烧结提高非主流矿与经济矿比例实践

方 亮[1]，王 平[2]，孙社生[1]，谢 蒙[2]，龙红明[2]
（1. 马鞍山钢铁股份有限公司，安徽 马鞍山 243000；2. 安徽工业大学 冶金工程学院，安徽 马鞍山 243032）

摘要：当前进口主流矿品质明显下降，主要成分 Al_2O_3 呈上升趋势，烧结生产需要采购大量的中硅低铝资源以降低高炉炉渣 Al_2O_3 含量。降低主流矿比例，寻找非主流矿和经济矿，对于炼铁工序降本增效至关重要。本文主要阐述了马钢公司在强化铁矿石市场寻源工作基础上，采用铁前一体化优化配矿技术，精心设置烧结、球团和高炉工序约束条件，在保证烧结矿质量稳定和高炉生产低耗高效基础上，对中长期烧结、球团配矿结构做出的重大变动。该变动将马钢南、北区非主流矿和经济矿质量分数分别从 16.0%、9.0% 提高至 30.0%、24.0%，使铁水成本有了明显的下降。

关键词：烧结；球团；高炉；非主流矿；优化配矿
中图分类号：TF046.4；TF52 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－8764(2024)04－0026－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.054

Practice of increasing proportion of non-primary ore and economic ore in sintering

FANG Liang[1], WANG Ping[2], SUN Shesheng[1], XIE Meng[2], LONG Hongming[2]
(1. Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243000 Anhui, China;
2. School of Metallurgy Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032 Anhui, China)

Abstract: At present, the quality of primary imported iron ore significantly declined, with the main component such as Al_2O_3 showing an upward trend. It is necessary to use the iron ores with the medium-silicon and low-aluminum to reduce the Al_2O_3 content in blast furnace slag. It is important to reduce the cost and improve the efficiency in the ironmaking process according to decrease the proportion of primary iron ores and seek the non-primary and cost-effective ores. Based on enhanced sourcing efforts in the iron ore market, an integrated optimization blending system was adopted to optimize the sintering, pelletizing, and blast furnace burden structure at Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd.. This optimization increased the proportion of non-primary and cost-effective ores in south zone and north zone of Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd. from 16.0% and 9.0% to 30.0% and 24.0%, respectively, resulting in a significant reduction in hot metal costs.

Key words: sintering; pelletizing; blast furnace; non-primary ore; optimize ore blending

目前，世界范围内主流矿主要是指淡水河谷、力拓、必和必拓和福蒂斯丘 4 大矿山出产的铁矿石。经济矿主要是指具有一定折扣、性价比较高的铁矿石。随着铁矿粉资源的不断消耗，各类铁矿粉呈质量劣化趋势[1]。一些大型钢铁公司含铁原料在 1 000 万 t/a 以上，其中 80% 依赖 4 大矿山，其成分 Al_2O_3 含量呈上升趋势，故混匀配矿需采购大量的中硅低铝等非主流和经济矿资源以降低高炉炉渣 Al_2O_3 含量。但同时这些矿粉其它有害元素多且烧结性能不佳，且精粉粒度细、黏

收稿日期：2023－04－25；**修回日期：**2023－07－26
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51774005)
作者简介：方 亮(1977—)，男，高级工程师，从事烧结、高炉方面的工作。
通信作者：王 平(1963—)，男，教授，从事炼铁新工艺方面的研究。

性较大，大量使用将影响料厂卸料效率和烧结透气性。

当前铁前一体化配矿模型是一种联动烧结、球团、高炉工序的配矿模型，是在几千种配料方案中寻求质量符合要求的铁水成本最低配矿方案[2-7]。现场对铁前一体化配矿模型的应用褒贬不一，反映的主要问题是利用铁前一体化配矿模型求解出来的配矿方案往往给高炉生产或烧结生产带来波动，给积极寻找性价比高的非主流矿和经济矿替代主流矿的信心带来干扰。

针对配矿存在的问题，从实际情况出发，在保证烧结矿质量稳定和高炉生产低耗高效基础上，采用铁前一体化优化配矿技术，对马钢中长期烧结、球团和高炉配矿结构进行优化，大幅提升非主流矿和经济矿的使用比例，使铁水成本有了明显的下降。本文对其进行了重点阐述，以期为同行提供借鉴与参考。

1　原料特性分析

铁矿粉常温下的自身特性包括矿粉的化学成分、粒度组成、含水量、孔隙度、制粒性以及铁矿粉的种类等。铁矿粉的烧结特性与其堆积密度、颗粒大小、颗粒形状、颗粒黏结性、烧损量等均有一定关系[8]。磁铁矿的黏结性能差，湿容量较小，容易使烧结料层的过湿带增厚，从而使烧结料层的透气性恶化，因此实际生产中磁铁矿的配比不宜过高[9]。针对铁矿粉制粒，准颗粒形成的主要过程是黏附粉（<0.25 mm 的细颗粒）黏附于核颗粒（>1.0 mm 的粗颗粒）之上的过程。因此，粒度较大的富矿粉宜与粒度较小的精矿粉互补搭配使用。针对粒度较细的混匀矿粉，生产中可以采用比生石灰更优的黏结剂强化制粒，改善料层透气性和提高成品矿强度[10]。

铁矿粉高温特性包括铁矿粉的同化性、液相流动性、黏结相自身强度、铁酸钙生成特性等[11]。同化温度是指在固定烧结时间的条件下，铁矿粉与 CaO 发生反应的最低温度。同化温度越低，在烧结过程中越容易生成液相[12]。基于烧结矿粉的有效固结、烧结料层透气性方面考虑，作为核矿石的粗粒过分熔化并不被生产人员所推崇，所以铁矿粉的同化温度并非越低越好，但通常高水化程度的褐铁矿同化温度比较低。液相流动性指数是指在烧结过程中铁矿粉与 CaO 反应而生成液相的流动能力，它表征的是黏结相的“有效黏结范围”[13]。液相流动性高可以提升烧结矿的固结强度，但过高易形成烧结体的薄壁大孔结构，使固结强度降低，也使烧结矿还原性降低[14]。故混匀矿适宜的液相流动性是确保烧结矿有效固结的基础。铁矿粉的酸性脉石（SiO_2）是烧结生成液相的主要组分，一定范围内，其含量越高，烧结过程生成的液相越多。

目前，马钢烧结所用铁矿粉主要化学成分及基础特性参数、铁矿粉粒度组成分别如表 1 与表 2 所示。

2　铁前一体化配料模式

铁前一体化配料模式以铁水成本最低为目标，适用于中长期配矿计划。烧结、球团和高炉单独优化配料则用于短期存量铁矿石配矿计划的调整。

2.1　约束条件设置

铁前烧结、球团和高炉一体化配料时，对应的是几十种矿和 3 种以上的有害元素组合。以铁水成本最低或者钢铁厂利润最高为目标函数的求解是约束条件下的非线性规划求解问题，其对烧结、球团和高炉各工序的要求通过对工艺条件、铁矿石用量上下限的约束来实现。这些约束的目的是稳定烧结矿、球团成分和质量，满足高炉稳定顺行和铁水质量需求。如烧结工序配矿不能有目的地对各种铁矿粉上、下限进行合理的选择，就无法实现真正意义上的“优化配矿”，而导致配矿后的烧结生产只能是通过如配碳量、机速、负压、料层高度等操作制度的调整去迎合烧结原料配比的改变。

依据铁矿粉的化学成分、基础特性参数和粒度分布有目的地对各种铁矿石进行合理的选择和使用，可优化烧结配矿，提高烧结矿质量和保持烧结生产稳定。烧结矿中 SiO_2 的含量高低不仅影响烧结矿质量，而且影响烧结矿碱度稳定。通过进口铁矿石低 SiO_2 的特点来改善非主流矿中高 SiO_2 矿的缺点，使 SiO_2 质量分数控制在 5.0%~5.5%，既不会减少液相量，也不会造成烧结矿转

表1 铁矿粉主要化学成分(质量分数)及基础特性

Table 1 Main chemical compositions and basic characteristics of iron ore fines

品种	质量分数/%									液相流动性指数
	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	S	P	MgO	CaO	烧损	
主流矿1	57.03	0.22	4.93	2.59	0.053	0.150	0.15	0.07	7.50	3.12
主流矿2	61.34	0.26	3.51	2.39	0.018	0.090	0.07	0.04	5.40	2.84
主流矿3	62.21	0.34	4.49	2.26	0.014	0.090	0.13	0.03	4.00	2.80
主流矿4	61.50	—	4.20	1.90	0.020	0.090	0.30	0.03	5.48	2.80
主流矿5	58.20	0.30	4.80	1.50	0.007	0.054	0.06	0.05	10.30	4.05
主流矿6	56.48	0.28	6.60	1.59	0.012	0.042	0.06	0.03	11.24	4.05
主流矿7	65.06	0.62	2.10	1.29	0.012	0.070	0.07	0.01	3.50	1.44
主流矿8	62.13	1.80	5.81	1.11	0.004	0.049	0.17	—	2.40	2.64
主流矿9	63.20	0.55	4.88	1.61	0.012	0.085	0.06	0.02	3.40	3.84
非主流矿1	64.00	—	6.00	1.20	0.100	0.050	0.84	0.49	1.00	3.50
非主流矿2	66.00	28.33	8.00	0.50	0.030	0.010	0.20	0.20	-1.00	4.80
非主流矿3	61.11	0.38	8.26	1.30	0.010	0.010	0.08	0.05	2.44	5.41
非主流矿4	57.74	0.83	13.35	0.89	0.009	0.055	0.09	0.07	3.70	5.89
非主流矿5	61.23	2.05	8.38	1.58	0.010	0.040	0.08	0.01	2.00	3.80
非主流矿6	56.83	0.22	7.15	1.71	0.053	0.119	0.15	0.07	7.53	3.67
非主流矿7	56.67	—	6.31	3.21	0.076	0.010	0.60	0.25	8.12	5.73
非主流矿8	58.20	—	5.00	2.48	0.034	0.062	—	—	8.00	5.73

表2 铁矿粉粒度组成(质量分数)

Table 2 Particle size composition of iron ore fines %

品种	质量分数/%									平均粒度/mm
	>8 mm	[8,5) mm	[5,3) mm	[3,1) mm	[1,0.5) mm	[0.5,0.25) mm	[0.25,0.15) mm	[0.15,0.074) mm	[0.074,0] mm	
主流矿1	14.19	8.65	7.37	14.45	16.53	12.21	8.50	10.15	7.95	2.73
主流矿2	11.90	15.67	15.15	16.21	10.93	10.28	7.24	5.56	7.06	3.21
主流矿3	10.94	15.10	12.83	16.26	17.90	9.80	6.00	10.17	1.00	3.04
主流矿4	20.15	26.51	18.02	15.53	12.87	3.07	1.89	1.76	0.20	4.80
主流矿5	13.01	14.33	15.71	27.16	16.23	7.04	6.01	0.41	0.10	3.50
主流矿6	6.75	4.15	9.09	8.51	8.08	11.99	5.25	24.77	21.41	1.57
主流矿7	16.25	12.30	16.88	22.52	9.45	6.39	5.30	6.14	4.77	3.59
主流矿8	20.84	8.11	13.25	32.08	13.92	4.40	4.35	1.08	1.97	4.19
主流矿9	17.69	10.24	12.80	15.33	11.14	10.60	8.15	7.08	6.97	3.31
非主流矿1	—	—	—	—	—	—	1.64	26.94	71.42	0.08
非主流矿2	—	—	—	—	—	—	—	7.98	92.02	0.01
非主流矿3	7.00	17.59	17.37	17.36	11.47	10.34	7.24	7.51	4.12	2.98
非主流矿4	8.47	12.06	16.69	13.73	13.62	8.63	9.48	16.03	1.29	2.70
非主流矿5	6.85	15.25	11.78	8.42	13.14	6.02	5.66	14.52	18.36	2.44
非主流矿6	2.12	4.34	10.87	11.11	12.63	9.93	11.77	10.93	26.30	1.31
非主流矿7	15.44	11.22	19.59	34.04	7.38	5.10	3.06	2.71	1.46	3.75
非主流矿8	10.02	10.83	17.65	32.58	9.48	6.20	4.09	4.95	4.00	3.12

鼓指数下降。一定含量的 Al_2O_3 能促进铁酸钙的生成，提高烧结矿强度，但会造成炉渣黏度增加，流动性减弱[15]。根据长期生产经验，当 $w(Al_2O_3)/w(SiO_2)$ 为 0.32 ~ 0.37 时，烧结矿强度最好。

当生产高硅低铁的烧结矿时，添加 MgO 能够改善烧结矿自然粉化和低温还原粉化性能，且对提高烧结矿强度、高温还原性能有一定的效果[15]。当铁矿原料由高硅低铁向低硅高铁转变时，以往软熔性能差、易粉化的情况随着烧结矿 SiO_2 含量的降低而得到明显改善，但 MgO 在高碱度低硅高铁的烧结矿中的负面影响逐渐显现[16]。当碱度为 2.0 的烧结矿 MgO 质量分数从 1.15% 提高到 3.50% 时，转鼓强度从 71.33% 降低到 61.13%[17]。在烧结过程中，MgO 的含量会抑制铁酸钙的生成并增加硅酸二钙和透明玻璃的含量，这些结构对烧结矿强度有不利影响，从而导致烧结矿的转鼓指数明显下降。

烧结矿的碱度对烧结矿的强度和高温冶金性能至关重要，宜控制在 1.80 ~ 2.20。按入炉硫负荷、铁水温度及稳定性考虑，高炉炉渣碱度一般控制在 1.19 ± 0.02。同时结合南北厂烧结产能，南区高炉烧结配比小，烧结矿碱度控制在 2.0 ~ 2.1，北区高炉烧结配比相对高，烧结矿碱度控制在 1.85 ~ 1.95。

试验[18]表明，可用单种矿液相流动性指数加权平均值表征混匀矿的液相流动性指数。为维持烧结矿强度和生产稳定性，在减少主流矿比例，增加非主流矿和经济矿比例时，混匀矿的主要化学成分和同化温度、液相流动性指数要保持稳定。马钢烧结配矿实际表明，当混匀矿最低同化温度控制在 1 270 ~ 1 310 ℃时，混匀矿流动性指数可控制在 3.0 ~ 3.8。但单种矿其它基础特性(如铁酸钙生成含量)加权平均值不能表征混匀矿对应的指数。烧结工序优化配矿约束条件如表 3 所示。

生产中，为了追求高炉生产稳定性，需对高炉生产关键参数如炉料结构、入炉综合品位、铁水 P 含量、渣中 Al_2O_3 含量、渣中 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$、炉渣碱度和有害元素负荷进行限制，如表 4 所示。炉渣中MgO可以促进高炉渣的高温流动性，但炉渣 $w(MgO)/w(Al_2O_3)$ 也要控制在合适的范围内，其取值范围与原燃料、炉温稳定性有关[19-20]，目前控制在 0.44 ~ 0.48。同时为了充分发挥公司烧结、球团工序产能，需对自产的烧结矿、球团矿用量上下限进行限制。

表 3　烧结工序优化配矿约束条件

Table 3　Constraints of ore blending optimization for sintering process

参数	2022 年 7 月南区	2022 年 7 月北区
烧结矿 $w(SiO_2)$/%	5.0 ~ 5.5	5.0 ~ 5.5
烧结矿 $w(Al_2O_3)/w(SiO_2)$	0.32 ~ 0.37	0.32 ~ 0.37
烧结矿 R	2.0 ~ 2.1	1.85 ~ 1.95
烧结矿 $w(MgO)$/%	≤1.95	≤1.80
混匀矿最低同化温度/℃	1 270 ~ 1 310	1 270 ~ 1 310
混匀矿液相流动性指数	3.0 ~ 3.8	3.0 ~ 3.8

表 4　高炉工序优化配矿约束条件

Table 4　Constraints of ore blending optimization blast furnace process

参数	2022 年 7 月南区	2022 年 7 月北区
自产烧结矿配比(质量分数)/%	≥70.0	≥72.0
自产带焙球团矿配比(质量分数)/%	≥20.0	≥6.0
外购球配比(质量分数)/%	—	≤7.0
澳块配比(质量分数)/%	≤10.0	≤15.0
入炉品位(质量分数)/%	≥58.0	≥58.5
铁水 $w(P)$/%	≤0.120	≤0.120
炉渣 $w(Al_2O_3)$/%	≤16.00	≤15.80
炉渣二元碱度 R	1.18 ~ 1.20	1.18 ~ 1.20
炉渣 $(MgO)/(Al_2O_3)$	0.44 ~ 0.48	0.44 ~ 0.48
入炉锌负荷/$(kg\cdot t^{-1})$	≤300	≤250
入炉碱负荷/$(kg\cdot t^{-1})$	≤4.00	≤3.30

2.2　非主流矿和经济矿替代实践

生产实践表明：非主流矿和经济矿替代主流矿有 3 个原则。其中，第一原则：与主流矿化学成分及特性相同的非主流矿可以替代主流矿。非主流矿 6(新库利矿)与主流矿 6(杨迪矿)的化学成分及高温特性基本接近，新库利矿的同化层厚度和液相流动性略低，黏结相强度略高。表 5 为配用新库利矿粉替代杨迪矿烧结杯试验结果。其中，

表5 配用新库利矿替代杨迪矿烧结杯试验结果

Table 5 Results of sintering pot test using new Kooly fines instead of Yandi fines

方案名称	混合料水分/%	堆密度/($t\cdot m^{-3}$)	垂直烧结速度/($mm\cdot min^{-1}$)	利用系数/($t\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$)	转鼓指数/%	成品率/%	固体燃料消耗/($kg\cdot t^{-1}$)
方案1	6.07	1.68	23.05	1.38	66.53	73.03	72.23
方案2	6.07	1.69	22.64	1.37	68.27	73.28	71.85
方案2－方案1	0.00	0.01	－0.41	－0.01	1.73	0.25	－0.38

方案1为配用杨迪矿，即基准组；方案2在方案1的基础上，采取配用10%的新库利矿替代10%的杨迪矿。由表5可知，新库利矿较其所替代杨迪矿烧损相对小、粒度细，烧结反应充分，对提高转鼓强度和成品率、降低固体燃料消耗有利，但新库利矿的SiO_2、S、P含量较高。

非主流矿和经济矿替代主流矿第二原则：若非主流矿化学成分优势略低于主流矿，但在烧结杯试验中总体效果好于主流矿。如非主流矿3(巴西CSN矿)是一种赤铁矿，品位为61.11%，略低于主流矿8(巴西BRBF矿)；SiO_2、Al_2O_3含量略高于主流矿8；两者有害元素含量均较低；巴西CSN矿平均粒度为2.98 mm，粒度总体偏粗，但小于巴西BRBF矿。巴西CSN矿的液相流动性指数为5.41，高于巴西BRBF矿，在铁矿粉中总体处于中等偏上水平。表6为CSN矿替代BRBF矿烧结杯试验配矿方案，方案1为基准组，配用BRBF矿质量分数为7.5%，方案2配用CSN矿质量分数为7.5%。表7为CSN矿替代BRBF矿烧结杯试验结果。由表7可知，替代后，垂直烧结速度降低，生产率上升，成品率大幅度上升，转鼓强度持平，固体燃料消耗大幅度下降，烧结矿平均粒度上升。

非主流矿和经济矿替代主流矿第三原则：非主流矿互补与相互结合原则。如非主流矿7(超特粉)是中品位褐铁矿，铝、锰偏高，硫磷偏低，是一种高烧损的铁矿，同化温度低，液相流动性指数偏高，烧结透气性好，大比例使用影响烧结矿强度，可搭配低铝巴西粉或者低铝的精粉，如非主流矿1(烧结精)或非主流矿2(张庄精)，非主流矿的相互结合就可减少主流矿的应用比例。

2.3 优化配矿提升非主流矿和经济矿使用量

表8为2022年马钢烧结混匀矿结构变化情况，表9为烧结矿实际质量变化情况，与表8中混匀矿结构相对应。由表8与表9可看出，从2022年7月始，马钢南区主流矿从81%降到65%，北区主流矿从88.5%降到73%；马钢南区非主流矿从16%上升到30%，北区非主流矿从9%上升到24%。尽管混匀矿配矿计划变动较大，按照表3、4所列的约束条件执行，依然可保证烧结矿主要化学成分和质量的稳定。

表6 巴西CSN矿替代巴西BRBF矿烧结杯试验配矿方案(质量分数) %

Table 6 Ore blending scheme of sintering pot test using CSN fines instead of BRBF fines

方案名称	巴西卡粉	巴西SSFT矿	纽曼矿	皮尔巴拉矿	杨迪矿	巴西SFHT矿	巴西BRBF矿	巴西CSN矿
方案1	19.00	15.50	17.50	18.50	18.00	4.00	7.50	0.00
方案2	19.00	15.50	17.50	18.50	18.00	4.00	0.00	7.50

表7 CSN矿替代BRBF矿烧结杯试验结果

Table 7 Results of sintering pot test using CSN fines instead of BRBF fines

方案名称	混合料水分/%	堆密度/($t\cdot m^{-3}$)	垂直烧结速度/($mm\cdot min^{-1}$)	生产率/($t\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$)	转鼓指数/%	成品率/%	固体燃料消耗/($kg\cdot t^{-1}$)	平均粒度/mm
方案1	6.11	1.670	30.50	1.653	65.20	69.67	76.40	14.16
方案2	6.07	1.775	25.67	1.751	65.20	78.40	64.59	16.10
方案2－方案1	－0.04	0.105	－4.83	0.098	0.00	8.73	－11.81	1.94

表 8　2022 年烧结混匀矿结构变化情况

Table 8　Structural changes of sintering mixture ore in 2022

原料来源	原料种类	2022 年 1 月配矿(质量分数)/%		2022 年 7 月配矿(质量分数)/%		液相流动性指数
		南区配比	北区配比	南区配比	北区配比	
澳洲矿	主流矿 1	—	—	—	15.0	3.12
	主流矿 2	—	24.0	—	15.0	2.84
	主流矿 3	26.0	—	25.0	—	2.80
	主流矿 4	4.0	4.0	4.0	4.0	2.80
	主流矿 5	14.0	17.0	12.0	10.0	4.05
	主流矿 6	11.0	6.0	17.0	10.0	4.05
巴西矿	主流矿 7	19.0	20.0	7.0	19.0	1.44
	主流矿 8	7.0	9.5	—	—	3.84
	主流矿 9	—	8.0	—	—	3.90
非主流矿	非主流矿 1	4.0	0.5	—	6.0	3.00
	非主流矿 2	—	—	7.0	—	4.80
	非主流矿 3	—	—	—	9.0	5.41
	非主流矿 4	6.0	8.5	—	4.0	5.89
	非主流矿 5	—	—	9.0	—	3.80
	非主流矿 6	6.0	—	9.0	—	3.67
	非主流矿 7	—	—	5.0	5.0	5.73
	非主流矿 8	—	—	—	—	5.73
回收料	回收沉降料	—	—	—	—	—
	回收杂矿	0.5	—	3.0	1.0	—
	冶金尘泥	2.5	2.5	2.0	2.0	—

表 9　2022 年烧结矿质量变化情况

Table 9　Changes in the quality of sintered ore in 2022

质量指标		$w(TFe)$/%	$w(SiO_2)$/%	$w(Al_2O_3)$/%	$w(MgO)$/%	R	$w(FeO)$/%	转鼓指数/%	筛分指数/%	平均粒度/mm
2022 年 1 月配矿	南区	56.01	5.25	1.90	1.92	2.14	8.42	80.81	3.68	20.04
	北区	57.11	5.18	1.88	1.76	1.94	8.35	80.44	3.49	21.09
2022 年 7 月配矿	南区	56.43	5.25	1.96	1.91	2.02	8.36	81.83	3.56	20.93
	北区	56.97	5.32	1.92	1.79	1.85	8.30	80.25	3.64	22.08

3　结　论

铁前一体化优化配矿是在“一切以高炉为中心”的思想指导下，把烧结、球团和高炉三个工序配矿统一起来，主要用于矿石采购的决策，优化中长期配矿结构。优化配矿是否成功其一在于采购部门要做好铁矿石寻源工作，其二在于配矿工程师对矿粉上下限用量和铁前各工序工艺约束条件的准确把握，这些约束条件的目的是稳定烧结矿、球团质量和满足高炉生产稳定顺行。通过铁前一体化优化配矿，2022 年 7 月开始马钢南区非主流矿从 16% 上升到 30%，北区非主流矿从 9% 上升到 24%，使烧结矿、铁水成本有了明显的下降。

参考文献：

[1]　寇明银,张众,曾旺,等. 铁矿粉烧结优化配矿及其模型研究进展[J]. 钢铁,2022,57(2):1－11.
KOU Mingyin, ZHANU Zhong, ZENG Wang, et al. Research progress on optimization technology and its

model of ore-blending for sinter process[J]. Iron & Steel,2022,57(2):1-11.

[2] 王子宏,潘晶,唐志宏,等. 柳钢铁矿石采购和生产评价体系[J]. 金属世界,2015(6):51-55.
WANG Zihong, PAN Jing, TANG Zhihong, et al. Evaluation system for iron ore purchase and production in Liuzhou Steel[J]. Metal World,2015(6):31-36.

[3] 许满兴,张天启. 铁矿石优化配矿实用技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2017:5.
XU Manxing, ZHANG Tianqi. Practical technology of optimal ore blending of iron ore[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2017:5.

[4] 许满兴. 优化高炉炼铁原料采购与烧结高炉配矿一体化的思路和方法[J]. 烧结球团,2016,41(5):1-7.
XU Manxing. Ideas and methods of integrated optimization of BF iron-making raw materials procurement and sintering and BF proportioning[J]. Sintering and Pelletizing,2016,41(5):1-7.

[5] 夏志坚,瞿涛,吴洪义,等. 铁矿石评价及铁前一体化优化配矿模型研发与应用[J]. 矿业工程,2023,21(2):52-56.
XIA Zhijian, QU Tao, WU Hongyi, et al. Development and application of iron ore evaluation and pre-iron-making integrated model for optimizing ore proportioning[J]. Mining Engineering,2023,21(2):52-56.

[6] 张中中,甘牧原,吴丹伟,等. "烧结—球团—高炉"联动配矿模型设计[J]. 烧结球团,2021,46(3):22-27.
ZHANG Zhongzhong, GAN Muyuan, WU Danwei, et al. "Sintering-pelletizing-ironmaking" model design of linkage ore blending[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(3):22-27.

[7] 刘自民,吴胜利,金俊,等. 马钢烧结优化配矿技术的研究[J]. 烧结球团,2012,37(2):13-18.
LIU Zimin, WU Shengli, JIN Jun, et al. Study on optimizing the sintering proportioning in Masteel[J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(2):13-18.

[8] LOO C,BRISTOW N. Properties of iron bearing materials under simulated blast furnace indirect reduction conditions. Part 2:reduction degradation[J]. Ironmaking and Steelmaking,1998,25(4):287-295.

[9] 周明顺,工义栋,赵东明,等. 高配比磁铁精矿烧结技术的研究进展[J]. 钢铁,2020,55(5):1-9.
ZHOU Mingshun, WAND Yidong, ZHAO Dongming, et al. Development on sintering technologies with high proportion of magnetite concentrates[J]. Iron & Steel,2020,55(5):1-9.

[10] 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 Xiaohui, 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.

[11] 吴胜利,刘宇,杜建新,等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报,2002,24(3):254-257.
WU Shengli, LIU Yu, DU Jianxin, et al. New concept of iron ores sintering basic characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2002,24(3):254-257.

[12] 阎丽娟,吴胜利,朱娟,等. 铁矿粉的化学成分劣质化对其烧结同化性的影响研究[J]. 太原理工大学学报,2014,45(1):19-24.
YAN Lijuan, WU Shengli, ZHU Juan, et al. Influence of chemical composition deterioration of iron ore on sintering assimilation[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2014,45(1):19-24.

[13] 吴胜利,杜建新,马洪斌,等. 铁矿粉烧结液相流动特性[J]. 北京科技大学学报,2005,27(3):291-293.
WU Shengli, DU Jianxin, MA Hongbin, et al. Fluidity of liquid phase in iron ores during sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005,27(3):291-293.

[14] KASAI E, WU S L, OMORI Y. Influence of property of iron ores on the coalescing phenomenon of granules during sintering. Tetsu-to-Hagane,1991,77(1):56-62.

[15] 姜鑫,吴钢生,魏国,等. MgO 对烧结工艺及烧结矿冶金性能的影响[J]. 钢铁,2006,41(3):8-11.
JIANG Xin, WU Gangsheng, WEI Guo, et al. Effect of MgO on sintering process and metallurgical properties of sinter[J]. Iron and Steel,2006,41(3):8-11.

[16] 张永中,卢志武,饶梓生,等. 碱度、SiO_2 及 MgO 含量对烧结矿质量的影响[J]. 烧结球团,2001,26(5):47-50.
ZHANG Yongzhong, LU Zhiwu, RAO Zisheng et al. Effects of basicity and contents SiO_2 and MgO in sinter on productivity and product quality[J]. Sintering and Pelletizing,2001,26(5):47-50. (下转第43页)

WU Shengli, PEI Yuandong, CHEN Hui, et al. Evaluation on liquid phase fluidity of iron ore in sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(10): 1095 – 1100.

[23] 吴胜利，杜建新，马洪斌，等. 铁矿粉烧结液相流动特性[J]. 北京科技大学学报，2005，27(3)：291 – 293.
WU Shengli, DU Jianxin, MA Hongbin, et al. Fluidity of liquid phase in iron ores during sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(3): 291 – 293.

[24] 王小艾，姜鑫，高远，等. 基于相图分析铁酸钙流动性及烧结矿强度[J]. 钢铁，2019，54(5)：9 – 13.
WANG Xiaoai, JIANG Xin, GAO Yuan, et al. Investigation on fluidity of SFCA and sintering strength based on phase diagram[J]. Iron & Steel, 2019, 54(5): 9 – 13.

[25] 吴胜利，贝纪承，朱娟，等. 化学成分对铁酸盐烧结液相流动性的影响[J]. 钢铁研究学报，2015，27(9)：7 – 13.
WU Shengli, BEI Jicheng, ZHU Juan, et al. Influence of chemical composition on liquid fluidity of ferrite[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(9): 7 – 13.

[26] 吴胜利，杜建新，马洪斌，等. 铁矿粉烧结粘结相自身强度特性[J]. 北京科技大学学报，2005，27(2)：169 – 172.
WU Shengli, DU Jianxin, MA Hongbin, et al. Self-intensity of binding phase in iron ores during sintering[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(2): 169 – 172.

[27] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙：中南大学出版社，2016.
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha: Central South University Press, 2016.

[28] 郅亚娜，李宇壮，白诗皓，等. 碱度对富矿粉厚料层烧结固相反应及矿物生成的影响[J]. 中国冶金，2023，33(2)：38 – 46.
QIE Yana, LI Yuzhuang, BAI Shihao, et al. Influence of basicity on solid phase reaction and mineral formation in high feed sintering of ore-rich[J]. China Metallurgy, 2023, 33(2): 38 – 46.

[29] 孟凡俭，孙长余，李廷乐，等. 烧结矿中复合铁酸钙形成影响因素[J]. 钢铁，2018，53(7)：16 – 23.
MENG Fanjian, SUN Changyu, LI Tingle, et al. Formation and influencing factors of silico-ferrite of calcium and aluminum in sinter[J]. Iron & Steel, 2018, 53(7): 16 – 23.

[30] 张国成，罗果萍，柴轶凡，等. 碱度对烧结矿液相形成性能和微观结构特性的影响[J]. 钢铁研究学报，2021，33(7)：584 – 592.
ZHANG Guocheng, LUO Guoping, CHAI Yifan, et al. Effect of basicity on liquid phase formation properties and microstructure of sinter[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(7): 584 – 592.

(上接第 32 页)

[17] 范晓慧，李文琦，甘敏，等. MgO 对高碱度烧结矿强度的影响及机理[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2012，43(9)：3325 – 3330.
FAN Xiaohui, LI Wenqi, GAN Min, et al. Influence and mechanism of MgO on strength of high basicity sinter[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(9): 3325 – 3330.

[18] 阎丽娟，吴胜利，尤艺，等. 各种铁矿粉的同化性及其互补配矿方法[J]. 北京科技大学学报，2010，32(3)：298 – 305.
YAN Lijuan, WU Shengli, YOU Yi, et al. Assimilation of iron ores and ore matching method based on complementary assimilation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(3): 298 – 305.

[19] 宋亚超，王平，李家新，等. 马钢 4 000 m^3 高炉高 Al_2O_3 炉渣渣系优化实验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版)，2009. 26(4)：327 – 332.
SONG Yachao, WANG Ping, LI Jiaxin, et al. Experimental study on slag optimization of 4 000 m^3 BF with Al_2O_3-rich slag in MaSteel[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural science), 2009, 26(4): 327 – 332.

[20] WANG P, MENG Q M, LONG H M. Influence of basicity and MgO on fluidity and desulfurization ability of high-aluminum slag[J]. High Temperatre Materials and Processes, 2016, 35(7): 669 – 675.