带式焙烧机球团控制NO_x和含氧量探索研究与应用

彭坤乾[1,2]，景 涛[3]，甘 敏[3]，孙大为[4]

(1. 北京首钢国际工程技术有限公司 烧结球团事业部，北京 100043；2. 北京市冶金三维仿真设计工程技术研究中心，北京 100043；3. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；4. 首钢京唐钢铁有限责任公司，河北 唐山 063200)

摘要： 带式焙烧机球团生产工艺排放尾气中 NO_x 质量浓度实测为 135～343 mg/Nm³，含氧量实测为 18.23%～19.32%，难以满足现有排放标准。本文通过分析 NO_x 和氧的来源、生成机理和各工艺段的分布，探索研究控制排放尾气中 NO_x 质量浓度和含氧量的措施和途径。分析发现，带式焙烧机 NO_x 主要来源为热力型 NO_x，其中焙烧段 NO_x 产生量约占总产生量的 68%，预热段 NO_x 产生量约占总产生量的 32%，实测风箱下 NO_x 质量浓度最高为 777 mg/Nm³。控制 NO_x 的重点应集中在燃烧室：采用低氮燃烧器、控制球团焙烧温度、控制烧嘴燃气消耗等方式可有效控制尾气中 NO_x 的质量浓度。通过在抽干段风箱增加密封风箱、增设回热风循环冷却风机、降低冷却空气引入量等措施可降低球团生产工艺排放尾气中的含氧量。

关键词： 带式焙烧机；NO_x；含氧量；氧平衡；焙烧；冷却

中图分类号： TF046.6　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764(2022)03－0051－08

doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.039

Exploratory research and application on NO_x and oxygen content controlling in pelletizing of belt roaster

PENG Kunqian[1,2], JING Tao[3], GAN Min[3], SUN Dawei[4]

(1. *Sintering and Pelletizing Division, Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd., Beijing* 100043, *China*; 2. *Beijing Metallurgical 3D Simulation Design Engineering Technology Research Center, Beijing* 100043, *China*; 3. *School of Resource Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*; 4. *Shougang Jingtang United Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan* 063200, *Hebei, China*)

Abstract: The mass concentration of NO_x in the exhaust gas of the pellet production process of belt roaster is measured to be 135～343 mg/Nm³, and the oxygen content is measured to be 18.23%～19.32%, which is difficult to meet the existing emission standards. By analyzing the source, generation mechanism and distribution of each process section of NO_x and oxygen, the measures and ways to control the mass concentration and oxygen content of NO_x in the exhaust gas are explored and studied. The analysis shows that the main source of NO_x from the belt roaster is thermal NO_x, in which the NO_x production in the roasting section accounts for about 68% of the total production, and the NO_x production in the preheating section accounts for about 32% of the total production, and the measured NO_x mass concentration under the airbox is up to 777 mg/Nm³. The focus of NO_x control should be concentrated in the combustion chamber: the NO_x mass concentration of tail gas can be effectively controlled by using low nitrogen burners, controlling the pellet roasting temperature and the burner gas consumption. The oxygen content in the exhaust

收稿日期： 2022－02－10；**修回日期：** 2022－03－07

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51974371)

作者简介： 彭坤乾(1987—)，男，工程师，从事烧结球团设计及工业烟气综合治理等方面研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

gas of the pellet production process can be reduced by adding sealed air boxes in the airbox of the extraction section, installing additional cooling fans for hot air recirculation, and reducing the introduction of cooling air, etc.

Key words: belt roaster; NO_x; oxygen content; oxygen balance; roasting; cooling

带式焙烧机球团工艺具有热效率高、可靠耐用性强、原料适应性强、废气粉尘少、成品率高，保温效果好、使用寿命长、热耗低等优点[1-2]，在高炉冶炼中可起到增产节焦、改善高炉技术经济指标和降低生铁成本的作用[3-4]。优质冶金球团的制备和高炉高比例球团冶炼将是中国钢铁长流程降低污染物排放，实现低碳冶炼和可持续发展的有效途径[5]。

高炉炼铁炉渣碱度要求在1.0～1.2，高炉煤粉喷吹带入灰分，高碱度烧结矿碱度一般为1.8～2.2，当球团矿配比在50%左右条件下，球团矿碱度需要在1.0左右才能满足炉料碱度的平衡。近些年随着大型带式焙烧机工艺生产熔剂性球团矿在首钢的成功应用，国内球团生产工艺，逐步由链箅机—回转窑—环冷机工艺向带式焙烧机工艺转变，目前已建成投产的大型带式焙烧机球团生产线有11条，在建的有10条。

NO_x是造成酸雨、温室效应以及破坏大气臭氧层的主要物质之一，也是当前我国雾霾天气频发的罪魁祸首之一，对人体有毒害作用。因此，国家对NO_x的排放标准越来越严格[6]。带式焙烧机球团生产尾气中NO_x和含氧量均比较高，难以满足现有排放标准，特别在钢铁行业超低排放大环境下，尾气脱硝末端治理难度大、成本高。因此，研究球团生产中NO_x产生的影响因素以及控制措施具有重要的现实意义。

孙大为等[7]通过对带式机NO_x生成量和生产操作参数进行分析，揭示了带式焙烧机生产中NO_x生成量主要受燃气流量控制，单纯调整温度控制NO_x排放难以取得显著效果。乔俊等[8]通过采用低氮燃烧技术对回转窑球团生产线燃烧器进行改造，焙烧烟气中的NO_x质量浓度降低了45.56%。胡兵等[9]通过对NO_x生成机理结合实际工况和生产条件的研究，得出空气中氮气的高温氧化和燃料中氮的燃烧是NO_x的主要来源。ÅBERG[10]通过CFD仿真模拟带式球团燃烧重油条件下燃烧室NO_x分布，认为高空燃比和炉内高温，热力型NO_x占主导地位。BOLEN[11]通过研究认为球团生产NO_x排放质量浓度范围宽，主要为热力型，当以天然气做为燃料时，吨球NO_x排放量高达1 200 g以上，高于重油。EDLAND[12]研究回转窑球团NO_x生成，根据实验结果，当采用燃气和重油作为燃料时，热力型NO_x占主导，当采用固体燃料时，燃料结合氮形成的NO_x占主导。FREDRIKSSON等[13]针对LKAB降低NO_x生成进行了一系列研究与应用，当采用预燃烧器，二次风温度为450 ℃时，NO_x排放可以减少约65%，随着二次空气温度的降低，NO_x的排放可以进一步减少，但能源成本会升高。本文通过分析NO_x和氧的来源，对其分布进行实测，研究带式焙烧机燃烧系统的特点和进行尾气含氧量的理论计算，提出控制NO_x和含氧量的思路和措施，以期为球团从业者提供借鉴。

1 NO_x和氧的来源与分布

表1为一些已建成投产带式焙烧机工程尾气中NO_x和含氧量。由表1可知，所测带式焙烧机球团生产工艺排放尾气中NO_x质量浓度为135～343 mg/Nm^3，含氧量(体积分数)为18.23%～19.32%，呈现出排放指标高，随生产条件波动大，多生产要素综合影响等特点。其主要影响因素有原料条件、燃料条件(预热、焙烧段)温度、工艺风系统配置、煤气消耗量、风箱漏风率、烧嘴形式等。

1.1 NO_x的来源与分布

1.1.1 NO_x的来源

NO_x通常包括N_2O、NO、NO_2、N_2O_3、NO_3、N_2O_4、N_2O_5等，从大气污染的角度看，主要是NO和NO_2。而NO_x的生成一般分为3种：热力型、快速型和燃料型。NO_x质量浓度与火焰温度的关系见图1。由图1可知，当火焰

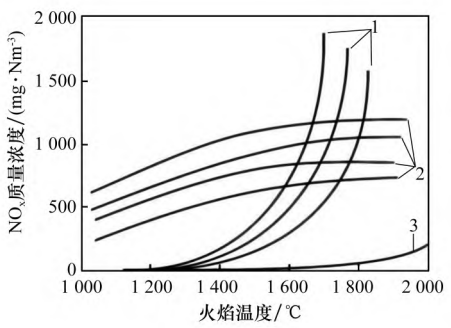
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　带式焙烧机生产线尾气 NO_x 质量浓度与含氧量

Table 1　NO_x and oxygen content of straight grate production line

球团生产线	尾气 NO_x 质量浓度/(mg·Nm^{-3})		尾气含氧量(体积分数)/%	
	正常值	最高值	正常值	最高值
京唐 4×10^6 t/a 带式焙烧机(1#线)	135	325	18.45	19.18
京唐 4×10^6 t/a 带式焙烧机(2#线)	138	278	18.51	19.32
京唐 4×10^6 t/a 带式焙烧机(3#线)	141	269	18.34	19.17
包钢 5×10^6 t/a 带式焙烧机生产线	168	343	18.23	18.7

温度达到 1 300 ℃时开始产生热力型 NO_x，1 400 ℃以上火焰周围空气中的 N_2 被快速氧化生成 NO_x，一般炉膛燃烧过程中产生的 NO_x 95%为热力型[6]。



1—热力型 NO_x；2—燃料型 NO_x；3—快速型 NO_x。

图 1　NO_x 质量浓度与火焰温度的关系曲线

Fig. 1　The relationship curve between NO_x concentration and flame temperature

带式焙烧机球团生产往往采用高热值的燃料，国内以焦炉煤气为主，也可采用混合煤气(天然气+高炉煤气+转炉煤气)，一般要求热值不小于 10 465 kJ/Nm^3。燃料中带入的 N 极少，且燃烧过程为强氧化气氛，燃料型和快速型不是带式焙烧机 NO_x 主要来源。CO_x[14] 通过研究 NO_x 的生成和控制，根据 Zeldovich 方程，在助燃空气含氧量为 20%的条件下，当火焰温度达到 1 300 ℃以上时，NO 开始生成。典型的带式焙烧机烧嘴燃烧 CFD 温度云图[15] 见图 2，在二次助燃风温度为 1 100 K(827 ℃)和出口温度为 1 500 K(1 227 ℃)时，燃烧火焰区域温度可达到 1 900～2 150 K(1 627～1 877 ℃)。带式焙烧机烧嘴采用燃气作为燃料，火焰区域温度超过 1 600 ℃，热力型 NO_x 大量生成，为主要来源。

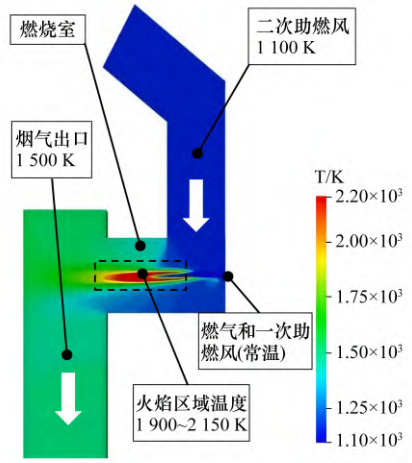


图 2　典型的带式焙烧机烧嘴燃烧 CFD 温度云图

Fig. 2　Typical straight grate burner burning CFD temperature cloud map

1.1.2　NO_x 的分布

带式焙烧机球团焙烧在一台设备上完成，分为 7 个工艺段：鼓风干燥段、抽风干燥段、预热段、焙烧段、均热段、冷却 I 段、冷却 II 段[16]。

为研究带式焙烧机球团生产每个风箱下的 NO_x 的分布，本文根据现场情况，针对性的对首钢京唐 4×10^6 t/a 带式焙烧机(2#线部分)风箱进行打孔、取样、测量和数据转化。带式球团生产线有效面积为 504 m^2，台车有效宽度为 4 m，每段风箱长度为 6 m，共配置 21 个风箱，工艺各系统分段情况见表 2。

取样期主要生产参数：生球给料量为 570 t/h，料层平均总厚度为 450 mm，鼓干鼓风风温为 320～330 ℃，鼓干旁路阀开度为 25%，鼓干—抽干连通阀开度为 0%。

图 3 为实测 5#～13#风箱下部废气温度分布。由图 3 可知，废气温度在预热段缓慢上升，焙烧段快速上升，均热段达到最大值，为549 ℃。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 504 m² 带式焙烧机工艺系统分段

Table 2 Segmentation of 504 m² straight grate process system

项目	鼓风干燥段	抽风干燥段	预热段	焙烧段	均热段	冷却Ⅰ段	冷却Ⅱ段
风箱面积/m²	48.0	48.0	96.0	96.0	48.0	124.6	43.4
风箱编号	1#～2#	3#～4#	5#～8#	9#～12#	13#～14#	15#～19#	20#～21#

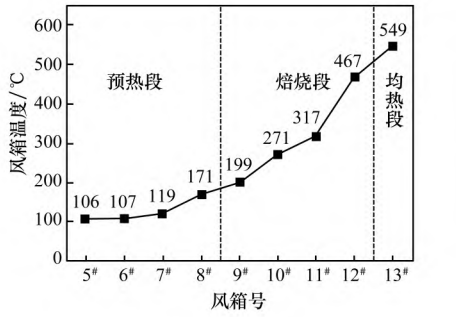


图3 5#～13#风箱下部废气温度分布

Fig. 3 5#～13# Exhaust gas temperature distribution curve

由于现场条件限制，只实测5#、7#、8#、12#、13#风箱下部废气NO质量浓度，中间未测试风箱按照插值法估算NO质量浓度，结果如图4所示。由于5#～12#风箱面积相同，每个风箱过风量相近，通过NO产生量计算(质量浓度×风量)，焙烧段NO产生量约占总NO产生量的68%，预热段NO产生量约占总NO产生量的32%。

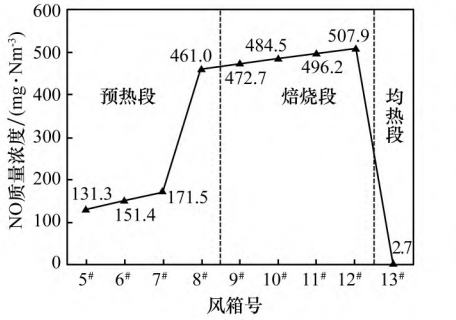


图4 5#～13#风箱下部废气NO质量浓度分布

Fig. 4 5#～13# Exhaust gas NO content distribution curve

另外，一般仪器测量目标为NO，国家环保局规定CEMS测量的NO_x以NO_2换算。NO_x与NO的折算系数≈1.53(NO_2分子量/NO分子量)。实测焙烧段风箱下NO_x最高质量分数约为777 mg/Nm³(未考虑含氧量折算)。

1.2 氧的来源与分布

1.2.1 氧的来源

带式焙烧机氧的主要来源：① 助燃风带入的氧气；② 冷却风带入的氧气；③ 台车底部滑道密封、头尾密封处、各分段间密封、管道连接法兰等部位漏风带入的氧气；④ 系统控制回热风温度所需兑冷风带入的氧气。氧气的消耗主要有燃气燃烧，磁铁矿、硫铁矿氧化和N、P等元素氧化。主引风系统最终尾气含氧量范围比较宽，一般为18%～19.5%。

2020年12月25日生态环境部印发批准《钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准》(GB 28662—2012)修改单，标准修改单自发布之日起一个月后实施。要求带式球团焙烧机焙烧干烟气基准含氧量为18%。基准含氧量折算污染物排放浓度限值的出台，倒逼企业升级装备，优化工艺生产，由传统末端治理转向前端和末端综合治理。

1.2.2 氧的分布

由于现场条件限制，实测了5#、7#、8#、12#、13#风箱下部废气含氧量，中间未测试风箱按照插值法估算废气含氧量，结果如图5所示。取气当期主要生产参数与1.1.2中提及的参数相同。可以看出在预热段(5#～8#)，上层与中层球团大量氧化，风箱含氧量逐步下降，磁铁矿氧化消耗的氧逐步增多，并在7#风箱开始

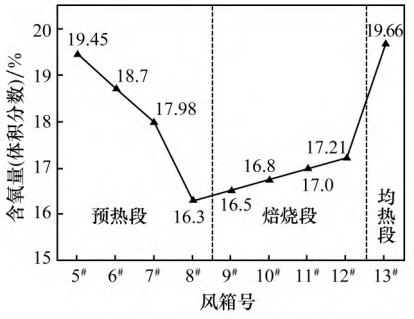


图5 5#～13#风箱下部废气氧含量分布

Fig. 5 5#～13# Exhaust gas oxygen content distribution curve

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

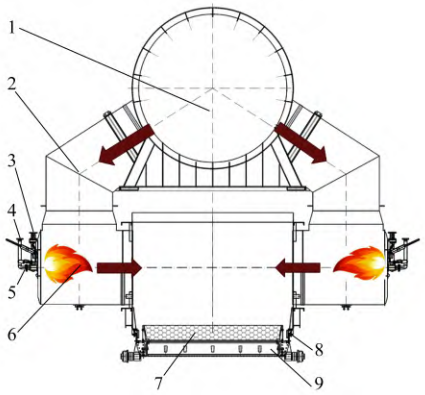
进入磁铁矿快速氧化期。在焙烧段(9#～12#)下层球团大量氧化，风箱含氧量整体呈现上升趋势，整体磁铁矿氧化消耗氧量逐步下降。

2　控制 NO_x 的研究

带式焙烧机尾气中 NO_x 的生成主要为热力型，其主要来自烧嘴火焰周围空中 N_2 的氧化，因此控制 NO_x 的重点为燃烧室。本文通过分析带式焙烧机燃烧系统，采用低氮燃烧器、控制球团焙烧温度、控制烧嘴燃气消耗等方式可有效控制尾气 NO_x 质量浓度。

2.1　带式焙烧机燃烧系统特点

典型的带式焙烧机燃烧系统示意如图 6 所示。结合图 6 可知，主要物质流(燃料)通过烧嘴进入燃烧室，一次助燃风由助燃风机通过烧嘴的一次助燃通道鼓入，二次助燃风由冷却Ⅰ段冷却高温球团矿产生的热风再通过焙烧机回热主管从两侧进入燃烧室，燃烧后的热风通过台车上部烟气罩进入料层焙烧球团。



1—回热风主管；2—二次助燃热风；3—一次助燃风；4—燃气管道；5—烧嘴；6—燃烧室；7—生球和铺底、边料；8—落棒密封装置；9—焙烧台车。

图 6　带式焙烧机燃烧系统示意

Fig. 6　Schematic diagram of the combustion system of the straight grate

带式焙烧机燃烧系统与常规的炉窑有显著不同：

(1) 常规炉窑通过烧嘴进入的助燃风一般都过量，可以满足燃料燃烧需要，而带式焙烧机烧嘴通过的助燃风一般占总理论需要量的 20% 以下。以首钢京唐球团为例，当采用焦炉煤气，热值大约为 17 999.8 kJ/Nm^3，理论空气/燃料比约为 4.5，吨球燃料消耗最大为 30 Nm^3，煤气消耗量为 15 150 Nm^3/h，理论助燃空气需要量为 68 175 Nm^3/h，一次助燃风设计流量为12 000 Nm^3/h，烧嘴通过的一次助燃风占总理论需要量的 17.6%。

(2) 带式焙烧机燃烧系统的二次助燃风为高温气体，温度一般为 600～1 000 ℃，且充分过量，含氧量约为 20.8%，总二次助燃风量约为 5×10^5 Nm^3/h，总空气过剩系数约 7.5 倍，燃烧后混合气体含氧量为 16% 以上，为强氧化气氛。

(3) 带式焙烧机燃烧系统的燃烧室狭小，火焰较短。

结合以上分析可得：一次助燃风主要作用为冷却烧嘴，控制火焰形状，强化火焰尾部燃烧效率，辅助燃烧；二次助燃风提供了主要燃烧用氧，为高温气体，含氧量高且大量过剩，燃烧过程总体为强氧化气氛，二次风量由风量平衡系统自动调整。

2.2　低氮燃烧器

低 NO_x 燃烧器是指燃料燃烧过程中 NO_x 排放量低的燃烧器，采用低 NO_x 燃烧器能够降低燃烧过程中 NO_x 的生成[17]。

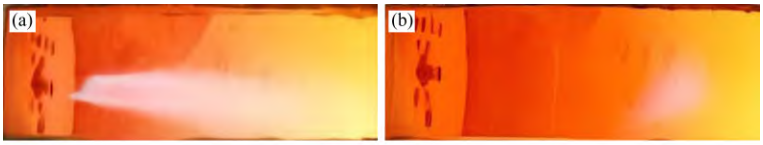
NO_x 生成量随燃料燃烧时的火焰温度、氧浓度及燃烧过程停留时间而变化。采用分级燃烧技术，将一次助燃空气分两级(旋流风和直流风)，实现燃料均匀燃烧，降低局部的火焰温度和氧气局部体积浓度，减少燃烧气体在高温区域的停留时间，从而降低 NO_x 的生成量。

带式焙烧机低氮燃烧器具有体积小，热量集中，燃烧室狭窄，火焰短等特点，比常规的大型回转窑低氮燃烧器设计难度更大，需借助流体仿真技术，精确模拟出火焰的形状，控制火焰形状为长圆柱状，减少强涡流，使火焰温度分布更均匀、平缓。常规火焰和低 NO_x 火焰对比见图 7。

2.3　控制球团焙烧温度和烧嘴燃料消耗

根据首钢的实践经验，当焙烧温度高达

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 常规火焰; (b) 低 NO_x 火焰

图7 常规火焰和低 NO_x 火焰对比

Fig. 7 Comparison diagram of conventional flame and low NO_x flame

1 250 ℃时，尾气中 NO_x 的质量分数接近 350 mg/Nm^3；同等生产条件下控制焙烧温度降低至 1 180 ℃时，尾气中 NO_x 的质量分数可降低至 150 mg/Nm^3。NO_x 显著下降主要有两方面原因：一是焙烧温度下降导致单位燃料燃烧产生的热力型 NO_x 量减少；二是焙烧温度下降且同等条件下一次、二次助燃风量不变导致燃气消耗量下降。焙烧温度和燃料消耗同时下降，NO_x 显著下降，单一因素的变化并不一定能起到显著效果。

球团焙烧温度作为重要生产参数，对球团抗压强度、还原膨胀率、还原性等指标影响很大。青格勒等[18]通过试验研究表明降低焙烧温度会显著提高低硅含镁球团矿的还原膨胀率，降低抗压强度。针对焙烧温度控制，应根据生产线实际原料条件，以成品质量指标为目标，探索适宜的焙烧温度范围。

控制烧嘴燃料消耗，即控制球团焙烧过程能源消耗。通过优化风流系统，采用厚料层(不小于 450 mm 布料厚度)焙烧工艺并加长均热段长度可有效降低焙烧能源消耗。厚料层焙烧球团在加强蓄热作用的同时，也使上层球和下层球之间质量差异增大，需适当延长均热段长度，提高铺底料厚度，提高下层球的质量。

焙烧温度和燃料消耗既相互关联又相互独立。例如：升高焙烧温度的同时大幅度降低助燃风量，燃料消耗反而下降，表明提高焙烧温度高并不意味着燃料消耗多，反之亦然。因此控制的核心是进行焙烧温度和燃料消耗最优耦合，需综合考虑产品质量、能源消耗、污染物排放等因素合理控制焙烧温度和烧嘴燃料消耗。

3 控制含氧量研究

带式焙烧机风流场内，低温区域含氧量高，高温焙烧区域含氧量低，根据系统氧平衡计算，降低尾气中含氧量的主要措施有降低风箱漏风、减少冷却空气鼓入、降低系统兑冷风量等。

为加强控制带式焙烧机尾气含氧量和降低能耗，在传统 5 大风机基础上，进行创新，率先在国内某新建 3×10^6 t/a 带式焙烧机设计上采用新风流系统，具体流程如图 8 所示。在新流程图中，新增了回热风循环冷却风机，将回热风机出口部分热风引至冷却 Ⅰ 段第一个风箱，并在鼓干段和抽干段之间增加密封风箱，提高密封效果。

3.1 增加密封风箱，提高密封效果

带式焙烧机鼓干段热风来自尾部二冷段热风，含氧量较高(约为 21%)。如图 8 所示，在带式焙烧机运行过程中，鼓干段风箱(1#、2#)内压力约为 3 kPa，抽干段风箱(3#、4#)内压力约为 −3 kPa，一层密封不能保证鼓干热风不进入抽干风箱，故在 3#风箱起始端增设一个小的密封风箱，并相应增设滑道密封，形成风箱死区，减少鼓干热风进入抽干风箱，从而降低进入主引风烟道的含氧量。

3.2 增加回热风循环冷却风机，减少冷却空气进入量

带式焙烧机系统含氧量影响因素较多，本文只考虑主要因素，带式焙烧机氧平衡见式(1)：

$$Q_1\delta_1 + Q_2\delta_2 + Q_3\delta_3 + Q_4\delta_4 = Q_5\delta_5 + Q_6\delta_6 + C_1 + C_2 \quad (1)$$

转化得式(2)：

$$\delta_5 = \frac{Q_1\delta_1 + Q_2\delta_2 + Q_3\delta_3 + Q_4\delta_4 - Q_6\delta_6}{Q_5} - \frac{C_1}{Q_5} - \frac{C_2}{Q_5} \quad (2)$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中：Q_1、Q_2、Q_3、Q_4、Q_5 和 Q_6 分别为冷却鼓风机、助燃风机、系统漏风、系统兑冷风、主引风机和鼓干排风机的风量(干基标态)，Nm^3/h；δ_1、δ_2、δ_3、δ_4、δ_5、δ_6 为对应氧的体积分数(干基标态)，%；C_1 为燃料燃烧消耗的氧气量，Nm^3/h；C_2 为磁铁矿、硫铁矿和 N、P 等主要元素氧化所消耗的氧气量，Nm^3/h。

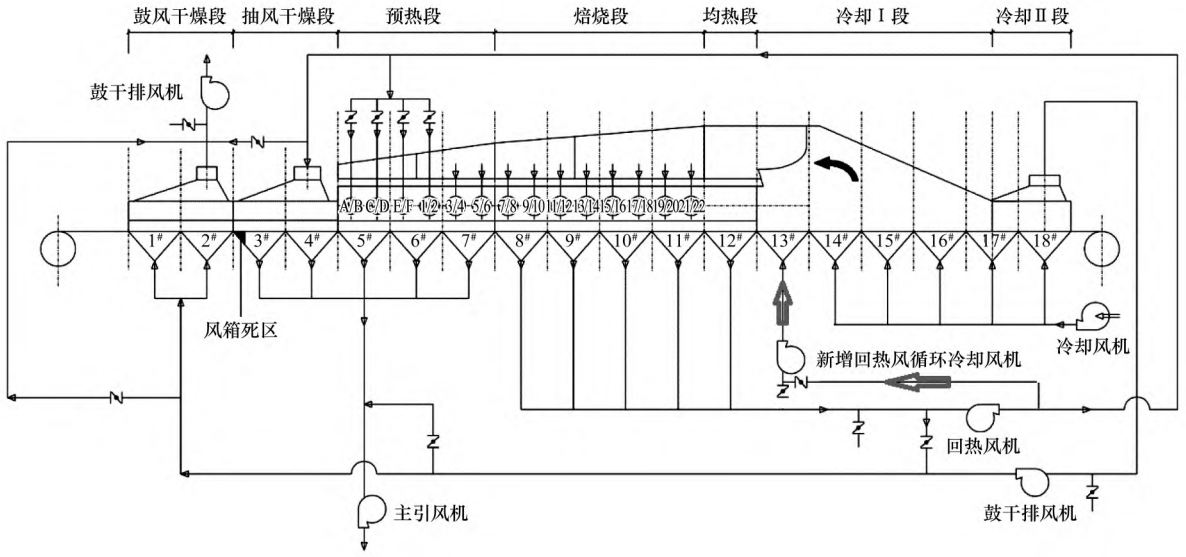


图 8　带式焙烧机新风流系统流程

Fig. 8　Flow chart of fresh air flow system of straight grate

一般可以认为冷却鼓风机、助燃风机、系统漏风和鼓干排风机的干基含氧量体积分数接近环境含氧量，约为 21%，则公式(2)可简化为公式(3)。

$$\delta_5 = 0.21 \times \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_6}{Q_5} - \frac{C_1}{Q_5} - \frac{C_2}{Q_5} \tag{3}$$

把整个带式焙烧机作为一个整体，整体风量平衡见公式(4)，其中 ΔQ 为燃气燃烧、磁铁矿、硫铁矿和 N、P 等主要元素氧化引起的系统风量变化(干基标态)，Nm^3/h。

$$Q_5 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_6 + \Delta Q \tag{4}$$

把公式(4)代入公式(3)，得到公式(5)：

$$\delta_5 = 0.21 \times \frac{Q_5 - \Delta Q}{Q_5} - \frac{C_1}{Q_5} - \frac{C_2}{Q_5} \tag{5}$$

从公式(5)可以看出，降低尾气含氧量需要降低 Q_5，即主引风机抽风总量。现以首钢京唐 4×10^6 t/a 带式焙烧机(2#线)实际运行参数进行理论计算。其球团矿产量为 505 t/h，主引风机设计风量为 1.8×10^6 m^3/h，实际约为 1.2×10^6 m^3/h，温度为 150 ℃，风机负压为 −5 kPa，折算干基标态 $Q_5 = 6.658\times10^5$ Nm^3/h。吨球实际焦炉煤气燃耗为 23 Nm^3，燃烧消耗的氧气量 $C_1 = 23\times505\times4.5\times21\% = 10\ 976$ Nm^3/h。球团矿全铁质量分数为 65%，球团矿赤铁矿质量分数约为 92%，其中 95% 由磁铁矿氧化所得，忽略 P、S、N 等少量元素氧化耗氧，通过计算 $C_2 = 10\ 298.6$ Nm^3/h。由于系统计算都按照干基计算，焦炉煤气氢气体积分数约为 55%，燃烧后生成水蒸气为系统干基风量损失，忽略 P、S、N 和球团原料各种元素氧化进入系统风量，可得 $\Delta Q = -(10\ 976\times0.55 + 10\ 298.6) = -16\ 335.4$ Nm^3/h。通过理论计算可得 $\delta_5 = 21.52\% - 1.65\% - 1.55\% = 18.32\%$，与实际值基本接近。

为了探讨降低主引风机抽风总量 Q_5 的措施，针对公式(4)，助燃风机 Q_2 生产中一般不调整，系统漏风 Q_3 可认为不变，鼓干排风机 Q_6 在保证相同的鼓风干燥效果下不变，在原料成分、燃料消耗相同条件下，ΔQ 也不变，系统兑冷风 Q_4 主要是控制回热风温度假设不变化。在平衡状态下，主引风机风量 Q_5 与冷却鼓风机 Q_1 变化量一致，降低 Q_1 即降低 Q_5。冷却鼓风

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

机 Q_1 降低的下限必须保证球团矿冷却效果，如果继续降低就需要系统内部其他介质对球团矿预先冷却。假设在京唐2#线球团冷却Ⅰ段第一个风箱，鼓入 2.5×10^5 m^3/h 热风(工况)，温度为340 ℃，出料面后温度为1 200 ℃，则所带走的热量经过计算可代替 1.087×10^5 m^3/h 常规25 ℃冷却风升温至950 ℃(冷却Ⅰ段出口平均温度)，因此主引风机抽风总量 Q_5 和冷却鼓风机 Q_1 具备降低 1.087×10^5 m^3/h 潜力，其他条件不变重新理论计算 δ_5 = 17.80%，降低了0.52%。

为此在新设计的带式球团工程中，增设回热风循环冷却风机，将回热风机出口小部分热风，引入冷却Ⅰ段第一个风箱(见图8中13#风箱)，可有效降低冷却鼓风机空气鼓入量，降低主引风机抽风总量，降低外排废气含氧量，同时节省了能耗。但是，上述措施的实施主要在带式机设计阶段进行(见图8)，相比常规同规模带式机，主引风机所抽风箱减少1个，回热风机所抽风箱增加了1个，冷却Ⅰ段加长了1个风箱，回热风机能力增大。现有带式焙烧机生产线，可根据上述氧平衡控制理念，优化系统平衡参数。

4 结论与展望

(1) 带式焙烧机球团生产工艺排放尾气中 NO_x 质量浓度实测值为135~343 mg/Nm^3，含氧量实测值为18.23%~19.32%，难以满足现有排放标准，特别在钢铁行业超低排放大环境下，必须优化生产工艺，由传统末端治理转向前端和末端综合治理。

(2) 带式焙烧机采用燃气作为燃料，尾气 NO_x 主要来源为热力型 NO_x，按照各风箱 NO_x 实测值估算，焙烧段 NO_x 产生量约占总产生量的68%，预热段 NO_x 产生量约占总产生量的32%。

(3) 采用低氮燃烧器、进行焙烧温度和燃料消耗最优耦合是有效控制尾气 NO_x 质量分数的核心。焙烧温度和燃料消耗同时下降，NO_x 显著下降，单一因素的变化并不一定能起到显著效果。

(4) 在新建带式焙烧机设计中通过增加密封风箱、增加回热风循环冷却风机经过分析论证可有效降低主引风机外排废气含氧量。

(5) 带式焙烧机风系统未来还可以借鉴燃煤锅炉低氮烟气再循环技术[19]，将脱硫脱硝后干净尾气，循环引入冷却Ⅰ段部分风箱，即可回收部分能源，又可降低二次助燃风的含氧量，同时降低 NO_x 生成量。

参考文献:

[1] 叶匡吾. 三种球团焙烧工艺的评述[J]. 烧结球团,2002,27(1):4-7.
YE Kuangwu. Review of three kinds of pelletizing process[J]. Sintering and Pelletizing,2002,27(1):4-7.

[2] 韩志国. 大型带式焙烧机球团技术的研究与应用[J]. 世界金属导报,2013,8(27):1-4.
HAN Zhiguo. Research and application of pelletizing technology of large-scale belt roasting machine[J]. World Metals,2013,8(27):1-4.

[3] 张福明. 中国高炉炼铁技术装备发展成就与展望[J]. 钢铁,2019,54(11):1-8.
ZHANG Fuming. Prospect and development achievement of blast furnace ironmaking technologies and equipments in China[J]. Iron and Steel,2019,54(11):1-8.

[4] 胡长松. 首钢高炉新炉料结构下球团技术的探索与应用[J]. 中国冶金,2021,31(6):54-60.
HU Changsong. Exploration and application of pelletizing technology under new burden structure of blast furnace in Shougang[J]. China Metallurgy,2021,31(6):54-60.

[5] 王新东,金永龙. 高炉使用高比例球团的战略思考与球团生产的试验研究[J]. 钢铁,2021,56(5):7-16.
WANG Xindong,JIN Yonglong. Strategy analysis and testing shudy of high ratio of pellet utilized in blast furnace[J]. Iron and Steel,2021,56(5):7-16.

[6] 李双娟. 焦炉氮氧化物生成机理及低氮脱硝技术研究[J]. 中氮肥,2017,5(3):71-74.
LI Shuangjuan. Study on NO_x formation mechanism and low nitrogen denitrification technology of coke oven[J]. M-Sized Nitrogenous Fertilizer Process,2017,5(3):71-74.

[7] 孙大为,刘文旺,肖爱元,等. 基于带式焙烧机的 NO_x 生成规律研究[J]. 山西冶金,2021,44(3):85-87.
SUN Dawei,LIU Wenwang,XIAO Aiyuan,et al. Study on NO_x generation law based on belt roaster[J]. Shanxi Metallurgy,2021,44(3):85-87.

(下转第88页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[8] ANTHONY A Lizzio, JOSEPHA Debarr. Effect of surface area and chemisorbed oxygen on the SO_2 adsorption capacity of activated char [J]. Fuel, 1996, 75(13): 1515 – 1522.

[9] VIVEKANAND Gaur, RITESH Asthana, NISHITH Verma. Removal of SO_2 by activated carbon fibers in the presence of O_2 and H_2O [J]. Carbon, 2006, 44: 46 – 60.

[10] LIU Qingya, LI Chunhu, LI Yanxu. SO_2 removal from flue gas by activated semi-cokes(1): The preparation of catalysts and determination of operating conditions [J]. Carbon, 2003, 41: 2217 – 2223.

[11] MOCHIDA I, KURODA K, MIYAMOTO S, et al. Remarkable catalytic activity of calcined pitch based activated carbon fiber for oxidative removal of SO_2 as aqueous H_2SO_4 [J]. Energy & Fuels, 1997, 11: 272 – 276.

[12] JOSEPH A DeBarr, ANTHONY A Lizzio. Adsorption of SO_2 on bituminous coal char and activated carbon fiber [J]. Energy & Fuels, 1997, 11: 267 – 271.

[13] RAYMUNDO Piñero E, CAZORLA Amorós D, SALINAS Martinez de Lecea C, et al. Factors controling the SO_2 removal by porous carbons: relevance of the SO_2 oxidation step [J]. Carbon, 2000, 38: 335 – 344.

[14] ZHI Yongting, ZHENG Juanjuan, ZHOU Yaping, et al. Studies on the enhancement of flue gas desulfurization with oxidation reaction [J]. Energy & Fuels, 2011, 25: 2035 – 5043.

[15] 唐雪萍. 纳米 V_2O_5/活性焦催化剂的制备 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012: 43 – 46.
TANG Xueping. Preparation of nano-V_2O_5/activated coke catalyst [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012: 43 – 46.

[16] 乔志军, 李家俊, 赵乃勤, 等. 高温热处理对活性炭纤维微孔及表面性能的影响 [J]. 新型炭材料, 2004(1): 53 – 56.
QIAO Zhijun, LI Jiajun, ZHAO Naiqin, et al. Effect of high temperature Heat treatment on microporous and surface properties of activated carbon fiber [J]. New Carbon Materials, 2004(1): 53 – 56.

[17] lOPEZ M C B, MARTINEZ Alonso A, M. D. T. J. Microporous texture of activated carbon fibres prepared from Nomex aramid fibres [J]. Micro-Mesoporus Mater, 2000, 34: 171 – 179.

(上接第58页)

[8] 乔俊, 沈国良, 刘金英, 等. 低氮燃烧技术在首钢球团的应用实践 [J]. 矿业工程, 2021, 19(6): 42 – 45.
QIAO Jun, SHEN Guoliang, LIU Jinying, et al. Application practice of low nitrogen combustion technology in pelltizing projects of beijing shougang Co., Ltd. [J]. Mining Engineering, 2021, 19(6): 42 – 45.

[9] 胡兵, 叶恒棣, 王兆才, 等. 链算机—回转窑球团 NO_x 排放规律及控制方法 [J]. 中国冶金, 2018, 28(4): 66 – 70.
HU Bin, YE Hengdi, WANG Zhaocai, et al. NO_x emission behavior and control method of grate-kiln pelletizing process [J]. China Metallurgy, 2018, 28(4): 66 – 70.

[10] ÅBERG J. NO_x modelling of a travelling-grate process [D]. Luleå University of Technology, 2008.

[11] BOLEN J. Modern air pollution control for iron ore induration [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2014, 31(2): 103 – 114.

[12] EDLAND R. NO_x formation in rotary kilns for iron ore pelletization [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2017.

[13] FREDRIKSSON C, MARJAVAARA D, LINDROOS F, et al. Combustion and emission challenges at LKAB [J]. Proceedings of the Swedish-Finnish Flame Days 2011, 2011: 1 – 12.

[14] COX L. Nitrogen oxides(NO_x) why and how they are controlled [M]. Goteborg: Diane Publishing, 1999.

[15] MUNKO A, JUNIOR FLCC, BERGMANN M, et al. Low NO_x, burner for pelletizing plants [C]//46th Iron Ore and Raw Material Reduction Seminar, Rio de Janeiro: Brazilian Association of Metallurgy Materials and Mining, 2016: 648 – 655.

[16] 张福明, 王渠生, 韩志国, 等. 大型带式焙烧机球团技术创新与应用 [C]//"第十届中国钢铁年会"暨"第六届宝钢学术年会"论文集. 上海: 中国金属学会, 2015: 1737 – 1743.
ZHANG Fuming, WANG Qusheng, HAN Zhiguo, et al. Innovation and application on pelletizing technology of large travelling grate machine [C]//Proceedings of the 10th CSM Steel Congress & the 6th Baosteel Biennial Academic Conference. Shanghai: The Chinese Society for Metals, 2015: 1737 – 1743.

[17] 姚永江, 蔡长明, 刘勇. 高效低氮燃烧器在球团回转窑的应用 [J]. 矿业工程, 2021, 19(2): 49 – 52.
YAO Yongjiang, CAI Changming, LIU Yong. Application of high-efficiency low-nitrogen burner in pelletized rotary kiln [J]. Mining Engineering, 2021, 19(2): 49 – 52.

[18] 青格勒, 吴锵, 刘洪松, 等. 焙烧温度对低硅含镁球团矿还原膨胀率的影响及机理 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(10): 2905 – 2912.
QING Gele, WU Keng, LIU Hongsong, et al. Effect and mechanism of calcination temperature on reduction swelling rate of low silica magnesium pellets [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(10): 2905 – 2912.

[19] 卢旺. 燃煤锅炉低 NO_x 燃烧技术的分析 [J]. 能源与节能, 2021(12): 137 – 138.
LU Wang. Analysis on low NO_x combustion technology of coal-fired boilers [J]. Energy and Energy Conservation, 2021(12): 137 – 138.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net