固体燃料分加强化细粒铁精矿烧结技术研究

张思平[1]，刘 臣[2]，钟 强[3]，李浩鸣[1]，王兆才[2]
（1. 新余钢铁集团有限公司，江西 新余 338000；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；
3. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083）

摘要： 针对以细粒铁精矿为主的厚料层烧结，本文采用燃料分加强化技术，研究了二次焦粉配比、焦粉小于0.5 mm粒级质量分数等对细粒铁精矿烧结矿产、质量的影响，分析了烧结产品矿物组成和显微结构的变化。研究结果表明：烧结所用焦粉小于0.5 mm粒级质量分数为51.85%，粒度偏细；在制粒水分为8.0%、焦粉配比为5.3%的优化条件下，通过适宜的燃料（焦粉）分加可提高烧结矿产、质量指标；当二次焦粉配比为50%时，烧结矿的成品率、转鼓强度、利用系数分别在二次焦粉配比为0的基础上提升了1.68%、1.16%、3.64%，固体燃料消耗降低了1.42%；适宜的固体燃料分加可改善烧结矿微观结构，提高结晶良好的针、条状铁酸钙体积分数。

关键词： 燃料；铁精矿；烧结；燃料分加；烧结指标；铁酸钙
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764（2023）03－0076－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.03.043

Research on sintering technology of fine-grained iron ore concentrate reinforced by solid fuel addition

ZHAGN Siping[1], LIU Chen[2], ZHONG Qiang[3], LI Haoming[1], WANG Zhaocai[2]
(1. Xinyu Steel Group Co., Ltd., Xinyu 338000, Jiangxi, China; 2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 3. School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Aiming at the sintering of thick material layer dominated by fine-grained iron ore concentrate, a fuel divided addition strengthening technology is used to study the effects of secondary coke powder ratio and coke powder mass fraction of less than 0.5 mm size fraction on the sinter production and quality of fine-grained iron ore concentrate, and the changes of mineral composition and microstructure of sintered products are analyzed. The results show that the mass fraction of less than 0.5 mm size fraction of coke powder used for sintering is 51.85%, and the particle size is small. Under the optimized conditions of granulation moisture of 8.0% and coke powder ratio of 5.3%, the sinter production and quality indexes can be improved by adding suitable fuel (coke powder). When the secondary coke powder ratio is 50%, the yield of sinter, the tumbler strength and utilization coefficient increases by 1.68%, 1.16% and 3.64% respectively on the basis of the secondary coke powder ratio of 0, and the solid fuel consumption decreases by 1.42%. Therefore, suitable solid fuel addition can improve the microstructure of sinter and increase the volume fraction of calcium ferrite in needles and strips with good crystallization.

Key words: fuel; iron ore concentrate; sintering; fuel addition; sintering index; calcium ferrite

收稿日期： 2022－04－28；**修回日期：** 2022－05－24
基金项目： 湖南省科技成果转化及产业化计划资助项目（2020GK4055）；中冶长天基础研究基金支助项目（2021JCYJ04）
作者简介： 张思平（1971—），男，高级工程师，从事铁矿烧结工艺方向的研究。
通信作者： 刘 臣（1989—），男，博士，中级工程师，从事铁矿烧结球团及熔融还原方面的研究。

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

我国烧结矿生产规模高达 10 亿吨/年，烧结技术推陈出新带动烧结矿产、质量提高、固体燃料消耗降低和污染物排放减少，其对钢铁行业降低碳排放、绿色低碳转型具有重要的现实意义[1-2]。

烧结工艺固体燃料消耗降低的重要手段之一是提高燃烧效率。固体燃料分加技术是将部分燃料在二混过程中加入的技术，将其黏附在制粒小球的表面，通过改善烧结料层内燃料分布与燃烧状态以提高完全燃烧效率[3-6]。理论分析，燃料分加技术可有效从动力学上改善烧结料层内燃烧前沿与传热前沿的匹配问题，保证烧结料层高温区的集中，进而提高利用系数，降低烧结燃料消耗[7-8]。然而，由于固体燃料的疏水性，外配燃料(>1 mm 粒级)黏附效果不佳，致使固体燃料消耗降低不明显。为此，太钢、山钢等开发固体燃料分级分加技术，确定燃料分加的最佳适宜粒度为 1 mm，实行一次分加粗粒级(>1 mm)，二次分加细粒级(<1 mm)，强化制粒效果，优化燃料偏析，从而有效降低燃料消耗[9-10]。李强等[11-12]为进一步强化技术效果，开发了基于燃料分加的优化燃料粒度组成、不同粒度燃料改性及燃料分加结合熔剂分加等技术，使分加技术适用范围扩大，更具有推广应用价值。

本文通过优化焦粉配比、焦粉分加配比以及小于 0.5 mm 细粒级质量分数，系统研究了固体燃料分加技术对烧结指标及其微观结构与矿物组成的影响，以期为该技术更好的工业化应用，进一步降低钢铁厂能耗提供参考。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验用含铁原料包括 3 种磁铁精矿与 1 种赤铁粉矿，配比依次为 37.5%、12.5%、37.5%、12.5%；熔剂包括白云石、石灰石和生石灰。各种原料主要化学成分和粒度组成分别如表 1 和表 2 所示。

由表 1 和表 2 可知，磁铁精矿与赤铁粉矿的 TFe 品位均高于 64%，精矿 B 的 SiO_2 质量分数较高。3 种精矿的粒度过细，无核颗粒导致制粒性能差，特别是精矿 A 与精矿 C 的 <0.074 mm 质量分数高达97.89%与95.00%，而粉矿的粒度分

表 1　原料主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1　Main chemical composition and bruning loss of raw materials　%

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P	烧损
精矿 A	66.64	9.79	3.01	0.66	0.33	0.084	0.024	0.024	0.03
精矿 B	65.22	22.52	7.02	0.58	0.40	0.150	0.100	0.027	0.00
精矿 C	65.09	14.70	5.62	0.45	0.35	0.160	0.065	0.036	0.00
粉矿	64.26	0.65	2.97	0.48	0.28	1.010	0.040	0.087	3.70
白云石	0.85	0.30	3.08	1.82	42.89	0.030	0.050	0.028	50.15
石灰石	0.65	0.06	2.91	51.82	1.87	0.520	0.040	0.054	42.58
生石灰	0.81	0.20	2.83	85.12	1.78	0.630	0.060	0.019	8.92

表 2　原料粒度组成(质量分数)

Table 2　Particle size composition of raw materials　%

原料名称	>5 mm	[3,5) mm	[1,3) mm	[0.5,1) mm	[0.074,0.5) mm	≤0.074 mm
精矿 A	—	—	0.10	0.10	1.91	97.89
精矿 B	—	0.05	0.10	0.85	20.02	78.98
精矿 C	—	0.00	0.10	0.10	4.80	95.00
粉矿	14.96	19.51	11.78	14.93	25.90	12.92
白云石	0.80	3.85	10.20	19.12	43.98	22.05
石灰石	0.03	14.97	20.23	20.17	27.46	17.14
生石灰	—	9.06	16.49	17.01	21.01	36.43

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

布较均匀。因此，适当增加部分粉矿可提供制粒核心，从而改善制粒效果。石灰石和生石灰中的氧化钙质量分数符合烧结要求，同时二者的粒度分布均匀，0.5～3 mm粒级的占比分别为40.4%和33.5%，为精矿制粒提供部分核颗粒。

烧结试验所用燃料为焦粉，其灰分的化学成分和粒度组成分别见表3和表4。由表3和表4可知，焦粉灰分的CaO和Al_2O_3质量分数较高，焦粉小于3 mm粒级的质量分数达到92.63%，质量达标，但小于0.5 mm粒级的质量分数达到了51.85%，细粒级偏高。鉴于这一特性，该燃料宜采用燃料分加技术。

表3 焦粉的工业分析及其灰分的主要化学成分(质量分数)

Table 3 Proximate analysis of coke powder and chemical composition of the ash %

工业分析			主要化学成分						
固定碳	灰分	挥发分	TFe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P
81.54	15.83	2.63	8.72	40.80	8.91	1.14	35.24	1.33	0.13

表4 焦粉的粒度组成(质量分数)

Table 4 Particle size composition of coke powder %

[3,5) mm	[1,3) mm	[0.5,1) mm	[0,0.5) mm	[0.5,0.074) mm	≤0.074 mm
0.55	6.82	16.03	24.75	30.90	20.95

1.2 试验方法

常规烧结与燃料分加烧结试验工艺流程图如图1所示，常规烧结中焦粉一次性由人工混匀再制粒，而燃料分加烧结中一部分焦粉由人工完成一次混匀，剩余焦粉在圆筒混合机中完成二次混匀(制粒)，制粒时间均为5 min。制粒后烧结混合料的烧结操作参数如表5所示。烧结指标包括烧结速度、成品率、转鼓强度、利用系数、固体燃耗，计算方法见相关文献[13]。烧结矿的矿相结构借助Leica DMI4500P型光学显微镜，进行矿相鉴定和显微结构分析。

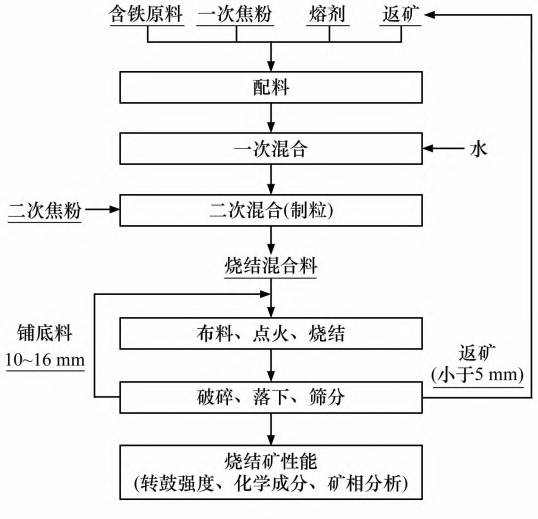


图1 燃料分加烧结试验流程

Fig. 1 Sintering test process of fuel divided addition

表5 烧结试验的基本操作参数

Table 5 Basic operating parameters of sintering test

烧结料层高度/mm	铺底料厚度/mm	点火温度/℃	点火时间/min	点火后保温/min	点火负压/kPa	烧结负压/kPa
700	30	1 050±50	1.5	1.5	5	12

2 结果与讨论

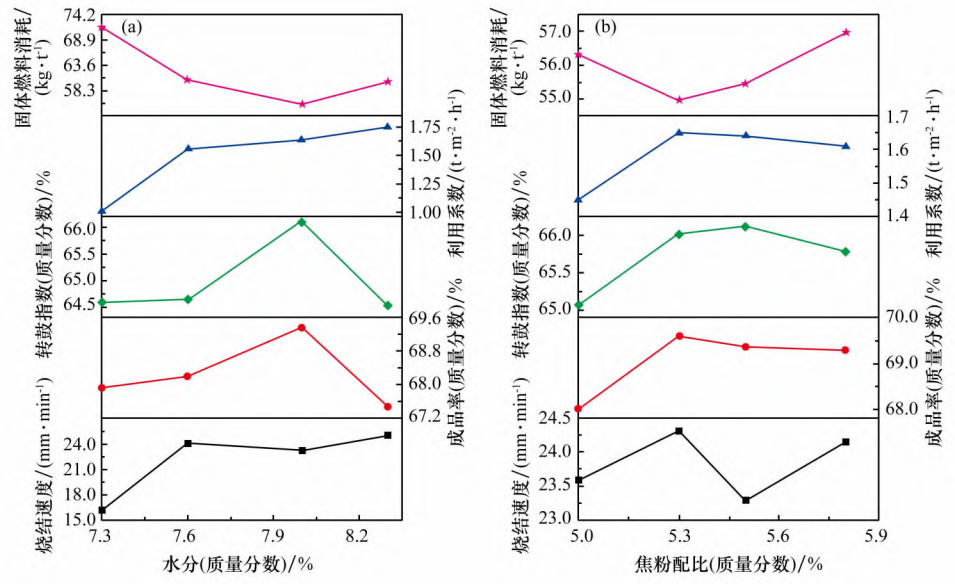
2.1 常规烧结工艺参数优化

试验首先开展了细粒铁精矿的常规烧结试验，分别研究了制粒水分和焦粉配比对烧结指标的影响，结果如图2所示。

由图2(a)可知，随着制粒水分的增加，因细精矿混合料的制粒效果改善，使得烧结速度显著提升，同时烧结矿的成品率与转鼓强度先升高后降低，利用系数持续提高，固体燃料消耗则是先降低后有所回升，主要是由于制粒水分的增加强化了烧结过程的气-固传热效率。综合对比，适宜的制粒水分为8.0%。

由图2(a)可知，当焦粉配比由5.5%增加至5.9%时，所有烧结指标有所恶化，反而将焦粉配比降低至5.3%时，烧结矿的成品率与利用系数提升，分别为69.60%，1.65 t/(m²·h)，固体燃料消耗处于最低值(54.95 kg/t)。综合对比，适宜的焦粉配比为5.3%。

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



(a) 焦粉配比为 5.5%；(b) 混合料水分为 8.0% 左右

图 2　混合料水分和焦粉配比对烧结指标的影响

Fig. 2　Effects of mixture moisture and coke powder ratio on sintering indexes

2.2　燃料分加强化细粒铁精矿烧结

基于焦粉配比为 5.3%，保持焦粉原始粒度不变，采用固体燃料分加技术强化细粒精矿烧结，提升烧结产、质量。将一次焦粉与二次焦粉的配比由 100%∶0逐步调整至 0∶100%，考察其对烧结指标的影响，结果如图 3 所示。

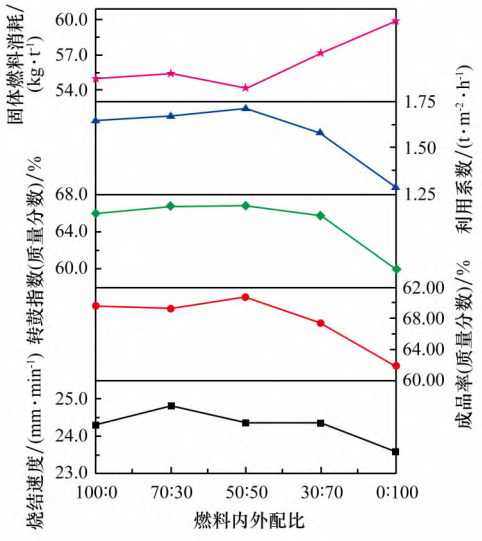


图 3　燃料外配对烧结指标的影响

Fig. 3　Effect of fuel divided addition on sintering indexes

由图 3 可知，随着二次焦粉配比由 0 提升至 50%，烧结矿的成品率、转鼓强度及利用系数进一步提升，分别达到 70.77%、66.80%、1.71 t/(m²·h)，固体燃耗降低至 54.17 kg/t。然而，随着二次焦粉配比继续增大，烧结指标大幅下降。这主要是因外配焦粉过高时，焦粉全都裹附于制粒小球表面，在烧结过程中焦粉与气流中氧气充分接触，燃烧速率过快，从而导致传热前沿与燃烧前沿差距增大，导致料层最高温度较低，影响烧结成矿。因此，适宜的一次焦粉与二次焦粉配比应控制在 50%∶50% 以内。

因焦粉中小于 0.5 mm 粒级质量分数高达 51.85%，考虑到焦粉外配时，细粒级焦粉相对于粗粒级更易被气流带走，更易燃烧，从而对燃料分加烧结产生不利影响。因此，在燃料内外配比为 50%∶ 50% 的前提下，降低小于 0.5 mm 粒级质量分数并以大于 0.5 mm 粒级补充，考察其对烧结指标的影响，结果如图 4 所示。

由图 4 可知，随着焦粉中小于 0.5 mm 粒级质量分数的提高，烧结速度在其质量分数为 30% 时达到最高值，烧结矿成品率和利用系数在其质量分数为 40% 时最高，转鼓强度在其质量分数为 50% 时最高，固体燃料消耗在其质量分数 50% 时最低。总体而言，全部烧结指标随小于 0.5 mm 粒级质量分数的提升有所改善，其适宜的小于 0.5 mm 粒级质量分数为 40% ~50%，其原因是基于燃料分加，降低小于0.5 mm 粒级质量分数，使得二次焦粉中粗颗粒增多，其疏水特性导致在混合

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

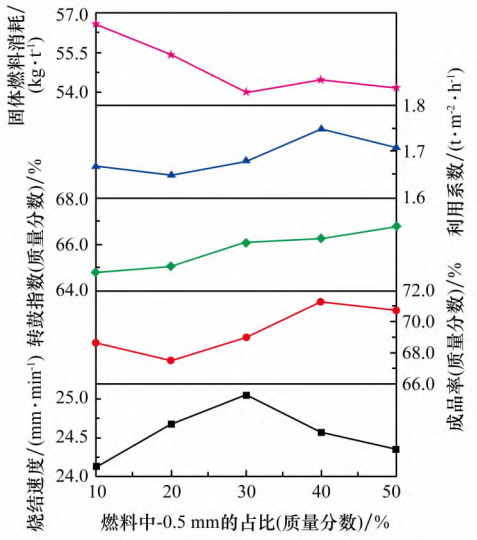


图 4 小于 0.5 mm 粒级占比对烧结指标的影响

Fig. 4 Effect of the content with less than 0.5 mm particle size on sintering indexes

料中以单一焦粉赋存状态存在的颗粒增多，会在烧结中独自燃烧，释放的化学热与气流发生对流传热并随烟气向下传递，而辐射给附近铁矿颗粒的热量减少，导致燃烧带热量减少，温度降低，不利于局部混合料的烧结成矿。

2.3 燃料分加强化效果分析

本文为进一步考察固体燃料分加技术对烧结的积极作用，选取 1#(常规烧结)、2#(一次焦粉:二次焦粉=50%:50%，焦粉小于 0.5 mm 质量分数为 50%)、3#(一次焦粉:二次焦粉=50%:50%，焦粉小于 0.5 mm 质量分数为 30%)烧结试验下，对比分析其烧结指标、烧结矿主要化学成分、矿物组成及微观结构的变化。

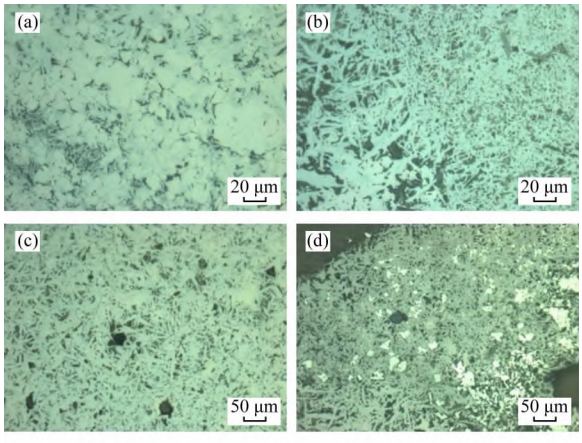
烧结指标及烧结矿主要化学成分如表 6 所示。由表 6 可知，2#烧结矿的转鼓指数与利用系数比 1#烧结矿分别提高 1.16%、3.64%，固体燃料消耗降低 1.42%，因此相对常规烧结，固体燃料分加对细粒铁精矿烧结指标起到强化作用，只是效果不够显著。这也表明通过控制一次焦粉与二次焦粉配比与调整焦粉小于 0.5 mm 粒级质量分数等措施，燃料分加有利于铁精矿烧结提质降耗，但需深度耦合燃料粒度优化、熔剂分加等有效手段来增强效果。此外，因烧结混合料配矿方案相同，3 种烧结矿的主要化学组成基本相同。其中，焦粉小于 0.5 mm 质量分数为 30% 时，烧结矿的 FeO 质量分数略有提高，这主要是因为燃料粗颗粒质量分数提高，在局部出现了弱还原性气氛，阻碍了 FeO 的充分氧化。

表 6 烧结指标及烧结矿主要化学成分

Table 6 Sintering indexes and chemical composition of different finished sinter

烧结试验	成品率/%	转鼓指数/%	利用系数/($t \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	固体燃料消耗/($kg \cdot t^{-1}$)	烧结矿主要化学成分(质量分数)/%					
					TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3
1#	69.60	66.03	1.65	54.95	56.58	8.75	5.15	10.52	1.96	0.46
2#	70.77	66.80	1.71	54.17	56.25	8.74	5.28	10.67	1.97	0.41
3#	69.02	66.10	1.68	54.01	55.66	8.86	5.22	10.80	1.95	0.40

3 种烧结矿的铁氧化物、铁酸钙黏结相及孔隙结构如图 5 所示。由图 5 可以看出：由于在常规烧结中焦粉被细粒铁精矿裹附，其燃烧释热产生高温状态，1#样品存在更多不规则、熔蚀状铁酸钙包裹磁铁矿，并与少量针状铁酸钙互联[图 5(a)]；适宜的燃料分加改善了料层热状态，有利于烧结成矿，使得 2#样品出现结晶形态良好的针、条状铁酸钙，与磁铁矿相互交织，同时孔隙中嵌布着少量的硅酸盐液相，提高了烧结矿的整体结构强度[图 5(b)、5(c)]；3#样品的微观构造变差，以细小针状铁酸钙连接磁铁矿、次生赤铁矿，孔隙较多[图 5(d)]。



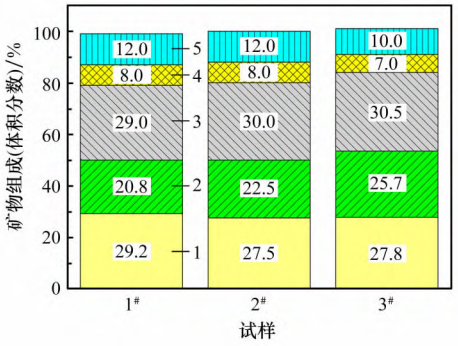
(a) 1#样品；(b) 2#样品；(c) 2#样品；(d) 3#样品

图 5 烧结矿的代表性微观结构

Fig. 5 Representative microstructure of finished sinter

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

基于多点的微观结构照片，以色差统计分析烧结矿主要矿物的体积分数，如图 6 所示。由图 6 可以看出，各样品主要矿物均为铁酸钙、赤铁矿、磁铁矿、硅酸盐和玻璃相，与普通烧结矿比较，采用燃料分加获得烧结矿的铁酸钙体积分数增加，赤铁矿、磁铁矿和硅酸盐的总体积分数减少。



1—磁铁矿；2—赤铁矿；3—铁酸钙；
4—硅酸二钙；5—玻璃相。

图 6　烧结矿的主要矿物组成

Fig. 6　Main mineral composition of finished sinter

3　结　论

(1) 细粒铁精矿烧结所用焦粉小于 0.5 mm 粒级质量分数达 51.85%，粒度偏细，在制粒水分为 8.0%、焦粉配比为 5.3% 的优化条件下，烧结矿的成品率、转鼓强度、利用系数和固体燃料消耗分别为 69.60%、66.03%、1.65 t/(m^2·h) 和 54.95 kg/t。

(2) 适宜的燃料分加可强化细粒铁精矿烧结，提高烧结矿产、质量指标。当二次焦粉配比为 50% 时，烧结矿的成品率、转鼓强度、利用系数分别为 70.77%、66.80%、1.71 t/(m^2·h)，相对常规烧结分别提升了 1.68%、1.16%、3.64%，固体燃料消耗为 54.17 kg/t，降低了 1.42%。

(3) 相对细粒铁精矿常规烧结，采用固体燃料分加技术，可改善烧结矿微观结构，提高结晶良好的针、条状铁酸钙体积分数，铁酸钙与磁铁矿相互交织，结构致密。

参考文献:

[1] 姜涛. 烧结球团生产技术手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社,2014.
JIANG Tao. Production technical manual of sintering and pelletizing [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.

[2] ZHONG Qiang, LIU Huibo, XU Liangping, et al. An efficient method for iron ore sintering with high-bed layer: double-layer sintering [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021. 28(11): 1366 – 1374.

[3] LI Guanghui, LIU Chen, YU Zhengwei, et al. Energy saving of composite agglomeration process (CAP) by optimized distribution of pelletized feed [J]. Energies, 2018, 11(9): 2382.

[4] 范晓慧,孟君,陈许玲,等. 铁矿烧结中铁酸钙形成的影响因素 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2008, 39(6): 1127 – 1130.
FAN Xiaohui, MENG Jun, CHEN Xuling, et al. Influence factors of calcium ferrite formation in iron ore sintering [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(6): 1127 – 1130.

[5] 吴胜利,韩宏亮,冯根生. 烧结固体燃料分加技术的研究 [C]//第七届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国技术学会,2009: 551 – 556.
WU Shengli, HAN Hongliang, FENG Gensheng. Research on solid fuel divided addition technology in sintering [C]//The 7th China Steel Annual Conference Proceedings. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2009: 551 – 556.

[6] 任志国,谢华,柳望洵,等. 燃料分加对混合料造小球团及烧结过程的影响 [J]. 钢铁研究学报,2000, 12(2): 1 – 5.
REN Zhiguo, XIE Hua, LIU Wangxun, et al. Influence of adding fuel separately on micropelletizing of sinter burden and sinter processing [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000, 12(2): 1 – 5.

[7] 张清岑,王隆谦. 关于燃料和熔剂分加的研究 [J]. 烧结球团,1980,5(1): 27 – 34.
ZHANG Qingcen, WANG Longqian. Research on the divided addition of fuel and flux [J]. Sintering and Pelletizing, 1980, 5(1): 27 – 34.

[8] 夏玉虹,杨绍利. 烧结燃料二次分加优化试验研究 [J]. 烧结球团,1998,23(4): 22 – 25.
XIA Yuhong, YANG Shaoli. Research for optimization of divided fuel addition [J]. Sintering and Pelletizing, 1998, 23(4): 22 – 25.

[9] 李强. 烧结细粒燃料分加技术研究 [J]. 烧结球团, 2012,37(2): 9 – 12.

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

LI Qiang. Study on separate adding technology of fine grained fuels in sintering process [J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(2):9 – 12.

[10] 闫小卫. 烧结燃料分加工艺优化试验研究 [J]. 山东冶金,2017,39(3):23 – 25.
YAN Xiaowei. Experimental study on separated addition process optimization of sintering fuel [J]. Shandong Metallurgy,2017,39(3):23 – 25.

[11] 冯根生,吴胜利,赵佐军. 改善厚料层烧结热态透气性的研究 [J]. 烧结球团,2011,36(1):1 – 5.
FENG Gensheng,WU Shengli,ZHAO Zuojun. Research on improving hot permeability of deep bed sintering [J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(1):1 – 5.

[12] 薛方,熊军,石江山,等. 湿熄焦的分加对烧结生产的影响研究 [J]. 烧结球团,2019,44(2):9 – 12.
XUE Fang,XIONG Jun,SHI Jiangshan,et al. Study on effect of separate addition of wet quenched on sintering production [J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(2):9 – 12.

[13] LI Guanghui,LIU Chen,RAO Mingjun,et al. Behavior of SO_2 in the process of flue gas circulation sintering (FGCS) of iron ores [J]. ISIJ International,2014,54(1):37 – 42.

(上接第26页)

[15] 叶恒棣,周浩宇,王业峰,等. 分层供热富氢烧结关键技术探索与研究 [J]. 钢铁,2021,56(12):134 – 141.
YE Hengdi, ZHOU Haoyu, WANG Yefeng, et al. Exploration and research on key technologies of multi-layer heat supplying and H_2-rich sintering [J]. Iron and Steel,2021,56(12):134 – 141.

[16] 叶恒棣,周浩宇,王兆才,等. 高配比富氢燃料烧结技术研究及展望 [J]. 烧结球团,2020,45(5):1 – 7.
YE Hengdi, ZHOU Haoyu, WANG Zhaocai, et al. Research and prospect of high proportion hydrogen-rich fuel sintering technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2020,45(5):1 – 7.

[17] 李威,谭炳富,栗克建,等. 钢铁厂含锌固废资源循环利用研究现状及发展态势 [J]. 有色冶金节能,2021,37(1):8 – 12.
LI Wei,TAN Bingfu,LI Kejian,et al. Research status and development trend of zinc-containing solid waste recycling in iron and steel plants [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy,2021,37(1):8 – 12.

[18] HAN J,HUANG Z,QIN L,et al. Refused derived fuel from municipal solid waste used as an alternative fuel during the iron ore sinter process [J]. Journal of Cleaner Production,2021,278:1 – 8.

[19] GAN M,FAN X,JI Z,et al. Application of biomass fuel in iron ore sintering: influencing mechanism and emission reduction [J]. Ironmaking & Steelmaking,2015,42(1):27 – 33.

[20] GHOULEH Z,SHAO Y. Turning municipal solid waste incineration into a cleaner cement production [J]. Journal of Cleaner Production,2018,195:268 – 279.

[21] YAN D,PENG Z,YU L,et al. Characterization of heavy metals and PCDD/Fs from water-washing pretreatment and a cement kiln co-processing municipal solid waste incinerator fly ash [J]. Waste Management,2018,76:106 – 116.

(上接第62页)

[11] NERI F,TIRRONEN V. Recent advances in differential evolution: a survey and experimental analysis [J]. Artificial intelligence review,2010,33(1):61 – 106.

[12] STORN R,PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal global optimization,1997,11(4):341 – 359.

[13] 葛延峰,金文静,高立群,等. 多种群并行的自适应差分进化算法 [J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(4):481 – 483.
GE Yanfeng,JIN Wenjing,GAO Liqun,et al Multi population parallel adaptive differential evolution algorithm [J]. Journal of Northeast University,Natural Science Edition,2011,32(4):481 – 483.

[14] 郑威迪,李志刚,贾涵中,等. 基于改进型鲸鱼优化算法和最小二乘支持向量机的炼钢终点预测模型研究 [J]. 电子学报,2019,47(3):700 – 706.
ZHENG Weidi, LI Zhigang, JIA Hanzhong, et al. Research on steelmaking end point prediction model based on improved whale optimization algorithm and least squares support vector machine [J]. Acta electronica Sinica,2019,47(3):700 – 706.

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