钒钛磁铁矿烧结过程 NO_X 控制技术研究

王建山[1,2,3]，朱廷钰[1]，黎建明[3]，张小龙[3]，邱正秋[3]

（1. 中国科学院过程工程研究所 湿法冶金清洁生产技术国家工程实验室，北京 100190；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室，四川 攀枝花 617000）

摘 要： 利用烧结杯实验装置研究了不同烧结工艺参数对钒钛磁铁矿烧结烟气 NO_X 生成及烧结主要技术经济指标的影响。结果表明：随着混合料碱度、水分、料层厚度及燃料配比的降低，烟气中 NO_X 排放浓度呈现降低的趋势；同时上述参数的改变未对烧结速度、利用系数、烧结成品率和转鼓强度等烧结主要技术经济指标产生显著的影响。

关键词： 钒钛磁铁矿；烧结；烧结烟气；利用系数；成品率；转鼓指数；NO_X；控制技术

中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2018)01－0020－05

doi： 10.13403/j.sjqt.2018.01.005

Research on NO_X control technology in sintering process of vanadium titanium magnetite

Wang Jianshan[1,2,3], Zhu Tingyu[1], Li Jianming[3], Zhang Xiaolong[3], Qiu Zhengqiu[3]

(1. *National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049; 3. *Pangang Group Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua* 617000, *Sichuan*)

Abstract The influence of different sintering process parameters on the NO_X production and sintering of the main technical and economic indexes were studied through sintering cup experimental device. The results showed that, As the mixture alkalinity, moisture, material thickness, the proportion of the fuel ratio increases and the fuel ratio decreases, the concentration of NO_X in the flue gas tends to decrease. Meanwhile, the modification of these parameters has no significant effect on sintering speed, utilization coefficient and the intensity of the drum.

Key words vanadium titanium magnetite; sinter; sintering flue gas; use factor; yield; index of the drum; NO_X; control technology

1 前 言

目前，由于烧结烟气自身固有的低温、高湿度等特性，暂无成熟、可靠的烟气脱硝技术适于烧结烟气的脱硝处理。已有研究表明[1]，烧结过程产生的 NO_X 有 80%～90% 来源于燃料中的氮，为燃料型 NO_X，热力型和快速型 NO_X 生成量很少；烧结过程产生的 NO_X 主要包括 NO 和 NO_2，90% 以上为 NO，5%～10% 为 NO_2，还有微量 N_2O[2]；NO_X 来源主要有两部分：一是烧结点火阶段，二是固体燃料燃烧和高温反应阶段；NO_X 生成量受到燃料氮含量、氮的存在形态、燃料粒度、空气过剩系数、烧结混合料中金属氧化物等成分的影响[3]。因此，从烧结过程控制出发，在保证烧结矿主要技术经济指标不受较大影响下，通过优化烧结过程相关的工艺参数，从源

收稿日期： 2018－01－23

作者简介： 王建山(1987－)，男，硕士研究生，主要从事烧结烟气脱硫脱硝方面的研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

头端减少 NO_X 的生成，是钢铁企业实现 NO_X 达标排放较为可行、经济路线。

2　实验内容

2.1　实验原料

采用攀钢炼铁厂现场生产所用的原料和燃料，主要有白马精矿、国高粉、中粉、生石灰、活性灰、焦炭、煤粉。

2.2　实验装置

实验在∅300 mm × 800 mm 烧结杯中进行，其主要工艺参数见表 1。

表 1　烧结杯实验工艺参数表

铺底料粒度 /mm	铺底料高度 /mm	一混时间 /min	二混时间 /min	点火温度 /℃	点火时间 /min	点火负压 /Pa
10 ~ 16	20	4	6	1 050 ± 50	2.0	6 000

2.3　实验检测指标

烧结杯试验开始时，采用德国 MRU 公司 VARIO plus 增强型烟气分析仪实时监测出口烟气中 NO_X 含量，每隔 4 min 记录一次数据。烧结杯试验结束后，检测每组烧结矿成品率、烧结矿转鼓强度及利用系数等指标。

3　结果与讨论

3.1　混合料碱度的影响

在烧结混合料其它指标一定的前提下，将混合料碱度分别控制在 1.7、1.8、1.9、2.0、2.1 进行烧结杯试验，研究其对烧结烟气中 NO_X 浓度及烧结主要技术经济指标的影响，结果如图 1 及表 2 所示。

由图 1 可知，随着混合料碱度从 1.7 逐渐增大到 2.1，烟气中 NO_X 排放浓度有小幅度的降低。混合料碱度提高意味着混合料中 CaO 含量也增大，一方面，CaO 可与焦粉及煤粉中的燃料氮反应生成 Ca – N 中间产物，而 Ca – N 在可与 O_2 反应生成 N_2，从而降低 NO_X 的生成量[4,5]；另一方面，CaO 能与铁矿石中的 Fe_2O_3 反应生成铁酸钙，而铁酸钙可作为 CO 还原 NO 的催化剂。

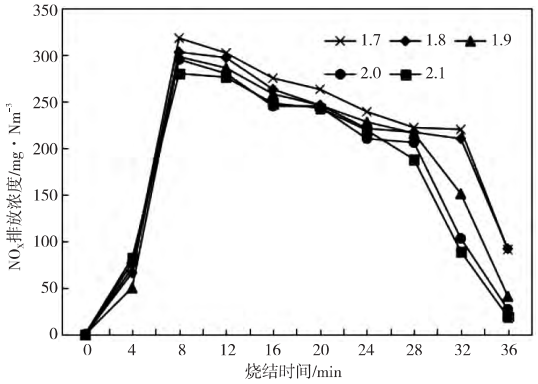


图 1　混合料碱度对烧结烟气 NO_X 排放浓度的影响

表 2　混合料碱度对烧结主要技术经济指标的影响

混合料碱度	烧结速度 /mm · min^{-1}	成品率 /%	转鼓强度 /%	利用系数 /t · (m^2 · h)$^{-1}$
1.7	16.72	74.1	70.8	0.967
1.8	17.81	74.8	72.07	1.021
1.9	18.22	75.51	73.80	1.108
2.0	19.18	76.29	75.93	1.189
2.1	20.34	77.16	77.33	1.265

由表 2 可知，随着碱度的逐渐提高，烧结速度、利用系数、烧结成品率和转鼓强度明显升高。其原因在于随着碱度升高，烧结混合料制粒造球效果改善，烧结矿矿物组成中粘结相硅酸盐和铁酸盐增加。

3.2　混合料水分的影响

在烧结混合料其它指标一定的前提下，将混合料水分分别控制在 6.0%、6.5%、7.0%、

中国知网　https://www.cnki.net

7.5%、8.0%进行烧结杯试验，研究其对烧结烟气中 NO_X 浓度及烧结主要技术经济指标的影响，结果如图2及表3所示。

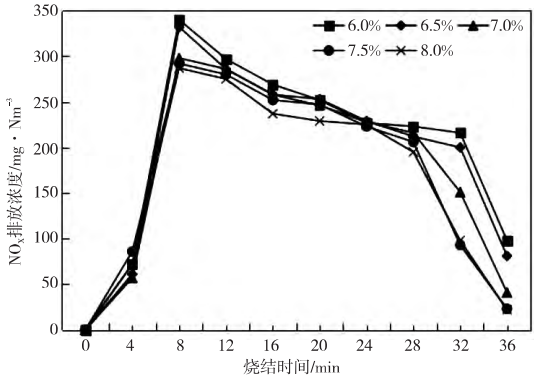


图2 混合料水分对烧结烟气 NO_X 排放浓度的影响

由图2可知，随着混合料水分从6.0%逐渐增大到8.0%，烟气中 NO_X 排放浓度有小幅度的降低。主要因为当烧结混合料的水分配比提高时，有利于改善烧结混合料的制粒效果，较大程度地提升了烧结混合料的透气性能，进而使得单位时间内通过混合料层的空气量变大，烟气中剩氧量升高，随着氧气量的增加，已经生成的NO被氧化成 NO_2 的几率大大增加，而 NO_2 被还原成 N_2 的能力要远强于NO[6,7]。因此，提高混合料的水分有利于抑制 NO_X 的生成。

表3 混合料水分对烧结主要技术经济指标的影响

混合料水分/%	烧结速度/mm·min^{-1}	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/t·(m^2·h)$^{-1}$
6.0	17.35	77.53	76.21	1.037
6.5	17.79	76.37	74.88	1.061
7.0	18.22	75.51	73.8	1.108
7.5	18.77	74.98	71.43	1.139
8.0	19.31	74.46	70.34	1.178

由表3可知，随着水分的逐渐提高，烧结速度明显升高，利用系数略有升高，改善的原因在于烧结混合料制粒效果变好，粒度组成改善及料层透气性变好。随着水分的逐渐提高，烧结成品率和转鼓强度呈下降趋势，降低的主要原因在于烧结混合料中水分升高，烧结速度加快，导致烧结料层中高温保持时间缩短，硅酸盐和铁酸盐粘结相结晶不充分，形成更多强度差的玻璃相，烧结矿强度大幅降低所致。

3.3 料层厚度的影响

在烧结混合料其它指标一定的前提下，将料层厚度控制在640 mm、660 mm、680 mm、700 mm、720 mm进行烧结杯试验，研究其对烧结烟气中 NO_X 浓度及烧结主要技术经济指标的影响，结果如图3及表4所示。

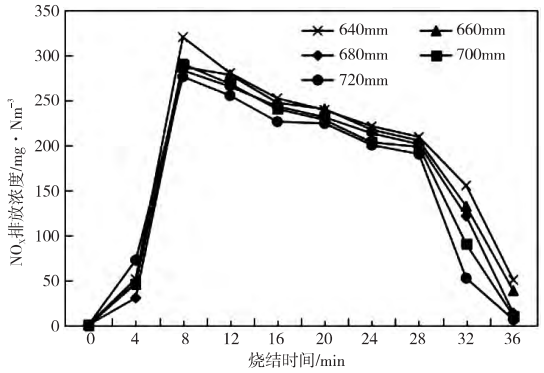


图3 料层厚度对烧结烟气 NO_X 排放浓度的影响

由图3可知，在整个烧结杯试验的时段内，随着料层厚度的增加，烧结烟气中 NO_X 浓度有降低的趋势。在烧结过程中，厚料层烧结有助于发挥料层的蓄热作用，可使烧结矿中生成更多铁酸钙，而铁酸钙可作为CO还原NO的催化剂。

中国知网 https://www.cnki.net

表 4　料层厚度对烧结主要技术经济指标的影响

料层厚度/mm	烧结速度/mm·min^{-1}	成品率%	转鼓强度%	利用系数/t·(m^2·h)$^{-1}$
640	20.02	75.59	71.76	1.263
660	19.35	76.18	72.34	1.211
680	18.66	76.88	72.55	1.188
700	17.93	77.31	72.89	1.156
720	17.41	77.53	73.15	1.12

由表 4 可知，随着烧结料层厚度的增加，烧结速度和利用系数逐渐降低，主要原因是空气通过料层的路径延长，压力损失增大。随着料层厚度的增加，烧结矿成品率和转鼓指数逐渐增加，原因在于料层提高后，表层未烧好及强度较差的烧结矿相对减少。同时，烧结料层自动蓄热作用增强，料层内高温保持时间相对增加，有利于各种物理化学反应的充分进行。

3.4　燃料配比的影响

在烧结混合料其它指标一定的前提下，将燃料的配比控制在 5%、4.5%、4%、3.5%、3% 进行烧结杯试验，研究其对烧结烟气中 NO_X 浓度及烧结主要技术经济指标的影响，结果如图 4 及表 5 所示。

由图 4 可知，在整个烧结杯试验的时段内，随着燃料的配比的降低，烧结烟气中 NO_X 浓度有显著的降低。降低了燃料的配比，即减少了混合料中氮的带入总量，进而降低了烧结过程 NO_X 的生成量。

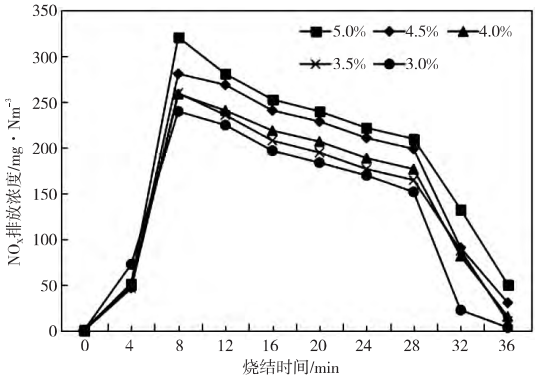


图 4　燃料的配比对烧结烟气 NO_X 排放浓度的影响

表 5　燃料的配比对烧结主要技术经济指标的影响

燃料配比/%	烧结速度/mm·min^{-1}	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/t·(m^2·h)$^{-1}$
5.0	16.98	78.12	73.59	1.133
4.5	17.39	77.31	72.89	1.156
4.0	17.55	76.87	71.47	1.162
3.5	17.93	76.35	70.89	1.145
3.0	18.42	76.03	69.47	1.129

由表 5 可知，随着燃料配比的降低，成品率、转鼓强度逐渐降低，所提供给烧结过程的热量减少，液相反应及液相生成物降低，烧结矿粘结相减少。随着燃料配比的降低，烧结利用系数逐渐呈先升高后降低的趋势：第一阶段，垂直烧结速度加快增加的烧结矿产量大于转鼓指数和成品率下降而降低的烧结矿产量，因此烧结利用系数呈上升趋势；第二阶段，垂直烧结速度加快增加

中国知网　https://www.cnki.net

的烧结矿产量小于转鼓指数和成品率下降而降低的烧结矿产量，因此烧结利用系数呈急速下降的趋势。

4 结 论

随着混合料碱度的增加，烟气中 NO_X 排放浓度小幅降低，烧结速度、利用系数、烧结成品率和转鼓强度明显升高；随着混合料水分的增加，烟气中 NO_X 排放浓度小幅降低，烧结速度、利用系数明显升高，烧结成品率和转鼓强度降低；随着料层厚度的增加，烧结烟气中 NO_X 浓度有一定幅度降低，烧结速度和利用系数逐渐降低，烧结矿成品率和转鼓指数逐渐增加；随着燃料配比的降低，烧结烟气中 NO_X 浓度有显著的降低，成品率、转鼓强度逐渐降低，烧结利用系数逐渐先升高后降低，烧结速度加快。

参考文献

[1] 马利锦. 煤焦燃烧过程中燃料氮转化规律研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[2] Ashman P J, Haynes B S, Buckley A N, et al. The fate of char-nitrogen in low-temperature oxidation [J]. Symposium (International) on Combustion, 1998. 27(2): 3069 – 3075.

[3] 周永刚，邹平国，赵虹. 燃煤特性影响燃 N 转化率试验研究 [J]. 中国电机工程学报，2006. 26(15): 63 – 67.

[4] 陈彦广，王志，郭占成. 焦粉改性降低烧结过程 NO_x 排放的模拟 [J]. 钢铁研究学报，2009. 21(5): 8 – 11.

[5] Thomas K M. The Release of Nitrogen Oxides During Char Combustion [J]. Fuel, 1997, 76(6): 457 – 461.

[6] 任重培，朱天乐，朱廷钰，等. 烧结过程 NOx 和 SO_2 形成规律及烧结料组成对 NOx 排放的影响 [J]. 环境科学，2014. 35(10): 3669 – 3702.

[7] Yamashita H, Tomita A, Yamada H, et al. Influence of char surface chemistry on the reduction of nitric oxide with chars [J]. Energy & fuels, 1993. 7(1): 85 – 89.

(上接第 19 页)

[8] Peng Liu, Baokuan Li, Sherman C. P. Cheung, et al. Material and energy flows in rotary kiln-electric furnace smelting of ferronickel alloy with energy saving [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 109, 542 – 559.

[9] 康兴东，夏春才. 镍矿资源现状及未来冶金技术发展 [J]. 科技视界，2015, 36: 273 – 274.

[10] Zheng, G. l., Zhu, D. Q., Pan, J., et al. Pilot scale test of producing nickel concentrate from low-grade saprolitic laterite by direct reduction-magnetic separation [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(5), 1771 – 1777.

[11] 潘料庭，罗会键，肖琦，等. 论红土镍矿 RKEF 生产工艺技术进步 [J]. 铁合金，2017, (1): 17 – 20.

[12] 潘料庭. 红土镍矿回转窑直接还原镍铁工艺设计与实践 [J]. 铁合金，2015, (2): 15 – 19.

[13] 王亚琴，李艳军，张剑廷，等. 红土镍矿深度还原—磁选试验研究 [J]. 金属矿山，2011, (9): 68 – 71, 86.

[14] 刘云峰，陈滨. 红土镍矿资源现状及其冶炼工艺的研究进展 [J]. 矿冶，2014, 04: 70 – 75, 78.

[15] 刘志国，孙体昌，蒋曼，等. 红土镍矿原矿性质及其对直接还原焙烧的影响机理 [J]. 北京科技大学学报，2014, (11): 1448 – 1455.

[16] 朱德庆，郑国林，潘建，等. 低品位红土镍矿制备镍精矿的试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版)，2013, (01): 1 – 7.

[17] 蒋曼，孙体昌，刘志国，等. 煤种类及添加剂对红土镍矿选择性直接还原的影响规律 [J]. 矿冶工程，2012, (05): 77 – 81.

[18] 路长远，鲁雄刚，邹星礼，等. 中国镍矿资源现状及技术进展 [J]. 自然杂志，2015, 04: 269 – 277.

[19] 曾祥婷，许虹，田尤，等. 中国镍资源产业现状及可持续发展策略 [J]. 资源与产业，2015, 04: 94 – 99.

[20] Liu, Z. G, Sun, T. C, Jiang, M., et al. Laterite ore properties and their influence mechanism on direct reduction roasting [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, (11), 1448 – 1455.

[21] GB/T 31391 – 2015, 煤的元素分析 [S]. 北京: 煤炭科学研究总院检测研究分院, 2015.

[22] GB/T 212 – 2008, 煤的工业分析方法 [S]. 北京: 煤炭科学研究总院煤炭分析实验室, 2008.

中国知网 https://www.cnki.net