高铝铁矿和高锰铁矿共还原行为的研究

朱德庆[1]，薛钰霄[1]，潘　建[1]，周仙霖[2]

(1. 中南大学 资源加工与生物工程学院，长沙 410083，2. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，武汉 430083)

摘　要： 高铝铁矿和高锰铁矿是两种储量丰富但又极难分选的铁矿资源，实现铁、锰、铝的高效综合利用具有重要意义. 本文研究了这两种铁矿石工艺矿物学，考查了单矿种及两者的混合矿种的直接还原行为及还原过程中的矿物组成演变，揭示了相应的还原机理. 结果表明：高铝铁矿难还原，其机理为经还原后仅部分铁氧化物转化为金属铁，其余的铁与铝、硅矿物形成难还原的铁橄榄石和铁尖晶石；高锰铁矿易还原，其中的铁氧化物大部分被还原成金属铁，锰氧化物与铝、硅矿物结合形成锰尖晶石和锰橄榄石，促进了铁氧化物的还原. 而且在相同还原条件下，高锰铁矿球团金属化率比高铝铁矿高 30 个百分点，前者还原性明显优于后者. 两种矿进行共还原，当高锰铁矿配比达到 60% 时，球团金属化率就可大于 90%. 锰氧化物的存在对高铝铁矿石中铁氧化物的还原具有显著的促进作用.

关键词： 高铝铁矿；高锰铁矿；共还原

中图分类号： TD 981　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1671-6620(2017)01-0001-07

Research on co – reduction of high – manganese and high – aluminum iron ores

Zhu Deqing[1], Xue Yuxiao[1], Pan Jian[1], Zhou Xianlin[2]

(1. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430083, China)

Abstract: It is of great significance to realize the efficiently and comprehensively utilization of iron, manganese and aluminum from extremely refractory high – aluminum iron ores and high – manganese iron ores with abundant reserves. Aimed at the two types of low grade refractory iron ores, mineralogical characteristics were studied. The direct reduction behaviors and evolution of mineral compositions of single iron ores and their blended ones were analyzed, and the corresponding reduction mechanisms were demonstrated. The results showed that high – aluminum iron ore possesses poor reducibility because only part of the iron oxides are reduced to metallic iron with a lower metallization degree after reduction, while the other react with aluminum and silicon to form fayalite and hercynite which are difficult to be reduced. For the high – manganese iron ore, better reducibility is achieved because most of the iron oxides can be reduced to metallic iron with high metallization degree and manganese oxides are combined with aluminum – silicate minerals to form galaxite and tephroite, promoting the reduction of iron oxides. Under the same conditions for reduction, the metallization degree of the high – manganese iron ore pellets is higher by 30% than that of high – aluminum iron ore pellets. Co – reduction of the blends of the two types of iron ores demonstrated that the metallization degree of the pellets could be more than 90% at the ratio of 60% high – manganese iron ore in the pellet feed, which proves that manganese oxides can obviously promote the reduction of iron oxides in high – alumina iron ores.

Key words: high – aluminum iron ore; high – manganese iron ore; co – reduction

高铝铁矿及高锰铁矿储量丰富，但其中各种矿物嵌布粒度微细，赋存状态复杂，铁和铝、铁和锰有相当比例是以类质同象存在，难以分离，是典型的复杂难选铁矿石资源[1-5]. 此外，还有一种高铝含铁二次资源—赤泥，我国每年排放赤泥高达数百万 t，但综合利用率仅 4%[6]；世界锰资源金

属储量约为 6.2 亿 t，我国储量高达 4 400 万 t，在已勘查的矿床中，铁含量超过标准的高铁锰矿资源占 73%[7]. 因此，研究如何综合利用高铝及高锰铁矿资源对缓解我国钢铁行业的压力及降低对进口矿的依赖度有着重要意义.

高铝铁矿因 Al_2O_3 含量太高，不能直接用于高炉冶炼铁水，而配加少量高铝铁矿用于烧结时，一方面配加比例太低，导致该类资源利用程度极低，另外又会对烧结矿质量产生不利影响，增加燃料消耗，影响高炉生产. 因此，高铝铁矿中铁铝高效分离是实现其高效利用的前提. 由于常规物理选矿工艺不能处理该类资源，大多采用火法工艺进行分离. 但大多数火法工艺需要加入大量盐类添加剂，使生产成本大幅度增加，不利于设备顺行[8-13]. 高锰铁矿由于铁和锰的性质相近，两者往往紧密共生或类质同象形态存在，常规选矿工艺难以实现铁、锰分离，较有效的手段是将其作为高炉炉料生产富锰渣，而富锰渣工艺需要以焦炭为燃料和还原剂. 随着焦煤资源的不断减少，需要配套炼焦工艺以生产优质焦炭，但炼焦工艺环境污染大[14-19]. 因此，需开发一种具有金属回收率高、环境污染小等优点的熔融还原工艺，以实现对铁和铝、铁和锰的高效分离，从而达到对这两种资源的高效利用. 本文以这两种铁矿石为原料，在研究两种单矿种物化性能、工艺矿物学特征及还原行为的基础上，对两种矿的混合矿共还原行为进行深入研究，以高锰铁矿促进高铝铁矿的还原，为实现铁、铝、锰在熔融还原中的高效分离提供理论依据.

1 原料性能及研究方法

1.1 含铁原料性能

1.1.1 物化性能

为保证原料的均匀性，两种铁矿干燥后破碎至 −1 mm，并充分混匀取样. 两种铁矿化学成分见表 1. 高铝铁矿铁品位为 41.92%，铝、硅含量(质量分数)达 13.74% 和 13.96%；高锰铁矿铁品位为 42.32%，锰、铝、硅含量(质量分数)分别为 9.24%、6.60% 和 4.22%，两者烧损(LOI)均较大，分别为 7.20% 和 11.05%. 两种铁矿分别烘干、磨细到 −0.074 mm 占 80% 后备用.

表 1 含铁原料化学成分分析(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of the raw materials (mass fraction) %

	TFe	FeO	TMn	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P	S	LOI
高铝铁矿	41.92	0.17	1.24	13.74	13.96	0.13	0.88	0.42	0.033	0.130	0.014	7.20
高锰铁矿	42.32	0.12	9.24	6.60	4.22	0.2	0.20	0.30	0.026	0.065	0.018	11.05

1.1.2 矿物组成及赋存状态

两种铁矿的 XRD 分析结果见图 1. 结果显示：高铝铁矿的矿物组成以赤铁矿、针铁矿、高岭石和三水铝石为主；高锰铁矿的矿物组成以赤铁矿、针铁矿、软锰矿、高岭石和三水铝石为主.

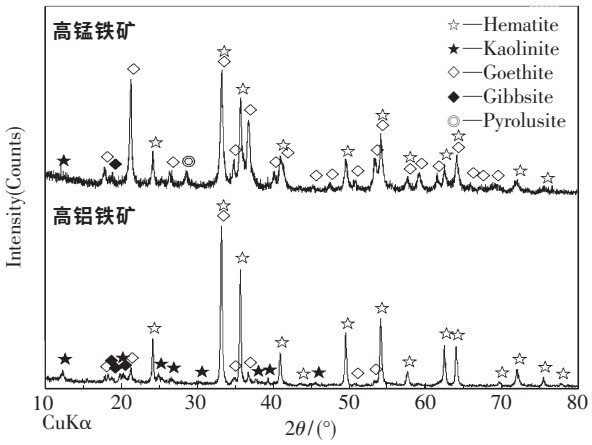

图 1 试验矿样 XRD 分析结果

Fig. 1 XRD patterns of the raw materials

表 2 为铁矿主要元素赋存状态. 两种铁矿中铁、铝、硅的赋存形式相似，铁均主要赋存于赤铁矿、针铁矿中，比例分别达 98.59% 和 98.87%；铝均以含铝硅酸盐类矿物(高岭石)和独立的铝矿物(三水铝石和一水铝石)为主，两者三种矿物分布率分别为 62.66% 和 41.36%、26.20% 和 51.06% 及 11.14% 和 41.36%；硅均以硅酸盐类矿物为主，分布率分别达 94.99% 和 85.78%，少量为游离的石英. 另外，高锰铁矿中锰以氧化锰为主，分布率达 72.73%，其次为锰铁矿物(类质同象)，达 19.70%.

1.2 还原剂性能

对试验所用还原剂进行工业分析、灰分成分及软熔特性分析，结果见表 3、表 4. 还原剂含固定碳 52.12%，挥发分为 30.41%，全硫含量较低，为 0.58%，灰分仅 4.49%，主要含硅、钙、铁、铝等，具有较高的软化温度，达 1 376 ℃，是一种理想的还原剂. 还原煤破碎到 −3 mm、烘干备用.

表2　原料中主要元素的赋存状态及分布(质量分数)

Table 2　Occurrence and distribution of the main elements in the two raw materials (mass fraction)　%

含铁原料	主要元素赋存状态	铁				
		碳酸铁	硫化铁	磁铁矿	赤铁矿、针铁矿	硅酸铁
高铝铁矿	含量	0.08	0.01	痕量	41.33	0.50
	分布率	0.19	0.02	–	98.59	1.19
高锰铁矿	含量	0.14	0.01	痕量	41.84	0.33
	分布率	0.33	0.02	–	98.87	0.78

含铁原料	主要元素赋存状态	铝			锰				硅	
		三水铝石	高岭石	一水铝石	碳酸锰	氧化锰	锰铁矿物	硅酸锰	游离石英	硅酸盐
高铝铁矿	含量	3.60	8.61	1.53	0.14	0.82	痕量	0.28	0.70	13.26
	分布率	26.20	62.66	11.14	11.29	66.13	–	22.58	5.01	94.99
高锰铁矿	含量	3.37	2.73	0.50	0.60	6.72	1.82	0.10	0.60	3.62
	分布率	51.06	41.36	7.58	6.49	72.73	19.70	1.08	14.22	85.78

表3　还原煤工业分析及其灰分软熔特性

Table 3　Industrial analysis of reductant coal and fusibility of coal ash

还原煤工业分析/%					还原煤灰分软熔特性/℃			
Fcad	Mad	Ad	Vdaf	St. ad	变形温度	软化温度	半球温度	流动温度
52.12	12.98	4.49	30.41	0.58	1332	1376	1450	1469

注: Fcad—空气干燥基固定碳; Mad—空气干燥基水分; Ad—干燥基灰分; Vdaf—干燥无灰基挥发分; St. ad/%—空气干燥基全硫.

表4　还原煤灰分成分(质量分数)

Table 4　Chemical compositions of coal ash (mass fraction)　%

TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P	S
11.80	27.62	8.02	24.94	1.34	0.16	1.34	0.01	12.92

1.3　研究方法

采用竖式电阻炉作为还原设备,其示意图见图2. 加热室内径为80 mm,最高可调温度1 350 ℃,温控精度±5 ℃,还原罐为φ65 mm×150 mm的不锈钢反应罐. 试验时首先在圆盘造球机上制备φ10–12 mm的铁矿球团(成球性好,无需添加膨润土),干燥后备用;每次称取50g干燥球团,按配用量依次装入1/3还原煤、干燥球团和剩余的2/3还原煤,然后把还原罐放入已达到目标温度的竖式加热炉中,待升至设定温度时开始计时;还原结束后,把还原罐取出并立即盖上煤粉以防止还原球团被氧化,冷却至室温.

检测球团的全铁品位及金属铁含量,计算其金属化率,计算公式如下:

$$m_{Fe}=\frac{w(Fe)}{w(TFe)}\times 100\% \qquad (1)$$

式中: m_{Fe}为还原产品金属化率,%; $w(Fe)$为还原产品金属铁含量,%; $w(TFe)$为还原产品全铁品位,%.

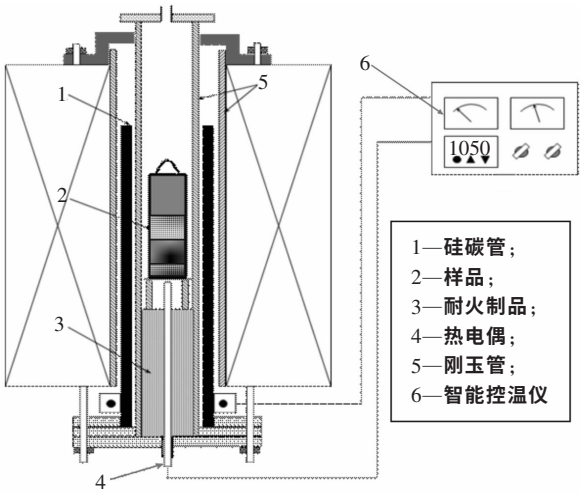

图2　竖式电阻炉直接还原试验装置

Fig. 2　Vertical furnace for direct reduction

矿物组成采用日本理学D/max 2500型X射线衍射仪检测,开始角度10°,结束角度80°,步长

0.02°，计数时间 0.15 s，CuKα 辐射，电压 40 kV，电流 250 mA. 主要元素赋存状态参照相关国家标准采用化学分析方法测定.

2 高铝铁矿和高锰铁矿还原行为研究

2.1 单种铁矿还原行为

考察了直接还原制度对高铝铁矿及高锰铁矿球团金属化率、矿物组成的影响，包括直接还原温度、时间及还原剂用量（以 C/Fe 比表示，即还原煤与矿物球团的质量比）的影响.

2.1.1 直接还原温度的影响

在还原时间 60 min、C/Fe 比 1.5 的条件下调节直接还原温度，结果见图 3. 随还原温度的提高，两种铁矿球团还原行为呈现较大差别，高铝铁矿球团铁的金属化率随着还原温度的升高而升高，在还原温度为 1 050 ℃ 时，铁的金属化率达到最大值（53.68%），进一步将还原温度升至 1 100 ℃ 时，金属化率反而下降至 36.44%. 由此表明，高铝铁矿难还原；而高锰铁矿球团铁的金属化率随着还原温度的升高而持续上升，并在 1 050 ℃ 时达到 90% 以上，继续提高还原温度则铁的金属化率趋于平稳. 比较不难发现，高锰铁矿球团的还原性远优于高铝铁矿球团.

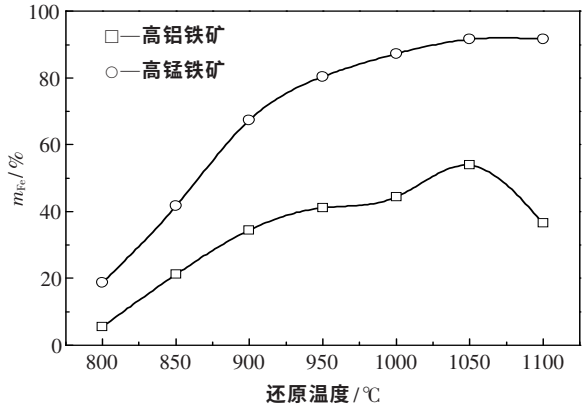

图 3 直接还原温度对还原球团金属化率的影响（还原时间 60 min，C/Fe 比 1.5）

Fig. 3 Effect of direct reduction temperature on metallization ratios of the pellets with high – aluminum and high – manganese

为揭示高铝及高锰铁矿还原行为的差别，对不同还原温度下还原后球团的矿物组成进行了测定，结果见图 4. 在 800 ~ 1 050 ℃ 范围内，随着还原温度的升高，高铝铁矿及高锰铁矿球团中金属铁的特征峰均逐渐增强，浮氏体的峰值随之减弱直至消失，表明随还原温度升高，更多的铁氧化物

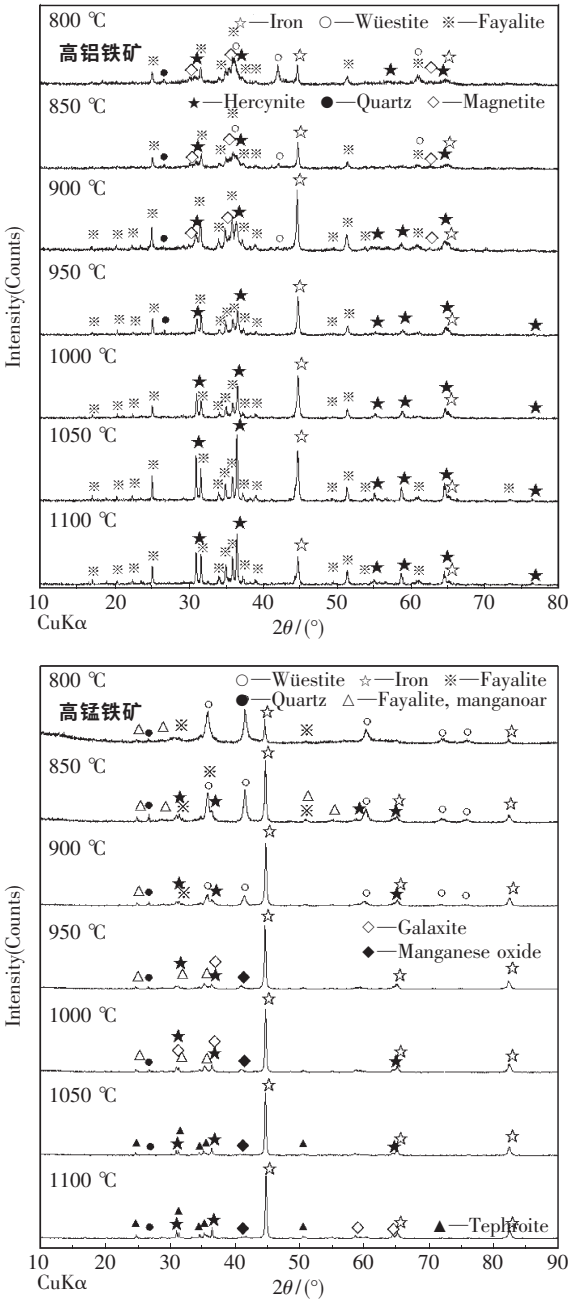

图 4 直接还原温度对高铝及高锰铁矿还原过程矿物组成的影响（还原时间 60min，C/Fe 比 1.5）

Fig. 4 Effects of direct reduction temperature on phase omposition of high – aluminum and high – manganese res in the reduction (60min, C/Fe mass ratio of 1.5)

被还原成金属铁，但 800 ~ 900 ℃ 时，高铝铁矿球团中始终有少量磁铁矿特征峰，高锰铁矿球团中则没有，进一步说明前者铁氧化物还原难度大；当还原温度达到 1 100 ℃ 时，高铝铁矿球团中的金属铁的峰值反而下降，更多的铁橄榄石和铁尖晶石出现，说明还原温度过高时铁氧化物更多地转化为难还原的铁橄榄石和铁尖晶石，从而阻碍铁氧化物进一步还原. 而高锰铁矿球团在 1 100 ℃ 还原时铁锰橄榄石特征峰被锰橄榄石取代，表明

升高还原温度时氧化锰矿物的存在进一步促进了铁矿物的还原.

2.1.2　直接还原时间的影响

在还原温度 1 050 ℃、C/Fe 比 1.5 的条件下考察还原时间对高铝铁矿及高锰铁矿球团铁的金属化率的影响,结果见图 5. 当还原时间从 15 min 延长至 30 min 时,高铝铁矿球团铁的金属化率提高较明显,继续延长还原时间,金属化率缓慢上升,还原时间为 90 min 时,其金属化率为 62.72%,还原时间延长至 120 min 时,铁的金属化率仅 66.49%,远低于高品位铁精矿球团. 可见高铝铁矿球团中铁氧化物难还原. 而高锰铁矿球团在还原时间仅为 15 min 时,其金属化率即达 79.83%,延长至 30 min 时,即超过 90%,继续延长还原时间则铁的金属化率变化不大. 在相同还原条件下,高锰铁矿还原球团铁的金属化率比高铝铁矿高 30 个百分点以上,表明高锰铁矿球团中的铁氧化物较易被还原.

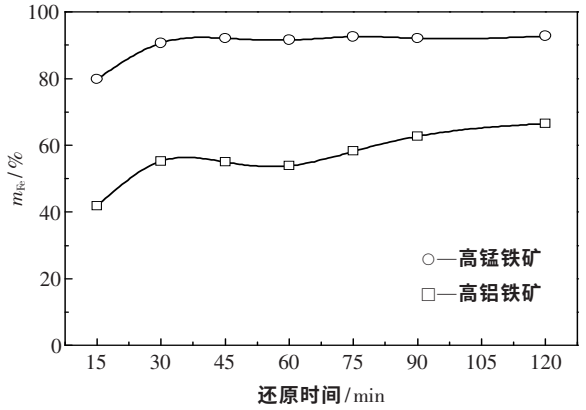

图 5　直接还原时间对还原球团金属化率的影响
(还原温度 1050℃,C/Fe 比 1.5)

Fig. 5　Effects of direct reduction time on metallization ratio of the pellets of high – aluminum and high – nganese iron ores (1 050 ℃, C/Fe mass ratio of 1.5)

不同还原时间条件下高铝及高锰铁矿还原球团中的矿物组成见图 6. 结果表明,当还原时间从 15 min 延长至 30 min,高铝铁矿球团中金属铁的衍射峰逐渐增强,铁橄榄石和铁尖晶石的峰值有所减弱,浮氏体特征峰消失,说明有更多的铁矿物被还原,金属化率升高. 延长还原时间至 60 min 时,各矿物衍射峰强度变化不大,仍有铁橄榄石和铁尖晶石存在,进一步说明了高铝铁矿难还原,可能是高铝含量对铁氧化物还原不利. 而高锰铁矿较易还原,还原 15 min 时就有大量金属铁生成. 还原时间延长至 60 min 时,金属铁的峰值继续增强,铁橄榄石和铁尖晶石被锰橄榄石和锰尖晶石取代,铁锰氧化物的特征峰则被 MnO 取代,说明铁氧化物被进一步还原成金属铁,锰的存在可能对铁氧化物还原具有促进作用.

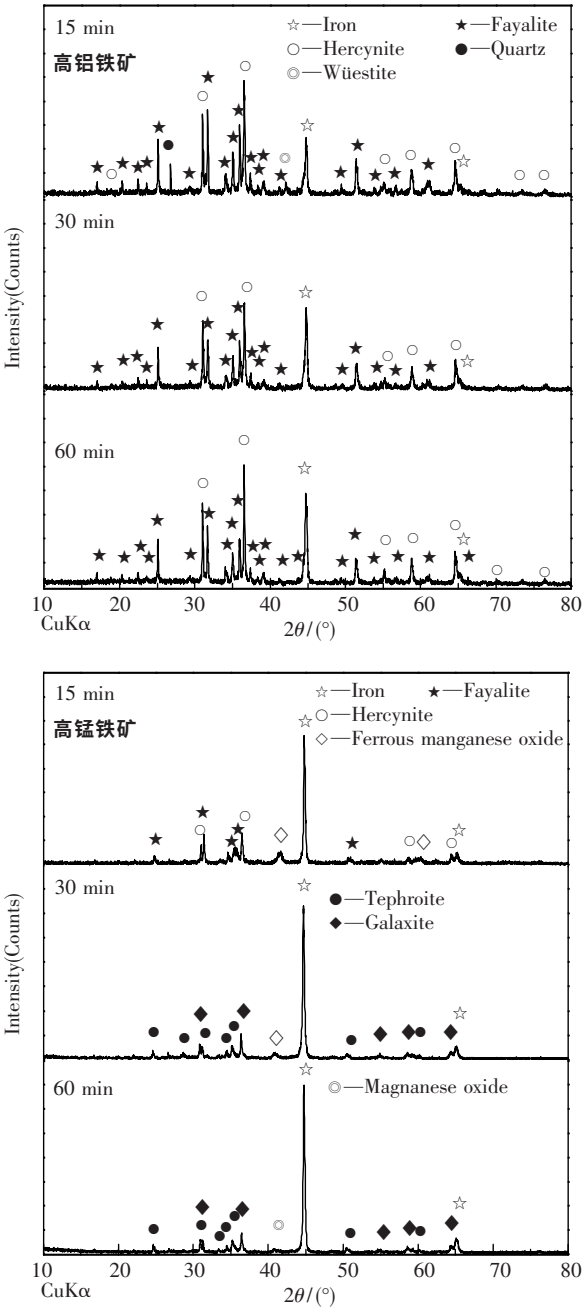

图 6　直接还原时间对高铝及高锰铁矿还原过程物相变化的影响
(还原温度 1 050 ℃,C/Fe 比 1.5)

Fig. 6　Effects of direct reduction time on phase composition of high – aluminum and high – manganese res in the reduction (1 050 ℃,C/Fe mass ratio of 1.5)

2.1.3　还原剂用量的影响

还原剂用量对球团铁的金属化率的影响见图 7. 对于高铝铁矿,C/Fe 比增加时,铁的金属化率略有提高,但总体来说依旧偏低,最佳值仅 62.72%,可见增加还原剂用量并不能改善高铝铁

矿的还原. 而当 C/Fe 比从 0.5 提高至 1.0 时,高锰铁矿还原球团铁的金属化率即从 87.14% 升至 91.26%,继续增加还原剂用量则变化不大. 在相同还原条件下,其金属化率远高于高铝铁矿.

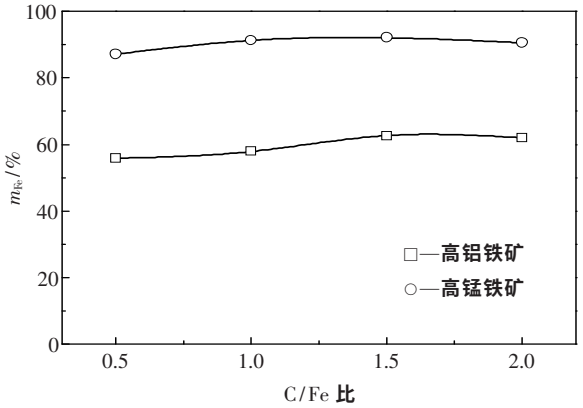

图 7　C/Fe 比对还原矿金属化率的影响
(还原温度 1 050 ℃,还原时间 90 min)

Fig. 7　Effects of C/Fe mass ratio on metallization ratio of the pellets (1 050 ℃ for 90 min)

由上述还原制度优化结果可知,高铝铁矿难以还原,在最佳条件下仅能获得金属化率为 62.72% 的还原球团,未被还原的铁矿物与铝、硅矿物结合形成难还原的铁尖晶石和铁橄榄石,阻碍了铁的进一步还原. 相比于高铝铁矿,高锰铁矿还原性能较优,在较短还原时间内即可获得金属化率超过 90% 的还原球团,锰氧化物与铝、硅矿物结合形成锰尖晶石和锰橄榄石,促进了铁氧化物的还原.

2.2　高铝铁矿和高锰铁矿共还原行为

鉴于高锰铁矿还原性能优于高铝铁矿,因此考虑利用高锰铁矿强化高铝铁矿的还原,考察这两种铁矿石混合后的共还原行为. 表 5 为不同高锰铁矿配比条件下混匀矿的主要成分的理论计算值,当高锰铁矿配比为 60% 时,混匀料中 TMn 含量提高至 6.67%,Al_2O_3 和 SiO_2 分别降低至 10.45% 和 8.97%,但仍比普通铁矿石高.

表 5　高锰铁矿配比对混合矿主要成分的影响(质量分数)*

Table 5　Effect of ratio of high-manganese ore on the main compositions of mixture (mass fraction)　%

配比	TFe	TMn	Al_2O_3	SiO_2
0	45.17	1.34	14.81	15.04
20	45.64	3.09	13.38	13.05
40	46.11	4.87	11.93	11.03
60	46.59	6.67	10.45	8.97
80	47.08	8.52	8.95	6.87
100	47.58	10.39	7.42	4.74

* 扣除烧损

基于前述研究结果,设定共还原温度为 1 050 ℃、还原时间 30 ~ 120 min,考察不同高锰铁矿配比对高铝铁矿还原效果的影响,结果见图 8. 随高锰铁矿配比的提高,金属化率明显上升,同时延长还原时间有利于金属化率的提高,当还原时间超过 90 min 后则变化不明显. 当高锰铁矿配比为 60%、还原温度 1 050 ℃、还原时间 90 min 时,球团金属化率达 90% 以上.

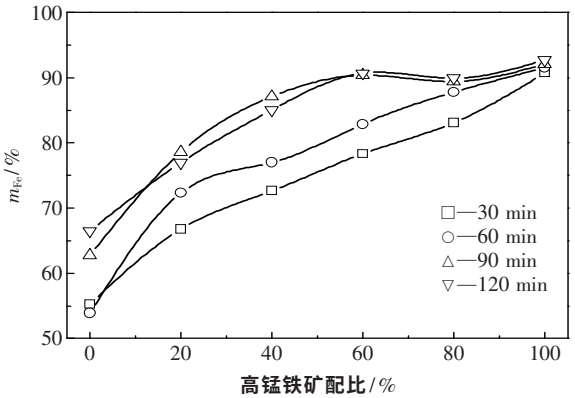

图 8　高锰铁矿配比对还原球团金属化率的影响(还原温度 1 050 ℃, C/Fe 比 1.5)

Fig. 8　Effects of ratio of high-manganese iron ore on metallization ratio of the pellets (1 050 ℃, C/Fe ratio of 1.5)

不同配比高锰铁矿还原球团的 XRD 结果见图 9. 高铝铁矿还原后仅部分铁矿物被还原成金属铁,铁尖晶石和铁橄榄石的衍射峰明显,说明大量铁矿物与铝、硅矿物结合; 随高锰铁矿配比的提高,铁橄榄石和铁尖晶石特征峰的强度减弱,当高锰铁矿配比为 40% 时,铁橄榄石特征峰被锰铁橄榄石取代,说明随原料中锰含量的提高,部分锰与铁橄榄石反应,将铁置换出来,强化了还原效果; 继续增加高锰铁矿配比至 60% 时,杂质矿物仍以铁尖晶石和锰铁橄榄石为主,但含量较低; 高锰铁矿配比为 80% 时,锰铁橄榄石的特征峰消失,出现锰橄榄石的特征峰,同时铁尖晶石的特征峰被锰尖晶石取代,较高锰铁矿配比为 60% 时的铁尖晶石峰值弱,说明更多的铁矿物被还原; 当全部为高锰铁矿时,出现少量氧化亚锰特征峰,铁尖晶石特征峰十分微弱.

综上,采用高锰铁矿与高铝铁矿的混合矿进行共还原时,高锰铁矿中的锰氧化物可有效地促进铁尖晶石和铁橄榄石的分解,将 FeO 置换出来,提高其活度,从而强化了高铝铁矿的还原.

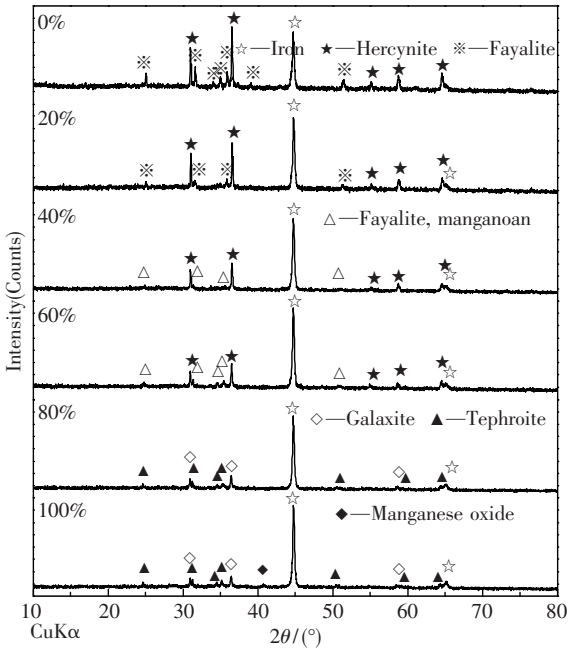

图 9　不同高锰铁矿配比下还原球团 XRD 检测结果
(还原温度 1 050 ℃,还原时间 90 min, C/Fe 比 1.5)
Fig. 9　XRD results of the pellets with different ratios of high-manganese iron ore
(1 050 ℃, 90 min, C/Fe ratio of 1.5)

3　结　论

(1) 高铝铁矿铁品位为 41.92%,铝、硅含量高达 13.74% 和 13.96%; 高锰铁矿铁品位为 42.32%,锰、铝、硅含量分别为 9.24%、6.60% 和 4.22%. 高铝铁矿及高锰铁矿中铁、铝、硅的赋存形式相似,铁均主要赋存于赤铁矿、针铁矿中,铝均以含铝硅酸盐类矿物(高岭石)和独立的铝矿物(三水铝石和一水铝石)为主,硅均以硅酸盐类矿物为主,少量为游离的石英,而高锰铁矿中锰主要赋存于软锰矿,以氧化锰为主.

(2) 单种铁矿直接还原行为研究表明: 高铝铁矿远比高锰铁矿难还原. 高铝铁矿球团经还原后部分铁氧化物转化为金属铁,其余则与杂质矿物形成难还原的铁橄榄石和铁尖晶石,表明高铝含量不利于铁氧化的还原. 高锰铁矿中铁氧化物大部分可被还原成金属铁,锰氧化物与铝、硅矿物结合形成锰尖晶石和锰橄榄石,表明锰的存在促进了铁氧化物的还原.

(3) 高铝铁矿与高锰铁矿的混合矿共还原行为研究表明: 高锰铁矿能促进高铝铁矿的还原,随着高锰铁矿配比的提高,球团中铁的金属化率明显提高. 当高锰铁矿配比达到 60% 时,球团中铁的金属化率就可达到 90% 以上. 进一步表明锰氧化物的存在促进高铝铁矿中铁氧化物的还原.

参考文献:

[1] Raghukumar C, Kumar Tripathy S, Mohanan S. Beneficiation of Indian high alumina iron ore fines - a case study [J]. International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing, 2012, 1(2): 94-100.

[2] 春铁军. 低品位微细粒赤铁矿高效富集技术及机理研究 [D]. 中南大学, 2010.
(Chun Tiejun. Study on the process and mechanism of effective beneficiation on the superfine low grade Hematite [D]. Central South University, 2010.)

[3] Das B, Prakash S, Das S K, *et al*. Effective beneficiation of low grade iron ore through jigging operation [J]. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2008, 07(1): 27-37.

[4] Rao K H, Narasimhan K S. Selective flocculation applied to Barsuan iron ore tailings [J]. International Journal of Mineral Processing, 1985, 14(1): 67-75.

[5] 张泾生, 周光华. 我国锰矿资源及选矿进展评述 [J]. 中国锰业, 2006, 24: 1-5.
(Zhang Jingsheng, Zhou Guanghua. A review of manganese ore resources in China and its processing technology progress [J]. China's Manganese Industry, 2006, 24: 1-5.)

[6] 工业和信息化部, 科技技术部. 赤泥综合利用指导意见 [CP/OL]. (2010-11-26) [2016-04-01]. http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294042/n11302360/13644816.html.
(Ministry of industry and information technology, Ministry of science and technology. Guidance on the comprehensive utilization of red mud [CP/OL]. (2010-11-26) [2016-04-01]. http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294042/n11302360/13644816.html.)

[7] Geological Survey U S. Mineral commodity summaries 2016 [G]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2016.

[8] 李光辉, 刘牡丹, 姜涛, 等. 高铝铁矿石工艺矿物学特征及铝铁分离技术 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 1165-1171.
(Li Guanghui, Liu Mudan, Jiang Tao, *et al*. Mineralogy characteristics and separation of aluminum and iron of high-aluminum iron ores [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(5): 1165-1171.)

[9] Chun T J, Zhu D Q, Pan J, *et al*. Preparation of metallic iron powder from red mud by sodium salt roasting and magnetic separation [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2014, 53(2): 183-189.

[10] 梅贤功. 高铁三水铝矿拜耳法溶出及赤泥直接还原工艺与理论研究 [D]. 中南工业大学中南大学, 1993.
(Mei Xiangong. Study on the technology and theory of Bayer digestion process of high-iron gibbsitic bauxite and direct reduction of red mud [D]. Central South University of Technology Central South University, 1993.)

[11] Chun T, Zhu D, Pan J, *et al*. Recovery of alumina from magnetic separation tailings of red mud by Na_2CO_3 solution leaching [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2014, 45(3): 827-832.

[12] Zhu D Q, Chun T J, Pan J, *et al*. Recovery of iron from high-iron red mud by reduction roasting with adding sodium salt [J]. Journal of Iron & Steel Research International, 2012, 19(8): 1-5.

[13] Zhou X, Zhu D, Pan J, *et al*. Upgrading of high – aluminum hematite – limonite ore by high temperature reduction – wet magnetic separation process [J]. Metals, 2016, 6(3): 57.

[14] 黄柱成，柴斌，赵鹏，等. 高铁锰矿直接还原及其还原行为 [J]. 中南大学学报(自然科学版)，2014，(01)：9 – 15.
(Huang Zhucheng, Chai Bin, Zhao Peng, *et al*. Reduction of high iron content manganese ore and its mechanism [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, (01): 9 – 15.)

[15] 徐栋梁. 高结晶水锰矿粉球团还原冶炼高碳锰铁合金工艺及机理研究 [D]. 中南大学，2009.
(Xu Dongliang. Investigation on technology and mechanism of high carbon ferromanganese alloys by pelletization – reducing smelting process using manganese ore fines containing high combined water [D]. Central South University, 2009.)

[16] Zhang H, Zhu G, Yan H, *et al*. Reduction of low – grade manganese dioxide ore pellets by biomass wheat stalk [J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2013, 26(2): 167 – 172.

[17] 黄柱成，赵鹏，姜涛，等. 某高铁锰矿煤基直接还原—磁选试验研究 [J]. 金属矿山，2012 (3)：74 – 77.
(Huang Zhucheng, Zhao Peng, Jiang Tao, *et al*. Process for coal – based direct reduction and magnetic separation of a high – iron manganese ore [J]. Metal Mine, 2012 (3): 74 – 77.)

[18] Zhu D, Yu W, Zhou X, *et al*. Strengthening pelletization of manganese ore fines containing high combined water by high pressure roll grinding and optimized temperature elevation system [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(9): 3485 – 3491.

[19] 朱德庆，徐栋梁，潘建，等. 高结晶水锰矿粉制备高性能球团研究 [J]. 钢铁，2009，44(5)：11 – 15.
(Zhu Deqing, Xu Dongliang, Pan Jian, *et al*. Study on high properties pellets produced by manganese ore fines containing high combined water [J]. Iron and Steel, 2009, 44(5): 11 – 15.