烧结配加高炉瓦斯灰替代燃料降低NO_x排放实践

裴元东[1,2]，吴胜利[1]，张俊杰[2]，盛建华[2]，张巧玉[2]，周晓冬[2]
(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083；2. 中天钢铁集团有限公司，江苏 常州 213000)

摘 要： NO_x 治理是烧结超低排放攻关的重点，从源头上削减 NO_x 有助于减轻烧结后续末端处理的压力和提升治理水平。高炉瓦斯灰通常作为固废返回烧结使用，其具有含 N 量为 0.15%～0.35%、粒度基本均小于 0.5 mm 的特征。针对源头控制 NO_x 排放，开展了烧结配加高炉瓦斯灰对 NO_x 排放影响的研究。结果表明：烧结配加 2.0%～2.5% 的瓦斯灰替代约 0.7%～1.0% 的燃料，有助于降低 NO_x 排放质量浓度(脱硝入口数据)约 20～70 mg/Nm^3；NO_x 降低幅度的大小受瓦斯灰中含 N 量、催化剂，以及瓦斯灰形成 P 形球团颗粒质量分数等因素的影响。

关键词： 烧结； NO_x； 瓦斯灰； 球团形状
中图分类号： X705 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2020)01－0073－04
doi： 10.13403/j.sjqt.2020.01.014

Practice of reducing NO_x emission by sintering with blast furnace gas ash as substitute fuel

Pei Yuandong[1,2], Wu Shengli[1], Zhang Junjie[2], Sheng Jianhua[2], Zhang Qiaoyu[2], Zhou Xiaodong[2]
(1. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083;
2. *Zenith Steel Group Co., Ltd., Changzhou* 213000, *Jiangsu*)

Abstract NO_x treatment is the key to tackle the key problem of sintering ultra-low emission. Reducing NO_x from the source is helpful to reduce the pressure of sintering end treatment and improve the treatment level. Blast furnace gas ash is usually returned to sintering process as solid waste, which has the characteristics of 0.15%～0.35% N content and particle size less than 0.5 mm. Aiming at the source control of NO_x emission, a study is carried out on the influence of sintering with blast furnace gas ash on NO_x emission. The study shows that adding the blast furnace gas ash instead of about 0.7%～1.0% fuel in sintering can help to reduce the emission of NO by about 20～70 mg/Nm^3; the extent of NO_x decline is affected by the N content and catalytic agent in gas ash, and the content of forming pellets(P) granules by the gas ash.

Key words sintering; NO_x; gas ash; pellet shape

烧结 NO_x 排放约占钢铁行业 NO_x 排放的 50%[1]，降低烧结 NO_x 排放是当前烧结环保攻关的重点。随着烧结超低排放对 NO_x 质量浓度降到 <50 mg/Nm^3 的要求逐步落实，各烧结厂基本均开始筹建活性炭、SCR 等末端治理工艺予以应对。若能从源头上减少 NO_x 排放，则有助于缓解后续末端处理 NO_x 的压力，同时提升烧结 NO_x 的控制水平[2]。事实上，大工业烧结机废气中 NO_x 质量浓度在 200～400 mg/Nm^3 的较大范围内波动。由于 NO_x 受烧结原燃料和工艺参数的影响较大，因此明晰影响 NO_x 排放因素对于在实际生产中的具体操作调整有显著价值。

烧结过程中 90% 以上的 NO_x 来源于燃料，即燃料型 NO_x 是烧结排放 NO_x 的主要成分；燃料的用量、含 N 量、粒度、赋存状态和添加剂加入与否等均对烧结 NO_x 排放有影响[3-5]。就燃料粒度对 NO_x 的影响而言，前人开展过较多

收稿日期： 2019－08－05
作者简介： 裴元东(1985—)，男，博士研究生，高级工程师，从事烧结技术研究和管理工作。

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

工作：中南大学潘建研究表明，在完全燃烧条件下，焦粉粒度为0.5～5 mm时，燃料N的转化率较高，接近95%，而－0.5 mm和＋5 mm粒级焦粉的燃料N转化率均低于前述粒级，分别为80%和70%左右[6]；宝钢在生产实践中基于控制NO_x提出减少焦粉中＞3 mm尤其是＞5 mm的占比[7]；安工大实验室研究表明，提高燃料中－3 mm的占比有助于降低NO_x的排放[8]。高炉瓦斯灰作为含C和Fe的固废，大多情况下返回烧结使用。前人研究过瓦斯灰对烧结矿质量和有害元素方面的影响，但未有对烧结使用瓦斯灰影响NO_x排放的报道。

本文以中天烧结机工业实践为基础，通过分析烧结配加瓦斯灰前后烧结NO_x排放的变化，阐述了瓦斯灰影响烧结NO_x排放的规律，期望能为后人从源头上减少烧结NO_x排放提供参考。

1 瓦斯灰的基本特征

对中天烧结用瓦斯灰的含N量进行了测试，并与焦粉和无烟煤的含N量进行对比，对多个不同批次的样品进行测试比较，如表1所示。由表1可知，瓦斯灰含N量在0.15%～0.35%之间，而焦粉和无烟煤基本为0.9%～1.0%。分析认为，瓦斯灰的含N量受燃料(焦炭和喷吹煤)在高炉内的燃烧过程和停留时间等因素影响，故表现出一定的波动。按瓦斯灰含C量30%，焦粉含C量80%计，则按等C折算后，瓦斯灰含N量也较焦粉低，尤其在瓦斯灰含N量为0.15%时，折算成焦粉后含N量仅在0.4%。

表1 瓦斯灰和燃料的含N量比较(质量分数) %

项目	含N量	含N量	含N量
瓦斯灰	0.32	0.35	0.15
瓦斯灰按等C折算成焦粉后	0.85	0.93	0.40
焦粉	0.97	0.92	0.90
无烟煤	1.00	0.99	—

瓦斯灰和燃料的粒度对比见表2。由表2可知，瓦斯灰粒度基本在－0.5 mm以内，明显较焦粉粒度为细。

表2 瓦斯灰和燃料的粒度比较(质量分数) %

项目	＞8 mm	8～5 mm	5～3 mm	3～1 mm	1～0.5 mm	＜0.5 mm
瓦斯灰	—	—	—	0.20	2.89	96.91
焦粉	2.33	10.88	9.57	28.61	17.78	30.82

2 烧结配加瓦斯灰对NO_x排放的影响

2.1 混匀矿料堆配加瓦斯灰对NO_x排放的影响

中天烧结在料堆中间歇式配加高炉瓦斯灰，如表3所示为烧结混匀矿配比的变化。根据表3，结合相关计算可知，在配加3%的瓦斯灰后(折算混合料比例2.5%)，保证烧结料的总C量，焦粉的配比从4.4%降低到3.4%，降低了1%。

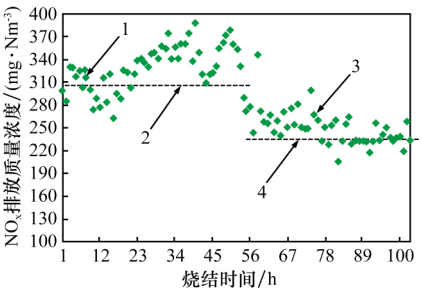
表3 烧结混匀矿配比变化(质量分数) %

物料	高返	扬迪粉	PB粉	巴西混合粉	瓦斯灰	纽曼粉	MAC粉	铁泊	污泥杂料
配加前	20	20	20	20	—	7	10	—	3
配加后	18	18	12	22	3	14	9	4	—

混匀矿料堆配加瓦斯灰前后烧结过程NO_x排放变化(脱硝入口数据)见图1。由图1可知：烧结配加瓦斯灰后，NO_x排放呈现显著降低趋势，整体上有助于降低NO_x质量浓度约70 mg/Nm^3。其主要原因可能为：一方面，瓦斯灰的含N量相对较低，即使在折算等C量条件后，贡献的含N量仍低于原先全部使用焦粉贡献的含N量；另一方面，瓦斯灰的粒度较小，基本为－0.5 mm水平(表2)，计算可知配加瓦斯灰后烧结总燃料中－0.5 mm粒度占比增大了近60%，而＋0.5 mm粒度占比均有所减少。特别细粒度的燃料可能NO_x的转化率相对较低，

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

最终造成 NO_x 排放减少。



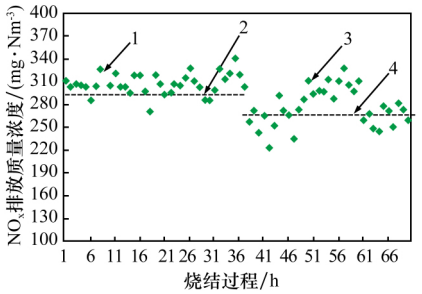
1—配加前测量值；2—配加前平均值；

3—配加后测量值；4—配加后平均值。

图 1　混匀矿料堆配加瓦斯灰前后烧结过程 NO_x 排放质量浓度变化

2.2　烧结直配瓦斯灰对 NO_x 的影响

直配瓦斯灰(采用 2% 的瓦斯灰搭配 3.7% 的燃料，替代原先 4.4% 的无烟煤)前、后的烧结过程 NO_x 排放变化(脱硝入口数据)见图 2。从图 2 可知：烧结配加瓦斯灰后，NO_x 质量浓度降低约 20 mg/Nm³，整体上配加瓦斯灰后 NO_x 的降幅较之前低。分析认为，这可能与瓦斯灰含 N 量变化、瓦斯灰替代无烟煤的占比略低等有关。



1—配加前测量值；2—配加前平均值；

3—配加后测量值；4—配加后平均值。

图 2　烧结在直配瓦斯灰前后 NO_x 排放质量浓度的变化

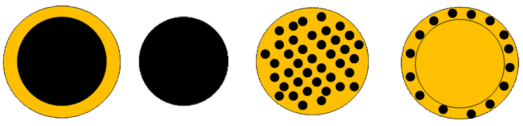
2.3　烧结配加瓦斯灰影响 NO_x 排放的机理分析

2.3.1　瓦斯灰含 N 量对 NO_x 的影响

前人研究表明高炉瓦斯灰中的 C 主要来源于焦炭[9-10]。分析认为：在高炉炉内焦炭磨损破碎、熔损反应等导致小颗粒形成而被煤气带出过程当中，焦炭中的部分 N 在高温过程中可能已释放出，在还原气氛下以 N_2 形式进入煤气。因此，瓦斯灰表现出等 C 条件下含 N 量低的特征，或者说 N/C 值一般较焦炭或焦粉的 N/C要低；从测试结果看，瓦斯灰的 N 和 C 质量分数以 0.15% 和 0.3% 计时，N/C 值仅为 0.5，远低于燃料。当然，由于 N 去掉的比例有波动，则瓦斯灰含 N 量存在波动。最终，瓦斯灰替代燃料后 NO_x 的降幅也有所波动。

2.3.2　瓦斯灰粒度对 NO_x 的影响

燃料粒度是影响 NO_x 排放的重要因素。就烧结燃料参与制粒过程而言，较细的瓦斯灰在制粒中的分布形态必然与较粗的焦粉有所不同。根据图 3 所示对燃料 4 种形态的划分，分析认为瓦斯灰在制粒过程中形成的更多应该是球团形(P 形)结构，而该形态下 NO_x 的转化率相对于其他形态如 S 和 S′形的转化率要低[11]；同时，较小粒度的瓦斯灰在烧结过程中也易于与其他大粒度燃料所生成的 NO_x 发生还原反应，最终促使 NO_x 排放减少。当然，由于配加瓦斯灰后生成 P 形结构的数量难确定，因此，这也是最终配加瓦斯灰后 NO_x 降幅波动的一大原因。



黑色为燃料；灰色为其余烧结料

图 3　烧结燃料的几种赋存状态

2.3.3　瓦斯灰中催化剂对 NO_x 的影响

瓦斯灰中同时含有铁氧化物和碱金属，前人研究表明，二者的存在均对 NO_x 的生成起抑制作用[12]。则在瓦斯灰替代部分燃料后，有助于 NO_x 排放的降低。

因此，在瓦斯灰替代部分烧结燃料后，在上述因素的共同作用下，最终促进了烧结 NO_x 排放量的减少。

3　结　论

烧结配加瓦斯灰替代部分燃料，在贡献含 C 量基本稳定的条件下，有助于降低 NO_x 排放。配加 2.0%～2.5% 的瓦斯灰替代约 0.7%～1.0% 的焦粉，有助于降低 NO_x 排放(脱硝入口数据)约 20～70 mg/Nm³；NO_x 降低幅度的大小受瓦斯灰中含 N 量、催化剂，以及瓦斯灰形成 P 形

(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