

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2020.11.015

微波冶炼高碳铬铁研究

赵志民, 庞建明, 方建锋, 邸久海, 李石稳, 何家庆

(中国钢研科技集团 新冶高科技集团有限公司, 北京 100081)

摘要:为开发洁净、高效的高碳铬铁冶炼新工艺,对微波加热铬矿球团冶炼高碳铬铁进行试验研究,探明配碳量、配渣对铬回收率的影响。结果表明,微波加热铬矿球团 100~120 min,可达到高碳铬铁冶炼所需的 1 550~1 620 ℃,得到符合国标要求的高碳铬铁,铬回收率超过 94%。当配碳系数为 1.1,加入硅石使炉渣 $R=\text{SiO}_2/(\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)=0.55$ 时,冶炼效果最好。当炉渣 R 值较低时,合金铬含量及回收率均明显下降,可以通过延长微波加热时间进行改善。

关键词:微波加热;配碳量;配渣;回收率

中图分类号:TF641

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2020)11-0085-04

Study on Smelting of High Carbon Ferrochrome with Microwave Heating

ZHAO Zhi-min, PANG Jian-ming, FANG Jian-feng, DI Jiu-hai, LI Shi-wen, HE Jia-qing

(New Metallurgy Hi-Tech Group, China Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to develop a new clean and efficient high-carbon ferrochrome smelting process, experiments of microwave heating chrome ore pellets to smelt high-carbon ferrochrome were carried out. Influence of proportion of carbon and slag allocation on recovery rate of chromium was investigated. The results show that microwave heating of chromium ore pellets for 100 to 120 minutes can reach a high-carbon ferrochrome smelting temperature of 1 550—1 620 ℃, and obtain high-carbon ferrochrome that meets the requirements of national standards with chromium recovery rate of 94% above. When carbon allocation coefficient is 1.1 and silica is added to make slag $R=\text{SiO}_2/(\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)=0.55$, the smelting effect is the best. When R value is lower, chromium content in alloy and recovery rate are significantly reduced, which can be improved by prolonging microwave heating time.

Key words: microwave heating; carbon allocation; slag allocation; recovery rate

高碳铬铁主要是作为不锈钢、工具钢、磨具钢等钢种的合金添加剂。2018 年我国生产的铁合金 3 123 万 t,其中高碳铬铁约为 527 万 t,占比为 16.8%^[1]。我国的铬矿资源储量少,质量较差,开采成本高^[2]。截至 2013 年,我国铬矿探明储量仅为 1 141.95 万 t^[3],铬矿资源对外依存度高达 98%。高碳铬铁主要采用矿热炉冶炼,以电能及焦炭的化

学能为能源,其中电耗占总能耗的 85%^[4]。国内高碳铬铁冶炼电耗大多高于 3 400 kWh/t($\text{Cr}_2\text{O}_3>40\%$),有的甚至高达 4 200 kWh/t($\text{Cr}_2\text{O}_3>40\%$)^[5],这大大提高了高碳铬铁的冶炼成本。因此发展低能耗、低污染的新型高碳铬铁冶炼工艺^[6]对高碳铬铁行业转型升级具有重大意义。

微波加热是一种绿色高效的加热方式,具有选

收稿日期:2020-08-03

基金项目:陕西省 2018 年重点研发计划(2018ZDXM-GY-157)

作者简介:赵志民(1986-),男,北京人,硕士,工程师

择性加热、升温速度快、可降低反应温度的特点^[7]。随着微波高温反应器的发展,微波加热已应用在矿石预处理、土壤修复、碳热还原等方面^[8]。MOURAO等^[9]研究了微波加热还原铁矿,与常规加热相比,微波加热能显著提高能量利用率。陈津^[10]等采用微波加热含碳铬铁矿粉,发现与常规电阻炉相比,还原反应速度加快,金属化率提高了32.5%。高琦^[11]等采用微波加热含碳锰矿球团,锰元素回收率达到90%以上,从开始加热到反应结束仅需60 min。可见,采用微波加热进行金属冶炼可以提高反应速度及金属化率。

本文主要研究了微波加热对冶炼高碳铬铁合金的影响及相关的工艺参数,为开发低能耗、低污染的新型高碳铬铁冶炼工艺提供数据支持。

1 试验原料及方法

主要原料为铬精矿、硅石、兰炭。铬精矿成分(%): Cr_2O_3 46.81、 TFe 14.30、 SiO_2 7.16、 CaO 0.363、 MgO 10.66、 Al_2O_3 9.06。硅石成分(%): SiO_2 97.15、 Fe_2O_3 2.19、 CaO 0.17、 MgO 0.006、 Al_2O_3 0.47。

兰炭成分(%): 固定碳 80.1、水分 7.79、挥发分 11.45、灰分 6.45。

将铬精矿、硅石、兰炭分别破碎并研磨至0.147 mm,按比例配料并搅拌均匀后,加入适量的水,压制成长轴约30 mm的椭球团,然后将球团放入干燥箱,在105℃保温4 h。试验时将1 000 g干燥后的料球装入刚玉坩埚,周围用保温棉包裹后放入12 kW微波高温冶炼炉中,打开微波发生器加热100~120 min。冶炼结束后将坩埚放入水中冷却,得到高碳铬铁合金及炉渣。试验过程中采用红外测温仪检测坩埚内温度。

冶炼目标产物为符合GB/T 5683—2008标准的牌号FeCr55C1000高碳铬铁合金,成分要求(%): $\text{Cr} \geq 52.0$ 、 $\text{C} \leq 10.0$ 、 $\text{Si} \leq 5.0$ 、 $\text{P} \leq 0.06$ 、 $\text{S} \leq 0.06$ 。为保证冶炼后合金能够聚集长大,需要保证所生成的炉渣熔点在冶炼温度以下。根据相图(图1)可知,当配渣 $R = \text{SiO}_2 / (\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) = 0.55$ 时,炉渣熔点接近1 400℃,随着 R 的降低,炉渣熔点提高,因此配料时添加一定比例的硅石为助溶剂,配料比例如表1所示,配碳系数定义为计算Cr、Si、Fe还原及合金含碳量总和的倍数。

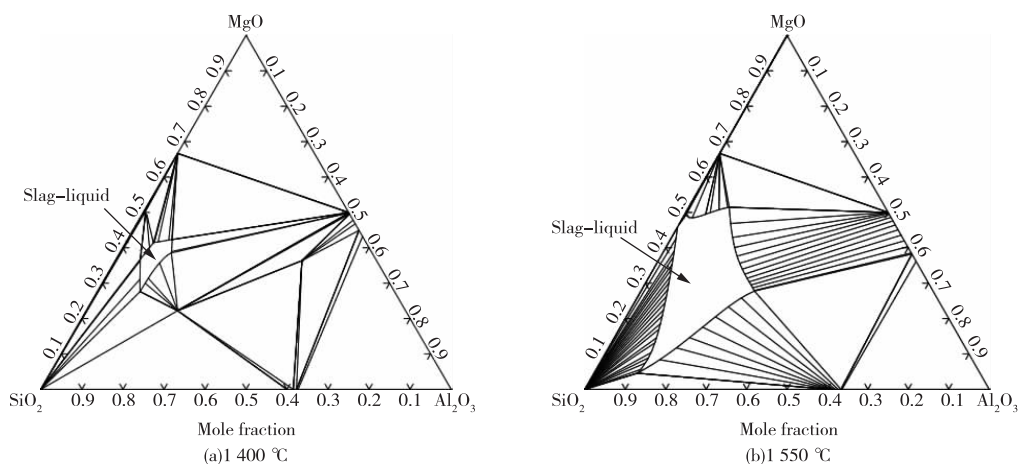


图1 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 相图

Fig. 1 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ phase diagram

表1 配料表

Table 1 Proportion of ingredients

编号	铬精矿/g	兰炭/g	硅石/g	配碳系数	R
a	100	25	22	1.0	0.55
b	100	27	22	1.1	0.55
c	100	29	22	1.2	0.55
d	100	27	17	1.1	0.52
e	100	27	15	1.1	0.49
f	100	27	12	1.1	0.45

2 试验结果

不同试验冶炼结果如表2所示,冶炼后所得合金如图2所示。由表2可知,采用微波加热铬矿球团冶炼得到的高碳铬铁合金中,Cr含量为44.91%~60.55%,C含量为6.15%~7.82%,Si含量为1.21%~2.59%,P含量为0.031%~0.045%,S含量为0.016%~0.024%,Cr元素回收率为67.13%~94.04%。试验1、2、3、5、7、9所得合金均符合GB/T 5683—2008标准的牌号FeCr55C1000的要求。

表 2 试验结果

Table 2 Experimental results

试验号	配比编号	加热时间/min	合金/g	合金成分/%					Cr 回收率/%	最高温度/℃
				Cr	C	Si	P	S		
1	a	100	526.89	56.17	7.82	2.24	0.037	0.019	92.94	1 562
2	b	100	506.06	58.38	6.42	1.27	0.035	0.018	94.04	1 583
3	c	100	508.47	56.09	6.55	1.49	0.039	0.024	92.01	1 571
4	d	100	527.91	48.40	7.01	2.59	0.036	0.016	77.51	1 592
5	d	120	461.83	60.55	7.45	1.93	0.038	0.022	84.83	1 618
6	e	100	541.38	45.82	7.17	1.21	0.041	0.016	75.25	1 555
7	e	120	453.81	60.40	6.15	1.24	0.042	0.017	83.15	1 601
8	f	100	496.24	44.91	6.18	1.93	0.035	0.019	67.13	1 567
9	f	120	448.90	59.43	7.15	1.83	0.041	0.021	80.36	1 622

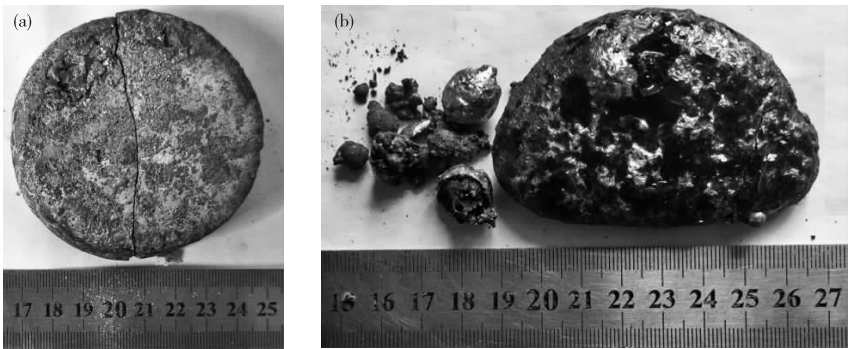


图 2 试验 2(a)和试验 4(b)冶炼所得合金

Fig. 2 Alloys obtained by experimental smelting No. 2(a) and No. 4(b)

3 结果分析及讨论

3.1 配碳量对微波冶炼高碳铬铁的影响

配碳量对微波冶炼高碳铬铁的 Cr 含量及回收率的影响如图 3 所示。由图 3 可知,配碳量为 1.0~1.2 时,冶炼的高碳铬铁中 Cr 含量在 56.17%~58.38%、Cr 回收率为 92.01%~94.4%。配碳量为 1.1 时,高碳铬铁 Cr 含量和回收率均较高。配碳量为 1.0 时,Cr 回收率较低,可能是升温过程中少量碳烧损,导致达到反应温度时,还原剂不足造成的;当配碳量为 1.2 时,过量的碳阻碍了固固反应过程中还原产物的流动聚集,使液态金属包裹于矿料表面,使矿料与碳难以进一步接触,从而阻碍反应的继续进行^[12-13]。

3.2 配渣及冶炼温度对微波冶炼高碳铬铁的影响

由试验 2 及试验 4~9 可知,配渣及冶炼时间(温度)对微波冶炼高碳铬铁有明显影响。如图 4 所示,当微波加热时间为 100 min 时,随着配渣 R 的降低,冶炼所得合金中 Cr 含量及 Cr 回收率均明显下降,而延长微波加热时间后合金中 Cr 含量及 Cr 回收率均有所提升。可见,当配渣 R 降

低后,导致炉渣熔化温度升高,在较低的冶炼温度下(微波加热时间短),炉渣黏度较大^[14],阻碍合金的聚集及反应的进一步发生。延长微波加热时间,冶炼温度进一步提高,延长了合金聚集时间,同时提高了炉渣流动性,促进了反应的发生。

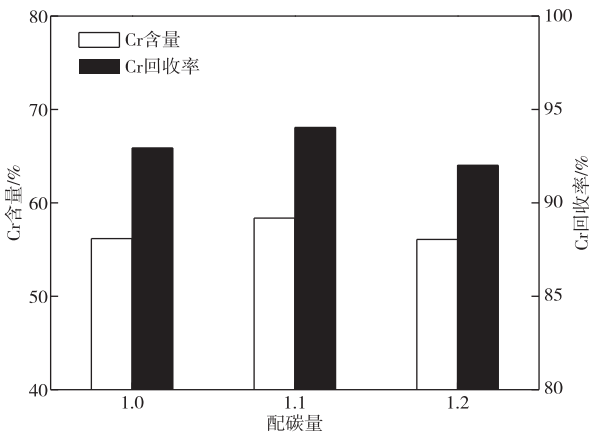


图 3 不同配碳量时高碳铬铁合金

Cr 含量及回收率

Fig. 3 Cr content and recovery rate of high-carbon ferrochrome alloy with different carbon content

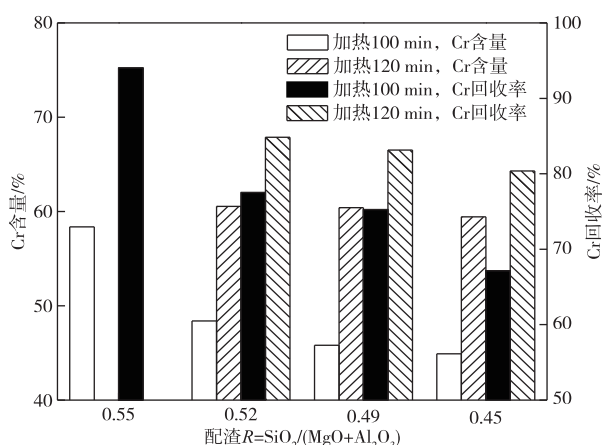


图4 配渣及冶炼时间对合金

Cr含量及回收率的影响

Fig. 4 Influence of slag mixing and smelting time on Cr content and recovery rate of alloy

4 结论

1)采用微波加热含碳铬矿球团的工艺,可以快速、高效冶炼出符合国标要求的高碳铬铁,铬的回收率超过94%。

2)当配碳系数为1.1且加入硅石,使炉渣中 $R = \text{SiO}_2 / (\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) = 0.55$ 时,可以在微波加热较短的时间(较低的冶炼温度)下,得到合格高碳铬铁。

3)配加硅石较少时,炉渣熔化温度明显上升,导致合金Cr含量及回收率明显下降,通过延长微波加热时间可以提高合金Cr含量及回收率。

参考文献

- [1] 李建法. 我国铬铁行业发展概况及现状[J]. 冶金管理, 2019(18):25-27.
LI J F. General situation and current situation of the development of ferrochrome industry[J]. Metallurgical Management, 2019(18):25-27.
- [2] 王惠永, 吕韬, 孙奉昌. 我国高碳铬铁产业发展现状[C]//2016(首届)全国铁合金热点难点技术交流会论文集. 北京:北京钢研柏苑出版有限责任公司, 2016: 48-51.
WANG H Y, LV T, SUN F C. Development status of my country's high-carbon ferrochrome industry[C]// 2016 (First) National Ferroalloy Hot and Difficult Technical Exchange Conference Proceedings. Beijing: CISRI Boyuan Publishing Co., Ltd., 2016:48-51.
- [3] 曾祥婷, 元春华, 许虹, 等. 中国铬资源产业形势及其相关策略研究[J]. 资源与产业, 2015, 17(3):39-44.
ZENG X T, YUAN C H, XU H, et al. Industrial situation and strategy of China's chrome resource[J]. Resources & Industries, 2015, 17(3):39-44.
- [4] 廖世明, 柏谈论, 刘英杰. 我国铁合金工业能源消耗与节能的探讨[J]. 铁合金, 1982(1):3-7.
LIAO S M, BO T L, LIU Y J. Discussion on energy consumption and energy saving in China's ferroalloy industry[J]. Ferro-alloys, 1982(1):3-7.
- [5] 贾艳桦, 刘培骁, 王幸日, 等. 冷压球团技术在高碳铬铁生产中的应用[J]. 铁合金, 2011(2):4-7.
JIA Y H, LIU P X, WANG X R, et al. Application of cold pressing pellet technology to high carbon ferrochrome production[J]. Ferro-alloys, 2011(2):4-7.
- [6] 王惠永, 吕韬, 孙奉昌. 中国高碳铬铁产业发展现状浅析[J]. 铁合金, 2016(2):45-48.
WANG Y H, LV T, SUN F C. Analysis on the development of Chinese high carbon ferrochrome industry[J]. Ferro-alloys, 2016(2):45-48.
- [7] 彭金辉, 刘秉国, 张利波, 等. 高温微波冶金反应器的研究现状及发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2607-2615.
PENG J H, LIU B G, ZHANG L B. Research status and trend of high-temperature microwave metallurgy reactor[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10):2607-2615.
- [8] 蔡卫权, 李会泉, 张懿. 微波技术在冶金中的应用[J]. 过程工程学报, 2005, 5(002):228-232.
CAI W Q, LI H Q, ZHANG Y. Application of microwave technology in metallurgy[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2005, 5(2):228-232.
- [9] MOURAO M B, PARREIRAS DE CARVAKHO I Jr, TAKANO C. Carbothermic reduction by microwave heating[J]. ISIJ International, 2001, 41:27-30.
- [10] 陈津, 李宁, 王社斌, 等. 含碳铬铁矿粉在微波场中的升温特性[J]. 北京科技大学学报(自然科学版), 2007, 29(9):880-883, 906.
CHEN J, LI N, WANG S B, et al. Temperature-rising characteristic of chromite ore fines containing coal in a microwave field[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(9):880-883, 906.
- [11] 高琦, 庞建明, 马永宁, 等. 微波处理低品位锰矿冶炼硅锰合金试验研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(8):81-84.
GAO Q, PANG J M, MA Y N, et al. Experimental study on smelting Si-Mn alloy by microwave heating of low-grade manganese ore[J]. 2019(8):81-84.
- [12] 张建良, 王春龙, 刘征建, 等. 钕钪磁铁矿含碳球团还原的影响因素[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(5):26-32.

- River Area[J]. Journal of Mineralogy And Petrology, 2000, 20(3): 95-99.
- [25] 李静, 吴华武, 周永强, 等. 长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1176-1183.
- LI J, WU H W, ZHOU Y Q, et al. Variations of stable oxygen and deuterium isotopes in river and lake waters during flooding season along the middle and lower reaches of the Yangtze River Regions[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1176-1183.
- [26] 肖可. 金佛山地区地下水与地表水水文地球化学及氢氧同位素特征分析[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- XIAO K. Analysis of hydrogeochemistry and hydrogen and oxygen isotopes of surface water and groundwater in Jinfo Mt[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [27] 田立德, 姚檀栋, 蒲健辰, 等. 拉萨夏季降水中氧稳定同位素变化特征[J]. 冰川冻土, 1997(4): 7-13.
- TIAN L D, YAO T D, PU J C, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in summer precipitation at Lhasa[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997(4): 7-13.

(上接第 88 页)

- ZHANG J L, WANG C L, LIU Z J, et al. Influencing factors of reduction of carbon-containing pellets of vanadium-titanium magnetite[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(5): 26-32.
- [13] 高琦, 庞建明, 马永宁, 等. 微波加热含碳锰矿球团冶炼高碳锰铁的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(3): 15-19.
- GAO Q, PANG J M, MA Y N, et al. Study on preparation of high carbon ferromanganese from carbon-bearing manganese ore pellets with microwave heating[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(3): 15-19.
- [14] 施哲, 熊洪进. 六元熔融还原渣黏度的分析[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(5): 37-45.
- SHI Z, XIONG H J. Analysis on the viscosity of six different compound smelting reduction slag[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(5): 37-45.