

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180006

梅钢 2 号高炉喷吹焦炉煤气数值模拟

毕传光¹, 唐 珏², 储满生²

(1. 宝钢股份研究院梅钢技术中心, 江苏 南京 210039; 2. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为实现绿色低碳炼铁, 梅钢拟利用厂内富余焦炉煤气进行高炉风口喷吹。为保证喷吹实际效果的准确性和合理性, 优先进行高炉喷吹焦炉煤气数值模拟研究。首先基于梅钢 2 号高炉的原燃料条件采用多流体高炉数学模型对高炉喷吹焦炉煤气进行数值模拟研究, 然后初步分析了梅钢 2 号高炉喷吹焦炉煤气的经济效益。结果表明, 与未喷吹焦炉煤气相比, 喷吹 50 m³/t(Fe) 焦炉煤气, 炉内还原气浓度增加, 炉料还原速度加快; 产量增至 4 740 t/d, 增幅 30.12%; 焦比降至 321.80 kg/t(Fe), 降幅 14.43%; 碳排放减至 355.93 kg/t(Fe), 减幅 8.61%; 当焦炭价格为 1 607 元/t、焦炉煤气价格为 0.774 9 元/m³ 时(2016 年 11 月梅钢提供), 吨铁成本降低 20.14 元, 每年因喷吹焦炉煤气节约焦炭 7.79 万 t, 年创综合经济效益 5 115 万元。综合考虑经济效益、节焦潜力、梅钢富氧能力和焦炉煤气富余量, 梅钢 2 号高炉适宜的焦炉煤气喷吹量宜维持在 50 m³/t(Fe) 左右。

关键词: 低碳炼铁; 高炉; 喷吹焦炉煤气; 多流体高炉数学模型; 经济效益

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)04-0089-08

Mathematical modeling of Mei Steel No. 2 BF with coke oven gas injection

BI Chuan-guang¹, TANG Jue², CHU Man-sheng²

(1. Mei Steel Technology Center, Bao Steel Research Institute, Nanjing 210039, Jiangsu, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: In order to achieve the green and low cost ironmaking, Mei Steel will perform the BF operation with coke oven gas(COG) injection. And for insuring the effective injection, the mathematical modeling research of Mei Steel No. 2 BF with COG injection is researched. Firstly, based on the raw material and fuel conditions of Mei Steel No. 2 BF, the mathematical modeling of the BF operation with COG injection is carried out by multi-fluid blast furnace model. Secondly, the economic benefit after COG injection is also preliminarily analyzed. Compared with the base case of no COG injection, when the COG injection is 50 m³/t(Fe), the concentration of reducing gas in the BF increases and the reduction is accelerated; the production increases to 4 740 t/d(increases 30.12%); the coke rate decreases to 321.80 kg/t(Fe)(decreases 14.43%); the carbon emission decreases to 355.93 kg/t(Fe)(decreases 8.61%). On the base of the coke price of 1 607 RMB/t and the COG price of 0.774 9 RMB/m³(supplied by Mei Steel in Nov 2016), the cost of pig iron reduces 20.14 RMB/t, the saved coke for COG injection is 7.79 ten thousand tons per year, and the total economic benefit is 51.15 million RMB per year. Considering the economic benefit, the coke saving potential, the rich oxygen capacity, and the COG surplus of Mei Steel, it is recommended that the rational COG injection for Mei Steel No. 2 BF is maintained around 50 m³/t(Fe).

Key words: low carbon ironmaking; blast furnace; coke oven gas injection; multi-fluid blast furnace model; economic benefit

高炉炼铁历来是钢铁产业节能降耗和二氧化碳减排的核心^[1-2]。近年来环保要求日益苛刻, 钢铁产业提出了绿色制造和制造绿色的新要求^[3-8]。中国钢铁企业全面响应, 积极研发并实施低碳炼铁技术^[9-15]。富氢还原是低碳炼铁的可行技术之一, 具有

清洁低碳的优越性。随着人类社会能源消耗不断增长, 能源日益紧张, 加上国家对节能减排高度重视, 焦炉煤气作为优质富氢气体应得到高效合理利用^[16-17]。另外, 梅钢焦炭每年缺口 60 万 t, 需大力研发与应用节焦技术以削减外购焦使用, 降低炼铁生

作者简介: 毕传光(1963—), 男, 硕士, 高级工程师; **E-mail:** 601539@baosteel.com; **收稿日期:** 2018-01-04

通讯作者: 储满生(1973—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** chums@simm.neu.edu.cn

产成本。因此,梅钢在绿色低碳炼铁的大趋势下,为更快地抢占技术发展和市场竞争先机,拟利用厂内富余焦炉煤气进行高炉风口喷吹。为保证喷吹实际效果的准确性和合理性,优先进行梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气数值模拟研究。基于多流体理论、冶金传输原理、反应热力学、动力学和现代计算流体力学创建的多流体高炉数学模型可合理描述炉内现象,准确预测高炉操作指标,是对高炉过程进行模拟解析的有效工具^[18]。本文首先基于梅钢2号高炉的原燃料条件,采用多流体高炉数学模型对高炉风口喷吹焦炉煤气进行数值模拟研究;然后初步分析了梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气的经济效益。研究结果为梅钢2号高炉风口喷吹焦炉煤气工

业实践提供指导,有利于节能降耗,实现绿色低碳炼铁。

1 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气对高炉指标的影响

1.1 模拟条件和方案

梅钢2号高炉的有效炉容为1 335 m³,炉缸直径为8.2 m,炉腰直径为9.66 m,炉喉直径为6.3 m,炉缸高度为3.45 m,炉腹高度为3.4 m,炉腰高度为1.6 m,炉身高度为15.1 m,炉喉高度为1.8 m。生产使用的含铁炉料有烧结矿、球团矿、块矿和海南尾矿,入炉比例分别为78.95%、7.0%、12.47%和1.58%,化学成分见表1。

表1 梅钢2号高炉使用的含铁炉料化学成分(质量分数)

含铁炉料	TFe	FeO	SiO ₂	H ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	%
烧结矿	57.85	9.14	5.03	0	1.76	9.27	1.59	0.013
球团矿	63.42	0.48	7.14	0.31	0.79	0.31	0.43	0.003
块矿	63.20	0	2.91	1.50	1.45	0.11	0	0.014
海南尾矿	52.31	2.35	15.89	0	0.94	1.11	0.38	0.765

模拟设置了8种不同的焦炉煤气喷吹量,相应的计算初始条件见表2。Base为基准即不喷吹焦炉煤气;COI20、COI40、COI50、COI60、COI70、COI80

和COI100分别表示喷吹焦炉煤气20、40、50、60、70、80和100 m³/t(Fe)。首先,利用多流体高炉数学模型计算Base的高炉生产指标(如铁水温度、焦比、

表2 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气模拟初始条件

条件	Base	COI20	COI40	COI50
鼓风温度/℃	1 179.32	1 179.32	1 179.32	1 179.32
鼓风流量/(m ³ ·t ⁻¹)	1 027.91	904.71	841.69	798.15
富氧率/%	4.625	6.670	8.679	9.980
理论燃烧温度/℃	2 271.28	2 271.26	2 271.28	2 271.27
煤粉喷吹量/(kg·t ⁻¹)	134.60	134.80	134.60	134.30
条件	COI60	COI70	COI80	COI100
鼓风温度/℃	1 179.32	1 179.32	1 179.32	1 179.32
鼓风流量/(m ³ ·t ⁻¹)	779.37	756.38	736.74	688.42
富氧率/%	10.885	12.014	13.236	15.646
理论燃烧温度/℃	2 271.27	2 271.27	2 271.27	2 271.28
煤粉喷吹量/(kg·t ⁻¹)	134.10	134.3	134.60	134.10

煤比、燃料比、生铁产量等),并将这些指标连同基准回旋区温度作为其他模拟方案的参考标准。其次,以各喷吹方案的风口鼻子区条件作为多流体高炉数学模型的边界条件参与模拟计算。计算过程按照梅钢要求,保持煤比维持恒定。

1.2 物料平衡

图1所示为8个CASE下的煤气物料平衡。

Base、COI20、COI40、COI50、COI60、COI70、COI80、COI100 8种操作下,喷煤量(PC)维持不变,鼓风温度均为1 179.32 ℃,鼓风流量分别为1 027.91、904.71、841.69、798.15、779.37、756.38、736.74、688.42 m³/t(Fe)(标准态);富氧率分别为4.625%、6.67%、8.679%、9.980%、10.885%、12.014%、13.236%、15.646%;炉腹煤气量分别为3 518.87、

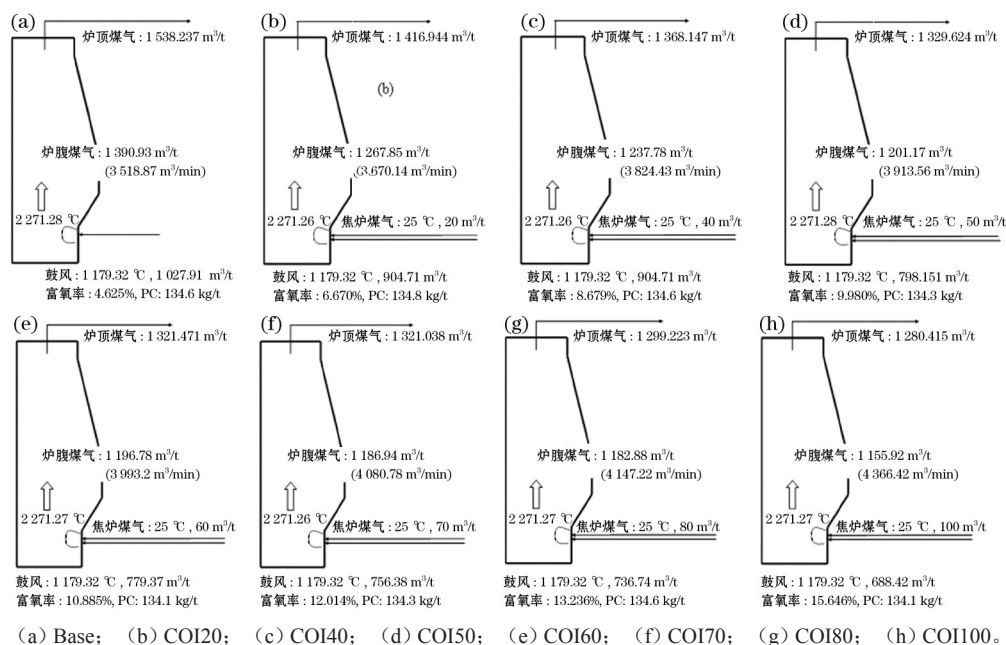


图1 梅钢2号高炉不同焦炉煤气喷吹量条件下的煤气物料平衡

Fig. 1 Gas material balance of Mei Steel No. 2 BF with COG injection

3 670.14、3 824.23、3 913.56、3 993.20、4 080.78、4 175.22、4 366.42 m³/t(Fe)(标准态); 炉顶煤气量分别为 1 538.237、1 416.944、1 368.147、1 329.624、1 321.471、1 321.038、1 299.223、1 280.415 m³/t(Fe)(标准态)。

1.3 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气对炉内工况的影响

图2和图3所示分别为喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉沿高度方向平均温度和炉内温度的影响,图3中虚线标识的1 200~1 400 °C视为软熔带。焦炉煤气喷吹量增大,软熔带位置下移,高炉上部温度水平降低,且靠近炉墙处较明显。这主要是由于焦炉煤气喷吹后需要增大富氧进行热补偿,单位时间内回旋区焦炭燃烧增多,为炉料下降提供了更大空间,炉料入炉量增加,高炉上部温度降低。

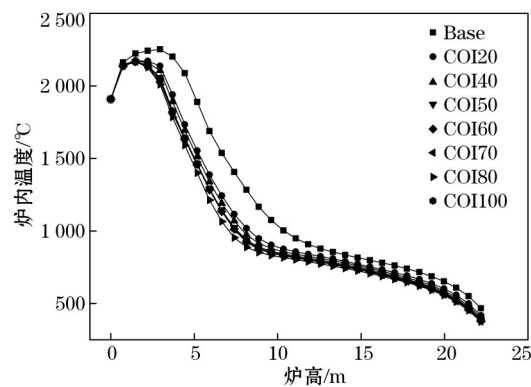


图2 喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉沿高度方向平均温度的影响

Fig. 2 Effect of COG injection on distribution of averaged temperature along height of Mei Steel No. 2 BF

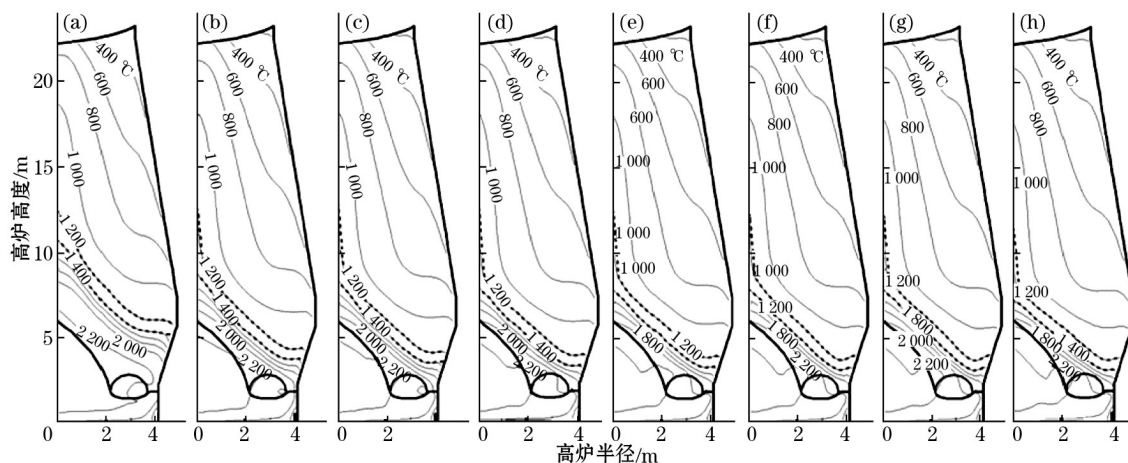


图3 喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉炉内温度分布的影响

Fig. 3 Effect of COG injection on distribution of inner temperature of Mei Steel No. 2 BF

图4所示为喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉内 H_2 摩尔浓度沿高度方向分布的影响。当喷吹焦炉煤气时,高炉下部 H_2 浓度较大,随着煤气向上运动,间接还原的消耗导致 H_2 摩尔浓度逐渐降低;而到炉身上部时, H_2 摩尔浓度反而稍有增加,这是由于高炉中上部 H_2O 和 CO 参与水煤气转换反应,少量 H_2O 转化为 H_2 。图5所示为喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉内 H_2 摩尔浓度分布的影响。由于喷吹优质的富氢气体——焦炉煤气带入更多 H_2 ,炉内 H_2 浓度明显增加,尤其是高炉中下部。Base条件下,最大 H_2 摩尔浓度为6%;当焦炉煤气喷吹量为 $50\text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$ 时,最大 H_2 摩尔浓度为10%;继续增加焦炉煤气喷吹量至 $100\text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$,最大 H_2 摩尔浓度增至14%。

图6所示为喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉含铁炉料还原的影响。随着焦炉煤气喷吹量增加,炉料还原速度明显加快。Base条件下,进入软熔带前高

炉内含铁炉料还原度约为75%~80%;喷吹焦炉煤气后,该还原度增至90%。

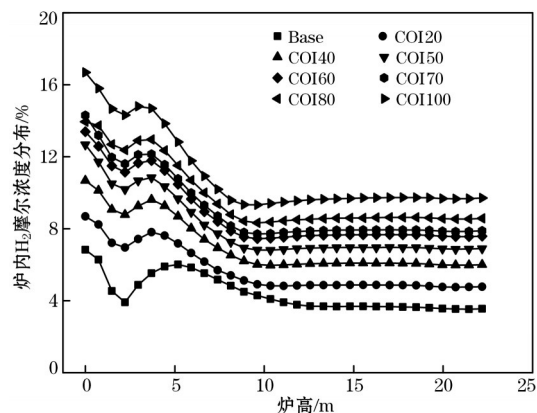


图4 喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉沿高度方向 H_2 平均摩尔浓度的影响

Fig. 4 Effect of COG injection on averaged H_2 mole concentration along height of Mei Steel No.2 BF

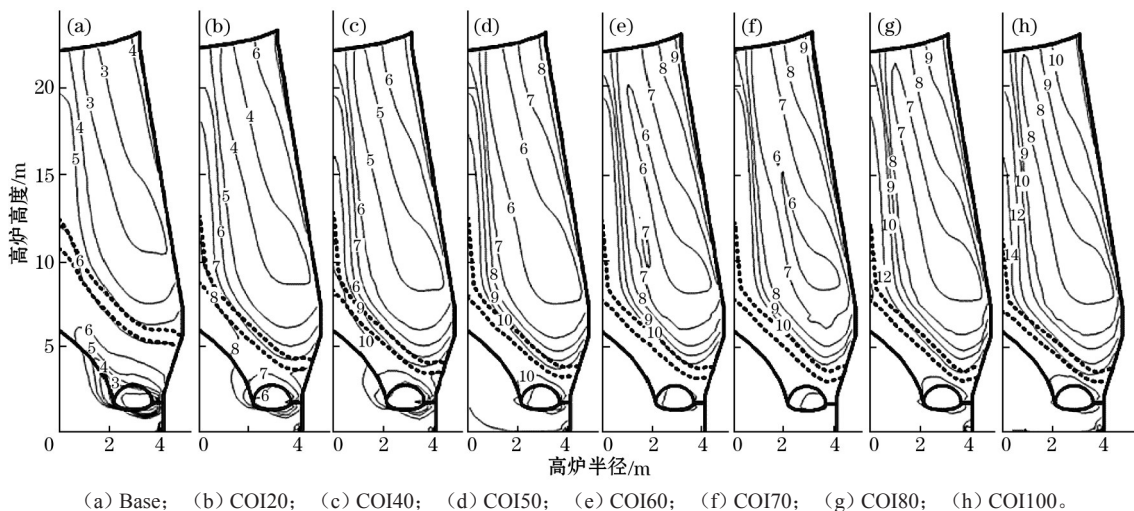


图5 喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉内 H_2 摩尔浓度(%)分布的影响

Fig. 5 Effect of COG injection on distribution of hydrogen mole concentration of Mei Steel No. 2 BF

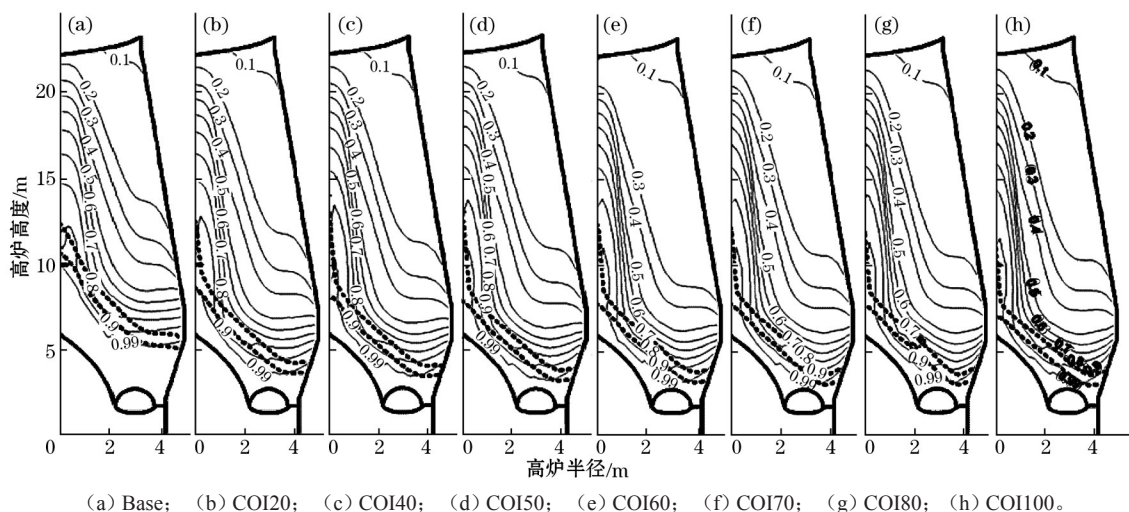


图6 喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉含铁炉料还原度的影响

Fig. 6 Effect of COG injection on reduction of burden containing iron of Mei Steel No. 2 BF

根据多流体高炉数学模型数值模拟结果,计算得到了不同焦炉煤气喷吹量条件下氢还原占间接还原的比例,见表3。当梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气量增大时,H₂还原磁铁矿和浮士体占间接还原的比例逐渐增大。与Base条件相比,喷吹50 m³/t(Fe)焦炉煤气后,H₂还原磁铁矿和浮士体占间接还原的比

表3 氢还原占间接还原中的比例
Table 3 Percent of hydrogen reduction in indirect reduction %

条 件	氢还原比例/%		
	Fe ₂ O ₃ →Fe ₂ O ₄	Fe ₃ O ₄ →FeO	FeO→Fe
Base	1.06	27.88	48.34
COI20	1.69	33.72	51.96
COI40	2.18	39.30	55.94
COI50	2.54	42.50	57.29
COI60	2.81	44.90	58.66
COI70	2.96	45.23	59.26
COI80	3.125	47.77	59.93
COI100	3.53	51.41	61.60

例分别增大14.62%和8.95%。这主要是由于H₂的还原条件优于CO,喷吹焦炉煤气后,炉内H₂摩尔浓度升高,含铁炉料还原加速,到达软熔带前可获得更高还原度。

1.4 喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉操作指标的影响

不同焦炉煤气喷吹量条件下,梅钢2号高炉主要操作指标的变化见表4。(1)矿焦比。与Base条件相比,当焦炉煤气喷吹量增加时,矿焦比随之增加,当焦炉煤气喷吹量为50 m³/t(Fe)时,增幅达13.64%,其主要原因是高炉喷吹焦炉煤气后,炉内还原气浓度变大,炉料还原加速,较多氢气参与间接还原,焦炭消耗减少,从而矿焦比增大。(2)置换比。随着焦炉煤气喷吹量增加,置换比呈降低趋势,当喷吹20 m³/t(Fe)焦炉煤气时,置换比为0.45;当喷吹量增大至50 m³/t(Fe)时,置换比稍降至0.446,这主要是由于焦炉煤气喷吹量增加,炉内氢的利用率降低。(3)生铁产量。焦炉煤气喷吹量增大,梅钢2号高炉生铁产量显著增加。一方面,炉内H₂浓度显著增加,且H₂还原条件优于CO,炉料还原加速,炉料在炉内停留时间减少;另一方面,喷吹焦

表4 喷吹焦炉煤气对梅钢2号高炉主要操作指标的影响
Table 4 Effect of COG injection on major operational parameters of Mei Steel No. 2 BF

条件	Base	COI20	COI40	COI50
矿焦比(w _o /w _c)	4.187	4.518	4.646	4.758
置换比/(kg·m ⁻³)	0	0.450	0.448	0.446
固体炉料流量/(kg·s ⁻¹)	85.02	95.26	101.18	105.87
生铁产量/(t·d ⁻¹)	3 642.8	4 181.70	4 494.80	4 740.00
焦比/(kg·t ⁻¹)	367.5	340.60	323.80	321.80
煤比/(kg·t ⁻¹)	134.6	134.8	134.6	134.3
焦炉煤气比/(kg·t ⁻¹)	0.00	9.62	19.55	23.98
固体还原剂总消耗量/(kg·t ⁻¹)	502.20	475.40	458.40	456.10
高炉碳净排放量/(kg·t ⁻¹)	387.07	367.48	361.82	355.93
CO利用率/%	51.76	54.64	55.67	56.46
H ₂ 利用率/%	33.99	31.16	30.17	29.44
还原气的利用率/%	49.87	51.56	51.71	51.84
条 件	COI60	COI70	COI80	COI100
矿焦比(w _o /w _c)	4.797	4.815	4.857	5.365
置换比/(kg·m ⁻³)	0.446	0.446	0.445	0.444
固体炉料流量/(kg·s ⁻¹)	108.73	111.489	114.91	122.5
生铁产量/(t·d ⁻¹)	4 854.20	4 950.8	5 153.10	5 495.52
焦比/(kg·t ⁻¹)	318.60	316.40	315.00	303.40
煤比/(kg·t ⁻¹)	134.1	134.3	134.6	134.1
焦炉煤气比/(kg·t ⁻¹)	28.82	33.95	38.61	48.20
固体还原剂总消耗量/(kg·t ⁻¹)	452.70	450.7	449.60	437.50
高炉碳净排放量/(kg·t ⁻¹)	350.80	345.231	341.02	330.96
CO利用率/%	56.90	56.93	57.60	58.50
H ₂ 利用率/%	29.01	28.71	28.45	27.87
还原气的利用率/%	51.81	51.82	51.85	51.93

炉煤气需要增大富氧进行热补偿,而富氧增加强化了回旋区碳的燃烧,有利于炉料快速下降。以上两方面的协同促进作用有利于生铁产量大幅增加。当喷吹 $50 \text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$ 焦炉煤气时,产量大幅增至 $4\,740 \text{ t}$,增产 30.12% 。(4)还原剂消耗量。由于风口喷吹焦炉煤气可代替部分碳燃烧,同时直接还原、硅还原及溶损反应消耗的碳减少,故当焦炉煤气喷吹量增大时,焦比、煤比、固体还原剂消耗均呈减少趋势。比照 Base 条件,喷吹 $50 \text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$ 焦炉煤气可使焦比和固体还原剂消耗分别降低 12.43% 和 9.18% 。(5)碳素净排放。喷吹焦炉煤气有利于降低碳排放,当喷吹 $50 \text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$ 焦炉煤气时,高炉碳排放可降低 8.61% ,这也再一次验证了喷吹焦炉煤气是低碳炼铁的有效可行途径之一。

2 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气经济效益初步分析

结合上述数值模拟研究结果,综合考虑喷吹焦炉煤气后原燃料消耗量变化以及市场焦炭价格波动,从降本和增产两个方面初步评价了梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气的经济效益。评估内容如图7所示,图中,由降低吨铁成本变化产生的经济效益简

称成本效益;由增加生铁产量产生的经济效益简称增产效益;由降本和增产共同作用产生的经济效益简称综合效益。

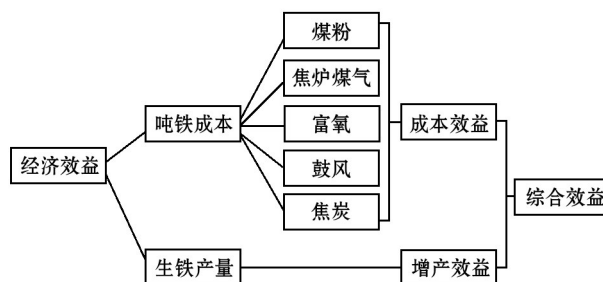


图7 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气经济效益初步分析

Fig. 7 Initial evaluation of economic benefit for Mei Steel No. 2 BF with COG injection

2.1 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气后原燃料消耗量变化

根据数值模拟研究结果,不同焦炉煤气喷吹量条件下梅钢2号高炉主要原燃料消耗量变化见表5。富氧消耗逐渐增大,焦比明显降低,节焦能力随焦炉煤气喷吹量增大不断提高。当喷吹 $50 \text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$ 焦炉煤气时,吨铁富氧增加 51.78 m^3 ,鼓风减少 227.42 m^3 ,焦炭减少 48.90 kg 。

表5 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气后原燃料消耗量变化

Table 5 Changes of raw materials and fuel consumption of Mei Steel No. 2 BF with COG injection

指标	Base	COI20	COI40	COI50	COI60	COI70	COI80	COI100
喷吹煤粉消耗/ $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	134.60	134.80	134.60	134.30	134.10	134.30	134.60	134.10
焦炉煤气消耗/ $(\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1})$	0	20.00	40.00	50.00	60.00	70.00	80.00	100.00
富氧消耗/ $(\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1})$	0	19.61	40.18	51.78	60.98	73.58	84.90	106.85
鼓风消耗/ $(\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1})$	0	-121.95	-184.32	-227.42	-246.01	-261.06	-288.21	-336.03
焦炭消耗/ $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	0	-26.90	-38.70	-45.70	-48.90	-51.10	-52.500	-64.100

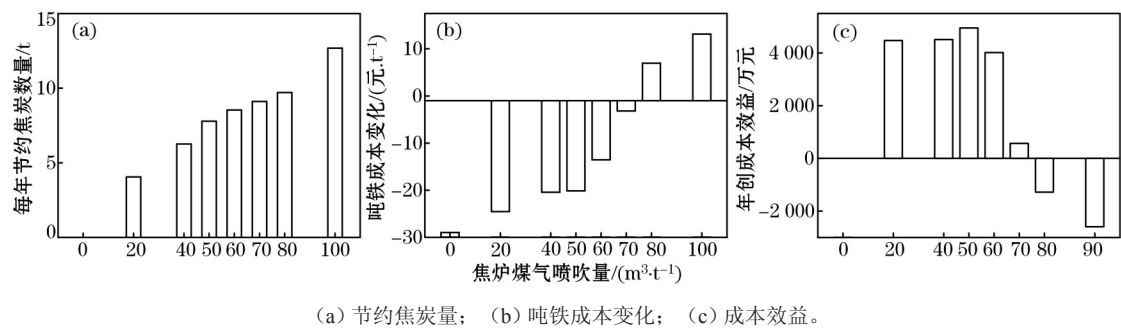
2.2 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气后的成本效益

根据梅钢2号高炉2016年11月的生产报表,鼓风 $0.064\,5 \text{ 元}/\text{m}^3$,焦炉煤气 $0.774\,9 \text{ 元}/\text{m}^3$,焦炭 $1.607 \text{ 元}/\text{kg}$,富氧 $0.5644 \text{ 元}/\text{m}^3$,吨铁生产成本 $1\,756.06 \text{ 元}$ 。基于以上价格,并假定含铁炉料成本、人工成本、维修费用、公共设施费等支出保持不变,初步评价了梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气产生的成本效益,结果如图8所示。当焦炉煤气喷吹量为 $50 \text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$ 时,吨铁成本降低 20.14 元 ,每年节约焦炭 7.79 万 t ,年创直接经济效益为 $3\,436 \text{ 万元}$ 。当焦炉煤气喷吹量大于 $80 \text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$ 时,由于焦炉煤气和富氧成本增幅较

高,导致吨铁成本反而增加,经济效益恶化。根据模型预测结果的变化趋势,最大喷吹量不宜超过 $70 \text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$ 。

2.3 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气后的增产效益

按照梅钢提供的吨铁经济效益 44 元 ,梅钢2号高炉喷吹不同量焦炉煤气条件下的增产效益见表6。喷吹焦炉煤气量增大时,年创增产效益增大。当喷吹焦炉煤气为 20 、 40 、 50 、 60 、 70 、 80 、 $100 \text{ m}^3/\text{t}(\text{Fe})$ 时,每年因生铁产量增加贡献的经济效益分别为 794 万 、 $1\,290 \text{ 万}$ 、 $1\,678 \text{ 万}$ 、 $1\,895 \text{ 万}$ 、 $2\,012 \text{ 万}$ 、 $2\,304 \text{ 万}$ 、 $2\,875 \text{ 万元}$ 。



(a) 节约焦炭量; (b) 吨铁成本变化; (c) 成本效益。
图 8 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气后的成本效益
Fig. 8 Cost benefit of Mei Steel No. 2 BF with COG injection

表 6 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气后的增产效益
Table 6 Production benefit of Mei Steel No. 2 BF with COG injection

变化	Base	COI20	COI40	COI50	COI60	COI70	COI80	COI100
生铁产量/(t·d ⁻¹)	0	501.2	814.3	1 059.5	1 173.7	1 270.3	1 454.6	1 815.0
年创增产效益/万元	0	794	1 290	1 687	1 897	2 012	2 304	2 875

2.4 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气后的综合效益

梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气后,由降本和增产共同作用产生的综合经济效益如图9所示。当喷吹焦炉煤气为20、40、50、60、70、80、100 m³/t(Fe)时,年创综合效益依次为4 487、4 592、5 115、4 225、2 580、1 019、281万元。

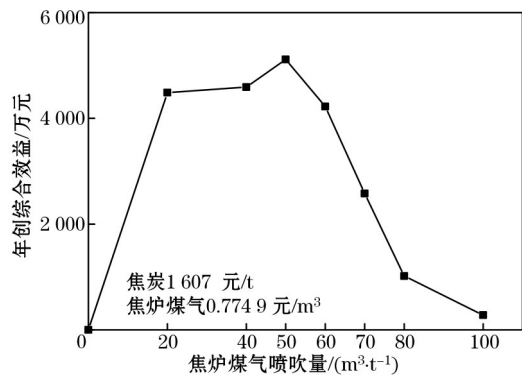


图 9 梅钢2号高炉喷吹焦炉煤气后的综合效益
Fig. 9 Total benefit of Mei Steel No.2 BF with COG injection

3 结论

- (1) 与未喷吹焦炉煤气相比,梅钢2号高炉喷吹 50 m³/t(Fe)焦炉煤气,炉内还原气浓度增加,炉料还原速度加快;产量增至 4 740 t/d,增幅 30.12%;焦比降至 321.80 kg/t(Fe),降幅 14.43%;碳排放减至 355.93 kg/t(Fe),减幅 8.61%;
- (2) 当梅钢2号高炉喷吹 50 m³/t(Fe)焦炉煤气时,按焦炭 1 607 元/t、焦炉煤气 0.774 9 元/m³、吨铁

效益 44 元计,吨铁成本可降低 20.14 元,每年因喷吹焦炉煤气节约焦炭 7.79 万 t,年创综合经济效益 5 115 万元。

- (3) 综合考虑经济效益、节焦潜力、梅钢富氧能力和焦炉煤气富余量,梅钢2号高炉焦炉煤气喷吹量适宜维持在 50 m³/t(Fe)左右。

参考文献:

[1] 张寿荣. 炼铁系统节能——我国钢铁工业 21 世纪技术进步的重点[J]. 钢铁, 2005, 40(5): 1.(ZHANG Shou-rong. Systematic energy saving in ironmaking—the priority to be paid in technological process of China's steel industry in 21st century[J]. Iron and Steel, 2005, 40(5): 1.)

[2] 蔡九菊, 孙文强. 中国钢铁工业的系统节能和科学用能[J]. 钢铁, 2012, 47(5): 5. (CAI Jiu-ju, SUN Wen-qiang. China can use system energy saving of iron and steel industry and science [J]. Iron and Steel, 2012, 47(5): 5.)

[3] 李新创, 高升. 钢铁工业绿色发展途径探讨[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2017, 9(1): 19. (LI Xin-chuang, GAO Sheng. Discussion on green development path of iron and steel industry[J]. Journal of Engineering Studies, 2017, 9(1): 19.)

[4] 刘绍敏. 河北钢铁业绿色产业链构建[J]. 开放导报, 2016, 184(1): 82. (LIU Shao-min. Construction of the green industrial chain in Hebei steel industry[J]. China Opening Journal, 2016, 184(1): 82.)

[5] 殷瑞钰. 绿色制造与钢铁工业[J]. 钢铁, 2000, 35(6): 61. (YIN Rui-yu. Green manufacturing vs steel industry[J]. Iron and Steel, 2000, 35(6): 61.)

[6] 邵学, 尚海霞. 中国钢铁工业“十二五”节能成就和“十三五”展望[J]. 钢铁, 2017, 52(7): 9. (GAO Xue, SHANG Hai-xia.

- Energy saving achievements of 12th Five- Year Program and prospect of 13th Five- Year Program for Chinese steel industry [J]. Iron and Steel, 2017, 52(7): 9.)
- [7] 王海风, 裴元东, 张春霞, 等. 中国钢铁工业烧结/球团工序绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 1. (WANG Hai-feng, PEI Yuan-dong, ZHANG Chun-xia, et al. Green development of sintering/pellet procedure in China iron and steel industry[J]. Iron and Steel, 2016, 51(1): 1.)
- [8] 廖中举, 李喆, 黄超. 钢铁企业绿色转型的影响因素及其途径[J]. 钢铁, 2016, 51(4): 83. (LIAO Zhong-ju, LI Zhe, HUANG Chao. Antecedent factors of iron and steel enterprises' green transition and its transition paths[J]. Iron and Steel, 2016, 51(4): 83.)
- [9] 徐匡迪. 低碳经济与钢铁工业[J]. 钢铁, 2010, 25(3): 1. (XU Kuang-di. Low carbon economy and iron and steel industry[J]. Iron and Steel, 2010, 25(3): 1.)
- [10] 刘文权. 低碳炼铁与低碳经济[J]. 炼铁, 2010, 29(5): 53. (LIU Wen-quan. Low carbon ironmaking and low carbon economy [J]. Ironmaking. 2010, 29(5): 53.)
- [11] 张春霞, 王海风, 张寿荣, 等. 中国钢铁工业绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁, 2015, 50(10): 1. (ZHANG Chun-xia, WANG Hai-feng, ZHANG Shou-rong, et al. Strategic study on green development of Chinese steel industry[J]. Iron and Steel, 2015, 50(10): 1.)
- [12] 刘宏强, 张福明, 刘思雨, 等. 首钢京唐钢铁公司绿色低碳钢铁生产流程解析[J]. 钢铁, 2016, 51(12): 80. (LIU Hong-qiang, ZHANG Fu-ming, LIU Si-yu, et al. Green low carbon analysis of iron and steel manufacturing process of Shougang Jingtang Iron and Steel Company[J]. Iron and Steel, 2016, 51(12): 80.)
- [13] 王新东, 王国栋. 以产学研用协同创新模式助推钢铁行业技术进步[J]. 钢铁, 2017, 52(7): 1. (WANG Xin-dong, WANG Guo-dong. Promoting technical progress of iron and steel industry with a new mode of collaborative innovation[J]. Iron and Steel, 2017, 52(7): 1.)
- [14] WANG Hong-tao, ZHAO Wei, CHU Man-sheng, et al. Current status and development trends of innovatite blast furnace iron-making technologies aimed to environmental harmony and operation interlectualization[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2017, 24(7): 751.
- [15] 项钟庸, 王筱留, 刘云彩, 等. 用评价高炉生产效率的新方法落实低碳炼铁方针[J]. 中国冶金, 2016, 26(7): 1. (XIANG Zhong-yong, WANG Xiao-liu, LIU Yun-cai, et al. Policy implementation of low-carbon ironmaking using a new evaluation method of blast furnace production efficiency[J]. China Metallurgy, 2016, 26(7): 1.)
- [16] 王海风, 张春霞, 胡长庆, 等. 钢铁企业焦炉煤气利用的一个重要发展方向[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(3): 1. (WANG Hai-feng, ZHANG Chun-xia, HU Chang-qing, et al. Important development trends of coke oven gas utilization in steel plant [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(3): 1.)
- [17] 白宗庆, 白进, 李文. 焦炉煤气综合利用及CO₂[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(1): 34. (BAI Zong-qing, BAI Jin, LI Wen. Utilization of coke oven gas in China and its potential for reduction of CO₂ emission[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(1): 34.)
- [18] 储满生, 郭宪臻, 沈峰满, 等. 多流体数学模型的开发和应用[J]. 钢铁, 2007, 42(12): 11. (CHU Man-sheng, GUO Xian-zhen, SHEN Feng-man, et al. Development and application of multi-fluid blast furnace model[J]. Iron and Steel, 2007, 42(12): 11.)

(上接第 77 页)

- [9] Sang Woo Lee, Hu-chul Lee. The mechanical stability of austenite and cryogenic toughness of ferritic Fe-Mn-Al alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24A: 1333.
- [10] 编跣. 浦项超低温高锰钢获 ASTM 注册[N]. 世界金属导报, 2017-6-13(B01). (PIAN Qian. Ultra-low temperature high Mn steel of Posco obtained ASTM registration[N]. World Metals, 2017-6-13(B01).)
- [11] 机械工程手册、电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册: 工程材料卷[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1996. (The Editorial Board of Mechanical Engineering Handbook and Electric Engineering Handbook. Mechanical Engineering Handbook: Engineering Material[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 1996.)
- [12] Fultz B, Morris J W. A mössbauer spectrometry study of the mechanical transformation of precipitated austenite in 6Ni steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 1985, 16: 173.
- [13] Morris J W, Jr, Kim J I, et al. Consequences of the Re-Transformation of Precipitated Austenite in Ferritic Cryogenic Steels [R]. Cambridge: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1979.
- [14] Lee Y K, Shin H C, Jang Y C, et al. Effect of isothermal transformation temperature on amount of retained austenite and its thermal stability in a bainitic Fe- 3% Si- 0.45% C- X steel[J]. Scripta Materialia, 2002, 47(12): 805.
- [15] Chiang J, Lawrence B, Boyd J D, et al. Effect of microstructure on retained austenite stability and work hardening of TRIP Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(13/14): 4516.
- [16] LI L, GAO Y, ZHU N Q, et al. Technology for high performance TRIP steel[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(7): 1823.
- [17] Farooque M, A Yub H, Huq A U, et al. The formation of reverted austenite in 18% Ni350 grade maraging steel[J]. Journal of Materials Science, 1998, 33(11): 2927.