

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201708045

燃瓦斯气蓄热式加热炉再燃低氮改造数值模拟

王义德^{1,2}, 孙巧群³, 张成志⁴, 高建民¹, 刘同仁⁵, 李喜梅^{1,2}, 王华山², 杜 谦¹

(1.哈尔滨工业大学 燃烧工程研究所, 哈尔滨 150001; 2.燕山大学 车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004;

3.哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001; 4.沈阳华顺供热集团, 沈阳 110000;

5.山东龙福油页岩综合利用有限公司, 山东 龙口 265700)

摘 要:为实现燃瓦斯气加热炉氮氧化物(NO_x)排放低于 200 mg/m^3 (O_2 体积分数 3.5%)的要求,提出高效的再燃低氮改造方案.通过数值计算和工业试验相结合的方法对其进行验证.采用 FLUENT 软件计算不同再燃瓦斯气比例和当量比下,不同截面温度及 NO_x 质量浓度分布, NO_x 生成还原特性和瓦斯气未燃尽率等.根据优化的数值计算结果对加热炉进行改造,进行连续一周的工业试验.结果表明:增加再燃比,燃烧空间高温区域比例降低,热型型 NO_x 生成量减少且减幅增大,再燃作用对 NO_x 的还原率先升高后降低.当再燃比为 0.20 时,再燃作用还原 NO_x 的效率最高.增加再燃比或降低主燃区当量比将降低 NO_x 浓度,但瓦斯气未燃尽率升高.通过与工业试验对比,验证了计算的可靠性.当再燃比为 0.15 ~ 0.20,主燃区当量比为 1.15 ~ 1.20 时, NO_x 质量浓度最高值约 160 mg/m^3 ,均值约 130 mg/m^3 (O_2 体积分数 3.5%),且瓦斯气未燃尽率较低.

关键词:氮氧化物;蓄热式加热炉;瓦斯气;再燃技术;数值模拟

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:0367-6234(2018)07-0046-06

Mathematical modeling on low nitrogen reconstruction by reburning
in regenerative heating furnace fired refining gas

WANG Yide^{1,2}, SUN Qiaqun³, ZHANG Chengzhi⁴, GAO Jianmin¹, LIU Tongren⁵,
LI Ximei^{1,2}, WANG Huashan², DU Qian¹

(1. Research Institute of Combustion Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. College of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 3. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 4. Shenyang Huashun Heating Group, Shenyang 110000, China; 5. Shandong Longfu Oil Shale Comprehensive Utilization Co., Ltd., Longkou 265700, Shandong, China)

Abstract: To realize nitric oxides (NO_x) emission regulation below 200mg/m^3 (O_2 volume fraction at 3.5%) in heating furnace fired refining gas, a high efficiency low nitrogen reconstruction scheme by reburning technology was proposed, and it was confirmed by numerical calculation and industrial test. The software of FLUENT was applied to investigate the effects of reburn refining gas ratio and primary area stoichiometric ratio on the distribution of temperature and NO_x mass concentration at different sections, generation, reduction characteristics of NO_x and unburned rate of refining gas. According to the optimized numerical calculations, the reconstruction was implemented and industrial test was carried out for one week. The results showed that, with the reburn fuel ratio increasing, the proportion of high temperature space decreased, the amount of thermal NO_x reduced and reduction increased, the NO_x reduction efficiency by reburning impact firstly increased and then decreased. The highest NO_x reduction efficiency by reburning impact when the reburn fuel ratio was 0.20. Increasing the reburn fuel ratio and decreasing the primary area stoichiometric ratio could increase the NO_x reduction efficiency, but the unburned fuel ratio increased meanwhile. When the reburn fuel ratio between 0.15~0.20 and the primary area stoichiometric ratio between 1.15~0.20, the greatest and average values of NO_x mass concentration were 160mg/m^3 and 130mg/m^3 (O_2 volume fraction at 3.5%) respectively.

Keywords: nitric oxides; regenerative heating furnace; refining gas; reburning technology; mathematical modeling

收稿日期: 2017-08-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(51506035); 十二五国家科技支撑计划项目(2014BAA07B03)
作者简介: 王义德(1990—),男,硕士研究生;
高建民(1977—),男,副教授,博士生导师.
通信作者: 高建民, yagjm@hit.edu.cn

油页岩是一种储量丰富的非常规能源,其储量比煤炭约多 40%,同时中国油页岩资源储量仅次于美国,位居世界第二位^[1]. 油页岩干馏炼油过程会产生可燃瓦斯气,循环瓦斯气在蓄热式加热炉中进行间歇式燃烧和预热^[2]. 在燃煤电站及工业锅炉 NO_x 减排

取得一定成效后,工业炉窑氮氧化物减排已成为一大关注点. 山东某公司燃瓦斯气蓄热式加热炉建设较早、结构简单,未安装低氮燃烧装置及 NO_x 后处理设备;其 NO_x 排放不满足相应法规要求,需进行低氮改造,而可靠的数值模拟计算能够为其改造及运行提供理论指导^[3].

再燃(燃料分级燃烧)技术被公认为是一种高效、低成本的 NO_x 控制技术,它通过燃料的分级燃烧实现对 NO_x 的还原^[4-5]. 经过多年的发展,再燃技术的效果已在多种热力设备上得到验证,同时众多学者的研究表明,再燃对 NO_x 的还原效率取决于再燃燃料种类与比例、当量比、停留时间及再燃燃料与主燃区烟气混合程度等因素^[6-7]. Rutar 等^[8]研究了以下 5 种燃料还原 NO_x 效果,从高到低为 $\text{H}_2>\text{CH}_4>\text{C}_2\text{H}_4>\text{C}_2\text{H}_6>\text{CO}$;而 Bilbao 等^[9-10]的研究表明,在高温下对 NO_x 还原率最高的为 CH_4 ,低温下 C_2H_2 则具有更高的还原率.

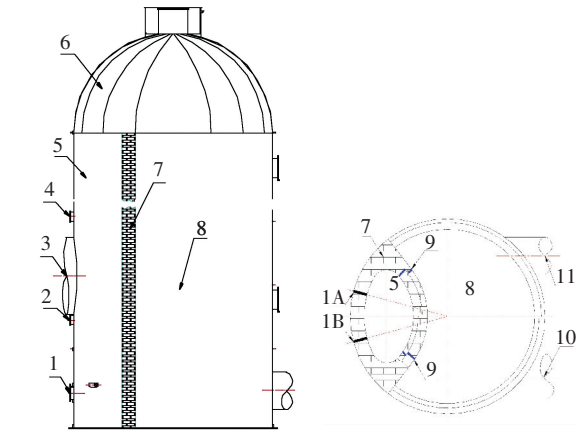
现有研究多侧重不同气体组分的机理分析、竞争关系,针对实际应用的加热炉研究较少,特别是 NO_x 排放浓度要稳定控制在 $200\text{ mg}/\text{m}^3$ 以下,降幅比例超过 65%以上情况下,对于燃尽率有怎样影响也少有报道.

本文通过数值模拟方法研究了再燃燃料比例、当量比对温度场、 NO_x 生成还原和瓦斯气燃尽率的影响. 通过与工业试验数据对比,验证了计算的可靠性,得到了适用于瓦斯气燃烧和 NO_x 生成与抑制的规律. 为加热炉低氮改造提供了理论指导,同时综合 NO_x 排放浓度和瓦斯气燃尽率,提出优化运行方案.

1 加热炉概述

该蓄热式加热炉为传统底燃式,由圆柱形主体($\Phi 6.5\text{ m}\times\text{H}19\text{ m}$)和半球形炉顶($\text{R}3.275\text{ m}$)构成. 主体被粘土质耐火砖隔墙 7 分为左侧燃烧室 5 和右侧蓄热室 8,结构简图见图 1. 蓄热式加热炉运行方式为:多台加热炉在燃烧和预热模式下交替运行,单炉模式每小时切换一次. 燃烧模式下,瓦斯气与空气在燃烧室中混合燃烧,产生的高温烟气上升至炉顶越过隔墙后进入蓄热室,热量被其中的蓄热体吸收,低温烟气经烟气出口 11 排出. 预热模式中,冷瓦斯气由入口 10 进入蓄热室,吸收蓄热体中热量被加热后由出口 3 排出进入页岩油生产装置,为页岩干馏过程提供辅助热量.

改造前的加热炉仅在底部有两个燃烧器 1A、1B,单台加热炉瓦斯气流量约 $4\,500\text{ m}^3/\text{h}$,其成分及体积分数详见表 1.



1—原有燃烧器(1A、1B); 2—新增再燃燃料喷口; 3—热瓦斯气出口; 4—新增燃尽风喷口; 5—燃烧室; 6—炉顶; 7—隔墙; 8—蓄热室; 9—膨胀缝; 10—冷瓦斯气入口; 11—烟气出口

图 1 蓄热式加热炉结构简图

Fig.1 Schematic profile of regenerative heating furnace

表 1 瓦斯气成分及体积分数

Tab.1 Composition and volume fraction of refining gas

组分	体积分数/ %	组分	体积分数/ %
CH_4	5.66	H_2S	0.50
C_2H_4	1.05	CO	8.98
C_2H_6	1.12	CO_2	18.23
C_3H_8	0.90	O_2	1.94
H_2	20.84	N_2	40.78

2 数值计算

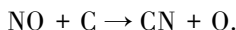
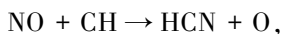
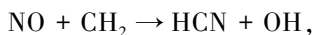
2.1 计算模型

由于加热炉中 NO_x 的生成和还原只发生在燃烧模式下的燃烧室中,为突出重点和提高计算效率,本文仅对燃烧室进行建模和计算. 经多次数值计算和对比,且综合考虑现场管道、设备的布置,燃料停留时间,瓦斯气的燃尽率及保证一定的射流速度等,改造方案为在燃烧器 1A、1B 上方 3 m 和 6 m 处增设再燃燃料喷口和燃尽风喷口. 利用 Solidworks 软件建立燃烧室模型,ICEM 软件进行结构化网格划分. 网格总数约 85.4 万,为准确描述各喷口处复杂的流场及燃烧特性,对各喷口处的网格进行局部加密.

2.2 模拟方法

本文采用计算流体动力学软件 FLUENT 17.0 计算炉内燃烧过程. 瓦斯气燃烧计算选用组分输运涡耗散模型^[5];气相湍流流动采用 $\kappa-\varepsilon$ 双方程模型^[11];辐射模型采用 P-1 模型,气相总吸收系数的计算采用 Weighted-Sum-of-Gray-Gases (WSGGM) 方法^[12];采用压力-速度耦合的 coupled 算法,压力

项离散采用 PRESTO 格式,其他项采用二阶迎风离散格式. 本文仅计算热力型和快速型 NO_x , 无需计算燃料型 NO_x ; 由于实际燃烧中生成的 NO 占主导地位, 本文总 NO_x 值由 NO 值除以系数 0.95 得到^[13]. 在炉内流场及燃烧计算收敛的基础上, NO_x 的生成及还原计算借助 NO_x 浓度方程^[14-15] 及再燃还原模型在 FLUENT 中采取后处理的方式进行. 还原 NO 的主控基元反应如下式所示^[16-17]:



数值计算主要边界条件如下:

1) 气体进口边界条件. 瓦斯气和空气进口为速度入口, 同轴燃烧器 1A、1B 的内外环内径为 300 和 420 mm, 新增再燃燃料和燃尽风喷口内径为 300 mm; 速度值根据气量和管径计算得到; 瓦斯气和空气的初始温度为 305 K.

2) 壁面边界条件. 设置热通量边界, 辐射黑度 0.7; 无滑移速度壁面条件^[18].

3) 出口边界条件. 压力出口边界, 气体出口压力为 -20 Pa.

2.3 计算方法

再燃比 r 、 NO_x 还原率 η_{NO_x} 、瓦斯气未燃尽率 β 和总体当量比 R 定义如下:

$$r = \frac{V_{\text{再燃瓦斯气}}}{V_{\text{主燃瓦斯气}} + V_{\text{再燃瓦斯气}}},$$

$$\eta_{\text{NO}_x} = \frac{f_{\text{NO}_x, \text{未分级}} - f_{\text{NO}_x, \text{分级}}}{f_{\text{NO}_x, \text{未分级}}},$$

$$\beta = \frac{V_{\text{出口, H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{CO} + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8}}{V_{\text{进口, H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{CO} + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8}},$$

$$R = \frac{2V_{\text{O}_2}}{V_{\text{H}_2} + V_{\text{CO}} + 3V_{\text{H}_2\text{S}} + 4V_{\text{CH}_4} + 6V_{\text{C}_2\text{H}_4} + 7V_{\text{C}_2\text{H}_6} + 10V_{\text{C}_3\text{H}_8}}.$$

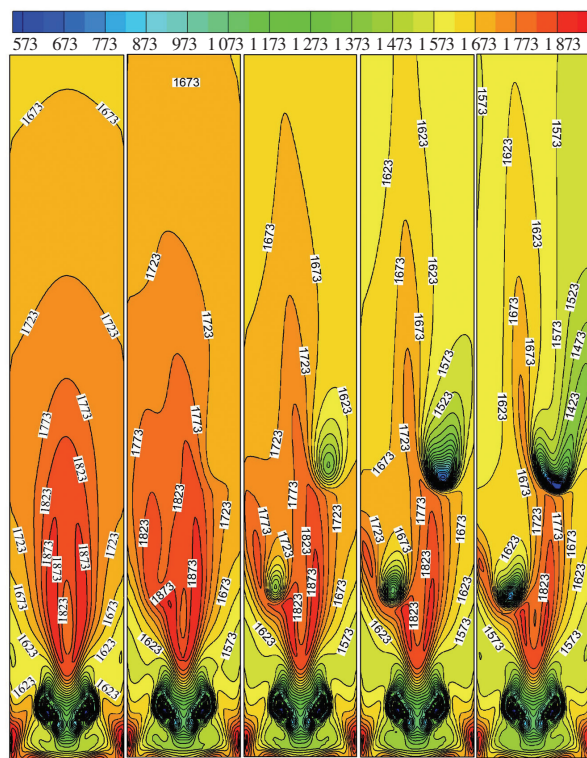
式中: $V_{\text{主燃瓦斯气}}$ 、 $V_{\text{再燃瓦斯气}}$ 为主燃及再燃喷口瓦斯气体积流量, m^3/h ; $f_{\text{NO}_x, \text{未分级}}$ 、 $f_{\text{NO}_x, \text{分级}}$ 为未分级和再燃分级后燃烧室出口 NO_x 质量浓度, mg/m^3 ; V_{H_2} 、 V_{CO} 为 H_2 、 CO 体积流量, m^3/h . 主燃区当量比 R_1 定义同 R .

3 数值模拟结果与讨论

3.1 再燃比对温度分布及出口烟温的影响

瓦斯气燃烧生成的 NO_x 类型主要为热力型, 而温度是影响热力型 NO_x 生成的决定性因素, 故本文首先探究了再燃比对燃烧空间温度分布的影响规律. 图 2 所示为 $R = 1.15$ 、 $R_1 = 1.20$ 时, 不同 r (0, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25) 下燃烧室长轴截面 ($x =$

-1.947 m) 的温度分布云图. 众多学者研究表明, 热力型 NO_x 的生成速率与温度的关系按照阿累尼乌斯定律变化, 当温度超过 1 500 °C 时, 温度才对 NO_x 生成量有明显影响^[18], 因此需要重点对比高温区域 ($T > 1\,773\text{ K}$) 分布的不同. 由图 2 可知, 高温区域面积随着 r 的增加而缩减. 对比 $r = 0.10$ 与 $r = 0$ 工况可知, 当 r 较小时, 再燃对燃烧空间温度的降低不明显. 当 r 大于 0.15 后, 温度大于 1 773 K 区域的面积迅速减少; 尤其当 r 为 0.25 时, 温度大于 1 773 K 的区域仅分布在再燃与主燃喷口间, 面积占比很小.



(a) $r = 0$ (b) $r = 0.10$ (c) $r = 0.15$ (d) $r = 0.20$ (e) $r = 0.25$

图 2 再燃比对 $x = -1.947\text{ m}$ 处截面温度分布影响 (K)

Fig.2 Effects of reburn fuel ratio on temperature distribution at the section of $x = -1.947\text{ m}$ (K)

为了更全面比较再燃比对温度分布的影响, 沿加热炉高度 (即 Z 轴) 方向取不同截面, 其相邻截面垂直距离为 1 m, 从下往上第 1、4、7 个截面分别为主燃喷口、再燃喷口和燃尽风口中心位置所在平面, 详见图 3. 由图 3 可知, 不同 r 值对再燃喷口以下截面的温度分布无明显影响; 由 $r = 0.1$ 时截面温度分布可知, 当再燃比较小时, 再燃并不能显著降低燃烧区域的温度水平. 由图 3(c) 可知, 当 r 值为 0.20 时, 燃烧区高温区域面积明显缩小, 同时再燃燃料和燃尽风的穿透能力明显增强, 这在一定程度上将增强再燃燃料、新增燃尽风与炉内烟气的扰动与混合, 有利于瓦斯气的燃尽与 NO_x 还原.

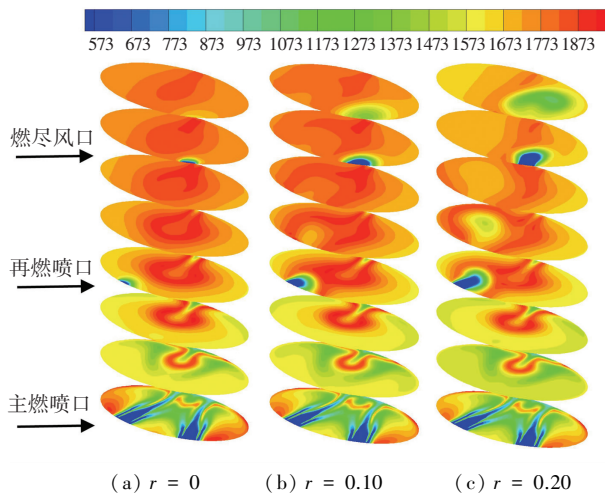


图 3 再燃比对 Z 轴方向截面温度分布影响(K)

Fig.3 Effects of reburn fuel ratio on temperature distribution at different sections along z-axis direction (K)

不同截面温度分布云图只能定性而不能定量反映总体的温度分布. 故本文对数值计算结果进行了统计分析,具体如图 4 所示. 由图 4 可知,总体上燃烧室出口平均烟温随 r 值的增大而降低. 分析该原因,一是随着 r 值的增大,更多的瓦斯气用于 NO_x 的还原,相应的其氧化燃烧所占比例降低;二是充当再燃燃料瓦斯气在燃烧室中的停留时间缩短,瓦斯气的未燃尽率升高,化学反应总放热量减少. 当 r 为 0,0.10,0.15,0.20 和 0.25 时,温度网格点大于 1 750 K 所占的比例为 25.71%,25.70%,14.82%,8.79%和 6.11%. 分析上述数据可知,当 r 值大于 0.10 后,温度大于 1 750 K 区域所占比例明显降低;且当 r 值大于 0.20 之后,降低幅度明显衰减,但此时的瓦斯气未燃尽率急剧上升. 对比 r 为 0 和 0.20 时的数据,可知这两种工况下所占比例较大的温度区间分别为 1 650~1 700 K (24.06%)、1 700~1 750 K (26.78%)和 1 600~1 650 K (27.55%)、1 650~1 700 K (17.32%). 由此更加充分说明再燃技术可明显减少燃烧高温区域的比例,且效果显著.

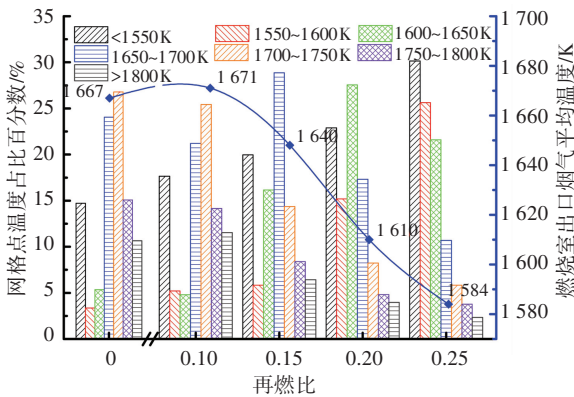


图 4 再燃比对网格点温度分布和出口平均烟温的影响

Fig.4 Effects of reburn fuel ratio on grid points temperature distribution and outlet gas average temperature

3.2 再燃比对 NO_x 生成还原影响

再燃技术降低 NO_x 浓度的原因可分解为两方面,一是再燃可降低高温区域的比例,使热力型 NO_x 的生成量减少;二是再燃燃料氧化分解形成的还原性基团对主燃区生成的 NO_x 进行还原. 虽然两者间是耦合关系,但后者仅发生在特定的温度区间且反应速率有限,可分开进行比较分析. 由图 5 可知,再燃比对热力型 NO_x 生成量具有显著影响,而对快速型 NO_x 生成量的影响极小. 首先单纯对比热力型 NO_x 生成量,当再燃比为 0.15,0.20,0.25 时对应的质量浓度分别为 210.4,160.7,118.9 mg/m^3 ,还原率为 15.0%,25.1%和 51.9%;考虑总 NO_x 量及再燃还原作用,对应的 NO_x 还原率分别为 49.1%,68.5%,79.2%. 由上述数据可知,随着再燃比的增加,热力型 NO_x 生成量减少且减幅增大;而再燃对 NO_x 的还原作用呈现先增强后减弱的趋势. 在本文的工况中,当再燃比为 0.20 时,再燃作用对 NO_x 的还原率最高.

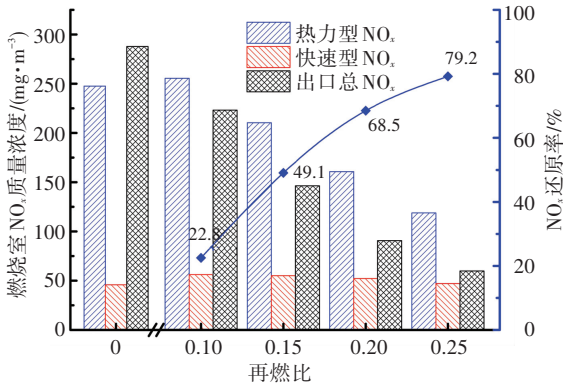


图 5 再燃比对 NO_x 生成特性和还原率的影响

Fig. 5 Effects of reburn fuel ratio on NO_x production characteristics and reduction efficiency

本文以 r 为 0.20 的工况为例,分析比较了再燃对 NO_x 沿加热炉高度方向分布的影响,其截面位置与图 3 中相同,不同截面 NO_x 分布与平均质量浓度详见图 6. 结合图中数据和对应的 NO_x 出口质量浓度 (287.8 与 90.8 mg/m^3) 可知, NO_x 的生成与还原反应主要发生区域为主燃喷口和燃尽风喷口之间,这也与图 3 和图 4 所示的火焰高度与截面温度分布相符合. 同时从图 6(b) 中可知,左侧 NO_x 浓度低于右侧,这是为了保证射流的速度,本文仅在一侧布置了再燃喷口. 如在其他工程应用中能够保证新射流速度满足要求,可以考虑两侧布置燃料喷口和燃尽风.

3.3 主燃区当量比对 NO_x 排放影响

主燃区当量比不仅直接影响主燃区的温度分布及 NO_x 生成特性,也间接影响再燃区的燃烧特性和总体的 NO_x 浓度. 图 7 所示为再燃比为 0.15 及 0.20

时,不同 R_1 下 NO_x 排放质量浓度和还原率. 总体上随着 R_1 的增大, NO_x 排放质量浓度增大,相应的其还原率降低. 这主要由于 R_1 值越低,再燃区还原性气氛越强,越有利于 NO_x 还原. 随着 R_1 的增大,不同再燃比下 NO_x 还原率间的差别增大;同时当 R_1 大于1.20后, NO_x 还原率降低幅度略有提升,这主要是由于进入再燃区总氧量增大造成的.

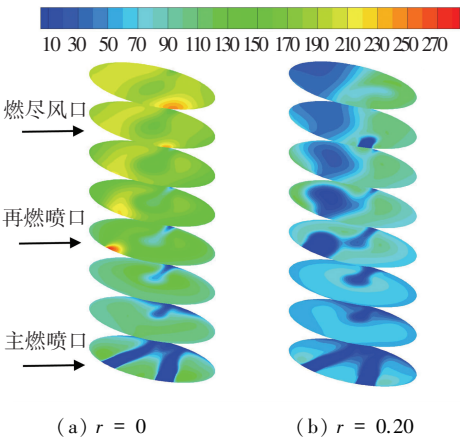


图 6 再燃对 Z 轴方向截面 NO_x 质量浓度分布影响(mg/m^3)

Fig.6 Effects of reburn fuel ratio on NO_x mass concentration distribution at different sections along z-axis direction (mg/m^3)

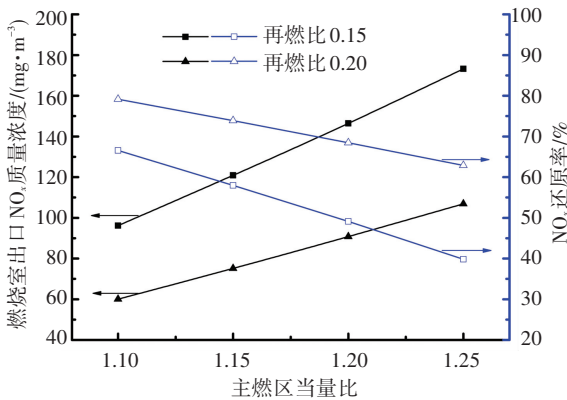


图 7 主燃区当量对 NO_x 质量浓度和还原率的影响

Fig.7 Effects of primary area stoichiometric ratio on NO_x mass concentration and reduction efficiency

3.4 再燃分级燃烧运行优化建议

在加热炉实际运行中,再燃比和主燃区当量比的确定需综合考虑燃料的燃尽率和 NO_x 浓度. 表 2 所示为不同 r 和 R_1 下瓦斯气 β 和 NO_x 质量浓度的计算值. 由表 2 数据可知,当 R_1 不变时,随着 r 的增加, NO_x 质量浓度降低, β 升高;当 r 值不变时,随着 R_1 的增加, β 降低, NO_x 质量浓度升高. 这是因为增加再燃瓦斯气量,还原性基团浓度增加和形成更强的还原性气氛,有利于 NO_x 的还原;但瓦斯气在燃烧室中的停留时间缩短,还原性气氛亦不利于其氧化,故瓦斯气的未燃尽率升高. 在 r 为 0.1 时, β 值虽小,但

NO_x 质量浓度高;当 r 为 0.25 时与此相反. 综合考虑两者,这两种工况都不建议在实际中应用. 笔者建议在实际生产中再燃比可介于 0.15 ~ 0.20,主燃区化学当量可介于 1.15 ~ 1.20,这可实现较低的瓦斯气未燃尽率和较低浓度的 NO_x 排放.

表 2 不同再燃比和主燃区当量比下数值计算结果

Tab. 2 Numerical results at different reburn fuel ratio and primary area stoichiometric ratio

r	R_1	反应热/ $\times 10^6 \text{ W}$	未燃尽率/ %	NO_x 质量浓度 (O_2 体积分数 3.5%) $/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$
0.10	1.15	8.494	1.45	198.3
0.10	1.20	8.572	0.38	223.1
0.15	1.15	8.297	4.04	120.9
0.15	1.20	8.393	2.94	146.4
0.15	1.25	8.484	1.80	173.2
0.20	1.15	8.103	6.63	75.1
0.20	1.20	8.179	5.80	90.8
0.20	1.25	8.175	4.66	106.9
0.25	1.20	8.018	7.66	59.8

3.5 加热炉改造后运行效果及分析

根据数值计算结果及优化运行方案,对改造后加热炉进行了连续一周的测试试验,图 8 所示为其中某天的 NO_x 质量浓度和 O_2 体积分数监测数据(监测点位于烟气出口). 由图 8 可知, NO_x 质量浓度最高、低值为 159、112 mg/m^3 ,两者相差 47 mg/m^3 ,且大部分数值低于 130 mg/m^3 ; O_2 体积分数大多分布在 5.5%附近,波动在 $\pm 0.8\%$ 的范围内. 出现波动的主要原因在于瓦斯气的流量及组成成分处于不断的变化中. 测试结果表明:加热炉经再燃低氮改造后, NO_x 排放质量浓度均在 200 mg/m^3 以下,满足山东省最新工业炉窑大气污染物排放标准(DB37/2375-2013)要求,并留有一定裕量.

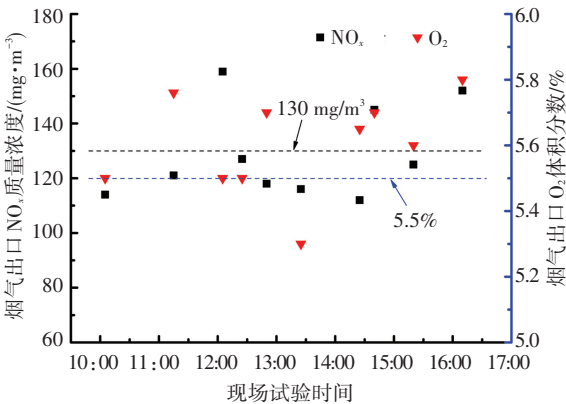


图 8 现场测试烟气出口 NO_x 质量浓度及 O_2 体积分数

Fig. 8 NO_x mass concentration and O_2 volume fraction at gas outlet in field test

现场 NO_x 质量浓度和 O_2 体积分数测试值和数值模拟值存在一定的偏差,主要原因有:一是模拟时监测点是燃烧室出口截面,而现场测试测点为烟气出口处;模拟时未考虑漏风,而加热炉存在较多密封不严密位置(如探火孔),所以实测氧量会较模拟值高。二是气体燃料燃烧反应速率快,瓦斯气成分复杂,不同反应之间的竞争关系很难用现有的燃烧模型进行准确的描述。三是粘土质耐火砖隔墙具有一定热负荷量,很难精确描述其吸热量的多少和变化过程,而数值模拟时以稳态代表整个过程,与实际存在一定的误差。

随着地方经济的发展及人们对环境质量的更高要求,氮氧化物排放的地方性法规也将愈加严格。如需进一步降低 NO_x 排放值,笔者建议可与低成本且可靠的烟气再循环技术联用。

4 结 论

1)当主燃区当量比相同时,随着再燃比的增加,燃烧室整体温度分布及出口平均烟温降低, NO_x 排放浓度降低,瓦斯气未燃尽率升高;

2)当再燃比相同时,随着主燃区当量比的增加, NO_x 排放浓度升高,瓦斯气未燃尽率降低;

3)综合考虑 NO_x 排放质量浓度和瓦斯气燃尽率,建议运行时再燃比 0.15~0.20,主燃区当量比 1.15~1.20;

4)加热炉经再燃分级改造后, NO_x 排放质量浓度低于 200 mg/m^3 ,满足法规要求并留有一定裕量。

参考文献

- [1] 侯吉礼,马跃,李术元,等.世界油页岩资源的开发利用现状[J].化工进展,2015,34(5):1183-1190. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2015.05.001.
- [2] 侯吉礼,MA Yue,LI Shuyuan, et al. Development and utilization of oil shale worldwide[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(5): 1183-1190. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2015.05.001.
- [3] 马美秀,黄建宁,张卫军,等.抚顺蓄热式加热炉与管式循环干馏气加热炉特点比较[J].重型机械,2010(S2):121-124. DOI: 10.13551/j.cnki.zjxqk.2010.s2.001.
- [4] MA Meixiu, HUANG Jianning, ZHANG Weijun, et al. Comparison between fushun regenerative furnace and tubular furnace of circulating gas[J]. Heavy Machinery, 2010(S2): 121-124. DOI: 10.13551/j.cnki.zjxqk.2010.s2.001.
- [5] 山东省工业炉窑大气污染物排放标准:DB37/2375-2013[S]. 济南:山东省环境保护厅,2013.
- [6] Emission standard of air pollutants for local standard industrial furnace in Shandong Province: DB37/2375-2013[S]. Jinan: Environmental Protection Department of Shandong Province, 2013.
- [7] CASACA C, COSTA M. Detailed measurements in a laboratory furnace with reburning[J]. Fuel, 2011, 90(3): 1090-1100. DOI:

- 10.1016/j.fuel.2010.12.020.
- [5] KIM H Y, BAEK S W, KIM S W. Investigation of fuel lean reburning process in a 1.5 MW boiler[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 183-192. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.05.027.
- [6] ZAJEMSKA M, MUSIAL D, POSKART A. Effective methods of reduction of nitrogen oxides concentration during the natural gas combustion[J]. Environmental Technology, 2014, 35(5): 602-610. DOI: 10.1080/09593330.2013.839722.
- [7] BILBAO R, ALZUETA M U, MILLERA A. Experimental study of the influence of the operating variables on natural gas reburning efficiency[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1995, 34(12): 4531-4539. DOI: 10.1021/ie00039a047.
- [8] RUTAR T, KRAMLICH J C, MALTE P C, et al. Nitrous oxide emissions control by reburning[J]. Combustion and Flame, 1996, 107(4): 453-463. DOI: 10.1016/S0010-2180(96)00057-0.
- [9] BILBAO R, ALZUETA M U, MILLERA A, et al. Experimental study and modelling of the burnout zone in the natural gas reburning process[J]. Chemical Engineering Science, 1995, 50(16): 2579-2587. DOI: 10.1016/0009-2509(95)00119-P.
- [10] BILBAO R, MILLERA A, ALZUETA M U, et al. Evaluation of the use of different hydrocarbon fuels for gas reburning[J]. Fuel, 1997, 76(14-15): 1401-1407. DOI: 10.1016/S0016-2361(97)00131-2.
- [11] YANG Y B, GOH Y R, ZAKARIA R, et al. Mathematical modelling of MSW incineration on a travelling bed[J]. Waste Management, 2002, 22(4): 369-380. DOI: 10.1016/S0956-053X(02)00019-3.
- [12] MODEST M F. Radiative heat transfer [M]. Kidlington: Academic Press, 2013.
- [13] SONG M, ZENG L, CHEN Z, et al. Industrial application of an improved multiple injection and multiple staging combustion technology in a 600 MWe supercritical down-fired boiler[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(3): 1604-1610. DOI: 10.1021/acs.est.5b03976.
- [14] DIEZ L I, CORTES C, PALLARES J. Numerical investigation of NO_x emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation[J]. Fuel, 2008, 87(7): 1259-1269. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.07.025.
- [15] HILL S C, SMOOT L D. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(4): 417-458. DOI: 10.1016/S0360-1285(00)00011-3.
- [16] SMOOT L D, HILL S C, XU H. NO_x control through reburning[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1998, 24(5): 385-408. DOI: 10.1016/S0360-1285(97)00022-1.
- [17] DIMITRIOU D J, KANDAMBY N, LOCKWOOD F C. A mathematical modelling technique for gaseous and solid fuel reburning in pulverised coal combustors[J]. Fuel, 2003, 82(15): 2107-2114. DOI: 10.1016/S0016-2361(03)00184-4.
- [18] 白明华,李路叶,徐宽,等.直接还原竖炉氢气利用率的数值分析及优化[J].燕山大学学报,2016,40(6):481-486. DOI: 10.3969/j.issn.1007-791X.2016.06.002.
- [19] BAI Minghua, LI Luye, XU Kuan, et al. Numerical analysis and optimization on hydrogen utilization in DR shaft furnace[J]. Journal of Yanshan University, 2016, 40(6): 481-486. DOI: 10.3969/j.issn.1007-791X.2016.06.002.