烧结料面喷吹蒸汽对烧结矿质量和 CO 排放影响研究

裴元东[1,2]，欧书海[3]，马怀营[2]，潘 文[2]，赵志星[2]，吴桂辑[3]，吴胜利[1]
（1. 北京科技大学冶金与生态工程学院，北京，100083；2. 首钢集团有限公司技术研究院，北京 100043；
3. 首钢股份公司炼铁部，河北 迁安 064400）

摘 要：近年来，烧结料面喷吹技术成为研究的热点，期望通过喷吹介质达到烧结节能减排改质的效果。前人研究了烧结料面喷吹天然气、焦炉煤气、氧气、烧结大烟道和环冷机废气等介质对烧结矿产、质量的影响。本文重点研究了烧结料面喷吹蒸汽对烧结矿质量和 CO 排放的影响，通过在烧结杯试验中对烧结废气成分和料层温度进行测试的手段评价了喷吹蒸汽的效果。研究表明烧结料面适宜的蒸汽喷吹可起到 CO 减排和改善烧结矿质量的综合效果。

关键词：烧结；水蒸气；喷吹；CO
中图分类号：TF046.4；X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2018)01－0035－05
doi：10.13403/j.sjqt.2018.01.008

Effect of steam spraying on sintering bed on sinter quality and CO emission

Pei Yuandong[1,2], Ou Shuhai[3], Ma Huaiying[2], Pan Wen[2], Zhao Zhixing[2], Wu Guiji[3], Wu Shengli[1]
(1. *Shougang Research Institute of Technology. Beijing* 100043; 2. *Ironmaking Plant, Shougang Stock Corporation. Qianan* 064400, *Hebei*; 3. *Ironmaking Plant, Shougang Jingtang Corporation. Tangshan* 063200, *Hebei*)

Abstract In recent years, spraying technology on sintering bed has become a hot research topic, the general effect of expectations by spraying medium is to achieve energy-saving, emission reduction and improvement of sintering indexes. Effects of spraying natural gas, coke oven gas, oxygen, sintering in flue gas and exhaust gas from sinter cooler were tested by former researchers. Influence of sintering surface spraying steam on sinter quality and emission were studied. The results showed that spraying steam can be beneficial for CO emission reduction during sintering process and there was a suitable spraying amount to improve the quality of the sinter.

Key words sintering; steam; spraying; CO

1 前 言

节能、减排和提质是铁矿粉烧结面临的三大重任。近几年，国内外报道了在烧结料面喷吹介质对烧结节能和质量影响的研究，日本 JFE 通过喷吹液化气技术改善了烧结矿气孔结构和烧结矿质量，重点取得了改善表层烧结矿强度和底层烧结矿还原性的效果[1]；同样喷吹含氢介质，梅钢烧结喷吹焦炉煤气也取得了改善烧结矿质量和还原性的效果[2,3]。国内曾就富氧烧结开展过大量研究[4~7]，氧气促进燃料燃烧、有助于烧结提产的作用，也可用于与天然气的综合喷吹上[8]。利用烧结大烟道废气[9~14]或环冷机废气[15~17]进行返回料面的热风烧结本质上也属于喷吹技术，有显著的节能和减排效果。烧结料面喷吹蒸汽可提高燃料燃烧效率的效果已在首钢京唐 550m^2 烧结机上被确定[18]。2018 年 1 月 1 日，《环境保护税法》颁布，将正式开始对废气 CO 污染物征税，烧结 CO 减排的意义重大。本文进一步对烧结料面喷吹蒸汽影响烧结矿质量

收稿日期：2017－08－08
作者简介：裴元东(1985－)，男，高级工程师，主要从事烧结技术方面的研究。

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

和 CO 排放进行了研究。

2 试验方法

为考察不同的喷吹制度对烧结矿质量和排放的影响，本次试验所用铁料为同一种，见表 1，最后两个方案的焦粉配比从 3.7% 降到 3.5%，以作为燃料配比降低后的对比。

表 1 烧结杯方案料比结构(%)

水粉	BHP	纽曼	巴卡	南非	灰石	云石	白灰	焦粉	高返	自返
22.3	13.4	13.4	8.9	4.4	6.2	1.0	4.4	3.7	13.4	8.9

表 2 所示为各方案的蒸汽喷吹制度。烧结杯试验所使用的蒸汽为从现场蒸汽管道所接，试验时蒸汽压力约 0.1 MPa，温度约 100 ℃。烧结杯料层厚度为 550 mm，杯体直径为 300 mm。烧结杯试验时采用烟气分析仪测试烧结废气成分。

表 2 不同喷吹蒸汽制度的方案

	蒸汽喷吹制度	喷吹总量 /m^3	喷吹流量 /$m^3 \cdot h^{-1}$
基准未喷－1	未喷	–	–
基准未喷－2	未喷	–	–
方案 1	点火结束后 5 min 开始喷，持续喷 10 min	0.032	0.19
方案 2	点火结束后 3 min 开始喷，持续喷 15 min	0.028	0.11
方案 3	点火结束后 10 min 开始喷，持续喷 5 min	0.012	0.14
基准未喷－3	未喷	–	–
方案 4	点火结束后 3 min 开始喷，以 1 min 为间隔喷 4 次，共喷 4 min	0.008	0.12
方案 5	点火结束后 3 min 开始喷，以 1 min 为间隔喷 10 次，共喷 10 min	0.010	0.06
方案 6	点火结束后 3 min 开始喷，以 2 min 为间隔喷 6 次，共喷 12 min	0.002	0.01
基准未喷(减燃料)	未喷	–	–

注：喷吹试验时蒸汽流量存在波动，故喷吹流量为平均流量

3 喷吹蒸汽对烧结矿质量的影响

表 3 和表 4 所示为各方案烧结杯试验的指标。

表 3 各方案烧结杯试验技术指标

	水份 /%	成品率 /%	转鼓指数 /%	利用系数/ $t \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$	全系/ $t \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$	垂烧速度/ $mm \cdot min^{-1}$	固体燃耗/ $kg \cdot t^{-1}$	烧结时间 /min	冷却时间 /min	返矿率/%	烧结终点温度/℃
基准未喷－1	5.34	72.65	63.47	0.75	0.61	17.93	74.73	30.67	38.03	27.35	290.0
基准未喷－2	6.10	73.24	64.67	0.90	0.74	18.64	64.35	29.50	36.02	26.76	281.8
方案 1	7.40	75.60	57.20	0.92	0.78	18.95	65.34	29.02	34.20	24.40	279.6
方案 2	7.40	69.89	57.33	0.87	0.74	19.23	69.37	28.60	33.70	30.11	280.1
方案 3	6.70	75.37	66.00	0.92	0.69	17.13	59.79	32.10	43.00	24.63	344.4
基准未喷－3	6.60	80.64	66.67	0.94	0.72	17.16	58.25	32.05	41.60	19.36	332.6

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

续表 3

方案 4	6.61	75.52	65.87	0.89	0.65	18.31	65.10	30.03	41.20	24.48	314.8
方案 5	6.65	72.11	60.80	0.89	0.68	17.68	63.29	31.10	40.60	27.89	337.5
方案 6	6.60	75.11	65.33	0.89	0.72	16.52	56.77	33.30	41.50	24.89	281.3
基准未喷(减燃料)	6.80	73.79	67.33	0.98	0.58	18.71	56.58	29.40	49.60	26.21	327.3

表 4　各方案烧结料和烧结矿粒度组成(%)

	混合料/mm				烧结矿/mm					
	>7	7~3	<3	>40	40~25	25~16	16~10	10~5	<5	平均粒径
基准未喷-1	24.2	39.1	36.7	5.0	26.4	32.5	23.5	12.6	35.1	22.52
基准未喷-2	22.6	35.7	41.6	4.1	19.9	35.7	33.0	7.4	34.4	21.44
方案 1	36.9	31.0	32.1	0.7	8.0	22.7	35.5	33.2	30.4	15.35
方案 2	45.7	28.3	26.0	0.9	10.2	21.6	35.2	32.1	40.3	16.08
方案 3	23.0	31.4	45.6	5.0	24.9	29.9	24.8	15.4	30.9	21.76
基准未喷-3	23.7	33.2	43.1	7.6	26.9	28.8	23.1	13.7	22.7	22.87
方案 4	24.6	30.3	45.2	9.9	23.1	28.7	25.2	13.1	30.5	23.14
方案 5	23.6	35.5	40.8	5.9	22.3	30.6	28.9	12.4	36.5	21.91
方案 6	30.1	30.3	39.6	6.9	23.7	27.3	26.1	16.0	31.4	21.96
基准未喷(减燃料)	25.7	31.5	42.9	4.2	25.2	28.2	27.6	14.8	33.5	21.48

喷吹蒸汽对烧结矿指标的影响分析如下:

(1) 方案 1 和 2 较基准的转鼓指数明显降低,可能与其水分偏大导致垂直烧结速度过快有关系,同时蒸汽喷吹量过大也导致表层和中间层冷却强度大,造成烧结矿急冷现象多,使转鼓强度降低。

(2) 方案 1 比 2 的成品率高 5.7%,说明蒸汽喷吹位置太靠前会影响成品率,这应是由于点火后料层红层相对较薄,蒸汽接触红层后进行吸热反应,导致表层质量变差形成返矿。

(3) 方案 3 较基准未喷 1 和 2 的指标均显著改善,其可能是方案 3 的水分较二者的相对为高所致。与水分接近的基准未喷 3 相比,方案 3 的成品率降低 5.3%,转鼓和系数变化不大,分析认为与喷吹位置太靠后有关—随着高温带的下移,过后位置喷吹使蒸汽在表层和中间层停留过长,也可能造成粉末多;同时,粉末多也与本实验所使用蒸汽压力和温度低有关。

(4) 方案 4 比 5 的成品率和转鼓指数分别高 3.4%和 5.8%,方案 5 的喷吹总量稍高,其喷吹流量小,但其效果反而不如前者,可能也是由于喷吹蒸汽位置过后对烧结矿质量不利所致。

(5) 降燃料配比的系列,整体上看喷吹蒸汽的方案 6 较不喷吹蒸汽的指标略好,其中成品率高 1.3%,转鼓指数降低 2%,燃料消耗接近,但烧结全系数显著提高。

(6) 从方案 3、4、5 在喷吹总量接近时的烧结指标看,后期连续喷吹的效果最好(方案 3),早期间隔喷吹其次(方案 4),从早期到后期的长时间间断喷吹效果最差(方案 5)。结合不同蒸汽喷吹量来看,效果更差的是如前所述的从烧结早期到后期的长时间连续喷吹(方案 1 和方案 2),效果更好的是低燃料配比时的低蒸汽量、长时间间隔喷吹(方案 6),即喷吹效果:方案 6 > 方案 3 > 方案 4 > 方案 5 > 方案 1 > 方案 2。方案 6 的效果最好,分析认为这是蒸汽进入烧结料层后发挥高温反应的效果也与燃料本身配比有关,二者的匹配性值得继续探索研究。

(7) 从降低燃料的最后两个方案与之前方案对比看,燃耗显著降低了 2~10 kg/t。

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

(8) 图1所示为不考虑具体喷吹位置，仅分析喷吹蒸汽量与烧结指标的关系。可见，随着喷吹量的增加，烧结矿指标基本呈现稳定然后变差的趋势。烧结指标变化不大的蒸汽喷吹量为 $<0.01m^3$，折算到烧结料重量为 $<0.01\%$，或者为吨烧结料喷吹 <100 g 蒸汽。此数量级为京唐现场实际蒸汽喷吹量的1/20。分析认为，烧结杯试验所用蒸汽的压力较京唐现场使用的低0.2 MPa，温度低30 ℃，可以预见工业生产中所能容纳的适宜蒸汽喷吹量在烧结杯试验中将降低。

整体上看，由于烧结杯试验蒸汽的温度和压力均比实际工业低，会一定程度影响喷吹效果。从烧结杯试验分析，蒸汽喷吹存在适宜量和喷吹范围，在此适宜范围内喷吹蒸汽对提高烧结矿质量有利，否则将产生负面影响。因此在实际工业生产上使用时应进行适宜蒸汽量和喷吹位置的摸索。

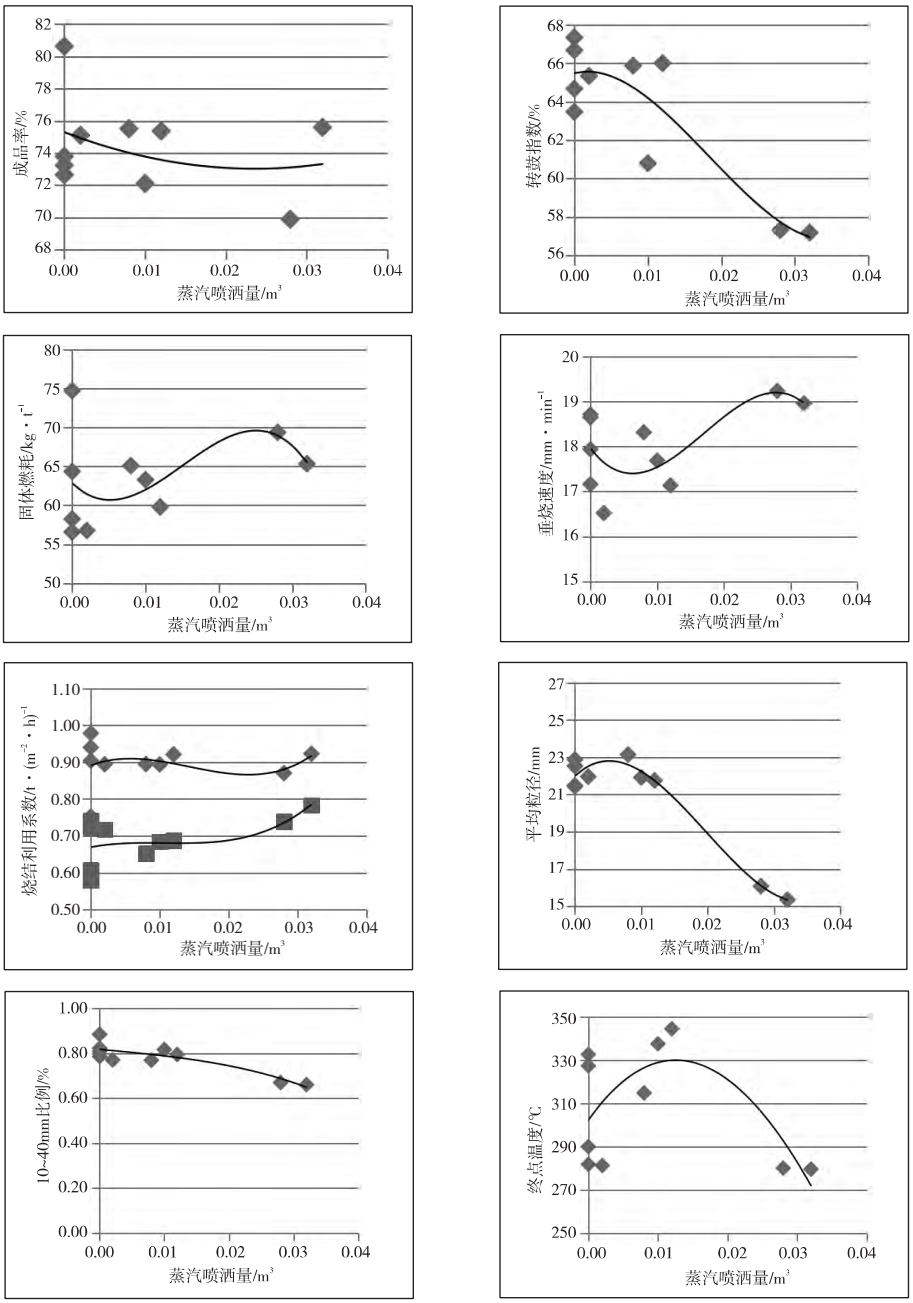


图1 喷吹蒸汽量对烧结指标的影响

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

4　喷吹蒸汽对烧结废气 CO 含量的影响

图 2 ~ 3 所示为喷吹蒸汽对烧结废气 CO 含量的影响。可见在不喷吹蒸汽时，CO 含量在烧结过程中段基本呈现逐步升高的形态（随工况变化 CO 含量有一定波动）；而喷吹蒸汽后，在喷吹期间，废气中 CO 含量呈现被拉低的趋势，喷吹结束后 CO 含量再次升高。这说明喷吹蒸汽对于烧结废气 CO 有减排效果。从 CO 曲线波峰波谷看，喷吹蒸汽可使烧结过程 CO 含量降低 1 000 ~ 2 000 ppm 以上。

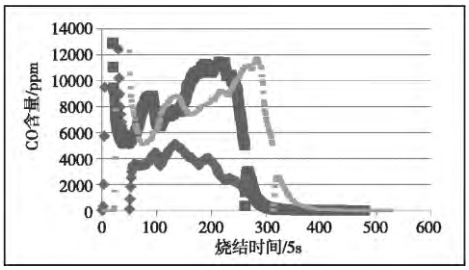


图 2　不喷吹蒸汽时废气 CO 含量变化

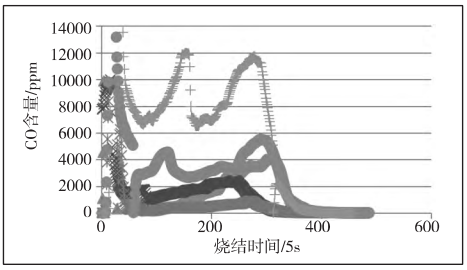


图 3　喷吹蒸汽时废气 CO 含量变化

5　结　论

（1）烧结料面喷吹蒸汽起到了降低 CO 的效果，尤其降低 CO 的效果明显；烧结杯条件下（50 kg 料）喷吹蒸汽 0.002 ~ 0.032 m^3，CO 峰值含量降低 1 000 ~ 2 000 ppm 以上。

（2）由于在管道末端，本次烧结杯试验所用蒸汽量的压力和温度均较工业使用时低，一定程度影响烧结矿的质量如成品率指标。

（3）存在可改善烧结矿质量的适宜喷吹量，料面喷吹蒸汽位置不能过前也不能过后；实际使用时应摸索适宜的蒸汽量，喷吹量逐步由小到大进行尝试。

参考文献

[1] Nobuyuki OYAMA，Yuji IWAMI，Tetsuya YAMAMOTO，et al. Development of Secondary - fuel Injection Technology for Energy Reduction in the Iron Ore Sintering Process [J]. ISIJ International，2011（51）6：913 - 921.

[2] 韩凤光，许力贤，吴贤甫，等. 焦炉煤气强化烧结技术研究[J]. 烧结球团，2016，41（02）：12 - 16，20.

[3] 李和平，聂慧远，韩凤光，等. 焦炉煤气强化烧结技术在梅钢的应用[J]. 烧结球团，2015，40（06）：1 - 3，35.

[4] 胡兵，黄柱成，姜涛，等. 铁矿石富氧烧结点火试验研究[J]. 钢铁研究学报，2010，22（12）：17 - 21.

[5] 沈小峰. 梅钢富氧烧结技术的研究与应用[J]. 中小企业管理与科技（下旬刊），2009，（10）：238.

[6] 王涛. 酒钢富氧烧结技术的研究与应用[C]. //2011 年全国冶金节能减排与低碳技术发展研讨会文集. 中国金属学会、河北省冶金学会，2011：3.

[7] 郭玉盛. 富氧烧结试验[J]. 烧结球团，1992，27（01）：16 - 19.

[8] Heejin KANG，Sangmin CHOI，Won YANG，et al. Influence of Oxygen Supply in an Iron Ore Sintering Process [J]. ISIJ International，2011（51）7：1065 - 1071.

[9] 于恒，王海风，张春霞. 铁矿烧结烟气循环工艺优缺点分析[J]. 烧结球团，2014，39（01）：51 - 55.

[10] 范振宇. 烟气循环烧结的基础研究[D]. 长沙：中南大学，2011.

[11] 张志刚，郑绥旭，丁志伟. 烧结烟气循环技术工业化应用概述[J]. 中国冶金，2016，26（07）：54 - 57.

[12] 贾秀凤，喻波. 宁钢烧结烟气循环系统的节能减排效果[J]. 烧结球团，2015，40（04）：51 - 54.

[13] 潘文，焦光武，高新洲，等. 烧结大烟道烟气循环利用合理的循环烧结面积控制研究[J]. 烧结球团，2016，41（04）：49 - 53.

[14] 常龙增. 烟气循环技术在广西盛隆烧结机上的应用[J]. 安徽冶金，2016，（03）：55 - 56.

[15] 朱德庆，吴浩方. 梅山烧结矿冷却废气热风烧结工艺的研究[J]. 烧结球团，1997，（05）：13 - 17.

[16] 宋宪平，郑东明，黎晓峰. 烧结冷却低温废气的余热利用[J]. 烧结球团，2001，（04）：23 - 25，54.

[17] 尹雄峰，秦大刚，董法道，等. 济钢烧结余热利用[J]. 烧结球团，2010，35（02）：47 - 49.

[18] 裴元东，史凤奎，吴胜利，等. 烧结料面喷吹蒸汽提高燃料燃烧效率研究[J]. 烧结球团，2016（6）：16 - 20.

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