节能环保与综合利用

链箅机-回转窑球团NO_X超低排放技术研究

叶恒棣[1,2]，胡 兵[1,2]，魏进超[1,2]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司 烧结球团及直还工程技术中心，湖南 长沙 410205；
2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205）

摘 要： 基于链箅机－回转窑球团生产过程 NO_x 排放质量浓度高、末端治理投资和运行成本大等问题，在系统分析 NO_x 排放规律和影响因素的基础上，开展了一系列源头控制、过程控制和选择性催化还原脱硝协同处理技术研究。研究结果表明：低 NO_x 燃烧技术、低 NO_x 烧嘴技术、低温焙烧技术是降低球团 NO_x 生成量的有效方法；先进再燃技术是减轻末端治理负荷最直接的技术手段，高 NO_x 烟气脱除效率可超过 60%，从而确保了预热二段烟气中 NO_x 质量浓度低于 300 mg/m^3；通过有效地抑制预热二段向预热一段串风，并利用烟气的中高温条件，在多管除尘器后增设 SCR 脱硝系统，不仅无需升温，而且烟气处理量减少 50% 以上，该阶段烟气含氧量为 15%～18%，SCR 脱硝效率仅需 90% 就可以满足球团烟气超低排放的技术指标，与传统末端治理技术相比，节省建设费用 1/3、运行费用 2/3。

关键词： 链箅机－回转窑；球团；NO_x；超低排放；先进再燃技术；选择性催化还原
中图分类号： X701 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2020)01－0055－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2020.01.011

Research on technology of ultra-low NO_x emission from grate-rotary kiln pelletizing process

Ye Hengdi[1,2], Hu Bing[1,2], Wei Jinchao[1,2]
(1. *Engineering Technology Center of Sintering & Pelletizing and Direct Reduction, Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan*; 2. *National Engineering Technology Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System, Changsha* 410205, *Hunan*)

Abstract In view of the problems of the grate-rotary kiln pelletizing process, such as high NO_x emission concentration in exhaust gas, high cost in investment and operation of terminal treatment, and based on the systematic analysis of the NO_x emission laws and its influencing factors, a series of studies on the collaborative treatment technology of source control, process control and selective catalytic reduction (SCR) for the NO_x emission reduction are carried out. The results show that low NO_x combustion technology, low NO_x burner technology and low temperature roasting technology are the most effective methods to reduce the NO_x generation in pellet production. The advanced reburning technology is the most direct technical means to reduce the end treatment load, and the removal efficiency of NO_x in exhaust gas can exceed 60%, thus ensuring that the NO_x concentration of the exhaust gas in the second preheating zone below 300 mg/m^3. By effectively restraining the movement of gas from the second preheating zone to the first preheating zone, and by taking advantage of the medium and high temperature conditions of the flue gas, the SCR denitrification system is added after the multicyclone deduster, there is no need for raising temperature and the volume of exhaust gas which needs to be treated can be reduced by over 50%. The oxygen content of flue gas reaches 15%～18% in this stage, and the ultra-low emission target can be obtained when the denitrification efficiency of SCR reaches 90%. Compared with the traditional

收稿日期： 2019－12－23
基金项目： 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ51007)；长沙市科技重大专项(kq1902003)
作者简介： 叶恒棣(1964—)，男，教授级高级工程师，国家烧结球团装备系统工程技术研究中心主任，烟气多污染物协同治理及资源化湖南省重点实验室主任，从事钢铁烟气治理与冶金装备等领域的研究。
通讯作者： 胡 兵(1983—)，男，博士，高级工程师，从事烧结球团、直接还原和微波冶金等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

technique of terminal treatment of NO_x, the construction cost and running cost can be saved by 1/3 and 2/3 respectively.

Key words grate-rotary kiln; pellet; NO_x; ultra-low emission of NO_x; advanced reburning technology; selective catalytic reduction

国家产业结构调整指导目录(2019年)明确提出鼓励类技术包括高炉高配比球团冶炼工艺技术[1]。由于球团产品具有品位高、强度好、冶金性能好的优点，应用到高炉冶炼中可起到增产节焦、降低生铁成本、改善炼铁技术经济指标、提高经济效益的作用，且生产过程能耗低、环境相对友好，因此球团矿在我国得到了大力发展，2018年我国球团矿产量为1.59亿t[2-4]。

2019年生态环境部发布的《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》[5]中明确要求：球团焙烧烟气在基准含氧量18%条件下，NO_x小时均值排放质量浓度不高于50 mg/m^3；如果含氧量高于18%，则NO_x质量浓度按折算到基准含氧量后的值进行考核。从大多数的球团厂生产情况来看，排放废气中NO_x质量浓度在100~300 mg/m^3，废气中的含氧量为17%~19%，过去主要采取的降低NO_x排放质量浓度的措施有[3]：降低球团矿产量，即减少煤气或煤粉喷入量；降低球团矿强度要求，即降低回转窑温度；采用较低NO_x的原料和燃料。这些措施虽然能够一定程度上减少NO_x的排放量，但不能满足超低排放的环保要求。

球团生产工艺中主抽风废气排放温度一般在130~150 ℃，该气体温度不满足常规SCR技术的脱硝温度反应区间，需要对烟气进行加热，由于球团烟气量大、组成复杂且波动大，采用末端脱硝的方法难度大，存在脱硝能耗高、设备庞大、运行成本高等诸多问题，超低排放的严苛指标给球团生产企业带来了沉重的负担。因此，亟需结合球团生产特点，开发一种通过源头控制、过程控制和末端治理协同控制的低成本、高效率的脱硝技术。

1 球团NO_x排放规律及影响因素

球团生产过程中由于原燃料的差异，点火方式和点火器结构的不同，以及设备自身存在的密封效果差等原因，造成废气排放量大、NO_x排放质量浓度高，给末端治理带来极大的处理负荷，在严苛的环保压力下，亟需寻求新的路径来实现超低排放，故此需追根溯源为后续处理提供指导方向。

1.1 球团NO_x排放规律

现场检测了某球团厂链算机各段烟罩中和预热后管道废气气体的成分，某球团生产工艺流程如图1所示(鼓干段UDD、抽干段DDD、预热1段TPH、预热2段PH)，具体数据如表1所示。同时还检测了该球团厂链算机各风箱中烟气的成分，具体数据如表2所示。

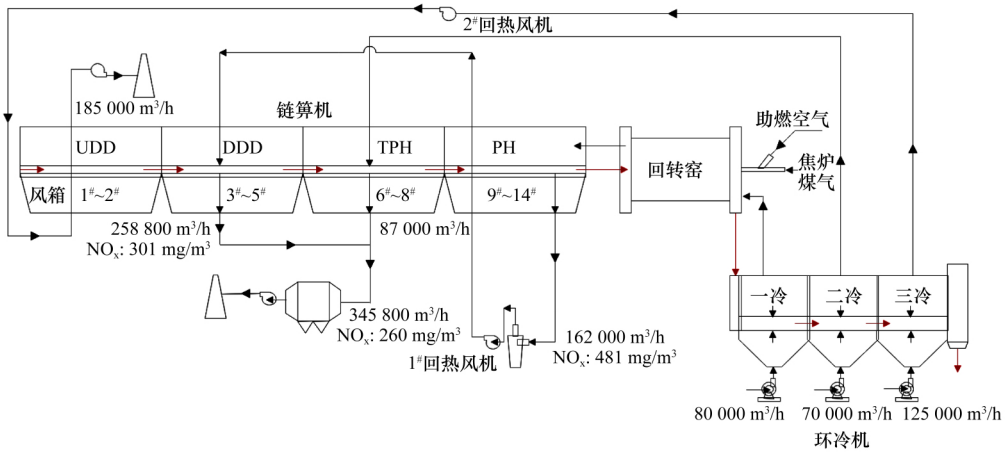


图1 某球团生产工艺流程图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　链算机烟罩及管道气体组成

位置	体积分数/%			质量浓度/(mg·m^{-3})		
	O_2	CO_2	NO	NO_2	SO_2	CO
窑尾	16.85	1.8	340	3	394	677
PH 烟罩(12#风箱)	16.19	2.0	403	0	1 909	125
TPH 烟罩(6#风箱)	18.22	1.1	236	5	857	125
预热后管道废气	17.46	1.2	300	1	1 231	43
DDD(4#风箱)	17.30	1.4	281	3	1 131	0

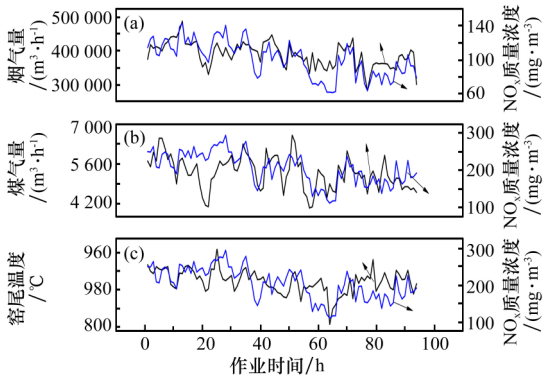
表 2　链算机风箱烟气组成

区域	风箱号	体积分数/%			质量浓度/(mg·m^{-3})		
		O_2	CO_2	NO	NO_2	SO_2	CO
PH 段	14#	19.73	0.4	91	0	566	0
	12#	15.57	2.2	429	7	1 629	36
	10#	15.42	2.3	492	11	1 171	125
TPH 段	8#	17.22	1.7	359	5	843	0
	7#	19.85	0.5	94	0	186	0
	6#	19.25	0.7	155	0	377	0
DDD 段	5#	17.10	1.7	339	0	854	125
	4#	17.80	1.3	301	5	834	0
	3#	19.20	0.7	157	0	414	0

由表 1 可知：PH 段烟罩气体中 O_2 体积分数为 16% 左右，而 DDD 段烟罩中气体来源于 PH 段的烟气，其 O_2 体积分数变为 17.30%，表明 DDD 和 TPH 段存在串风；预热后管道废气中 O_2 体积分数为 17.46%，NO 质量浓度为 300 mg/m^3，SO_2 质量浓度为 1 231 mg/m^3。结合表 2 可知：O_2 变化规律：PH 段风箱中的 O_2 体积分数最低；PH 段 10#和 12#风箱 O_2 体积分数比较低，说明在该区域中 O_2 消耗量大，球团的氧化速度比较快；SO_2 变化规律：窑尾处的 SO_2 质量浓度为394 mg/m^3，PH 段 10#和 12#风箱 SO_2 质量浓度最高，表明在该段区域释放的 SO_2 速度最快，其质量浓度高达 1 171 mg/m^3 以上；TPH 段风箱中 SO_2 质量浓度相差较大，6#风箱的 SO_2 质量浓度低，而 8#风箱的 SO_2 质量浓度相对较高；NO_x 变化规律：PH 段 10#和 12#风箱 NO_x 质量浓度最高，可达 429 mg/m^3 以上；各风箱中的 NO_2 的质量浓度均较低，最高为 11 mg/m^3。表明链算机－回转窑工艺产生的 NO_x 主要为 NO，而 NO_2 较少。

1.2　球团 NO_x 生成影响因素

在统计生产现场实际数据的基础上，分析了球团生产过程中煤气用量、烟气流量和窑尾温度对 NO_x 排放质量浓度的影响，结果如图 2 所示。从图 2 可以看出：在球团生产过程中，不同的时间点煤气流量会有波动，而且球团烟气中 NO_x 的排放质量浓度与煤气流量变化趋势大致相同，表明球团生产过程中 NO_x 的排放质量浓度与煤气流量正相关；随着球团生产过程的进行，在不同的时间点煤气流量会有一定的波动，而且球团烟气中 NO_x 的排放量与烟气流量的变化趋势大致一致，表明球团生产过程中 NO_x 的排放量与烟气流量有一定的关系；NO_x 排放质量浓度与窑尾温度的变化趋势大致相同，随着窑尾温度的升高，NO_x 排放质量浓度也有升高的趋势。



(a) 烟气量；(b) 煤气量；(c) 窑尾温度

图 2　影响因素与 NO_x 排放的关系

2　球团低 NO_x 排放控制技术研究

2.1　低 NO_x 燃烧技术

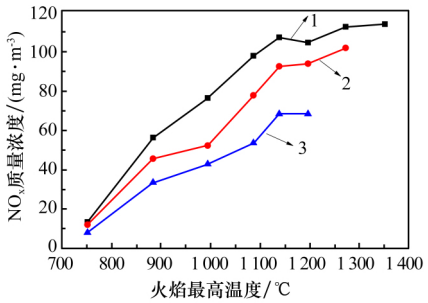
在热废气温度或热量一定的前提下，由于煤气热值的差异造成火焰高温区温度不同，直接影响热力型 NO_x 的产生[6]。试验所用气体燃料按表 3 配制(焦炉煤气与高炉煤气体积比分别为 1.0∶0、0.8∶0.2、0.5∶0.5)的混合煤气，分别命名为燃气 3 号、燃气 2 号、燃气 1 号。图 3 为采用不同成分的燃气燃烧后火焰最高温度与烟气中 NO_x 质量浓度的变化关系。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 不同混合煤气的成分范围(体积分数) %

种类	H_2	CO	CH_4	CO_2	N_2	焦炉煤气与高炉煤气体积比
燃气 3 号	36.0	14.0	18.0	8.0	24.0	0.5∶0.5
燃气 2 号	47.0	11.0	23.0	5.0	14.0	0.8∶0.2
燃气 1 号	58.0	7.0	29.0	2.0	4.0	1.0∶0

从图 3 可以看出：随着燃气中的焦炉煤气成分升高，即燃气中的 H_2、CH_4 体积分数的增加，CO、CO_2、N_2 体积分数的减少，在同等燃烧条件下，烟气中的 NO_x 质量浓度逐渐升高，且不同燃气在同一温度附近的烟气 O_2 体积分数基本相同；与采用全焦炉煤气燃烧相比，在同等燃烧温度条件下，用 50% 的高炉煤气替代焦炉煤气可减少烟气中 NO_x 质量浓度 35% 以上。



1—燃气 3 号；2—燃气 2 号；3—燃气 1 号。

图 3 不同燃气的火焰最高温度与烟气中 NO_x 质量浓度的变化关系

2.2 低 NO_x 烧嘴技术

烧嘴结构的不同，造成煤气和空气流场分布的差异，对 NO_x 的质量浓度也有较大的影响[7-8]。通过分别研究不同烧嘴燃烧时火焰最高温度与烟气 NO_x 质量浓度之间的关系，选取同等条件下的不同烧嘴燃烧性能参数进行比较，以期得出低 NO_x 烧嘴燃烧过程中对 NO_x 减排效果的优劣。表 4 为 4 款不同烧嘴火焰最高温度与烟气中 NO_x 质量浓度之间的关系。

表 4 不同烧嘴的火焰最高温度与烟气中 NO_x 质量浓度的关系

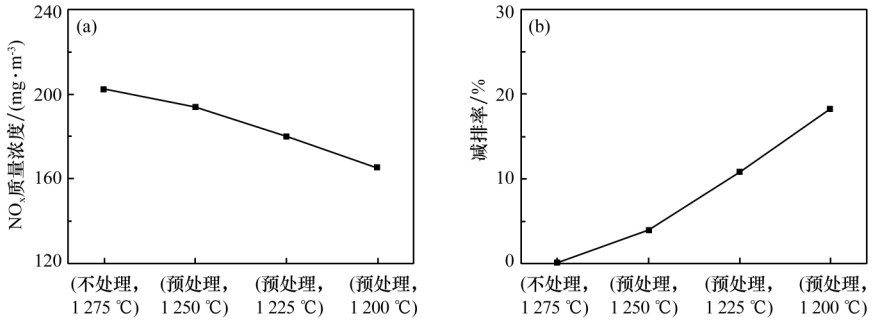
名称	温度/℃	体积分数/%		质量浓度/(mg·m^{-3})			烧嘴结构
		O_2	CO_2	CO	NO	NO_2	
1 号烧嘴	1 132	7.2	12.6	20	84	7	
	1 269	5.4	14.3	65	110	5	
2 号烧嘴	1 250	6.1	13.1	19	163	4	
3 号烧嘴	1 171	5.6	14.1	0	96	4	
4 号烧嘴	1 175	7.2	12.6	90	127	7	
	1 238	4.9	14.7	41	150	8	

由表 4 可以看出：当烟气成分中 O_2 体积分数在 5%~7% 时，火焰最高温度为 1 200 ℃左右，烧嘴 1 号和 3 号燃烧后的烟气 NO_x 质量浓度在 80~100 mg/m^3，烧嘴 2 号达到 163 mg/m^3，而4 号燃烧后烟气 NO_x 质量浓度在 127~150 mg/m^3；在同样的火焰最高温度时，烧嘴 1 号燃烧时消耗的燃气最低，说明此款烧嘴燃气燃烧更加充分。试验结果表明，采用低 NO_x 烧嘴技术，NO_x 的减排效果可以达到 15%~40%。

2.3 低温焙烧技术

原料预处理方法主要采用高压辊磨，通过提高颗粒表面的活性，强化颗粒之间的固结，以实现球团低温焙烧。球团原料预处理对焙烧温度和 NO_x 的产生与减排影响结果如图 4 所示。由图 4 可知：原料经过高压辊磨预处理，焙烧温度从 1 275 ℃降低至 1 200 ℃，NO_x 的减排达到 18.3%。

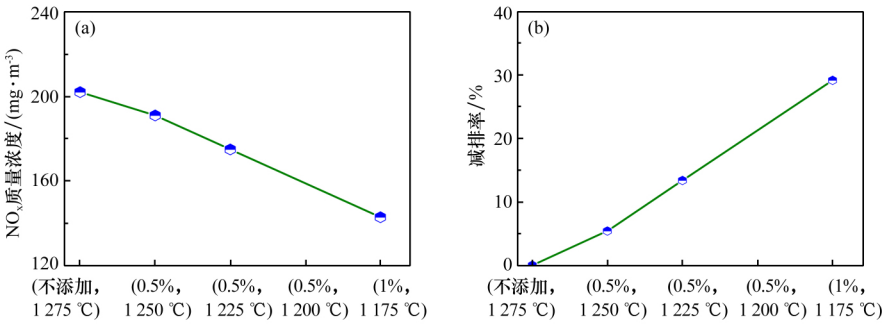
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) NO_x 产生；(b) NO_x 减排

图 4　原料预处理对 NO_x 产生和减排的影响

图 5 反映的是添加低温焙烧剂，焙烧温度降低后对球团 NO_x 的影响。由图 5 可知：在球团原料中添加细磨后的低温焙烧剂，添加配比从 0.5%～1.0% 时，在保证球团质量指标基本不变的前提条件下，焙烧温度从基准条件时的 1 275 ℃降低至 1 175℃，NO_x 减排率达到 29.2%。



(a) NO_x 产生；(b) NO_x 减排

图 5　添加低温焙烧剂对 NO_x 产生和减排的影响

2.4　先进再燃技术

先进再燃技术是一种将再燃技术与氨剂喷入技术相结合，比再燃技术更加有效的 NO_x 控制技术，属于末端治理的一种低 NO_x 控制方法[9-11]。为探究氧化球团先进再燃技术适用的 NO_x 初始质量浓度，研究了 NO_x 初始质量浓度对反应脱硝率的影响规律，结果如表 5 所示。

表 5　烟气初始 NO_x 质量浓度对脱硝率和氨逃逸的影响

初始 NO_x 质量浓度/(mg·m^{-3})	温度/℃	氨氮摩尔比	喷氨前烟气成分质量浓度/(mg·m^{-3})		喷氨后烟气成分质量浓度/(mg·m^{-3})		脱硝率/%	残 NH_3 质量浓度/(mg·m^{-3})
			NO	NO_2	NO	NO_2		
362	940	1.1∶1	351	11	250	16	26.3	3.0
545	924	1.0∶1	512	33	271	11	48.4	2.0
568	918	1.1∶1	536	32	212	21	59.0	3.0
897	924	1.0∶1	887	11	295	0	67.2	3.0

由表 5 可知：脱硝率与 NO_x 初始质量浓度有一定的关系，在相同的工艺条件下，随着 NO_x 初始质量浓度的增加，脱硝率逐渐增加，而氨逸出质量浓度变化不大。因此，在 NO_x 初始质量浓度较高的环境中采用先进再燃技术更为合适，由于其 NO_x 质量浓度较高，PH 段和链算机与回转窑之间的过渡段是链算机－回转窑球团工艺中实施该技术的最为合适的场所。采用该项技术，高 NO_x 的烟气脱硝效果可以超过 60%，且投资和运行成本较低，是减轻球团生

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

产中末端治理负荷的最有效、最直接的技术手段之一。

3 球团 NO_x 超低排放技术思路

为了满足环保要求，实现球团生产过程的 NO_x 超低排放，同时又不能大幅增加投资和运行成本，作者团队经过多年产、学、研的结合，开辟了一条通过源头控制－过程控制和末端治理 3 者结合的工艺路线，为球团 NO_x 超低排放指明了方向，技术路线如图 6 所示。

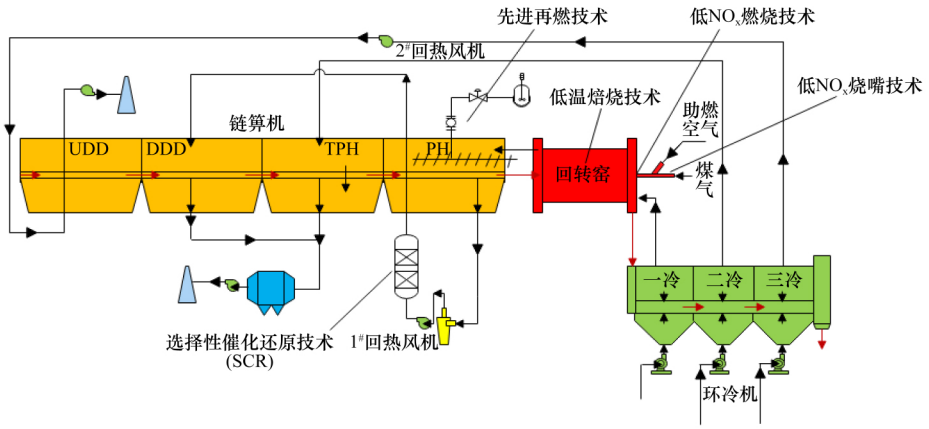


图 6 链算机－回转窑球团 NO_x 超低排放技术

研究结果表明，球团生产过程 NO_x 的产生来源主要是燃烧产生的热力型 NO_x 和燃料型 NO_x[3]。由如图 6 可知：链算机－回转窑球团风流系统按照环冷 1 段的热风进入回转窑，经预热 2 段(PH)预热后再作为抽风干燥段(DDD)的热风，环冷 2 段的热风经预热 1 段(TPH)预热后联合 DDD 的废气协同处理后排放，环冷 3 段的热风则进入鼓风干燥段(UDD)后进入烟囱；结合球团低 NO_x 排放控制技术研究结果，选择性的采取低 NO_x 烧嘴技术、低 NO_x 燃烧技术或低温焙烧技术，从根本上减少球团烟气 NO_x 的产生；再对出回转窑的烟气在链算机和回转窑之间的过渡段和 PH 段实施先进再燃技术，进一步减少烟气中 NO_x 的质量浓度；最后在避免 PH 段向 TPH 段串风的前提下，对多管除尘后的高 NO_x 烟气实施选择性催化还原技术(SCR)，该阶段烟气含氧量 15%～18%，NO_x 质量浓度控制在 300 mg/m^3 之内，温度区间 350～500 ℃，满足中高温 SCR 的条件，脱硝效率＞90%，烟气 NO_x 的排放质量浓度可以控制在 30 mg/m^3 之内，满足球团烟气超低排放的技术指标，与传统末端治理技术相比，节省建设费用 1/3、运行费用 2/3。可见，该技术具有良好的推广应用价值。

4 结 论

(1) 以焦炉煤气为燃料的回转窑球团工艺产生的 NO_x 主要是 NO，而 NO_2 占比很低，外排烟气中 DDD 段的 NO_x 质量浓度高，TPH 段的 NO_x 质量浓度相对较低；NO_x 排放质量浓度主要与单位燃耗、回转窑窑尾温度相关，随着单位燃耗的增加、窑尾温度的升高，NO_x 排放质量浓度呈现增加的趋势；降低能耗、降低回转窑焙烧温度是控制 NO_x 生成的重要措施。

(2) 低 NO_x 燃烧技术、低 NO_x 烧嘴技术、低温焙烧技术是降低球团 NO_x 产生的有效方法，源头和过程减排后再利用工艺自身的特点实施先进再燃技术和 SCR 技术的协同治理技术，最终可实现链算机－回转窑球团生产过程 NO_x 的超低排放。

参考文献

[1] 王海风，裴元东，张春霞，等. 中国钢铁工业烧结/球团工序绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁，2016，51(1)：1－7.

[2] 段菁春，柴发合，谭吉华，等. 钢铁行业 NO_x 控制技术及对策[J]. 环境污染与防治，2013，35(3)：100.

(下转第 76 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

球团颗粒质量分数等因素所影响。

参考文献

[1] 苏家栋,李咸伟,范晓慧. 烧结过程中 NO_x 减排技术研究进展[J]. 烧结球团,2013,38(6):41-44;54.

[2] 张洪亮,施琦,龙红明,等. 烧结烟气中氮氧化物脱除工艺分析[J]. 钢铁,2017,52(5):100-106.

[3] 吴胜利,张永忠,苏博,等. 影响烧结工艺过程 NO_x 排放质量浓度的主要因素解析[J]. 工程科学学报,2017(5):693-701.

[4] 甘牧原,吴丹伟,韦振宁,等. 碱土元素改性燃料对其燃烧 NO_x 减排研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):43-46.

[5] 聂绍昌. 新钢烧结生产 NO_x 排放规律及减排措施[J]. 烧结球团,2018,43(4):73-77.

[6] 潘建. 铁矿烧结烟气减量排放基础理论与工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2007.

[7] 张典波,周茂军,王跃飞. 宝钢烧结烟气 NO_x 过程减排技术[J]. 炼铁,2015,34(6):47-51.

[8] 朱梦飞,李东升,谢运强,等. 燃料特性对铁矿烧结过程NO排放行为的影响[J]. 烧结球团,2019,44(2):58-62,68.

[9] 代兵,姜曦,王运国,等. 本钢新1号高炉降低瓦斯灰碳含量攻关[J]. 中国冶金,2017(1):73-76.

[10] 孙健,陈辉,武建龙. 高炉瓦斯灰含碳来源及降低瓦斯灰碳含量研究[C]//北京金属学会第八届冶金年会论文集. 北京:北京金属学会,2014:62-67.

[11] 吴胜利,候超刚,张国良,等. 焦粉颗粒赋存状态对烧结过程 NO_x 排放的影响研究[C]//第十五届全国大高炉炼铁学术年会论文集. 乌鲁木齐:中国金属学会炼铁分会,2014:924-930.

[12] 周昊,刘瑞鹏,刘子豪,等. 碱金属对焦炭燃烧过程中 NO_x 释放的影响[J]. 煤炭学报,2015,40(5):1 160-1 164.

(上接第60页)

[3] 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.

[4] 卓凤荣,黄世来,陈连发,等. 马钢链算机-回转窑烟气中 NO_x 探讨[J]. 山东工业技术,2016(16):37.

[5] 中华人民共和国生态环境部. 关于推进实施钢铁行业超低排放的意见[J]. 2019-04-28. 环办大气函[2019]35号.

[6] 张建社,张合宾. 焦炉复合煤气加热 NO_x 形成模拟研究[J]. 山东化工,2015(44):149.

[7] 吴光亮,李士琦,朱荣,等. 自蓄热式烧嘴的试验研究[J]. 钢铁,2004,39(2):60-62.

[8] 苏亚欣,汪文辉,赵丹,等. 射流参数对单烧嘴燃烧室高温空气燃烧特性的影响的数值研究[J]. 钢铁,2010,45(7):94-98.

[9] P E C Burstrom,T S Lundstrom,B D Marjavaara,et al. CFD-modelling of Selective Non-Catalytic Reduction of NOSUB alignrightx in grate-kiln plants[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics An International Journal,2010,10(5-6):284~291.

[10] 陆彪,黄柱成,胡兵. 先进再燃技术在氧化球团工艺中的高效脱硝研究[J]. 烧结球团,2018,43(6):7-12.

[11] M P E C Burstr,D Antos,M T S Lundstr,et al. A CFD-based evaluation of Selective Non-Catalytic Reduction of Nitric Oxide in iron ore grate-kiln plants[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics An International Journal,2015,15(1):32-46.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net