

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.005

# 基于反扩散燃烧的 $\text{CH}_4$ 燃烧特性及 $\text{NO}_x$ 排放的数值研究

孟 顺<sup>1</sup>, 宫好奇<sup>1</sup>, 杨文韬<sup>2</sup>, 刘 博<sup>3</sup>, 钱叶剑<sup>1</sup>, 徐 尧<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006;  
3. 安徽华夏蓝天机电设备有限公司, 安徽 池州 242800)

**摘 要:**反扩散燃烧具有火焰温度均匀、污染物排放低的特点。针对基于反扩散燃烧的天然气的低氮氧化物( $\text{NO}_x$ )燃烧器,文章利用 CFD 软件对燃烧器反扩散燃烧的燃烧特性进行数值研究,分析分级燃烧过程及热力型和快速型  $\text{NO}_x$  的生成特点,提出“气包风”的反扩散燃烧组织思想;研究不同过量空气系数、烟气再循环率对流场分布、温度场分布、 $\text{NO}_x$  排放特性的影响。研究表明:随着过量空气系数增大,火焰长度变短,燃烧速率变快,燃烧状况得到改善, $\text{NO}_x$  排放呈现先增加后减少的变化趋势;随着烟气再循环率的增加,炉膛内火焰平均温度与出口处  $\text{NO}_x$  排放均呈下降趋势,当烟气再循环率为 0.20 时,出口处  $\text{NO}_x$  排放降低约 95%,实现超低排放。该研究对反扩散火焰在工业生产中的应用具有一定的指导意义。

**关键词:**低  $\text{NO}_x$  燃烧器;反扩散燃烧;烟气再循环;分级燃烧;数值模拟

**中图分类号:**TK16 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)10-1328-07

## Numerical study on $\text{CH}_4$ combustion characteristics and $\text{NO}_x$ emission based on anti-diffusion combustion

MENG Shun<sup>1</sup>, GONG Haoqi<sup>1</sup>, YANG Wentao<sup>2</sup>, LIU Bo<sup>3</sup>, QIAN Yejian<sup>1</sup>, XU Yao<sup>1</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China; 3. Anhui Huaxia Blue Sky Electromechanical Equipment Co., Ltd., Chizhou 242800, China)

**Abstract:** Anti-diffusion combustion has the characteristics of uniform flame temperature and low pollutant emission. Aiming at the natural gas low  $\text{NO}_x$  burner based on anti-diffusion combustion, the combustion characteristics of anti-diffusion combustion of the burner are numerically studied by CFD software, the staged combustion process and the generation characteristics of thermal and rapid  $\text{NO}_x$  are analyzed, and the anti-diffusion combustion organization idea of “air bag wind” is put forward. The effects of different excess air coefficient and flue gas recirculation rate on flow field distribution, temperature field distribution and  $\text{NO}_x$  emission characteristics are studied. The results show that with the increase of excess air coefficient, the flame length becomes shorter, the combustion rate becomes faster, the combustion condition is improved, and the  $\text{NO}_x$  emission increases first and then decreases. With the increase of the flue gas recirculation rate, the average flame temperature in the furnace and the  $\text{NO}_x$  emission at the outlet both show a downward trend. When the flue gas recirculation rate is 0.20, the  $\text{NO}_x$  emission at the outlet decreases by about 95%, achieving ultra-low emission, which has guiding significance for the application of anti-diffusion flame in industrial production.

**收稿日期:**2022-12-14; **修回日期:**2023-03-01

**基金项目:**安徽省自然科学基金资助项目(1808085QE134);合肥市关键技术重大研发资助项目(J2020G33)

**作者简介:**孟 顺(1983—),男,安徽宿州人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师;

钱叶剑(1977—),男,安徽池州人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: qianyejian@163.com.

**Key words:** low  $\text{NO}_x$  burner; anti-diffusion combustion; flue gas recirculation; staged combustion; numerical simulation

## 0 引 言

随着我国碳达峰、碳中和目标的提出,对各个行业提出了新的要求,节能减排绿色发展成了新的课题,化石能源清洁高效利用是实现“双碳”目标的必经之路,天然气的高效清洁燃烧技术是实现气体燃料节能减碳的关键。

反扩散火焰与扩散火焰不同,其氧化剂流经燃烧器喷嘴的中心管道,而燃料从四周通入,由于正、反扩散火焰在燃料和氧化剂的混合方式上存在差异,导致反扩散火焰中产生的碳烟比扩散火焰中的碳烟少<sup>[1]</sup>,在气体燃烧过程中产生的污染物较少。

文献[2]以甲烷( $\text{CH}_4$ )氧气反扩散撞击火焰实验平台为基础,研究了  $\text{CH}_4$  反扩散撞击火焰的稳定性,为反扩散火焰反应器的结构设计提供了依据;文献[3]利用高光谱仪对不同空气流量的乙烯层流反扩散火焰数据进行测量发现,随着空气量的增大,火焰形状有变高、变宽的趋势;文献[4]研究了氧化剂的含氧浓度对同轴射流  $\text{CH}_4$  反扩散火焰光谱特性分布的影响,发现  $\text{CH}_4$  反扩散火焰具有明显的内外双层结构;文献[5]利用试验与理论相结合的方法,研究不同喷嘴直径、多火源喷嘴距离及热释放速率下的火焰高度和温度的演化规律。

采用分级燃烧的方法能够降低最高温度峰值,减少污染物的生成。文献[6]研究了燃气分级对氮氧化物( $\text{NO}_x$ )排放的影响,发现燃气分级燃烧时炉膛出口处的  $\text{NO}_x$  浓度有所降低;文献[7]设计了改进型的燃料分级式燃烧器,发现火焰结构的改进可以显著且稳定地降低  $\text{NO}_x$  排放;文献[8]以非预混同轴热伴流火焰系统的  $\text{CH}_4$  燃烧过程为研究对象,对富氧燃烧特性受  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  等不同组分所具有的物理性质和化学性质的影响进行深入且系统的研究,结果显示,  $\text{CO}_2$  所具有的化学特性、热力特性以及扩散特性都能促使火焰温度下降,而  $\text{CO}$  浓度升高的原因在于  $\text{CO}_2$  所具有的化学特性,并且辐射特性无法显著影响  $\text{CH}_4$  的燃烧;文献[9]设计了新型低氮燃烧器,该结构可以使内循环烟气产生的高速射流将烟气卷吸至燃烧器内部,不仅能够降低燃烧温度、减少  $\text{NO}_x$  的生成,同时也预热了空气,提高了燃

烧稳定性。

目前关于反扩散火焰的研究以实验室为背景的小型火焰较多,对于参与实际生产的大型复杂燃烧器产生的反扩散火焰研究甚少,而对于此类燃烧器的反扩散火焰研究意义深远。本文研究基于天然气反扩散燃烧实际工业燃烧器,该燃烧器利用分级燃烧、烟气再循环和旋流燃烧的原理,采用反扩散火焰燃烧形式,结合  $\text{CH}_4/\text{AIR}$  反应机理进行数值模拟研究,研究结果对反扩散火焰在工业生产中的应用具有一定的意义。

## 1 物理模型与数值计算方法

本研究所用的反扩散低  $\text{NO}_x$  天然气燃烧器三维图如图 1 所示,由主燃气管、空气通道、集气环、集气环上下板、挡风圈、外围燃气孔、燃气支管、旋流盘、布风孔和回流孔等构成。

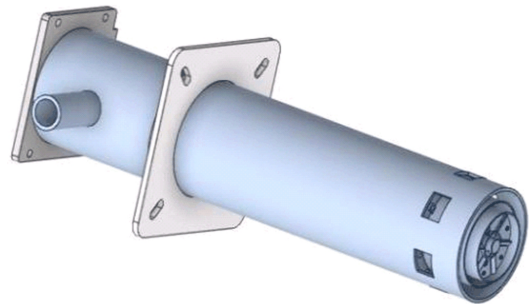


图 1 燃烧器三维图

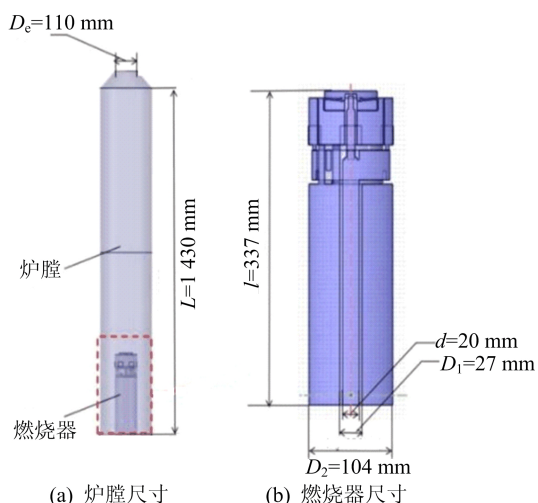
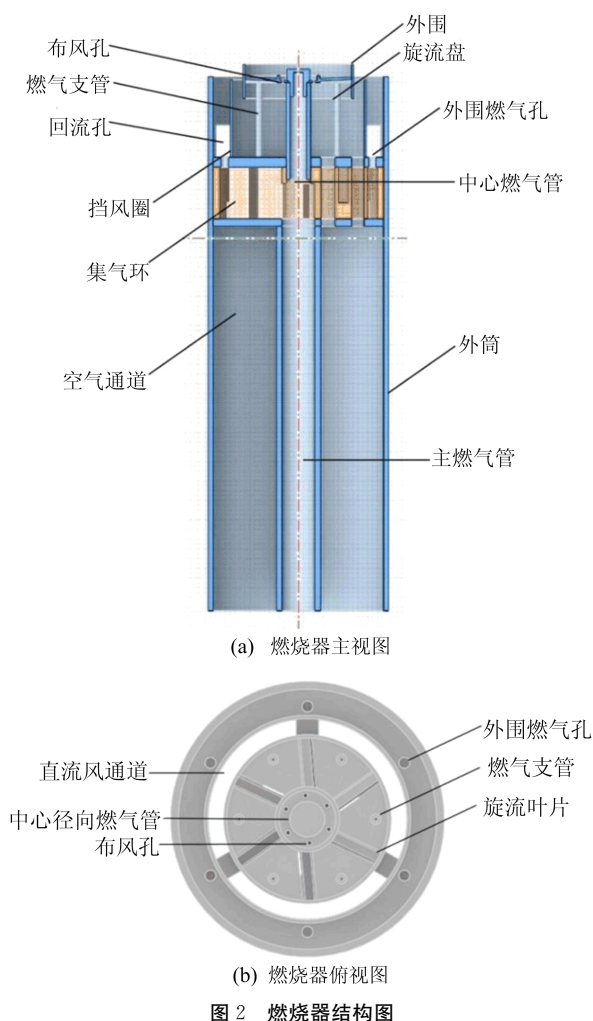
该燃烧器的详细结构如图 2 所示。

空气和燃气分别从下方的空气和燃气主管进入燃烧器;通过集气环,燃气主管分为中心燃气管、燃气支管和外围燃气孔 3 路,利用中心布风孔和旋流叶片结构将空气分为 3 路,实现燃料和空气的 3 次分级燃烧,形成 3 个燃烧区域;为了增强烟气内循环效果,在外围燃气喷口处设置 6 个回流孔,外围燃气卷吸高温烟气,实现对燃气的预热和稀释。

燃烧器及炉膛尺寸如图 3 所示。

图 3 中:燃烧器整体长度  $l=337$  mm;空气通道内径  $D_1=27$  mm;外径  $D_2=104$  mm;主燃气管内壁直径  $d=20$  mm;炉膛尺寸为  $\phi 250$  mm  $\times$  1 500 mm;在距离炉膛出口 70 mm 处设计直径  $D_c=110$  mm 的收口结构作为烟气的出口,提高

计算的稳定性。



由于燃烧器喷口与炉膛尺寸相差较大,采用分区局部加密方法对燃烧器和炉膛进行网格划分。炉膛上方部分结构简单,网格类型为六面体结构化网格;炉膛下方与燃烧器部分结构复杂,生

成非结构化网格。在回流孔与燃烧器头部出口处等部位,考虑到该部位存在强烈的混合和湍流流动,进行了局部加密,最终网格数量为  $19 \times 10^6$ 。燃烧器局部和炉膛整体网格模型如图 4 所示。

在流动和燃烧计算模型的选择上:湍流模型选择标准  $k-\epsilon$  模型;燃烧模型采用涡耗散(eddy-dissipation, ED)模型;整体反应速率由湍流混合速率控制,采用速度与压力耦合的 SIMPLE 算法。ED 模型计算量适中,可以较好地模拟湍流扩散燃烧的火焰结构。在计算边界条件的设置上:空气和燃气采用速度入口;炉膛出口采用压力出口;炉膛壁面采用恒温无滑移壁面,温度设为 450 K。

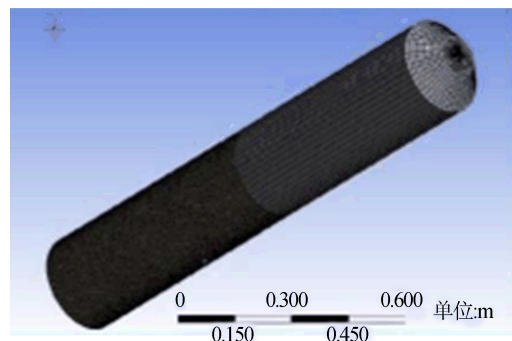
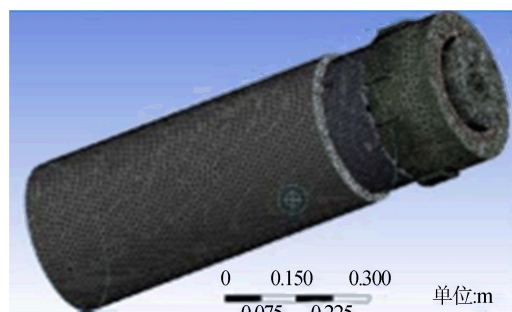


图 4 燃烧器和炉膛网格模型

燃烧器在不同过量空气系数  $\alpha$  和不同烟气再循环率  $r$  下的计算工况分别见表 1、表 2 所列。

表 1 不同过量空气系数下燃烧器计算工况

工况	$\alpha$	空气进口 流速/(m/s)	空气进口 温度/K	CH <sub>4</sub> 进口 流速/(m/s)
工况 0	1.20	4.00	300.0	8.84
工况 1	1.05	3.51	300.0	8.84
工况 2	1.10	3.67	300.0	8.84
工况 3	1.15	3.84	300.0	8.84

表 2 不同烟气再循环率下燃烧器计算工况

工况	$r$	空气进口 流速/(m/s)	空气进口 温度/K	混合后 O <sub>2</sub> 体积分数/%
工况 4	0.05	4.23	308.8	20.1
工况 5	0.10	4.44	314.3	19.3
工况 6	0.15	4.66	320.3	18.5
工况 7	0.20	4.88	326.1	17.8

表 1、表 2 中燃烧器的工况规定:CH<sub>4</sub> 体积流量  $Q_f$  为 10 m<sup>3</sup>/h,保持不变;研究过量空气系数的影响时,烟气再循环率为 0;研究烟气再循环的影响时,过量空气系数为 1.20;烟气再循环采用空气侧稀释。

## 2 燃烧器分级燃烧特性分析

### 2.1 流动特性分析

工况 0 炉膛内部中心截面的速度流场分布情况如图 5 所示。

从图 5 可以看出,速度场沿 X 轴和 Y 轴整体分布比较均匀,并且关于中心 Z 轴具有良好的对称性。

从图 5 的流场分布还可以看出,入口空气和燃气稳定流向燃烧器头部,经过集气环出现分流,中心区的轴向燃气支管和径向燃气管的流量较小,高速轴向射流的燃气包裹在直流空气的外侧进行混合,推动气流向前边混合边燃烧,同时向中间汇集,沿 Z 轴向上流速逐渐减小。

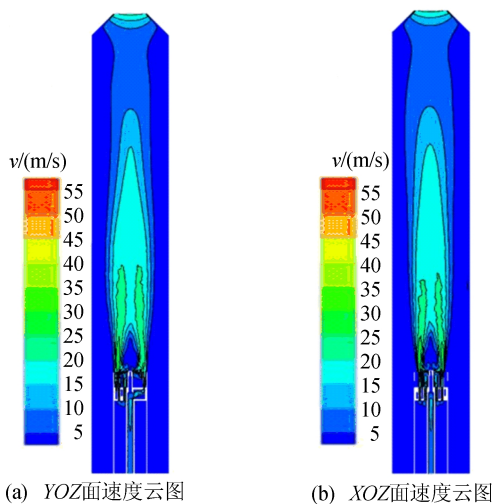


图 5 炉膛中心截面上的速度云图

燃烧器头部局部放大速度矢量图如图 6 所示。

从图 6 可以看出,旋流使得中心区域产生了一个负压区,在射流卷吸作用下形成中心回流区,

导致燃料和氧化剂可以更好地进行物质交换和热量传递。

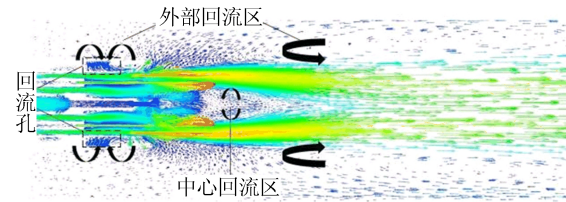


图 6 燃烧器头部局部放大速度矢量图

### 2.2 燃烧特性分析

燃烧器采用了分级燃烧和旋流燃烧的原理,燃料与空气在刚开始混合处的炉膛横截面( $Z=330$  mm)分布云图如图 7 所示。

从图 7 可以看出,外围主燃气从喷嘴处喷出后被回流孔卷吸进来的内循环烟气预热和稀释,CH<sub>4</sub> 的摩尔分数稀释至 0.50,燃气加速形成高速射流,将空气包裹在内侧。

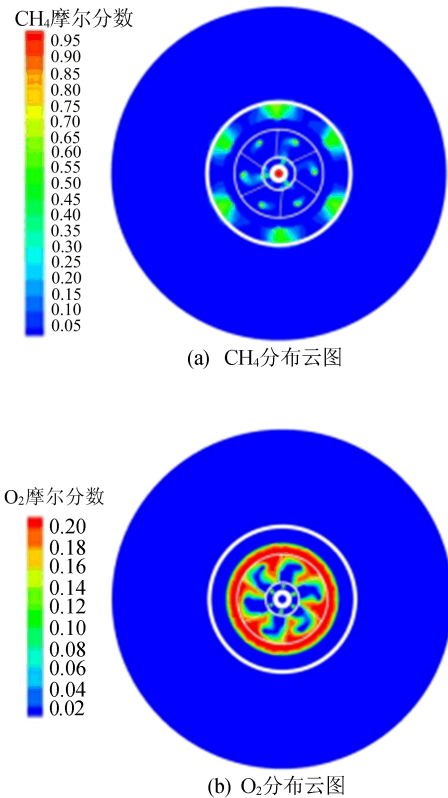


图 7  $Z=330$  mm 处 CH<sub>4</sub> 和 O<sub>2</sub> 分布云图

炉膛 XOZ 平面温度分布如图 8 所示。

从图 8 可以看出,中心径向喷出的燃气与空气在旋流的作用下快速混合,出口处稳燃区接近当量比燃烧,在中心形成稳燃区,局部最高火焰温度可以达到 2 300 K。

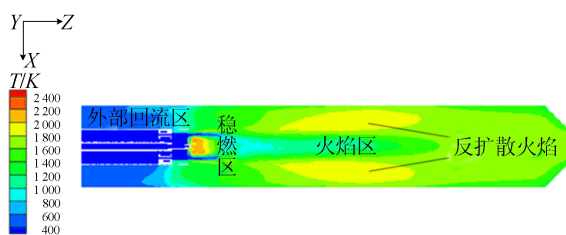


图 8 YOZ 平面温度分布云图

由图 8 可知,外围燃气分布在燃烧器的最外侧,包裹直流风形成周向分布的主燃区,由于燃料喷嘴在最外面周向布置,燃烧所需的空气在燃气管内侧,采用直流形式给入,燃烧过程中形成“气包风”形式的反扩散火焰,火焰温度分布均匀,中间最高温度约为 2 000 K,整体火焰较长,火焰温度低。

### 2.3 污染物生成特性分析

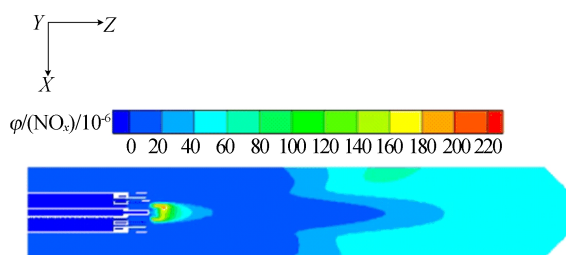
燃烧器中  $\text{NO}_x$  体积分数采用去除水蒸气含量后得到干基的  $\text{NO}_x$  体积分数<sup>[10]</sup>,计算公式为:

$$\varphi(\text{NO}_x) = \frac{\varphi(\text{NO}_x)_w}{1 - \varphi(\text{H}_2\text{O})} \quad (1)$$

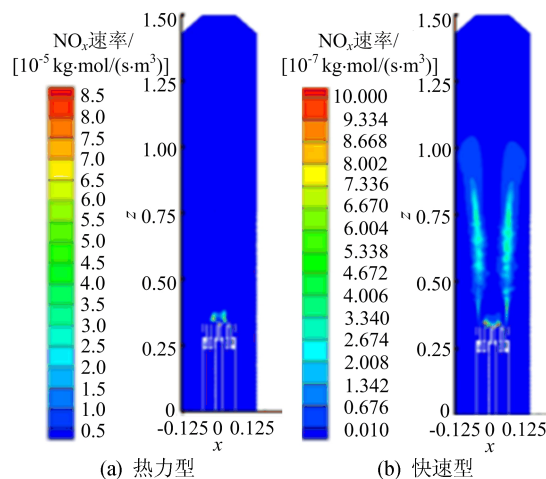
其中:  $\varphi(\text{NO}_x)_w$  为湿基  $\text{NO}_x$  的体积分数;  $\varphi(\text{H}_2\text{O})$  为  $\text{H}_2\text{O}$  的体积分数。

炉膛内  $\text{NO}_x$  分布情况如图 9 所示。

从图 9 可以看出: $\text{NO}_x$  主要分布在中心燃烧区,该区域温度高、流速低并且  $\text{NO}_x$  停留时间长,符合  $\text{NO}_x$  生成条件;炉膛中部反扩散火焰温度较高,因此有少量  $\text{NO}_x$  出现在火焰锋面下游。

图 9  $\text{NO}_x$  分布云图

炉膛纵截面热力型和快速型  $\text{NO}_x$  的生成速率如图 10 所示。从图 10 可以看出:热力型  $\text{NO}_x$  主要在高温稳燃火焰处生成,占据主导地位,在炉膛中后部,随着燃烧的进行,流场中  $\text{CH}_4$  摩尔分数逐渐减少,燃烧所消耗的  $\text{O}_2$  减少,烟气中  $\text{O}_2$  摩尔分数逐渐增加,当烟气中  $\text{O}_2$  的摩尔分数达到 0.02 时, $\text{NO}_x$  大量生成;随着火焰附近湍流强度增加,OH 自由基浓度增加,促进快速型  $\text{NO}_x$  生成反应正向移动,快速型  $\text{NO}_x$  的生成速率也随之增加<sup>[11]</sup>。

图 10 热力型  $\text{NO}_x$  和快速型  $\text{NO}_x$  生成速率云图

## 3 结果与分析

### 3.1 不同空气过量系数对燃烧特性的影响

为了研究过量空气系数  $\alpha$  对燃烧特性的影响,分别对过量空气系数为 1.05、1.10、1.15、1.20 的燃烧状况进行数值模拟。计算过程中保持  $\text{CH}_4$  体积流量不变,过量空气系数通过改变空气进口条件来实现。

温度场随过量空气系数变化的规律如图 11 所示。

从图 11 可以看出:随着过量空气系数的增大,反扩散火焰变短,燃烧速率变快,炉膛内火焰的高温区变短,前段的稳燃区内都存在着局部高温区,能够实现较好的稳燃效果;在过量空气系数较小时,由于空气流速低导致混合较慢,整个燃烧较慢,形成较长的火焰高温区,当过量空气系数在 1.15 以上时,扩散燃烧区的火焰长度明显变短,燃烧状况得到改善。

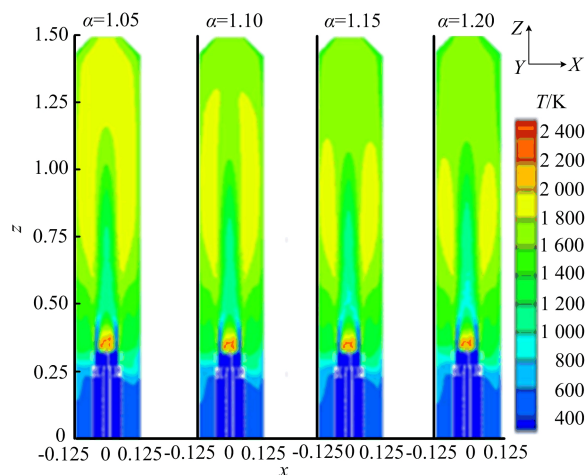


图 11 不同过量空气系数下的温度分布云图

NO<sub>x</sub> 分布随过量空气系数变化的规律如图 12 所示。

从图 12 可以看出,NO<sub>x</sub> 主要在中心稳燃区生成;中心稳燃区 NO<sub>x</sub> 生成量随过量空气系数增加呈现出先增加后减少的趋势。温度与 O<sub>2</sub> 含量是影响热力型 NO<sub>x</sub> 生成的重要因素,过量空气系数比较小时,炉膛内平均温度和 O<sub>2</sub> 含量低,NO<sub>x</sub> 的生成速率较慢。

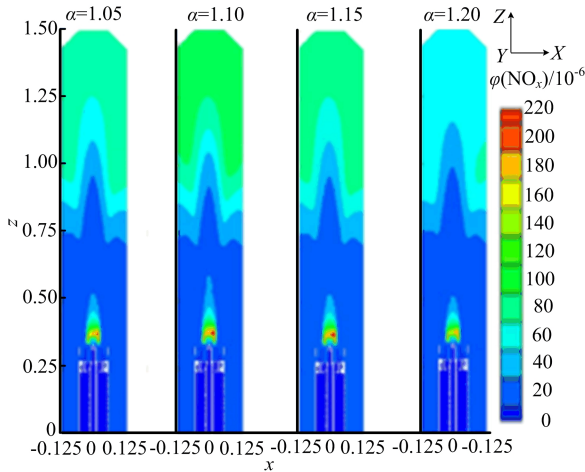


图 12 不同过量空气系数下的 NO<sub>x</sub> 分布云图

不同过量空气系数下炉膛出口处的 NO<sub>x</sub> 排放情况如图 13 所示。

从图 13 可以看出:当过量空气系数增加时,反应更加充分,燃烧温度更高,使得燃烧室内温度升高,热力型 NO<sub>x</sub> 的生成量增加;当过量空气系数继续增大时,过量的空气使炉膛内的平均温度下降,从而使热力型 NO<sub>x</sub> 的生成量减少。因此,整体上 NO<sub>x</sub> 排放呈现出随着过量空气系数的增大先增大后减小的规律<sup>[12]</sup>。

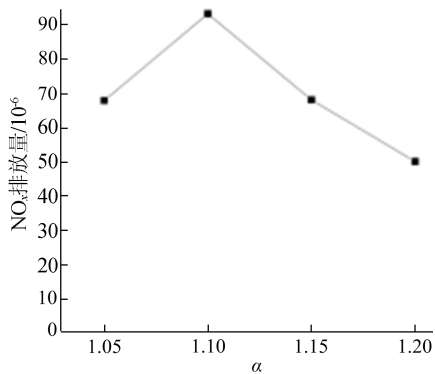


图 13 不同过量空气系数下炉膛出口 NO<sub>x</sub> 排放情况

### 3.2 烟气再循环率对燃烧器性能的影响

针对烟气再循环率  $r$  对燃烧特性的影响开展

数值研究。在过量空气系数  $\alpha=1.20$  的条件下,分别对烟气再循环率为 0、0.05、0.10、0.15、0.20 的燃烧状况进行数值模拟。

过量空气系数  $\alpha=1.20$  时,温度场随烟气再循环率变化的规律如图 14 所示。

从图 14 可以看出:当烟气再循环率由 0 提高到 0.20 时,炉膛内整体温度降低,最高温度也相应降低,中心稳燃区面积减小,反扩散火焰长度变短,最高温度区域变小;随着外部再循环烟气的加入,外围燃气燃烧的温度更加均匀,火焰锋面温度降至 2 000 K 左右。

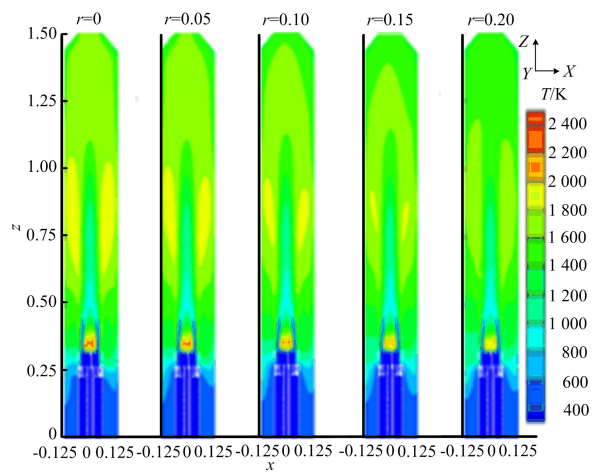


图 14 不同烟气再循环率下的温度分布云图

过量空气系数  $\alpha=1.20$  时,NO<sub>x</sub> 分布随烟气再循环率变化的规律如图 15 所示。从图 15 可以明显看出:随着  $r$  的增加,NO<sub>x</sub> 体积分数整体大大降低,中心稳燃区生成的 NO<sub>x</sub> 范围变窄,降低 NO<sub>x</sub> 排放效果显著;随着再循环烟气的加入,稀释了空气中的 O<sub>2</sub>,减小了局部高温区,使炉膛温度降低且燃烧均匀性改善,抑制了热力型 NO<sub>x</sub> 的生成<sup>[13]</sup>。

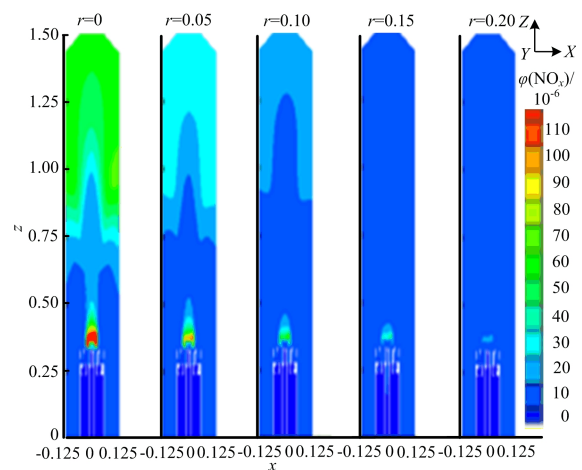


图 15 不同烟气再循环率下的 NO<sub>x</sub> 分布云图

不同烟气再循环率下炉膛出口处的排放情况如图 16 所示。

由图 16 可知:当烟气再循环率为 0.05 时,出口处排放量换算成质量浓度为  $30.48 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_x$  排放降低了 56.6%;当烟气再循环率为 0.20 时,出口处排放量为  $1.52 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_x$  减排约 95%。

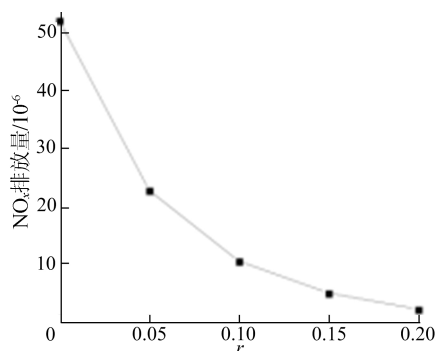


图 16 不同烟气再循环率条件下炉膛出口  $\text{NO}_x$  排放情况

## 4 结 论

针对反扩散燃烧的天然气管燃烧器,本文通过数值研究分析了反扩散燃烧特性,研究了过量空气系数和烟气再循环率对燃烧特性和污染物生成的影响,具体结论如下:

1) 反扩散燃烧器在炉膛内形成 2 个主要燃烧区:中心空气射流、旋流空气与中心燃气强烈混合,达到部分预混效果,形成接近当量比燃烧的中心稳燃区;外侧燃气射流通过回流孔引射高温烟气,将燃气加热并稀释,在外侧形成反扩散燃烧区。燃烧器出口处  $\text{NO}_x$  排放质量浓度为  $47.00 \text{ mg/m}^3$ 。

2) 随着过量空气系数从 1.05 增加到 1.20,反扩散燃烧区的火焰长度变短,燃烧速率变快,  $\text{NO}_x$  排放量先升高后降低。在过量空气系数为 1.20 时,出口  $\text{NO}_x$  排放量最低。

3) 烟气再循环能够降低炉内整体温度并缓解局部热负荷,抑制  $\text{NO}_x$  的生成。随着烟气再循

环率增大,炉膛内平均温度和出口处  $\text{NO}_x$  生成量均快速下降。当烟气再循环率为 0.05 时,出口处  $\text{NO}_x$  排放降低 56.6%;当烟气再循环率为 0.20 时,出口处  $\text{NO}_x$  减排约 95%,实现了清洁燃烧。

## [参 考 文 献]

- [1] 闫帅,杨家宝,龚岩,等.  $\text{CO}_2$  稀释对  $\text{CH}_4$  反扩散火焰结构的影响研究[J]. 化工学报,2022,73(3):1335-1342.
- [2] 石美玉.  $\text{CH}_4$  氧气反扩散撞击火焰稳定性及光谱辐射特性研究[D]. 银川:宁夏大学,2022.
- [3] 李智聪,何小煌,姜春. 乙烯层流反扩散火焰形状的理论计算及实验测量[J]. 燃烧科学与技术,2020,26(3):199-204.
- [4] 王宝璐,额日其太,李挺. 氧化剂含氧浓度对  $\text{CH}_4$  反扩散火焰光谱特性影响实验研究[J]. 推进技术,2017,38(4):878-884.
- [5] 刘芹,贾琦晖,何沛祥,等. 多火源气体射流火动力学特性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(8):1094-1099.
- [6] 丁冬冬,刘道银,梁财,等. 天然气分级燃烧器  $\text{NO}_x$  排放的数值模拟研究[J]. 发电设备,2020,34(5):313-318.
- [7] CHEN S, XING Y M, LI A J. CFD investigation on Low- $\text{NO}_x$  strategy of folded flame pattern based on fuel-staging natural gas burner[J]. Applied Thermal Engineering,2017,112:1487-1496.
- [8] 胡帆,李鹏飞,郭军军,等. 甲烷扩散火焰的富氧燃烧特性[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6302-6312.
- [9] 王志宁. 基于烟气再循环某 85 t/h 燃气锅炉低氮燃烧特性的研究[D]. 太原:太原理工大学,2019.
- [10] 袁琪. 某型低氮燃烧器的结构设计和数值模拟[D]. 岳阳:湖南理工学院,2021.
- [11] 孙海华,刘安源,巩亮,等. 丙烷燃烧过程氮氧化物排放特性的数值模拟研究[J]. 东北电力大学学报,2021,41(4):35-42.
- [12] JING L, ZHAO J, WANG H, et al. Numerical analysis of the effect of swirl angle and fuel equivalence ratio on the methanol combustion characteristics in a swirl burner[J]. Process Safety and Environmental Protection,2022,158:320-330.
- [13] 张子函,王清成,马月月. 基于烟气再循环技术降低燃气锅炉  $\text{NO}_x$  排放数值模拟与分析[J]. 工业锅炉,2022(2):1-8.

(责任编辑 胡亚敏)