铁矿粉球团烧结试验研究

郭正启[1]，詹若宁[1]，朱德庆[1]，吕 韬[2]，潘 建[1]，洪荣勇[3]

（1. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；2. 中冶东方工程技术有限公司，山东 青岛 265000；
3. 福建三钢闽光股份有限公司，福建 三明 365000）

摘要：本文针对传统烧结工艺能耗高、强度差等缺点，开发了铁矿粉球团烧结新工艺。实验室烧结杯试验结果表明：普通铁矿烧结时采用新工艺，其转鼓强度可由 61.50% 提升至 75.12%，成品率由 67.29% 提升至 85.03%，固体能源消耗降低 43.6% 至 44.31 kg/t；而对于红土镍矿烧结，转鼓强度由 46.27% 提升至 58.66%，成品率由 64.88% 提升至 68.16%，利用系数由 1.06 t/(m^2·h) 提升至 1.19 t/(m^2·h)，固体能源消耗降低 22.78% 至 110.36 kg/t。球团烧结工艺能促进复合铁酸钙的生成，所获得的成品烧结矿 FeO 质量分数低，还原度高，还原粉化率低，具备优良的还原性能。球团烧结新工艺不但能显著改善烧结矿的产、质量指标，降低固体能耗和 CO_2 排放，而且该工艺对矿粉类型适应性强，有助于传统烧结生产的提质降耗改造。

关键词：铁矿粉、烧结；球团烧结、红土镍矿；常规烧结、烧结性能

中图分类号：TF046.4；TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0087－08

doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.012

Experimental study on iron ore powder pelletizing sintering

GUO Zhengqi[1], **ZHAN Ruoning**[1], **ZHU Deqing**[1], **LV Tao**[2], **PAN Jian**[1], **HONG Rongyong**[3]

(1. *School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*;
2. *MCC Oriental Engineering Technology Co., Ltd., Qingdao* 265000, *Shandong, China*;
3. *Sansteel Minguang Co., Ltd., Fujian, Sanming* 365000, *Fujian, China*)

Abstract: In view of such disadvantages of traditional sintering process as high energy consumption and poor strength, a new process for iron ore powder pelletizing sintering is developed. The results of laboratory sintering cup tests show that: the new process is used in the sintering of ordinary iron ore, the drum strength can be increased from 61.50% to 75.12%, the yield is increased from 67.29% to 85.03%, and the solid energy consumption can be reduced by 43.6% to 44.31 kg/t. As for the laterite nickel ore sintering, the drum strength is increased from 46.27% to 58.66%, the yield is increased from 64.88% to 68.16%, and the utilization coefficient is increased from 1.06 t/(m^2·h) to 1.19 t/(m^2·h), and the solid energy consumption is reduced up to 110.36 kg/t, about 22.78%. The pelletizing sintering process can promote the formation of composite calcium ferrite, and the obtained finished sinter has low FeO mass fraction, high reduction degree, low reduction pulverization rate, and excellent reduction performance. The new pelletizing sintering process can not only significantly improve sinter production and quality indicators, reduce solid energy consumption and CO_2 emissions, but also have strong adaptability to the type of ore powder, which is conducive to the quality improvement and consumption reduction of traditional sintering production.

Key words: iron ore powder, sintering; pelletizing sintering, laterite nickel ore; conventional sintering, sintering properties

由于中国的国情，以及烧结工艺具有产量高、原料适应范围广等优点，中国高炉炉料主要以烧结矿为主，其比例可高达 70% 以上[1-2]。但传统烧结工艺存在着环境污染大、碳排放高、

收稿日期：2021－12－16；**修回日期**：2022－01－21

基金项目：湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5726)。

作者简介：郭正启(1988—)，男，副教授，从事钢铁冶金方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

烧结矿强度较低等问题[3-4]。同时，中国已作出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的郑重承诺[5]。因此，烧结工艺节能减排势在必行。

与烧结工艺相比，球团工艺 CO_2 排放量仅为烧结工序的20%~45%，其无论从节能方面还是减少碳排放方面都更具有优势[6-7]。同时，球团矿强度也远在烧结矿强度之上[8-9]。结合球团工艺的优势，对传统烧结工艺进行技术改进，不仅可以降低碳排放和减少环境污染，还可以提高烧结矿的强度和产量。目前，在常规铁矿粉方面，小球烧结(HPS工艺)已进行了相关实验和试生产[10-11]，但大多集中在铁精矿方面，一般铁粉矿并未涉及。复合造块、分流制粒等工艺均能强化烧结过程，但是通常也仅把烧结原料中精粉进行造球，而并未涉及大量的粉矿。此外，在现今不锈钢需求量大、硫化镍矿日益枯竭及高品位红土镍矿短缺的背景下，通过烧结高炉工艺利用褐铁矿型红土镍矿是一种有效的低成本生产不锈钢母液的途径[12-13]。但其烧结矿产率低、强度差、能耗高的问题严重制约了褐铁矿型红土镍矿的利用[14-15]。

基于上述研究背景，结合球团工艺的优势，研究者提出球团烧结工艺，即通过将铁精矿(或磨细的粉矿)、熔剂等按一定比例混匀，后经造球机造球，并外滚一定量的固体燃料，最后进行烧结，以获得更为优质的球团烧结矿。球团烧结工艺将混合料预先造球，这可以有效改善烧结料层的透气性，为实现超高料层烧结创造了有利条件；同时，其将固体燃料外裹于球团表面，避免了矿粉颗粒深裹燃料颗粒的发生，使固体燃料的燃烧条件及燃烧效果大为改善，进而有效降低了烧结矿的固体燃耗；此外，球团烧结工艺中生球的强度要高于普通混合制粒工艺的混合料准颗粒强度，这更有利于改善混合料透气性及形成强度更高的烧结矿。此外，考虑到褐铁矿型红土镍矿良好的可磨性[16]，球团烧结工艺有望提高褐铁矿型红土镍矿烧结矿的产、质量指标，并大幅度地降低碳排放量。

本文以普通铁矿石、褐铁矿型红土镍矿及铬铁矿为主要含铁原料，对比常规烧结工艺和球团烧结工艺的烧结矿产、质量指标，验证球团烧结工艺的可行性。并通过烧结矿工艺矿物学分析，揭示了球团烧结矿固结机理，为传统烧结生产提质降耗改造提供了有益的探索和选择方向。

1 原料性能与研究方法

1.1 原料性能

试验过程所用原料主要包括含铁原料、熔剂和固体燃料。含铁原料主要有普通铁矿粉A、红土镍矿、铬铁矿和尾渣，其中铁矿A是一种普通铁矿石，常用于铁矿烧结，本研究中主要用于普通铁矿粉两种烧结工艺的对比研究；而后3种含铁原料应用于红土镍矿常规烧结与球团烧结试验的对比。熔剂主要包括石灰石、白云石和生石灰；固体燃料为焦粉。原料主要化学成分分别见表1与表2。由表1可知：铁矿A铁品位较高为65.03%，脉石成分(如 SiO_2、CaO、Al_2O_3、MgO等)较低，有害元素P、S极低，是一种优质的铁矿石烧结原料；红土镍矿含铁量为45.09%，含Ni量为0.86%，含 Cr_2O_3 量为3.45%，含 Al_2O_3 量为4.50%，烧损LOI为12.49%。因此，从成分看，该红土镍矿是一种褐铁矿型红土镍矿，其高烧损可能会导致常规烧结过程能耗高、强度差；铬铁矿铁品位为21.68%，Cr品位为27.75%(Cr_2O_3 质量分数为40.56%)，铬铁比 $w(Cr)/w(TFe)$ = 1.28，SiO_2、Al_2O_3 及MgO质量分数分别达到6.41%、13.22%和10.47%，含S、P杂质量少；生石灰CaO质量分数达到82.21%，可用以改善烧结混合料制粒性能及调节烧结矿碱度，石灰石和白云石作为烧结熔剂，用于调节烧结矿碱度及MgO质量分数。

此外，由表2可知，焦粉固定碳质量分数达到83.35%，P、S有害元素质量分数低，可很好地满足烧结过程的热量需求。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　原料主要化学成分和烧损(质量分数)

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

原料名称	TFe	FeO	Ni	Cr_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	P	烧损
铁矿 A	65.03	0.67	—	0.03	1.28	0.09	0.06	1.47	0.014	0.024	2.39
红土镍矿	45.09	1.21	0.86	3.45	5.70	0.12	5.58	4.50	0.011	0.001	12.49
铬铁矿	21.68	20.81	0.04	40.56	6.41	0.27	10.47	13.22	0.018	0.005	−1.49
石灰石	0.26	—	—	0.02	3.83	51.78	0.92	0.47	0.090	0.50	40.43
生石灰	0.22	0.00	0.00	0.00	4.20	82.07	1.81	1.18	0.091	0.009	10.42
白云石	0.10	—	—	0.29	30.81	0.10	20.66	0.44	0.004	0.014	46.67
焦粉	0.75	0.00	0.00	0.00	7.46	0.31	0.28	3.70	0.091	0.009	85.64

表 2　焦粉工业分析(质量分数)

Table 2　Industrial analysis of coke powder　%

固定碳(FC_{daf})	挥发分(A_d)	灰分(V_{daf})
83.35	5.84	10.81

注：d—干燥基；daf—干燥无灰基。

烧结试验主要原料粒度组成见表 3。由表 3 可知，铁矿 A 和红土镍矿粒度相对比较均匀，−0.15 mm 粒级占比较低，适合常规烧结工艺。但是，在球团烧结工艺中，原料需要先造球，然后进行烧结。因此，铁矿 A 和红土镍矿需要经过辊磨预处理使粒度达到造球要求后，才能用于造球。铬铁矿粒度较细，−0.15 mm 粒级占比为 93.90%，其中 −0.074 mm 可达 65% 左右，是一种精矿，可直接用于后续造球试验。熔剂(白云石、石灰石和生石灰) −3 mm 部分均在 75% 以上，可满足常规烧结工艺对其粒度的需求，但是球团烧结过程，也需将其辊磨至 −0.074 mm粒级占比达 65% 左右。固体燃料中，焦粉 −3 mm 部分达到 73.26%，基本满足常规烧结及球团烧结外加燃料粒度要求。

表 3　原料的粒度组成(质量分数)

Table 3　Size distribution of raw materials　%

原料名称	+8.00 mm	6.30 ~ 8.00 mm	5.00 ~ 6.30 mm	3.00 ~ 5.00 mm	1.00 ~ 3.00 mm	0.50 ~ 1.00 mm	0.25 ~ 0.50 mm	0.15 ~ 0.25 mm	−0.15 mm
铁矿 A	5.82	3.66	8.29	21.80	23.31	11.09	9.77	8.16	8.10
红土矿	6.10	4.06	6.00	22.35	44.78	6.43	5.83	1.17	3.28
铬铁矿	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.10	93.90
石灰石	0.00	0.00	0.63	13.23	37.41	23.44	14.75	4.10	6.41
生石灰	0.00	0.63	1.75	21.27	20.11	5.19	2.96	0.81	47.29
白云石	0.00	0.25	0.61	4.92	9.87	11.43	23.43	19.39	30.10
焦粉	3.26	1.70	3.70	18.08	15.23	15.46	14.10	5.22	23.25

试验造球使用的膨润土为印度膨润土，膨润土的化学成分见表 4，粒度分布及物理性能见表 5。由表 4、5 可知，膨润土蒙脱石质量分数为 99.86%(超过 60%)，2 h 吸水率为 487.59%，膨胀倍数为为 17.0 mL/g，按照GB/T 20973—2020 冶金球团用膨润土质量标准，除粒度偏粗外，其属于质量较好的一种。

表 4　膨润土化学成分(质量分数)

Table 4　Chemical composition of bentonite　%

Al_2O_3	SiO_2	Fe	K_2O	Na_2O	P	S	MgO	CaO
16.60	60.15	11.87	0.12	3.84	0.19	0.15	4.67	2.41

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表5 膨润土物理性能

Table 5 Physical properties of bentonite

蒙脱石/%	吸兰量/[g·(100g)$^{-1}$]	胶质价/%	2 h吸水率/%	膨胀倍数/(mL·g^{-1})	pH值/(30 g·L^{-1})	比表面积/(cm^2·g^{-1})	粒度组成(质量分数)/%	
							-0.074 mm	-0.043 mm
95.86	42.37	50.23	487.59	17.0	10.38	1032	87.6	46.00

1.2 研究方法

1.2.1 常规烧结

常规烧结主要包括配料、混合、制粒、布料、烧结、冷却和检测等步骤。烧结采用质量配料法，在设定碱度、$w(SiO_2)$和$w(MgO)$条件下进行配料，返矿外配比固定为25%。人工混匀三次后，加生石灰和消化水消化3 min，然后加水混匀至设定混合料水分后装入∅600 mm×1 400 mm的圆筒制粒机混合制粒，转速设定为30 r/min，制粒时间为5 min。在布料之前，事先往∅150 mm×700 mm烧结杯内加入1 kg的铺底料(10~16 mm)，然后将制粒后的混合料布入烧结杯内，烧结混合料高度为600 mm。烧结点火采用天然气点火，点火温度为(1 100±50)℃，点火时间为1.5 min，点火负压为5 kPa。点火完毕后将烧结负压调至12 kPa，从点火开始到烧结废气温度达到最高点后开始下降的那一刻所需的时间即为烧结时间。到达烧结终点以后，将抽风负压调整至6 kPa，冷却5 min后将烧结矿卸出在空气中自然冷却，最后进行落下、粒度筛分及转鼓强度等冷态性能检测。

两个配矿方案如表6所示。在铁矿A烧结中，固定碱度为1.75，MgO质量分数为1.80%，生石灰配比为3%，返矿配比为25%。在红土镍矿烧结中，固定碱度为1.40，自然MgO，返矿配比为25%。此外红土镍矿配矿方案中，铬铁精矿配比为10%，MgO/SiO_2质量比为0.36，Al_2O_3/SiO_2质量比为1.18。

表6 两种不同配矿方案

Table 6 Comparison of two different ore allocation schemes

配矿方案	碱度	$w(MgO)$/%	生石灰配比/%	返矿配比/%	铬铁精矿配比/%	MgO/SiO_2(质量比)	Al_2O_3/SiO_2(质量比)
铁矿A烧结	1.75	1.80	3	25	0	—	—
红土镍矿烧结	1.40	自然	3	25	10	0.36	1.18

1.2.2 球团烧结

球团烧结工艺流程如图1所示，主要包括：原料预处理、配料、混匀、造球、外滚焦粉、布料、干燥、点火、烧结、保温、破碎、冷却和筛分。先将粗的含铁矿粉、石灰石、白云石对辊破碎至-0.074 mm占比达到65%左右。然后，采用质量配料法进行配料计算，加入适量的膨润土，进行混匀，并在圆盘造球机(∅1000 mm，倾角45°，转速30 r/min)进行造球。造球适宜水分为7.5%左右，造球时间为10 min，造球结束后将生球(粒度为10~12.5 mm)与焦粉在圆筒混合机中外滚混匀，然后将混合料送至烧结杯中(∅150 mm×700 mm)进行烧结试验。在布料之前，同样需要在烧结杯内加入1 kg的铺底料(10~16 mm)。在球团烧结工艺中，需要先进行干燥。干燥温度控制在200~250 ℃，干燥时间为3 min，烧结点火采用天然气点火，点火温度为(1 100±50)℃，点火时间为1.5 min，点火负压为5 kPa。点火完毕后将烧结负压调制12 kPa进行烧结，到达烧结终点以后，将抽风负压调整至6 kPa冷却5 min后将烧结矿卸出在空气中自然冷却，最后进行落下、粒度筛分及转鼓强度等冷态性能检测。其烧结矿碱度、成分及返矿配比与常规烧结保持一致。

1.2.3 成品烧结矿性能评价

成品烧结矿的性能包括烧结矿的常温机械性能(冷态转鼓强度)和高温冶金性能(还原度、低温还原粉化及软融特性)两部分。烧结矿的冷态转鼓强度参照标准ISO 3271—1995执行。烧结矿的还原度(*RI*)和静态法低温还原粉化指数

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

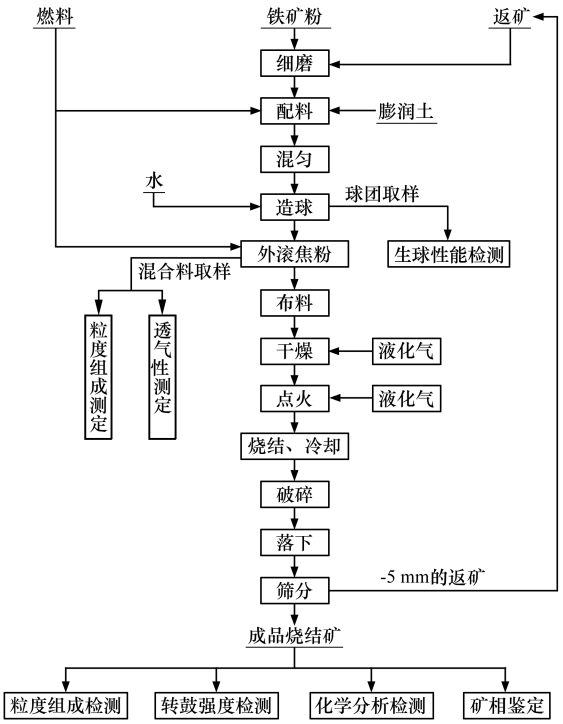


图 1　球团烧结工艺流程

Fig. 1　Flowsheet of pelleting-sintering process

(*RDI*) 分别参照 GB/T 13241—2017 和 GB/T 13242—2015 进行。

烧结矿的矿相分析主要包括鉴定烧结矿中的矿物组成、物相的百分含量和矿物之间的嵌布关系。样品为选定料比的成品烧结矿冶金性能样品(10 ~ 12.5 mm)，然后对其煮胶定型，再用半自动研磨抛光机制成光片在 Leica DM4500P 光学显微镜下进行鉴定。矿物的百分含量采用面积统计法，统计区域不低于 50 个，每个区域面积约 0.6 mm × 0.6 mm。

2　结果与讨论

2.1　常规烧结与球团烧结工艺指标对比

表 7 为铁矿 A 球团烧结工艺与常规烧结工艺烧结指标在返矿平衡下的对比。由表 7 可知：常规烧结工艺在焦粉用量为 4.90%，水分为 7.5%的条件下，烧结矿转鼓强度为 61.50%，成品率为 67.29%，烧结利用系数为 1.95 t/(m^2·h)，固体能耗高达 78.61 kg/t；而采用球团烧结新工艺后，焦粉用量可降低至 3.25%，烧结矿转鼓强度提高至 75.12%，成品率提高至 85.03%，利用系数维持在 1.9 t/(m^2·h)左右，而固体能耗则显著降低至 44.31 kg/t，降低幅度高达 43.6%。通过两种工艺对比，球团烧结新工艺能够显著提高成品率，改善烧结矿强度，降低固体能耗。

表 7　铁矿 A 球团烧结工艺与常规烧结工艺性能对比

Table 7　Comparison of traditional sintering process and pelletizing-sintering process for iron ore A

工艺	返矿配比/%	焦粉用量/%	水分/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	转鼓强度/%	成品率/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	固体能源消耗/(kg·t^{-1})
球团烧结	25	3.50	7.5	28.47	75.07	86.32	1.85	49.65
	25	3.35	7.5	29.15	75.12	85.03	1.92	44.31
	25	3.20	7.5	28.33	71.43	83.43	1.62	43.21
常规烧结	25	4.90	8.0	34.84	60.76	66.41	2.01	79.63
	25	4.90	7.5	32.43	61.50	67.29	1.95	78.61
	25	4.90	7.0	27.13	57.99	63.51	1.53	84.99

通过优化烧结水分和焦粉用量后，红土镍矿球团烧结工艺与常规烧结工艺性能在返矿平衡下对比如表 8 所示。由表 8 可知：红土镍矿作为一种褐铁矿型的复杂铁矿，由于烧损高、Al_2O_3 和 MgO 质量分数高，烧结过程难以形成液相，烧结矿强度差，转鼓强度仅为 46.27%；成品率较低，不到 65%；焦粉用量高，固体能源消耗极高，达到 142.92 kg/t；当采用球团烧结工艺后，烧结矿转鼓强度、成品率、利用系数分别提升至 58.66%、68.16%、1.19 t/(m^2·h)，固体能源消耗降低 22.78% 至 110.36 kg/t。可见，球团烧结新工艺也能改善红土镍矿这类复杂铁矿的烧结性能。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表8 红土镍矿球团烧结工艺与常规烧结工艺性能对比

Table 8 Comparison of traditional sintering process and pelletizing-sintering process for nickel laterite

工艺	返矿配比/%	焦粉用量/%	水分/%	烧结速度/(mm·min^{-1})	转鼓强度/%	成品率/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})	固体能源消耗/(kg·t^{-1})
常规烧结	25	8.50	18.00	32.07	46.27	64.88	1.06	142.92
球团烧结	25	6.50	18.50	33.05	58.66	68.16	1.19	110.36

由以上分析可知，球团烧结工艺能大幅度提高烧结矿产、质量，降低能耗，且该工艺不仅能应用于常规铁矿烧结，而且也可用于复杂铁矿烧结，对原料适应性强。

2.2 成品烧结矿性能对比

2.2.1 粒度组成

不同铁矿不同烧结工艺所获得的最佳烧结矿的粒度组成如表9所示。由表9可知，相比常规烧结而言，球团烧结所制备的成品烧结矿的5~10 mm粒度相对较少，而10~40 mm中其他粒级分布较为均匀。因此，表明由球团烧结新工艺制备的烧结矿具有均匀的粒度组成和较粗的平均粒度，将能保证在高炉内获得良好的透气性，为高炉高产低耗提供良好条件。

表9 成品烧结矿的粒度组成(质量分数)

Table 9 Size distribution of product sinter from different sintering processes %

铁矿	工艺	+40 mm	25~40 mm	16~25 mm	10~16 mm	5~10 mm
铁矿A	常规烧结	5.33	13.29	24.18	27.52	29.68
	球团烧结	4.44	16.78	26.56	28.89	23.33
红土镍矿	常规烧结	0.00	9.49	21.15	38.08	31.28
	球团烧结	7.30	11.64	17.95	34.90	28.21

2.2.2 化学成分

不同铁矿不同烧结工艺所获得的最佳烧结矿的化学成分如表10所示。由表10可知，常规烧结与球团烧结工艺所得烧结矿的化学成分基本相似。然而，值得注意的是，球团工艺所获得的烧结矿，其FeO质量分数均低于常规烧结工艺，这主要是因为球团烧结的焦粉用量较低，料层局部还原气氛减弱所导致。较低的FeO质量分数有利于改善烧结矿的还原性能，降低高炉冶炼焦比，可在降低生产成本的同时减少炼铁CO_2排放。

表10 成品烧结矿主要化学成分分析(质量分数)

Table 10 Main chemical composition of product sinter from different sintering processes %

铁矿	工艺	TFe	FeO	NiO	Cr_2O_3	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	S	P
铁矿A	常规烧结	57.12	9.56	—	—	8.82	5.07	1.78	1.34	0.003	0.001
	球团烧结	57.34	7.64	—	—	8.79	5.02	1.81	1.39	0.001	0.001
红土镍矿	常规烧结	41.55	28.13	0.98	5.53	10.92	7.79	6.84	5.41	0.002	0.001
	球团烧结	41.16	18.55	0.96	5.45	10.21	7.30	6.84	5.73	0.001	0.001

2.2.3 冶金性能

不同铁矿不同烧结工艺所获得的成品烧结矿的冶金性能如表11所示。由表11可知，相比于常规烧结而言，球团烧结工艺所制备的烧结矿还原性指数(*RI*)较高，而低温还原粉化$RDI_{+3.15\ mm}$略低，且均处于优质烧结矿范围。烧结矿的还原性及低温还原粉化性能主要受烧结矿中的矿物组成(黏结相、铁氧化物类型等)、矿物之间的嵌布关系和烧结矿的微观结构(孔隙、裂纹)等因素影响。球团烧结所制备的烧结矿FeO质量分数较低，还原性差的橄榄石相少，而还原性能优良的铁酸钙较多，因此其还原性能较好。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

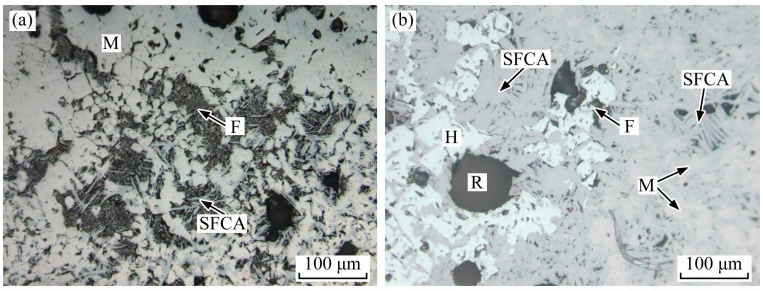
表 11　成品烧结矿的冶金性能(质量分数)

Table 11　Metallurgical properties of product sinter from different sintering processes　%

铁矿	工艺	*RI*	低温还原粉化指数		
			$RDI_{+6.3\ mm}$	$RDI_{+3.15\ mm}$	$RDI_{-0.5\ mm}$
铁矿 A	常规烧结	82.65	33.32	66.33	8.02
	球团烧结	85.48	31.34	65.21	9.11
红土镍矿	常规烧结	73.27	93.89	96.23	1.01
	球团烧结	74.65	92.20	95.89	1.25

2.3　烧结矿固结机理分析

铁矿 A 和红土镍矿常规烧结和球团烧结所制备成品烧结矿的微观结构分别如图 2、3 所示。由图 2 可知：铁矿 A 采用常规烧结所得的成品矿中，主要矿相为磁铁矿、尖晶石型橄榄石和复合铁酸钙(SFCA)，其中大部分 SFCA 包裹于尖晶石型橄榄石中，少量呈枝状分布于孔洞边缘；采用球团烧结工艺，成品烧结矿中片状 SFCA 和块状赤铁矿明显增多。由图 3 可知：采用常规烧结，所得烧结矿的固相主要为铁尖晶石，包括$(Fe,Mg)Fe_2O_4$、$Fe(Fe,Al)_2O_4$、$(Fe,Mg)(Fe,Al)O_4$，还有少量粒状的镍铁尖晶石和块状铬尖晶石，液相主要为共晶尖晶石型橄榄石和 SFCA，此烧结矿呈大孔薄壁结构，复合铁酸钙含量低并以枝状或板状结构在空洞边缘分布，同时铁尖晶石颗粒较为分散，固结效果较差；采用球团烧结工艺后，大孔薄壁结构向中孔厚壁结构转变，SFCA 含量增多，由孔洞边缘延伸至内部，可以更好的润湿铁尖晶石。可见，采用球团烧结工艺，由于混合料预先造球，可有效改善烧结料层的透气性，同时，其将固体燃料外裹于球团表面，避免了矿粉颗粒

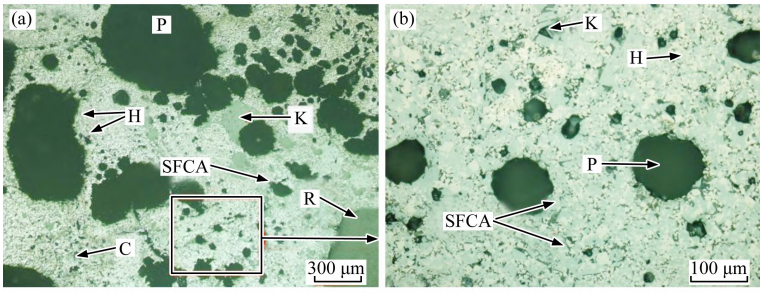


(a) 常规烧结；(b) 球团烧结

H—赤铁矿；F—尖晶石型橄榄石；SFCA—复合铁酸钙；M—磁铁矿；P—孔洞；R—树脂。

图 2　铁矿 A 烧结矿微观结构

Fig. 2　Microstructure of product sinter from nickel laterite sintering process



(a) 常规烧结；(b) 球团烧结

H—铁尖晶石；K—共晶尖晶石型橄榄石；SFCA—复合铁酸钙；C—铬尖晶石；P—孔洞；R—树脂。

图 3　红土镍矿烧结矿微观结构

Fig. 3　Microstructure of product sinter from nickel laterite sintering process

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

深裹燃料颗粒现象的发生，使固体燃料的燃烧条件及燃烧效果大为改善，这促进了烧结过程成矿动力学及热力学条件的改善。相对于常规烧结而言，球团烧结工艺所制备成品烧结矿SFCA形成量明显增多，结晶改善，晶粒尺寸明显增大，结构也更加致密。因此，烧结矿产、质量指标显著改善。

3 结 论

（1）普通铁矿采用球团烧结新工艺后，烧结矿转鼓强度由61.50%提高至75.12%，成品率由67.29%提高至85.03%，固体能源消耗则由78.61 kg/t大幅降至44.31 kg/t，而利用系数则维持在1.9 t/(m^2·h)的较高水平。红土镍矿采用球团烧结新工艺后，烧结矿转鼓强度由46.27%提高至58.66%，成品率由64.88%提高至68.16%，利用系数由1.06 t/(m^2·h)提高至1.19 t/(m^2·h)，固体能源消耗则由142.93 kg/t大幅降至110.36 kg/t。与常规烧结相比，球团烧结新工艺不但能显著改善烧结矿产、质量，降低固体能耗，也可显著降低CO_2排放，而且该工艺对原料适应性强。

（2）相比于常规烧结工艺，球团烧结工艺所制备的烧结矿FeO质量分数较低，且具备较好的冶金性能，比如更高的还原指数和相当的低温还原粉化率。

（3）球团烧结新工艺由于透气性能较好，料层氧位高，所制备的成品烧结矿中SFCA含量明显增加，且晶粒完善，结构优良，因此能够显著改善烧结矿的强度和冶金性能。

参考文献：

[1] 赵东明,刘金站. 高炉炉料结构及分析[J]. 铁合金,2010,41(5):14-17.
ZHAO Dongmin, LIU Jinzhan. Analysis of blast furnace burden structure[J]. Ferro-Alloys,2010,41(5):14-17.

[2] 许满兴. 我国高炉炉料结构的进步[J]. 炼铁,2001,20(2):24-27.
XU Manxing. Deve1opment of BF burden structure in China[J]. Ironmaking,2001,20(2):24-27.

[3] 裴元东,廖继勇,张俊杰,等. 铁矿粉烧结过程CO减排探讨[J]. 烧结球团, 2019,44(1):69-73.
PEI Yuandong, LIAO Jiyong, ZHANG Junjie, et al. Discussion on CO emission reduction in iron ore fines sintering process[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(1):69-73.

[4] 林高平,戴坚. 钢铁企业控煤减排的策略与举措[J]. 冶金能源,2018,37(3):3-5;8.
LIN Gaoping, DAI Jian. The way to reduce coal consumption in iron and steel enterprises[J]. Energy for Metallurgical Industry,2018,37(3):3-5;8.

[5] 张琦,沈佳林,许立松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. 钢铁,2021,56(10):152-163.
ZHANG Qi, SHENG Jialin, XU Lisong. Carbon peak and low-carbon transition path of China's iron and steel industry[J]. Iron & Steel,2021,56(10):152-163.

[6] 杨晓东,张丁辰,刘锟,等. 球团替代烧结—铁前节能低碳污染减排的重要途径[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程,2017,9(1):44-52.
YANG Xiaodong, ZHANG Dingchen, LIU Kun, et al. Substituted pelleting for sintering-An important approach of energy-saving, low-carbon and emission reduction before ironmaking[J]. Journal of Engineering Studies,2017,9(1):44-52.

[7] LI Yuan, ZHU Lei. Cost of energy saving and CO_2 emissions reduction in China's ironand steel sector[J]. Applied Energy, 2014,130(1):603-616.

[8] 薄胜岳,胡长庆,师学峰,等. 镁质熔剂性球团矿发展现状及展望[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2021,43(3):40-48.
BO Shengyue, HU Changqing, SHI Xuefeng, et al. Development and prospect of magnesium flux pellets[J]. Journal of Hebei United university natural sclence edition,2021,43(3):40-48.

[9] 吴耀光,肖步庆,朱立光,等. 电炉炼钢钢铁原料的现状分析与展望[J]. 钢铁,2021,56(11):55-62.
WU Yaoguang, XIAO Buqing, ZHU Liguang, et al. Current situation analysis and prospect of iron and steel raw material for electric arc furnace steelmaking[J]. Iron & Steel, 2021,56(11):55-62.

[10] 姜曦,裴元东,韩宏亮. 铁矿粉烧结技术进展[J]. 科技导报,2011,29(15):70-74.
JIANG Xi, PEI Yuandong, HAN Hongliang. Progress of iron ore sintering technology[J]. Science & Technology Review, 2011,29(15):70-74.

[11] 李寿宝,任志国. 厚料层烧结技术的完善与小球团烧结工艺的发展[J]. 烧结球团,1996,26(2):1-4.
LI Shoubao, REN Zhiguo. Improvement of thick bed sintering technology and development of small pellet sintering process[J]. Sintering and Pelletizing,1996,26(2):1-4.

(下转第103页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Steel,2020,55(8):11 – 18.

[4] 王欣,潘建,朱德庆,等. 铬复合氧化球团的制备工艺[J]. 钢铁,2020,55(3):23 – 28.
WANG Xin,PAN Jian,ZHU Deqing,et al. Process of pelletization of nickel laterite and chromite[J]. Iron and Steel,2020,55(3):23 – 28.

[5] 朱德庆,杨聪聪,潘建,等. 福建三钢带式焙烧机球团工艺研究[J]. 烧结球团,2020,45(4):27 – 34.
ZHU Deqing,YANG Congcong,PAN Jian,et aln. Research on pellets process of belt type roasting machine in Fujian Sangang[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4):27 – 34.

[6] 朱德庆,黄伟群,杨聪聪,等. 铁矿球团技术进展[J]. 烧结球团,2017,42(3):42 – 49.
ZHU Deqing,HUANG Weiqun,YANG Congcong,. Technical progress in iron ore pelletization[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(3):42 – 49.

[7] 赵连达,刘迎立,薛庆国,等. 添加赤铁矿对氧化球团性能的影响[J]. 烧结球团,2020,45(2):36 – 40;66.
ZHAO Lianda,LIU Yingli,XUE Qingguo,et al. Effects of adding hematite on the properties of oxidized pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(2):36 – 40;66.

[8] 王维兴. 提高高炉炉料中球团矿配比、促进节能减排[J]. 冶金管理,2018(9):53 – 58.
WANG Weixing. Improve the pellet ratio of blast furnace charge to promote energy conservation and emission reduction[J]. Metallurgical Industry Management,2018(9):53 – 58.

[9] 李杰,韩闯闯,杨爱民,等. MgO 含量对镁质熔剂性球团性能的影响[J]. 烧结球团,2017,42(2):31 – 37.
LI Jie,HAN Chuangchang,YANG Aimin,et al. Effect of MgO on the performance of magnesian fluxed pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(2):31 – 37.

[10] 李杰,信自成,杨爱民,等. 碱度对镁质熔剂性球团性能的影响[J]. 钢铁,2017,52(7):35 – 41.
LI Jie,XIN Zicheng,YANG Zicheng,et al. Effect of basicity on quality of magnesium fluxed pellets[J]. Iron and Steel,2017,52(7):35 – 41.

[11] 潘建,田宏宇,朱德庆,等. 回转窑结圈形成机理及应对措施的研究进展[J]. 钢铁,2020,55(7):13 – 22.
PAN Jian,TIAN Hongyu,ZHU Deqing,et al. Research progress of ringing formation mechanisms in rotary-kiln and its response measures[J]. Iron and Steel,2020,55(7):13 – 22.

(上接第 94 页)

[12] 朱德庆,郑国林,潘建,等. 低品位红土镍矿制备镍精矿的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(1):1 – 7.
ZHU Deqing,ZHENG Guolin,PAN Jian,et al. Study of producing nickel concentrate from low-grade laterite ore[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2013,44(1):1 – 7.

[13] 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 – 362.
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.

[14] 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.

[15] ZHU Deqing,XUE Yuxiao,PAN Jian,et al. Co-benefits of CO_2 emission reduction and sintering performance improvement of limonitic laterite via hot exhaust-gas recirculation sintering[J]. Powder Technology,2020,373:727 – 740.

[16] XUE Yuxiao,ZHU Deqing,PAN Jian,et al. An investigation into the co-sintering process of limonitic nickel laterite and low-grade chromite via multi-force fields[J]. Journal of Materials Research and Technology,2021,12:1816 – 1831.

[17] 朱德庆,郭正启,潘建,等. 分流制粒强化巴西某镜铁矿的烧结性能[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(11):3719 – 3726.
ZHU Deqing,GUO Zhengqi,PAN Jan,et al. Improving sintering performance of braziliansp ecularite bearingmixture by separated granulation sintering process[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2014,45(11):3719 – 3726.

[18] 朱德庆,周文涛,潘建,等. 含硼磁铁矿强化巴西赤铁矿球团的制备[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(2):348 – 355.
ZHU Deqing,ZHOU Wentao,PAN Jian,et al. Improving pelletization of razilian hematite byadding boron-containing magnetite[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2014,45(2):348 – 355.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net