

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180054

适用于高炉冶炼不锈钢母液的含铬炉料制备

朱德庆, 杨聪聪, 潘建, 郭正启

(中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 使用低品位铬铁精矿(或粉矿)是提高不锈钢产品市场竞争力的有效措施,对精粉进行预先造块是提高熔炉冶炼效率、降低焦比不可缺少的步骤。回顾了中南大学使用低品位南非铬铁精矿制备高品质炉料用于高炉冶炼不锈钢母液工艺的相关研究及经验。前期扩大试验表明,任意铬铁精矿比例条件下均可制备出高强度氧化球团($>2\,500\text{ N/个}$)和烧结矿。高压辊磨预处理是强化铬铁精矿造块的关键技术。为获得满足高炉冶炼要求的炉料冶金性能,南非铬铁精矿的使用比例应低于60%。球团烧结技术是对细粒铬铁精矿造块有效且较经济的技术手段,所得含铬烧结矿用于高炉冶炼不锈钢母液工艺是可行的。

关键词: 烧结矿; 球团矿; 铬铁精矿; 不锈钢母液; 高炉

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)10-0016-08

Preparation of chromium-bearing agglomerates for stainless steel master alloy production in blast furnace

ZHU De-qing, YANG Cong-cong, PAN Jian, GUO Zheng-qi

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The utilization of low grade chromite concentrates or fines is an effective way to improve the competitiveness of stainless steel products in the market. Preliminary agglomeration of these concentrates or fines is an essential step to improve the reduction efficiency and reduce the coke ratio of the smelting process. Earlier researches and experiences of Central South University in producing high quality feedstocks from low grade chromite concentrates for alternative production of stainless steel master alloys in blast furnaces were summarized. Pilot-scale tests showed that both high strength oxidized pellets (over $2\,500\text{ N/pellet}$) and sinters could be manufactured from any proportion of chromite concentrate. High pressure grinding rollers (HPGR) pretreatment is a key technique to strengthen the agglomeration of chromite concentrate rates. To achieve a desirable metallurgical performance of agglomerates in blast furnaces, the proportion of chromite concentrate should be less than 60%. Pellet-sintering technique is an effective and economic method for the agglomeration of fine chromite concentrates. It is feasible to use the chromium-bearing sinter as the charging material for stainless steel master alloys production in blast furnaces.

Key words: sinter; pellet; chromite concentrate; stainless steel master alloy; blast furnace

在冶金工业中,铬铁矿是生产金属铬、铬铁合金和不锈钢等产品必不可少的原料之一^[1]。当前,随着高品位铬铁块矿资源的日益枯竭,高效利用低品位的铬铁粉矿及精矿的现实意义日益凸出,特别表现在其突出的经济性,可明显降低不锈钢的生产成本,从而提高产品的市场竞争力^[2]。

当今几乎所有的铬铁合金都是采用电炉工艺冶炼得到的,而高炉冶炼不锈钢母液工艺作为一种可显著降低不锈钢生产成本的工艺,自“二战”以来,德国、前苏联、美国、瑞典和日本等国家便开展

过相关的试验研究^[3-6]。自20世纪80年代末,北京科技大学、上海大学联合上海宝钢集团一钢公司,以及太钢均先后开展了竖炉(高炉)法冶炼不锈钢母液的实验室和工业试验研究^[6-8]。其中,在上海宝钢集团一钢公司 255 m^3 高炉的工业试验成功冶炼得到铬质量分数为5%~21.3%的不锈钢母液近千吨,铬回收率达96%以上。该工业试验进一步说明高炉生产不锈钢母液的新工艺是可以被采纳的,表现出产量大、对低品位铬铁矿原料的适应性好和铁水中铬回收率高等优势,但同时也暴露了

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574281)

作者简介: 朱德庆(1964—),男,博士,教授; **E-mail:** dqzhu@csu.edu.cn; **收稿日期:** 2018-02-05

通讯作者: 杨聪聪(1989—),男,博士生; **E-mail:** smartyoung@csu.edu.cn

两个问题:焦比过高,一方面因为当时选择了保守的操作方针——高入炉焦比以确保渣铁排放顺利,另一方面是因为采用了较高比例生料(铬铁块矿)入炉;未对原燃料中磷质量分数加以控制而导致铁水含磷率高。因此,对低磷的铬铁粉矿或精矿进行造块、控制炉料磷质量分数、提高熟料入炉比例,对减少高炉冶炼焦比、控制铁水中含磷率和降低铁水生产成本具有重要意义。

铬铁矿粉常用的造块工艺有:烧结法、球团法和压团法,但目前所有的团块均是针对传统电炉法工艺而设计的,团块强度普遍较低,所需冶炼温度均在 1 600 ℃ 以上^[4, 9-14]。与电炉法相比,高炉冶炼不锈钢母液工艺所需的含铬炉料应具备合理的化学成分(磷、硫等有害杂质质量分数低)、足够高的机械强度(对于大型高炉而言,抗压强度应大于 2 500 N/个)和合格的高温冶金性能(低温还原粉化率和球团还原膨胀率低,特别是软化熔融性能需满足高炉冶炼顺行的要求)。因此,开展针对铬铁精(粉)矿的造块工艺研究,实现从原料、造块到冶炼、铸造全流程的贯通,可以为开发具有自主知识产权的不锈钢生产新工艺奠定坚实的基础。

南非拥有世界第一的铬铁矿储量,约占已探明总储量的 83.3%,其中南非铬铁矿 UG2 因其 $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\text{FeO})$ 低但有害杂质元素少、经济性高、储量大而受到世界广泛关注,被认为是冶炼不锈钢

的理想原料^[6, 15-16]。在此背景下,中南大学以一种南非低品位低磷铬铁精矿和一种国产磁铁精矿为主要原料,分别系统研究了适用于高炉冶炼不锈钢母液工艺的含铬氧化球团及烧结矿制备工艺,确定了铬铁精矿适宜的配加比例,并在实验室模拟高炉条件对含铬烧结矿的还原熔炼效果进行了评估。本文总结了此前的相关研究及经验,旨在为铬铁精矿制备高品质的高炉及传统电炉炉料提供有力依据。

1 试验原料

试验采用的主要原料包括一种南非铬铁精矿粉 C 和一种国产磁铁精矿 M,其化学成分和粒度组成分别见表 1 和表 2,两者的微观颗粒形貌如图 1 所示。试验选用了一种钠基膨润土 B 来改善原料的成球性,此外在烧结试验中还使用一种焦粉作为燃料,它们的化学成分见表 1。

由表 1 可知,南非铬铁精矿的 $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$ 为 42.55%,铬铁比 ($w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/w(\text{FeO})$) 仅为 1.99,属于低品位铬铁矿,同时其磷质量分数极低,仅为 0.005 6%,是一种优质的低磷原料。国产磁铁矿的 $w(\text{FeO})$ 为 27.67%,磷质量分数较低,为 0.021%,硫质量分数偏高,为 0.190%。整体来看,试验在选择原料时都严格控制了磷质量分数,而鉴于烧结、球团工序及高炉炉渣均具备较高的脱硫能力,因而并未严格控制原料中的硫质量分数。

表 1 试验用原料的化学成分
Table 1 Chemical compositions of raw materials

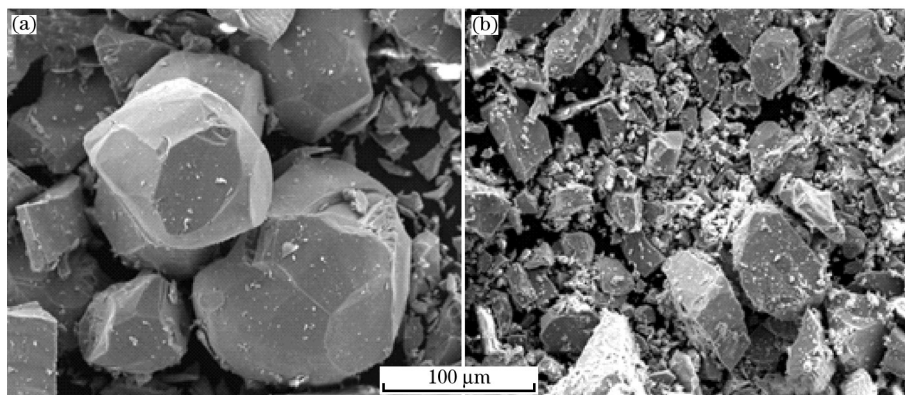
原料	$w(\text{TFe})$	$w(\text{FeO})$	$w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	% 烧损
南非铬铁精矿粉 C	22.61	21.38	42.55	1.92	3.40	9.02	13.58	0.005 6	0.047	1.03
国产磁铁精矿 M	65.12	27.67		0.98	3.61	1.49	1.42	0.021 0	0.190	0.99
钠基膨润土 B	1.28	0		4.17	62.12	0.23	14.20	0.027 0	0.100	7.42
焦粉	2.08	0		0.44	7.58	0.10	5.73		0.400	82.68

由表 2 和图 1 可得,南非铬铁精矿的粒度较粗,粒度大于 0.075 mm 的质量分数达到了 90.65%,表面光滑致密,颗粒近乎球形,成球性差,在造块前需

要预处理。相比之下,磁铁精矿的粒度较细,小于 0.075 mm 的质量分数达到了 85.19%,基本满足造球的要求。

表 2 铬铁精矿和磁铁精矿的粒度组成(质量分数)
Table 2 Particle size distributions of chromite and magnetite concentrates

原料	>0.5 mm	0.25~0.5 mm	0.15~0.25 mm	0.075~0.15 mm	0.045~0.075 mm	0.038~0.045 mm	<0.038 mm
南非铬铁精矿粉 C	2.41	10.20	29.59	48.45	8.55	0.80	0.00
国产磁铁精矿 M	0.00	0.00	1.08	13.73	25.14	3.90	56.15



(a) 南非铬铁精矿粉 C; (b) 国产磁铁精矿 M。

图 1 南非铬铁精矿和国产磁铁精矿的微观颗粒形貌

Fig. 1 Morphology of Southern African chromite and Chinese magnetite concentrates

2 原料的预处理

选择合适的原料预处理方式能够显著降低磨矿功耗,改善铬铁精矿的表面活性及亲水性,为后续优质球团及烧结矿的制备奠定有利的基础。前期研究^[7]已着重对比了高压辊磨预处理与常规球磨预处理两种工艺对改善铬铁精矿成球性的影响。

两种预处理工艺对铬铁精矿颗粒表面形貌及相同膨润土用量(1.6%)条件下生球性能的影响如图 2 所示。可以明显看到,未经预处理的铬铁精矿

的成球性极差,落下强度仅为 2 次/(0.5 m)左右,而使用高压辊磨及球磨预处理工艺均能明显改善其成球性能。对比两种预处理方式,在精矿比表面积接近的条件下,高压辊磨预处理的生球落下强度几乎是球磨预处理生球的 2 倍。在不同铬铁精矿比例条件下对铬铁精矿和国产磁铁精矿组成的混合精矿统一用高压辊磨预处理 1 次,处理后混合精矿比表面积为 780~1 140 cm²/g。在膨润土用量仅为 1.6%条件下,生球的落下强度也可达 7 次/(0.5 m)以上,抗压强度在 12 N/个以上,从而能够满足其在后续布料、烧结过程的强度要求。

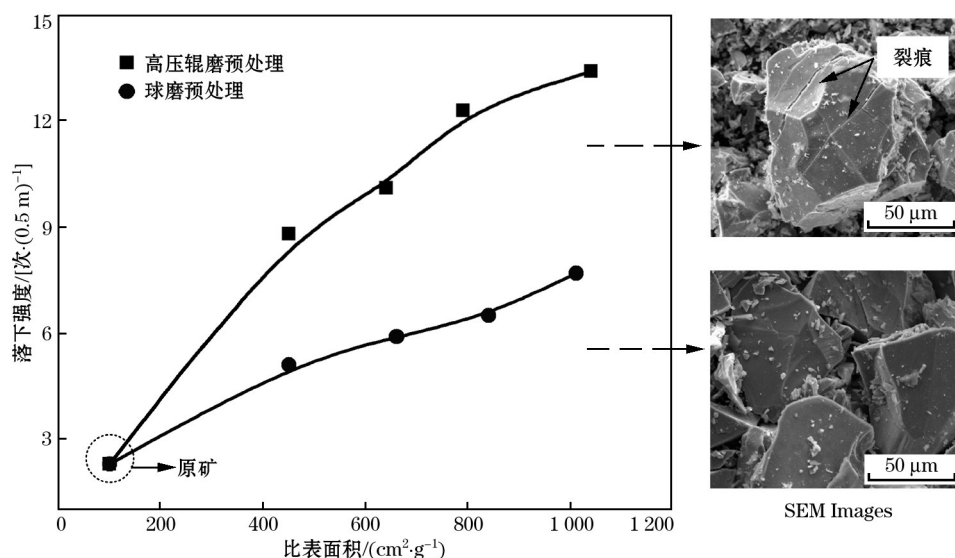


图 2 不同预处理方式对铬铁精矿颗粒表面形貌及生球性能的影响

Fig. 2 Effect of pretreatment methods on morphology and balling performance of chromite ore particles

通过观察预处理后铬铁精矿颗粒的颗粒形貌可以发现,高压辊磨通过料层挤压的作用可促使铬铁精矿颗粒内部产生裂纹、尖角等晶格缺陷,以及暴露更多新生表面和微细颗粒;而球磨预处理通过钢球

的冲击和研磨等作用往往使铬铁精矿颗粒呈片状、板状,表面依然致密光滑。这使得即使在低比表面积条件下高压辊磨预处理精矿制备的生球依然保持良好的落下强度。其主要原因在于:高压辊磨预处

理后样品粒度组成变得更加合理,颗粒表面粗糙和无序程度明显加强,从而有利于在造球过程中颗粒与颗粒之间的咬合拉紧;微细颗粒在粗颗粒之间有效填充更加增加了颗粒间的毛细作用力和生球的塑性,从而大大提高了生球的落下强度^[18]。高压辊磨预处理在处理球状或近球状颗粒时较球磨预处理体现出独特而明显的优势。

3 造块工艺

3.1 氧化球团工艺

预处理后混合精矿在比表面积为 $1\,500\sim 1\,900\text{ cm}^2/\text{g}$ 、焙烧温度为 $1\,300\text{ }^\circ\text{C}$ 、时间为 15 min 条件下,对比高压辊磨预处理与球磨预处理对含铬球团预热焙烧效果的影响(图3)可知:高压辊磨预处理条件下,任意铬铁精矿比例下均可制备出强度大于 $2\,500\text{ N/个}$ 的焙烧球;而球磨预处理条件下,铬铁精矿配加比例约在 20% 以下时焙烧球强度才能达到 $2\,500\text{ N/个}$ 以上。此外可以看到,随着铬铁精矿配加比例的提高,焙烧球强度均呈现不同程度的下降,这意味着

铬铁矿的存在并不利于球团的焙烧固结。

铬铁精矿配比为 40% ,混合精矿比表面积为 $1\,800\sim 1\,900\text{ cm}^2/\text{g}$,相同条件下对比两种预处理方式下得到的焙烧球微观结构和固结形式,如图4所示

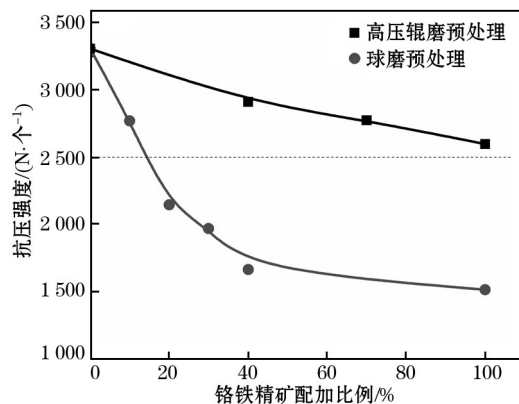
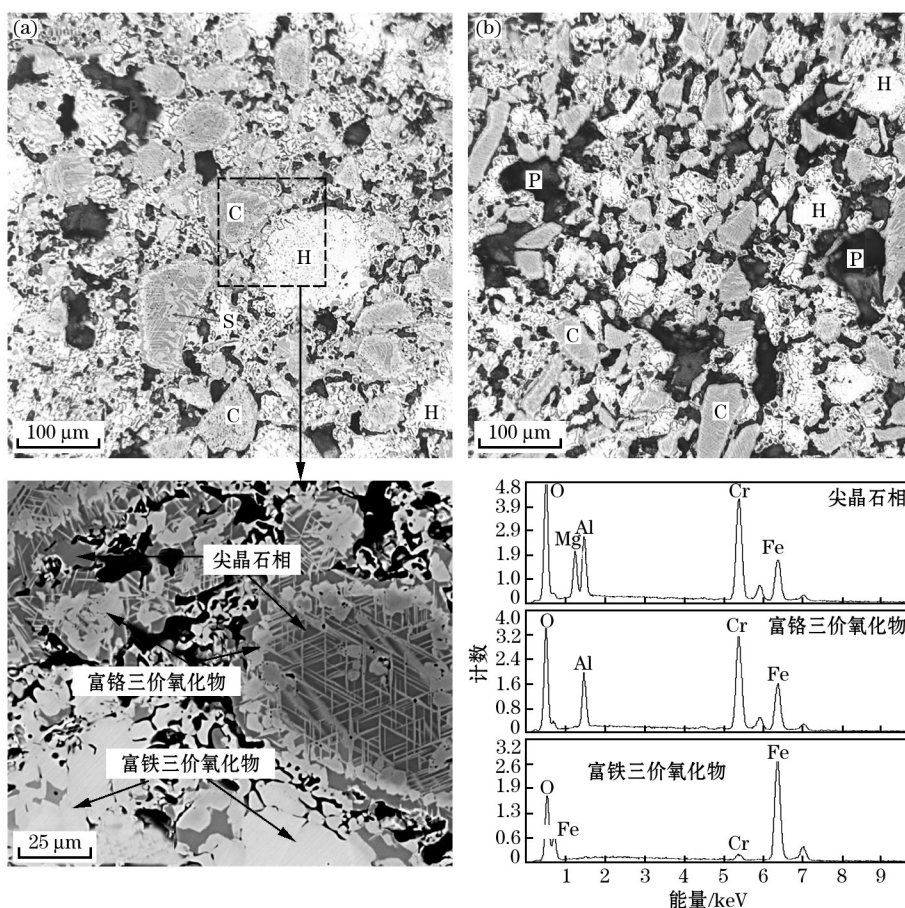


图3 不同铬铁精矿比例条件下高压辊磨和球磨预处理对焙烧球强度的影响

Fig. 3 Comparison of roasting performance of pellets made from varying amount of chromite concentrate pretreated by HPGR and ball milling



C—铬铁矿; H—赤铁矿; P—孔洞。

(a) 高压辊磨处理; (b) 球磨预处理。

图4 高压辊磨和球磨预处理对焙烧球固结效果的对比

Fig. 4 Comparison of consolidation of fired pellets made from 40% chromite concentrate pretreated by HPGR and ball milling

示。尽管在相同原料比表面积条件下,两者的微观结构和固结紧密程度仍呈现出巨大的差异,但是可以明显看到,高压辊磨预处理得到的焙烧球中晶体互连更加良好,颗粒间有更多的连接桥形成,这得益于高压辊磨的机械活化作用使矿物颗粒一开始便能相互咬合,粗细颗粒有效地填隙从而使接触面积明显增加。

朱德庆等^[19-20]揭示了铬铁精矿和磁铁精矿配矿得到的焙烧球团的固结机理,对比了铬铁精矿和磁铁精矿的氧化行为并阐述了其对球团固结的影响。含铬氧化球团主要为固相固结的形式,其强度的形成依赖于 Fe_2O_3 再结晶和富铬、富铁三价氧化物形成的固溶体连接颈。由于铬铁尖晶石的氧化能力明显弱于磁铁精矿,因而随着铬铁精矿比例的增加, Fe_2O_3 再结晶和三价氧化物固溶体连接桥的形成受到抑制,焙烧球的抗压强度下降。值得指出的是,少量液相的存在对铬铁矿球团的固结是十分有利的,但由于铬铁尖晶石结构稳定性较高、二价铁离子的反应活性差,往往导致 FeO_x - CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - MgO 系液相的生成困难^[21]。通过调控液相生成的方式来促进铬铁矿球团固结需要在今后进一步研究。

3.2 球团烧结工艺

混合精矿通过高压辊磨预处理至 $1800\sim 1900\text{ cm}^2/\text{g}$ 可以制备出高强度的焙烧球团,但这意

味着将带来前期的设备投入和较高的磨矿功耗。相比之下,烧结工艺对于原料的粒度和比表面积要求更低。已有研究^[22-25]表明,铬铁矿粉矿可以用常规烧结工艺进行造块,但在对铬铁精粉进行常规烧结时往往存在转鼓强度差、利用系数低、固体燃耗高等缺点,而采用球团烧结技术可以明显改善烧结矿的强度、提高利用系数和降低固体燃耗。因此,本文研究将基于球团烧结工艺试验。对高压辊磨预处理后比表面积为 $780\sim 1140\text{ cm}^2/\text{g}$ 的混合精矿和小于 1 mm 焦粉进行预先造球,然后在 $\phi 600\text{ mm}\times 1000\text{ mm}$ 的常规圆筒制粒机内外滚小于 3 mm 焦粉得到烧结混匀料,进而在直径为 180 mm 、料层高度为 600 mm 的扩大型烧结杯上优化干燥、点火制度,焦粉用量及内外分加比例、水分、生球粒度组成等一系列参数,得到了适宜的烧结工艺条件。

在自然碱度,总焦粉用量为 7.5% 、焦粉内配比例为 30% 、水分为 8.5% 条件下,不同铬铁精矿配比条件下最佳烧结指标的变化规律如图5所示。可以看到,铬铁精矿配比的增加有利于改善混合料的烧结性能:提高烧结矿转鼓强度、利用系数和成品率,降低固体燃耗。这一规律与制备氧化球团时相反,这可能是因为不同铬铁精矿配比条件得到的生球在烧结过程中高温带生成的液相量及液相性质不同的缘故,烧结矿的宏观形貌如图6所示,也证明了上述观点。

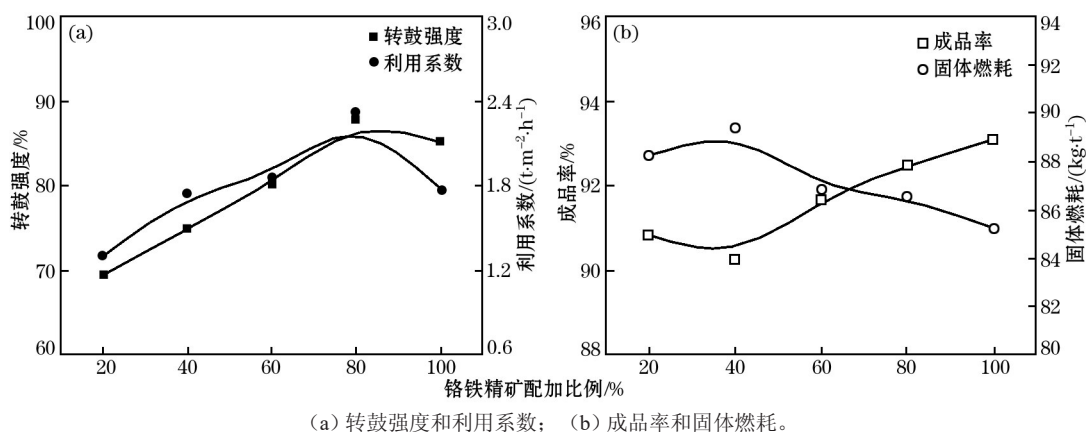


图5 不同铬铁精矿配加比例对生球烧结过程的影响

Fig. 5 Effect of amount of chromite concentrates in mixtures on sintering performance of green balls

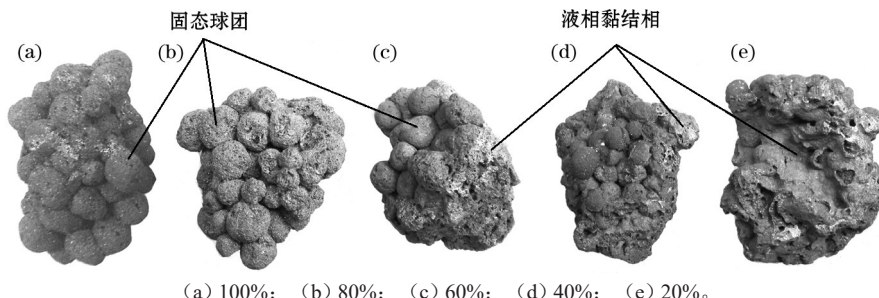


图6 不同铬铁精矿配比条件下球团烧结矿的宏观形貌

Fig. 6 Morphology of chromium-bearing sinters made from different proportions of chromite concentrates

与含铬氧化球团不同,含铬球团烧结矿主要依靠固相(铬铁尖晶石相再结晶)和液相(硅酸盐)固结^[26]。随着铬铁精矿配比的降低,液相固结的作用逐渐增强。与常规铁矿烧结矿的固结相比,含铬球团烧结矿中的液相量更少,仅为10%~25%,但烧结矿的机械强度和成品率往往较高^[22-24]。因此,烧结原料中铬铁精矿适宜的配比将更多由烧结矿的冶金性能所决定。

3.3 含铬氧化球团与烧结矿冶金性能的比较

对两种造块工艺进行扩大试验得到的氧化球团和烧结矿的主要化学成分和冶金性能进行了测定,结果分别见表3和表4。从两者的化学成分来

看,球团矿和烧结矿的硫、磷等杂质质量分数均较低,相比之下球团矿略低。球团矿的 $w(\text{FeO})$ 仅为1.79%,明显低于烧结矿的 $w(\text{FeO})$ (20%以上),这是由两种造块工艺气氛不同导致的。

对比相同铬铁精矿配比(40%)条件下球团和烧结矿的冶金性能可知,两者的高温软融特性接近,均能满足高炉冶炼的要求,但球团矿的机械强度和还原性更好。当铬铁精矿配比由40%提高至60%,烧结矿的低温还原粉化性能基本不变,但其还原性变差、开始软化温度和滴落温度明显增加,这对高炉冶炼不利。综合来看,为保证高炉冶炼的顺行,南非铬铁精矿的适宜配比应在60%以下。

表3 不同铬铁精矿配比时含铬氧化球团和烧结矿的化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical compositions of chromium-bearing agglomerates made from different proportions of chromite concentrates %

炉料类型	TFe	FeO	Cr ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P	S
球团(铬铁精矿配比为40%)	46.81	1.79	16.14	1.38	3.48	4.42	6.88	0.010	0.007
烧结矿(铬铁精矿配比为40%)	44.25	29.28	18.61	0.89	6.00	5.20	7.37	0.013	0.039
烧结矿(铬铁精矿配比为60%)	37.31	23.28	24.09	1.02	5.68	6.21	8.11	0.012	0.018

表4 不同铬铁精矿配比时含铬氧化球团和烧结矿的冶金性能

Table 4 Metallurgical performance of chromium-bearing agglomerates made from different proportions of chromite concentrate

炉料类型	CCS/ (N·个 ⁻¹)	TI/%	RI/%	RSI/%	RDI/%		$t_s/^{\circ}\text{C}$	$t_d/^{\circ}\text{C}$
					RDI _{>6.3 mm}	RDI _{<0.5 mm}		
球团(铬铁精矿配比为40%)	2917	96.40	57.70	8.90	94.80	1.50	1 158	1 369
烧结矿(铬铁精矿配比为40%)	—	74.93	52.57	—	92.44	4.93	1 102	1 352
烧结矿(铬铁精矿配比为60%)	—	80.13	47.24	—	92.84	3.75	1 142	>1 430

注: CCS为冷态抗压强度; TI为ISO转鼓强度; RI为还原度; RSI为还原膨胀指数; RDI为低温还原粉化指数; t_s 为软化开始温度; t_d 为滴落开始温度。以上指标均是参照高炉炉料冶金性能的相关检测标准测定。

4 模拟高炉条件的实验室还原熔炼

结合 Fact-Sage 热力学计算软件进行渣型设计,并在实验室小型电炉装置上模拟高炉冶炼条件(渣二元碱度为1.0,终渣中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为10%, $w(\text{MgO})$ 为10%)对上述40%铬铁精矿配比得到的球团烧结矿的还原熔炼效果进行了考察。试验方法为:将约150 g、粒度为10~12.5 mm的烧结矿和一定量事先经压团、烘干得到的粒度为5~8 mm还原剂(石墨)和熔剂(分析纯试剂)团块混匀后装入 $\phi 60\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱形石墨坩埚内,待电炉达到指定温度后放入石墨坩埚,温度回升后开始计时,在封闭环境下还原熔炼60 min,结束后迅速取出坩埚并铺盖煤粉以防止合金被进一步氧化。还原熔炼温度

对铁、铬回收率及合金产率的影响如图7所示。

由图7可得,随着熔炼温度由1 400提高至1 550 $^{\circ}\text{C}$,铁、铬元素的回收率和合金产率均随之增加。在熔炼温度达到1 500 $^{\circ}\text{C}$ 以上时,铁元素回收率几乎不变,维持在92.55%左右,意味着铁在该温度区间内基本被还原完毕;而铬元素回收率持续增加,从1 400 $^{\circ}\text{C}$ 的10%急剧提高到1 550 $^{\circ}\text{C}$ 的87.53%。此时合金母液与终渣的实际成分分别见表5和表6,最终合金母液中铁品位达到了71.15%,铬品位为19.52%,碳质量分数为7.84%,同时硫、磷等有害成分质量分数均较低,可以满足后续熔炼的要求;渣成分与设计终渣的成分接近。

对比模拟高炉条件下与模拟传统电炉条件的铬回收率^[12-13, 27-29],高炉冶炼不锈钢母液工艺对铬元

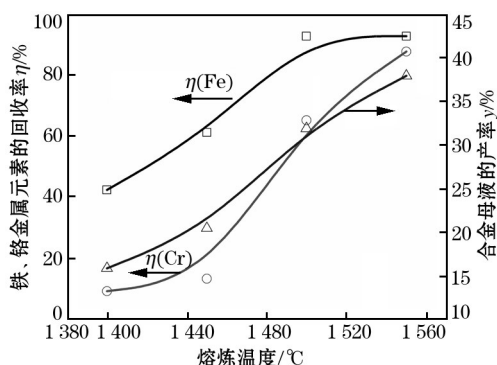


图7 温度对含铬烧结矿还原熔炼效果的影响

Fig. 7 Effect of smelting temperature on reduction efficiency of chromium-bearing sinter

素往往有更高的回收率,而相应所需的熔炼温度也明显要低。考虑到实际高炉操作时的熔炼温度可能更高,铬元素的回收率还会进一步提高。由此可见,含铬烧结矿用于高炉冶炼不锈钢母液工艺是可行的。

表5 最佳还原熔炼条件下的合金母液成分(质量分数)

Table 5 Alloy components under optimal smelting reduction conditions					
reduction conditions					%
TFe	TCr	C	Si	P	S
71.75	19.52	7.84	0.10	0.013	0.010

表6 最佳还原熔炼条件下的终渣实际成分

Table 6 Slag components under optimal smelting reduction conditions

w(TFe)/%	w(TCr)/%	w(CaO)/%	w(SiO ₂)/%	w(MgO)/%	w(Al ₂ O ₃)/%	w(C)/%	R
4.50	3.31	31.28	33.03	7.97	11.28	7.17	0.95

5 结论

(1) 高压辊磨预处理是强化铬铁精矿造块的关键技术。高压辊磨预处理条件下,任意铬铁精矿比例下均可制备出强度大于2 500 N/个的焙烧球;而球磨预处理条件下,南非铬铁精矿配加比例约在20%以下时焙烧球强度才能维持在2 500 N/个以上。

(2) 球团烧结技术可大大降低对原料粒度和比表面积的要求,同时能明显改善烧结矿的强度、提高利用系数和降低固体燃耗,较氧化球团工艺有着独特优势,是对铬铁精矿造块的有效技术手段。

(3) 相同铬铁精矿配比(40%)条件下得到的球团矿和烧结矿高温软融特性接近且均能满足高炉冶炼的要求,但相比之下,球团矿的机械强度和还原性更好。当铬铁精矿配比提高至60%以上时,烧结矿的还原性变差,开始软化滴落温度明显升高。综合来看,为保证高炉冶炼的顺行,南非铬铁精矿的适宜配比应在60%以下。

(4) 含铬烧结矿用于高炉冶炼不锈钢母液是可行的,表现出铁水中硫和磷杂质元素质量分数低、铬回收率高、所需还原熔炼温度较低等优势。因此,对低磷铬铁粉矿或精矿进行造块,控制炉料磷质量分数和提高熟料入炉比例,对减少高炉冶炼焦比、控制铁水中含磷率和降低铁水生产成本有着重要意义。

参考文献:

- [1] 闫江峰. 铬冶金[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007. (YAN Jiang-feng. Chromium Metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.)
- [2] Daavittila J, Honkaniemi M, Jokinen P. The transformation of ferrochromium smelting technologies during the last decades [J]. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, 104(9): 541.)
- [3] Niekerk A A, Meyjes R P. Fe-Cr smelting process selection[C]// The seventh China International Ferroalloys Conference. Changsha: [s.n.], 2010: 150.
- [4] 朱大镛. 国外铬矿粉的利用途径[J]. 铁合金, 1981(2): 30. (ZHU Da-yong. Application routes of foreign chromite ore fines[J]. Ferro-Alloys, 1981(2): 30.)
- [5] 储少军, 陈佩仙, 杨大海. 电硅热法生产300系不锈钢工艺的可行性[J]. 钢铁, 2015, 50(4): 1. (CHU Shao-jun, CHEN Pei-xian, YANG Da-hai. Feasibility of a new process for 300 series stainless steel with electrosilicothermic metallurgy[J]. Iron and Steel, 2015, 50(4): 1.)
- [6] 李一为. 竖炉法冶炼不锈钢母液的理论及工艺研究[D]. 上海: 上海大学, 2010. (LI Yi-wei. Theory and Technology of Producing Stainless Steel Master Alloys in Shaft Furnace[D]. Shanghai: Shanghai University, 2010.)
- [7] 任大宁, 万天骥, 袁章福, 等. 竖炉用含碳铬矿球团冶炼铬铁合金[J]. 铁合金, 1990(4): 22. (REN Da-ning, WAN Tian-ji, YUAN Zhang-fu, et al. Smelting of ferrochrome by shaft furnace with carbon bearing chromite ore pellets[J]. Ferro-Alloys, 1990(4): 22.)
- [8] 李一为, 丁伟中, 郑少波, 等. 255 m³高炉冶炼不锈钢母液工业试验[J]. 钢铁, 2004, 39(4): 1. (LI Yi-wei, DING Wei-zhong, ZHENG Shao-bo, et al. Industrial test of producing stainless

- steel master melt on 255 m³ blast furnace[J]. *Iron and Steel*, 2004, 39(4): 1.)
- [9] 张华,毛瑞,袁骥,等.竖炉法冶炼含Cr和Ni的铁水试验研究[J]. *中国冶金*, 2014, 24(6): 47. (ZHANG Hua, MAO Rui, YUAN Xiang, et al. Experimental study on smelting of molten iron containing Cr and Ni in method of shaft furnace[J]. *China Metallurgy*, 2014, 24(6): 47.)
- [10] 朱德庆,李建,范晓慧,等.铬铁矿粉造块方法综述[J]. *烧结球团*, 2004, 29(2): 27. (ZHU De-qing, LI Jian, FAN Xiao-hui, et al. Literature review of the agglomeration of chromite fines[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2004, 29(2): 27.)
- [11] Rao P V T, Das A K. Agglomeration of chromite ore fines for ferrochrome making a step towards increased competitiveness [C]//*Ferro Alloy Industries in the Liberalised Economy*. Jamshedpur: NML, 1997: 51.
- [12] Nandy B, Chaudhury M K, Paul J, et al. Sintering characteristics of India chromite ore fines[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2009, 40B: 662.
- [13] Vazarlis H G, Lekatou A. Pelletising-sintering, prereduction, and smelting of Greek chromite ores and concentrates[J]. *Iron-making and Steelmaking*, 1993, 20(1): 42.
- [14] Glastonbury R I, Beukes J P, Zyl P G V, et al. Comparison of physical properties of oxidative sintered pellets produced with UG2 or metallurgical-grade South African chromite: a case study[J]. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2015, 115(8): 699.
- [15] Erkkila P. Trends and challenges in the stainless steel industry [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2004, 31(4): 277
- [16] Cramer L A, Basson J, Nelson L R. The impact of platinum production from UG2 ore on ferrochrome production in South Africa[J]. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2004, 104(9): 517.
- [17] ZHU De-qing, YANG Cong-cong, PAN Jian, et al. Improving the pelletization of chromite concentrate by HPGR and its mechanism[C]//6th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc, Hoboken, 2015: 139.
- [18] 罗艳红. 磁铁精矿氧化球团的基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011. (LUO Yan-hong. A Fundamental Investigation on Magnetite Concentrate Oxidized Pellets[D]. Changsha: Central South University, 2011.)
- [19] ZHU De-qing, YANG Cong-cong, PAN Jian, et al. Insight into the consolidation mechanism of oxidized pellets made from the mixture of magnetite and chromite concentrates[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, 47(2): 1010.
- [20] ZHU De-qing, YANG Cong-cong, PAN Jian, et al. Comparison of the oxidation behaviors of high FeO chromite and magnetite concentrates relevant to the induration of ferrous pellets[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2016, 47(5): 2919.
- [21] 刘衍辉,吕学伟,陈攀,等.镍铬复合烧结矿制备工艺与固结机理[J]. *钢铁研究学报*, 2016, 28(3): 19. (LIU Yan-hui, LÜ Xue-wei, CHEN Pan, et al. Preparation and consolidation mechanism for nickel-chromium composite sinters[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2016, 28(3): 19.)
- [22] ZHU De-qing, LI Jian, PAN Jian, et al. Sintering behaviors of chromite fines and the consolidation mechanism[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2008, 86(1): 58.
- [23] 朱德庆,仇宏亮,潘建. 铬铁粉矿球团烧结新工艺及固结机理研究[J]. *金属矿山*, 2010(5): 99. (ZHU De-qing, ZHANG Hong-liang, PAN Jian. Study of chromite fines pellet sintering and its hardening mechanism[J]. *Metal Mines*, 2010(5): 99.)
- [24] 朱德庆,熊守安,仇宏亮,等. 铬铁精矿球团烧结工艺与机理[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2010, 41(5): 1658. (ZHU De-qing, XIONG Shou-an, ZHANG Hong-liang, et al. Pellet sintering process of chromite concentrate and mechanism of consolidation[J]. *Journal of Central South University: Natural Science*, 2010, 41(5): 1658.)
- [25] Agarwal S, Pal J, Ghosh D. Development of chromite sinter from ultra-fine chromite ore by direct sintering[J]. *ISIJ International*, 2014, 54(3): 559.
- [26] ZHU De-qing, YANG Cong-cong, PAN Jian, et al. An integrated approach for production of stainless steel master alloy from a low grade chromite concentrate[J]. *Powder Technology*, 2018, 335: 103.
- [27] Pal J, Bandyopadhyay D, Singh D P, et al. A comparative study for smelting of chromite ore, pellets, briquettes and sinter[J]. *Mineral Processing Extractive Metallurgy (Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section C)*, 2008, 117(3): 129.
- [28] Ahmed A, El-Fawakhry M K, Eissa M, et al. Direct chromite alloying by smelting reduction of mill scale and low grade chromite ore[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2015, 42(9): 648.
- [29] Agarwal S, Pal J, Ghosh D. Smelting characteristics of fluxed chromite sinter and its performance assessment in electric arc furnace to produce high carbon ferrochrome[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2016, 43(2): 97.