

微波选择性还原处理铬铁粉矿

李 成¹, 常国华², 彭镜鑫¹, 张 庆², 朱彦荣², 高天鹏²

(1. 兰州三普电力有限公司, 兰州 730070;

2. 兰州城市学院 化学与环境科学学院, 兰州 730070)

摘 要: 为提高铬铁粉矿中的铬铁比, 依据选择性碳热还原原理, 利用微波对南非铬铁粉矿进行加热还原, 然后用稀盐酸对其浸取, 最后进行过滤分离, 得到高铬铁比的铬铁精矿。研究工艺参数, 如还原剂的用量、还原温度和时间等因素对铬铁矿还原酸浸后铁和铬浸取率的影响。结果表明: 当还原剂用量为 6.0 g, 还原温度为 $(100 \pm 25)^\circ\text{C}$, 还原时间为 (20 ± 2) min 时, 100 g 铬铁粉矿经还原酸浸后, 其铬铁比由 1.4~1.6 升至 2.6~3.2。同时, 对酸液中浸出的铁进行了回收, 获得副产品氧化铁红。

关键词: 铬铁粉矿; 选择性还原; 微波处理; 氧化铁

中图分类号: TF556

文献标志码: A

Selective reduction of chromite fines by microwave treatment

LI Cheng¹, CHANG Guo-hua², PENG Jing-xing¹, ZHANG Qing², ZHU Yan-rong², GAO Tian-peng²

(1. Lanzhou Sanpu Electric Power Co., Ltd, Lanzhou 730070, China;

2. School of Chemistry and Environmental Science, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to raise the ratio of chromium to iron in chromite fines, chromite fines from South Africa were reduced selectively by microwave heating based on the principle of selective carbothermic reduction of chromite. Then, chromite fines were submerged in dilute hydrochloric acid. Finally, chromite concentrate was obtained by filtration separation and the ratio of chromium to iron in chromite fines increased. The influences of technical parameters, such as the amount of reducing agent, reducing temperature and time, on leaching rates of iron and chromium were investigated through single factor experiments. The results show that, after chromite fines(100 g) treated with reduction and acid leaching, the ratio of chromium to iron increases from 1.4~1.6 to 2.6~3.2, under the optimal conditions of the dosage of reducing agent 6.0 g, reducing temperature $(100 \pm 25)^\circ\text{C}$ and reducing time (20 ± 2) min. Iron in dilute acid solution was recovered and a by-product of iron oxide was obtained.

Key words: chromite fines; selective reduction; microwave treatment; iron oxide

随着铬铁矿资源的日趋紧缺, 由贫矿富选出的粉矿已成为冶炼铬铁合金的主要原料。通常采用矿热炉冶炼碳素铬铁时, 要求铬铁矿中的铬铁比大于 2.5, 否则技术指标差、经济效益低^[1]。目前, 产量最大的南非粉矿及巴西粉矿中的铬铁比均在 1.4~1.6 范围内, 对铬铁矿粉采用经济手段以提高其铬铁比, 成为铬铁

冶炼业关注的课题^[2-3]。

化学处理法是提高铬铁矿中铬铁比的主要方法^[2], 但因成本较高, 应用在工业上的不多。以南非明泰科冶金部的矿热炉选择性碳热还原法为例^[4], 此法虽能大幅提高铬铁比, 但使铬铁矿中的三氧化二铬的品位大幅度下降, 导致冶炼中矿耗及渣比成倍增

加,其能耗远高于现有生产工艺。其次,该工艺在选择性还原过程中,需配入大量的熔剂(SiO_2+CaO),致使铬铁矿的矿性发生变化,熔点大幅降低,熔化速度大于还原速度,造成电极上抬,炉底上涨,无法在传统的埋弧矿热炉中冶炼,只能在直流电弧炉内进行生产,且由于直流电弧炉的容量小、能耗大、成本高,未能推广。因此,如何高效益地提高铬铁矿粉中的铬铁比,仍然是一项重要的研究课题。

近几十年来,将微波应用于矿物方面的研究逐渐增多,因其具有选择性加热、快速加热、易于控制和环境友好等特点,在冶金生产中的磨矿、预处理、碳热还原及浸出等过程中逐步得到广泛地应用^[5-7]。早在 1967 年, FORD 和 PEI^[8]就用微波(2 450 MHz, 800 W)对碳和 17 种氧化物及硫化物进行处理,发现一些化合物在 1 min 内就能被加热到几百摄氏度。HAQUE^[5]、KINGMAN^[6]和 AL-HARAHSEH 等^[9]研究表明,微波加热在黑色金属和有色金属的火法冶金过程中有很大的应用前景,几乎所有工业上使用的金属都可以用微波进行处理。SAMOUHOS 等^[10]在微波炉(2.45 GHz)中利用碳热还原对红土镍矿进行处理,在 900 °C 以上,就可达到 70% 的还原程度。我国许多学者也在 20 世纪 80 年代开展了这一领域的研究工作。目前,已在选矿领域、稀贵金属冶炼、难选金矿的预处理、钒钛磁铁矿冶金、工业废料的处理及材料制备等方面,取得了不少成果^[11-18],这对节约资源、提高生产效率、降低能耗以及开发清洁、环保的生产工艺等方面具有重要的意义。

在有关铬铁矿粉的微波加热研究方面,陈津等^[19-20]和 LI 等^[21]对铬铁矿粉的电磁特性以及含碳铬铁矿粉在微波场中的升温特性进行了研究,结果表明铬铁矿粉是一类具有磁致损耗和电致损耗的双损耗特性的吸波材料;微波对铬铁矿粉的加热就是将微波损耗转变成热能,含碳铬铁矿粉在微波场(功率 10 kW, 2.45 GHz)中具有良好的升温特性,1 kg 的含碳铬铁矿粉在 7 min 内温度可升至 1 100 °C,升温速率为 157.1 °C/min;微波能可避免传统加热方式带来的粉状物料传热传质不均匀的现象,采用微波加热法可以有效地加热含碳铬铁矿粉,进行碳热还原。本文作者在此研究基础上,采用微波加热技术,对低铬铁比的南非铬铁矿粉进行碳热还原和酸浸处理,以期获得高铬铁比的铬铁矿。同时考察了还原剂用量、加热时间、温度和矿粉粒度等因素的影响,并利用 XRD、SEM 及能谱对其物相、形貌和成分进行了分析,为低铬铁比的铬铁矿粉的利用提供实验和理论依据。

1 实验

1.1 原料

实验原料主要为南非铬铁矿粉($n(\text{Cr})/n(\text{Fe})=1.5$)、还原剂(兰炭或焦粉)、活化剂(含镁化合物)和盐酸等。铬铁矿样品的化学成分见表 1,其 XRD 谱见图 1,主要矿物组成为 $(\text{Mg, Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$ 、 AlFe_2O_4 和 Fe_2O_3 。

表 1 铬铁矿的化学成分

Table 1 Chemical composition of chromite (mass fraction, %)

Cr_2O_3	TFeO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO
44.5	25.2	2	15	12	0.46

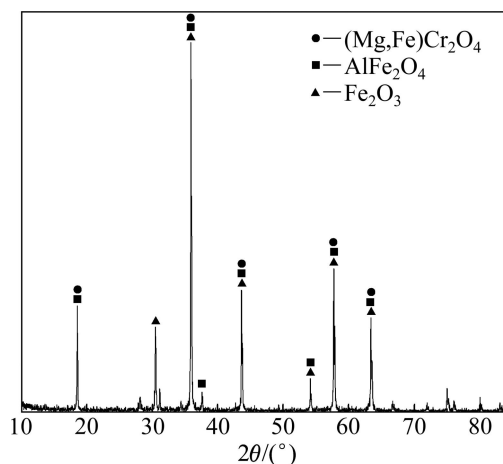


图 1 铬铁矿样品的 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of chromite fines sample

1.2 实验方法

实验主要流程见图 2。首先,取 100 g 铬铁矿样,分别加入一定量的还原剂(0、2、4、6 和 8 g),再加入 1 g 活化剂,充分混匀后,置于外加保温层的氧化铝坩埚中,放入微波炉(功率为 12 kW,频率为 2 456 MHz)内进行加热,采用带有屏蔽套的双铂铑热电偶(B, 0~1 600 °C)测定温度。还原一段时间后,取出样品,冷却破碎过筛至 97 μm 。将此矿样按固液比为 1:3 与稀盐酸混合,加热浸取、过滤、烘干后得到高铬铁比的精矿。然后分别对精矿和滤液中的铬、铁含量进行测定(铬、铁含量由甘肃省出入境检验检疫局测定)。同时,计算铁浸取率(其值为滤液中的铁含量/原矿中总铁量的比值,铬浸取率计算方法与铁相同)和酸浸后铬铁矿中的铬铁比(其值为矿样中的三氧化二铬与总氧化铁的比值)。实验数据采用 Origin8.0 软件进行处理,

数据以平均值 $\pm$ SD 表示。最后, 对含铁的滤液加碱中和至 pH 值为 8~10, 并通入空气, 滤液中产生大量红色沉淀。沉淀物经压滤、烘干后, 采用 X 射线衍射仪 (D8 ADVANCE) 测定 (兰州理工大学省部共建重点实验室进行), 确定沉淀为氧化铁红 (Fe_2O_3 , 其含量 > 98%)。

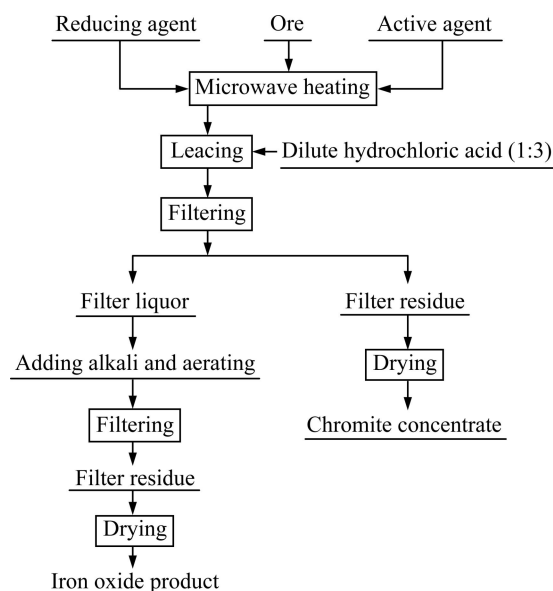


图 2 还原实验的主要流程

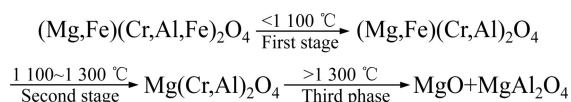
Fig. 2 Basic flow sheet of reduction experiment

2 结果与讨论

2.1 选择性还原作用原理

铬铁矿主要是由铁铬尖晶石 ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$), 镁铬尖晶石 ($\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$), 铝镁尖晶石 ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) 和铁粘结相 (主要 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) 及其它一些硅酸盐相组成。氧化铬的稳定性高于氧化铁, 这是碳热选择性还原铬铁矿的基础。碳热还原过程中铬铁矿可能发生反应的热力学计算结果见表 2^[22-24]。

从表 2 中可以看出, 在碳还原铬铁矿过程中, Fe_3O_4 最易还原, $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 其次, $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 最难还原。铬铁矿在碳热还原过程中可分为 3 个阶段进行^[24]。



由这 3 个阶段可以看出, 第一和第二阶段铬铁矿中的大部分铁被碳还原出来, 而第三阶段主要是镁铬尖晶石的还原, 在此还原过程中会形成高熔点、难还原的镁铝尖晶石, 包裹在镁铬尖晶石外部形成阻挡层,

从而阻挡还原的继续发生。所以, 在正常的铬冶炼过程中, 需要加入定量的熔剂 (SiO_2) 与氧化镁形成熔点较低的物质, 避免高熔点的镁铝尖晶石阻挡层的形成, 使矿物内部的氧化铬得以还原。本工艺则要利用铬铁冶炼过程中生成镁铝尖晶石阻挡层这一特点, 在无外加熔剂的情况下, 通过控制反应温度, 使反应仅停留在第二阶段, 实现铬铁矿中的铁大部分被还原, 而铬不被还原, 同时矿性也不会发生明显变化的目的。另外, 根据含碳铬铁矿粉在微波场中良好的升温特性以及微波对粉状物料的快速选择性加热和还原的特点^[21], 还可通过控制反应时间、还原剂的用量以及矿粉粒度等因素, 达到铁被选择性还原的目的。

2.2 还原剂对反应的影响

还原剂的用量是铬铁矿反应的重要影响因素之一。在还原温度为 $1100\text{ }^\circ\text{C}$, 还原时间为 20 min 的条件下, 不同还原剂用量对铁和铬浸取率的影响见图 3。由于只有通过高温还原反应将铬铁矿中的铁还原之后, 才能经过酸溶使之浸取出来。因此, 铁的还原程度与铁的浸取率是紧密相关的。由图 3 可知, 随着还原剂用量的增加, 铁的浸取率呈较快增加的趋势, 而铬的浸取率增加趋势比较缓慢。当还原剂用量为 6.0 g 时, 铁的浸取率可达 54% , 且铁与铬浸取率比值最大。因此, 本实验选择最优还原剂用量为 6.0 g 。虽然实验的目的是还原铬铁矿中的铁而不是铬, 但是铬铁矿中的铁被还原和浸取的同时, 不可避免地会有少量的铬也会被还原和浸取出来。当还原剂用量为 6.0 g 时, 100 g 的铬铁矿经还原、酸浸、过滤烘干后, 所得精矿质量为 88.4 g (其中铬、铁含量分别为 29.55 和 9.2 g); 滤液中的铬、铁含量分别为 0.45 和 10.8 g , 铬铁矿收得率为 88.4% 。

2.3 温度对反应的影响

根据铬铁矿的结构及其还原机理, 铬铁矿在碳热还原过程中, 随着还原温度的上升, 其中的含铁粘结相 (主要 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) 首先被还原。当反应温度上升至 $910\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 铬铁矿中的铁铬尖晶石 ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) 开始被碳还原生成 $\text{Fe}(\text{s})$ 和 $\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})$; 而当温度达 $1303\text{ }^\circ\text{C}$, 镁铬尖晶石 ($\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) 的还原反应开始进行 (见表 2)。因此, 控制还原温度可达到选择性还原的目的。图 4 所示为不同温度对铬铁矿还原的影响。由图 4 可看出, 在还原剂的用量为 6.0 g , 还原时间为 20 min 的条件下, 当温度在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 以下时, 铬铁矿中铁的浸取率无明显变化; 当温度高于 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 随温度的升

表 2 碳还原铬铁矿反应的 ΔG° — T_{start} 关系

Table 2 Relationship between ΔG° and T_{start} in carbon thermal reduction reactions of chromite

Reaction equation	$\Delta G^\circ/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1})$	$T_{\text{start}}/\text{K}$
$\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s})+4\text{C}=3\text{Fe}(\text{s})+4\text{CO}(\text{g})$	$684\,400-698T$	980
$\text{FeO}(\text{l})+\text{C}=\text{Fe}(\text{s})+\text{CO}(\text{g})$	$158\,970-160.25T$	992
$\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})+3\text{C}=2\text{Cr}+\text{CO}(\text{g})$	$819\,936-541.2T$	1\,515
$\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})+13/3\text{C}=2/3\text{Cr}_3\text{C}_2+3\text{CO}(\text{g})$	$755\,927-522.03T$	1\,369
$\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})+27/7\text{C}=2/7\text{Cr}_7\text{C}_3+3\text{CO}(\text{g})$	$766\,692-546.86T$	1\,448
$23\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})+81\text{C}=2\text{Cr}_{23}\text{C}_6+69\text{CO}(\text{g})$	$16\,613\,320-11\,545.55T$	1\,438
$\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})+4\text{C}=2\text{Cr}(\text{s})+\text{Fe}(\text{s})+4\text{CO}(\text{g})$	$951\,540-653.61T$	1\,455
$\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})+\text{C}=\text{Fe}(\text{s})+\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})+\text{CO}_2(\text{g})$	$163\,830-138.43T$	1\,183
$\text{MgO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})+3\text{C}=2\text{Cr}(\text{s})+\text{MgO}(\text{s})+3\text{CO}(\text{g})$	$792\,140-502.36T$	1\,576

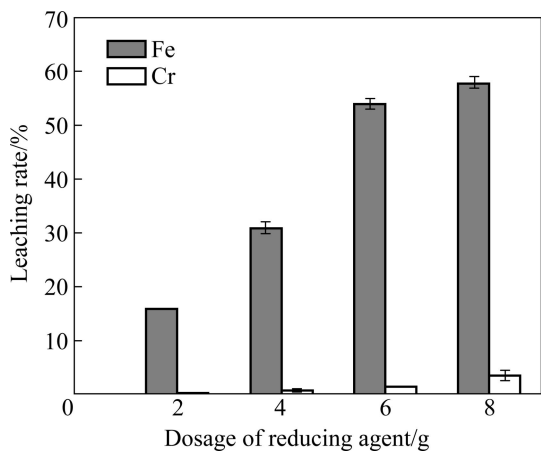


图 3 还原剂用量对铁和铬浸取率的影响
Fig. 3 Effect of dosage of reducing agent on leaching rates of Fe and Cr

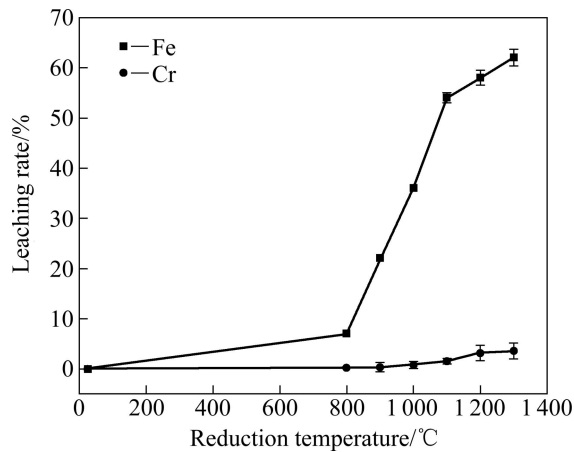


图 4 还原温度对铁和铬浸取率的影响
Fig. 4 Effect of reduction temperature on leaching rates of Fe and Cr

高,铁的浸取率几乎呈线性增加趋势;当温度达 1 100 ℃时,铁的浸取率可到 54%。铬的还原率随温度变化较缓。因此,加入一定量的还原剂,控制反应温度,可很好地达到选择性还原的目的。本实验选择最优温度为(1 100±25) ℃。

2.4 还原时间对反应的影响

在温度为(1 100±25) ℃,还原剂用量为 6.0 g 的条件下,研究还原时间对铁、铬浸取率的影响(见图 5)。当由图 5 可知,还原时间小于 7 min 时,铬铁矿中铁的浸取率未见明显变化;当还原时间为 7~20 min 时,铁的浸取率增加较快;当还原时间继续延长至 24 min 时,铁的浸取率变化较前变缓;铬铁矿中铬的浸取率随时间的延长没有太大变化。根据以上结果,本实验选择最优还原时间为(20±2) min。

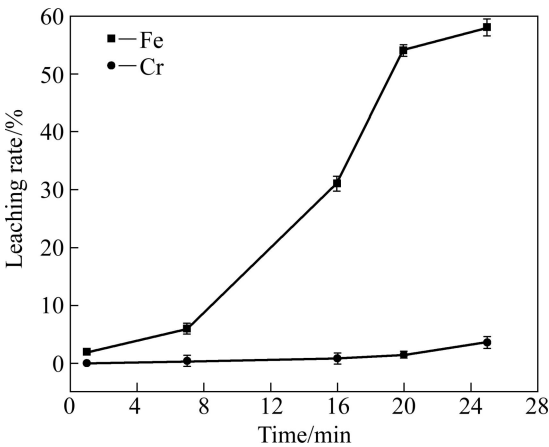


图 5 还原时间对铁和铬浸取率的影响
Fig. 5 Effect of reduction time on leaching rates of Fe and Cr

2.5 铬铁粉矿粒度对反应的影响

南非铬铁矿粉的原始平均粒度为1 mm左右,部分原料经制样机研磨,将粉矿磨制成粒度小于97 μm 的粉料,然后将磨好的粉料与原矿按质量比1:1制成混合矿样。在温度为 $(1100 \pm 25)^\circ\text{C}$,还原剂用量为6.0 g,还原时间为 (20 ± 2) min的条件下,考察了3种不同粒度的矿样对铁浸取率的影响(见图6)。由图6可知,铬铁矿中铁浸取率随粒度的减小而增大,这是由于在机械外力作用下,铬铁尖晶石的晶格结构被部分扭曲,同时还提高了参与反应的比表面积,有利于氧化铁的还原。但是粒度小于97 μm 的矿样与混合矿样相比,二者铁浸取率相差不太大,而且前者在还原过程中容易结块,在后续酸溶阶段还需破碎,故实验选用混合矿样较好。

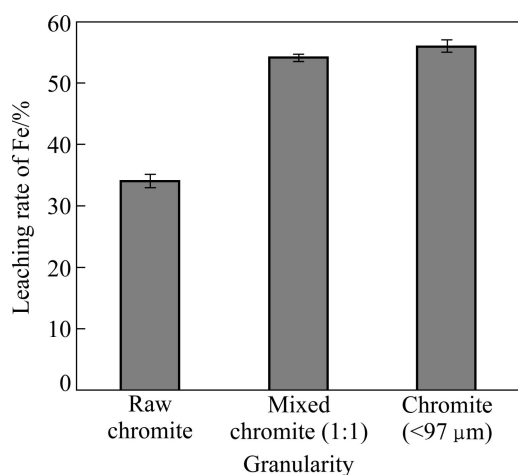


图6 粒度对铁浸取率的影响

Fig. 6 Effect of granularity on leaching rate of Fe

2.6 其它因素对反应的影响

在本实验中选用一种介电常数高的含镁活化剂。其吸波能力强,可使整个还原过程升温速度快,还原效果好,提高了铁还原率,减少了结块现象,降低了后续破碎与酸溶的成本,同时有利于形成镁铝尖晶石阻挡层,使反应停留在第二阶段,达到选择性还原的目的。另外,对于低 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的南非矿而言,加入活化剂可为后续冶炼提供更好的条件。

2.7 电子扫描显微镜分析

为了进一步了解铬铁矿经微波加热还原和酸浸过程对其表面结构的影响,分别对原矿、还原后和酸浸后的矿样采用扫描电镜和能谱对其形貌特征和成分进行分析,扫描电像观察结果如图7(a)、(b)和(c)所示,对应的能谱分析见图8(a)、(b)和(c)。

从图7(a)可见,铬铁矿原矿颗粒多呈粒状或致密块状体,其表面比较光滑;晶粒粗大,表面棱角多,结构紧密,结晶程度较好。这些特征使其具有难熔、难还原的特点。图7(b)所示为微波加热还原后的矿样,与原矿样相比,其矿粒表面出现了大量的细小颗粒。这可能是还原出来的铁在矿粒表面聚集形成金属颗粒的结果。经酸浸处理后矿样微观形貌(见图7(c))发生较大变化,其表面出现大量的凹坑,表明矿粒表面上的铁相经酸溶后与矿样发生分离。在能谱色散分析仪上所做的材料成分分析结果表明(见图8),铬铁矿原矿和还原后样品中的 $n(\text{Cr})/n(\text{Fe})$ 没有太大变化,但经酸浸后矿样中的 $n(\text{Cr})/n(\text{Fe})$ 明显上升。这意味着酸浸后,矿样中铁元素被溶出,导致铬铁矿中的 $n(\text{Cr})/n(\text{Fe})$ 上升(见图8(c))。

在酸溶过程中,为尽力避免三氧化二铬的溶出,选用稀盐酸而没有选取能同时溶解铬和铁的混合酸,

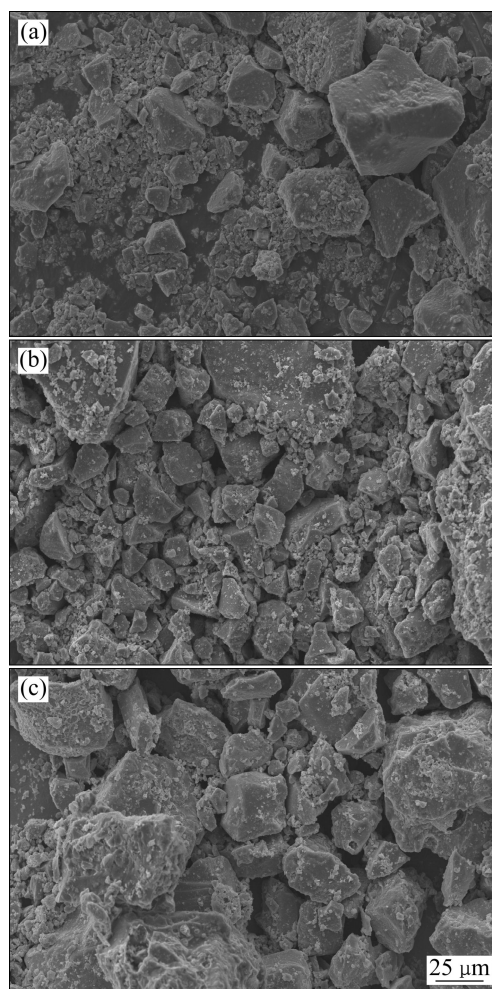


图7 铬铁矿的SEM像

Fig. 7 SEM images of chromite samples: (a) Raw sample; (b) Reduced sample; (c) Sample treated by hydrochloric acid

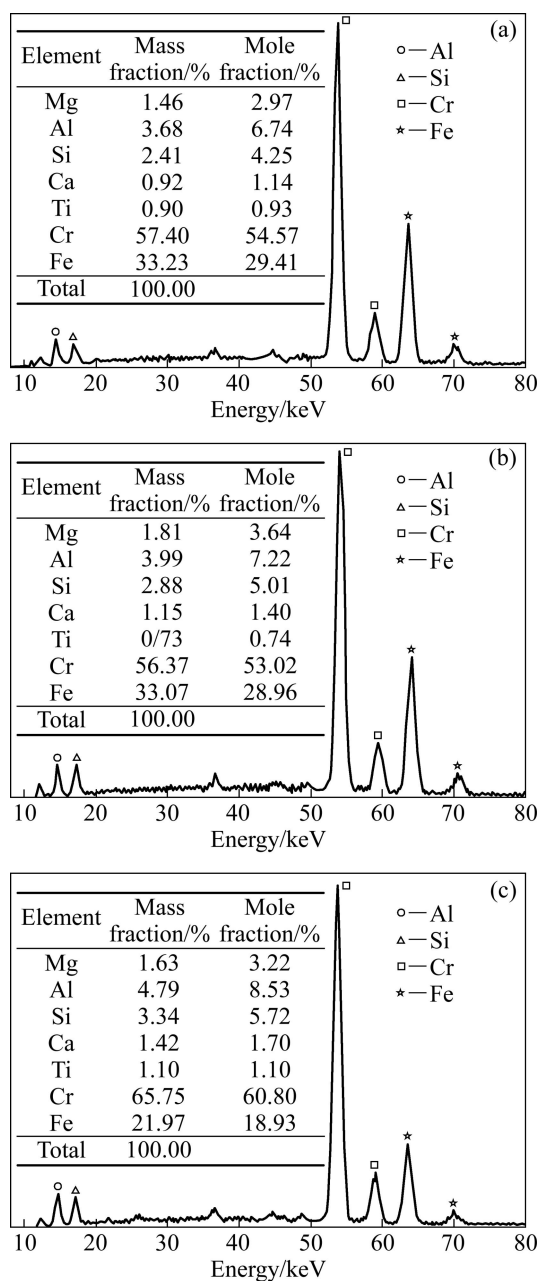


图8 铬铁矿能谱分析

Fig. 8 Energy dispersive spectra of chromite samples: (a) Raw sample; (b) Reduced sample; (c) Sample treated by hydrochloric acid

这在最大程度上提高铬铁矿中的 $n(\text{Cr})/n(\text{Fe})$ 。另外, 还需指出的是, 经高温还原反应后, 铬铁矿中的一些碱性氧化物(MgO)和两性氧化物(如 Al_2O_3)形成了稳定的镁铬尖晶石 ($\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) 和铝镁尖晶石 ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)。因此, 稀酸很难与之发生反应, 而且也保证了后续氧化铁的纯度。由于滤液中含有大量的铁离子和极少量的铬离子, 为了综合利用铬铁矿资源, 进行铁回收实验。滤液经加碱中和, 同时通入空气后,

会产生大量的红色沉淀。最后, 沉淀经清洗、压滤和烘干, 得到了副产品氧化铁红(Fe_2O_3 含量 $>98\%$), 其中产生的废液也将有可能返回酸浸工序循环使用。

3 结论

1) 南非铬铁粉矿采用微波进行选择性地加热还原酸浸处理后, 获得高铬铁比的铬铁精矿。

2) 在加热酸浸过程中, 采用稀盐酸(固液比 1:3)浸取还原后的铬铁矿, 有利于提高矿样中的铬铁比。

3) 本工艺为后续铬铁冶炼提供了优质原料, 同时还得到副产品氧化铁红, 增加产品收益; 工艺中产生的废液也可循环使用有望实现零排放。

REFERENCES

- [1] 阎江峰, 陈加希, 胡亮. 铬冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 46-47.
YAN Jiang-feng, CHEN Jia-xi, HU Liang. Chromium metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 46-47.
- [2] NAFZIGER R H. A review of the deposits and beneficiation of lower-grade chromite[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1982, 82(8): 205-226.
- [3] MURTHY Y R, TRIPATHY S K, KUMAR C R. Chrome ore beneficiation challenges & opportunities—A review[J]. Minerals Engineering, 2011, 24 (5): 375-380.
- [4] CURR T R, NELSON L R, MCRAE L B. The selective carbothermic reduction of chromite[C]//8th International Ferroalloys Congress Proceedings. Beijing, China: CSM, 1998: 158-170.
- [5] HAQUE K E. Microwave energy for mineral treatment processes—A brief review[J]. International Journal of Mineral Processing, 1999, 57(1): 1-24.
- [6] KINGMAN S W, ROWSON N A. Microwave treatment of minerals—A review[J]. Minerals Engineering, 1998, 11(11): 1081-1087.
- [7] OGHBAEI M, MIRZAEI O. Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 494(1/2): 175-189.
- [8] FORD J D, PEI D C T. High temperature chemical processing via microwave absorption[J]. Journal of Microwave Power, 1967, 2(2): 61-64.
- [9] AL-HARASHEN M, KINGMAN S W. Microwave-assisted leaching—A review[J]. Hydrometallurgy, 2004, 73(3/4): 189-203.
- [10] SAMOUHOS M, TAXIARCHOUA M, HUTCHENB R,

- DEVLIN E. Microwave reduction of a nickeliferous laterite ore[J]. Minerals Engineering, 2012, 34: 19–29.
- [11] 雷 鹰, 李 雨, 彭金辉, 张利波, 郭胜惠. 微波选择性加热在矿冶过程中的应用进展[J]. 材料导报, 2011, 25(15): 119–122.
- LEI Ying, LI Yu, PENG Jin-hui, ZHANG Li-bo, GUO Sheng-hui. Application of microwave selective heating on mining and metallurgy processing[J]. Materials Review, 2011, 25(15): 119–122.
- [12] 刘能生, 彭金辉, 张利波, 张泽彪. 微波技术在稀贵金属冶金中的研究应用进展[J]. 贵金属, 2009, 30(4): 48–51.
- LIU Neng-sheng, PENG Jin-hui, ZHANG Li-bo, ZHANG Ze-biao. Development of the investigation and application of microwave technology in rare and precious metals metallurgy[J]. Precious Metals, 2009, 30(4): 48–51.
- [13] 彭元东, 易健宏, 罗述东, 李丽娅, 陈 刚, 冉俊铭. 微波技术在金属材料制备中的应用现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4): 742–747.
- PENG Yuan-dong, YI Jian-hong, LUO Shu-dong, LI Li-ya, CHEN Gang, RAN Jun-ming. Review of microwave energy application in metallic materials preparation[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(4): 742–747.
- [14] 杜 军, 王 娜, 刘作华, 于 鲸, 陶长元. 微波加热在冶金工业中的应用[J]. 中国稀土学报, 2010, 28: 448–452.
- DU Jun, WANG Na, LIU Zuo-hua, YU Jing, TAO Chang-yuan. Application of microwave heating in metallurgy[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2010, 28: 448–452.
- [15] 余文华. 微波加热在钒钛磁铁矿冶金领域应用的研究进展[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(3): 87–96.
- YU Wen-hua. Research progress of the application of microwave heating in the metallurgy field of vanadium and titanium magnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2011, 32(3): 87–96.
- [16] 刘书祯, 白 燕, 程艳明, 钟 文. 微波技术在冶金中的应用[J]. 湿法冶金, 2011, 30(2): 91–94.
- LIU Shu-zhen, BAI Yan, CHENG Yan-ming, ZHONG Wen. Application of microwave technology in metallurgy[J]. Hydrometallurgy of China, 2011, 30(2): 91–94.
- [17] 张小云, 覃文庆, 田学达, 陈燕波, 谷 雨, 习晓光. 石煤微波空白焙烧-酸浸提钒工艺[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(4): 908–912.
- ZHANG Xiao-yun, QIN Wen-qing, TIAN Xue-da, CHEN Yan-bo, GU Yu, XI Xiao-guang. Microwave roasting-acid leaching technique for extraction of vanadium from stone coal[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(4): 908–912.
- [18] 黄生祥, 齐 伟, 周克省, 秦宪明, 陈 颖, 邓联文, 夏 辉, 韩建华. $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ 的微波吸收特性[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(2): 448–452.
- HUANG Sheng-xiang, QI Wei, ZHOU Ke-sheng, QIN Xian-ming, CHEN Ying, DENG Lian-wen, XIA Hui, HAN Jian-hua. Microwave absorption properties of $\text{La}_{1-x}\text{K}_x\text{MnO}_3$ [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(2): 448–452.
- [19] 冯秀梅, 陈 津, 李 宁, 崔慧军, 刘金营. 微波场中铬铁矿粉电磁特性研究[J]. 矿物学报, 2006, 26(4): 363–367.
- FENG Xiu-mei, CHEN Jin, LI Ning, CUI Hui-jun, LIU Jin-ying. Study on the electromagnetic characteristics of chromite ore powder in microwave field[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2006, 26(4): 363–367.
- [20] 崔慧军, 陈 津, 刘金营. 微波场中含碳铬铁矿粉反应过程升温特性数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(11): 5–9.
- CUI Hui-jun, CHEN Jin, LIU Jin-ying. Numerical modeling of temperature rise characteristic curve reaction process for carbon-containing chromite fines in microwave field[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19(11): 5–9.
- [21] LI Ning, CHEN Jin, YAN Hong, FENG Xiu-mei, CUI Hui-jun, LIU Jin-ying. Temperature rise characteristics of carbon-containing chromite ore fines in microwave field[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2008, 15(1): 1–5.
- [22] 叶大伦, 胡建华. 实用无机物热力学数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- YE Da-lun, HU Jian-hua. The handbook of inorganic thermodynamic data[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [23] 李 宁. 含碳铬铁矿粉微波加热体还原热力学及动力学研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007: 45–47.
- LI Ning. Research on thermodynamics and kinetics of carbon-containing chromite ore fines voluminally reduced by microwaves heating[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007: 45–47.
- [24] 刘 岩, 姜茂发. 转炉铬矿熔还原法不锈钢直接合金化技术[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2009: 41–52.
- LIU Yan, JIANG Mao-fa. The process of stainless steel making by chromium ore smelting reduction and direct alloying in a converter[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2009: 41–52.

(编辑 李艳红)