

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220772

渣铁比对 5 500 m³高炉冶炼影响分析

李宏伟

(首钢京唐公司炼铁部, 河北 唐山 063200)

摘 要: 2019 年 5 月以来, 5 500 m³高炉入炉球团矿比例成功由 25% 提升至 50%~70%, 铁前系统不仅颗粒物、SO₂、NO_x 等污染物排放降低 24%, 吨铁 CO₂ 排放降低 10%, 而且渣铁比由最低 300 kg/t 降至 200 kg/t, 极大地促进了高炉冶炼水平提升。通过研究渣铁比大幅下降后对高炉冶炼主要参数的影响, 以对今后采用低渣铁比冶炼的高炉提供技术参考。经统计生产数据发现, 渣铁比由 300 kg/t 下降至 230 kg/t 后, 一方面主要指标取得显著提升, 利用系数由 2.25 提升至 2.50 以上, 透气性指数由 4 100 升至 4 300 以上, 焦比由 295 kg/t 降至 265 kg/t 以下, 煤比提高至 200~220 kg/t; 另一方面, 渣比下降也带来炉渣脱硫和排碱能力的下降, 在入炉硫负荷为 3.80~3.90 kg/t 和碱负荷为 2.60 kg/t 的条件下, 为了满足铁水中硫质量分数小于 0.050% 和炉渣排碱率大于 75%, 提出最佳渣铁比控制为中线 230 kg/t。今后, 若进一步实现降低渣比生产, 应从降低入炉有害元素和优化渣系成分入手, 以最大限度降低有害元素在炉内循环富集, 以确保炉况高水平稳定顺行。此外, 渣铁比大幅下降后, 铁水流速出现明显升高, 出铁次数下降, 出铁制度上应及时做出优化调整, 以满足低渣铁比冶炼要求。

关键词: 渣铁比; 高炉; 冶炼; 影响; 焦比

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2023)08-0093-06

Effect of slag ratio on 5 500 m³ BF smelting

LI Hongwei

(Ironmaking Department, Shougang Jingtang Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063200, Hebei, China)

Abstract: Since May 2019, the proportion of pellets fed has been successfully increased from 25% to 50%-70% on the 5 500 m³ blast furnace in Shougang Jingtang Iron and Steel Co., Ltd. The pre iron system has not only reduced the emission of pollutants such as particulate matter, SO₂ and NO_x by 24%, the emission of CO₂ per ton of iron by 10%, but also the slag ratio has reduced from 300 kg/t to 210 kg/t, which greatly promoted the improvement of blast furnace smelting level. The influence of slag ratio on the main parameters of blast furnace smelting is studied, which can provide technical reference for blast furnace smelting with low slag iron ratio in the future. It is found through the statistics of production data that after the slag iron ratio decreases from 300 kg/t to 230 kg/t, on the one hand, the main indicators have been significantly improved. The utilization coefficient has been increased from 2.25 to more than 2.50, the permeability index has been increased from 4 100 to more than 4 300, the coke ratio has been reduced from 295 kg/t to less than 265 kg/t, and the coal ratio has been increased to 200-220 kg/t. On the other hand, the reduction of slag ratio also brings about the reduction of slag desulfurization and alkali discharge capacity. Under the conditions of 3.80-3.90 kg/t sulfur load and 2.60 kg/t alkali load, in order to meet $w([S]) < 0.050\%$ in molten iron and the slag alkali discharge rate is greater than 75%, the optimal slag iron ratio control center line of 230 kg/t is proposed. In the future, if the the slag ratio is further reduced, it should start with reducing harmful elements and optimizing slag composition to minimize the circulation and enrichment of harmful elements in the furnace, so as to ensure that the furnace conditions are high and stable. In addition, after the slag ratio decreases significantly, the flow rate of molten iron increases significantly, and the tapping times decrease. The tapping system should be optimized and adjusted in time to meet the smelting requirements of low slag ratio.

Key words: slag ratio; blast furnace; smelting; effect; coke ratio

当今, 低碳绿色发展是钢铁工业可持续发展的生命力, 而高比例球团冶炼是钢铁工业实现低碳绿色发展的主要方向之一^[1-2]。某钢铁公司二期产线投

产后, 炼铁系统实现 3 座 5 500 m³高炉+3 台 504 m²带式焙烧机+2 台 500 m²烧结机的工艺配置, 满足高炉高比例球团冶炼需求。自 2015 年 12 月 1 号高

炉首次开展高比例酸球工业试验,历经 6 次工业试验,到 2019 年 5 月 3 座高炉成功实现 50%~70% 比例球团冶炼。

高炉炼铁工序 CO₂ 排放量约占钢铁行业的 70%^[3-5]。高比例球团矿冶炼技术能显著提高生产效率,有效降低 CO₂ 排放,是发展环境友好型高炉有效技术之一^[6]。高炉每冶炼出 1 t 生铁所产生的炉渣量即为渣铁比。3 座高炉采用大球比冶炼后,采用低硅球团工艺替代烧结工艺,铁前系统不仅颗粒物、SO₂、NO_x 等污染物的排放降低 24%,而且吨铁 CO₂ 排放降低了 10%;入炉品位得到大大提高,渣铁比由 300 kg/t 下降至最低 200 kg/t。造渣制度是高炉冶炼 4 大基本制度之一,而炉渣成分和渣铁比是合理造渣的制度核心。渣铁比取得大幅下降后,主要经济指标得到显著提升,其中 2022 年 1 号高炉利用系数提升至 2.49、入炉焦比降至 264 kg/t、压

差大幅下降。与此同时,低渣铁比同样也带来高炉脱硫能力减弱、铁水硫含量升高、炉渣排碱能力下降等问题。因此,本文通过对高炉近几年的大球比冶炼进行系统分析,总结渣铁比变化对高炉冶炼参数的影响,以对今后采用低渣铁比冶炼的高炉提供借鉴。

1 高炉渣系的演变

入炉矿料包括烧结矿、球团矿和澳矿,矿料成分见表 1。因球团矿的品位最高,故球比变化直接决定渣铁比。2009—2018 年 1 号高炉炉料结构相对稳定,球比维持为 25%±3%,渣铁比控制为(300±15) kg/t,2019 年入炉结构发生较大变化,球团比例逐步升高,球比提升至 50%以上,相应渣铁比下降至(220±20) kg/t。炉料结构和渣铁比演变如图 1 所示。

表 1 矿料成分									
Table 1 Chemical component of mineral aggregate									
名称	w(TFe)/%	w(SiO ₂)/%	w(CaO)/%	二元碱度 R	w(FeO)/%	w(MgO)/%	w(Al ₂ O ₃)/%	w(TiO ₂)/%	w(S)/%
烧结矿	55.61	5.27	10.63	2.02	8.84	1.97	1.79	0.120	0.016
澳块	63.24	2.64	0.08			0.02	1.08	0.034	0.012
碱性球	65.25	2.25	2.48	1.10	0.50	0.90	0.58	0.086	0.031
酸性球	66.08	2.74	0.92	0.34	0.54	0.83	0.70	0.096	0.002

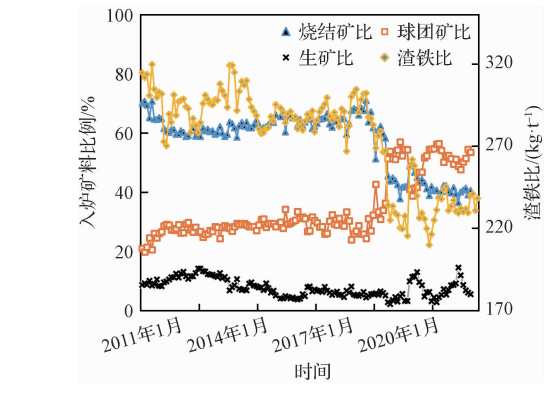


图 1 炉料结构和渣铁比演变

Fig. 1 Evolution of burden design and slag ratio

合理且适宜的造渣制度有利于高炉的稳定顺行、高效冶炼及长寿,带来较大的经济效益^[7-10]。为了获得相对较好的指标,1 号高炉自投产以来渣系各项成分控制相对稳定。渣系演变如图 2 所示。

2 渣铁比对高炉冶炼影响分析

已有诸多学者研究了高炉渣成分对黏度、脱硫、

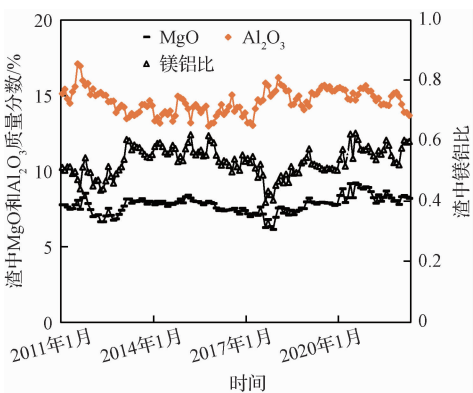


图 2 渣系演变

Fig. 2 Evolution of slag composition

排碱、熔化温度等指标的影响,以获得良好性能的冶金渣^[11],但对渣铁比变化对高炉冶炼指标量化的影响研究很少,因此,系统研究渣铁比大幅下降后对高炉冶炼参数的影响就显得尤其重要。

2.1 产量

高炉炼铁就是要将矿石中的铁从氧化物中分离出来形成优质的液体高温铁水,不进入生铁和煤气

的其他成分 (CaO、SiO₂、Al₂O₃、MgO 等) 称为高炉炉渣。提高入炉品位是实现低渣比冶炼的前提^[12-13]。随着入炉球比的提高, 渣铁比下降, 入炉品位升高, 冶炼每吨铁所需造渣的熔剂和热量降低, 节省下来的还原剂碳和鼓风带入物理热参与炉内更多铁氧化物的还原反应, 相应高炉利用系数升高, 尤其是当渣铁比由 300 kg/t 下降至 230 kg/t 时, 入炉品位由 59.5% 升高至 62.1%, 利用系数由 2.25 提升至 2.50 以上。渣铁比对焦比的影响如图 3 所示。

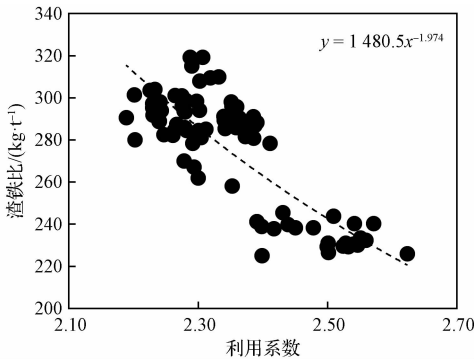


图 3 渣铁比对利用系数的影响

Fig. 3 Influence of slag and iron ratio on utilization coefficient

2.2 高炉压差

由于炉料混装, 球团矿平均粒径 (12 mm) 小于烧结矿平均粒径 (20 mm), 炉料透气性存在拐点。缩小球团矿与烧结矿的粒径差异有利于降低压差。2019 年以来, 为了降低入炉矿料的混装效果, 一方面调整造球参数, 球团矿粒度由 10~14 mm 调整为 12~16 mm, 平均粒径由 11.7 mm 提升至 14 mm; 另一方面通过强化机械力造球, 改善鼓干段干燥效率, 减少了干燥延后造成的“黑球”, 通过进行双层辊筛溜料板和铺边料结构改造, 减少了焙烧不充分的“红球”, 低抗压球团比例持续降低, 抗压强度低于 800 N/个的比例由 3.5% 降至 1%。

软熔带是高炉内部压力损失最大的区域, 达到高炉总压损的 60% 以上^[14]。根据高炉入炉综合炉料冶金性能测试结果, 球团矿比例提高后, 综合炉料冶金性能变好, 其中软化开始温度和熔化温度提高、熔滴温度区间减少、压差降低, 这有利于炉内透气性的改善。此外, 因炉渣黏度为铁水黏度的 39~45 倍 (1 号高炉试验数据为铁水中 $w([Si])$ 为 0.4%, 铁水温度为 1 500 ℃), 软熔带以下至风口带区域受渣铁比下降的影响, 压力损失也必然下降。因此, 随着渣铁比下降, 必然有利于降低高炉内压差, 透气性指

数由 4 100 升至 4 300 以上, 有利于高炉进一步强化冶炼。渣铁比与透气性指数的对应关系如图 4 所示。

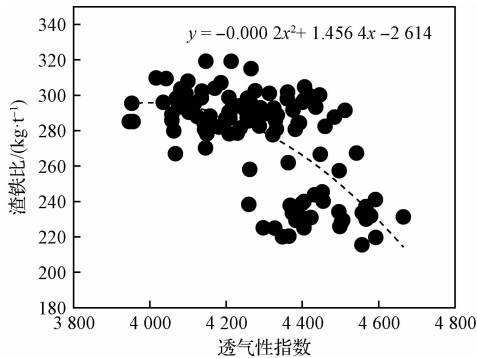


图 4 渣铁比与透气性指数的对应关系

Fig. 4 Relationship between slag ratio and ventilating index

2.3 焦比

焦炭在高炉冶炼过程中的料柱骨架作用是任何炉料都不能代替的。随着渣铁比下降, 高炉内的料柱透气性指数提升, 为进一步促进喷煤降焦创造了有利条件。渣铁比对焦比的影响如图 5 所示。由图 5 可知, 高炉渣铁比与焦比呈现反比关系。目前, 当渣铁比降至 230 kg/t 时, 高炉入炉焦比已经降至 265 kg/t 以下, 煤比提高至 200~220 kg/t, 燃料比稳定为 505 kg/t 以下。因此, 降低渣铁比是今后高炉实现低碳冶炼主要的发展方向。

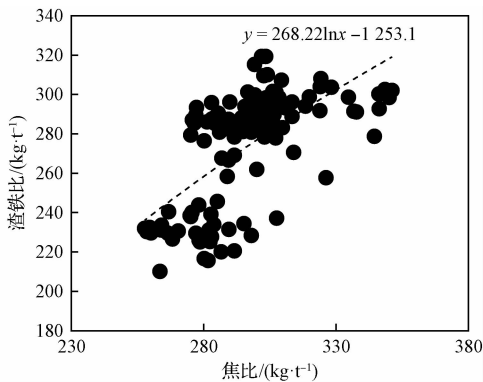


图 5 渣铁比对焦比的影响

Fig. 5 Influence of slag ratio on coke ratio

2.4 铁水脱硫

冶金性能良好的炉渣要具备优良的脱硫能力, 才能够满足冶炼优质铁水的要求^[15]。原燃料带入高炉内的硫负荷维持在 3.8 kg/t, 经过硫平衡计算可知, 带入的硫由炉渣 (比例为 75%)、铁水 (比例为 12%)、除尘灰 (比例为 5.5%) 和煤气 (比例为

7.5%)带出。高炉炉渣脱硫反应是通过渣中 CaO、MgO 等碱性氧化物与铁水中硫发生反应,使铁水中的硫进入炉渣来实现的。硫在高炉内总的平衡分配关系计算公式为^[16]

$$\omega([S]) = \frac{0.1[M(S)_L - M(S)_S]}{1 + 0.001 L_S Q_S} \quad (1)$$

式中: $\omega([S])$ 为铁水中硫质量分数,%; $M(S)_L$ 为硫负荷,kg/t; $M(S)_S$ 为煤气带出硫量,kg/t; L_S 为硫在渣铁间分配系数; Q_S 为渣铁比,kg/t。

由式(1)可知,在炉渣成分稳定的情况下,渣铁比降低导致脱硫所需的 CaO、MgO 等碱性氧化物减少,高炉脱硫水平下降,铁水中硫含量升高。

针对渣铁比下降开展了炉渣脱硫试验研究。脱硫试验所使用的加热设备为高温管式炉,用双铂铑

热电偶测温。试验在高温管式炉内采用双层石墨坩埚进行,高炉渣放在双层坩埚的下部坩埚,铁样放在上部坩埚,滴落口用塞棒塞住。其中,原渣样配制 22 g,原铁样配置 100 g,铁质量分数为 94.5%,碳质量分数为 4.5%,FeS 质量分数为 1%,以渣铁比为考察因素。试验前把铁样及渣样分别装入上下 2 层石墨坩埚内,待温度升到指定温度时保温 60 min,待高炉渣样和铁样完全熔化后,拔出上坩埚内的石墨塞棒,使铁液通过上坩埚底部的小孔穿过渣层而沉积于下坩埚底部。反应 70 min 后,取出上、下石墨坩埚进行水冷,以确保最初平衡状态下渣、铁中的硫含量。冷却后取出渣块、铁块在密封式离心磨样机中碾磨成粉样,通过化学分析检测渣、铁中硫含量,试验结果见表 2。

表 2 试验方案

Table 2 Experimental scheme

序号	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	碱度	渣铁比/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	渣中硫质量分数/%	铁水中硫质量分数/%	L_S
F-1	36.02	39.98	8.5	15.50	1.11	180	1.19	0.073	16.30
F-2	36.02	39.98	8.5	15.50	1.11	200	1.17	0.065	18.00
F-3	36.02	39.98	8.5	15.50	1.11	220	1.19	0.057	20.88
F-4	36.02	39.98	8.5	15.50	1.11	240	1.38	0.048	28.75
F-5	36.02	39.98	8.5	15.50	1.11	260	1.53	0.042	36.43

试验条件下渣铁比对渣铁硫分配比的影响如图 6 所示。由图 6 可知,随着渣铁比升高,硫的分配比呈上升趋势,即随着渣铁比升高,炉渣的脱硫能力逐渐上升。当渣铁比从 180 kg/t 上升至 220 kg/t 时,硫分配比缓慢上升,且硫分配比均低于 25;当渣铁比从 220 kg/t 上升至 260 kg/t 时,硫分配比从 20.88 增加到 36.43,且均高于 25,这表明炉渣脱硫性能明显改善。

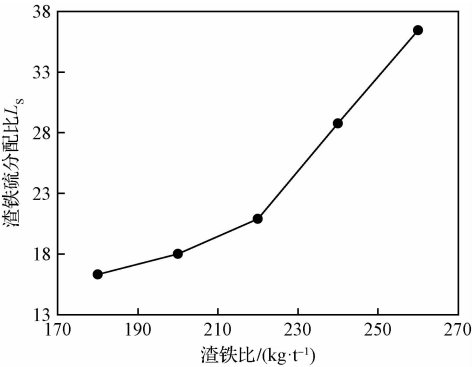


图 6 试验条件下渣铁比对渣铁硫分配比的影响

Fig. 6 Influence of slag ratio on sulphur distribution under test condition

高炉生产实践证明,渣量是影响高炉脱硫效率的主要因素之一。渣铁比对铁水中硫的影响如图 7 所示。由图 7 可知,渣铁比下降至 220 kg/t 以下时,铁水中硫质量分数升至 0.055% 以上。铁水持续的高硫不仅会降低铁水表面张力,加速高硫铁水对炉缸炭砖的侵蚀,降低耐火材料寿命,也会在焦炭表面形成 CaS 层,从而阻碍铁水中渗碳反应的进行,降低死料柱中焦炭的更新速率。因此,在现有原料条件下,入炉硫负荷维持为 3.80~3.90 kg/t,为

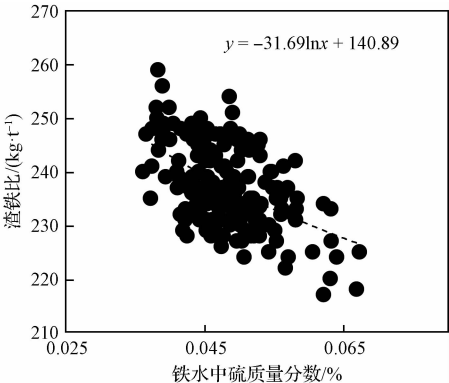


图 7 渣铁比对铁水中硫的影响

Fig. 7 Influence of slag ratio on sulfur content in molten iron

了保证铁水中硫质量分数小于 0.050%，渣铁比应控制为 230 kg/t 左右。

2.5 炉渣排碱

原料带入高炉的碱金属大部分通过炉渣排出，少部分随炉顶煤气排出，剩下部分在炉内还原后形成循环富集。炉渣的排碱性能直接决定碱金属在高炉内的循环富集程度^[17]，这对焦炭性能和高炉长寿有重要影响。渣铁比降低后，不仅影响炉渣的脱硫能力，更影响炉渣排出碱金属能力。渣铁比对炉渣排碱率的影响如图 8 所示。由图 8 可知，渣铁比控制为 270 kg/t 以上时，高炉炉渣排碱率基本维持为 90% 以上。在炉渣成分相对稳定的情况下，随着渣

铁比下降，炉渣排碱率呈现缓慢下降趋势，尤其是当渣铁比下降至 220 kg/t 时，炉渣排碱率将降至 70% 左右。

为缓解高球比冶炼下的低渣量带来的有害元素排出量降低问题，一方面通过全要素分析各种料有害贡献占比，并对所带入有害元素进行溯源，确定控制途径，将入炉碱负荷由 3.5 kg/t 下降至目前的 2.6 kg/t；另一方面，从控制渣铁比提升排碱率角度来看，渣铁比控制不易过低，目前最佳渣铁比控制为 230 kg/t 左右，排碱率达到 75% 以上，基本实现炉内碱平衡，没有出现因为碱金属富集而造成炉况的波动。

2.6 出铁制度

高炉渣在成渣过程中对高炉冶炼的影响是连续的，从铁矿石软化生成初渣开始到终渣排出高炉为止^[18]。现代化大型高炉冶炼产生的高温炉渣和铁水是通过铁口排出炉外的，渣铁比的下降也必然导致高炉出铁制度的变化。不同渣铁比下的出铁指标见表 3。由表 3 可知，通过统计不同渣铁比下的出铁情况，渣铁比由 309.6 kg/t 下降至 226.0 kg/t，高炉利用系数提升，铁水流速由 6.4 t/min 提升至 8.6 t/min，出铁次数由 14.9 次/d 下降至 12.7 次/d。受铁水流速提升影响，应重点关注提升炮泥抗冲刷性能，避免在出铁末期出现跑大流情况。

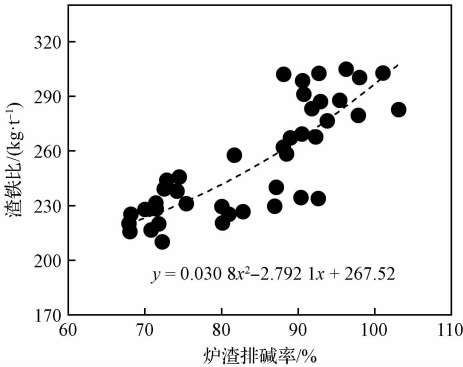


图 8 渣铁比对炉渣排碱率的影响

Fig. 8 Influence of slag ratio on alkali discharge rate of slag

表 3 不同渣铁比下的出铁指标

Table 3 Tapping index under different slag ratio

时间	高炉利用系数	焦比/(kg·t ⁻¹)	渣铁比/(kg·t ⁻¹)	出铁次数/(次·d ⁻¹)	出铁时间/min	出渣时间/min	重叠时间/min	出铁间隔/min	铁水流速/(t·min ⁻¹)
2014 年 6 月	2.32	302.8	309.6	14.9	135.2	126.2	37.5	59.3	6.4
2015 年 7 月	2.34	299.8	285.5	14.5	137.4	130.1	38.5	62.2	6.5
2022 年 9 月	2.48	274.9	238.4	13.3	123.3	117.9	15.4	94.4	8.2
2021 年 12 月	2.54	270.4	230.6	12.9	128.0	122.7	16.6	96.1	8.4
2022 年 4 月	2.62	257.7	226.0	12.7	131.5	126.2	18.6	96.1	8.6

3 结论

高炉采用大球比冶炼后，渣铁比大幅下降，不仅降低铁前系统污染物减排，促进高炉冶炼水平提升，今后更是现代化大型高炉实现低碳冶炼的主要途径之一。

1)渣铁比由 300 kg/t 下降至 230 kg/t 时，高炉压差大幅下降，利用系数由 2.25 提升至 2.50 以上，透气性指数由 4 100 升至 4 300 以上，高炉焦比由 295 kg/t 降至 265 kg/t 以下，煤比提高至 200~220 kg/t，燃料比稳定为 505 kg/t 以下。

2)渣铁比大幅下降后，炉渣脱硫和排碱能力下降。当前，在高炉入炉硫负荷为 3.80~3.90 kg/t 和碱负荷为 2.60 kg/t 的条件下，为了满足铁水中硫质量分数小于 0.050% 和炉渣排碱率大于 75%，最佳渣铁比控制为中线，即 230 kg/t。此外，从提升渣炉脱硫和排碱能力上来看，两者是相互矛盾的，今后应重点从降低入炉有害元素和优化渣系成分入手，降低有害元素在炉内循环富集，为低渣铁比冶炼提供支撑。

3)渣铁比下降后，高炉产量提升，必然导致铁水流速提升，一方面应重点提升炮泥性能，另一方面应

从优化出铁制度入手,避免出现亏渣铁、跑大流等情况出现,以满足低渣铁比冶炼下高炉出铁需求。

参考文献:

[1] 张利娜. 钢铁行业低碳技术应用及发展研究[J]. 冶金能源, 2023,42(2):3. (ZHANG L N. Application and development research of low carbon technology in iron and steel industry [J]. Energy for Metallurgical Industry,2023, 42(2):3.)

[2] 路明,陈小燕,王兴锋,等. 钙质添加剂对碱性球团性能的影响[J]. 冶金能源, 2022, 41(2): 19. (LU M, CHEN X Y, WANG X F, et al. Effect of calcium additives on the performance of calcium fluxed iron ore pellets[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2022,41(2):19.)

[3] KOKI T, YUSUKE K, TOSHIYUKI H, et al. Optimization of coke mixed charging based on discrete element method[J]. ISIJ International, 2017,57(10):1084.

[4] 赵沛,董鹏莉. 碳排放是中国钢铁业未来不容忽视的问题[J]. 钢铁, 2018,53(8): 8. (ZHAO P, DONG P L. Carbone-mission cannot be ignored in future of China steel industry[J]. Iron and Steel, 2018,53(8):8.)

[5] 王海洋,张建良,王广伟,等. 铁前系统的二氧化碳减排技术浅析[J]. 中国冶金, 2018,28(1):1. (WANG H Y, ZHANG J L, WANG G W, et al. Analysis of carbon dioxide emission reduction before ironmaking[J]. China Metallurgy, 2018, 28(1):1.)

[6] 牛群,邹忠平,王刚,等. 高炉炉缸死料柱受力分析及影响因素[J]. 中国冶金, 2023, 33(2): 55. (NIU Q, ZOU Z P, WANG G, et al. Force analysis and influence factors of dead-man in blast furnace hearth[J]. China Metallurgy, 2023,33(2):55.)

[7] 姜喜远. 高碱度 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO-TiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ 六元渣系脱硫性能的研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2016. (JIANG X Y. Study on Desulfurization Performance of High Alkalinity $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO-TiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ Six Component Slag System[D]. Ganzhou:Jiangxi University of Science and Technology, 2016.)

[8] 孙宝银. 改善高炉渣系的生产操作实践[J]. 炼铁技术通讯, 2007(9):16. (SUN B Y. Production practice of improving blast furnace slag system[J]. Ironmaking Technical Communication, 2007(9):16.)

[9] 田坚,冯可芹,严子迪,等. 缓冷与水淬高钛型高炉渣制备微晶泡沫玻璃的对比研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(5): 96.

(TIAN J, FENG K Q, YAN Z D, et al. Comparative study on preparation of foam glass-ceramics from slow-cooling and water-quenched high titanium blast furnace slag[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020,41(5):96.)

[10] 刘杰,赵东明,等. 鞍钢高炉低镁渣冶炼技术研究与应用[J]. 钢铁, 2018,53(3):22. (LIU J, ZHAO D M, et al. Research and application of blast furnace's low(MgO) slag in Ansteel [J]. Iron and Steel, 2018,53(3):22.)

[11] 姜鑫. 高炉炉料中合理利用含 MgO 原料的基础理论研究[D]. 沈阳:东北大学, 2008. (JIANG X. Fundamental Study on Reasonable Utilizing of Raw Material Containing MgO in the Burden of BF[D]. Shenyang:Northeastern University, 2008.)

[12] KIMMO K, TIMO P, JARMO L, et al. (STSI-156)Modelling and aimulation of blast furnace process for switch from sinter to operation[C]//4th International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking. Dusseldorf;METEC, 2011:1.

[13] TIMO P, KIMMO K, JARMO L, et al. Experience of full scale research test with 100% pellet blastfurnace operation in ruukkiauthors[C]//6th European Coke and Ironmaking Congress. Dusseldorf;METEC, 2011:11.

[14] 杜鹤桂,车传仁. 软熔带对高炉强化冶炼的影响[J]. 钢铁, 1980,15(4):21. (DU H G, CHE C R. Influence of softening-melting zone on the hard driving of blast furnace[J]. Iron and Steel, 1980,15(4):21.)

[15] 赵晨光. $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ 系高炉中间渣流动性能与结构[D]. 鞍山:辽宁科技大学, 2019. (ZHAO C G. Fluidity and Structure of $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ Bosh Slag in Blast Furnace[D]. Anshan:University of Science and Technology Liaoning, 2019.)

[16] 吴胜利,王筱留. 钢铁冶金[M]. 北京:冶金工业出版社, 2019. (WU S L, WANG X L. Iron and Steel Metallurgy[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 2019.)

[17] 常治宇,张建良,许仁泽,等. 酒钢高炉炉渣冶金性能评价与炉况分析[J]. 钢铁研究, 2017(6): 26. (CHANG Z Y, ZHANG J L, XU R Z, et al. Evaluation of metallurgical properties of blast furnace slag of JISCO and analysis of furnace condition[J]. Research on Iron and Steel, 2017(6):26.)

[18] 王鑫杰. 高炉冶炼过程中渣性能变化研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2021. (WANG X J. Study on Performances Change of Slag in the Process of Blast Furnace Smelting[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2021.)