返矿影响烧结过程的机理研究

王永红[1]，杜 屏[1]，邸 航[1]，冯根生[2]
(1. 江苏沙钢钢铁研究院，江苏 张家港 215625；2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083)

摘要： 为研究烧结返矿中大粒级占比对烧结生产指标的影响，通过化学分析、XRD分析、热重分析等对烧结返矿的各项理化性能进行了分析研究，并利用微型烧结实验装置及烧结杯模拟实验就返矿中+5 mm粒级占比对烧结指标的影响进行了实验研究。结果表明：返矿中不同粒级的成分存在较大差异；随着返矿粒级的增大，其矿物物相中磁铁矿和铁酸钙的量增加；返矿粒级越大，其同化温度、熔化温度越高，返矿粒级越小，越有利于液相生成；当返矿+5 mm的占比超过25%时，混合料制粒效果变差，同时其烧结成品率、转鼓强度均下降，固体燃耗升高，烧结矿成品粒级组成中5～10 mm的粒级占比上升。因此，在烧结生产配料过程中需控制返矿中+5 mm的粒级占比低于25%。

关键词： 烧结；返矿；基础性能；粒级；指标
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)03－0028－05
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.03.035

Research on mechanism of return fines affecting sintering process

WANG Yonghong[1], DU Ping[1], DI Hang[1], FENG Gensheng[2]
(1. *Institute of Research of Iron and Steel, Zhangjiagang* 215625, *Jiangsu, China*; 2. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science & Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to research the influence of the proportion of large particle size fraction in sintering return fines on the index of sintering production, the physical and chemical properties of sintering return fines are analyzed by chemical analysis, XRD analysis, thermogravimetric analysis, etc. The influence of the proportion of +5 mm particle size fraction on sintering index is studied by using micro sintering experimental device and sintering cup simulation experiment. The results show that, the composition of different particle sizes in the return fines is also quite different; as the particle size of the return fines increases, the amount of magnetite and calcium ferrite in the mineral phase increases. The larger the particle size of return fines is, the higher the assimilation temperature and melting temperature are, and as the particle size of return fines gets smaller, it becomes more conducive to the formation of liquid phase. When the proportion of return fines +5 mm is more than 25%, the granulation effect of the mixture becomes worse, the sintering yield and drum strength decrease, the solid fuel consumption increases, and the proportion of 5～10 mm in the particle size composition of sinter products also increases. Therefore, it is necessary to control the proportion of +5 mm in the return fines less than 25% in the sintering production proportioning process.

Key words: sintering; return fines; basic properties; particle size; index

烧结返矿是成品烧结矿经破碎筛分后粒级－5 mm的颗粒，但由于设备检修、老化等原因，其中往往有大量+5 mm的颗粒存在。当返矿重回烧结生产时，其部分理化性能接近于烧结矿，属于熟矿，在烧结过程中易于产生液相，配加后可以降低烧结固体燃耗。当前各企业返矿配加量在20%左右，低的控制在15%左右[1]，相关的研究表明最佳的配比为30%[2]。返矿的配加可以减少新矿的使用量，也有利于提高烧结过程的效率[3-4]。尹桂先等[5]利用生

收稿日期： 2020－04－30；**修回日期：** 2021－03－26
作者简介： 王永红(1980—)，男，硕士研究生，从事铁矿石烧结技术研究工作。

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

产现场的原料条件，研究了返矿配加量与产、质量的对应情况，结果表明：当返矿配加比例超过 30% 后，转鼓指数和成品率均降低。贾占民等[8]生产实践表明：返矿率高，烧结矿产、质量均下降；当返矿率下降 2% 时，燃耗下降 1.7 kg/t，成品率提高 2.0%。孙艳红等[7-9]通过对返矿理化性能的研究发现，返矿中大粒级增加，会影响混匀料的制粒，同时在烧结过程中大颗粒返矿高温保持时间短，不利于液相的产生和黏结，影响烧结矿强度。为了解释返矿影响烧结过程指标的机理，本文将返矿分级筛分处理后进行冶金性能和物化性能的测试分析，同时进行烧结杯试验，以期为配加返矿烧结提供理论指导。

1　原料与方法

1.1　实验原料

实验所用返矿及其他混匀矿、辅料均来源于某钢铁公司 360 m^2 烧结机，熔剂生石灰为化学纯试剂。返矿主要化学成分见表 1。

表 1　返矿主要化学成分(质量分数)

Table 1　The chemical composition of return fines %

TFe	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3
56.54	9.98	1.68	5.45	1.80

1.2　实验方法

实验首先将返矿按照 5、3、1 mm 筛网进行筛分并测试粒级组成；其次测试各筛分粒级返矿的化学成分；再次对不同粒级返矿进行 XRD 测试其矿物组成；接着利用 STA 热重分析仪分析不同粒级返矿的热分解温度，实验中每次称取返矿(35 ± 0.1) mg，在空气中从室温以升温速率 20 ℃/min 加热至 1 300 ℃；然后利用微型烧结装置测试 −1、1 ~ 3、3 ~ 5、+5 mm 4 个粒级返矿的同化温度及熔化温度；最后利用烧结杯实验测试返矿大粒级占比对烧结指标的影响，烧结杯实验参数：∅300 mm × 700 mm，点火负压为 −7 kPa，烧结负压为 −14 kPa，点火温度为 1 050 ℃，烧结矿 R 为 1.90 ± 0.08，w(MgO) 为 (1.65 ± 0.05) %。

2　结果与分析

2.1　返矿的理化基础性能

2.1.1　粒级分布

对所用返矿进行粒级组成测定，结果见表 2。由表 2 可知：返矿中 +5 mm 的粒级占比偏高，而 −3 mm 的粒级较少，说明烧结成品矿在筛分时筛网粒径过大，应加强筛分管理。

表 2　烧结返矿的粒级分布(质量分数)

Table 2　The particle size distribution of return fine %

+5 mm	5 ~ 3 mm	3 ~ 1 mm	−1 mm
38.98	28.87	20.55	11.60

此外，随着返矿中 +5 mm 占比的增加，在其它原料条件不变的情况下，会引起混匀矿平均粒径增大，从而使烧结料层透气性过好，烧结高温保持时间缩短，直接使台车表层料烧不透，返矿量增加，最终使成品率降低[8]。

2.1.2　化学成分

对不同粒级的返矿进行主要化学成分检测分析，结果如表 3 所示。由表 3 可知：随着返矿粒级的增大，w(TFe) 增加、w(SiO_2) 降低；在配料时如果不注意控制返矿粒级组成，会造成烧结混合料化学成分的不稳定，导致熔剂配比的频繁调整，影响碱度的稳定性。

表 3　不同粒级返矿的主要化学成分(质量分数)

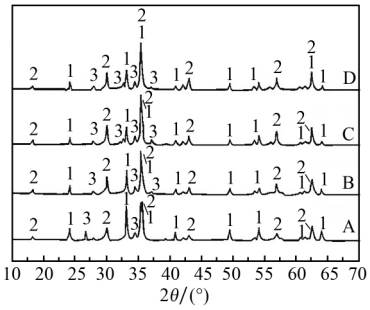
Table 3　The chemical composition of return fines of different grain size %

粒级/mm	TFe	FeO	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3
−1	55.43	8.38	9.65	1.75	5.58	1.78
1 ~ 3	55.62	9.15	10.06	1.86	5.21	1.88
3 ~ 5	56.03	9.98	10.09	1.84	5.19	1.76
+5	56.37	10.01	9.87	1.73	5.01	1.79

2.1.3　矿物物相组成

为考察返矿中矿物的组成，对不同粒级返矿进行 XRD 测试，其结果如图 1 所示。由图 1 可知：返矿中所含矿物主要为赤铁矿、磁铁矿以及铁酸钙。随着返矿粒级的增大，矿物相中磁铁矿和铁酸钙衍射峰增强，说明该种矿物数量增加。

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



返矿粒级/mm：A—－1；B—1～3；C—3～5；D—＋5；
1—赤铁矿；2—磁铁矿；3—铁酸钙。

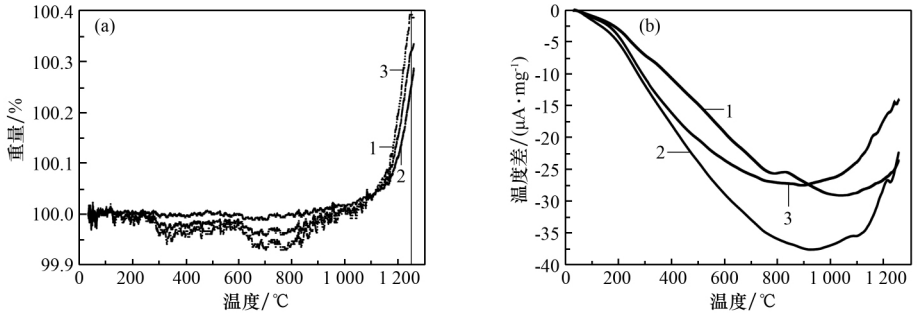
图1 不同粒级返矿 XRD 分析结果

Fig. 1 The XRD analysis results of different particle size return fines

2.1.4 热重分析

为分析不同粒级返矿在受热过程中所发生的反应，固定试样质量为35 mg，进行热重分析实验，结果见图2。

由图2可看出：3种粒级的返矿开始分解放热温度分别在800～900 ℃、940～1 000 ℃、950～1 050 ℃之间；3个粒级的返矿在1 250 ℃附近均发生了质量的变化，表明此处可能有分解吸热过程，此时发生的反应可能是 Fe_2O_3 分解或 Fe_3O_4 与 SiO_2 化合生成硅酸铁的失氧过程[10]。



(a) 热重分析(TG)；(b) 差热分析(DTA)

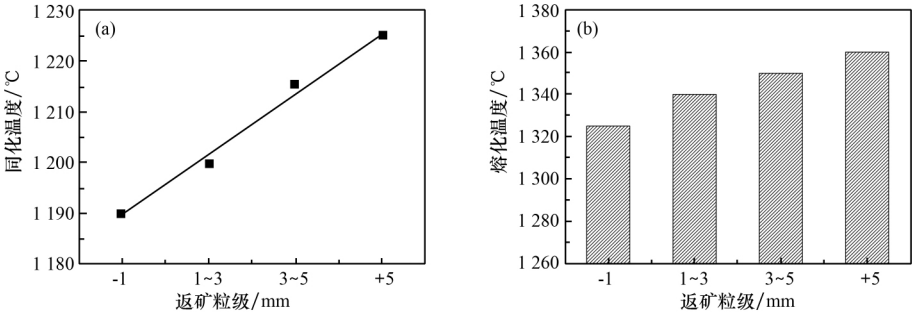
粒级/mm：1—0～1；2—1～3；3—3～5。

图2 不同粒级返矿的热重分析结果

Fig. 2 The results of STA thermal analysis of return fines with different particle sizes

2.2 返矿的高温冶金性能

返矿经过高温烧结，其中必然存在低熔点的化合物，同时由于粒级的影响，比表面积存在差异，其与熔剂形成液相的能力也会不同。图3为各粒级返矿与生石灰的反应温度(参照文献[11]中同化温度测试方法进行测试)及单独进行焙烧时的温度(熔化温度)。



(a) 同化温度；(b) 熔化温度

图3 不同粒级返矿的同化温度与熔化温度

Fig. 3 The results of high temperature metallurgical properties of different size return fines

由图3(a)可知：返矿粒级与同化温度呈线性正相关关系。－1 mm的返矿与熔剂生石灰开始生成液相的温度为1 190 ℃，有利于降低烧结过程初生液相的温度；其它粒级的返矿同化温度在1 200～1 250 ℃，与固相反应产生低熔点化合物的熔点相当，有利于液相的产生和发展。

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

此外，由图 3(b) 可知：在不配加熔剂的条件下，返矿自身生成液相的温度均超过 1 320 ℃，表明返矿独自生成液相需要较高的温度，即在其周围没有有效熔剂时难以生成液相。当混合料中返矿配比过高时，由于其本身含氧化钙较高，会导致熔剂量减少，从而使得含铁物料能够接触到的有效熔剂量减少，其将导致含铁原料液相生成能力减弱，最终影响烧结矿的强度、粒级等指标。

2.3　不同粒级返矿对烧结指标的影响

2.3.1　不同粒级返矿对制粒效果的影响

以 0.5 kg 不同粒级的返矿作为核粒子，用 1.8 kg 粒级为 -1 mm 的富矿粉作为黏附粒子进行制粒实验，结果如图 4 所示。从图 4 可看出：1 ~ 5 mm 粒级制粒后黏附量较多，而 +5 mm 粒级黏附量较少。这是因为随着返矿粒级的增大，在同质量条件下，粒级越大，与黏附粉的接触面积就越小，因此粘附量越少，其相似结果在文献[10,12]中也得到了验证。

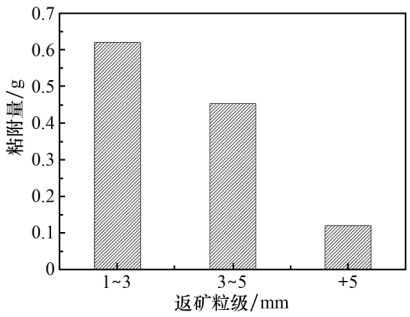


图 4　不同粒级返矿的制粒效果

Fig. 4　The granulating effect of different grain size return fines

2.3.2　对混合料粒级组成的影响

对配加不同返矿质量分数的混合料制粒后取 1 kg 进行粒级测试，结果如表 4 所示。由表 4 可知：当返矿中 +5 mm 质量分数超过 25% 时，混合料粒级组成有降低趋势。随着返矿中 +5 mm 粒级的增加，混合料中 +3 mm 的粒级减少，而小粒级尤其是 -1 mm 的量明显增加。因此可认为当返矿 +5 mm 的质量分数超过 25% 时，混合料制粒效果会变差。

表 4　返矿 +5 mm 对烧结混合料粒级分布的影响(质量分数)

Table 4　The influence of composition of +5 mm on sintering mixture　%

返矿 +5 mm	+10 mm	10 ~ 8 mm	8 ~ 6 mm	6 ~ 5 mm	5 ~ 3 mm	3 ~ 1 mm	-1 mm	-3 mm
10	7.01	12.87	28.87	12.9	26.48	8.98	2.89	88.13
25	8.25	14.06	23.82	15.31	21.57	9.91	7.08	83.01
40	9.88	15.32	19.56	15.79	18.01	12.11	9.33	78.56

2.3.3　返矿中 +5 mm 质量分数对烧结指标的影响

表 5 为返矿中 +5 mm 占比对烧结指标的影响。由表 5 可知：当返矿 +5 mm 质量分数为 10% ~ 25% 时，垂直烧结速度变化不大，烧结各项指标处于较好水平；当 +5 mm 返矿占比提高至 40% 时，垂直烧结速度有所降低，这与大粒级返矿配加过多，降低了混合料粒级组成有关；与返矿 +5 mm 比例为 10% ~ 25% 时烧结矿质量指标相比较，+5 mm 返矿占比为 25% 和 40%，较 10% ~ 25% 时，烧结矿转鼓强度分别降低 2.0% 和 3.34%，成品率指标分别降低 2.35% 和 3.27%，而 5 ~ 10 mm 占比和烧结固体燃料消耗有较大幅度的升高。

表 5　返矿 +5 mm 对烧结指标的影响

Table 5　The influence of the proportion of return fines of 5 mm on the sintering index

质量分数/%				固体燃料消耗
返矿中粒级 +5 mm	烧结成品 5 ~ 10 mm	成品率/%	转鼓强度/%	/(kg·t^{-1})
10	21.0	79.0	67.0	56.3
25	23.6	76.0	65.6	58.2
40	26.4	72.4	64.9	61.3

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

3 结 论

(1) 返矿粒级越大，w(TFe)越高，w(SiO_2)越低；随着返矿粒级的增大，磁铁矿和铁酸钙数量明显增加；且同化温度、熔化温度均升高；返矿粒级越小，越利于液相的生成。

(2) 当返矿 +5 mm 的比例超过 25% 时，不利于改善混合料制粒效果，同时烧结成品率、转鼓强度均下降，固体燃料消耗升高；烧结矿成品粒级组成中 5 ~ 10 mm 占比也上升。

(3) 在烧结生产配料过程中需控制返矿中 +5 mm 占比小于 25%。

参考文献:

[1] 全国烧结球团信息网. 2018—2019 年度全国烧结球团厂技术经济指标汇编[G]. 长沙《烧结球团》编辑部,2018 - 2019.
National Sintering and Pelletizing Information Network. Compilation of technical and economic indicators of national sintering and pelletizing plants in 2018—2019 [G]. Changsha: Sintering and Pelletizing Editorial Department, 2018 - 2019.

[2] MRóZ Jan, SKOWRONEK Ryszard, FRANCIK Przemysaw, 等. 返矿对烧结过程和烧结矿质量影响的研究[J]. 世界钢铁,2012,12(1):8 - 10;37.
JAN Mróz, RYSZARD Skowronek, PRZEMYSAW Francik, et al. Investigations on the influence of return sinter fines on the irons sintering process and on the properties of iron ore sinter [J]. World Iron & Steel,2012,12(01):8 - 10;37.

[3] 傅菊英,姜涛,朱德庆. 烧结球团学[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1996.
FU Juying, JIANG Tao, ZHU Deqing. Sintering and pelletizing-theory [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1996.

[4] 张波. 改善 900 mm 厚料层烧结透气性的措施[J]. 烧结球团,2014,39(1):15 - 20.
ZHANG Bo. Measures for improving 900 mm deepbed sintering permeability [J]. Sintering and Pelletizing, 2014, 39(1): 15 - 20.

[5] 尹桂先,汪华斌. 烧结返矿控制的研究与实践[J]. 武钢技术,1998,36(11):8 - 11.
YIN Guixian, WANG Huabin. Research and practice of sinter return control [J]. WISCO Technology, 1998, 36(11): 8 - 11.

[6] 贾占民,贺宝军. 烧结降低返矿率的技术措施[J]. 冶金与材料,2019,39(5):108 - 109.
JIA Zhanmin, HE Baojun. Technical measures for reducing return rate of sintering [J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(5): 108 - 109.

[7] 孙艳红. 烧结返矿产生机理分析及控制途径探究[J]. 世界有色金属,2016(13):147 - 148.
SUN Yanhong. Sintering mineral vitality theory analysis and the control way to explore [J]. World Nonferrous Metals, 2016(13): 147 - 148.

[8] WU S L, ZHU J, FANJ X, et al. Sintering behavior of return fines and their effective utilization method [J]. ISIJ International, 2013, 53(9): 1561 - 1570.

[9] YAMAGUCHI Y, KAMIJO C, MATSUMURA M, et al. Improvement of permeability of sintering bed by adding dry particles to granulated raw materials [J]. ISIJ International, 2013, 53(9): 889 - 895.

[10] 康旭,史先菊,李军. 返矿的物化特性及其对烧结过程的影响研究[J]. 烧结球团,2014,39(2):5 - 8.
KANG Xu, SHI Xianju, LI Jun. Study on physicochemical properties of return fines and their influence on sintering process [J]. Sintering and Pelletizing, 2014, 39(2): 5 - 8.

[11] 吴胜利,刘宇,杜建新,等. 铁矿粉与 CaO 同化能力的实验研究[J]. 北京科技大学学报,2002,24(3):258 - 261.
WU Shengli, LIU Yu, DU Jianxin, et al. Experimental study on assimilation of iron ores [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002, 24(3): 258 - 261.

[12] 王喆,安钢,刘伯洋,等. 烧结返矿粒级分布对烧结矿质量影响研究[J]. 烧结球团,2017,42(4):6 - 9;34.
WANG Zhe, AN Gang, LIU Boyang, et al. Study on Influence of ReturnsSize Distribution onSinter Quality [J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(4): 6 - 9; 34.

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