球团

铝的赋存状态及质量分数对球团焙烧性能的影响

朱德庆，王 名，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：随着国内外优质铁矿资源的减少，球团矿原料中 Al_2O_3 质量分数将越来越高，这可能直接影响到铁精矿的成球性能、球团焙烧性能和产品质量。本文以巴西某赤铁精矿为原料，通过加入不同类型的含铝添加剂粉（纯氧化铝、铁铝尖晶石、三水铝石和高岭石），分别将球团矿 Al_2O_3 质量分数调至1.0%、2.0%和3.0%，研究铝的赋存状态及质量分数对赤铁精矿造球性能及球团焙烧行为的影响规律。结果表明：高岭石和三水铝石均能显著改善生球的落下强度，铁铝尖晶石能显著提高生球的爆裂温度；配加氧化铝和三水铝石时，焙烧球团矿抗压强度明显下降；而在 Al_2O_3 质量分数小于2%时，配加高岭石有助于提高焙烧球团抗压强度；总体来看，Al_2O_3 质量分数的增加对球团还原性不利，但能一定程度上抑制还原膨胀；不同铝的赋存状态的影响程度不同，其中高岭石影响最为明显；从矿相结构分析，配加氧化铝、三水铝石和铁铝尖晶石时未生成明显液相，而配加高岭石后有更多渣相生成，球团固结进一步加强，带入的铝在球团中的分布也更均匀。

关键词：铁矿石；赤铁精矿；铝；赋存状态；焙烧球团矿
中图分类号：TF046.6 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)02－0001－07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.017

Influence of aluminum occurrence state and mass fraction on roasting performance of pellets

ZHU Deqing, WANG Ming, YANG Congcong, PAN Jian, GUO Zhengqi
(*School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan, China*)

Abstract: With the decrease of high quality iron ore resources at home and abroad, the mass fraction of Al_2O_3 in pellets raw materials will become higher and higher, which may directly affect the balling property, pellets' roasting performance and product quality of iron concentrates. In this paper, a Brazilian hematite concentrate is used as raw material, and the mass fractions of Al_2O_3 in the pellets are adjusted to 1.0%, 2.0% and 3.0% by adding different types of aluminum-containing additive powders (pure alumina, hercynite, gibbsite and kaolinite) to investigate the effect law of aluminum occurrence state and mass fraction on the balling property and pellets' roasting behavior of hematite concentrate. The results show that both kaolinite and gibbsite significantly improve the falling strength of fresh pellets, and hercynite significantly increases the bursting temperature of fresh pellets; the compressive strength of roasting pellets decreases significantly when alumina and gibbsite are added; while the addition of kaolinite helps to improve the compressive strength of roasting pellets when the mass fraction of Al_2O_3 is below 2%; in general, the increase in the mass fraction of Al_2O_3 is unfavorable to the reduction of pellets, but can inhibit the reduction expansion to a certain extent; the influence of different aluminum occurrence state is different, among which kaolinite has the most

收稿日期：2021－10－22；**修回日期**：2021－12－05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52004339)
作者简介：朱德庆(1964—)，教授，从事铁矿造块、非高炉炼铁、低品位矿综合利用、钢铁冶金节能减排与环保等研究。
通讯作者：杨聪聪(1989—)，博士，讲师，从事烧结球团理论与新工艺、低碳冶金技术与短流程、低品位矿及冶金固废资源化利用等研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

obvious influence; from the analysis of ore phase, no obvious liquid phase is generated when alumina, hercynite, gibbsite are added, while more slag phase is generated when kaolinite is added. The consolidation of the pellets is further strengthened and the distribution of the introduced aluminum in the pellets is also more uniform.

Key words: iron ore; hematite concentrate; aluminum; occurrence state; roasting pellets

我国高品位的优质铁矿较少，且国外铁矿的价格优势较大，因此我国仍将长期处于对国外铁矿依存度较高的局面。随着国内外优质铁矿资源的减少，球团矿原料中 Al_2O_3 质量分数势必持续走高[1]。因此，深入研究铝对球团焙烧和成品球团矿质量的影响机制，对指导钢铁厂采购和合理利用国内外铁矿资源，促进高品质球团矿生产具有重要的意义。

前期研究发现，较高的 Al_2O_3 质量分数通常会导致球团矿抗压强度下降，还原性和还原粉化性能变差；而球团矿的 Al_2O_3 质量分数过高也将进一步导致高炉透气性恶化，熔化温度升高，黏度增大，流动性变差，同时引起脱硫困难，炉料下行困难，引起悬料、崩料的危险[2-3]。王振阳等[4]通过往某磁铁矿造球过程中添加分析纯 Al_2O_3 试剂来研究 Al_2O_3 对球团矿抗压强度的影响，结果表明：随着 Al_2O_3 质量分数的增加，球团矿的抗压强度先升高后降低，其中，当 Al_2O_3 质量分数为 1.5% 时，焙烧球团矿孔隙率最低，而抗压强度最高。SHARMA 等[5-6]分别使用纯氧化铁、B 矿和 N 矿来研究 Al_2O_3 对球团还原膨胀率的影响，认为球团还原膨胀主要是由铁晶须的长大而导致，脉石成分可以抑制铁晶须的长大，使球团的还原膨胀率减少，但与 SiO_2、MgO 和 CaO 相比，Al_2O_3 对还原膨胀的抑制不明显。张作良等[7-8]、李小斌等[9]通过热力学计算和还原焙烧试验对铁硅铝氧化物还原过程规律进行了分析，发现氧化铁还原时产生的 FeO 与 Al_2O_3 反应生成 $FeO\cdot Al_2O_3$ 的能力最强；其次是与 SiO_2 反应，其在与 SiO_2 反应时生成 $2FeO\cdot SiO_2$ 的能力强于生成 $FeO\cdot SiO_2$ 的能力。

虽然此前已有不少关于 Al_2O_3 质量分数对球团矿质量影响的文献报道，但多采用 Al_2O_3 分析纯试剂来调节球团中的铝质量分数。而在天然铁矿石中，铝元素可能以三水铝石、高岭石、一水硬铝石等多种物相形式存在[10-13]。不同赋存形态的氧化铝对铁矿粉球团质量的影响必将与纯 Al_2O_3 试剂存在较大差别。因此，本文以赤铁精矿为研究对象，采用氧化铝、铁铝尖晶石、三水铝石和高岭石为含铝添加剂，系统研究铝的赋存状态及质量分数对赤铁精矿成球性能及球团焙烧行为的影响，并揭示其对氧化球团固结和还原性质的影响机理。这将有利于加深人们对高铝铁精矿对球团制备影响的认识，对高效利用高铝铁矿资源具有重要理论意义及应用价值。

1 原料性能与研究方法

1.1 试验原料

1.1.1 铁精粉和球团黏结剂

本文采用巴西某赤铁精矿作为造球原料，印度某膨润土为黏结剂，其主要化学成分如表 1 所示。由表 1 可知，该赤铁精矿的全铁品位为 66.29%，FeO 质量分数较低，仅为 0.30%，SiO_2、Al_2O_3 质量分数分别为 3.90%、0.30%，其他杂质元素质量分数较低，表明其为一种优质球团原料。为满足造球要求，采用高压辊磨工艺对该赤铁精矿进行预处理，使其比表面积达到 1533 cm^2/g，-0.074 mm 粒级质量分数大于

表 1 赤铁精矿和膨润土的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 1 Main chemical compositions and burning loss of hematite concentrates and bentonite %

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	P	S	烧损
铁精矿	66.29	0.30	3.90	0.11	0.30	0.02	0.021	0.005	0.53
膨润土	11.12	—	47.90	1.59	14.81	—	0.057	—	9.43

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

95.48%。预处理后的赤铁精矿具有良好的成球性，静态成球性指数达到 0.61。所用膨润土的蒙脱石质量分数为 84.73%，吸水率高达 569%，粒度较细，是优质球团用黏结剂。

1.1.2　熔剂

由于赤铁矿球团存在焙烧性能差的问题，同时考虑到含铝添加剂对焙烧球团强度可能存在不利影响，本文通过添加细磨后的石灰石将球团二元碱度适当提高至 0.3，以改善其焙烧性能。细磨石灰石的 CaO 质量分数达 52.97%，有效成分高，杂质质量分数低，－0.074 mm 粒级质量分数达 82.69%，粒度满足造球要求。

1.1.3　含铝添加剂

本文所用含铝添加剂包括：氧化铝（Al_2O_3）、铁铝尖晶石（$FeO·Al_2O_3$）、三水铝石［$Al(OH)_3$］、高岭石（$Al_2O_3·2SiO_2·2H_2O$）4 种。其中，Al_2O_3 和 $Al(OH)_3$ 为分析纯试剂；铁铝尖晶石为工业电熔法制备得到的工业产品。另外，采用了一种水洗脱泥后高岭土来模拟铁矿石中高岭石的赋存状态。

含铝添加剂的化学成分如表 2 所示。由表 2 可知：氧化铝和三水铝石的 Al_2O_3 质量分数较高，分别为 99.25% 和 64.65%；三水铝石的烧损值高达 33.37%；铁铝尖晶石的 Al_2O_3 质量分数为 50.58%，FeO 质量分数为 26.99%，除含有少量 CaO 和 MgO 外，其他杂质较少；高岭石中 Al_2O_3、SiO_2 质量分数分别为 33.49%、46.24%，烧损为 11.15%。

表 2　含铝添加剂的主要化学成分和烧损（质量分数）

Table 2　Main chemical composition and burning loss of Al-containing additives　　%

原料名称	TFe	FeO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	P	S	烧损
氧化铝	—	—	0.17	0.20	99.25	—	—	—	0.38
铁铝尖晶石	31.65	26.99	0.59	0.74	50.58	1.17	0.074	0.014	－2.87
三水铝石	—	—	0.03	0.01	64.65	—	—	—	33.37
高岭石	0.99	—	46.24	0.11	33.49	0.34	0.007	0.038	11.15

对 4 种含铝添加剂均进行细磨预处理，使其粒度尽可能相近，尽可能消除含铝添加剂的粒度组成差异对球团性能的影响。处理后 4 种含铝添加剂均满足造球要求，－0.074 mm 粒级质量分数均在 99% 以上。

1.2　研究方法

试验流程：首先将赤铁精矿通过高压辊磨预处理到相应比表面积；然后将膨润土、细磨石灰石和含铝添加剂按一定配比进行混匀，球团二元碱度固定为 0.3。对混匀矿进行造球，试验在直径为 800 mm、边高为 150 mm、倾斜角为 45°、转速为 25 r/min 的圆盘造球机中进行，每批造球料的干重固定为 5 kg，造球时间为 14 min（其中紧密时间为 2 min）。将所得 8～16 mm 合格生球，分别进行生球水分、落下强度、抗压强度和爆裂温度 4 项性能的检测。对于最佳造球条件下的生球，除部分用于检测外，其余全部通过 105 ℃烘箱干燥后用于管炉预热焙烧试验。

采用两段开放式卧式管炉，模拟链算机—回转窑工艺的预热焙烧试验，试验预热温度为 900～950 ℃，焙烧温度为 1 200～1 300 ℃，预热和焙烧时间均为 15 min，对每组试验得到的焙烧球团进行抗压强度测定。为确保预热球团在回转窑焙烧过程中产生较少粉末及焙烧球团满足大型高炉冶炼的要求，将预热、焙烧球团的抗压强度的标准分别设定为 500、2 500 N/P。

在相应最佳焙烧条件下得到的成品球团，分别按照 GB/T 13241 和 GB/T 13240 进行还原度（*RI*）和还原膨胀性能（*RSI*）的测定；同时，将成品球团制备成光片后置于德国 Leica DM4500P 型光学显微镜下进行矿相分析，进一步揭示铝的赋存状态和质量分数对焙烧球团物相组成、微观结构和固结形式的影响机理。

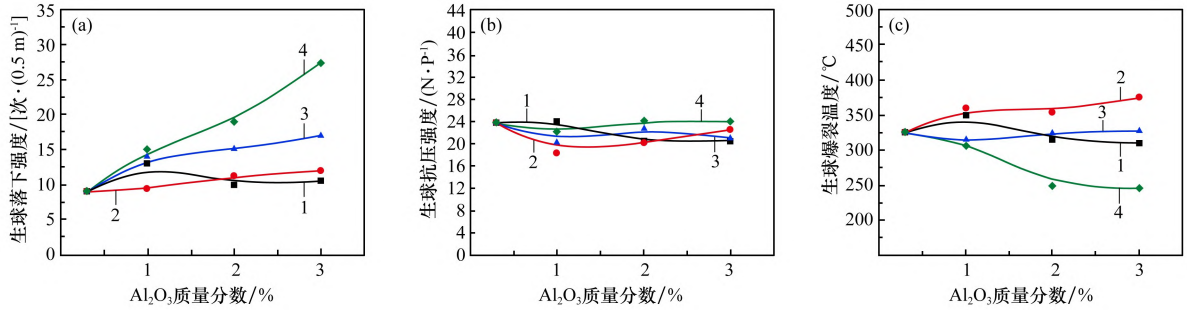
2　结果与讨论

2.1　铝的赋存状态及质量分数对生球性能的影响

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在基准试验确定的最佳膨润土用量和水分条件下，考察不同含铝添加剂(氧化铝、铁铝尖晶石、三水铝石和高岭石)和 Al_2O_3 质量分数对生球落下强度、抗压强度及爆裂温度的影响，结果如图 1 所示。

由图 1(a)可知，当 Al_2O_3 质量分数由 0.5% 增加到 3% 时，配加三水铝石和高岭石均能明显改善生球的落下强度，前者生球的落下强度由 9.4 次/(0.5 m)升高至 17.7 次/(0.5 m)，后者则增加至 27.1 次/(0.5 m)。相比之下，配加氧化铝对生球落下强度的影响不大，而配加铁铝尖晶石时，生球落下强度则仅有轻微提高。由图 1(b)可知，Al_2O_3 质量分数及铝的赋存状态均对生球的抗压强度影响不大，维持在 20 ~ 24 N/P。由图 1(c)可知：添加氧化铝和三水铝石对生球爆裂温度的影响较小，提高铁铝尖晶石用量对改善生球热稳定性有利；添加高岭石对生球稳定性不利，其爆裂温度由 325 ℃大幅降低至 250 ℃以下，这可能是因为其在改善生球落下强度时，生球致密化、孔隙尺寸变小，从而使干燥过程时球内水蒸气压力明显增大，导致球团破裂。



(a) 落下强度；(b) 抗压强度；(c) 爆裂温度

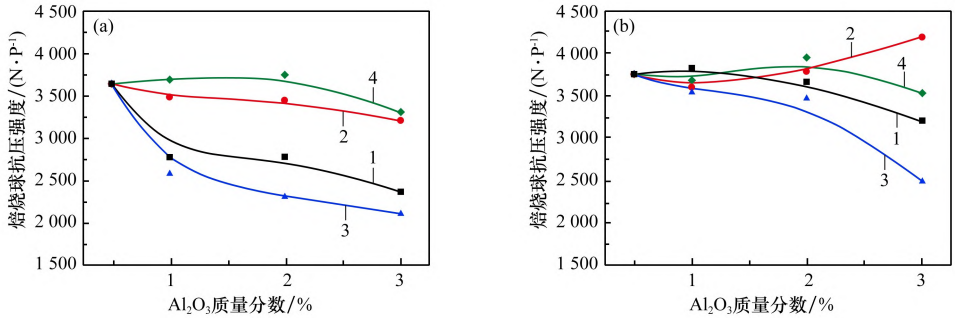
1—氧化铝；2—铁铝尖晶石；3—三水铝石；4—高岭石。

图 1 铝的赋存状态及质量分数对生球质量的影响

Fig. 1 The effect of the occurrence state and content of aluminum on the quality of green ball

2.2 铝的赋存状态及质量分数对球团焙烧行为的影响

在预热温度为 950 ℃，预热、焙烧时间均为 15 min，焙烧温度分别为 1 200、1 250 ℃的条件下，考察铝的赋存状态及质量分数对焙烧球团矿抗压强度的影响，结果如图 2 所示。由图 2 可知，赤铁矿球团在添加不同含铝添加剂及不同焙烧温度时呈现出不同的焙烧性能。在焙烧温度为 1 200 ℃时，含铝添加剂对焙烧球团抗压强度存在不利影响，其不利影响按从小到大的排序：高岭石 < 铁铝尖晶石 < 氧化铝 < 三水铝石。



焙烧温度/℃：(a) 1 200；(b) 1 250

1—氧化铝；2—铁铝尖晶石；3—三水铝石；4—高岭石。

图 2 Al_2O_3 质量分数及铝的赋存状态对焙烧球团抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of Al_2O_3 content and occurrence state of aluminum on the compressive strength of roasted pellets

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

但由图 2(b)可知，当焙烧温度由 1 200 ℃继续提高到 1 250 ℃时，赤铁精矿焙烧球团抗压强度整体得到改善，氧化铝、三水铝石、高岭石 3 种含铝添加剂对焙烧球团抗压强度的影响与 1 200 ℃ 类似。然而，焙烧温度的提高，能明显改善配加铁铝尖晶石焙烧球团的固结，即使当球团 Al_2O_3 质量分数为 3%时，焙烧球团的抗压强度仍升高至 4 193 N/P。分析原因认为：当配加氧化铝时，因 Al_2O_3 的熔点较高，活性较低，阻碍了 Fe_2O_3 的再结晶，球团抗压强度下降较快；而铁铝尖晶石在焙烧温度为 1 200 ℃条件下的反应活性较低，类似于氧化铝阻碍球团中赤铁矿的再结晶固结，但在更高的焙烧温度(1 250 ℃)条件下，Fe_2O_3 再结晶程度加强，加上球团中存在一定量的 CaO，温度升高促使了更多液相的生成，从而促进了球团的固结[13-15]。而随着三水铝石配加量的增加，细微裂纹和孔洞将增加，同时新生成的 Al_2O_3 会抑制 Fe_2O_3 再结晶，使焙烧球团抗压强度显著下降。而添加一定量的高岭石，在较低焙烧温度时能形成一定的渣相强化球团固结，而在更高焙烧温度时，液相量随焙烧时间延长而增加，故球团抗压强度呈现先升高后降低的趋势，但总体影响不大。

2.3　铝的赋存状态对成品球团冶金性能的影响

2.3.1　还原度

针对不同铝添加剂制备的成品球团(Al_2O_3 质量分数为 2%)，研究铝的赋存状态对焙烧球团还原性的影响，并与基准球团(Al_2O_3 质量分数为 0.5%)进行对比，结果如图 3 所示。由图 3 可知：随着 Al_2O_3 质量分数的增加，不论何种铝添加剂，球团还原性均有所变差；但是不同铝的赋存状态所带来的影响程度不同。其中：配加氧化铝和铁铝尖晶石后，由于球团矿抗压强度和孔隙率相差不大，其还原度指数也较为接近；配加三水铝石后，由于三水铝石和石灰石分解同时产生孔洞与裂纹的作用，焙烧球团的孔隙率明显较高，还原速率会相对较快，造成还原度指数较其他含铝添加剂高；配加高岭石后，在高温焙烧过程中更易形成 $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Fe_2O_3\text{-}Al_2O_3$ 液相，使球团固结更致密，球团孔隙率较低，因而其还原性最差[16-17]。

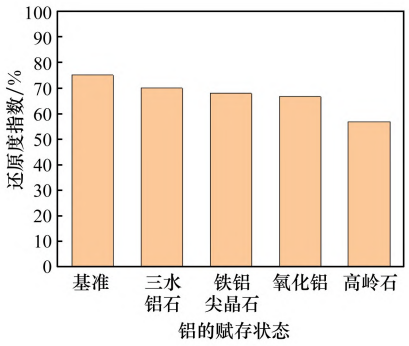


图 3　铝的赋存状态对球团还原度的影响

Fig. 3　The effect of the occurrence state of aluminum on the reduction degree of pellets

2.3.2　还原膨胀性能

铝的赋存状态对成品球团还原膨胀性能的影响如图 4 所示。由图 4 可知，对于赤铁矿球团，配入含铝添加剂后，还原膨胀率总体均呈现下降的趋势。其中：加入铁铝尖晶石和氧化铝后还原膨胀率下降不明显，且二者下降趋势接近；加入三水铝石后，球团的还原膨胀率下降约 2%；相比之下，加入高岭石对球团还原膨胀性能的改善作用最为突出，还原膨胀率由 25%降低至 20%左右。已有研究表明，球团发生还原膨胀的根本原因是氧化铁在还原过程中发生 $Fe_2O_3\text{-}Fe_3O_4\text{-}FeO\text{-}Fe$ 的物相和晶格变化，从而引起体积膨胀；另外也与铁晶须在浮氏体界面快速生长有关。结合球团还原性分析可知，配加铝添加剂后，球团矿的还原性均有所变差。换言之，球团还原速率有所降低，这在一定程

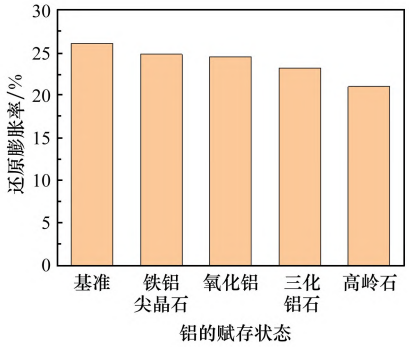


图 4　铝的赋存状态对球团还原膨胀的影响

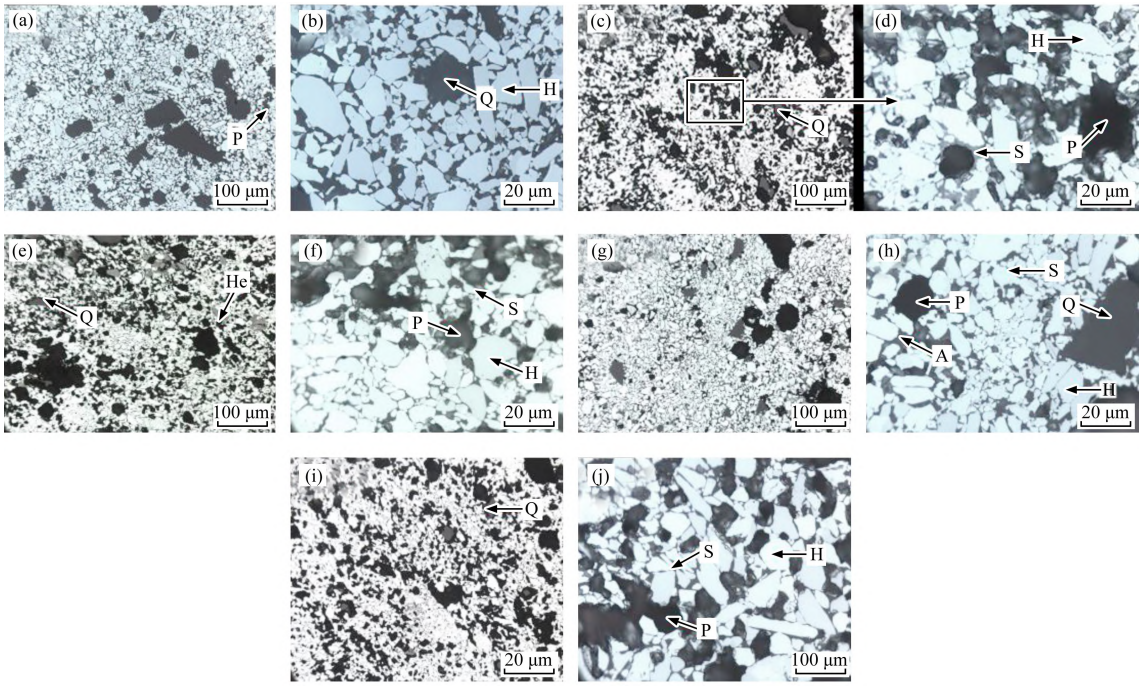
Fig. 4　The effect of the occurrence state of aluminum on the reduction and expansion of pellets

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度上抑制了球团的还原膨胀。

2.4 铝的赋存状态对球团微观结构的影响

对不同铝赋存状态制备的成品球团(Al_2O_3质量分数为2%)和基准球团(Al_2O_3质量分数为0.5%),分析铝的赋存状态对赤铁矿球团矿相结构的影响,结果如图5所示。由图5可知,由于焙烧球团矿中含有一定量的CaO,配加含铝添加剂后,有利于Fe_2O_3-CaO-SiO_2-Al_2O_3系共熔物液相的生成,渣相也明显增多,这些液相使赤铁矿颗粒靠近、拉紧并黏结在一起,促进了球团固结,因而含铝添加剂对焙烧球团抗压强度的不利影响较小。但同时也可以看到,部分氧化铝、三水铝石和铁铝尖晶石颗粒并未参与液相生成而残留于球团中,抑制了赤铁矿的再结晶过程;高岭石则在高温下形成较多液相,促进了颗粒间的拉紧、靠近和再结晶长大,球团内的大孔数量更少,结构趋于致密,固结更好。



(a)、(b) 基准(无添加剂,焙烧温度为1 250 ℃);(c)、(d) 添加氧化铝;(e)、(f) 添加铁铝尖晶石;(g)、(h) 添加三水铝石;(i)、(j) 添加高岭石

A—氧化铝;Q—石英;H—赤铁矿;P—孔洞;He—铁铝尖晶石;S—渣相。

图5 铝的赋存状态对赤铁精矿焙烧球团外部显微结构的影响

Fig. 5 Effect of occurrence state of aluminum on the external microstructure of roasted pellets

3 结 论

(1) 高岭石和三水铝石均能显著改善赤铁矿生球的落下强度,而氧化铝和铁铝尖晶石对生球强度的影响较小。Al_2O_3质量分数及铝的赋存状态对生球的抗压强度影响不大。当添加高岭石使球团Al_2O_3质量分数高于1%时,生球爆裂温度下降;而添加铁铝尖晶石对改善生球爆裂温度的趋势最明显。

(2) 配加氧化铝和三水铝石对焙烧球团强度不利;而在Al_2O_3质量分数小于2%时,配加高岭石能显著改善焙烧球团强度;配加铁铝尖晶石的球团则需较高的焙烧温度(1 250 ℃),以促进焙烧球团固结,提高球团强度。

(3) 随着Al_2O_3质量分数的增加,球团的还原度与还原膨胀性有所变差,但不同铝赋存状态的影响程度不同。其中,配加高岭石的球团还原度指数降低趋势最为明显,其余3种铝赋存状态对还原度指数的影响相对较小。配加高岭石有利于改善球团还原膨胀性能,其次为三水铝石,而配加铁铝尖晶石与氧化铝的作用较小。

(4) 球团强度和冶金性能与球团矿相结构

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

紧密相关。氧化铝、三水铝石和铁铝尖晶石颗粒的反应性较差，与铁氧化物、熔剂之间未发生明显的反应，抑制了赤铁矿的再结晶过程；高岭石在高温下更易形成液相，使颗粒间连接更加紧密，孔隙率下降，球团趋于致密，固结更好，这降低了球团的还原性，但对改善球团的还原膨胀性能有利。

参考文献：

[1] 朱德庆,黄伟群,杨聪聪,等. 铁矿球团技术进展[J]. 烧结球团,2017,42(3):42－49.
ZHU Deqing,HUANG Weiqun,YANG Congcong,et al. Technology progress of iron ore pellets[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(3):42－49.

[2] 张淑会,王宝勇,兰臣臣,等. 球团矿化学成分控制现状及展望[J]. 钢铁,2020,55(8):19－26.
ZHANG Shuhui,WANG Baoyong,LAN Chenchen,et al. Status and prospect of chemical composition control of pellets[J]. Iron and Steel,2020,55(8):19－26.

[3] 潘建,马雯卓,朱德庆,等. Al_2O_3 对铁矿烧结球团及高炉冶炼的影响[J]. 钢铁研究学报,2021,33(10):1095－1108.
PAN Jian, MA Wenzhuo, ZHU Deqing, et al. Influence of Al_2O_3 on iron ore sintering pellets and blast furnace smelting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1095－1108.

[4] 王振阳,邢相栋,张建良,等. 氧化铝对球团矿抗压强度的影响及其机理分析[C]//中国金属学会. 第九届中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2013:382－387.
WANG Zhenyang,XING Xiangdong,ZHANG Jianliang,et al. Influence of alumina on compressive strength of pellets and its mechanism analysis[C]//The Chinese Society for Metals. Proceedings of the 9th China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 382－387.

[5] SHARMA T, GUPTA R C, PRAKASH B. Effect of gangue content on the swelling behaviour of iron ore pellets[J]. Mining Engineering,1990,3(5):509－516.

[6] SHARMA T,GUPTA R C,PRAKASH B. Effect of firing condition and ingredients on the swelling behaviour of iron ore pellets[J]. ISIJ International,1993,33(4):446－453.

[7] 张作良,李强,高攀,等. 高铝铁矿石球团气基还原物相状态研究[J]. 中国冶金,2013,23(10):10－13.
ZHANG Zuoliang,LI Qiang,GAO Pan,et al. Study on phase state of gas-based reduction of high Alumina iron ore pellets[J]. China Metallurgy,2013,23(10):10－13.

[8] 张作良,李强,高攀,等. 高铝铁矿石球团在预还原过程中的热力学行为[J]. 材料与冶金学报,2013,12(1):4－6.
ZHANG Zuoliang,LI Qinag,GAO Pan,et al. Thermodynamic behavior of high Alumina iron ore pellets during prereduction[J]. Journal of Materials and Metallurgy,2013,12(1):4－6.

[9] LI X B. Reaction behavior of kaolinite with ferric oxide during reduction roasting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2019,29(1):186－193.

[10] 舒聪伟,唐云. 铁矿石中铁、铝、硅分离研究进展[J]. 矿冶工程,2012,32(z1):368－374.
SHU Congwei,TANG Yun. Research progress on separation of iron,aluminum and silicon from iron ore[J]. Mining and metallurgical engineering,2012,32(z1):368－374.

[11] CLOUT J M F,MANUEL J R. 2-Mineralogical,chemical,and physical characteristics of iron ore[J]. Iron Ore(Mineralogy,Processing and Environmental Sustainability),2015:45－84.

[12] DAMIEN O'Dea,BEN Ellis. New insights into Alumina types in iron ore and their effect on sintering[C]//10th CSM Steel Congress & 6th Baosteel Bienniel Academic Conference. Shanghai:The Chinese Society for Metals,2015:1936－1942.

[13] ZHU D,XUE Y,PAN J,et al. An investigation into aluminum occurrence impact on SFCA formation and sinter matrix strength[J]. Journal of Materials Research and Technology,2020,9(5):10223－10234.

[14] 易陆杰,蒋林海,李建,等. 优质球团矿产品多元化低成本清洁生产技术开发与应用[J]. 烧结球团,2022,47(1):95－103.
YI Lujie,JIANG Linhai,LI Jian,et al. Development and application of diversified low-cost clean production technology for high-quality pellets[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1):95－103.

[15] 范晓慧,刘昌,陈许玲,等. 提高赤铁精矿配比对制备铁矿氧化球团的影响[J]. 矿冶工程,2012,32(5):94－97.
FAN Xiaohui,LIU Chang,CHEN Xuling,et al. Influence of increasing the proportion of hematite concentrate on the preparation of iron ore oxidized pellets[J]. Mining and metallurgical engineering,2012,32(5):94－97.

[16] 张金良. 熔剂性赤铁矿球团焙烧特性及高炉还原行为研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
ZHANG Jinliang. Study on the roasting characteristics and blast furnace reduction behavior of flux hematite pellets[D]. Changsha:Central South University,2012.

[17] 王喆,张建良,左海滨,等. Al_2O_3 质量分数对高碱度烧结矿软熔滴落性能影响[J]. 钢铁,2015,50(7):20－25;76.
WANG Zhe,ZHANG Jianliang,ZUO Haibin,et al. Effect of Al_2O_3 mass fraction on soft melt dripping properties of high basicity sinter[J]. Iron and Steel,2015,50(7):20－25;76.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net