超厚料层烧结料面喷吹天然气生产实践

李乾坤[1]，裴元东[1]，周晓冬[1]，李国良[1]，刘 前[2]，龙红明[3]
（1. 中天钢铁集团有限公司，江苏 常州 213000；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，
湖南 长沙 410205；3. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243002）

摘要： 针对在钢铁行业绿色生产实现“碳达峰、碳中合”背景下烧结工序降耗减碳的问题，在中天钢铁 550 m^2 烧结机上开展了 930 mm 超厚料层烧结料面顶吹天然气工业化试验，并综合分析了天然气喷吹量对烧结负压、转鼓强度、w(FeO)、低温还原粉化率、内返率以及矿相结构的影响。结果表明：当天然气喷吹量从 0 m^3/h 逐步升高到 600 m^3/h 时，固体燃料消耗逐步降低，最低较基准降低了 3.77 kg/t，固体燃料降幅达到 7.0%，贡献烧结工序 CO_2 减排 9.19 kg/t；在中天当前烧结原料和工艺条件下最佳的天然气喷吹量为 300 m^3/h 水平。下一步需要进一步完善天然气喷吹装置和提升气固燃料耦合燃烧度，以取得更大的烧结减碳效果。

关键词： 烧结；降耗；减碳；厚料层；天然气；喷吹；强度
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)03－0032－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.036

Production practice of natural gas injection on sintering material surface of ultra-thick layer

LI Qiankun[1], PEI Yuandong[1], ZHOU Xiaodong[1], LI Guoliang[1], LIU Qian[2], LONG Hongming[3]
(1. *Zenith Steel Group Corporation, Changzhou* 213000, *Jiangsu, China*; 2. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan, China*; 3. *School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan* 243002, *Anhui, China*)

Abstract: Aiming at the problem of reducing consumption and reducing carbon in the sintering process under the background of "carbon peak and carbon nuetrality" in green production in the iron and steel industry, an industrialized test of natural gas injection on sintering material surface of 930 mm ultra-thick layer is carried out on a 550 m^2 sintering machine of Zenith Steel. The effects of natural gas injection on the negative sintering pressure, drum strength, FeO content, low temperature reduction pulverization rate, internal reversion rate and ore phase structure are analyzed. The results show that when the natural gas injection volume is gradually increased from 0 m^3/h to 600 m^3/h, the solid fuel consumption is gradually decreased, and the lowest is 3.77 kg/t lower than the baseline, the solid fuel is decreased by 7.0%, contributing to the sintering process CO_2 emission reduction of 9.19 kg/t; under the current sintering raw materials and process conditions in Zenith Steel, the optimal natural gas injection rate is 300 m^3/h. The next step is to further improve the natural gas injection device and enhance the gas-solid fuel coupling combustion degree to achieve greater carbon reduction in sintering.

Key words: sintering; reducing consumption; reducing carbon; thick bed of material; natural gas; injection; strength

随着当前世界范围内对“碳达峰，碳综合”理念认知的提升，钢铁生产全流程绿色化、高效化、节能化被推上了新的高度，铁矿烧结作为钢铁生产的第一道原料加工工序，主要采用

收稿日期： 2021－11－08；**修回日期：** 2021－12－27
基金项目： 2020 年度湖南省科技创新计划社会化出资项目(2020SKC4003)
作者简介： 李乾坤(1990—)，男，工程师，从事烧结生产工艺方面的工作。

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

焦煤等化石原料作为能源介质，介质燃烧产生的碳排放量占钢铁生产工序总碳排放量的 15% 以上[1]，同时烧结生产在钢铁工业生产中能耗占比也较高，达到 10% 以上[2]。

针对通过降低烧结过程焦煤配比达到降低烧结固体燃料消耗，从而达到减少烧结过程总碳排放的目标，前人开展了不少的生产研究，从控制烧结生产过程探究了合适的生产工艺参数对烟气 CO 排放的综合影响[3]，从改善烧结原燃料结构、提升混合料温、热风烧结、漏风治理、控制燃料破碎粒度、厚料层烧结工艺制度等方面探究了如何降低烧结固体燃料的消耗，取得了一定效果[4-5]，但是常规工艺的实施对降低烧结固体燃料消耗已达到了瓶颈。叶恒棣等[6]通过烧结杯试验探究出了用氢系气体介质天然气部分替代焦煤等化石能源进行烧结热量供应可行性方案，在其烧结杯试验数据下，当天然气喷吹浓度达到 0.8%、喷吹持续时间为 8 min、喷吹高度为 300 mm、采用梯级喷加制度时，在保持同等成品率、转鼓强度等质量指标的同时，工序配碳量最高可降低约 11%。该试验结果也为其工业化应用提供了可靠依据。

烧结料面天然气喷吹工业化装置于 2020 年 5 月在中天钢铁 550 m^2 烧结机上投用实施，投用以来发现随着天然气喷吹流量和固体燃料配比的气固替代比增大，烧结终点温度出现先升高后降低的变化趋势，烧结负压呈现逐步增加的趋势；烧结矿 FeO 质量分数降低，转鼓强度呈现波动变化，低温还原粉化性能 $RDI_{+3.15\ mm}$ 呈现先升高后降低趋势[7-8]。针对当前 930 mm 超厚料层条件，本文进一步开展了不同天然气喷吹流量对烧结各项技术指标的影响研究，探究了天然气喷吹流量对烧结固体燃料消耗、总碳排放的影响，同时分析了天然气喷吹流量对烧结技术指标和矿相结构的影响，最终结合烧结矿质量指标给出了当前条件下的最佳天然气喷吹制度。

1　试验方法

1.1　试验条件

中天钢铁 550 m^2 烧结机生产所用铁料以褐铁矿和赤铁矿为主，现场试验条件：烧结料层厚度为 930 mm（烧结机台车栏板高度为 750 mm），混合料水分为（7.2 ± 0.2）%，烧结抽风负压为（－14.5 ± 1.5）kPa，点火温度为（1 050 ± 50）℃，烧结终点温度在 420 ℃以上，废气温度为（140 ± 10）℃，烧结机速为（2.35 ± 0.05）m/min，固体燃料粒度组成中大于 5 mm 占比为 8%～10%、小于 3 mm 占比为 70%～75%，固体燃料配比基准值为 4.3%，固体燃料固定碳质量分数大于 72%，天然气喷吹设计流量量程为（0～600）m^3/h。

1.2　试验方案

取烧结连续稳定生产对应的混匀料堆标注为 1#～10#堆，对比不同天然气喷吹流量下烧结过程和主要工艺参数的变化。以喷吹天然气后带来固体燃耗降低的收益与增加的天然气成本的差值进行效益分析。通过综合分析不同天然气喷吹流量下烧结过程主要工艺指标和效益的变化，来确定超厚料层烧结顶吹天然气工业化应用的最佳喷吹制度。不同混匀料堆下烧结工艺参数与天然气喷吹流量数据关系如表 1 所示。

分析表 1 可知，在烧结料层厚度为 930 mm，在褐铁矿和赤铁矿之比为 1.25～1.88 的原料条件下，当天然气喷吹流量变化为（0～600）m^3/h 时，对应烧结终点平均温度为 429.3 ℃，废气平均温度为 139.2 ℃，平均抽风负压为 －14.51 kPa，平均烧结机速为 2.348 m/min。以上烧结工艺指标均在工业化生产指标控制范围内。

2　结果与分析

2.1　喷吹天然气对烧结固体燃料消耗的影响

不同料堆固体燃料消耗与天然气喷吹流量关系如表 2 所示。天然气喷吹流量按烧结矿产量折算处理。

由表 2 可知，随着天然气喷吹流量以 50 m^3/h 逐级增加，厚料层烧结过程上部热量得到迅速补充，烧结固体燃料消耗以约 0.5 kg/t 逐级降低，烧结上料量呈现先升高后降低的变化趋势，烧结负压整体呈现出持续升高的趋势。当

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

表1 不同料堆烧结工艺参数与天然气喷吹流量关系

Table 1 Relationship between sintering process parameters anddifferent natural gas injection volume

混匀料堆	质量分数/%			终点温度/℃	废气温度/℃	负压/kPa	料层厚度/mm	烧结机速/(m·min^{-1})	天然气喷吹流量/(m^3·h^{-1})
	褐铁矿配比	赤铁矿配比	混合料水分						
1#	47	25	7.16	422	138	-13.6	930	2.35	0
2#	45	28	7.18	426	136	-13.5	930	2.35	100
3#	46	25	7.12	432	145	-13.8	930	2.38	150
4#	44	26	7.08	428	143	-14.2	930	2.32	200
5#	40	32	6.96	434	146	-14.4	930	2.36	250
6#	46	25	7.02	442	145	-14.8	930	2.40	300
7#	42	30	6.88	421	142	-14.6	930	2.37	350
8#	46	28	7.05	436	136	-15.0	930	2.35	400
9#	43	33	6.96	427	131	-15.4	930	2.30	500
10#	40	32	7.16	425	130	-15.8	930	2.30	600

表2 不同料堆固体燃料消耗与天然气喷吹流量关系

Table 2 Relationship between solid fuel consumption and different natural gas injection volume

混匀料堆	固体燃料消耗(基准)/(kg·t^{-1})	烧结上料量/(t·h^{-1})	烧结负压/kPa	固定碳占比/%	天然气喷吹流量/(m^3·t^{-1})	固体燃料消耗(实际值)/(kg·t^{-1})	固体燃耗降低值/(kg·t^{-1})
1#	54.01	1 055	-13.6	75.28	0	54.01	0
2#	54.01	1 055	-13.5	74.32	100	53.50	0.51
3#	54.01	1 055	-13.8	73.66	150	53.00	1.01
4#	54.01	1 055	-14.2	76.88	200	52.50	1.51
5#	54.01	1 055	-14.4	75.34	250	52.00	2.01
6#	54.01	1 055	-14.8	72.42	300	51.49	2.52
7#	54.01	1 055	-14.6	77.66	350	50.99	3.02
8#	54.01	1 055	-15.0	73.68	400	50.49	3.52
9#	54.01	1 055	-15.4	75.65	500	50.24	3.77
10#	54.01	1 055	-15.8	74.77	600	50.24	3.77

天然气喷吹流量达到400 m^3/h以上时，固体燃料消耗降低速度减小到0.25 kg/t，烧结过程抽风负压出现了明显上升，由-14.6 kPa提高到-15.8 kPa。分析认为，在一定条件下当烧结料面喷吹天然气过多后，燃气和固体燃料两种燃料燃烧出现的两个燃烧带可能出现不匹配，因而造成高温带透气性变差，烧结负压有所升高，对烧结过程带来一定负面影响[9]。

2.2 喷吹天然气对减少CO_2排放的影响

考虑到天然气喷吹降低固体燃料消耗带来的CO_2减少量和天然气中主要烃类燃烧生成CO_2之间的关系[如式(1)~(3)]，本文对烧结料面喷吹天然气减少CO_2排放量进行了综合分析，数据如表3所示。其中，所用天然气气质分析成分检测中CH_4摩尔分数占比为95.60%，C_2H_6摩尔分数占比为3.00%，其他烃类摩尔分数占比小于0.1%，CH_4密度为0.7174 kg/m^3，C_2H_6密度为0.45 kg/m^3，天然气喷吹流量按烧结矿产量折算处理。

固体燃料反应产生CO_2:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (1)$$

天然气中主要烃类物质燃烧产生CO_2:

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

表 3　不同料堆天然气喷吹流量与总碳排放减少关系

Table 3　Relationship between gas injection volume and different total carbon emission reduction

混匀料堆	烧结上料量/($t \cdot h^{-1}$)	固定碳占比/%	天然气喷吹流量/($m^3 \cdot t^{-1}$)	固体燃料消耗降低值/($kg \cdot t^{-1}$)	燃料消耗降低 CO_2 量/($kg \cdot t^{-1}$)	天然气带入 CO_2 量/($kg \cdot t^{-1}$)	总 CO_2 减少量/($kg \cdot t^{-1}$)
1#	1 055	75.28	0	0	0	0	0
2#	1 055	74.32	0.13	0.51	1.39	0.25	1.14
3#	1 055	73.66	0.20	1.01	2.73	0.38	2.35
4#	1 055	76.88	0.26	1.51	4.26	0.51	3.75
5#	1 055	75.34	0.33	2.01	5.55	0.63	4.92
6#	1 055	72.42	0.39	2.52	6.69	0.76	5.93
7#	1 055	77.66	0.46	3.02	8.60	0.89	7.71
8#	1 055	73.68	0.53	3.52	9.51	1.01	8.50
9#	1 055	75.65	0.66	3.77	10.46	1.27	9.19
10#	1 055	74.77	0.79	3.77	10.46	1.52	8.94

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \quad (2)$$

$$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O \quad (3)$$

由表 3 可知，随着天然气喷吹流量的增加，固体燃料替代量也呈现升高趋势，整体烧结 CO_2 减排量也逐步升高；当喷吹流量达到 0.66 m^3/t 时，烧结固体燃料消耗降低 3.77 kg/t，烧结 CO_2 排放量降低 9.19 kg/t；当喷吹流量继续升高到 0.79 m^3/t 时，烧结固体燃料消耗和 CO_2 排放均不再降低。虽然天然气燃烧过程会产生 CO_2，但相对于天然气喷吹后固体燃料消耗降低减少的 CO_2 量要小。

2.3　料面喷吹天然气对烧结矿转鼓和内返率的影响

不同料堆烧结矿转鼓强度、内返矿率、低温还原粉化($RDI_{+3.15\ mm}$)的变化与天然气喷吹流量间的关系如表 4 所示。

表 4　不同料堆烧结矿转鼓强度、内返矿率、$RDI_{+3.15\ mm}$ 与天然气喷吹流量关系

Table 4　Relationship between sinter drum strength, internal return rate and different natural gas injection

混匀料堆	转鼓强度/%	质量分数/%			天然气喷吹流量/($m^3 \cdot t^{-1}$)
		内返矿率	FeO	$RDI_{+3.15\ mm}$	
1#	78.32	14.90	8.96	73.66	0
2#	78.43	14.82	8.82	74.28	100
3#	78.38	14.82	8.67	74.56	150
4#	78.38	14.88	8.69	74.42	200
5#	78.40	14.84	8.68	74.38	250
6#	78.46	14.72	8.54	74.68	300
7#	78.42	14.80	8.52	74.02	350
8#	78.40	14.84	8.21	73.85	400
9#	78.38	14.95	8.06	73.28	500
10#	78.12	14.98	7.88	72.84	600

由表 4 可知，随着天然气喷吹流量增加，烧结转鼓强度出现了先增加后降低的变化趋势。当天然气喷吹流量为 300 m^3/h 时，达到最大值，为 78.46%，相比 1# 基准提升了 0.14%；当喷吹流量在 350 m^3/h 以上时，呈现降低趋势；在喷吹流量为 500 m^3/h 及以上时，降低明显，最低值为 78.12%。内返率总体呈现先降低后增加的趋势：当喷吹流量为300 ~ 350 m^3/h 时，达到最小值，为 14.72%，相比于 1# 基准降低了 0.18%；当喷吹流量在 400 m^3/h 以上时，呈现明显增加趋势，最高达到 14.98%。烧结矿低温还原粉化 $RDI_{+3.15\ mm}$ 呈现先波动上升后降低的趋势，当喷吹流量在 300 m^3/h 时，达到最大，为 74.68%，相比 1# 基准提升了 1.02%。烧结矿 FeO 呈现逐渐降低的趋势，当喷吹流量为 350 m^3/h 及以上时，呈现明显降低趋势，当

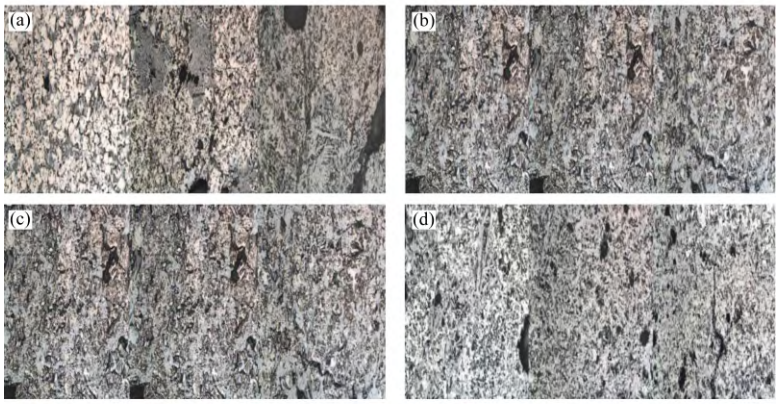
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

喷吹流量在600 m^3/h时，达到最低7.88%。

分析认为，随着天然气喷吹流量的增加，固体燃料配比减少，起还原作用的C减少，烧结还原气氛减弱，Fe^{3+}被还原成Fe^{2+}过程减弱，导致烧结矿$w(FeO)$降低。因此，虽然天然气顶吹料面可在一定程度弥补厚料层烧结热量偏析(即上部热量不足)的现象，可以提升表层烧结矿的强度，减少表层返矿量，但是当喷吹流量过多后，燃气和固体燃料两种燃料燃烧的两个燃烧带可能出现不匹配，造成高温带透气性变差，烧结负压有所升高，对烧结过程带来一定负面影响。因而整体转鼓强度开始降低，内返矿率也升高[10]。

2.4 喷吹天然气对烧结矿矿相组成的影响

在相同工艺条件下，为了探究喷吹天然气流量对烧结矿相的影响，本文分别取喷吹流量为200、300、400、500 m^3/h的烧结矿样进行矿相结构分析，结果如图1与表5所示。



天然气喷吹流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)：(a) 200；(b) 300；(c) 400；(d) 500

图1 不同天然气喷吹流量对应烧结矿矿相结构(反光200×)

Fig. 1 Sinter mineral phase structure corresponding on different natural gas injection (reflection 200×)

表5 不同天然气喷吹流量对烧结矿物相组成影响

Table 5 Influence of different natural gas injection rates on sintering phase composition

喷吹流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	各物相面积百分比/%				
	铁酸钙	硅酸盐	孔洞	磁铁矿	赤铁矿
200	33.9	16.50	26.20	5.50	17.90
300	56.3	7.60	25.00	3.10	8.00
400	48.4	15.40	28.90	3.70	3.50
500	52.7	19.50	21.70	2.20	4.00

由图1和表5可知，矿物组成主要由铁酸钙、磁铁矿、赤铁矿、硅酸盐相和孔洞组成。随着天然气喷吹流量由200 m^3/h逐渐增加至400 m^3/h，赤铁矿占比明显下降，磁铁矿占比也有一定程度减少，分别由17.9%和5.5%降低到4.0%和2.2%；铁酸钙占比随着天然气喷吹流量的增加，呈现先增加后降低的趋势，并在喷吹流量为300 m^3/h时达到最高，为56.3%。分析认为，这可能是由于随着表层天然气喷吹流量的增加和固体燃料的下降，整个烧结上下部的温度场分布更合理，斑状-粒状结构的赤铁矿矿物结构逐渐向针状的铁酸钙矿物结构转变。硅酸盐相主要镶嵌分布在磁铁矿之间，随着天然气喷吹流量的增加，呈现先降低后增加趋势，并在喷吹流量为300 m^3/h时达到最低，为7.6%；随着天然气喷吹流量的增加，孔洞数量稳定，在喷吹流量达到500 m^3/h时孔洞有所减少。

3 结 论

(1) 在中天烧结当前条件下，930 mm厚料层烧结兼顾改善烧结矿质量的天然气喷吹流量宜稳定在300 m^3/h水平，此时固体燃料消耗可减少2.52 kg/t，减少烟气CO_2排放量为5.93 kg/t，烧结矿转鼓强度提升0.14%，低温还原粉化$RDI_{+3.15\ mm}$提升1.02%，烧结内返矿率降低0.18%，烧结矿铁酸钙、赤铁矿占比最高达

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

到 56.3%，硅酸盐占比最低为 7.6%。

(2) 烧结喷吹天然气工艺可有效降低固体燃料消耗，减少烧结 CO_2 排放总量，当天然气喷吹流量为 500 m^3/h 时，固体燃料消耗降低 3.77 kg/t，烟气 CO_2 排放量减少 9.19 kg/t。

参考文献:

[1] 王国栋. 钢铁行业技术创新和发展方向[J]. 钢铁,2015,50(9):1-10.
WANG Guodong. Technological innovation and development direction of iron and steel industry[J]. Iron and Steel,2015,50(9):1-10.

[2] 杨学斌,李可军. 260 m^2 烧结机节能降耗生产实践[C]//2015 年第三届炼铁对标、节能降本及相关技术研讨会论文集. 宁波:河北省金属学会,2015,8:304-307.
YANG Xuebin,LI Kejun. Practice of saving energy and reducing consumption of 260 m^2 sintering machine[C]//Proceedings of the 3rd Iron making Benchmarking,Energy saving and cost reduction and related Technology Seminar. Ningbo: Metal Society of Hebei Province,2015,8:304-307.

[3] 李乾坤,李国良,周晓冬,等. 中天钢铁 550 m^2 烧结机降低 CO 排放研究及实践[J]. 烧结球团,2019,44(4):70-73.
LI Qiankun,LI Guoliang,ZHOU Xiaodong,et al. Research and practice on CO emission reduction of ZenithIron& Steel Co´ 550 m^2 sintering machine[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):70-73.

[4] 曹建刚. 汉钢公司烧结厂降低固体燃料消耗生产实践[C]//第五届全国冶金渣固废回收及资源综合利用、节能减排高峰论坛文集. 昆明:河北省金属学会,2020,8:177-180.
CAO Jiangang. Production practice of reducing solid fuel consumption in sintering plant of Han Steel Company[C]//Proceedings of the 5th National Summit Forum on Solid waste Recovery,Comprehensive Resource Utilization,Energy Conservation and Emission Reduction of Metallurgical Slag. Kunming: Metal Society of Hebei Province,2020,8:177-180.

[5] 顾尚军,陶倩. 降低水钢烧结工序能耗的措施[J]. 能源与节能,2018(2):63-64.
GU Shangjun,TAO Qian. Measures to reduce energy consumption in sintering process of Shuigang[J]. Energy and Energy Conservation,2018(2):63-64.

[6] 张永中,曹建民. 降低马钢一铁烧结工序能耗的实践[J]. 烧结球团,2013,38(6):6-10.
ZHANG Yongzhong,CAO Jianmin. Practice of reducing energy consumption in sintering process of Ma Iron and Steel[J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(6):6-10.

[7] 王兆才,刘臣,陈宇,等. 烧结烟气 CO_x 的生成机理及减排措施[J]. 烧结球团,2021,46(1):14-22.
WANG Zhaocai,LIU Chen,CHEN Yu,et al. Formation mechanism of CO_x in sintering flue gas and abatement measures[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(1):14-22.

[8] 李国良,李乾坤,周晓冬等. 多工艺协同降低烧结机工序能耗生产实践[J]. 烧结球团,2021,46(1):55-59.
LI Guoliang,LI Qiankun,ZHOU Xiaodong,et al. Production practice of multi-process cooperation to reduce sintering machine process energy consumption[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(1):55-59.

[9] 叶恒棣,周浩宇. 高配比富氢燃料烧结技术研究及展望[J]. 烧结球团,2020,45(5):48-53.
YE Hengli,ZHOU Haoyu. Research and prospect of high ratio hydrogen-rich fuel sintering technology[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(5):48-53.

[10] 张俊杰,裴元东,周晓冬,等. 中天钢铁 550 m^2 烧结机喷吹天然气工艺实践[C]//2020 年第八届炼铁对标节能降本及新技术研讨会. 河北:河北省金属学会,2020:17-19.
ZHANG Junjie,PEI Yuandong,ZHOU Xiaodong,et al. Practice of gas injection by 550 m^2 sintering machine in Zenith´ Iron & Steel Co[C]//The 8th iron making benchmarking energy-saving and new technology seminar. Hebe: Metal Society of Hebei Province,2020:17-19.

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