利比里亚邦精矿复合造块工艺研究

韦 东[1]，李光辉[2]，黄三兵[3]
（1. 武钢资源集团有限公司，湖北 武汉 430070；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙 410083；
3. 武钢中非（香港）矿业有限公司，中国 香港 999077）

摘要： 针对常规烧结工艺中利比里亚邦精矿存在制粒性能差、烧结性能差等问题，本文采用复合造块工艺从水分、燃料用量、熔剂结构、基体料、球团料等条件对其成球性能和烧结性能进行研究，并与常规烧结工艺进行对比。结果表明：复合造块工艺参数在基体料水分为8.5%、燃料用量为4.5%、综合料碱度为1.30、返矿外配量为25%、w(MgO)为1.5%、生石灰用量为7.8%、球团用量为40%、球团直径为8～10 mm时，利比里亚邦精矿烧结性能显著提高；与常规烧结工艺相比，复合造块成品率从67.81%提高至76.15%，转鼓强度从63.00%提高至76.82%，利用系数从1.03 t/(m²·h)提高至1.41 t/(m²·h)，固体燃料消耗从63.81 kg/t降低至52.38 kg/t。微观结构表明，复合造块基体料矿相中针状和片状铁酸钙增多，球团料矿相以氧化程度较好的Fe_2O_3、未氧化充分的Fe_3O_4为主，微观结构更为致密，促进了烧结矿强度提高。

关键词： 复合造块；烧结；球团；铁精矿
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)03－0025－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.035

Research on process of composite agglomeration of concentrates in the state of liberia

WEI Dong[1], LI Guanghui[2], HUANG Sanbing[3]
(1. *WISCO, Wuhan* 430070, *Hubei, China*; 2. *School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*; 3. *China-Union (Hong Kong) Mining Company Limited, Hong Kong* 999077, *China*)

Abstract: In response to such problems as poor pelletizing performance and poor sintering performance of concentrates in the State of Liberia in conventional sintering process, the granulation performance and sintering performance of the composite agglomeration process are studied from such conditions as moisture, fuel consumption, flux structure, matrix material, pelletizing material, etc., and compared with the conventional sintering process. The results show that the sintering performance of concentrates in the State of Liberia is significantly improved when the composite agglomeration process parameters are as follows: the moisture of the matrix material is 8.5%, the amount of fuel is 4.5%, the alkalinity of the composite material is 1.30, the amount of return fine is 25%, w(MgO) is 1.5%, the amount of quicklime is 7.8%, the amount of pelletizing is 40%, and the diameter of the pelletizing is 8～10 mm. Compared with the conventional sintering process, the yield of composite agglomeration process is increased from 67.81% to 76.15%, the drum strength is increased from 63.00% to 76.82%, the utilization coefficient is increased from 1.03 t/(m²·h) to 1.41 t/(m²·h), and the solid fuel consumption is reduced from 63.81 kg/t to 52.38 kg/t.

收稿日期： 2021－12－10；**修回日期：** 2022－03－10
基金项目： 国家重点研发计划项目(2017YFB0304301)
作者简介： 韦 东(1972—)，男，高级工程师，从事选矿及造块方向的研究。
通讯作者： 李光辉(1972—)，男，博士，教授，从事复杂铁矿短流程加工、铁矿造块与直接还原、大宗固废资源高效清洁利用、共伴生稀散金属提取、矿物功能材料加工、低品位铝硅资源加工等方向的研究。

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

The microstructure shows that the matrix material phase of composite agglomeration has more needle – like and flaky calcium ferrate, and the pelletizing material phase is dominated by the better oxidized Fe_2O_3, and the less oxidized Fe_3O_4, while the microstructure is denser, which promotes the improvement of the sinter strength.

Key words: composite agglomeration; sintering; pelletizing; iron concentrates

近年来，中国粗钢产量保持全球第一，对铁矿石的高位需求也将长期不变[1]。然而，由于国内铁矿石品质相对较差，我国铁矿石主要依赖进口，而由于全球铁矿供应几乎被四大供应商垄断，导致我国钢铁行业没有议价权[2]。因此，为了增强中国钢铁行业的竞争力，开辟新的铁矿石供应来源是中国钢铁行业发展的一个重要途径。

据勘探，西非地区铁矿石资源量高达 5.045×10^{10} t，其中，几内亚、塞拉利昂、利比里亚和毛利塔利亚4国的铁矿石储量最为丰富[3-4]。目前，中国是西非铁矿投资最多的国家，其中，中国宝武集团拥有权益资源量 4.1×10^{9} t[5]。宝武集团拥有的铁矿石资源位于利比里亚邦州西南地区的邦山铁矿，其原矿铁品位约为35.8%，通过选矿后的精矿铁品位超过60%。

目前，利比里亚邦精矿主要用于武钢烧结，但是其制粒性能较差，严重影响了烧结矿的产、质量[6]。为了改善铁精矿的制粒性能，科研工作者做了大量的研究[7-9]。其中，复合造块工艺被认为是改善料层透气性的有效方法。陈革等[10]的研究表明，包钢对超细粒铁精矿实施复合造块之后，烧结矿产量提高，燃料消耗下降。张贺雷[11]对宝钢镜铁矿与含铁粉尘进行了复合造块工艺研究，大幅提高了镜铁矿在烧结中的比例，同时该工艺在宝钢完成了工业可行性研究。万新宇等[12]对钒钛磁铁精矿进行了复合造块烧结工艺研究，大幅提高了烧结矿的产、质量，同时解决了酸性炉料不足的问题。因此，基于复合造块工艺的优越性，本研究对利比里亚邦精矿进行了复合造块工艺研究，以达到提高利比里亚邦精矿烧结性能的目的。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用原料主要化学成分见表1。由表1可知，利比里亚邦精矿为磁铁矿，其TFe品位为62.40%，w(FeO)为18.06%，其主要脉石为 SiO_2，质量分数为11.32%。熔剂包括石灰石、生石灰及白云石，其中生石灰的 w(CaO)较高，为80.69%，烧损为17.02%，石灰石的 w(CaO)较低仅为49.52%，白云石的 w(MgO)为16.53%。膨润土的 SiO_2 和 Al_2O_3 质量分数分别为58.89%和15.64%。

表1 原料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions of raw materials %

名称	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P	S	LOI
精矿	62.40	18.06	11.32	0.31	0.30	0.35	0.094	0.110	0.017	0.052	-2.88
石灰石	0.26	—	2.69	0.81	49.52	3.35	0.064	0.029	0.007	0.035	42.77
生石灰	0.28	—	1.06	0.25	80.69	2.38	0.026	0.034	0.012	0.045	17.02
白云石	0.06	—	0.62	0.10	34.78	16.53	0.009	0.049	0.007	0.025	45.43
膨润土	2.58	—	58.89	15.64	2.22	1.07	2.690	1.290	0.237	0.030	12.43

精矿的粒度组成与物理性能分别如表2、3所示。由表2、3可知，该矿 -0.074 mm 的粒级占比仅为57.04%，比表面积仅为527 cm^2/g，远低于球团生产精矿比表面积1 800 cm^2/g 的要求[13]，静态成球性指数仅为0.12，基本无成球性。试验所用石灰石、生石灰和白云石的 -3 mm 粒级占比分别为83.03%、90.98%和83.54%。焦粉和无烟煤 -3 mm 粒级占比分别为72.13%和69.08%，平均粒度分别为1.77 mm和2.04 mm。

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

表 2　精矿的粒度组成(质量分数)

Table 2　Size distributions of concentrate　%

+0.250 mm	0.250 ~ 0.150 mm	0.150 ~ 0.074 mm	0.074 ~ 0.045 mm	−0.045 5 mm
6.21	15.08	21.67	22.09	34.95

表 3　精矿的物理性能

Table 3　Physical properties of concentrate

真密度/($g \cdot cm^{-3}$)	堆密度/($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙率/%	最大毛细水/%	吸水速度/($mm \cdot min^{-1}$)	最大分子水/%	静态成球性指数	比表面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$)
4.49	2.99	33.28	13.28	7.50	1.46	0.12	527

固体燃料包括焦粉和无烟煤，配比为 1∶3 组成，固体燃料的工业分析及灰分的化学分析如表 4 所示。由表 4 可知，焦粉和无烟煤的固定碳分别为 81.36% 和 68.05%，焦粉的挥发分为 3.11%，无烟煤的挥发分为 20.73%。

表 4　固体燃料的工业分析及灰分的化学分析(质量分数)

Table 4　Industrial analysis of solid fuel and chemical analysis of ash　%

燃料种类	M_{ad}	FC_{ad}	V_{daf}	A_d	S	P	灰分化学成分				
							TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO
焦粉	11.25	81.36	3.11	15.53	0.68	1.10	9.62	35.86	25.47	12.88	1.68
无烟煤	10.98	68.05	20.73	11.22	0.38	0.92	7.48	39.53	24.04	11.67	1.17

注：FC_{ad}为空气干燥基固定碳；M_{ad}为空气干燥基水分；A_d 为干燥基灰分；V_{daf}为干燥无灰基挥发分。

表 5 为膨润土的物理性质。由表 5 可知，膨润土的吸水率为 163.68%，膨胀容较低，仅为 6.80 mL/g，同时，膨润土粒度较细，−0.074 mm 占比为 95.56%。

表 5　膨润土的物理性质

Table 5　Physical properties of bentonite

膨胀容/($mL \cdot g^{-1}$)	吸水率/%	吸蓝量/[$g \cdot (100\ g)^{-1}$]	水分/%	−0.074 mm 粒级占比/%
6.80	163.68	23.79	7.96	95.56

1.2　研究方法

复合造块试验方法分为配料、球团料制备、基体料制备、二次混合、点火、抽风烧结、破碎整粒、取样、转鼓强度测定共 9 个步骤。其中配料、点火、抽风烧结、破碎整粒、取样和转鼓强度测定 6 个步骤与常规工艺烧结方法相同。球团料制备：首先将一部分铁精矿(占烧结含铁原料总量的 30%~70%)，配加一定量水分和黏结剂，再进行润磨预处理；经过预处理的物料，在圆盘造球机中制备成一定粒度(5 ~ 8、8 ~ 10、10 ~ 12 mm)的生球。基体料制备：首先将生石灰消化 5 min，再与剩余的铁精矿、燃料和返矿一起混合均匀，然后加水润湿，人工混匀。再把混匀料装入∅600 mm × 1 200 mm 圆筒混合机里进行制粒，得到基体料。二次混合：将制备好的球团料和基体料置于料盒中，以堆锥法混匀三次，得到烧结混合料。烧结杯试验参数见表 6。烧结杯试验结束后，测定及计算烧结相关评价指标，包括垂直烧结速度、成品率、转鼓强度、利用系数、固体燃料消耗及返矿平衡系数。最后，借助 Leica DMI4500P 型光学显微镜，进行烧结矿矿相鉴定和显微结构分析。

2　结果与讨论

2.1　基体料参数的影响

在综合料碱度为 1.30，w(MgO) 为 1.5%，燃料用量为 4.5%，生石灰用量为 7.8%，球团用量为 40%，球团直径为 8 ~ 10 mm 时，基体料水分对烧结性能的影响见图1(a)所示，根据

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

表 6 烧结杯试验参数

Table 6 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/℃	保温温度/℃	保温时间/min	冷却负压/kPa	冷却时间/min
700	170	5	7	1 150	900	1	5	3

前期常规烧结工艺优化的适宜水分，基体料水分按 8.0%、8.5%、9.0% 依次增加。由图 1(a) 可知，烧结速度、成品率、利用系数随着基体料水分的增加呈先升高后降低的趋势。当基体料水分质量分数为 8.5% 时，烧结性能达到最佳，烧结矿成品率为 74.15%，转鼓强度为 72.75%，利用系数为 1.54 t/(m^2·h)。

固定基体料水分为 8.5% 左右，燃料用量对复合造块烧结性能的影响见图 1(b)。由图 1(b) 可知，随着燃料用量的提高，成品率、转鼓强度和利用系数均呈现先升高后降低的趋势，其主要原因是无烟煤燃烧速度快。当燃料用量为 4.8% 时，烧结速度高达 27.01 mm/min，料层高温维持时间短，不利于成矿，造成烧结矿强度降低。

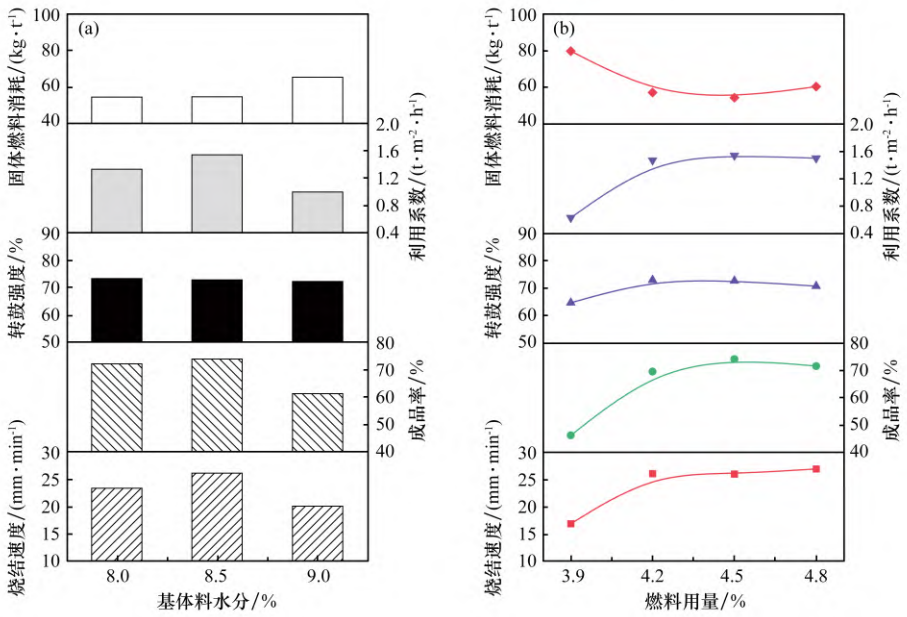


图 1 基体料水分和燃料用量对的烧结性能的影响

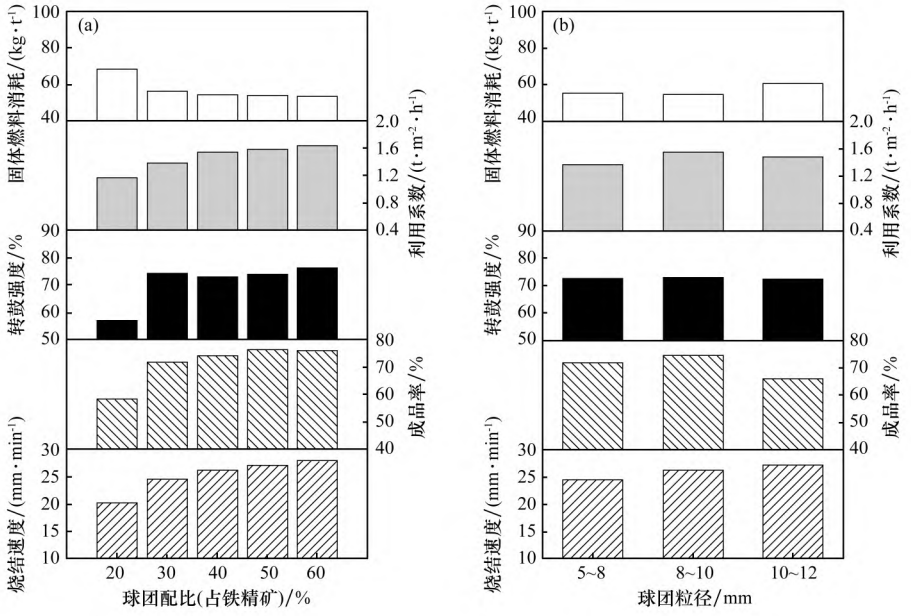
Fig. 1 Influence of moisture content and fuel content on sintering performances

2.2 球团料参数的影响

在基体料水分为 8.5%、燃料用量为 4.5% 条件下，球团料配比对烧结性能的影响如图 2(a) 所示，球团配比对基体料碱度的影响见表 7。由图 2(a) 可知，随着球团添加量增加，垂直烧结速度有明显的增加趋势，这是由于配加球团，显著改善了烧结混合料的料层透气性，从而显著提高烧结速度；球团配比增加，烧结技术经济指标明显改善。此外，由表 7 可知，球团配比越高，基体料的碱度越高，当球团配比为 40% 时，折算基体料的碱度已接近 2.07，此时的基体料碱度有利于铁酸钙体系物质的形成，从而提高造块产品的强度。

固定球团用量为 40%，球团料粒度对复合造块烧结性能的影响见图 2(b)。由图 2(b) 可知，随着球团粒度的增大，垂直烧结速度明显增加，其原因是球团粒度越大，对烧结混合料料层透气性改善作用越显著，复合造块产品质量有明显的提高；但是当球团粒径增大到 10 ~ 12 mm 时，复合造块成品率和转鼓强度略有降低，主要是由于烧结速度过快会造成烧结矿欠烧，因此适宜的球团矿粒度为 8 ~ 10 mm。

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



(a) 球团配比；(b) 球团粒度

图 2　球团配比和球团粒度对烧结性能的影响

Fig. 2　Influence of pellet ratio and particle size on sintering performances

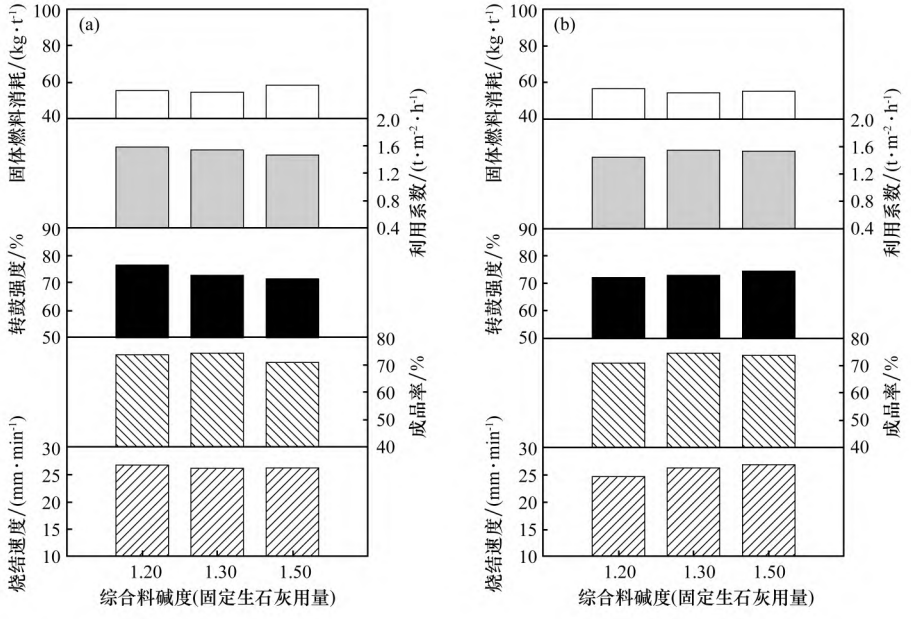
表 7　球团配比对基体料碱度的影响

Table 7　Influence of pellet ratio on basicity of matrix

球团配比/%	0	30	40	50	60
基体料碱度	1.30	1.80	2.07	2.44	2.97

2.3　熔剂结构的影响

在 w(MgO) 为 1.5%，基体料水分为 8.5%，综合燃料用量为 4.5%，球团用量为 40%，球团直径为 8 ~ 10 mm 的条件下，研究了综合料碱度对复合造块烧结性能的影响。固定生石灰用量，以石灰石调节综合料碱度的试验结果见图 3(a)。由图 3(a) 可知，随着综合碱度的提高，造块产品成品率、转鼓强度略有下降，主要是



(a) 生石灰用量固定；(b) 固定石灰石用量

图 3　碱度对烧结性能的影响

Fig. 3　Influence of basicity on sintering performances

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

由于铁精矿 SiO_2 质量分数高，为调节烧结碱度，配加的石灰石用量高，其在烧结过程中的分解消耗大量热量，不利于液相生成，影响产品强度。固定石灰石用量，以生石灰调节综合料碱度的试验结果见图3(b)。由图3(b)可知，随着综合碱度的提高，烧结成品率和转鼓强度有升高的趋势。生石灰一方面可以在原料制粒过程中改善精矿制粒性能；另一方面，生石灰有较高的反应活性，在烧结过程中更容易与铁矿物反应，高碱度有利于生产铁酸钙等物质[14]，可以显著提高复合造块产品的强度。综合料碱度对基准料碱度的影响如表8所示。

表8 综合料碱度对基体料碱度的影响

Table 8 Influence of basicity of composite material on basicity of matrix material

综合料碱度	1.20	1.30	1.50
基体料碱度	1.92	2.07	2.38

2.4 综合实验条件优化

在前期优化工艺参数下调整返矿外配量使烧结过程达到返矿平衡，其试验结果见表9。从表9可知，与常规烧结工艺相比，复合造块成品率由67.81%提高至76.15%，转鼓强度由63.00%提高至76.82%，利用系数由1.03 t/(m²·h)提高至1.41 t/(m²·h)，固体燃料消耗由63.81 kg/t降低至52.38 kg/t。由此可见，针对于利比里亚邦精矿，复合造块工艺是一种十分优异的烧结工艺。

表9 常规烧结与复合造块优化烧结性能对比

Table 9 Comparison of sintering performances between conventional sintering and composite agglomeration

方案	返矿用量/%	烧结负压/kPa	烧结速度/(mm·min⁻¹)	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m⁻²·h⁻¹)	固体燃耗/(kg·t⁻¹)	返矿平衡
常规(燃料4.8%)	35	-7	19.32	67.81	63.00	1.03	63.81	1.026
复合(燃料4.5%)	25	-7	23.15	76.15	76.82	1.41	52.38	0.966

在优化条件下，常规烧结矿产品和复合造块产品的主要化学成分见表10。由表10可知，复合造块产品的 $w(FeO)$ 明显高于常规烧结，其主要原因是复合造块所用的球团矿颗粒较大，而在烧结过程中高温维持时间短，其中的磁铁矿氧化不充分，导致了烧结矿的 $w(FeO)$ 高，而根据烧结现场生产经验，烧结矿 $w(FeO)$ 高对抑制低温还原粉化现象有利[15]。

表10 优化条件下常规烧结和复合造块产品主要化学成分(质量分数)

Table 10 Main chemical composition of conventional sintering and composite agglomeration products under optimized conditions %

方案	TFe	FeO	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O
常规(燃料4.8%)	52.13	7.24	12.52	1.33	9.80	0.67	0.06	0.01
复合(燃料4.5%)	51.11	10.04	13.39	1.48	10.45	0.71	0.08	0.01

2.5 复合造块对产品微观结构的影响

在优化的烧结工艺参数下，图4(a)、4(b)为常规烧结矿的矿相(不同区域)；而针对复合造块产品，分别研究了基体料区域[图4(c)、4(d)](不同区域)和球团料区域[图4(e)、4(f)](不同区域)的微观结构。

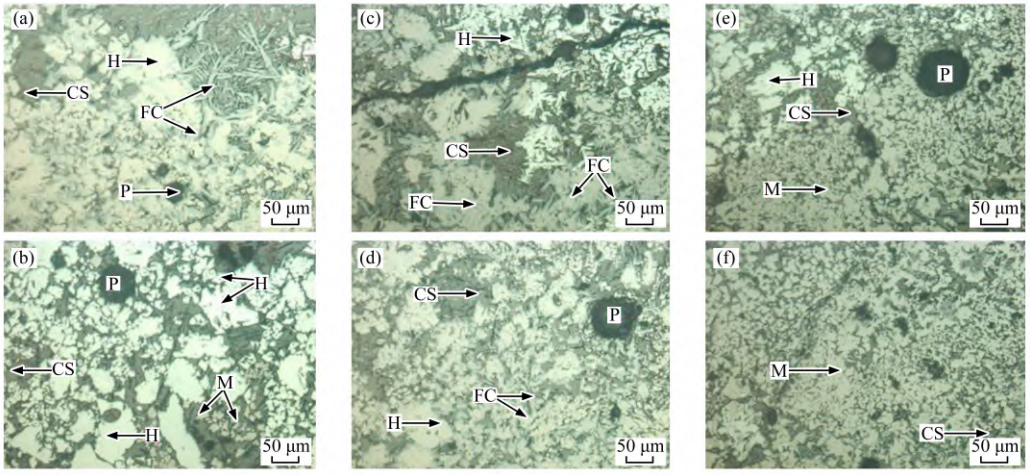
由图4(a)、4(b)可知，常规烧结条件下，烧结矿中硅、钙质量分数较高，产生的硅酸钙液相占比明显较高，而铁酸钙的液相占比相对较低，由于添加石灰石和白云石等熔剂量较多，烧结矿中由碳酸盐分解产生的孔洞也较为明显；硅酸盐液相连结 Fe_2O_3，同时有少量的铁酸钙与铁氧化物相连接，但是在烧结矿成矿机制中，硅酸钙尤其是 $2CaO·SiO_2$ 的存在对烧结矿强度有十分不利的影响。

由图4(c)、4(d)可知，复合造块基体料的矿相结构接近于目前主流的高碱度烧结矿，当复合造块综合碱度为1.3，球团配比为40%时，基体料部分的碱度已经高达2.0左右，有利于铁酸钙体系液相的生成，在基体料中，可以清

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

楚的看到大量的针状以及片状的铁酸钙。由图4(e)、4(f)可以看出，球团内部的矿物组成较为简单，主要是氧化程度较好的 Fe_2O_3、未氧化充分的 Fe_3O_4 以及少量脉石(主要是 SiO_2)；球团料内部的物相变化主要是在烧结过程中，靠基体料中的燃料燃烧产生热量，实现球团料内部磁铁矿的氧化和固结。虽然在烧结过程中，料层维持在 1 000 ℃以上的高温时间短，但是料层燃烧带高温可以达到 1 400 ℃以上，高温有利于球团料内部的铁氧化物氧化和结晶，使球团料保证一定的强度。

结合图4(b)、4(d)和图4(e)、4(f)可知，复合造块产品为高碱度的基体料配合酸性球团矿，高碱度基体料中主要靠铁酸钙液相黏结；球团料内部没有燃料，主要是靠基体料中的燃料燃烧热量促进球团料内部的固相反应进行。通过这种成矿机制，避免了高硅铁矿烧结过程中大量硅酸钙液相的形成，提高了烧结矿强度。



(a)、(b) 常规烧结矿矿相；(c)、(b) 复合造块产品基体料矿相；(e)、(f) 复合造块产品球团料矿相

P—孔洞；CS—硅酸钙；H—Fe_2O_3；FC—铁酸钙；M—Fe_3O_4。

图4　烧结矿的微观结构

Fig. 4　Microstructure of sinter

3　结　论

(1) 复合造块工艺能够大幅提高利比里亚邦精矿的烧结性能，与常规烧结工艺相比，复合造块成品率由 67.81% 提高至 76.15%，转鼓强度由 63.00% 提高至 76.82%，利用系数由 1.03 t/(m²·h) 提高至 1.41 t/(m²·h)，固体燃料消耗由 63.81 kg/t 降低至 52.38 kg/t。

(2) 复合造块产品为高碱度基体料配合酸性球团矿，高碱度基体料中主要靠铁酸钙液相黏结；球团料主要是靠基体料中的燃料燃烧热量促进球团料内部固相反应进行。通过这种成矿机制，避免了高硅铁矿烧结过程中大量硅酸钙液相的形成，显著提高了复合造块产品的强度。

参考文献：

[1] 刘长俭，李宜军．我国港口铁矿石进口仍将高位运行：2021 港口生产走势分析之二 [J]．中国水运，2021(6)：15－17.
LIU C J，LI Y J. China´s port iron ore imports will continue to run at a high level-The second analysis of port production trend in 2021 [J]. China Water Transportation，2021(6)：15－17.

[2] 连民杰，赖木收．铁矿石税费对中国冶金矿山的影响 [J]．中国矿业，2016，25(11)：43－51.
LIAN M J，LAI M S. The influence of iron ore tax on China´s metallurgical mines [J]. China Mining Magazine，2016，25(11)：43－51.

[3] 段红梅．我国铁矿石海外投资现状分析及策略研究 [J]．中国矿业，2013(10)：51－55.
DUAN H M. The current situation analysis and strategy research of iron ore overseas investment by China mines [J]. China Mining Magazine，2013(10)：51－55.

[4] MARKWITZ V，HEIN K A A，MILLERS J. Compilation of West African mineral deposits：Spatial distribution and mineral endowment [J]. Precambrian Research，2016，274，61－81.

(下转第 97 页)

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

[20] 裴元东，张俊杰，祁成林．适宜烧结烟气循环工艺的探讨[J]．烧结球团，2019，44(2)：74－77.
PEI Yuandong，ZHANG Junjie，QI Chenglin. Discussion on proper sintering flue gas recirculation process [J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(2)：74－77.

[21] 裴元东，吴胜利，张俊杰，等．烧结配加高炉瓦斯灰替代燃料降低 NO_x 排放实践[J]．烧结球团，2020，45(1)：73－76.
PEI Yuandong，WU Shengli，ZHANG Junjie. Practice of reducing NO_x emission by sintering with blast furnace gas ash as substitute fuel [J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(1)：73－76.

(上接第 31 页)

[5] 胡鹏，曾国平，刘江涛，等．西非铁矿资源现状及潜力分析[J]．地质学报，2021，95(4)：1306－1319.
HU P，ZENG G P，LIU J T，et al. Status and potential of iron ore resources in west Africa [J]. Acta Geologica Sinica，2021，95(4)：1306－1319.

[6] 史先菊，李军，冯红云．利比里亚邦矿烧结性能试验研究[C]//2014 年度全国烧结球团技术交流年会论文集．厦门：全国烧结球团信息网，2014：51－54.
SHI X J，LI J，FENG H Y. Experimental study on sintering performance of Liberia Bang Ore [C]//Proceedings of 2014 National Sintering Pellet Technology Exchange Conference. Xiamen：National sintering and pelletizing information network，2014：51－54.

[7] 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 X H，ZHANG Y X，JI Z Y，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.

[8] JIANG T，LI G H，WANG H T，et al. Composite Agglomeration Process(CAP) for preparing blast furnace burden [J]. Ironmaking & Steelmaking，2010，37(1)：1－7.

[9] 张元波，杜明辉，李光辉，等．复合造块法在难处理含铁资源中的应用新进展[J]．烧结球团，2016，41(4)：39－44.
ZHANG Y B，DU M H，LI G H，et al. New advances on application of composite agglomeration process in hard-to treat iron-nearing mineral resources [J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(4)：39－44.

[10] 陈革，王瑞军，沈茂森．包钢自熔性复合烧结矿试验研究[J]．矿冶工程，2013，33(3)：98－100；103.
CHEN G，WANG R J，SHEN M S. Experimental study on self-fluxing composite sinters of Baogang group [J]. Mining and Metallurgical Engineering，2013，33(3)：98－100；103.

[11] 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 H L. Research on composite agglomeration process with high-ratio of specularite ore and iron-bearing dust of Baosteel [D]. Changsha：Central South University，2014.

[12] 万新宇，吕庆．钒钛磁铁矿的复合造块新工艺[J]．钢铁，2014，49(6)：12－17.
WAN X Y，LYU Q. Vanadium-titanium magnetite concentrates by composite agglomeration process [J]. Iron and Steel，2014，49(6)：12－17.

[13] 胡志清，潘建，朱德庆，等．铁精矿原料特性及其对成球性能的影响[J]．烧结球团，2013，38(4)：42－45；49.
HU Z Q，PAN J，ZHU D Q，et al. Raw material characteristics of iron ore concentrate and its influence on balling performance [J]. Sintering and Pelletizing，2013，38(4)：42－45；49.

[14] 王永红，任立群，陆志宏，等．生石灰配比对烧结过程的影响[J]．烧结球团，2012，37(6)：23－26.
WANG Y H，REN L Q，LU Z H，et al. Influence of proportion of burnt lime on sintering process [J]. Sintering and Pelletizing，2012，37(6)：23－26.

[15] 张朝晖，徐凯强，邢相栋，等．烧结矿低温还原粉化影响因素研究进展[J]．钢铁研究学报，2021，33(6)：453－460.
ZHANG Z H，XU K Q，XING X D，et al. Research progress of influence factors on low-temperature reduction degradation [J]. Journal of Iron and Steel Research，2021，33(6)：453－460.

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