空气分级技术对焙烧炉内煤气燃烧 NO_x 生成的影响

杨协和,蔡润夏,张 扬,张建胜,张 海,吕俊复 (清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室,北京 100084)

摘 要:煤气化后的煤气常用于氢氧化铝焙烧过程。煤气中一般含有一定量的氨气,造成焙烧过程的 氮氧化物生成量较高。针对一种燃用煤气的氢氧化铝气态悬浮焙烧炉,采用空气分级的方案,开展了 煤气低氮燃烧过程的研究,探究空气分级技术对焙烧炉内煤气燃烧氮氧化物生成的影响规律,从而指 导实际焙烧炉内的燃烧组织设计及优化。利用 Barracuda[™] 气固两相流动计算软件,分析了一 台3000 t/h 的氧化铝焙烧炉的炉内气固流动及燃烧过程。结果表明,悬浮焙烧炉炉膛底部存在明显 的高温区,局部高温负荷点较集中,最高温度达1700 K。随着炉膛高度的增加,炉膛温度逐渐降低。 同时由于气流回流的作用,炉膛内部在炉膛底部以及上部气流转向处存在明显的颗粒堆积造成的颗 粒高浓度区域。基于气固流动计算得到炉内的温度场,耦合详细化学反应机理来考虑详细的化学反 应过程,利用 Chemkin Pro 软件建立了反应器网络,通过数值计算探究空气分级技术对含氨煤气在焙 烧炉内燃烧过程中 NO_x 生成的影响。结果表明,燃用煤气的焙烧炉内生成的氮氧化物主要为燃料型 氮氧化物。空气分级为 20% 时,空气分级对煤气燃烧氮氧化物生成的抑制效果有限。当空气比例为 40% 时,主燃烧区呈还原性气氛,焙烧炉内煤气燃烧生成 NO_x 减排率达 70.3%。

关键词:空气分级;煤气;燃烧;氧化铝焙烧炉; NO_x 排放

中图分类号:TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)03-0075-07

Effect of air grading technology on NO_x formation of coal gas

combustion in a calciner

YANG Xiehe, CAI Runxia, ZHANG Yang, ZHANG Jiansheng, ZHANG Hai, LYU Junfu

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China) **Abstract**: Coal gas produced from coal gasification, is frequently used as a fuel in the aluminium hydroxide calcination process. Normally, coal gas generally contains a certain amount of ammonia, resulting in a high amount of nitrogen oxides in the roasting process. In this paper, the low-nitrogen combustion process of gas was studied by air classification method in a gas-fired aluminum hydroxide suspended calciner, and the influence of air classification technology on the formation of nitrogen oxides in gas combustion in the calciner was investigated, so as to guide the actual combustion structure design and optimization in the calciner. BarracudaTM software was utilized to simulate the gas-solid two-phase flow and the combustion process in a 3 000 t/h Al_2O_3 calciner. The results show that there is an obvious high temperature zone at the bottom of the suspension calciner. The local high temperature load point is concentrated, and the maximum temperature is up to 1 700 K. With the increase of furnace height, the mean temperature decreases gradually. Additionally, due to the effect of airflow reflux, there is a high concentration area of particles in the bottom of the furnace and the upper airflow diversion. Based on the temperature field in the furnace calculated by gas-solid flow, and the detail chemical reaction process was considered by coupling the detailed chemical reaction mechanism. The reactor network was established by using Chemkin Pro software, and the influence of air classification technology on the formation of NO_x in the combustion process of ammonia–containing gas in the calciner was investigated by numerical calculation.

引用格式:杨协和,蔡润夏,张扬,等.空气分级技术对焙烧炉内煤气燃烧 NO_x 生成的影响[J]. 洁净煤技术,2019,25(3):75-81.

YANG Xiehe, CAI Runxia, ZHANG Yang, et al. Effect of air grading technology on NO_x formation of coal gas combustion in a calciner [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(3):75-81.



收稿日期:2019-04-04;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19040403

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51706119)

作者简介:杨协和(1994—),男,广东汕头人,博士研究生,主要从事清洁高效燃烧技术方面的研究。E-mail;yangxh17@mails.tsinghua.edu.cn。通 讯作者:张 扬(1986—),助理研究员,主要从事清洁高效燃烧技术方面的研究。E-mail;yang-zhang@tsinghua. edu.cn

中国煤炭行业知识服务平台 www.chinacaj.ne

The results show that the main nitrogen oxides produced in the calciner burning gas are fuel nitrogen oxides. In addition, the inhibition effect of air classification on the formation of NO_x in gas combustion is limited when the staged-air ratio is 20%. However, the NO_x emission generated by gas combustion in calciner reduced up to 70.3% when the staged-air ratio is 40%, and the reducing atmosphere appears in the main combustion area.

Key words:air-staged; coal gas; combustion; alumina calciner; NO_x emission

0 引 言

我国煤炭资源储存量巨大,是主要的燃料和工 业原料,不但具有高硫、高灰煤比等特点,燃烧过程 中会产生 SO₂等有害气体,而且利用率较低。为实 现煤炭的高效、清洁转化,采用煤气化技术,将煤从 固态能源转化为气态,脱除 H₂S 后得到煤气再进行 燃烧是目前重要的技术手段^[1-3]。在制铝工业中, Al(OH)₃的焙烧常以煤气作为燃料,从而达到保证 Al,O₃产品质量和清洁燃烧的目的。

2010年前, Al (OH), 气态悬浮焙烧过程中的 NO, 排放并未得到关注, 氮氧化物的实际排放值在 150~400 mg/m3。随着国家对大气污染防治工作的 进一步加强,环保部颁布实施的《重点区域大气污 染物防止"十二五"规划的相关要求》,在国家污染 物排放标准《铝工业污染物排放标准》(GB 25465— 2010) 中增加了 NO, 的排放限值, 要求 Al(OH), 焙 烧炉的 NO, 排放在 100 mg/m3 以下,促使氧化铝生 产工业加强了以增设 SCR(选择性催化还原)、 SNCR(选择性非催化还原)为主要技术路线的低氮 改造研究。SCR 与 SNCR 技术成熟,脱硝效率高,但 由于使用脱硝剂(氨或尿素)和催化剂,运行成本 高,且由于气态悬浮焙烧炉的烟气中含有大量固体 氧化铝颗粒,会使 SCR 催化剂严重失活。因此,低 氮燃烧技术^[4]在氧化铝焙烧炉中的应用引起了广 泛关注。低氮燃烧技术包括低氮燃烧器技术^[5-8]、 分级燃烧(空气分级和燃料分级)技术^[9-12]、富氧燃 烧^[13-15]和烟气再循环(FGR)^[16-18]等技术,其中,空 气分级技术已广泛应用于大型工业化锅炉中。空气 分级燃烧技术是将总燃烧空气量分2个阶段送入锅 炉:先将一部分空气与燃料混合燃烧,在燃烧区形成 富燃还原性气氛,抑制了燃烧过程中 NO, 的形成; 然后将剩余部分空气通入燃烧后区域与未燃烧完全 的燃料进一步混合燃烧,此时虽处于富氧条件,但燃 烧温度低, NO, 的生成量降低, 从而降低了总 NO, 牛成量[10]。

Fan 等^[19-20]在一维炉上研究了空气分级燃烧对 无烟煤着火及燃烧过程中 NO_x 排放规律的影响,试 验最高温度1573 K,结果表明,随着燃烧空燃比的 降低,NO_x生成量显著下降。Houshfar等^[21]利用链条炉进行空气分级燃烧对生物质燃料 NO_x 排放特性研究,试验温度 1 123 K,发现在空气分级燃烧以及高燃料氮燃烧条件下,NO_x 排放量降低了约90%。周俊虎等^[10]将空气分级技术应用于一台SG-420/13.7-W756 电站锅炉的改造,实现了37.8%的脱硝率。这些研究大多集中于实际煤粉锅炉及实验室尺度火焰,关于含氨煤气在氧化铝悬浮焙烧炉内燃烧的 NO_x 生成机制研究较少,且焙烧炉工况下空气分级降低煤气燃烧 NO_x 的机制尚未有明确的结论。

从生成机制看,可燃煤气中含有一定的氮(气 化条件下常以氨气形式存在),在氧化铝悬浮焙烧 炉内燃烧时,会有热力型和燃料型 NO,^[22-23]生成。 热力型 NO, 的生成主要受氧浓度以及在高温区停 留时间等因素影响,并随温度升高呈指数增长;快速 型 NO_x 的主要影响因素是燃料浓度和氧浓度^[23],在 过量空气系数大的情况下生成量较少。NO_x的生成 还会受雷诺数影响,雷诺数越大,NO_x 排放量越 少^[24]。因此,控制氧化铝悬浮焙烧炉内 NO, 的关键 在于控制焙烧炉内燃烧区域的气氛,形成还原性环 境,同时降低燃烧温度,从而抑制 NO, 的生成。本 文基于空气分级方案,采用 Barracuda^{™[25-26]}颗粒流 体力学计算软件,对一个3000 t/h 的悬浮焙烧炉内 气固两相流动规律、温度场进行仿真计算;并在温度 场基础上,将整个焙烧炉划分为由多个反应器模型 组成的反应网络,采用 Chemkin Pro^[27]软件,研究了 不同空气分级比例下悬浮焙烧炉内 NO_x 的生成规 律,以期对氧化铝焙烧炉的低氮燃烧设计提供参考。

1 数值计算方法

1.1 计算对象的建立

采用 G. S. C. 气态悬浮焙烧炉的焙烧段(P04) 作为研究对象,满负荷运行时氧化铝的产量为3000 t/h。炉 膛 高 23.34 m,底 部 为 圆 形 截 面,直径 5.75 m,距离炉膛底部 0.6 m 和 1.5 m 处设置 2 排 烧嘴,每排烧嘴沿炉膛周向均匀设置 6 个。运行过 程中,炉内温度为1273~1573 K,主燃烧区空气从 炉膛底部给入,Al(OH)₃颗粒由炉膛底部锥段给

杨协和等:空气分级技术对焙烧炉内煤气燃烧 NO_x 生成的影响



Fig. 1 Structure of simulation object

1.2 Barracuda[™] 计算网格划分及边界条件

根据焙烧炉的基本参数,在 Barracuda^{™[25-26]}中 建立 3D 计算模型。考虑到计算效率及研究对象, 计算区域仅包含焙烧炉炉膛内部。图 1(b)为模拟 对象的三维模型,模型尺寸为6 m × 8 m × 25 m。 对网格进行无关性分析发现,网格尺寸过大,计算结 果精度无法达到要求;网格尺寸过小,所需计算量 大,计算时间长。综合考虑选择 10 mm 中等精度尺 寸结构化网格,精度与精细网格相近,网格总数量为 10 万个。

初始状态下,炉膛温度设置为1473 K,压力为 常压。计算开始后,模型出口处设置为压力出口,炉 膛四壁设置为绝热界面,主燃烧区空气由模型下部 入口给入,空气来流温度为993 K,干空气流量 为136 160 m³/h,水蒸气流量为12 670 m³/h,同时 底部的空气带入52 570 kg/h固体氧化铝,经预脱水 的固体氧化铝(170 870 kg/h)和氢氧化 铝(22 330 kg/h)由锥段的物料进料口进入炉膛。 同时,氧化铝不断从出口离开,并有新鲜的固体物 料、燃料和空气补充,最终达到动态平衡。由于本文 炉膛内颗粒浓度较大,分布范围较广,因此选用 Wen-Yu/Ergun 曳力公式计算气固两相间曳力。计 算中,时间步长取0.001 s,Al(OH)₃ 焙烧脱水过程 中的动力学参数参照文献[28]。

1.3 计算工况设定

选取一个基准工况进行气固两相流动计算,得 到 Al(OH)₃、Al₂O₃颗粒浓度空间分布和温度空间 分布,该基准工况与原 3 000 t/h 悬浮焙烧炉工况相 同,且无任何的燃料分级和空气分级;在基准工况温 度场的基础上,采用 Chemkin pro 软件,研究燃料中 氨气体积分数(0、200×10⁻⁶、400×10⁻⁶)对燃烧过程 中 NO_x 生成规律的影响;模拟计算不同空气分级比 例(20%、40%)条件下的 NO_x 生成规律。相关工况 见表1。

表 1 工况设定 Table 1 Simulation conditions

空气分级比例/%	氨气体积分数/10-6
0	0
0	200
0	400
20	400
40	400
	空气分级比例/% 0 0 20 40

2 结果与讨论

2.1 炉膛内气固两相流动规律及温度场

在悬浮焙烧炉 P04 中,炉内的气固流动及温度 分布对整体运行至关重要。图 2 为 100 s 时炉膛内 部温度和颗粒浓度分布,该工况下无燃料分级和空 气分级。从图 2(a)可看出,当气固流动稳定后,炉 膛底部存在明显的高温区,局部高温负荷点较集中, 最高温度达 1 700 K。随着炉膛高度的升高,炉膛温 度逐渐降低。炉膛内部的温度分布较均匀。由图 2 (b)可知,炉膛底部存在一个能维持一定高度(3 ~ 5 m)的密相区,在炉膛底部截面变化处,出现局部 颗粒浓度较高的现象,这是由于此处气体流动发生 回流的缘故。在此区域,物料与燃烧烟气发生强烈 混合,物料吸热脱水并发生晶相转变,烟气温度迅速 降低。同时,炉膛上部烟气转向处,也存在局部颗粒 浓度较高区域。



根据图 2 的计算结果,后处理计算得到悬浮焙 烧炉延高度方向的截面平均温度,如图 3 所示。悬 浮焙烧炉内的燃烧过程可分成4个阶段:① 热空气 与第1层燃料反应,燃烧放热使温度升高,约 为1380 K;② 第2层燃料注入后,由于燃料气流温 度较低,炉内温度稍降,但随着第2层燃料的燃烧放 热,炉内温度进一步升高,约为1460 K;③ 随着物 料注入,物料较低的温度及其快速脱水吸热使炉内 温度显著降低,降至约1170 K,该阶段的气固流动 具有喷动床特征,气固两相之间相对滑移较明显,混 合较剧烈;④ 混合完成后,气固两相流动具有气流 床特征,未完全燃尽的燃料进一步燃烧放热,温度缓 慢上升,为氧化铝样品的晶相转变提供所需的温度 条件。



图 3 悬浮焙烧炉内的截面平均温度分布(下层烧嘴定 义为0m,无空气分级)

Fig. 3 Average cross-section temperature distribution in the suspension calciner (lower burner is defined as 0 m, without air-staged)

2.2 燃料中氨气体积分数对污染物排放的影响

通过能嵌合详细反应动力学的 Chemkin Pro^[27] 软件,模拟计算了空气分级工况下氨气体积分数对 焙烧炉燃烧过程 NO_x 排放的影响。根据悬浮焙烧 炉 PO4 的燃烧特征,选取 Chemkin Pro 软件中的平 推流反应器(PFR)模块模拟燃烧过程 NO_x 的生成 过程。PFR 反应器是一维流动模型,可考虑详细的 化学反应过程,对实际燃烧现象进行化学动力学分 析。计算过程中采用 GRI 3.0 详细化学反应机 理^[29],该机理包含 C/H/O 等详细化学反应以及 NO_x 化学子机理,广泛应用于实际燃烧设备中 NO_x 生成规律以及化学路径的分析。

根据 2.1 节计算得到的沿炉膛高度的温度特征,并于距下层烧嘴 15 m 处增加空气分级入口,将 P04 抽象为一个带有 5 个 PFR 反应器的燃烧系统, 建立反应器网络模型(图4),采用 Chemkin Pro 软件模拟 NO_x 生成的详细化学动力学。在计算中,反应器必须确定温度和停留时间。本文采用 Baracuda[™] 计算对应工况下的炉内截面平均温度(图3)和停留时间,再将此作为边界条件给入反应器网络中。本







不同体积分数氨气(0、200×10⁻⁶、400×10⁻⁶)条 件下,无空气分级时 Chemkin Pro 计算得到的 P04 燃烧过程中 NO,沿炉膛高度方向的生成情况如图 5 所示。可以看出,燃料中氨气体积分数对焙烧炉 NO₂的生成具有显著影响。燃料中氨气体积分数为 0时, 焙烧炉中 NO, 主要为热力型 NO, , PO4 内部沿 炉膛高度方向上 NO_x 浓度几乎为0,说明在氧化铝 焙烧炉工况下,主要 NO_x 为燃料型 NO_x。结合图 3, 炉膛内部截面平均温度最高值未超过1500℃,这 是 P04 燃烧过程中生成热力型 NO, 较少的原因。 随着燃料中氨气体积分数增加,截面平均 NO,浓度 增加,特别在炉膛下部存在 NO_x 生成浓度的局部最 高点,这是由于该区域为燃料的主要燃烧区,燃料中 大量氮元素(以 NH, 形式存在)被氧化生成燃料型 NO_x。同时, P04 出口处 NO_x 浓度与燃料中氨气体 积分数近似呈线性关系。说明若焙烧炉的燃料中含 有氨气,则在整个炉膛燃烧过程中,燃料型 NO,占 主导地位。因此,降低燃料型 NO, 的生成是氧化铝 焙烧炉低氮技术需要考虑的重点问题。



图 5 不同氨气体积分数下截面平均 NO_x 浓度分布 (下层烧嘴 0 m)

Fig. 5 Average NO_x concentration distribution at the lower section of different ammonia gas volume fraction (lower burner is 0 m)

煤气燃烧过程中,生成 NO_x 的同时还伴随 CO 的生成。图 6 为燃料中不同氨气体积分数下炉膛高 度方向截面的平均 CO 体积分数变化情况。可以看

出,氨气体积分数变化对炉膛内部 CO 生成的影响 可忽略。炉膛内部由下向上的 CO 生成量先降后 升,在距下层烧嘴 8 m 处最低,炉膛出口处 CO 体积 分数不超过 10⁻⁶。说明在氧化铝焙烧炉中,污染物 排放主要是燃料型 NO_x。







2.3 空气分级对焙烧炉内 NO_x 排放的影响

焙烧炉内燃烧产生的主要污染物为燃料型 NO_x,空气分级技术对抑制燃料型 NO_x 具有显著效 果。采用平推流反应器网络模型,嵌合 GRI 3.0 详 细化学反应机理,计算不同空气分级比例条件下 NO_x和 CO 生成情况。其中,主燃烧区的空气由底 部给入,分级空气于 PO4 中部 15 m 处给入,还原区 停留时间约1 s。空气分级影响的计算分为2 个工 况:① 20%分级空气,燃料中氨气体积分数为400× 10⁻⁶,此工况下,虽然空气进行了分级,但主燃烧区 的过量空气系数为1.12,仍处于氧化性气氛,但氧 化性的程度较原始工况低;② 40%分级空气,燃料 中氨气体积分数为400×10⁻⁶,此工况下,经空气分 级后,主燃烧区的过量空气系数为0.84,处于欠氧 还原性气氛。

Chemkin Pro 化学动力学计算结果如图 7 所示。 可以看出,与原工况相比,20% 空气分级时,P04 下 部 NO_x 浓度升高。这是由于减少了空气量后,燃烧 产物被稀释的程度降低。在距下层烧嘴 15 m 处注 入剩余 20% 的分级空气时,NO_x 浓度被稀释,使出 口处 NO_x 浓度略低于原工况。表明虽然采取了空 气分级方案,但若未将燃烧氛围调整到合理范围内, 空气分级对于 NO_x 生成的抑制作用有限。采用 40% 空气分级时,初始阶段 NO_x 的生成浓度很高, 但由于存在较长时间的还原性气氛,生成的 NO_x 逐 渐被还原,其浓度降至 50×10⁻⁶ 以下。当剩余 40% 的分级空气送入后,虽有少量被氧化,NO_x 浓度略 升,但出口 NO_x 仍处于较低水平。与无空气分级的 基准工况相比,炉膛出口处 NO_x 浓度下降约 70%。



Fig. 7 Comparison of cross-section average NO_x concentration distribution under different air-staged ratios (lower burner is 0 m)

(下层烧嘴0m)

对比无空气分级和 40% 空气分级工况发现,初 始燃烧阶段 NH₃ 的氧化速度很快,几乎所有的 NH₃ 均转化为 NO_x。因此,无论空气分级与否,都会在炉 膛底部形成 NO_x 高浓度区(>150×10⁻⁶)。40% 空气 分级情况下,由于形成还原性气氛,生成的 NO_x 被 还原,其最终浓度较低(<50×10⁻⁶)。由于初始阶段 几乎所有 NH₃ 均被消耗,此时 NO_x 的还原剂并非 NH₃,而是不完全燃烧产生的 H₂、CO 和碳氢有机 物。

空气分级燃烧对焙烧炉内 CO 生成的影响如图 8 所示。采用 20% 空气分级燃烧时,炉膛下部 CO 体积分数比基准工况时略高。而剩余 20% 的分级 空气送入后,炉膛内 CO 体积分数与基准工况时基 本相同。采用 40% 空气分级时, P04 下部的 CO 体 积分数显著增高,但当分级空气给入后,未燃尽的 CO 迅速被氧化,浓度降至很低。整体上看,空气分 级对 P04 出口的 CO 体积分数的影响有限,采用空 气分级方案可保证燃烧效率。各工况下 NO_x 减排 结果见表 2。

表 2 不同空气分级方案的 NO_x 减排计算结果 Table 2 Summary of the NO_x emission reduction of different air-staged schemes

方案	无空气分级	20% 空气分级	40% 空气分级
NO _x 排放量/10 ⁻⁶	138	132	41
减排率/%	0	4.3	70.3
CO 排放量/10-6	<5	<5	<5
燃尽率/%	>99	>99	>99

综上,数值模拟结果表明,若空气分级燃烧方案 设计合理,分级空气比例合适,采用空气分级燃烧方 式可显著降低燃用含氨煤气的焙烧炉 NO, 排放。



(下层烧嘴0m)

Fig. 8 Comparison of cross-section average CO volume fraction distribution under different air-staged ratios(lower burner is 0 m)

3 结 论

1)Barracuda[™] 气固两相流动模拟计算表明,在 焙烧炉膛炉部以及上部气流转向处,存在颗粒高浓 度区,该区域气固混合剧烈,烟气温度迅速下降,最 后维持在1200~1300 K。

2) Chemkin 化学反应动力学计算表明,氧化铝 焙烧炉内主要污染物为燃料型 NO_x。燃料中氨气体 积分数升高会造成炉膛出口 NO_x 浓度线性上升,但 对 CO 体积分数影响有限。

3) 若未将燃烧氛围调整到合理的工况范围内, 空气分级对焙烧炉出口 NO_x 排放浓度的降低并不 显著。采用 40% 空气分级方案时, 炉膛出口处 NO_x 浓度显著降低。同时, 空气分级对焙烧炉出口 CO 体积分数影响有限, 采用空气分级方案可保证燃烧 效率。

参考文献(References):

[1] 汪宝林.煤气化化学与技术进展[J].洁净煤技术,2014,91(3):69-74.

WANG Baolin. Chemistry and technology progress of coal gasification[J]. Clean Coal Technology, 2014, 91(3):69-74.

- [2] 龚泽儒,王晓娜,吕俊复,等.离子体煤气化技术研究进展[J]. 洁净煤技术,2019,25(1):35-40.
 GONG Zeru, WANG Xiaona, LYU Junfu, et al. Research on plasma gasification technology of coal [J]. Clean Coal Technology, 2019,25(1):35-40.
- [3] 蔡东方,王黎,徐静,等.煤制天然气煤气化技术的研究现状及 分析[J]. 洁净煤技术,2011,17(5):44-47.
 CAI Dongfang, WANG Li, XU Jin, et al. Present status and analysis on coal gasification technology for SNG[J]. Clean Coal Technolo-

gy,2011,17(5):44-47. [4] 宋少鹏,卓建坤,李娜,等.天然气供热锅炉低氮燃烧技术研究 现状[J].供热制冷,2016(2):18-21.

SONG Shaopeng, ZHUO Jiankun, LI Na, et al. Research status of

low nitrogen combustion technology for natural gas heating boiler [J]. Heating and Cooling, 2016(2):18-21.

- [5] 胡瓅元,罗永浩,周力行,等.外二次旋流风对旋流煤粉燃烧及 NO 生成的影响[J].化工学报,2010,61(9):2437-2441.
 HU Liyuan,LUO Yonghao,ZHOU Lixing, et al. Effect of outer secondary air on swirling pulverized-coal combustion and NO formation[J]. CIESC Journal,2010,61(9):2437-2441.
- [6] SURJOSATYO A, PRIAMBODHO Y D, KWOK C K. Investigation of gas swirl burner characteristic on biomass gasification system using combustion unit equipment (CUE) [J]. Journal Mekanikal, 2011,33(12):15-31.
- [7] HOU S S, LEE C Y, LIN T H. Efficiency and emissions of a new domestic gas burner with a swirling flame [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(5):1401-1410.
- [8] 刘慧,张林,杨晓晰,等. 缝式低 NO_x 燃烧器结构的优化模拟
 [J]. 化工学报,2018,69(4):1723-1730.
 LIU Hui,ZHANG Lin, YANG Xiaoxi, et al. Structure optimization simulation of slit burner with low NO_x[J]. CIESC Journal,2018, 69(4):1723-1730.
- [9] 岑可法,姚强.高等燃烧学[M].杭州:浙江大学出版社,2002: 603-610.
- [10] 周俊虎,赵琛杰,许建华,等. 电站锅炉空气分级低 NO_x 燃烧 技术的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(23):19-23.
 ZHOU Junhu, ZHAO Chenjie, XU Jianhua, et al. Application of air-staged and low NO_x emission combustion technology in plant boiler[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(23):19-23.
- [11] BAI W, LI H, DENG L, et al. Air-staged combustion characteristics of pulverized coal under high temperature and strong reducing atmosphere conditions[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(3):1820-1828.
- [12] 宋少鹏,卓建坤,李娜,等.燃料分级与烟气再循环对天然气低氮燃烧特性影响机理[J].中国电机工程学报,2016,36
 (24):6849-6858.

SONG Shaopeng,ZHUO Jiankun,LI Na, et al. Low NO_x combustion mechanism of a natural gas burner with fuel-staged and flue gas recirculation [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (24):6849-6858.

- [13] 刘皓,任瑞琪,黄永俊,等. 富氧燃烧系统中 NO 的还原及其 排放[J]. 化工学报,2011,62(2):495-501.
 LIU Hao, REN Ruiqi, HUANG Yongjun, et al. Reduction and emission of NO in oxy-fuel system[J]. CIESC Journal,2011,62 (2):495-501.
- [14] LEE C Y, BAEK S W. Effects of hybrid reburning/SNCR strategy on NO_x/CO reduction and thermal characteristics in oxygen-enriched LPG flame [J]. Combustion Science and Technology, 2007,179(8):1649-1666.
- [15] AUDAI H A, JAMAL N, DAVID D. CFD modelling of air-fired and oxy-fuel combustion in a large-scale furnace at Loy Yang a brown coal power station [J]. Fuel, 2012, 102:646-665.
- [16] 曾强,刘汉周,阎良.烟气再循环对天然气非预混燃烧 NO_x 排 放特性的影响[J].燃烧科学与技术,2018,24(4):369-375.
 ZENG Qiang,LIU Hanzhou, YAN Liang. Effect of flue gas recirculation on NO_x emission characteristics of natural gas non -

80

premixed combustion [J]. Journal of Combustion Science and Technology ,2018 ,24(4) ;369–375.

- [17] 吕煊,顾春伟,刘建军. 基于 F 级燃气轮机烟气再循环系统的 分析[J]. 动力工程学报,2018,38(1):24-28.
 LYU Xuan, GU Chunwei, LIU Jianjun. Application analysis of exhaust gas recirculation technology in F-class gas turbine[J].
 Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(1): 24-28.
- [18] 张利琴,宋蔷,吴宁,等. 煤烟气再循环富氧燃烧污染物排放 特性研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(29):35-40.
 ZHANG Liqin,SONG Qiang, WU Ning, et al. Study on pollutant emission characteristics from oxy-fuel combustion of coal with recycled flue gas[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(29):35-40.
- [19] FAN W, LIN Z, KUANG J, et al. Effect of air-staging on anthracite combustion and NO_x formation [J]. Energy & Fuels, 2009, 23 (1):111-120.
- [20] FAN W, LIN Z, LI Y, et al. Effect of temperature on NO release during the combustion of coals with different ranks[J]. Energy & Fuels, 2010, 24(3):1573-1583.
- [21] HOUSHFAR E, SKREIBERG O, LOVAS T, et al. NO_x emission reduction by staged combustion in grate combustion of biomass fuels and fuel mixtures [J]. Fuel, 2012, 98:29–40.
- [22] 徐旭常,吕俊复,张海.燃烧理论与燃烧设备[M].北京:机械 工业出版社,1990.
- [23] MILLER J A, BOWMAN C T. Erratum: Mechanism and modeling

of nitrogen chemistry in combustion [J]. Progress in Energy & Combustion Science, 1990, 16(4):287-338.

- [24] 王海峰,陈义良. 湍流扩散火焰中氮氧化物排放的数值研究
 [J]. 化工学报,2005,56(2):209-214.
 WANG Haifeng, CHEN Yiliang. Numerical investigation of nitrogen oxides emission from turbulent non-premixed flames[J]. CI-ESC Journal,2005,56(2):209-214.
- [25] 张贤,葛荣存,张守玉,等. CFB 密相区大颗粒横向扩散系数的 CPFD 模拟[J]. 化工学报,2017,68(10):3725-3732.
 ZHANG Xian,GE Rongcun,ZHANG Shouyu, et al. Study on lateral dispersion coefficient of large solid particles in a CFB dense zone using CPFD method [J]. CIESC Journal, 2017,68(10): 3725-3732.
- [26] ZHAO P, SINDER D, WILLIAMS K. Computational particle-fluid dynamics simulations of a commercial-scale turbulent fluidized bed reactor[C]//AICHE Annual Meeting. San Francisco, 2006.
- [27] CHEMKIN-PRO. Release 15131, Reaction Design[CP]. San Diego.
- [28] 彭志宏,李琼芳,周秋生. 氢氧化铝脱水过程的动力学研究
 [J]. 轻金属,2010(5):16-18.
 PENG Zhihong,LI Qiongfang,ZHOU Qiusheng. Studies on dehydration kinetics of aluminium hydroxide[J]. Light Metals,2010 (5):16-18.
- [29] SMITH G P, GOLDEB D M, FRENKLACH M, et al. GRI-Mech 3.0[EB/OL]. www. me. berkeley. edu/gri_mech.