摩尔分数最低,因为此处预混气体和再循环烟气混合极其强烈,将此处区域的甲烷气体燃烧殆尽;而在 14~20 号区域,轴线区域喷出的甲烷和空气的混合物扩散到了此区域,导致甲烷摩尔分数略有上升;在 12~14 号区域,由于再循环烟气的混入,导致局部严重缺氧,燃烧速率大幅降低,所以在燃烧器出口处非对称轴区域,甲

烷摩尔分数偏高,需进一步使甲烷燃烧。这恰好满足高温、弥散、长火焰低氮燃烧技术的要求,可以有效降低 NO_x 的排放量。

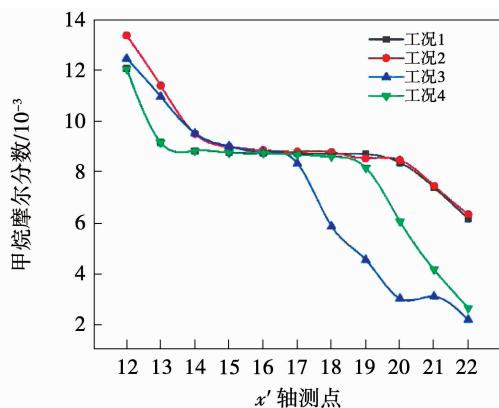


图 12 非对称轴上甲烷摩尔分数分布

Fig. 12 Distribution of methane mole fraction for the asymmetric axis

甲烷燃烧情况与 NO_x 分布有很大关联性。甲烷摩尔分数高,燃烧反应处于贫氧燃烧的状态, NO_x 排放量比较低。反之, NO_x 排放量相对比较高。此时,采用了预混燃烧技术使燃烧稳定。

4.5 数值模拟结论

使用正交实验法对工况 1~4 的甲烷摩尔分数和 NO_x 排放质量分数进行了数值模拟研究。从模拟结果可看出,工况 2 的 NO_x 排放质量分数只有 1.4×10^{-4} 左右,明显低于其他工况,比较理想。工况 2 不但 NO_x 排放质量分数低,而且甲烷在出口处明显已经燃尽,多孔板出口处的 NO_x 和甲烷分布也是均匀的,有效起到了均流作用,证明此种燃烧器的结构设计是合理的。根据数值模拟结果,可以推断出燃烧器的最佳工况是再循环烟气速度为 35 m/s,对应的烟气再循环率为 20%,预混段长度为 100 mm,多孔板通孔直径 5 mm。其合理性将通过热态实验做进一步的验证。

5 热态实验

多孔板孔径这一变量因素只在数值模拟中进行了研究,未在实验中进行研究。因为多孔板与低氮燃烧器采用焊接的方式连接在一起,极难拆除,在实

验中进行多孔板孔径的研究,势必要更换不同孔径的多孔板,对于现场实验来说几乎没有可行性,所以只在数值模拟中进行探究。

燃料喷孔孔径这一因素只在实验中进行研究,是考虑到数值模拟的网格划分中燃料喷孔孔径过小,且孔径附近的几何特征较为不规则,导致整体几何网格尺度差异极大,网格质量较差,收敛困难。也考虑到燃料喷射装置拆装方便,改造简单,所以在现场实验中进行燃料喷孔孔径研究。

实验台由燃气调节系统、烟气循环系统、引风系统、水冷系统、烟气检测系统等组成,如图 13 所示。来自引风机的烟气经过外循环管道进入低氮燃烧器的空气入口管,市政供应的管道天然气通过涡街流量计进入低氮燃烧器的燃气入口管。

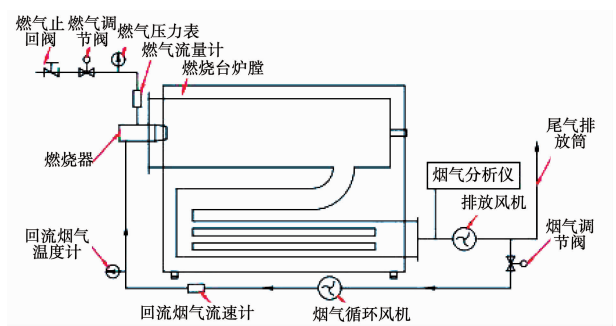


图 13 天然气低氮燃烧器热态实验台原理图
Fig. 13 Schematic diagram of the hot state test bench for natural gas low-nitrogen burner

实验研究在一台改建后的 0.2 MW WNS 全自动燃气热水锅炉上进行。此实验台采用卧式三回程炉胆湿背式结构,烟管全部浸在水中,炉膛内具有圆柱形波纹管结构。

热态实验中燃烧器的参数采用工况 2 中的设计参数,工况 2 是由数值模拟研究得出的最佳工况,实验的目的是验证工况 2 的合理性。由于针对多孔板孔径已经进行了数值模拟研究,因此在热态实验中,保持多孔板孔径为 5 mm 不变,保证数值模拟与实验研究的工况是一致的。

5.1 烟气再循环率对 NO_x 排放量的影响

由图 14 可知,当过量空气系数为 1.2,负荷为 100% 时,烟气再循环率的峰值为 23%,大于这个值

时火焰已经不稳定,对降低 NO_x 排放质量分数不会有影响;当负荷分别为 50% 和 80%,过量空气系数为 1.2 时,发现火焰在烟气再循环率达到 10% 和 15% 的时候已经不稳定,峰值变小。这里需要指出,天然气环形喷管上的喷孔按以往设计经验取 3 mm,预混段长度按照数值模拟结果取 100 mm。

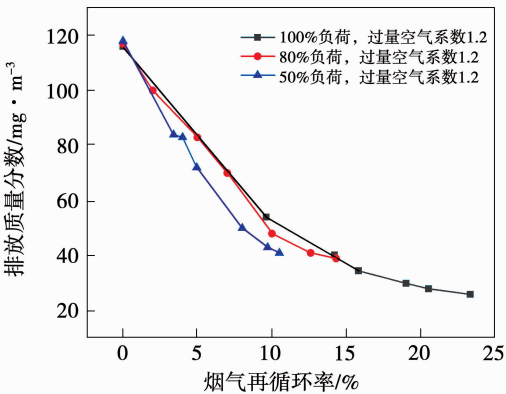


图 14 烟气再循环率对 NO_x 排放质量分数的影响
Fig. 14 Influence of flue gas recycling rate on NO_x emission mass fraction

由图 14 分析可知,当通过烟气循环系统向燃烧器内通入一定量的低温回程烟气时,能够显著降低燃烧器内的燃烧温度和高度区域面积,使内温度场分布更加均匀。原理是当回程烟气与空气混合后,空气所占比例大幅降低,氧气质量分数被稀释。燃烧效率与最高温度、氧气质量分数有很大关系,当氧气质量分数降低时,甲烷的最高燃烧温度相应降低;其次,经循环系统回程的烟气温度较低,在燃烧器内吸收了燃烧产生的部分热量,减少了燃烧器内的高温区域。循环烟气量越大,燃烧器内的温度越低,温度场分布越均匀。烟气再循环技术能够有效减少 NO_x 的生成,适当的烟气循环量可降低 20% ~ 70% 的 NO_x 排放量^[16]。但是最佳烟气再循环率不超过 23%。因此,取烟气再循环率为 20%,此时对应的烟气流速是 35 m/s,这与数值模拟的结果完全一致。

5.2 燃料喷孔孔径对 NO_x 排放量的影响

根据数值模拟结果,工况 2 效果最佳,此时多孔板通孔直径为 5 mm。除此之外,由于天然气燃料的

射流深度和掺混均匀性会受到燃料喷孔孔径的影响,不同的孔径大小都影响着 NO_x 的排放,所以燃料喷孔孔径的大小如何选取也是一个极为重要的问题。在工况 2 条件下,进一步研究了不同燃料喷孔孔径对燃烧器 NO_x 排放质量分数的影响,如图 15 所示。

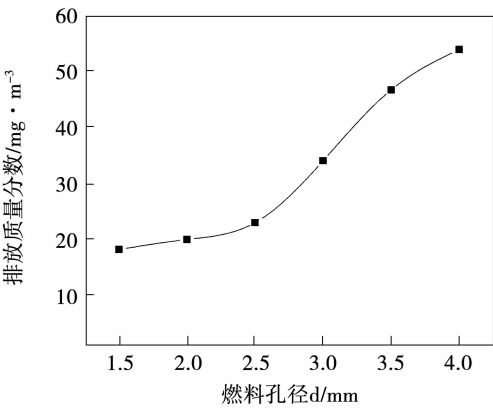


图 15 不同燃料孔径对 NO_x 排放质量分数的影响

Fig. 15 Influence of different fuel apertures on NO_x emission mass fraction

由图 15 可知,燃料孔径的大小对 NO_x 排放量的影响不大,曲线变化比较平缓。燃料孔径在 1.5 ~ 3 mm 之间变化时, NO_x 排放量变化不大,考虑到空气和燃气的流动阻力不能过大,因此不宜采用孔径过小的多孔板。根据实际设计经验,孔径为 3 mm 时流动阻力较小, NO_x 的排放量变化不大。因此,综合考虑流动阻力和 NO_x 排放量两个因素,认为燃料喷孔孔径取 3 mm 是合理的。

5.3 预混段长度对 NO_x 排放的影响

通过实验发现,天然气射流方向矢量与空气流通方向矢量呈 90° 关系,尽管预混段的空间距离很小,但天然气与空气在此处发生交叉射流预混,导致在此处停留时间会较长,影响了在多孔板上游的掺混,也为其提供了充分混合的条件。同样,在工况 2 条件下研究分析了五种不同预混段长度对 NO_x 的排放特性的影响,如表 3 所示。

不同预混段长度对 NO_x 排放质量分数的影响如图 16 所示。由图 16 可知,预混段越长, NO_x 排放

越低。但是预混段过长,势必导致燃烧器体积偏大,造价成本高,安装难度增大。因此,在综合考虑制造成本和安装难度两个因素的基础上,认为预混段长度取 100 mm 比较合适。

表 3 不同工况的预混段长度列表

Tab. 3 List of premixed section lengths under different working conditions

工况	预混段长度/mm
1	50
2	75
3	100
4	125
5	150

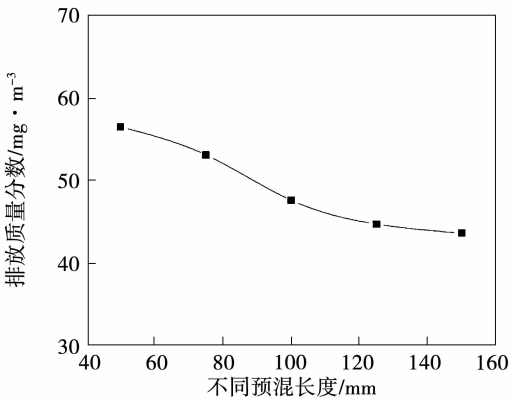


图 16 预混段长度对 NO_x 排放的影响

Fig. 16 Influence of premixed section length on NO_x emission

5.4 热态实验结论

由实验结果可以看出,当未设置烟气再循环系统时, NO_x 的排放质量分数最高,为 116 mg/m^3 ,如图 14 所示。随着烟气再循环量的增加, NO_x 的排放质量分数逐渐减小,且减小的速度越来越慢。当烟气再循环率为 23% 时,燃烧器内的 NO_x 质量分数最低,为 25 mg/m^3 。当烟气再循环率为 5%,10%,15%,20%,23% 时,其对应的 NO_x 排放质量分数分别为 95,55,42,31,25 mg/m^3 。由此可见,随着循环烟气量的增加, NO_x 的生成量逐渐降低,并且对现有燃气锅炉进行烟气再循环技术升级改造具有指导意

义。结论为烟气再循环率为20%时,不但 NO_x 排放质量分数低,而且燃烧状况稳定。

根据实验数据,设计的小型天然气锅炉低氮燃烧器采用贫氧预混燃烧和烟气再循环耦合技术,在烟气再循环率为20%的情况下,其 NO_x 排放质量分数值是 31 mg/m^3 ,与传统的燃烧器 NO_x 排放质量分数值 95.90 mg/m^3 相比^[5]减少68%,证实了低氮燃烧技术的合理性。

6 结 论

(1) 烟气再循环将促进烟气与炉内空气的充分混合,降低了氧气的体积分数,使燃烧器内高温区域分布均匀,营造出高温低氧的弥散燃烧状态,使燃料燃烧更充分。燃烧室的实际情况将会影响烟气再循环率的峰值,一旦超过这个数值,火焰将会熄灭,所以保持合理的烟气再循环率将使炉内的温差保持在比较低的水平,温度保持在较高的水平, NO_x 的排放量也将相应降低到最小值。烟气再循环率为20%时(此时烟气再循环流速为 35 m/s),不但 NO_x 排放量低而且燃烧稳定,是被推荐的较佳参数。

(2) 随着预混段长度的增加, NO_x 的排放量呈现下降趋势。因为此时天然气和预混空气混合的更加均匀,可以确保温度场分布均匀,杜绝局部高温区和大温差现象的出现,有效降低 NO_x 排放质量分数。但是预混段长度需在合理的范围内,得出最佳预混长度为 100 mm 。

(3) 多孔板的设置对于气体均流、促进燃料与空气混合有很大作用。但是通孔直径不能过小,以免阻力过大,得出最佳通孔直径为 5 mm 。

(4) 燃料喷孔孔径对 NO_x 的生成也有影响。孔径越小,燃料射流深度越深,混合越好,但阻力也大。综合考虑到阻力及堵塞问题,取燃料喷孔孔径为 3 mm 。

(5) 从热态实验结果来看,此小型低氮燃烧器 NO_x 减排效果显著,减排率达到68%,证实了此燃烧技术的有效性。同时证明数值模拟的结果是可信的,可以用来指导实际工程设计工作。

参考文献:

- [1] 曾叶丽,董秀成,朱 敏.新时期我国天然气工业发展战略转变探讨[J].天然气工业,2007,27(2):131-133.
ZENG Ye-li, DONG Xiu-cheng, ZHU Min. Discussion on China's natural gas industry development strategy orientation at a new era [J]. Natural Industry, 2007 27(2): 131-133.
- [2] 宋 杰.燃气锅炉尾气综合处理装置的设计研发[D].重庆:重庆大学,2016.
SONG Jie. The design and research of exhaust gas comprehensive treatment device for gas fired boiler[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [3] 王禹苏,张 蕾,陈吉浩,等.大气中 NO_x 的危害及治理[J].科技创新与应用,2019(7):137-138.
WANG Yu-su, ZHANG Lei, CHEN Ji-hao, et al. The harm and treatment of nitrogen oxide in the atmosphere[J]. Technology Innovation and Application, 2019(7): 137-138.
- [4] 李 杰.天然气低氮燃烧技术的研究现状及趋势[J].中国科技成果,2015(4):28-30.
LI Jie. Research status and trends of natural gas low nitrogen combustion technology [J]. China Science and Technology Achievements, 2015 (4): 28-30.
- [5] 杨琛琛.烟气再循环天然气预混燃烧器性能优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
YANG Cheng-cheng. Research on performance optimization of flue gas recirculation natural gas premixed burner [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [6] 范向军,李 军,傅 强.燃气锅炉烟气再循环脱硝技术浅析[J].区域供热,2018(6):37-43.
FAN Xiang-jun, LI Jun, FU Qiang. Analysis of flue gas recirculation technology for gas boiler [J]. District Heating, 2018 (6): 37-43.
- [7] 李 军,邱金海.29 MW 燃气锅炉低氮改造工程[J].暖通空调,2019,49(3):53-56,28.
LI Jun, QIU Jin-hai. Low NO_x retrofitting project of 29 MW gas boilers [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2019, 49(3): 53-56, 28.
- [8] 王 进.燃料氮及烟气再循环对垃圾焚烧炉出口 NO_x 质量分数的影响研究[D].杭州:浙江大学,2019.
WANG Jin. Effect of fuel nitrogen and flue gas recirculation on NO_x concentration at the outlet of MSW incinerator [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[9] 赵增武,苍大强,李保卫,等. 烟气再循环对高温空气平焰燃烧及其 NO_x排放特性的影响[A]. 2007 年中国机械工程学会年会论文汇编. 长沙: 中国机械工程学会,2007.

ZHAO Zeng-wu, CANG Da-qiang, LI Bao-wei, et al. Effect of flue gas recycle on combustion characteristics and NO_x emission of flat flame with HITAC[A]. The 2007 China Mechanical Engineering Society Annual Meeting Paper Collection. Changsha: Chinese Mechanical Engineering Society,2007.

[10] 张瑞峰. 燃气高温低氧燃烧温度场及 NO_x排放特性的研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.

ZHANG Rui-feng. Study on the temperature field and NO_x emission characteristics of gas high temperature and low oxygen combustion[D]. Nanjing: Nangjing University of Science and Technology,2009.

[11] 林 杨,李俊达. 不同燃料对 NO_x排放质量分数的影响[J]. 天津冶金,2016,(B08):57-58,61.

LIN Yang, LI Jun-da. Influence of different fuels on emission concentration of nitrogen oxide[J]. Tianjin: Tianjin Metallurgy, 2016,(B08): 57-58,61.

[12] 王 珏,赵向东. 基于烟气再循环的燃气炉低 NO_x排放性能研究[J]. 工业锅炉,2017(1):22-25.

WANG Jue, ZHAO Xiang-dong. Studies on NO_x emission of natural gas-fired boiler with internal flue gas recirculation[J]. Industrial Boilers,2017(1): 22-25.

[13] 李宗耀. 600 MW 机组低氮燃烧器与 SCR 改造的研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.

LI Zong-yao. Research of low nitrogen burner and SCR reconstruction in 600 MW unit[D]. Beijing:Beijing North China Electric Power University,2016.

[14] 段宏伟. 燃气锅炉低氮燃烧改造的主要安全风险问题分析及防范措施[J]. 中国特种设备安全,2019 36(6):62-64,84.

DUAN Hong-wei. Cause analysis and preventive measures of common security risks in the low nitrogen combustion alternation of gas boilers[J]. China Special Equipment Safety,2019,36(6): 62-64,84.

[15] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理(第三版)[M]. 北京:化学工业出版社,2017.

LI Yun-yan, HU Chuan-rong. Experiment design and data processing (3rd edition) [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2017.

[16] 杨禹坤. 燃气锅炉烟气再循环低氮技术研究[D]. 郑州:郑州大学,2018.

YANG Yu-kun. Research on low nitrogen technology of flue gas recirculation in natural gas boiler[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2018.

(刘 颖 编辑)