

稳恒磁场下白云鄂博矿形貌变化及热分解分析^①

蒋锦韬^{1,2,3,4}, 金永丽^{1,2,3,4}

(1.内蒙古科技大学材料与冶金学院,内蒙古包头014010; 2.内蒙古科技大学白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室,内蒙古包头014010; 3.内蒙古科技大学白云鄂博共生矿资源高效综合利用省部共建协同创新中心,内蒙古包头014010; 4.内蒙古科技大学白云鄂博共生矿废弃物资源综合利用国家地方联合工程研究中心,内蒙古包头014010)

摘要:研究了稳恒磁场条件下焙烧对矿物分解的影响,在焙烧温度950℃、磁感应强度1.02 T时,对白云鄂博贫铁矿进行非碳热还原条件下的直接焙烧实验,采用TG-DSC、XRD、SEM-EDS等手段,分析矿物失重率、矿相转变、显微形貌变化,揭示了磁场作用下稀土矿物、脉石矿物、铁矿物的矿相演变规律。结果表明,相较于无磁条件,施加稳恒磁场后,氟碳铈矿分解所需时间缩短近20 min,分解率极低的独居石在焙烧60 min后几乎完全分解;磁场可以促进脉石矿物的分解转变,使无磁条件下无法发生分解的钠辉石发生大量分解,同时加快碱金属离子迁移速度、促进与铁橄榄石中Fe²⁺的置换。

关键词: 稳恒磁场; 白云鄂博贫铁矿; 焙烧; 脉石相; 稀土相

中图分类号: TF046

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.01.020

文章编号: 0253-6099(2023)01-0089-06

Morphology Change and Thermal Decomposition Analysis of Baiyun Obo Ore Under Stable Magnetic Field

JIANG Jintao^{1,2,3,4}, JIN Yongli^{1,2,3,4}

(1. School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Integrated Exploitation of Bayan Obo Multi-Metal Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 3. Provincial and Ministerial Co-founded Collaborative Innovation Center for Comprehensive and Efficient Exploitation of Bayan-Obo Associated Ore Resources, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 4. National & Local Joint Engineering Research Center for Comprehensive Utilization of Discarded Resources of Bayan-Obo Associated Ore, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The influence of roasting on mineral decomposition under stable magnetic field was investigated. A direct reduction roasting experiment without carbon presence was performed for Bayan Obo lean iron, with roasting temperature of 950 °C and magnetic induction density of 1.02 T. Based on the analysis of the loss rate of mineral weight, mineral phase transformation and micro-morphology change by means of TG-DSC, XRD and SEM-EDS, the phase evolution law for rare earth minerals, gangue minerals and iron minerals under magnetic field was revealed. The results show that the decomposition time of bastnaesite is shortened by about 20 min after applying a stable magnetic field, and even the monazite with extremely low decomposition rate is almost completely decomposed after 60 min-roasting process. It is found that magnetic field can promote the decomposition and transformation of gangue minerals that cannot be decomposed without application of magnetism, and also accelerate the migration of alkali metal ions and the replacement of Fe²⁺ with fayalite.

Key words: stable magnetic field; Bayan Obo lean iron ore; roasting; gangue phase; rare earth phase

白云鄂博矿是罕见的多金属共生矿,现已发现 71 种元素、170 多种矿物。其中具有或可能具有综合

① 收稿日期: 2022-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(51464039, 52064044); 内蒙古自然科学基金(2019MS05010)

作者简介: 蒋锦韬(1998—),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要从事白云鄂博矿磁场强化还原的研究。

通信作者: 金永丽(1972—),女,内蒙古包头人,博士,教授,主要从事贫铁矿低温磁场强化还原及资源综合利用的研究。

利用价值的元素 26 种,以铈、稀土等资源储量尤为丰富。半个多世纪以来包钢对白云鄂博矿遵循“以铁为主,综合利用”的开采方针。由于矿物“多、贫、细、杂”的特点,白云鄂博矿综合利用水平还相当低^[1-4]。近年来,引入外场的特殊冶金越来越多地应用于处理这类复杂难选冶矿物^[5-7]。明晰外场作用下矿物的热分解特性对揭示复杂难选冶矿物中有价元素的分离和提取具有重要意义^[8-9]。

磁场作为一种过程强化手段,以其洁净、非接触、强磁取向及能量密度高等特点,近些年已被广泛应用于冶金领域^[10-12]。本课题组在前期研究中发现,磁场能够降低复杂难选冶贫铁矿的还原温度,能在低温下实现矿物的深度除铁,且与铁精矿相比,磁场对矿物深度除铁的强化作用尤为明显^[13-15]。贫铁矿中富含硅酸盐、碳酸盐等脉石矿物,焙烧过程中,这些矿物必然会发生分解、化合等物相转变。磁场下,矿物的热分解行为影响贫铁矿的低温还原效率。基于此,本文以白云鄂博贫铁矿为研究对象,在非碳热还原条件下进行焙烧,从矿物失重率、矿相转变、显微形貌变化等方面研究稳恒磁场对矿物热分解的影响。

1 实验

1.1 实验原料

实验原料为白云鄂博贫铁矿矿粉(粒度为 0.048~0.074 mm),主要化学成分如表 1 所示,矿物组成如表 2 所示。白云鄂博贫铁矿主要由铁矿物、脉石矿物和稀土矿物组成。铁矿物主要包含磁铁矿和赤铁矿;脉石矿物

表 1 白云鄂博贫铁矿主要化学成分(质量分数) %

TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
28.40	14.30	15.50	2.98	13.17	1.99	0.62	1.53
P	S	F	Nb ₂ O ₅	TiO ₂	REO	ThO ₂	BaO
0.57	4.58	8.06	0.11	0.29	4.38	0.071	1.89

表 2 白云鄂博贫铁矿主要矿物组成

矿物	含量/%	单体解离度/%	连生度/%			
			萤石	脉石矿物	铁矿物	稀土矿物
磁铁矿/赤铁矿	35.74	94.58	0.95	2.48	—	0.46
独居石	1.22	92.59	1.28	3.64	—	0.62
氟碳铈矿	3.25	73.56	5.99	12.29	4.99	—
钠辉石	3.25	71.18	7.07	10.88	6.74	—
萤石	11.39	—	—	—	—	—
闪石	12.25	—	—	—	—	—
石英	8.44	—	—	—	—	—
方解石	4.77	—	—	—	—	—
其他	3.16	—	—	—	—	—
	19.78	—	—	—	—	—

主要为钠辉石、闪石、方解石和萤石;稀土矿物由氟碳铈矿和少量独居石组成。

1.2 实验方法

实验主要设备为磁场反应炉,可提供磁感应强度 $B=1.02\text{ T}$ 的稳恒磁场,热处理温度可达 $1\ 050\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$,炉体部分如图 1 所示,磁场反应炉由可移动磁体、加热控温装置(PID)、水冷系统和供气系统构成。通过移动磁体,可以实现磁场条件和常规条件的直接焙烧。

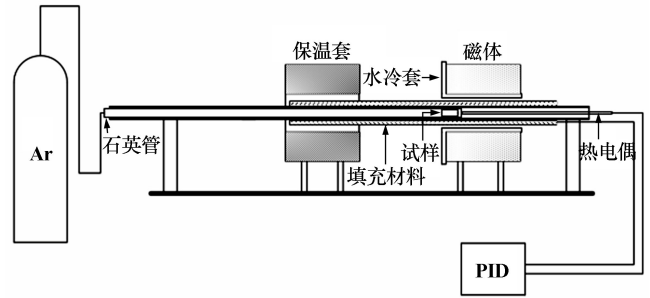


图 1 磁场反应炉示意

实验时,将磁场反应炉由室温升至 $950\text{ }^\circ\text{C}$,温度恒定后,将试样放入磁场反应炉内,在氩气气氛中进行不同时间(20 min、40 min、60 min、80 min)的焙烧试验。焙烧结束后,持续通气至试样冷却,并记录试样质量变化。

采用同步热分析仪(NETZSCH STA449 F3)进行 TG 和 DSC 分析;采用 X 射线衍射仪(Smartlab-9kw)分析焙烧后矿物的矿相组成;采用扫描电子显微镜(ZEISS SUPRA55)配加能谱分析(Quantax 400)观察矿物显微形貌。

2 结果与分析

2.1 差热分析

在氩气气氛中以升温速率 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 对白云鄂博贫铁矿进行 DSC-TG 分析,研究贫铁矿的分解过程,结果如图 2 所示。

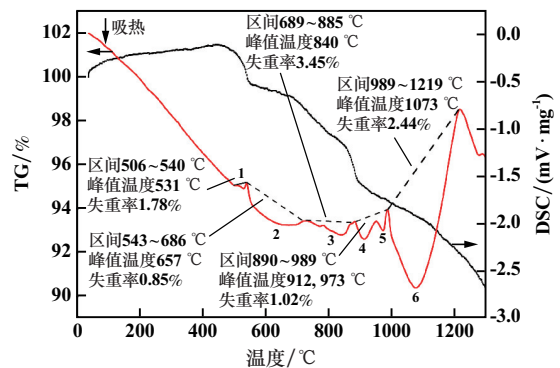


图 2 白云鄂博贫铁矿的 DSC-TG 曲线

由图 2 可知, TG 曲线呈现持续失重,白云鄂博贫

铁矿在峰值温度 531 °C、657 °C、840 °C、912 °C、973 °C 和 1073 °C 出现吸热峰。在 506~541 °C 温度段, TG 曲线下落明显, 失重率为 1.78%。在氩气气氛下氟碳铈矿热力学分解温度为 474~580 °C^[16], 因此认为该吸热峰由氟碳铈矿分解所致。536~686 °C 范围内, TG 曲线平缓, 矿物并没有明显的失重变化, 该处吸热峰为白云鄂博贫铁矿中 SiO₂ 晶型转变所致^[17]。在 689~885 °C 温度段, TG 曲线所对应的失重率达 3.45%, 说明在该温度段有大量气态产物生成。方解石开始分解的热力学温度约为 851 °C, 认为该吸热峰由方解石分解所致。钠辉石分解的热力学温度为 970 °C^[18] 并伴随有 NaF 气体溢出, 对应 TG 曲线在 890~989 °C 范围内所呈现的失重变化。989~1 219 °C 范围内出现一个明显的吸热峰, 这是钠辉石、CaF₂ 和 CaO 反应生成枪晶石 (Ca₄Si₂O₇F₂) 的过程。温度高于 1 120 °C 后, 枪晶石不再稳定, 分解产生 SiF₄ 气体, TG 曲线持续下降。

在无磁或有磁条件下于 950 °C 焙烧, 白云鄂博贫铁矿失重率随焙烧时间的变化如图 3 所示。无磁条件下, 焙烧 60 min 时, 贫铁矿失重率为 5.03%, 延长焙烧时间, 失重率变化不明显。施加稳恒磁场后, 贫铁矿焙烧 20 min 时, 失重率已经达到 6.15%; 焙烧时间 60 min 时, 失重率可达无磁条件下失重率的 1.4 倍。

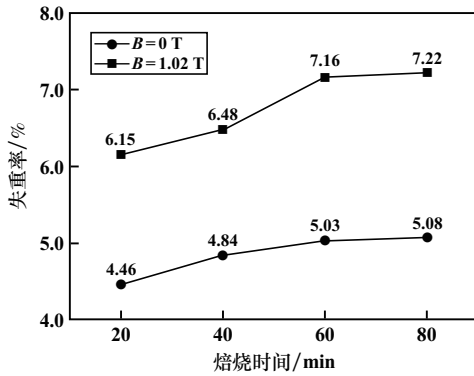


图 3 不同焙烧时间下矿物的失重变化

2.2 稳恒磁场对脉石矿物的影响

白云鄂博贫铁矿中脉石矿物通常可分为硅酸盐以及碳酸盐。硅酸盐矿物主要由钠辉石 (NaFeSi₂O₆) 和铁橄榄石 (Fe₂SiO₄) 构成, 其中钠辉石在矿物中占比为 11.39%、铁橄榄石为 20.26%。最典型的碳酸盐矿物即方解石 (CaCO₃), 但由于方解石在矿物中占比仅 3.16%, 且在焙烧过程中, 并未发现磁场对于方解石分解有明显的促进作用, 故不作具体讨论。

2.2.1 稳恒磁场对钠辉石的影响

于 950 °C 焙烧不同时间后, 白云鄂博贫铁矿的 X 射线衍射图谱如图 4、图 5 所示。

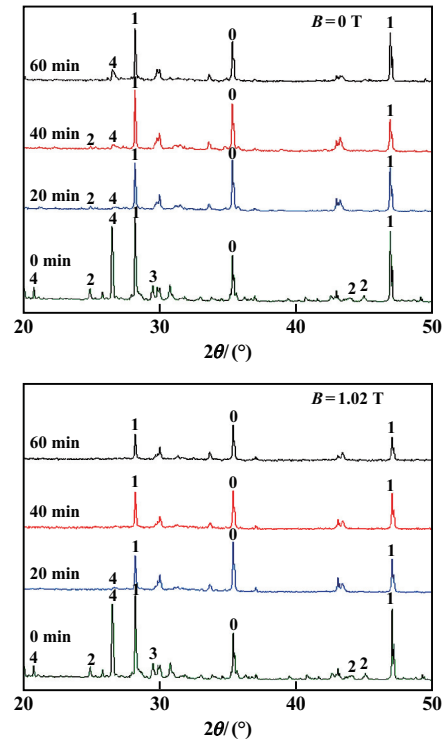


图 4 950 °C、不同焙烧时间下矿物的 XRD 图谱
0—Fe₃O₄; 1—CaF₂; 2—RECO₃F; 3—Fe₂O₃; 4—SiO₂

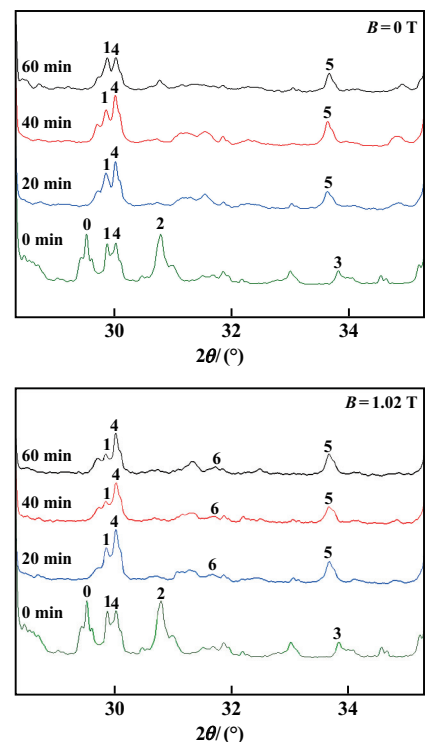
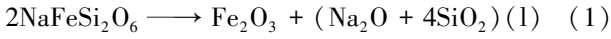


图 5 不同焙烧时间下矿物 28.3°~35.3° 的 XRD 图谱

0—CaCO₃; 1—NaFeSi₂O₆; 2—CaMg(CO₃)₂; 3—FeS₂;
4—Fe_{1-x}S; 5—CaFe₂O₄; 6—Ca₂Fe₂O₅

CaF₂ 的衍射特征峰出现在 28.25° 和 46.95° 位置,

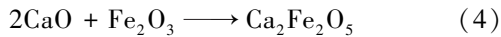
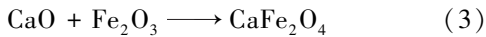
NaFeSi₂O₆ 的衍射特征峰出现在 29.87°位置。由图 4~5 可知,无磁条件下焙烧时,NaFeSi₂O₆ 的衍射峰强度基本不变,说明 950 °C 并未达到 NaFeSi₂O₆ 的分解温度。相较于无磁条件,施加稳恒磁场后,CaF₂ 和 NaFeSi₂O₆ 的衍射峰强度明显减弱。文献[19]指出,在 970 °C 时,钠辉石会分解生成 Na₂O,并进一步与 CaF₂ 反应生成 NaF:



$$\Delta G^0 = -151.86 + 0.01T \quad (\text{kJ/mol}) \quad (2)$$

CaF₂ 的存在,使体系更易出现液相,磁场在固、液界面处产生热电磁流体效应,提高了熔体内溶质原子的传输能力,进而促进了 NaFeSi₂O₆ 的分解。由于体系中 NaF 的分压接近 0,NaFeSi₂O₆ 分解生成的 NaF 很容易挥发,造成体系失重。

由图 5 可知,无论是否施加磁场,均出现 CaFe₂O₄ 的衍射峰。CaFe₂O₄ 和 Ca₂Fe₂O₅ 分别为 Fe₂O₃ 在低碱度和高碱度氛围下与 CaO 结合所生成的产物,其反应方程式如下:



式(3)和(4)的标准吉布斯自由能 ΔG⁰ 与温度的关系见图 6。950 °C 时,上述反应均可发生,但由于体系碱度仅 0.49,生成 CaFe₂O₄ 而非 Ca₂Fe₂O₅。

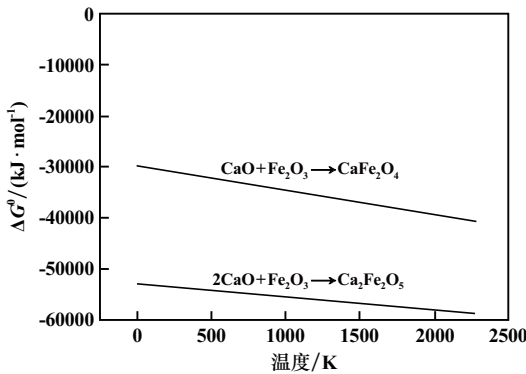


图 6 反应式(3)~(4)的 ΔG⁰ 与温度的关系

由图 5 可知,施加稳恒磁场后,出现了 Ca₂Fe₂O₅ 的衍射峰,并随着焙烧时间延长,衍射峰强度逐渐增强。这是由于钠辉石的分解使体系中出现新的 Fe₂O₃,同时方解石及其他含 Ca²⁺ 矿物分解使体系中碱度增加,进而有 Ca₂Fe₂O₅ 生成。

综合无磁条件与有磁条件下失重率的差距,CaF₂、NaFeSi₂O₆ 衍射峰强度的明显减弱以及 Ca₂Fe₂O₅ 衍射峰的出现,可知施加稳恒磁场可以使无磁条件下无法发生分解的 NaFeSi₂O₆ 发生大量分解。

2.2.2 稳恒磁场对铁橄榄石的影响

表 3 为不同焙烧条件下铁橄榄石的显微形貌,各点的 EDS 能谱分析结果如表 4 所示。无论是否施加磁场,Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺ 等碱金属离子在铁橄榄石中的占比均会随焙烧时间延长而增加,这是由于碱金属离子能够削弱 SiO₄²⁻ 和 Fe²⁺ 之间的键能,且与 SiO₄²⁻ 的结合能力更强,Fe²⁺ 逐渐被碱金属离子置换,形成 FeO 和 (Ca,Na,Mg)FeSiO₄。表 4 中碱金属离子与 Fe 物质的量比如图 7 所示。施加稳恒磁场后,碱金属离子在外

表 3 不同焙烧时间下铁橄榄石显微形貌

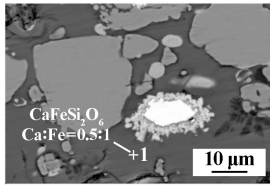
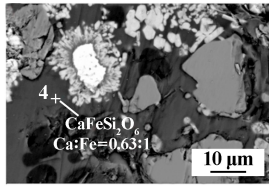
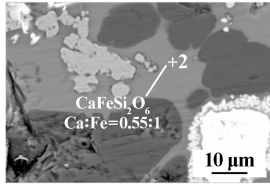
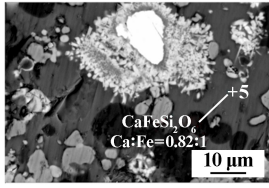
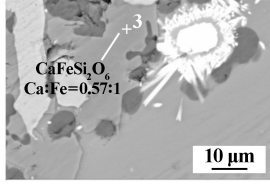
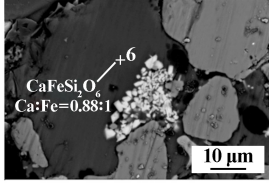
时间/ min	铁橄榄石显微形貌	
	B=0 T	B=1.02 T
20		
40		
60		

表 4 表 3 中各点能谱分析结果

磁场条件	点	Ca	Na	Mg	Fe	Si	O
B=0 T	1	5.3	2.3	1.1	14.8	10.9	27.2
	2	4.3	1.9	0.7	10.9	7.1	30.2
	3	6.2	3.2	0.8	15.3	11.0	28.2
B=1.02 T	4	7.0	3.7	1.5	15.7	14.6	30.7
	5	8.1	4.2	1.7	13.8	14.0	31.3
	6	8.2	4.2	1.9	13.1	14.6	29.4

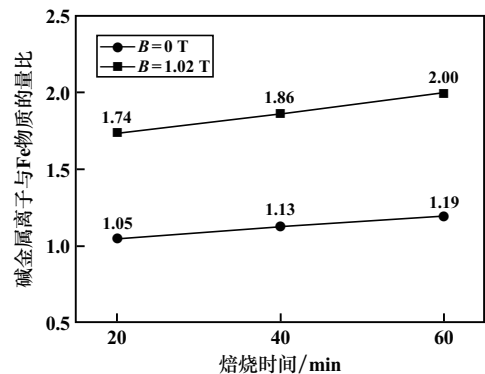


图 7 铁橄榄石中碱金属离子与 Fe 物质的量比

磁场作用下显示出磁性,磁极间的相互作用力强化了Ca²⁺等碱金属离子的迁移与分布,使碱金属离子在铁橄榄石中的占比可达无磁条件下的1.7倍。

2.3 稳恒磁场对稀土矿物的影响

2.3.1 稳恒磁场对独居石的影响

白云鄂博贫铁矿中稀土相主要由独居石和氟碳铈矿组成。独居石是白云鄂博矿石中独有以及分布最广的稀土矿物。纯独居石的化学性质十分稳定,在空气中2000℃也无法发生分解。不同焙烧条件下独居石的显微形貌如表5所示。其中点1处的白色块状物为独居石,在其周围包裹的一圈深灰色物质(点3)是Ca₃(PO₄)₂。灰白色发散状物质(点2)为CaO·SiO₂·RE₂O₃。无磁条件下,随着焙烧时间延长,独居石分解缓慢。但施加稳恒磁场后,独居石的分解速度明显加快,并且在焙烧时间60 min时几乎完全分解。这种由外至内的分解方式与文献[20]一致。由表2可知,白云鄂博贫铁矿中独居石单体解离度低,连生关系复杂,与萤石、脉石矿物的连生度分别为5.99%和12.29%。这样的矿物特性使得独居石极易与脉石矿物以及CaF₂发生反应。文献[21]指出,在CaO-CaF₂体系中,750℃时独居石的分解率为10%,当该体系中存在Na⁺时,分解率可达79%。其反应式如下:

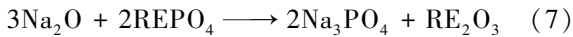
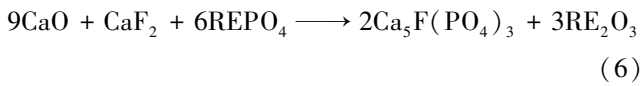


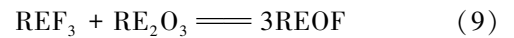
表5 不同焙烧时间下独居石显微形貌

时间/ min	独居石显微形貌	
	B=0 T	B=1.02 T
20		
40		
60		

白云鄂博贫铁矿中NaFeSi₂O₆在磁场作用下发生大量分解,使体系中存在足量的Na⁺,同时磁场加快了碱金属离子的扩散迁移,进而促进了独居石的分解。

2.3.2 稳恒磁场对氟碳铈矿的影响

由图4可知,RECO₃F衍射特征峰出现在24.92°位置。RECO₃F在无磁条件下的分解十分缓慢,焙烧40 min时,RECO₃F衍射峰仍然存在,延长焙烧时间至60 min,RECO₃F衍射峰消失。同时,随着RECO₃F衍射峰消失,CaF₂衍射峰开始增强。这是由于焙烧40 min后,RECO₃F分解完全,其分解产物REOF会与CaO发生反应生成CaF₂。分解反应式如下^[16]:



相较于无磁条件,施加稳恒磁场后,RECO₃F衍射峰在焙烧20 min时就已经消失,说明磁场促进了RECO₃F的分解。

3 结 论

1) 在非碳热还原条件下,相同焙烧时间时,施加稳恒磁场时矿物的失重率可达无磁条件的1.4倍。

2) 稳恒磁场能促进钠辉石的分解转变,使无磁条件下无法发生分解的钠辉石发生大量分解;稳恒磁场还能加快Ca²⁺等碱金属离子迁移速度,促进与含铁硅酸盐中Fe²⁺的置换。

3) 稳恒磁场可以促进稀土矿物的分解,与无磁条件相比,分解率极低的独居石在950℃焙烧60 min后几乎完全分解,氟碳铈矿分解所需时间缩短20 min。

参考文献:

- [1] 王凯怡,张继恩,方爱民,等. 白云鄂博矿床成因——矿体内霓长岩化成矿作用与赋矿白云岩的联系[J]. 岩石学报, 2018,34(3): 785-798.
- [2] 马升峰,孟志军,王振江,等. 白云鄂博高品位混合稀土精矿特性分析[J]. 中国冶金, 2021,31(6): 7-13.
- [3] 李春龙,李小刚,徐广尧. 白云鄂博伴生矿资源综合利用技术开发与产业化[J]. 稀土, 2015,36(5): 151-158.
- [4] 杨占峰,朱智慧,王振江,等. 白云鄂博主矿霓石型稀土铁矿石中稀土元素在独立矿物中的富集状况研究[J]. 中国稀土学报, 2019,37(6): 769-776.
- [5] 代青青,林顺达,杜金佳,等. 外场强化技术在锰矿资源处理过程中的研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2021,33(11): 1109-1117.
- [6] 何文浩,陈雯,王鑫,等. 鲕状赤铁矿微波碳热还原-磁选提铁脱磷实验研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(5): 92-94.
- [7] ZHU X J, LIU C H, WANG Y L, et al. Reduction mechanism and optimization of prepare metallic antimony through direct microwave

- carbothermal reduction of antimony oxide concentrate[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022,18:882-895.
- [8] 王苗,杨双平,庞锦琨,等.微波活化预焙烧对辉钼矿焙砂脱硫影响研究[J]. *矿冶工程*, 2018,38(5):115-118.
- [9] 陈雯,雷鹰,何文浩,等.鲕状赤铁矿微波加热还原提铁脱磷机制[J]. *钢铁研究学报*, 2020,32(1):9-19.
- [10] YANG S P, LIU H J, SUN H X, et al. Study on Influencing Factors of High-Temperature Basic Characteristics of Iron Ore Powder and Optimization of Ore Blending[J]. *Materials*, 2022,15(9):3329.
- [11] LI K Q, CHEN J, PENG J H, et al. Efficient improvement for dissociation behavior and thermal decomposition of manganese ore by microwave calcination[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,260:121074.
- [12] Amankwah R K, Pickles C A. Microwave roasting of a carbonaceous sulphidic gold concentrate[J]. *Minerals Engineering*, 2009,22(13):1095-1101.
- [13] 王强,董蒙,孙金妹,等.强磁场下合金凝固过程控制及功能材料制备[J]. *金属学报*, 2018,54(5):742-756.
- [14] 金永丽,韩福铁,于海,等.磁场对含SiO₂和CaO的铁氧化物还原的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2018,39(6):103-109.
- [15] 金永丽,于海,张捷宇,等.磁场对含CaO铁氧化物还原的影响[J]. *金属学报*, 2019,55(3):410-416.
- [16] 张旭东,金永丽.白云鄂博矿磁场强化还原的矿相演变规律[J]. *钢铁钒钛*, 2021,42(2):139-145.
- [17] 杨英,孙树臣,涂赣峰,等.我国氟碳铈矿焙烧分解过程与机理研究进展[J]. *稀土*, 2014,35(4):98-102.
- [18] 朱文振.碳化硅粉体低温合成工艺以及二氧化硅为主的烧结相晶型转变的研究[D].合肥:合肥工业大学材料科学与工程学院,2012.
- [19] 张芳.白云鄂博铁精矿焙烧过程氟化物逸出机理研究[D].北京:北京科技大学冶金与生态学院,2015.
- [20] ZHENG Qiang, WU Wen-yuan, BIAN Xue. Investigations on mineralogical characteristics of rare earth minerals in Bayan Obo tailings during the roasting process[J]. *Journal of Rare Earths*, 2017,35(3):300-308.
- [21] 孙树臣,吴志颖,边雪,等. NaCl-CaCl₂对氧化钙分解独居石的影响[J]. *稀土*, 2007(5):6-9.
- 引用本文: 蒋锦韬,金永丽.稳恒磁场下白云鄂博矿形貌变化及热分解分析[J]. *矿冶工程*, 2023,43(1):89-94.

(上接第88页)

- [10] 何辉.锰矿资源现状与锰矿勘察研究[J]. *中国锰业*, 2017,35(1):23-24.
- [11] 邓文兵,张彦文,孔令湖,等.中国锰矿资源现状与国家级锰矿床实物地质资料筛选[J]. *中国矿业*, 2019,28(9):175-182.
- [12] Amiri A, Ingram G D, Maynard N E, et al. An Unreacted Shrinking Core Model for Calcination and Similar Solid-to-Gas Reactions[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2015,202(9):1161-1175.
- [13] Homma S, Ogata S, Koga J, et al. Gas-solid reaction model for a shrinking spherical particle with unreacted shrinking core[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005,60(18):4971-4980.
- [14] 赵强.菱铁矿流态化磁化焙烧强化过程基础研究[D].北京:北京科技大学冶金与生态工程学院,2019.
- [15] 潘峰.山西广灵难选赤铁矿制易选磁铁矿的氢还原行为及动力学[D].太原:太原理工大学化学化工学院,2013.
- [16] FENG Y, CAI Z, LI H, et al. Fluidized roasting reduction kinetics of low-grade pyrolusite coupling with pretreatment of stone coal[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2013,20(3):221-227.
- [17] Muriana R A, Muzenda E, Abubakre O K. Carbothermic Reduction Kinetics of Ka'oje (Nigeria) Manganese Ore[J]. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2014,2(5):392-403.
- 引用本文: 张汉泉,杨帆,许鑫,等.高铁氧化锰矿还原过程中铁锰氧化物同步还原动力学研究[J]. *矿冶工程*, 2023,43(1):84-88.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2023年2月