500 m^2 烧结机强化混匀技术研究与应用

刘周利[1]，张 娜[1]，梁海全[2]，何晓义[1]，张国成[3]
（1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司，内蒙古 包头 014010；2. 内蒙古包钢稀土钢板材有限责任公司，内蒙古 包头 014010；3. 包头师范学院 化学学院，内蒙古 包头 014030）

摘要：针对实际生产中，当混合机填充率无法达到设计水平以及混合料中配加难制粒物料时而导致的混匀制粒效果不理想，烧结矿转鼓指数差的问题，本文在 500 m^2 烧结机工艺中配加 20% FMG 粉矿的条件下，结合弗鲁德准数计算，对烧结机混料系统工艺进行了研究。结果表明，当一次混合机的设计转速低于合理转速（6.94 r/min）时，烧结混料系统混匀制粒效果较差，通过采取将一次混合机加水比例由 80% 降低至 75% 并后延加水位置 3 m 的技术措施，增强了一次混合机混合料的混匀水平，使混合料制粒效果由 39.12% 提高至 48.98%，解决了配加 20% 的 FMG 粉矿之后出现的烧结混合料黏结团聚、制粒效果差的问题，消除了烧结矿断面不均匀现象，最终使得烧结矿转鼓指数由 76.14% 提高至 78.44%。

关键词：烧结；混合机；混匀制粒；加水量；加水位置
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2024）03－0033－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.038

Research and application of enhanced mixing technology of 500 m^2 sintering machine

LIU Zhouli[1], ZHANG Na[1], LIANG Haiquan[2], HE Xiaoyi[1], ZHANG Guocheng[3]
（1. Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Rare Earth Steel Plate Co., Ltd., of Baotou Steel (Group) Corp, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 3. Department of Chemistry, Baotou Teachers' College, Baotou 014030, Inner Mongolia, China）

Abstract: In view of the problems, that is, unsatisfactory mixing & granulation effect and poor sinter drum index caused by the mixing rate of the mixer cannot reach the design level and the difficult granulation materials are mixed in the compound in actual production, under the condition of adding 20% FMG fine ore to the 500 m^2 sintering machine process, combined with the Frouder criterion calculation, the process of the sintering machine compound system is studied. The results show that, when the design speed of the primary mixer is lower than the reasonable speed of 6.94 r/min, the mixing and granulating effect of the sintering compound system is poor. By taking such technical measures to reduce the proportion of water added to the primary mixer from 80% to 75%, and the position where it added water is extended by three meters from the original position, the mixing level of the compound of the primary mixer is enhanced, and the granulation effect of the compound is increased from 39.12% to 48.98%, the problems of bonding and agglomeration of the sintering compound and poor granulation effect are resolved after adding 20% FMG fines, the uneven cross-section of the sinter is eliminated, and the sinter drum index is increased from 76.14% to 78.44% finally.

Key words: sintering; mixer; mixing and granulating; water added; water addition location

收稿日期：2023－05－25；**修回日期**：2023－08－13
作者简介：刘周利（1984—），男，硕士，高级工程师，从事烧结工艺研究及管理工作。
通信作者：张国成（1986—），男，博士，讲师，从事烧结球团新技术方面的研究工作。

烧结生产的本质是混合料部分熔融产生液相并黏结未熔矿物而形成烧结矿的过程，烧结矿结构在微观上是非均质的，但在宏观上却希望其成分和性能是均匀的，其非均质性主要源于烧结物料混匀不够充分，而粘性物料的混匀会直接影响到制粒效果，尤其是烧结配加 FMG 粉以后，该粉矿属于褐铁矿，疏松多孔，在混匀过程中易产生吸液性，即水分首先进入粉矿的孔隙，待孔隙全部被水充满，在一次混合机中充满水的粉矿与消化后的生石灰未充分摔碎混匀就出现黏结现象，使得一次混合机中出现了较多的团聚物料，从而影响了二次混合和三次混合机的制粒效果以及烧结风量的均匀分布，最终导致烧结矿液相呈现明显的不均匀性，烧结机机尾烧结矿断面出现“花脸”现象；且由于 FMG 粉具有同化能力强、液相流动性好、有效黏结范围大等特性，其所含结晶水分解后会导致烧结矿中较多孔隙的形成，因此高配比褐铁矿烧结一般会出现烧结固体燃耗升高，烧结饼结构疏松，烧结矿转鼓指数下降的问题[1-4]。高为民等[5]通过试验分别分析了混合机填充率和转速对烧结混合料制粒效果的影响，结果表明，在圆筒混合机内存在滑动、滚动和泻落三种状态，且三种状态中靠近泻落区的制粒效果最好。何云华等[6]通过力学分析，得出了烧结一次混合的最佳状态应该位于泻落区靠近滚动区的范围内，制粒的最佳状态应该位于滚动区靠近泻落区的范围内。欧阳鸿武等[7]研究表明，在烧结机转速不变的前提下，混合料混匀效果随着填充率的增加而提高，在填充率不变的前提下，混匀效果随着转速的提高而增强。

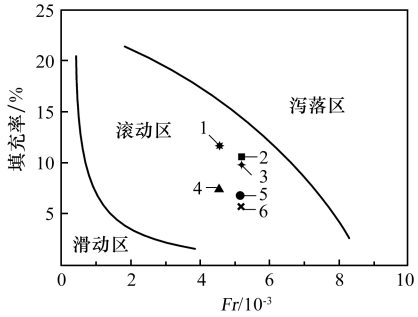
为了提升烧结机的产、质量，针对实际生产中，当混合机填充率低于设计值以及混合料中存在难制粒物料时而导致的混匀制粒效果不理想，烧结矿转鼓指数变差的问题，本文结合弗鲁德准数（*Fr*）计算，并以包钢 500 m^2 烧结机配加 20% FMG 粉矿（褐铁矿）的混合系统（由一、二、三次混合机组成）为例进行了整体的实践探索，实践经验以期为同行提供借鉴与参考。

1 圆筒混合机参数设计分析

500 m^2 烧结机在设计上采用三段圆筒混合制粒，一次混合的目的是混匀并加水润湿混合料，二次混合、三次混合的目的是制粒并调整混合料水分，三段混合的总时间为 8.1 min。一次混合、二次混合和三次混合设计参数见表 1。

根据相关研究成果[5-8]，圆筒混合机内物料的运动状态随填充率和 *Fr* 的不同而发生变化，500 m^2 烧结机三次混合机的工作状态见图 1。

图 1 中的三个区域分别表示：① 滑动区。混合料随圆筒上升，当被提升到一定高度，混合料全部或上面部分成片滑下，滑下后再被提升到一定高度又滑下；② 滚动区。混合料分成上、下两层，靠近圆筒壁的下层物料随圆筒向上运动，当



1—一次混合设计参数；2—二次混合设计参数；3—三次混合设计参数；4—一次混合生产参数；5—二次混合生产参数；6—三次混合生产参数。

图 1 *Fr*、填充率与物料运动状态的关系

Fig. 1 Relationship between *Fr*, filling rate and material motion state

表 1 一次混合、二次混合、三次混合设计参数

Table1 Design parameters of primary mixing, secondary mixing and tertiary mixing

混合机	内径/mm	长度/mm	转速/($r \cdot min^{-1}$)	倾角/(°)	通料量/($t \cdot h^{-1}$)	填充率/%	打水位置距入口距离/m	加水比例（质量分数）/%	$Fr/10^{-3}$
一次	4 400	15 000	6.0	2.5	1 078.0	12.83	3.0	80	4.49
二次	4 800	18 000	6.2	2.0	1 091.6	12.03	3.0	20	5.23
三次	4 800	18 000	6.2	2.0	1 097.5	12.10	—	0	5.23

注：加水比例为该混合机加水量占一次混合、二次混合、三次混合整体加水量之和的比例。

提升到一定高度后便脱离，转入上层后向下滚动；③ 泻落区。当转速较大时，物料达到最高点后被抛射，成抛物线运动，落在底部料层上的物料又以滚动状态运动。

由图 1 可以看出：在 500 m² 烧结机设计产能的条件下，一次混合机的混合效果点在滚动区距离泻落区稍远位置，二次混合、三次混合机的混合效果点则位于较理想的滚动区靠近泻落区的位置。在限产条件下，其产能为设计产能的 85%，在混合机转速和 Fr 一定的情况下，随着混合机通料量和填充率的下降，一次混合、二次混合和三次混合机的混合效果点均远离泻落区和滚动区的分界线向下移动，混合料的混匀和制粒效果也逐渐变差，结果见表 2。

由表 2 结合图 1 可以看出，随着填充率的下降，一次混合机混合效果点距离最佳值会越来越远，一次混合机填充率在 10%～15% 的范围内，可近似认为滚动区与泻落区的分界线为一条直线，若混合效果点落在此线上则认为混合机具有最优的运动状态，可以达到最佳的混匀与制粒效果，由图 1 可得此直线公式：

$$1.6\varphi + 5\times10^{3}Fr = 47 \quad (10\% < \varphi < 15\%) \tag{1}$$

混合机工艺参数：

$$Fr = \frac{Dn^{2}}{g} \tag{2}$$

$$\varphi = \frac{Q\cdot t}{0.471\gamma\cdot L\cdot D^{2}} \tag{3}$$

$$t = \frac{L}{\pi Dn\mathrm{tg}(\beta)} \tag{4}$$

式(1)～(4)中：g 为重力加速度，m/min²；D 为混合机有效直径，m；n 为筒体转速，r/min；Q 为混合机通料量，t/h；t 为混合时间，min；β 为混合机倾角，(°)；γ 为物料堆比重，t/m³；L 为混合机有效长度，m；φ 为混合机填充率，%。

将式(3)与(4)联立可得：

$$\varphi = \frac{Q}{0.471\gamma\pi nD^{3}\mathrm{tg}\ (\beta)} \tag{5}$$

将上式(2)和(5)代入式(1)可得滚动区与泻落区的分界曲线方程：

$$1.6\times\frac{Q}{0.471\gamma\pi nD^{3}\mathrm{tg}\ (\beta)} + 5\times10^{3}\times\frac{Dn^{2}}{g} = 47 \tag{6}$$

由式(6)可以计算出一次混合机物料在最优运动状态下的通料量与筒体转速的合理控制范围，结果见表 3。

由表 3 可以看出，当一次混合机的通料量为 100%，即为 1 078 t/h 时，其合理的转速应该控制在 6.39 r/min 及以上，而实际一次混合机的设计转速只有 6.0 r/min，明显偏小。对照图 1，其填充率和 Fr 的对应点应该控制在分界线附近的泻落区内，才有利于获得最佳的混匀效果。在限产条件下，当通料量降低为正常通料量的 80% 时，即为 862.4 t/h 的情况下，Fr 应该达到 6.01×10^{-3} 及以上，一次混合机最大设计转速约需达到 6.94 r/min 以上，才能获得良好的混合效果[9]。所以，在实际生产中由于一次混合机转速无法提升，导致混匀效果变差，在限产条件下混匀效果会进一步下降，不利于二次混合、三次混合机的制粒。

2　混合机参数优化及结果分析

2.1　加水位置优化

一次混合机长度为 15 m，加水管喷头分布于中部的长度为 12 m，喷射角度为 60°，加水喷头不等距排列 30 个。二次混合机长度为 18 m，加水段长度为15 m，不等距喷头排列28个，喷射角度

表 2　混合机不同通料量下一次混合、二次混合、三次混合机相关参数

Table 2　Related parameters of primary mixing, secondary mixing and tertiary mixing machine under different feeding amount of mixing machine

参数	一次混合			二次混合			三次混合		
通料量/%	100	90	80	100	90	80	100	90	80
填充率/%	12.83	11.55	10.26	12.03	10.83	9.62	12.10	10.89	9.68
设计转速/(r·min⁻¹)	6.00	6.00	6.00	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20
$Fr/\times10^{-3}$	4.49	4.49	4.49	5.23	5.23	5.23	5.23	5.23	5.23

表3 最优运动状态下一次混合机通料量与筒体转速取值

Table 3 The value of feeding amount and cylinder speed of primary mixer under optimal motion state

通料量/($t \cdot h^{-1}$)	转速/($r \cdot min^{-1}$)	填充率/%	$Fr/10^{-3}$
1 078.00	≥6.39	≥12.01	≥5.09
970.20	≥6.70	≥10.29	≥5.60
862.40	≥6.94	≥8.90	≥6.01

为60°。三次混合机加水段为4 m。通过理论计算及实践分析，混合机加水喷头间距为350 mm，一次混合机等距分布喷头22个，二次混合机等距分布喷头23个，且喷射角度提高至90 °。为了延长配合料混匀时间，将一次混合机加水喷头关掉8个。通过合理减少一次混合的加水长度，适当延长配合料的混匀长度，不影响混合工序总加水量的改进，一次混合机功能分配见表4，优化前、后制粒效果对比见表5。

表4 一次混合机功能分配

Table 4 Functional allocation of primary mixer

筒体长度/mm	混匀/mm	加水长度/mm	一次混合机加水配比/%
15 000	9 200	5 800	70~75

由表5可以看出，将二次混合机喷射角度由原来的60°优化为90°，使得喷射水流直接抛射于混合料回旋区，提高了加水效率，利于物料润湿，在一定程度上减少了混合机衬板粘料量。通过将一次混合机加水喷头由不等距改进为等距分布，喷头喷射范围界面基本覆盖，消除了喷头间距大喷射范围有间隙、喷头间距小喷射范围冲突现象，使混合料在混合机内回旋前进过程中接收水分稳定均匀，利于混合料的混匀及制粒。通过上述改进措施，制粒效果由10.46%提高至34.02%，混合料平均粒径提高0.65 mm。

2.2 加水量及加水比例优化

添加到混合料中的水量对混合料成球及透气性有很大影响，加水方式是提高制粒效果的重要措施之一[10-12]。由于500 m^2烧结机混合系统加水点设计为一次混合机、二次混合机、三次混合机共同加水，其加水量很难在实际操作生产中保持稳定，且当上料量发生变化时，加水量亦随之发生变化，进而影响烧结混合料制粒效果，最终导致生产操作的稳定性变差。根据生产实践经验，可通过采取调整一次混合与二次混合机加水比例的技术措施来改善混合料制粒效果，混合料水分控制见表6。

通过减少一次混合的加水长度，延长了配合料的混匀长度，同时调整一次混合与二次混合加水量比值，并控制三次混合加水量为0.5~1.0 t/h，最终使混匀程度更加充分，制粒效果稳定提高。

2.3 配加高比例FMG粉矿后加水位置及比例调整

烧结机配加20% FMG粉矿之后，烧结混合料中出现了黏结团聚的现象，机尾烧结矿也呈现明显的液相不均匀问题，即烧结机机尾断面出现“花脸”现象，主抽负压升高，转鼓指数下降，这主要是由于混合料中主要的黏性物料生石灰和FMG粉矿未能充分摔碎混匀[13-15]，影响了混匀和制粒效

表5 优化前、后制粒效果对比

Table 5 Comparisons of granulation effect before and after optimization

阶段	位置	粒度组成(质量分数)/%				制粒效果/%	平均粒度/mm
		>10.0 mm	(5.0,10.0]mm	[3.0,5.0]mm	<3.0 mm		
优化前	一次混合	2.66	15.78	25.15	56.41	10.46	3.37
	二次混合	1.75	24.78	20.34	53.14		3.69
	三次混合	1.79	20.01	27.70	50.51		3.59
优化后	一次混合	2.33	15.78	23.02	58.87	34.02	3.28
	二次混合	2.01	20.36	27.23	50.40		3.62
	三次混合	2.13	29.33	29.70	38.84		4.24

注：制粒效果=(一次混合出料中<3 mm的混合料所占质量分数-三次混合出料中<3 mm的混合料所占质量分数)/(一次混合出料中<3 mm的混合料所占质量分数)×100%。

表 6　混合料水分控制参数

Table 6　Moisture control parameters of mixture

混合加水率（质量分数）/%	一次混合与二次混合加水量比值	三次混合加水量/（t·h⁻¹）
2.3 ~ 3.3	1.5 ~ 4.5	0.5 ~ 1.0

注：混合加水率为一次混合、二次混合和三次混合总加水量占上料量的质量分数。

果所致。其一次混匀效果有待于改善和提升，但由于一次混合机的转速已达到设计能力，故无法通过提高转速来改善混匀效果，在这种情况下，通过延长混合料未加水前的混匀距离以及减少一次混合机加水比例来延长生石灰消化前与 FMG 粉矿的摔打混匀时间，避免其团聚黏结，以优化一次混合的混匀效果，从而对后续二次混合、三次混合的制粒效果产生积极影响。将一次混合机的加水比例由配加 FMG 粉矿之前的 80% 降低至配加 FMG 粉矿之后的 75%，同时将其打水位置由入口 3 m 后延至 6 m 处，混合机优化后工艺参数见表 7。

经过优化后，一次混合、二次混合和三次混合机混合料中各粒级的筛分效果见图 2。图 2 为烧结机全年混合料粒级筛分数据变化趋势，其中从 4 月开始配加 20% 的 FMG 粉，7 月开始调整一次混合和二次混合加水比例，一次混合机加水比例降低 5%，二次混合机加水比例增加 5%，8 月由于生产秩序需要将机速从 2.0 m/min 下调至 1.8 m/min，9 月将一次混合机加水点后移 3 m。

由图 2 分析可知，4 月配加 20% FMG 粉后，混合料中小于 3 mm 颗粒增多，制粒效果变差，4 月制粒效果为 39.12%，7 月通过调整一次混合和二次混合加水量比值后使制粒效果提升至 46.34%，后由于 8 月机速降低的影响，制粒效果呈现变差趋势，因此 9 月后移一次混合机加水点位置 3 m 后，又使得制粒效果提升至 10 月的 48.28%。

由以上调整措施可以看出，在烧结生产实践中，通过调整一次混合和二次混合加水比例及后移一次混合机加水点位置可以实现混合料制粒效果的改善。实施改善制粒效果的技术措施前、后烧结机尾烧结矿断面实际情况见图 3。

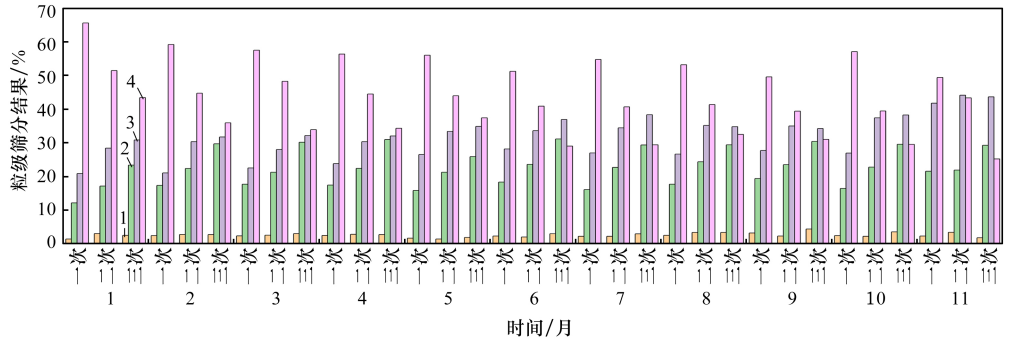
由图 3 可知，由于一次混合机加水比例和加水位置优化技术措施的实施，使烧结混合料的制粒效果得到了明显改善，进一步体现在烧结过程中，从烧结机尾断面可以明显看出混合料中大团黏结现象消失，机尾烧结矿断面“花脸”现象消除，烧结过程均匀性提高。具体结果见图 4。

由图 4 分析可知，制粒效果与一次混合机机速的变化呈现较为明显的相关性，说明500 m² 烧

表 7　一次混合、二次混合、三次混合机优化后的工艺参数

Table 7　The optimized process parameters of primary mixing, secondary mixing and tertiary mixing machine

混合机	内径/mm	长度/mm	转速/（r·min⁻¹）	倾角/（°）	通料量/（t·h⁻¹）	填充率/%	打水位置距入口距离/m	加水比例（质量分数）/%	$Fr/10^{-3}$
一次	4 400	15 000	6.0	2.5	916.3	10.90	6.0	75	4.49
二次	4 800	18 000	6.2	2.0	927.8	10.22	3.0	25	5.23
三次	4 800	18 000	6.2	2.0	932.9	10.28	—	0	5.23



1—>10 mm；2—(5.0,10.0] mm；3—[3.0,5.0] mm；4—<3.0 mm。

图 2　1 月—11 月烧结混合机粒级筛分结果

Fig. 2　Sintering mixer particle size screening results from January to November



（a）实施前；（b）实施后

图 3 实施改善制粒效果前、后烧结机机尾断面状况

Fig. 3 Implementation to improve the granulation effect before and after the sintering machine tail section condition

结机在限产时有必要进一步提高一次混合机转速，但混合机的圆筒转速已达到设计能力，故通过提高一次混合机转速来改善烧结混合料制粒效果的技术可行性较低。4 月配加 FMG 粉后，由于 FMG 粉的吸液性，使得烧结混合料出现黏结团聚现象，混匀制粒效果明显变差[16-17]，制粒效果仅为 39.12%，主抽负压增加至 14.44 kPa，烧结机机尾大团物料频现，使得烧结固体燃料消耗增加至 46.34 kg/t；7 月采取降低一次混合加水量至 75% 的技术措施使得制粒效果呈现增加趋势，同时烧结矿转鼓指数和固体燃料消耗指标均向好；8 月受机速降低的影响，制粒效果再次变差；9 月以后，将一次混合机打水点位置后移 3 m 以后，混合料中生石灰和 FMG 粉的摔打混匀时间延长，制粒效果提升至 48.98%，同时烧结的均匀性变好，主抽负压降低至 12.48 kPa，烧结矿质量明显改善，转鼓指数提升至 78.36%，固体燃料消耗降低至 43.00 kg/t。

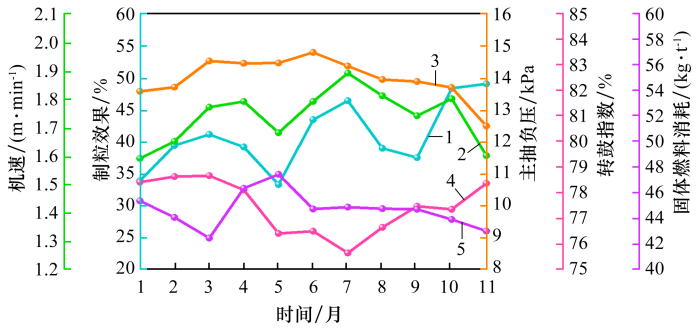
通过理论研究和生产实践证明，500 m^2 烧结机一次混合、二次混合和三次混合机的最大转速、填充率及 *Fr* 仅在最大产能时可以控制在滚动区靠近泻落区范围内，但限产时无法进一步提高转速。因此，可通过降低一次混合机加水配比和后移打水点位置等措施来延长烧结混合料一次混匀距离和时间，从而实现改善制粒效果，进一步提升烧结矿产、质量的目的。

3 结 论

（1）500 m^2 烧结机的一次混合机设计转速偏低，未能实现在泻落区工作，结合 *Fr* 计算和生产实践经验，一次混合机适宜转速应提高至 6.94 r/min。

（2）将二次混合机喷射角度由原来的 60°优化为 90°，同时将一次混合机加水喷头改进为等距分布，不仅促进了物料的润湿，而且强化了混匀制粒，制粒效果由 10.46% 提高至 34.02%，混合料平均粒径提高 0.65 mm。

（3）烧结配加 20% FMG 粉矿导致烧结混匀制粒效果变差，转鼓指数降低，将一次混合机的加水质量分数降低至 75%，同时后移加水位置 3 m，可使制粒效果由 39.12% 提升至 48.98%，不仅消除了烧结机机尾烧结矿断面“花脸”现象，而且使烧结矿转鼓指数由 76.14% 提升至 78.44%。



1—制粒效果；2—机速；3—主抽负压；4—转鼓指数；5—固体燃料消耗。

图 4 混合机制粒效果与烧结技术指标的关系变化趋势

Fig. 4 Change trend of the relationship between the effect of mixed mechanism granule and sintering technical index

参考文献：

[1] 裴元东,赵志星,马泽军,等. 高比例褐铁矿烧结机理分析及试验研究[J]. 烧结球团,2011,36(5):1－7.
PEI Yuandong, ZHAO Zhixing, MA Zejun, et al. Mechanism analysis and research on high ratio limonite sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 2011, 36(5): 1－7.

[2] 黄柱成,易凌云,胡兵. 高配比褐铁矿的烧结配矿试验研究[J]. 钢铁,2012,47(5):9－13.
HUANG Zhucheng, YI Lingyun, HU Bing. Experimental investigation on sintering with high ration of limonite[J]. Iron and Steel,2012,47(5):9－13.

[3] 林恩玉. 高配比褐铁矿烧结工艺优化试验研究[J]. 烧结球团,2020,45(2):15－20.
LIN Enyu. Experimental study on sintering process optimization of high ratio limonite[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):15－20.

[4] 吴洪义,夏志坚,陈晓光. 高褐铁矿的烧结试验研究及生产实践[J]. 烧结球团,2018,43(4):17－21.
WU Hongyi,XIA Zhijian,CHEN Xiaoguang. Experimental study and production practice of high proportion limonite sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):17－21.

[5] 高为民,王树同,周取定. 改善烧结圆筒混合机制粒工艺参数的研究[J]. 钢铁,1995,30(4):1－5.
GAO Weimin, WAGN Shutong, ZHOU Quding. Investigation on improving technology parameter of granulation in drum mixer during sintering[J]. Iron and Steel,1995,30(4):1－5.

[6] 何云华,白明华. 圆筒混合机内物料运动状态的研究[J]. 烧结球团,2007,32(1):1－4.
HE Yunhua, BAI Minghua. Research on the movement states of material in drum mixer[J]. Sintering and Pelletizing,2007,32(1):1－4.

[7] 欧阳鸿武,何世文,廖奇音,等. 圆筒型混合器中颗粒混合运动的研究[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2003,8(4):278－284.
OU YANG Hongwu,HE Shiwen,LIAO Qiyin,et al. Study on movement of granular in rotating drum blender[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering,2003,8(4):278－284.

[8] 石玥,潘建,朱德庆,等. 圆筒混合机制粒性能优化研究[J]. 烧结球团,2019,44(4):1－6.
SHI Yue, PAO Jian, ZHU Deqing, et al. Research on improvement of granulating effect of drum mixer[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):1－6.

[9] 赵彬,季文东,高万良,等. 包钢 500 m² 烧结机布料偏析控制优化研究[J]. 烧结球团,2019,44(2):24－27.
ZHAO Bin,JI Wendong,GAO Wanliang,et al. Study on optimization of feeding segregation control of Baotou Steel 500 m² sintering machine[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(2):24－27.

[10] 郅亚娜,王相龙,蒋孟欣,等. 水分对富矿粉烧结制粒的影响机制[J]. 钢铁研究学报,2023,35(5):532－540.
QIE Yana, WANG Xianglong, JIANG Mengxin, et al. Influence mechanism of moisture on sintering granulation of ore-richpowder[J]. Journal of Iron and Steel Research,2023,35(5):532－540.

[11] 王永红,杜屏,任立群. 混合料粘附比对烧结性能指标的影响[J]. 烧结球团,2015,40(2):11－14.
WANG Yonghong, DU Ping, REN Liqun. Influences of sintering mixture adhesive rate on performance indexes of sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(2): 11－14.

[12] 周乾刚,戴波,甘敏,等. 强力混合技术在烧结球团行业的应用[J]. 烧结球团,2023,48(1):51－56.
ZHOU Qiangang,DAI Bo,GAN Min et al. Application of intensive mixing technology in sintering and pelleting industries[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(1):51－56.

[13] 张蒙飞,李绍铭,徐龙淞. 烧结混合料水分在线检测装置研究[J]. 烧结球团,2021,46(5):9－14.
ZHANG Mengfei, LI Shanming, XU Longsong. Research on on-line detection device for moisture of sintering mixture[J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(5): 9－14.

[14] 范晓慧,张一雄,季志云,等. 强力混合对高比例精矿烧结的影响及机制[J]. 钢铁研究学报,2021,33(1):25－31.
FAN Xinghui ,ZHANG Yixiong,JI Zhiyun,et al. Effect and mechanism of intensive mixing on sintering with high proportion iron ore concentrate[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(1):25－31.

（下转第 80 页）

2010.

[13] 张福顺,赵增武,冯乃祥,等. 铁铌共生矿冷固结含碳球团成型工艺研究[J]. 烧结球团,2012,37(1):42 – 45.
ZHANG Fushun, ZHAO Zengwu, FENG Naixiang, et al. Study on shaping technology of carbon-containing cld-bound pellet of Fe-Nb associated ores[J]. Sintering and Pelleting,2012,37(1):42 – 45.

[14] 甘胤,王吉坤,包崇军,等. 冷压球团技术在冶金中的研究进展[J]. 矿产综合利用,2014(1):10 – 15.
GAN Yin, WANG Jikun, BAO Chongjun. Research progress of cold-pressing pelletizing technology in metallurgy[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2014(1):10 – 15.

[15] 刘征建,王榕榕,刘依然,等. 冷固结球团用地聚合物黏结剂制备参数优化[J]. 钢铁,2019,54(2):15 – 19.
LIU Zhengjian, WANG Rongrong, LIU Yiran, et al. Preparation parameters optimization of geopolymer binder for cold-bonded pellets[J]. Iron and Steel,2019,54(2):15 – 19.

[16] 王榕榕,张建良,刘征建,等. 新型黏结剂强化冷固结球团的作用机理[J]. 钢铁,2017,52(11):9 – 14.
WANG Rongrong, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Hardening behavior and mechanism of a new type of binder on cold-bonded pellets[J]. Iron and Steel, 2017,52(11):9 – 14.

[17] 张汉泉. 烧结球团理论与工艺[M]北京:化学工业出版社,2018:272.
ZHANG Hanquan. Theory and technology of singtering and pelletizing[M] Beijing: Chemical Industry Press, 2018:272.

(上接第39页)

[15] 陈伟,邢建民,王凯. 澳大利亚FMG粉矿烧结性能的实验研究[J]. 金属世界,2007(2):26 – 27.
CHEN Wei, XING Jianmin, WANG Kai. Experimental study of sinter about Australian FMG fine ore[J]. Metal World,2007(2):26 – 27.

[16] 赵晓文,李荣玲. FMG粉烧结性能研究[J]. 河北冶金,2010(1):30 – 31.
ZHAO Xiaowen, LI Rongling. Research on sintering property of FMG powder[J]. HEBEI Metallurgy, 2010(1):30 – 31.

[17] 刘振林,杨金福,冯根生,等. 高配比褐铁矿的烧结试验研究[J]. 钢铁,2004,39(12):9 – 13.
LIU Zhenlin, YANG Jinfu, FENG Gensheng, et al. Study on sintering test with high ratio of limonite[J]. Iron and Steel,2004,39(12):9 – 13.

(上接第47页)

WANG Zhaocai, ZHOU Zhian, HU Bing, et al. Wind-oxygen balance model of flue gas circulation in sintering [J]. Iron and Steel,2015,50(12):53 – 59.

[12] 赵晓东,王天明,王萌,等. 离心变频风机并联运行的失速特性分析[J]. 现代电力,2013,30(2):48 – 52.
ZHAO Xiaodong, WANG Tianming, WANG Meng, et al. Stalling characteristics analysis of centrifugal frequency conversion fan in parallel system[J]. Modern Electric Power,2013,30(2):48 – 52.

[13] 叶恒棣. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
YE Hengdi. Flue gas full-process emission reduction technology for sintering of iron and steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019.