DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.019

球墨铸造生铁的开发与冶炼

黄宏奇
(马鞍山钢铁公司,安徽 马鞍山 243000)

摘　要:通过对原料资源的调查和分析,对冶炼球墨铸造生铁进行了可行性研究。选择凹山磁铁矿、氧化铁皮和罗布河铁矿粉作为烧结含铁原料,以降低烧结矿 P 含量;在生产烧结矿过程中,对碱度、配碳量和其他烧结参数加以调整;在高炉冶炼过程中,为了控制生铁中 P 含量,采用降低熟料率的方法,即 25%大山生矿 +75%高碱度烧结矿,再加入一定数量的硅石、锰矿等的炉料结构。最终成功生产出合格的球墨铸造生铁。

关键词:球墨铸造生铁;冶炼;烧结矿;P 含量;高炉

中图分类号: TF593　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)07-0708-04

Development and Smelting of Foundry Pig Iron for Nodular Cast Iron

HUANG Hongqi
(Maanshan Iron & Steel Co., Ltd., Maanshan 243000, China)

Abstract: The feasibility of smelting of foundry pig iron for ductile iron was studied by investigation and analysis of raw material resources. Aoshan magnetite ore, iron oxide scale and Luobohe iron ore powder were selected as the raw materials for sinter to reduce the P content of sinter. In the process of sinter production, alkalinity, carbon content and other sintering parameters were adjusted. In the process of blast furnace smelting, in order to control the P content in pig iron, the method of reducing clinker rate was adopted, that was, 25% of dashanite ore and 75% of high-basicity sinter, and then a certain amount of silica, manganese ore and other charge structure was added. Finally, the qualified foundry pig iron for ductile iron is successfully produced.

Key words: nodular cast pig iron; smelting; sintered ore; P content; blast furnace

随着生产的发展,马钢公司及其长江分公司、合肥分公司自制零配件的内在质量要求越来越高,马钢机修厂普通铸铁件的生产已大批量转入球墨铸铁件的生产,每年需要球墨铸铁 6 000 多 t。多年来,马钢公司球墨铸铁一直从外面购进,单价 2 500~2 900 元 /t,加上运输费和其它费用,合计 2 700~3 000 元 /t 左右,不仅成本高,而且数量不能满足,严重影响公司球墨铸铁件的生产。同时,周边市场对球墨铸造生铁的需求也比较旺盛。为解决这一难题,在公司有关部门的组织协调下,马鞍山钢铁公司原第三炼铁分厂 1#、2# 高炉于 2015 年 2 月 10 日至 17 日进行了开发冶炼,基本成功,此次开发,不仅满足了公司生产球墨铸铁的需要,而且开辟了该厂今后发展生产的途径。

收稿日期: 2018-05-03

作者简介: 黄宏奇(1964-),安徽枞阳人,高级工程师. 主要从事钢铁冶金方面的工作. 电话:13215555880,
E-mail:hhq2485246@163.com

1　球墨铸造生铁的试制

1.1　烧结用铁矿粉种类的选择

球墨铸造生铁对 P 等元素含量要求很高, 马钢矿石资源中含 P 含量较高,因此冶炼难度很大。为此该厂组织有关人员首先进行了可行性研究, 认为本次新产品的开发,铁矿石品种选择至关重要,通过对公司原料资源的调查、分析和研究,厂部亦多次召开了专题研讨会,矿种选择如下。

精矿粉:由于东山精矿粉含 P 0.12%左右,必须替代, 本公司南山矿所产凹山磁矿粉 P 含量在 0.07%~0.10%之间, 品位较东山精矿粉高 3%左右,且运输组织较方便。

富矿粉: 澳大利亚的罗布河矿粉含 P 量比凹山磁矿粉略低,而且马钢公司一直在使用,同时也便于转产变料。

烧结粉矿: 一铁厂过筛后的烧结粉矿含 P 一般为 0.11%~0.12%,也必须替代。氧化铁皮含 P 量为烧结粉的 50%~60%, 约在 0.06%~0.09%, 经 10 mm×10 mm 的筛子过筛后, 粒度较均匀,1~3 mm 占多数,且 FeO 高达 50%左右,这些均有利于烧结,并可

提高烧结矿的品位,从而进一步降低生铁含P量。

选择了凹山磁铁矿粉、氧化铁皮、罗布河铁矿粉作为烧结的含铁原料,根据其理化成分(见表1),进行了多种配料方案的计算,通过计算结果比较,从中选择配比为:25%凹山磁铁矿粉+25%氧化铁皮+30%罗布河铁矿粉+8%石灰粉+6%~7%云石粉+5%~6%焦碳粉,最后烧成的烧结矿中P含量为0.05%~0.07%的方案。

1.2 低P烧结矿生产技术参数的调整

(1)烧结矿碱度的调整　烧结矿P含量一般为0.05%~0.07%,相比较,大山矿含P略低。为确保生铁含P≤0.1%,高炉熟料率75%,考虑冶炼时还要加一定数量的硅石,因此将烧结矿二元碱度提高0.25,由1.40提至1.65。

(2)烧结配碳量的调整　罗布河铁矿粉结晶水含量高10%左右,烧损很大。其配比越高,越难烧结,焦粉消耗也越高,本次罗布河铁矿粉配比由15%~20%增加到30%,增加近一倍,按钢研所的研究报告,配炭量需大量增加,但由于配加了(25±2)%的氧化铁皮,其氧化亚铁含量为45%~50%。在高温氧化性气氛下发生氧化反应并放出热量。据有关资料介绍,在用100%的氧化铁皮作为铁原料进行烧结时,配炭量可减至零,说明该氧化反应放出的热量是相当可观的。我公司正常生产时,采用40%东山精矿粉+15%~20%罗布河铁矿粉+15%~20%烧结矿粉,烧结矿二元碱度在1.40±0.15时的配炭量一般在6%。

本次生产,含铁矿粉配比采用23%~30%凹山磁铁矿粉+25%~30%罗布河铁矿粉+23%~27%氧化铁皮,烧结矿二元碱度提高到1.6±0.15,其配炭量不但没有增加,反而降低了约15%,在5%的配炭量下,所生产的烧结矿FeO含量在12%左右,较普通烧结矿仍高约2%,烧结矿转鼓强度在78%~82%,而在6%的配炭量下,烧结矿FeO含量约为13%~15%。

1.3 烧结操作条件和主要技术指标

烧结操作条件和主要指标如表2。开发期间,烧结机的利用系数接近1.4 t/m^{2}台时,但作业率较低,主要原因是受成品仓满停机影响。开发期间,平均每天仓满停机4~5 h。

焦粉的合格率偏低,仅71.68%,另外我厂采用高炉煤气点火,点火温度较低,1#烧结机的点火温度仅为997℃。这些因素对烧结生产都有一定的影响。

1.4 球墨铸造生铁的试生产及冶炼特点

(1)高炉炉料结构　由于在炼铁过程中所有原料中的P含量将全部被还原进入生铁[1]。通过炼铁配料计算得知本次烧结矿中的P含量必须控制在0.05%~0.07%之间,才能使球墨铸造生铁中的P含量达到要求[2]。为了使生铁中P尽可能低,采用降低熟料率的方法,即25%大山矿+75%高碱度烧结矿+一定数量的锰矿、硅石等的炉料结构。因为根据相关资料显示,大山铁矿P含量较低。

(2)加硅石冶炼　生铁中硅的还原主要来自于焦炭的灰份,为增加生铁硅含量通常用多加焦炭的方法来提高炉缸温度,促进硅的还原。众所周知,炉缸温度越高,析出的石墨越多,这种石墨使得铁液流动性变差,铁损增多,而冶炼球墨铸造铁的P要求极低,这种现象较冶炼普通铸造生铁尤为突出。而且石墨碳易沉积于炉底,引起炉底升高,炉缸堆积,导致炉况不顺,焦比升高,产量降低[3]。为改变这一状况,决定加硅石进行冶炼。加硅石冶炼铸造生铁,我厂已进行过多次实践,已经有了比较一致的看法,主

表1 烧结含铁原料的成分及波动情况(三铁分厂烧结车间)(%)

Tab.1 Composition and fluctuation of sintered iron-containing raw materials

品种	凹山磁铁粉				澳大利亚铁矿粉				氧化铁皮			
成分指标	SiO_2	P	TFe	H_2O	SiO_2	P	TFe	H_2O	SiO_2	P	TFe	H_2O
平均值	6.14	0.079	64.15	10.0	6.61	0.062	59.18	9.0	4.08	0.073	70.55	5.6
最大	8.75	0.097	66.51	11.0	7.45	0.087	64.39	10.0	6.75	0.100	73.09	9.5
最小	5.30	0.061	61.1	9.5	5.05	0.043	56.40	7.5	微	0.033	69.33	4.5
极差	3.45	0.036	5.41	1.5	2.40	0.044	7.99	2.5	6.75	0.067	3.76	5.0
标准偏差	0.985	0.010 5	1.50	0.612	1.03	0.017 8	3.61	1.08	2.48	0.026 2	1.55	2.19

表2 烧结操作条件和主要指标

Tab.2 Operating conditions and main indicators of sintering

指标	料层厚度/mm	点火温度/℃	焦粉合格率(%)	混合料水份(%)	总管负压/kPa	利用系数/t·(m^2·h)$^{-1}$	作业率(%)	仓满停机率(%)
1#烧结机	500	997	71.68	7.18	13.1	1.387	87.10	8.11
2#烧结机	510	1012	71.68	7.18	13.8	1.405	88.18	7.58
全厂	500/510	997/1012	71.68	7.18	13.1/13.8	1.394	87.64	7.85

要从以下几个方面考虑，硅石加入量、硅石加入方式、硅石加入时间、焦炭负荷调整和炉渣碱度控制。

硅石加入方式是：硅石与焦炭一同入炉；加入时间是将炉温提到铸造铁水平后，再加入，然后逐步加大焦炭负荷，并控制炉渣碱度，直至炉温控制在铸造铁水平，生铁含 S 适宜。

硅石加入量的适宜与否，是影响冶炼效果的关键，加入量过多，影响铁液脱 S 效果，同时渣量过大也对增 Si 不利，加入量过小，起不到应有的效果。

我厂冶炼普通铸造生铁的实践表明，硅石加入量为 50~60 kg/t 铁时，效果显著，可以提高 5.5%产量，焦比减少 15 kg/t 铁。

此次冶炼条件发生了显著变化，主要是烧结矿品位高，渣量比普通铸造铁减少约 100 kg/t，实际硅石用量平均 37 kg/t 铁。

(3)加钢屑冶炼　钢屑的含铁量高，含 P 低，因此加钢屑冶炼球墨铸铁是提高产品质量的重要手段，通过对比试验，当钢屑加入量达到 100 kg/t 铁时，可使生铁 P 含量降低 0.01%，成品率提高 20%，产量增加 15%，焦比降低 5%~10%。加钢屑冶炼效果如表 3。

(4)加锰矿冶炼　为了满足用户对生铁含Mn量的要求，加锰矿冶炼是必不可少的，同时提高生铁含 Mn 量，可以改善铁水流动性，减少铁损，这对冶炼球墨铸造铁更加重要。锰矿的含 P 一般较高，此次选择柳州锰矿，对冶炼有利，其化学成分为 Fe7.99%，Mn34.22%，P0.087%，$SiO_2$16.28%各高炉的加入量和效果如表 4。

表3 加钢屑冶炼效果

Tab.3 Effect of steel scrap smelting

指标	钢屑量 /kg·t^{-1}	生铁含 P(%)	P≥0.1%炉次	球墨铁成功率(%)	平均日产 /t
1# 炉	0	0.081	14	76.81	716
2# 炉	104	0.072	7	97.67	747
比较	+104	-0.09	-7	+20.80	+31

表4 加锰矿冶炼效果

Tab.4 Smelting effect of adding manganese ore

炉号	1#	2#	全厂
加入量 kg/t$_{铁}$	16	29	22.5
生铁含 Mn(%)	0.58	0.64	0.62

2　球墨铸造生铁生产过程中存在的问题

从烧结配料到烧结矿生产，再到高炉炼铁生产，全部时间只有一个星期。在这段时间内表现出来的问题主要有：

(1)转产的滞后效应影响，转产前后，因矿种的变化，烧结仅大变料就达到 4 次之多，这对稳定高炉炉况，稳定铁液的产量和质量带来了不利影响。

(2)过渡产品等对生铁合格率的影响，球墨铸造生铁对 P、S 含量等要求极高，加上用户对 Si、Mn 等的附加要求，以及转产前后过程中必然产生的过渡产品，这些因素造成球墨铸造生铁合格率较普通生铁下降 5%，仅为 94.50%；

(3)铁损增加，由于铁液粘稠，造成铁液粘沟、粘罐特别严重，炉前和铸铁的劳动强度加大。2 月 10~17 日，铸铁机回炉 342.6 t，送原料处 182.9 t，龙沟铁 260 t 合计 785.5 t，与理论出铁量相比较，铁损高达 6.52%，比正常生产时增加 1.5 倍，铁液水罐大修增加 50%，糊罐增加 133%；

(4)转产和组织生产难度大：烧结要清仓提前进料，东山精矿粉和烧结粉末必须用完方可转产，而实际两种料难以同时用完。在转产过程中，高炉用料种类多，料仓数量少，5# 皮带打料很困难，2 座高炉转产在时间上很难一致，给铸铁机等影响也较大。当球墨铸铁改炼炼钢铁时，因炉缸堆积，炉底不同程度升高，造成的高炉炉况波动很大。另外，我厂受高炉料仓的限制，锰矿等只能采用人工加入，因此要使锰矿等的配比达到要求和均匀加入相当困难。

3　相关问题讨论

3.1　铁矿石的 P/Fe 比问题

为了使生铁中的 P 含量尽可能低，本次采用降低熟料率的方法，即多配大山生铁矿，而从冶炼期间的实际情况来看，大山生铁矿不仅品位低，SiO_2、CaO 和 TFe 波动大，并且含 P 也不是很低，其实际成分与波动如表 5。

表 5 大山铁矿石成分

Tab.5 Chemical composition of Dashan Iron Ore

成分(%)	TFe	SiO_2	CaO	MgO	P
波动范围	34.78~52.17	10.30~20.00	7.90~13.43	0.91~2.28	微量 ~0.091
平均	45.21	14.81	9.97	48	0.047
准标准差	5.28	2.96	1.71	0.35	0.027

我们认为，生铁中P含量主要来源于铁矿石，这不仅与铁矿石的P含量有关,而且与其品位关系较大,衡量铁矿石是否有利于冶炼球墨铸造铁,可以比较其P/Fe比指标，大山生铁矿和烧结矿的P/Fe比分别为1.04×10^{-3}和1.07×10^{-3}，二者无显著差别，建议今后进行增加熟料率的试验。在确保生铁质量的同时,提高产量,降低焦比,改善各项经济技术指标。

3.2 罗布河铁矿粉配比偏高问题

罗布河铁矿粉的配比由15%~20%增至30%后，虽然烧结矿的转鼓强度仍为78%~82%,粒度组成也较好，但该烧结矿使用后,4座高炉炉况均明显变差,不易接受风量,坐塌料次数大增。转产前后高炉炉况对比见表6。

表6 转产前后高炉炉况对比

Tab.6 Comparison of blast furnace conditions before and after conversion

时间	转产前(1~7日)	冶炼期(11~17日)
项目 炉号	坐塌料次数	坐塌料次数
1#	3	10
2#	4	12
全厂	7	22

这就说明烧结矿的还原粉化和熔融等冶金性能降低,建议公司有关部门加强这方面的研究,便于指导高炉生产和操作。

3.3 铁矿石品种选择问题

烧结精矿粉选用凹山磁铁矿，该矿仍含有一定数量的钒(V)、钛(Ti)等元素,导致球墨铸造生铁中含V=0.11%左右。由于V元素的存在,使铁液的黏度增大,铁液粘沟粘灌现象严重,铁损增大(9.7%),建议用铜陵精矿粉和其它原料代替。

4 结论

(1)本次开发的铁液成分波动较大,产品既有球墨铸铁,也有普通铸铁,还有炼钢铁。球墨铸铁成分为Si=1.00%~1.60%、Mn=0.40%~0.80%、S=0.02%~0.045%、P=0.03%~0.08%,其中符合GB/T 1412-2005国家标准的球墨铸造铁8 583 t，成功率83.80%,完全符合机修厂附加要求的产品达7 473 t，成功率72.97%,此次开发是基本成功的。

(2)在马钢现有原料条件下,选择凹山磁铁矿粉、氧化铁皮和罗布河铁矿粉作为烧结铁原料是可以生产球墨铸造铁的，产品的P含量必须执行GB/T 1412-2005国家标准,今后大批量进行工业生产,关键是要确保氧化铁皮、钢屑等原料的供给。

(3)冶炼球墨铸造铁,加硅石是必需的,其粒度在25~50 mm,用量在40~50 kg/t铁效果较好。

(4)按本次冶炼的高炉炉料结构,烧结矿二元碱度应在1.65±0.15,配炭量以5%为宜。

(5)经济效益显著,本次开发的产品成本约为2 150元/t,较公司外部买入价减少650元/t,运输费用减少200元/t。合计为公司节约费用729多万元，再加上球墨铸件本身的经济效益和社会效益更可观。

参考文献:

[1] 刘竹林编著. 炼铁原料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007

[2] 王振龙编著. 烧结原理与工艺 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001.

[3] 于宏杰. 硅石在冶炼铸造生铁中的应用[J]. 云南冶金,1994(11): 19-21, 12.

(上接第707页)

6 结语

(1)通过使用ProCAST模拟仿真技术,能够较准确的预测轮毂铸钢件缺陷产生部位,模拟分析结果与实物缺陷特征及分布基本相吻合,验证了优化后工艺的可靠性,可为优化工艺提供指导性依据。

(2)通过优化工艺方案,结合ProCAST软件模拟分析,显著降低了轮毂零部件发生渗油问题的不良品率，由优化改进前的29%降低到了2%以内,提高了该产品的经济效益。

(3)ProCAST模拟仿真技术可以对新产品铸造工艺进行验证,有效预测铸件缩孔缩松缺陷的分布,提高工艺出品率,辅助铸造工艺的设计与优化。

参考文献:

[1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册(5)[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[2] 樊超,杜志强,刘江,等. 利用发热保温冒口解决钩体头部缩孔缺陷的探索[J]. 铸造技术,2017,38(12)3021-3023.

[3] 樊超,张挨元,杜志强,等. Procast模拟仿真技术在平衡肘支架铸造缺陷预测方面的应用[J]. 铸造技术,2019,40(4):394-396.