

铬铁矿固态还原研究进展

叶明峰, 吴光亮

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 综述了近50年国内外与铬铁矿固态还原的相关研究, 总结了铬铁矿固态还原的机理和动力学机制, 综述了各个主要因素(原料性质、温度、还原剂、添加剂、气氛等)对还原过程的影响以及一些强化铬铁矿还原的方法, 为铬铁矿的固态还原发展方向提供思路。

关键词: 铬铁矿; 固态还原; 进展

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.06.003

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2018) 06-0013-06

随着不锈钢产业的飞速发展, 对铬系合金的需求也日益增长。铬铁合金主要用矿热电炉来冶炼^[1-2]。根据炉中物料的物化特征可分为松散炉料区(400~1300℃)、软熔带(1300~1500℃)、残碳层(1500~1800℃)、炉渣层、残矿层、合金层^[3]。其中松散炉料区主要反应是尖晶石结构的破坏、部分氧化物的优先还原。固体炉料区的物料的反应状况直接影响到其在后续各区中的还原状况, 也间接影响着矿热炉的能耗的高低。因此, 为了提高铬矿原料的还原性能, 将固体炉料区的部分功能通过铬矿预还原工艺转移出去, 降低矿热炉电耗, 节约成本。

铬铁矿在我国属于稀缺资源, 由于资源受制于人, 同时高品位的铬铁矿资源逐渐枯竭, 因此积极开发利用化工级别铬铁矿, 可为铬铁冶炼提供优质原料, 保障不锈钢冶炼的稳定发展。为提高铬矿的Cr品位和Cr/Fe, 传统的选矿方法如磁选、重选等因未破坏铬铁尖晶石结构, 不能充分回收Cr, 尾矿中Cr含量较高^[4]; 碳热氯化法^[5]虽分选效果好却不安全环保。以“直接还原-磁选”为代表的采用火法冶金的手段破坏尖晶石的结构并配合传统选矿的方法也越来越受到提倡。在铬铁矿的还原-分选工艺中, 固态还原仍是关键的一个环

节。因此, 深入研究含铬物料在松散炉料区的还原、铬铁矿的预还原、铬铁矿还原-分选等固态还原过程的机理、工艺及其强化措施意义重大。

1 铬铁矿固态还原机理及影响因素

1.1 铬铁矿固态还原机制

FeCr₂O₄是常见的AB₂O₄型尖晶石结构, 属于空间晶群的面心立方晶格, 是氧原子的最密堆积^[6]。1988年, Perry^[7]提出了基于离子扩散的反应模型:

(1) 铬铁矿颗粒表面的Fe²⁺和Fe³⁺离子向内扩散, 在内外核的交界面上将颗粒表面以下尖晶石内部的Fe³⁺离子还原成Fe²⁺;

(2) Fe²⁺向表面扩散, 在铬铁矿颗粒表面被还原成铁颗粒;

(3) 在铁被全部还原之后, Cr³⁺和Cr²⁺被还原成金属, 残留下几乎不含铁和铬的尖晶石, 即MgAl₂O₄。

1991年Soykan^[8]阐述了类似的离子扩散理论。1995年Lekatou^[9]基于前人的离子扩散理论和实验结果, 认为低熔点物质会对离子扩散造成影响, 具体表现为未生成液相渣时, 铬铁矿的还原机制和固态还原一致, 液相渣系生成之后, 部分离子

收稿日期: 2017-04-04; 改回日期: 2017-05-16

作者简介: 叶明峰(1992-), 男, 硕士研究生在读, 研究方向为铬系合金原料预处理。

会在渣中进行还原。

2015 年元捷等^[10]认为, 铬铁尖晶石结构在 1200℃ 时已经开始部分被破坏, 其破坏的程度随温度的升高而逐渐增大, 在 1500℃ 左右时铬铁矿基体就变成了主要是镁、铝、氧组成的化合物。

固态还原与液态还原相对应, 根据铬铁矿在固态还原过程中的特点, 可以将铬铁矿和熔剂中的主要氧化物分成两大类, 一类是 Cr₂O₃、FeO_x, 属于还原的氧化物, 另一类是 Al₂O₃、MgO、CaO、SiO₂ 等, 属于不可还原的氧化物, 是高温下液相渣的主要组成。许多学者对于铬矿的固态还原研究表明, 影响其还原的因素主要是原料性质、温度、还原剂、气氛、添加剂等^[11]。

1.2 铬铁矿原料性质对固态还原的影响

铬铁矿原料性质主要有物理性质和化学性质, 其对固态还原的影响是自始至终的一个综合过程。研究中最关注的是原料成分和粒度的影响, 常常以不同的矿或以同种矿不同的粒度作对比。铬铁矿中的 Al₂O₃ 和 MgO 含量越高, 不利于还原; FeO 含量高则有利于还原^[12]。Ringdalen^[13]认为铬铁矿的还原度与矿石的矿物学性能关系紧密, 不同的矿物成分和矿相结构使得不同的矿物表现出不同的还原状态。

2011 年 Apaydin^[14]在 1100 ~ 1400℃ 温度范围内还原土耳其的铬矿, 证明了对原料进行机械活化可以增加还原率和金属化率。2015 年朱德庆等人^[15]采用高压辊磨和球磨两种方法对比预处理铬铁矿粉, 也验证了该结论。

1.3 温度对铬铁矿还原 - 分选的影响

铬矿分解和氧化物的还原都是吸热反应, 需要在较高的温度下进行, 所需反应温度要比常规铁矿的还原温度要高, 在 1000℃ 以上, 反应的进行需要高温, 同时, 离子的扩散、金属颗粒的析出和长大也需要较高温度。

王亚娟等^[16]总结了不同温度下铬铁矿固态还原的大致特征 (见表 1) 并指出, 寻求 1300 ~ 1400℃ 温度范围内最优的还原条件十分关键。

表 1 不同温度下铬铁矿固态还原的大致特征

Table 1 Characteristics of the chromite reduction under different temperature

| 温度区间 | 低温 | 中温 | 高温 |
|------|---|-------------------------|-------------------------------|
| 还原温度 | 1000 ~ 1200℃ | 1200 ~ 1400℃ | 1400 ~ 1500℃ |
| 还原特征 | 延长反应时间 可实现 Fe 的全 部还原, Cr 则 少量被还原 | Cr 开始还原, 进入铁金属相 中 | 矿物中的脉石成 分形成液相渣, 改变动力学条件 |

1.4 还原剂对铬铁矿还原 - 分选的影响

还原剂有固体和气体之分, 铬铁矿的还原是以碳热还原为主, 还原剂的配比以及自身性质对还原效果的影响较大。Nafziger^[17]比较了煤焦、焦炭、冶金焦和石油焦分别作还原剂在 1100 ~ 1500℃ 原范围内对两种铬铁矿还原过程的影响。其中, 1100 ~ 1300℃ 的温度下煤焦是最好的还原剂, 而 1400 ~ 1500℃ 的温度最下冶金焦还原效果最好, 对两种铬矿而言具有相似的效果。

Xiao 等^[18]采用 CO 在 1400 ~ 1550℃ 还原芬兰铬铁矿块矿, 表明加入焦块后铬铁矿的还原率要比只有 CO 气体作还原剂时要高, 原因是固体 C 的存在有利于发生 Boudouard 反应, 从而促进还原。

对于气体还原剂的研究除了 CO 之外, 还有 H₂、CH₄ 等^[19], 这时还要考虑气体流速对铬矿还原的影响。CO、H₂、CH₄ 的还原作用比较相似, 最终产物是金属合金, H₂S 的还原产物则是硫化物^[20]。

1.5 添加剂对铬铁矿固态还原的影响

因为铬铁矿结构致密, 尤其是在 MgO、Al₂O₃、TiO₂ 含量较高时固态还原比较困难。因此研究者们使用不同的添加剂来促进还原, 从而降低反应温度或缩短反应时间。其中, 添加剂对还原的促进作用主要通过三个方面来实现:

(1) 与铬铁矿中的不还原物质形成低熔点渣相, 减小离子扩散阻力。Weber^[21-23]和 Duong^[24]的研究表明, SiO₂ 只有在 1300 ~ 1500℃ 的高温下才会发挥促进还原的作用, 其根本原因是 SiO₂ 参与形成 MgO-Al₂O₃-SiO₂ 低熔点渣相, 对尖晶石颗粒产生溶蚀破坏, 暴露新的反应界面, 同时, 渣相的形成有助于离子的扩散。而 Lekatou^[25]进一步阐述了 SiO₂ 的作用, 认为 SiO₂ 的添加量会有一个临

界值，超过该临界值会产生大量渣相，减少了反应物与还原剂接触的机会，阻挡反应的推进。SiO₂的这种双重作用在铬铁矿气基还原中表现得更加明显^[26]。

(2) 改变铬铁尖晶石结构组成，促进其分解。有些学者研究了石灰的作用。Ding^[27]发现CaO能起到催化铬铁矿的还原，推测其可能通过进入晶格中使FeO得以释放出来并加强Cr的固态扩散来催化反应。

(3) 促进反应中的离子扩散或气相扩散，改善动力学条件。此类添加剂主要有碱金属盐。李建臣^[28]在1150剂下添加不同添加剂研究配碳过量20%的球团的还原效果，最终结果表明，以NaCl、Na₂B₄O₇·aCl₂O和Na₂CO₃的促进效果最佳，验证了另一篇文献^[29]中的结论。

虽然添加剂在一定程度上能对反应起到促进作用，但是往往各自都有有限的使用条件，并且还会伴随着成本的提高、杂质的引入、分离的困难、污染环境、腐蚀设备等等问题，因此要依据具体工艺选择合适的添加剂。

1.6 气氛对铬铁矿固态还原的影响

气氛的作用主要有降低体系氧势、形成一定分压等，为了保证还原产物不被氧化和还原过程顺利进行，在铬矿的气基还原中常常采用的保护气氛常见有N₂和Ar，但是在固体碳热还原过程则需要一定氧气进来形成CO进行间接还原，而保护气氛通常在后期冷却中使用。

Chakraborty^[30]探讨了1200℃下铬铁矿碳热还原中通入Ar的流量的影响，结果表明低流量的Ar能帮助还原顺利进行，大流量的Ar则会降低还原程度，主要因为前者促进了气态产物向外扩散，有助于C参与的反应向右进行，而后者则归因于过大的Ar流量带走了大量的热，降低了反应温度，从而影响了反应平衡常数，不利于还原。

1.7 其他强化铬铁矿固态还原的方法

国内外不少学者也已经开展了对Fe粉、磁铁矿精粉等加入铬铁矿中进行还原的研究。

早在1988年Deventer^[31]的动力学研究表明Fe粉对铬铁矿的还原有着比较温和的催化作用，但并未阐述其中缘由。2016年，X.Hu等^[32]详细阐述了添加Fe粉对合成铬铁矿碳热还原的影响。他们的研究表明，不添加Fe粉的条件下，合成铬铁矿FeO·eO₂O₃的还原产物有Cr₂O₃、Fe-Cr-C合金与碳化物(Cr, Fe)₇C₃；添加Fe粉的条件下，合成铬铁矿FeO·eO₂O₃的还原度得到提高，Fe粉含量越高，对还原的促进也越大，还能促进Cr向Fe相和碳化物(Cr, Fe)₇C₃中溶解，降低初始生成的Cr的活度，最终产物Cr₂O₃和(Cr, Fe)₇C₃减少，主要产物是Fe-Cr-C合金，而不是促进boudouard反应。添加Fe粉还影响还原的动力学过程，其中的控制环节既不是表面化学反应，也不是FeCr₂向Fe合金颗粒中的扩散溶解环节，更不是两者的混合控制。

Kleynhans等^[33]报道了在磨矿和造块之前在800~1100℃范围内对铬铁矿进行高温预氧化，会显著提高后续还原的效果。基于此，近年来有些研究者对铬铁矿预氧化-还原^[34]和铬铁矿与磁铁矿混合球团的氧化焙烧-还原工艺^[35]做了尝试。结果表明，铬铁矿颗粒在高温氧化条件下可以形成更多的倍半氧化物(Fe,Cr,Al)₂O₃，然后在1200℃及以上煤基直接还原，金属化率有较大提高。

微波作为一种清洁的能源，也用于强化铬铁矿固态还原的研究。研究结果表明^[36]，铬铁矿在微波场中加热至260℃并保持16min，然后快速冷却至室温，能有效提高内部孔隙和裂纹，促进铬矿的破碎。Bayat等^[37]也证实了微波预热铬铁矿能提高铬铁矿的易磨性。除了预处理的强化之外，用微波替代常规加热用于铬铁矿碳热还原也有较好的效果，具体表现为升温快，反应时间短，能耗低，还原率高^[38]。

2 铬铁矿碳热固态还原动力学研究

动力学讨论反应速率和活化能，着重于揭示

具体的反应路径和催化进程。合成铬矿的碳热还原动力学见表 2。

表 2 合成铬矿的碳热还原动力学

Table 2 The carbon thermal reduction kinetics of synthesis of chrome ore

| 反应物和 C/O | 还原温度 | 还原产物 | 还原方式和控制环节 |
|---|-------|---|-------------------------------|
| FeCr ₂ O ₄ + 石墨, 1.375 | 1453K | Cr ₂ O ₃ , (Fe,Cr) ₃ C, (Cr,Fe) ₇ C ₃ | |
| (Fe _{0.5} Mg _{0.5})Cr ₂ O ₄ + 石墨, 1.43 | 1513K | Cr ₂ O ₃ , (Cr,Fe) ₇ C ₃ | Boudouard 反应 |
| MgCr ₂ O ₄ + 石墨, 1.125 | 1513K | Cr ₃ C ₂ , MgO | Boudouard 反应 |
| (Fe _{0.5} Mg _{0.5}) (Cr _{0.8} Al _{0.2}) ₂ O ₄ + 石墨, 1.55 | 1633K | Cr ₂ O ₃ , Cr ₃ C ₂ , MgAl ₂ O ₄ | 和间接还原混合控制 [39-40] |
| Mg(Cr _{0.6} Al _{0.4}) ₂ O ₄ + 石墨, 1.94 | 1633K | MgO, MgAl ₂ O ₄ , Cr ₃ C ₂ | 主要是间接还原 |
| FeCr ₂ O ₄ + 碳粉, 0.52/0.94/1.17/2 | 1773K | -Fe, Cr ₂ O ₃ , Cr ₇ C ₃ | 第一阶段和第二阶段两种不同的扩散控制机理 [41] |
| (Fe _{0.4} Mg _{0.6}) (Fe _{0.4} Cr _{0.6}) ₂ O ₄ 碳粉, 0.42/1.62 | 1773K | Fe, Cr ₂ O ₃ , Cr ₃ O ₄ | |
| FeCr ₂ O ₄ + 石墨, 1.2/1.25/1.3 | 1573K | Fe-Cr 合金, Cr ₂ O ₃ , Cr ₇ C ₃ , (Cr,Fe) ₇ C ₃ | 初始阶段氧离子扩散 [42] |
| FeCr ₂ O ₄ + 石墨, 1.17/1.20 | 1823K | Fe-Cr-C 合金, Fe-Cr 合金, Cr ₂ O ₃ , Cr ₇ C ₃ | 初始阶段是零级反应 [43] |
| FeCr ₂ O ₄ + 石墨, 1 | 1673K | | 第一阶段是形核控制, 第二阶段是晶体化学传输控制 [44] |

实际的天然铬矿往往伴随着许多含硅脉石及其他金属氧化物, 在其固态还原过程中或多或少会伴有渣相或其他杂质的影响, 因而其固态还原动力学则相对较为复杂。而且, 在添加一些添加剂之后, 该过程也会有不同的变化, 速率控制环节也不一样。

3 结 论

(1) 铬铁矿作为我国的一种重要战略资源, 有关铬铁矿固态还原的基础研究在我国还比较匮乏, 也未形成较为科学的体系, 因而需要在国外学者的研究基础上继续加强基础研究, 进行深入探讨, 需要开展的研究工作有铬铁矿中脉石成分对其固态还原的影响、铬铁矿 + 铁矿的协同还原机理等等。

(2) 铁和铬同为黑色金属, 矿物性质相近,

考虑到铁矿造块工艺和高铁铝土矿、钛铁矿、钒钛磁铁矿等难处理铁矿资源选冶技术在我国的发展和研究比较成熟, 可以因地制宜和借鉴铁矿原料处理方法, 将铁矿造块和直接还原的研究经验以及新的研究成果应用于铬铁矿的预还原和直接还原 - 分选等固态还原中, 在提高我国已有的铬铁矿造块水平的同时, 积极开发铬铁矿资源处理和利用的新工艺, 如流化床预还原、转底炉预还原、悬浮焙烧等等。高效的固态还原技术不仅可为我国铬系合金的冶炼提供稳定优质的含铬原料, 还有助于提升铬系合金的整体冶炼水平。

参考文献:

[1]Xiao Y., Yang Y., HolappaL., et al, Microstructure changes of chromite reduced with CO gas[C]. INFACON 14, 2007: 134-144.

[2]Yang Y., Xiao Y., Reuter MA. Analysis of transport phenomena in submerged arc furnace for ferrochrome production[C].INFACON 10, South Africa, 2004.

[3]舒莉,戴维. 高碳铬铁含碳量控制[J]. 铁合金, 1994(2): 1-7.

[4]Murthya Y. R., Tripathya S. K., Kumar C R. Chrome ore beneficiation challenges & opportunities - A review[J].Minerals Engineering, 2011, 24: 375-380.

[5] Shen S., Hao X., Yang G. Kinetics of selective removal of iron from chromite by carbochlorination in the presence of sodium chloride[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 476: 653-661.

[6]Hosterman B.D.. Raman spectroscopic study of solid solution[M]. University of Nevada, Las Vegas, 2011.

[7] Perry K P D, Finn C W P, King R P. An ionic diffusion mechanism of chromite reduction [J]. Metallurgical Transactions B,1988,19B(8):677-684.

[8] Soykan O., Eric R H, King R P. The reduction mechanism of a natural chromite at 1416 °C [J].Metallurgical Transactions B,1991,22B(2):53-63.

[9] Lekatou A., Walker R D. Mechanism of solid state reduction of chromite concentrate[J]. Ironmaking and Steelmaking,1995,22(5):393-404.

[10] 元捷, 刘承军, 张波, 等. 铬铁矿的还原焙烧与磁选分离 [J]. 重庆大学学报, 2015,38 (2) : 25-32.

[11] 赵青, 刘承军, 元捷, 等. 铬铁矿固态碳热还原过程的影响因素 [J]. 科技导报, 2013(Z1): 40-43.

- [12] Barcza N. A., Jochens P R, Howat D D. The mechanism and kinetics of reduction of Transvaal chromite ores[C]. Electric Furnace Proceedings, 1971,29:88-93.
- [12] Katayama H. G., Tokuda M. The reduction behavior of synthetic chromites by carbon[J]. Transactions ISIJ, 1980, 20: 154-162.
- [13] Ringdalen E., Olsen S E. The effect of chromite ore mineralogy on reduction mechanism and reducibility[C]//Proc. Int. Ferroalloy Cong., Beijing China: SAIM M, 1998: 124-130.
- [14] Apaydin F., Atasoy A, Yildiz K. Effect of mechanical activation on carbothermal reduction of chromite with graphite[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2011, 50 (2) : 113-118.
- [15] Zhu D., Yang C., Pan J., et al. Improving the pelletization of chromite by HPGR and its mechanism[C].6th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, TMS, 2015: 139-146.
- [16] 王亚娟, 王丽君, 周国治. 铬铁矿高效还原的动力学分析 [J]. 材料与冶金学报, 2014, 13 (2) : 112-118.
- [17] Nafziger R. H., Tress J. E., Paige J I. Carbothermic reduction of domestic chromites [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2000, 18 (9) : 209-211.
- [18] Xiao Y., Schuffeneger C., Reuter M., et al. Solid state reduction of chromite with CO[C]//Proc. Int. Ferroalloy Cong., Gape Town South Africa: SAIM M, 2004:26-35.
- [19] Leikola M.. Solid state reduction of chromite with methane and hydrogen[M].Alto University, 2015.
- [20] Ahamad S., Rhamdhani M. A., Pownceby M., et al. Sulfidation kinetic of natural chromite ore using H₂S gas[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 557-567.
- [21] Weber P., Eric R.H.. Solid-state fluxed reduction of LG-6 chromite from the bushveld complex[C].Proc. Int. Ferroalloy Cong., Cape Town South Africa: SAIM M, 1992: 71-77.
- [22] Weber P., Eric R H. The reduction of chromite in the presence of silica flux [J]. Minerals Engineering, 2006, 19 (3): 318-324.
- [23] Weber P., Eric R H. The reduction mechanism of chromite in the presence of a silica flux [J]. Metallurgical Transactions B, 1993, 24 (12) : 987-995.
- [24] Duong H. V., Johnston. Kinetics of solid state silica fluxed reduction of chromite with coal [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2000, 27 (3) : 202-206.
- [25] Lekatou A., Walker R D. Effect of SiO₂ addition on solid state reduction of chromite concentrate[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1997,24 (2) : 133-143.
- [26] Ding Y. L., Warner N A. Reduction of carbon-chromite composite pellets with silica flux[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1997,24(4):283-287.
- [27] Ding Y. L., Warner N A. Catalytic reduction of carbon-chromite composite pellets by lime[J]. Thermochemica Acta,1997,292:85-94.
- [28] 李建臣, 白国华, 李光辉. 含碳铬铁矿球团的固态还原特性 [J]. 中国有色金属学报, 2011,21(5):1159-1164.
- [29] Katayama H., Tokuda M., Ohtani M. Promotion of the carbothermic reduction of chromium ore by addition of borates[J]. Tetsu-to-Hagane,2009,72:1513-1520.
- [30] Chakraborty D., Ranganathan S., Sinha S.N. Carbothermic reduction of chromite ore under different flow rate of inert gas[J]. Metallurgical and Materials, Transactions B, 2010,41B(2):10-18.
- [31] Dewenter J.V. The effect of additions on the reduction of chromite by graphite: an isothermal kinetic study[J]. Thermochemica Acta,1988,127(1):25-35.
- [32] Hu X., Teng L., Wang H., et al. Carbothermic reduction of sythetic chromite with/without the addition of iron powder[J]. ISIJ, 2016,56(2):2-9.
- [33] Kleynhans E. L. J., Neizel B. W., Beukes P. J., et al. Utilisation of pre-oxidised ore in the pelletised chromite pre-reduction process[J]. Minerals Engineering, 2016,92:114-124.
- [34] Kapure G., Tathavadkar V., Rao C. B., et al. Coal based direct reduction of preoxidized chromite ore at high temperature[C]. Infacon 12, Helsinki Finland, 2010:293-301.
- [35] Pan J., Yang C., Zhu, D.. Solid state reduction of preoxidized chromite-iron ore pellets by coal[J]. ISIJ International, 2015, 55(4):727-735.
- [36] Nita P.S. Some effects of microvave heating of chromite ore for Fe-Cr-Al alloys by aluminothermy[C]. The Annals of the University Dunarea De Jos of Galati Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science, 2011:87-91.
- [37] Byyat O., Altiner M., Altinecep Z, et al. Effects of microwave pre-heating on grindability and liberalization degree of chromite ores[C]. Processings of the XV Balkan Mineral Processing Congress, 2013.
- [38] Mackowiak K.D. A study of the microwave carbothermic reduction of chromite ore[M]. Queen's University, Kinston, Ontario, Canada, 2016.
- [39] Katayama H., Tokuda M. Rate-determining process in carbothermic reduction of chromites[J]. Tetsu- to-

Hagane,1985,71:1094-1101.

[40] Katayama H.,TokudaM. The reduction behavior of synthetic chromites by carbon[J]. Tetsu-to- Hagane, 1979, 65:331-340.

[41]Vuuren V. C. P. J., Bodenstein J. J.,Sciarone M.,et al. The reduction of synthetic iron chromite in the presence of various metal oxides - a thermos-analyticalstudy[C]. Infacon 6,1992(1):51-56.

[42] Sundar M. N. S.,Seshadri V.. Kinetics of reduction of synthetic chromite with carbon[J]. Iron Steel,1982,22(12):925-933.

[43] Zhang Y.,Liu Y.,Wei W..Carbothermal reduction process of the Fe-Cr-O system[J],International Journal of Minerals Metallurgy and Materials,2013,20(10):931-940.

[44] Wang Y.,Wang L.,Yu J.,et al. Kinetics of carbothermic reduction of synthetic chromite[J]. Journal of Mining & Metallurgy,2014,50(1):15-21.

Research Progress of Solid-state Reduction of Chromite

Ye Mingfeng, Wu Guangliang

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

Abstract: A brief review of domestic and foreign investigation on solid-state reduction of chromite for the past 50 years, the mechanism and kinetics were summarized. Effects of factors as material properties, temperature, reductant, additives, atmosphere were analyzed and some new ways to strengthen the reduction in newly-published literature were also mentioned, providing some thought to seek development trend of solid state reduction about chromite.

Keywords: Chromite; Solid-state reduction; Progress

////////////////////////////////////
(上接 52 页)

Study on Magnetic Composite Flocculation Behavior of Fine - grained Hematite

Zhou Wenbo^{1,2}, Li Aiqiang¹, Li Qingqing¹, Chen Tingkang¹, Qi Fang¹

(1.College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan University of Science and Technology,Wuhan,Hubei, China; 2 .Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, China)

Abstract: The effect of the combined action of magnetic field and flocculant on the flocculation and settling behavior of hematite was investigated by the sedimentation test. The results show that the combined effect of magnetic field and flocculant is better than single ploymer flocculation and magnetic flocculation. The total potential energy of hematite particles in the composite system was calculated, and the results show that the combined action of the magnetic field and the flocculant reduces the potential barrier in the composite system and benefits the agglomeration between hematite particles.

Keywords: Hematite; Magnetic composite flocculation; DLVO; Sedimentation Test