强化红土镍矿烧结料层透气性工艺研究

张思平[1]，王兆才[2]，胡梦杰[3]，李 靖[2]，周仙霖[3]，师本敬[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. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081）

摘要：为了改善红土镍矿烧结料层透气性，本文通过研究制粒水分和时间、圆筒混合机转速及润湿时间对制粒性能的影响，得出适宜的强化制粒条件；同时，为了进一步改善料层透气性和烧结性能，在强化制粒的基础上进行布料工艺优化，并且揭示相关机理。结果表明：与基准相比，强化制粒料层透气性指数由 0.233 提高到 0.347；同时，烧结性能大幅提高，成品率、转鼓强度、利用系数分别由 68.69%、51.73%、0.77 t/(m²·h) 提高到 72.53%、56.80%、0.84 t/(m²·h)，固体燃料消耗由 147.10 kg/t 下降到 143.68 kg/t。在采用分层分级布料方式之后，强化制粒混合料料层的透气性指数由 0.347 提高到 0.418；同时，烧结性能显著提高，成品率、转鼓强度、利用系数进一步提高到 75.14%、63.47%、1.08 t/(m²·h)，固体燃料消耗下降至 132.01 kg/t。

关键词：烧结；红土镍矿；强化制粒；透气性

中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)02－0052－09

doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.024

Research on technology of strengthening permeability of laterites sinter bed

ZHANG Siping[1], **WANG Zhaocai**[2], **HU Mengjie**[3], **LI Jing**[2], **ZHOU Xianlin**[3], **SHI Benjing**[2]

(1. *Xinyu Steel Group Co., Ltd., Xinyu* 338000, *Jiangxi*, *China*; 2. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan*, *China*; 3. *College of Resource and Environmental Engineering*, *Wuhan University of Science and Technology*, *Wuhan* 430081, *Hubei*, *China*)

Abstract: In order to improve the permeability of laterites sinter bed, the effects of granulation moisture and time, cylinder mixer speed and wetting time on the granulation performance are researched to get the suitable conditions of granulation process enhancement; meanwhile, in order to further improve the permeability of laterites sinter bed and sintering performance, the fabric process optimization is carried out on the basis of granulation process enhancement, and the related mechanism is revealed. The results show that: compared with the baseline, the permeability index of granulation process enhancement is increased from 0.233 to 0.347; meanwhile, the sintering performance is improved significantly, and the yield, drum strength and utilization coefficient are increased from 68.69%, 51.73% and 0.77 t/(m²·h) to 72.53%, 56.80% and 0.84 t/(m²·h), while the solid combustion consumption is decreased from 147.10 kg/t to 143.68 kg/t. The permeability index of the mixture layer of granulation process enhancement is increased from 0.347 to 0.418 after the adoption of the layered graded fabric method; meanwhile, the sintering performance is improved significantly, and the yield, drum strength and utilization factor are further increased to 75.14%, 63.47%, 1.08 t/(m²·h), and solid fuel consumption is decreased to 132.01 kg/t.

Key words: sintering; laterites; granulation process enhancement; permeability

收稿日期：2021－11－22；**修回日期**：2021－12－13

基金项目：湖南省科技成果转化及产业化计划资助项目(2020GK4055)；中冶集团 181 攻关计划自主项目(第一批)；中冶长天基础研究基金项目(2020JCYJ06)

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工作。

通讯作者：王兆才(1984—)，男，博士，高级工程师，从事铁矿烧结球团及直接还原方面的研究工作。

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

近年来，随着不锈钢需求持续增长及硫化镍矿资源逐渐枯竭，占镍资源总量为 70% 以上的红土镍矿受到广泛的关注[1-2]。中国作为全球最大的镍消费国，每年需要进口大量的红土镍矿，以改善国内镍资源不足的现状。然而对高品位红土镍矿施行的出口禁令，导致我国进口的多为低品位红土镍矿，其中“高铁低镍”的褐铁矿型红土镍矿占比很高[3-5]，该资源已成为当前镍资源开发利用的重点。目前，处理褐铁矿型红土镍矿的工艺主要是烧结—高炉工艺，该工艺凭借技术成熟、生产效率高、生产成本较低等优势，受到不锈钢冶炼工业的广泛应用和推广[6-7]。

红土镍矿与普通铁矿大不相同，一方面，其自由水(通常超过 20%)和结晶水(通常超过 12%)的脱水过程消耗大量热量[8]，导致烧结固体燃料消耗远高于普通铁矿；另一方面，其具有粒度较粗、吸水性强、气孔率高、结构疏松、堆密度小等特点[9-10]，这要求制粒水分远高于常规烧结，易导致料层过湿带增厚，影响料层透气性；同时，其高温特性具有液相黏度大、料层收缩性大、黏结相强度差等特点[12-13]，影响高温透气性，不利于烧结过程。此外，烧结配料中常常会配入一些难制粒的烧结除尘灰、高炉重力灰以及粒度较细的返矿，这在一定程度上影响了料层透气性。因此，改善料层透气性，对红土镍矿烧结具有十分重要的意义。

在常规铁矿烧结中，为了改善料层透气性，国内外学者采用的主要方法有优化混合制粒工艺参数、分流制粒、复合造块、小球烧结、分层制粒、强力混合、添加黏结剂、优化配矿结构等[14-17]。这些方法在一定程度上强化了制粒效果，提高了料层透气性和烧结矿产、质量，但这些方法大多会增加设备投资或增加工艺的复杂性，不利于降低成本。本文在前期烧结方案的基础上，通过研究润湿时间、制粒时间、圆筒混合机转速和混合料水分对制粒性能的影响，并分析不同布料方式对料层透气性及烧结性能的影响，以达到改善料层透气性和提高烧结性能的目的，为红土镍矿超厚料层烧结提供一定的参考。

1　原料性能及研究方法

1.1　原料性能

试验原料均来自广西某不锈钢生产企业，湿料的水分及干料的主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知：红土镍矿中自由水高达 24.60%，铁品位为 46.69%，Ni 质量分数为 0.79%，烧损高达 14.69%，是典型的“高铁低镍”型红土镍矿，即褐铁矿型红土镍矿。其他含铁原料包括高返矿、内返矿、高炉重力灰、烧结除尘灰。燃料采用无烟煤，其固定碳质量分数为 77.32%，灰分及挥发分分别为 15.19% 和 7.49%；熔剂采用生石灰，其 CaO 质量分数为 79.56%，可满足烧结生产要求。

表 1　原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

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

原料名称	H_2O	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Ni	Cr_2O_3	P	S	烧损
红土镍矿	24.60	46.69	0.38	5.84	0.50	3.10	5.78	0.79	3.71	0.002	0.150	14.69
高返矿	4.46	44.26	29.93	6.83	8.05	2.45	4.92	0.84	3.76	0.002	0.290	1.87
内返矿	0.30	46.90	23.47	6.26	8.71	2.38	6.41	0.82	2.49	0.005	0.240	2.51
高炉重力灰	7.88	14.52	4.06	8.10	4.26	2.14	4.63	0.19	1.67	0.011	0.230	46.74
烧结除尘灰	0.12	45.09	22.58	6.67	8.25	1.62	8.00	0.75	2.38	0.041	0.590	3.12
无烟煤	4.95	0.44	—	6.39	0.55	0.13	4.67	—	—	0.020	0.064	86.70
生石灰	—	0.06	—	1.51	79.56	1.67	0.50	—	—	0.002	0.075	16.44

原料粒度组成如表 2 所示。在制粒过程中，物料的粒度通常分为核颗粒(1 ~ 3 mm)、中间颗粒(1 ~ 0.5 mm)及黏附粉(-0.5 mm)。由表 2 可知：红土镍矿中 1 ~ 3 mm 粒级占比达

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

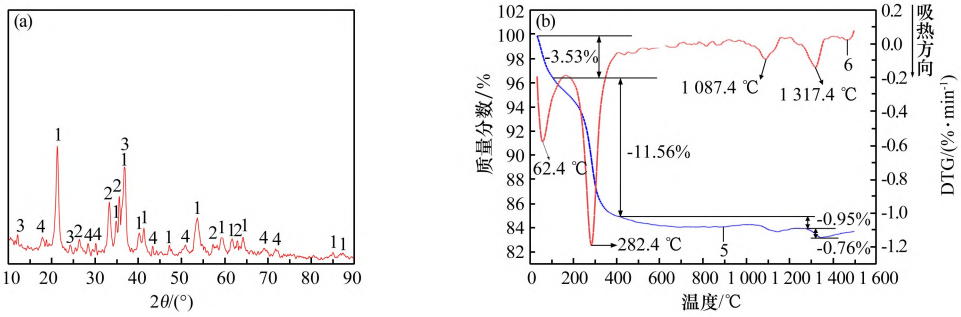
39.07%，核颗粒较多，使其具有较好的成球性[18]；高返矿的平均粒度为 3.20 mm，能够满足烧结生产对返矿的要求；内返、高炉重力灰、烧结除尘灰的平均粒度分别为 1.31、1.37、0.10 mm，具有粒度均较细、亲水性差、难制粒等特点，易对料层透气性产生不良影响；燃料和熔剂的 -3 mm 粒级占比为 85% 以上，均能满足一般烧结对粒度的要求。

表 2 原料的粒度组成和平均粒度

Table 2 Size distribution and mean grain size of raw materials

项目	粒度组成(质量分数)/%								平均粒度/mm
	+8 mm	8 ~ 5 mm	5 ~ 3 mm	3 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.355 mm	0.355 ~ 0.175 mm	-0.175 mm	
红土镍矿	2.13	5.46	9.95	37.95	20.1	10.32	6.36	7.73	1.96
高返矿	4.88	10.21	32.07	30.63	6.13	5.43	5.64	5.01	3.20
内返矿	—	—	4.82	42.42	18.97	16.3	10.38	7.11	1.31
高炉重力灰	4.86	3.55	5.51	5.05	4.99	11.55	23.57	40.92	1.37
烧结除尘灰	—	—	—	—	—	—	4.71	95.29	0.10
无烟煤	—	3.39	6.02	20.82	18.12	19.10	16.16	16.39	1.15
生石灰	—	—	6.52	16.75	8.26	7.98	8.38	52.11	0.76

采用日本 SmartLab SE 型 X 射线衍射仪[X 射线光源为 Cu 靶，扫描速度为 5(°)/min]对红土镍矿进行 XRD 分析，结果如图 1(a)所示。由图 1(a)可知：红土镍矿的主要矿物为针铁矿，包含少量的磁铁矿、绿铬矿、利蛇纹石、鳞石英、一水硬铝石及镍铁尖晶石。采用德国 NETZSCH STA 449C(保护气体为空气，升温速度为 10 ℃/min，温度测量范围为 30 ~ 1500 ℃)对红土镍矿进行 TG-DTG 分析，结果如图 1(b)所示。由图 1(b)可知：DTG 曲线上出现 4 个主要的吸热峰，第一个吸热峰出现在 62.4 ℃，主要是由于烘干后的红土镍矿所含的少量自由水的脱除引起的，该吸热峰对应的自由水脱除引起的失重约为 3.53%；另外 3 个吸热峰出现在 282.4、1 087.4 及 1 317.4 ℃，引起的失重分别为 11.56%、0.95% 及 0.76%，结合矿物热分析认为是针铁矿、一水硬铝石及利蛇纹石的羟基脱除所引起的。由此可知，该红土镍矿羟基质量分数高达 13.27%，羟基开始脱除温度为 282.4 ℃，羟基完全脱除温度为 1 317.4 ℃。



(a) XRD 分析；(b) TG-DTG 分析

1—针铁矿[FeO(OH)]；2—磁铁矿(Fe_3O_4)；3—绿铬矿(Cr_2O_3)；4—利蛇纹石[$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$]；5—TG 曲线；6—DTG 曲线。

图 1 红土镍矿 XRD 衍射分析和 TG-DTG 分析

Fig. 1 X-ray diffraction pattern and TG-DTG patterns of laterite nickel ore

按照 BS EN 14617 - 1—2013 中烧结石料表观密度和吸水率的测定方法，得到原料的堆密度和最大吸水量如表 3 所示。由表 3 可知：红土镍矿的堆密度非常小，仅为 1.18 g/cm^3；同时，红土镍矿的最大吸水量较高，高达 0.69 $g_{水}/g_{矿}$，这将造成红土镍矿制粒水分较高。

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

表 3　试验原料的堆密度和最大吸水量

Table 3　Heap density and the maximum water absorption of raw materials

项目	红土镍矿	高返矿	内返矿	高炉重力灰	烧结除尘灰	无烟煤	生石灰
堆密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.18	1.83	1.78	1.05	1.08	0.72	0.90
最大吸水量/($g_{水} \cdot g_{矿}^{-1}$)	0.69	0.26	0.44	0.57	0.56	0.57	1.25

1.2　研究方法

烧结杯试验的基准配矿方案和相关参数分别如表 4、5 所示。混料步骤：在∅700 mm × 700 mm 立卧式混料机中进行一次混合，转速为 25 r/min，填充率为 11%，干式混料时间为 3 min；在∅600 mm × 1 200 mm 圆筒混合机中进行二次混合，转速为 20 r/min，填充率为 9%，加水制粒时间为 6 min。两次混合后，取混合料进行透气性指数和粒度组成检测。将达到烧结终点的烧结饼冷却至低于 150 ℃，将其倒出并采用单齿辊破碎机破碎，然后在 2 m 高度连续落下 4 次，筛分分级，测定并计算成品率、转鼓强度、利用系数、固体燃料消耗等指标。

强化制粒配矿方案与表 4 相同，但是一次混合过程需要进行加水润湿，并调整润湿时间和加水量，二次混合过程需要调整制粒时间和圆筒混合机转速。混合料透气性指数、粒度组成，以及烧结杯试验参数和相关检测均与基准试验保持一致。

试验均未铺底料，常规布料方式是将混合料直接倒入烧结杯中；而分层分级布料是用孔径为 5 mm 的筛子将混合料进行筛分，得到 +5 mm 和 −5 mm 的混合料，然后将其依次倒入烧结杯中。

试验借助德国 ZEISS AxioLab. A1 金相显微镜对成品烧结矿的微观结构及矿物组成进行分析。

表 4　试验基准配矿方案(质量分数)

Table 4　Basic test batching scheme　　%

红土镍矿	高返矿	内返矿	高炉重力灰	烧结除尘灰	无烟煤	生石灰
63.0	17.0	8.0	2.3	2.0	7.2	7.3

表 5　烧结杯试验参数

Table 5　sintering pot test parameters

料层厚度/mm	杯体直径/mm	点火负压/kPa	烧结负压/kPa	点火温度/℃	点火时间/min	保温时间/min	冷却负压/kPa
770	250	5	10	1100	1.5	3	5

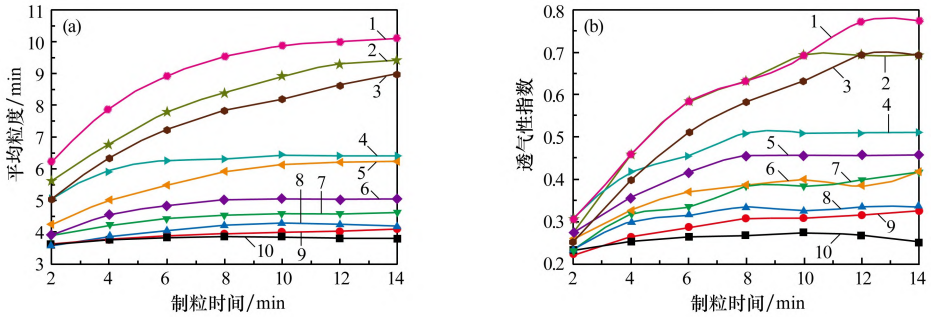
2　结果与讨论

2.1　水分和制粒时间对制粒性能的影响

在润湿时间为 9 min，圆筒混合机转速为 24 r/min 条件下，得到水分和制粒时间对制粒性能的影响如图 2 所示。由图 2 可知：在水分一定的条件下，随着制粒时间的增加，混合料的平均粒度及透气性指数均呈现先升高后稳定的趋势；当制粒 10 min 后，制粒性能变化不明显。因此，建议制粒时间为 10 min。在制粒时间一定的条件下，随着水分的增加，混合料的平均粒度及透气性指数均呈现升高的趋势，但水分质量分数超过 20.5% 后，试验中混合料出现明显过湿和粘料现象，不利于烧结生产。因此，建议制粒水分不超过 20.5%。

由上述分析可知：在圆筒混合机制粒过程中同时存在制粒和小球破坏的过程，制粒时间过短时，混合料来不及聚集长大，造成制粒效果差；当制粒时间过长时，生产效率会下降，同时小球容易破坏。水分在制粒过程中的主要作用是促进物料与水形成毛细力而使物料相互黏结成具有一定粒级的小球；增加水分有利于颗粒相互聚集成球，但水分过高时，混合料容易黏结成块，对烧结生产不利[19]。

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



（a）平均粒度；（b）透气性指数

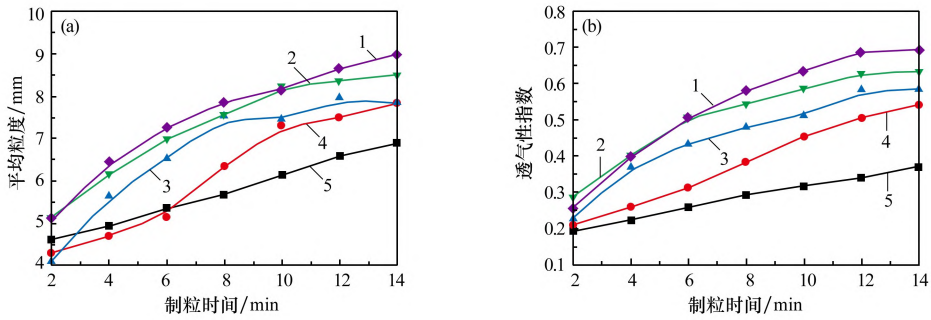
水分质量分数/%：1—21.5；2—21；3—20.5；4—20；5—19.5；6—19；7—18.5；8—18；9—17.5；10—17。

图 2 水分和制粒时间对制粒性能的影响

Fig. 2 Effects of moisture and granulation time on granulation performance

2.2 圆筒混合机转速对制粒性能的影响

在润湿时间为9 min，混合料水分为20.5%条件下，圆筒混合机转速对制粒性能的影响如图3所示。由图3可知：在制粒时间保持一定的条件下，随着圆筒混合机转速的增加，混合料的平均粒度及透气性指数均呈现升高的趋势。圆筒混合机制粒过程中物料存在6种运动状态，分别为滑移、阶梯、滚动、小瀑布、大瀑布和离心，当圆筒混合机转速过低时，混合料呈现滑移、阶梯的运动状态，不利于制粒[20]；当圆筒混合机转速过高时，混合料容易出现大瀑布、离心状态，也不利于制粒；当圆筒混合机转速适宜时，混合料呈现滚动和小瀑布的运动状态，混合料之间的能够充分接触和滚动成球，有利于制粒。由此可知：圆筒混合机转速为24 r/min时，混合料呈现小瀑布运动状态，混合料制粒性能较好。



（a）平均粒度；（b）透气性指数

转速/(r·min^{-1})：1—24；2—20；3—16；4—12；5—8。

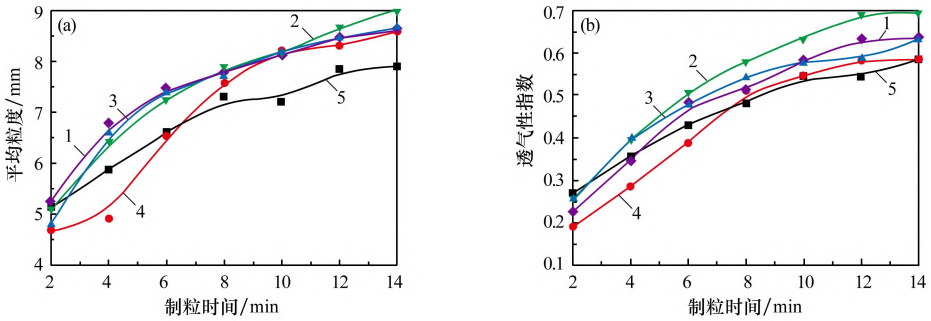
图 3 圆筒混合机转速对制粒性能的影响

Fig. 3 Influence of rotating speed of drum mixer on granulation performance

2.3 润湿时间对制粒性能的影响

在水分为20.5%，圆筒混合机转速为24 r/min条件下，润湿时间对制粒性能的影响如图4所示。由图4可知：在制粒时间保持一定的条件下，随着润湿时间的增加，混合料的平均粒度及透气性指数呈现先升高后略微下降的趋势，在润湿时间达到9 min时，制粒性能达到最佳。分析原因认为，润湿时间增加，有利于生石灰消化生成[$Ca(OH)_2 \cdot nh_2O$]胶体颗粒，它具有良好的黏结作用，有利于混合料制粒，同时生石灰消化放热有利于提高料温[21]。润湿时间过短时，生石灰消化不充分，混合料中存在大量“白点”，在制粒过程中生石灰继续消化会破坏制粒小球；另外润湿时间过长时，生产效率会下降，同时料温会下降，且制粒性能变化不明显。

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



（a）平均粒度；（b）透气性指数

润湿时间/min：1—12；2—9；3—6；4—3；5—0。

图 4　润湿时间对制粒性能的影响

Fig. 4　Influence of wetting time on granulation performance

结合基准烧结试验条件，强化制粒工艺参数：润湿时间为 9 min，圆筒混合机转速为 24 r/min，制粒时间为 10 min，水分质量分数为 17.5% ~19.5%。

3　烧结性能对比

在常规布料方式下，基准期与强化制粒后的烧结技术经济指标对比如表 6 所示。由表 6 可知：与基准期相比，强化制粒的料层透气性指数由 0.233 提高到 0.347；同时烧结性能大幅提高，烧结矿成品率由 68.69% 提高到 72.53%，转鼓强度由 51.73% 提高到 56.80%，利用系数由 0.77 t/(m^2·h) 提高到 0.84 t/(m^2·h)，固体燃料消耗由 147.10 kg/t 下降至 143.68 kg/t。分析原因认为，强化制粒之后，混合料透气性大幅提高，燃料燃烧更加充分，有利于液相生成，烧结固结条件得到大幅改善[22]。

表 6　烧结技术经济指标对比

Table 6　Comparison of economic indicators of sintering technology

项目	混合料水分/%	成品率/%	转鼓强度/%	垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	固体燃料消耗/(kg·t^{-1})	透气性指数
基准期	18.50	68.69	51.73	24.44	0.77	147.10	0.233
强化制粒	18.57	72.53	56.80	30.68	0.84	143.68	0.347
强化制粒Ⅱ	19.41	75.14	63.47	35.81	1.08	132.01	0.418

注：强化制粒Ⅱ表示强化制粒混合料采用分层分级布料。

此外，与常规布料相比，分层分级布料下强化制粒料层透气性指数由 0.347 提高到 0.418；同时，烧结性能显著提高，烧结矿成品率由 72.53% 提高到 75.14%，转鼓强度由 56.80% 提高到 63.47%，利用系数由 0.84 t/(m^2·h) 提高到 1.08 t/(m^2·h)；同时，固体燃料消耗由 143.68 kg/t 下降至 132.01 kg/t。分析原因认为：① 分层分级布料实现了粗颗粒位于下层，细颗粒位于上层，有利于减少料层阻力，从而改善透气性；② 分层分级布料有利于料层上下层碳的偏析，从而实现烧结传热过程均匀化，大幅减弱了上层欠烧和下层过熔现象，改善了烧结固结条件，因此烧结性能大幅提高。

烧结矿的化学成分如表 7 所示。由表 7 可知：由于在低碱度条件下红土镍矿烧结的液相量生成不足，高碱度容易生成大孔薄壁结构[11-12]，所以碱度均保持在 1.6 较低的水平；同时，强化制粒后烧结矿的 FeO 质量分数较低，主要原因是料层透气性得到改善，有利于 FeO 质量分数的降低[23]。

4　烧结矿工艺矿物学分析

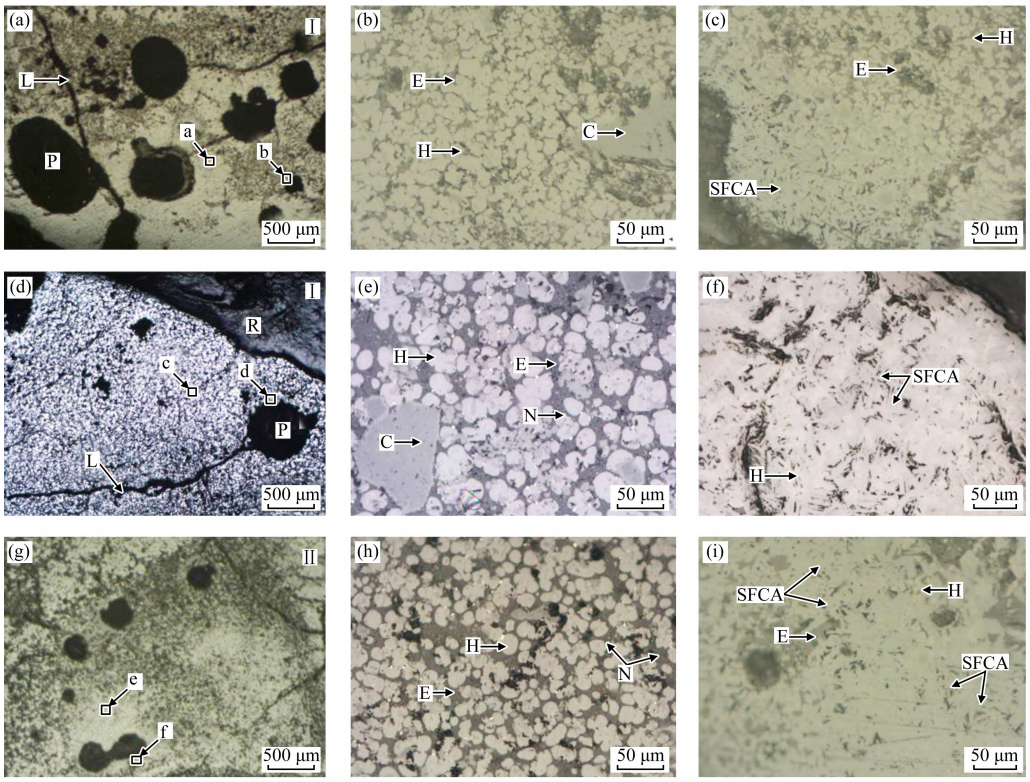
烧结矿微观结构如图 5 所示。由图 5 可知：基准期烧结矿主要呈大孔薄壁结构，孔洞和大

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

表 7 烧结矿主要化学成分和碱度

Table 7 Main chemical composition and basicity of sintering ore

项目	主要化学成分(质量分数)/%								碱度
	TFe	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Ni	Cr_2O_3	
基准期	46.68	23.57	6.97	11.15	3.17	6.52	0.82	3.76	1.6
强化制粒	46.21	22.68	6.83	11.07	3.24	6.27	0.81	3.69	1.6
强化制粒Ⅱ	46.51	21.65	6.92	11.14	3.13	6.22	0.81	3.63	1.6



(a) 基准期烧结矿；(b)、(c) 分别为图(a)中 a、b 区域放大图；(d) 强化制粒烧结矿；(e)、(f) 分别为图(d)中 c、d 区域放大图；(g) 分层分级布料方式下强化制粒烧结矿；(h)、(i) 分别为图(g)中 e、f 区域放大图

Ⅰ—常规布料方式；Ⅱ—分层分级布料方式；P—孔；L—裂纹；R—树脂；H—铁尖晶石；C—铬尖晶石；N—镍铁尖晶石；E—硅酸盐相；SFCA—复合铁酸钙。

图 5 烧结矿微观结构

Fig. 5 Microstructure of sintering ore

裂纹多，严重影响了烧结矿的强度；与基准期相比，经过强化混合料制粒后，烧结矿仍然存在大孔洞，但孔洞和大裂纹明显减少，且微观结构呈现小孔厚壁，微观结构更加致密化；强化制粒烧结矿中主要的固相——铁尖晶石由溶蚀状向为球粒状发展，铁尖晶石与液相之间的润湿程度提高，烧结矿的微观结构明显改善。分析原因认为，采用强化制粒工艺后，料层透气性大幅改善，燃料燃烧更加充分，烧结过程液相量增多，烧结固结条件得到大幅改善。在分层分级布料方式下，强化制粒烧结矿呈现小孔厚壁，孔洞和裂纹进一步减少，铁尖晶石与液相之间的润湿程度进一步提高，SFCA 呈针状或交织状，铁微观结构改善，有利于烧结矿强度提高。

总的来说，通过分层分级布料和强化制粒后，料层透气性得到大幅提高，烧结过程传热条件大幅改善，有利于烧结矿固结，从而提高烧结矿强度。

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

5 结 论

（1）试验所用红土镍矿为“高铁低镍”的褐铁矿型红土镍矿，存在自由水和结晶水高、烧损大、堆密度小、吸水能力强等问题，其制粒水分远高于普通铁矿。

（2）通过对水分、制粒时间、圆筒混合机转速、润湿时间等工艺进行优化后，红土镍矿混合料制粒性能大幅提高。

（3）在常规布料方式下，与基准相比，强化制粒料层的透气性指数由 0.233 提高到 0.347；同时，烧结性能大幅提高，成品率、转鼓强度、利用系数分别由 68.69%、51.73%、0.77 t/(m^2·h)提高到 72.53%、56.80%、0.84 t/(m^2·h)，固体燃料消耗由 147.10 kg/t 下降到 143.68 kg/t。在分层分级布料方式下，强化制粒料层透气性指数由 0.281 提高到 0.418；同时，烧结性能大幅提高，成品率、转鼓强度、利用系数分别由 72.53%、56.80%、0.84 t/(m^2·h) 提高到 75.14%、63.47%、1.08 t/(m^2·h)，固体燃料消耗由 143.68 kg/t 下降到 132.01 kg/t。

参考文献：

[1] YOSHITOMO O, TORU O. Current status of resources and supply-demand of nickel, and outlook of hydrometallurgical processes for nickel laterite ore[J]. Journal of MMIJ, 2014, 130(4):93 – 103.

[2] 朱德庆,田宏宇,潘建,等. 低品位红土镍矿综合利用现状及进展[J]. 钢铁研究学报,2020,32(5):351.
ZHU Deqing, TIAN Hongyu, PAN Jian, et al. Comprehensive utilization status and progress of low-grade laterite nickel ore [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(5):351 – 362.

[3] 武兵强,齐渊洪,周和敏,等. 红土镍矿火法冶炼工艺现状及进展[J]. 矿产综合利用,2020,223(3):78 – 93.
WU Bingqiang, QI Yuanhong, ZHOU Hemin, et al. Status and progress in pyrometallurgy processes of a laterite nickel ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 223(3):78 – 93.

[4] GAO L H, LIU Z G, PAN Y Z, et al. Separation and recovery of iron and nickel from low-grade laterite nickel ore using reduction roasting at rotary kiln followed by magnetic separation technique [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2019, 36(2):375 – 384.

[5] 王帅,姜颖,郑富强,等. 红土镍矿火法冶炼技术现状与研究进展[J]. 中国冶金,2021,31(10):1 – 7.
WANG Shuai, JIANG Ying, ZHENG Fuqiang, et al. Development of pyrometallurgical technology of laterite nickel ore[J]. China Metallurgy, 2021, 31(10):1 – 7.

[6] 李光辉,姜涛,罗骏,等. 红土镍矿冶炼镍铁新技术[M]. 北京:冶金工业出版社. 2018.
LI Guanghui, JIANG Tao, LUO Jun, et al. New technology of ferronickel smelting from laterite ore[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.

[7] 潘料庭,杨静,许严邦. 红土镍矿烧结配加添加剂的工业试验[J]. 烧结球团,2013,38(2):25 – 27;31.
PAN Liaoting, YANG Jing, XU Yanbang. Industrial test of laterite nickel ore sintering proportioned with additives[J]. Sintering and Pelletizing, 2013, 38(2):25 – 27;31.

[8] 吕学伟,白晨光,张立峰,等. 印度尼西亚红土镍矿脱水 – 烧结机理[J]. 钢铁,2008,43(12):13 – 18.
LÜ Xuewei, BAI Chenguang, ZHANG Lifeng, et al. Dehydration and sintering mechanism of indonesian nickeliferous laterite[J]. Iron and Steel, 2008, 43(12):13 – 18.

[9] 朱德庆,薛钰霄,潘建,等. 废弃块矿作铺底料强化红土矿烧结工艺及机制[J]. 钢铁研究学报,2020,32(7):591 – 600.
ZHU Deqing, XUE Yuxiao, PAN Jian, et al. Sintering performance and mechanism of limonite laterite strengthened by using waste lump ore as hearth layer[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(7):591 – 600.

[10] 黄伟青,张旭孝,刘燕霞,等. 褐铁矿在烧结中的高效使用技术[J]. 钢铁研究学报,2016,28(7):13 – 19.
HUANG Weiqing, ZHANG Xuxiao, LIU Yanxia, et al. High effective utilization technology of limonite in sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(7):13 – 19.

[11] 郭恩光. 褐铁矿型红土镍矿烧结行为研究及工艺优化[D]. 重庆:重庆大学,2014.
GUO Enguang. Sintering behaviour and process optimization of nickel laterite based of limonitic style[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[12] ZHU Deqing, XUE Yuxiao, Pan Jian, et al. An investigation into the distinctive sintering performance and consolidation mechanism of limonitic laterite ore[J]. Powder Technology, 2020(367):616 – 631.

[13] XUE Yuxiao, ZHU Deqing, PAN Jian, et al. Effective utilization of limonitic nickel laterite via pressurized densification process and its relevant mechanism [J]. Minerals, 2020,

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

10(9):750 – 767.

[14] 刘文权,吴记全. 烧结强力混合和强化制粒创新技术[C]//2017年全国烧结球团技术交流年会暨"提质增效、创新驱动、绿色发展"行业主题研讨会论文集. 宜昌:全国烧结球团信息网,2017:155 – 158.
LIU Wenquan, WU Jiquan. Innovation technology of sintering strong mixing and strengthening granulation [C]//2017 National Sintering Pelletizing Technology Exchange Annual Conference and Symposium on "Improving Quality and Efficiency, Innovation-Driven, Green Development". Yichang: National sinter pellet information network, 2017: 155 – 158.

[15] 王建晖,胡岳华,傅菊英,等. 有机黏结剂强化烧结制粒[J]. 中南工业大学学报,1997(1):28 – 30.
WANG Jianhui, HU Yuehua, FU Juying, et al. Investigation on strengthening granulation of sinter mix with organic binder[J]. Journal of Central South University of Technology, 1997(1): 28 – 30.

[16] 周东峰. 分级制粒法非均质烧结工艺研究[D]. 辽宁:东北大学,2006.
ZHOU Dongfeng. Study of the Non-isotropic sintering graft by separated granulation[D]. Liaoning: Northeastern University, 2006.

[17] 张贺雷. 宝钢高配比镜铁矿与含铁粉尘的复合造块工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
ZHANG Helei. Research on composite agglomeration process with high-ratio of specularite ore and iron-bearing dust of Baosteel[D]. Changsha: Central South University, 2014.

[18] ZHU D Q, SHI B, PAN J, et al. Effect of pre-briquetting on the granulation of sinter mixture containing high proportion of specularite concentrate[J]. Powder Technology, 2018(331): 250 – 257.

[19] 吕学伟,郭家宝,游洋,等. 铁矿粉烧结制粒过程颗粒行为研究综述[J]. 钢铁研究学报,2021,33(10):1084 – 1094.
LÜ Xuewei, GUO Jiabao, YOU Yang, et al. Particles behavior of iron ore fine during granulation process: A review[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1084 – 1094.

[20] 何云华. 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. Research on the movement states of material in drum mixer[J]. Sintering and Pelletizing, 2007, 32(1): 1 – 4.

[21] 周密,杨松陶,姜涛,等. 强化制粒对含铬型钒钛混合料烧结的影响[J]. 钢铁,2015(3):39 – 43.
ZHOU Mi, YANG Songtao, JIANG Tao. Effect of enhanced granulation on Cr-bearing vanadium and titanium magnetite sintering[J]. Iron and Steel, 2015(3): 39 – 43.

[22] 李文琦. 优化烧结料层透气性和温度场的研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
LI Wenqi. Investigation on optimizing permeability and temperature field of sintering bed[D]. Changsha: Central South University, 2012.

[23] WU S L, WANG Q F, BIAN M L, et al. Influence of iron ore characteristics on FeO formation during sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(5): 5 – 10.

(上接第51页)

[6] 周文涛,胡俊鸽,郭艳玲. 国外烧结球团突破性技术研究进展[J]. 烧结球团,2015,40(2):5 – 10.
ZHOU Wentao, HU Junge, GUO Yanging. Research progress about breakthrough sintering & pelleting technologies[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(2): 5 – 10.

[7] OYAMA Nobuki, IWAMA Yuji, YAMAMOTO Tetsuyu. Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process[J]. ISIJ International, 2011, 51(6): 913 – 921.

[8] 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(6):1 – 3.
LI Heping, NIE Huiyuan, HAN Fengguang, et al. Application of intensified sintering technology with COG in Meisteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(6): 1 – 3.

[9] 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.

[10] 程志龙,杨剑,魏赏赏,等. 燃气喷吹技术调控铁矿烧结熔化特性的实验研究[J]. 工程热物理学报,2017,38(5):1044 – 1050.
CHENG Zhilong, YANG Jian, WEI Reward, et al. Experimental study of gaseous fuel injection method for controlling heat pattern of melting zone in iron ore sintering[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(5): 1044 – 1050.

[11] 白晨光,谢皓,邱贵宝,等. 烧结料层中的蓄热模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2008(9):1002 – 1007.
BAI Chenguang, XIE Hao, QIU Guibao, et al. An accumulation heat model and its application in iron ore sintering[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2008(9): 1002 – 1007.

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