

硼铁矿工艺矿物学研究

李治杭¹, 韩跃新¹, 高鹏¹, 应平²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 北京矿冶研究总院, 北京 100044)

摘 要: 通过光学显微镜、化学分析、X射线衍射、扫描电镜等分析手段,对硼铁矿石的化学组成、矿物组成、元素赋存状态、各矿物间的嵌布关系及粒度分布进行了详细研究。结果显示:硼铁矿石矿物组成复杂,种类繁多,主要含硼矿物为硼镁石和硼铁矿,其中硼镁石含硼量占硼总量的89.01%,主要含铁矿物为磁铁矿,85.60%的铁赋存于磁铁矿中,蛇纹石是主要脉石矿物;硼镁石、磁铁矿、硼铁矿和蛇纹石嵌布关系复杂,嵌布粒度粗细不均,硼镁石、磁铁矿、蛇纹石嵌布粒度相对较粗,硼铁矿嵌布粒度相对较细。

关 键 词: 硼铁矿;矿物学;矿物组成;嵌布特征;粒度分布

中图分类号: TD 912

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)02-0258-05

Research on Processing Mineralogical Characterization of the Paigeite Ore

LI Zhi-hang¹, HAN Yue-xin¹, GAO Peng¹, YING Ping²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China. Corresponding author: HAN Yue-xin, E-mail: dongdafulong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The chemical composition, phase composition, occurrence state of element, dissemination relationship and size distribution of the paigeite ore were analyzed by optical microscope, chemical analysis, XRD and SEM analysis. The results show that mineral composition of the paigeite ore is very complex. Main boron minerals are szaibelyite and paigeite, boron content in szaibelyite accounting for 89.01% of total boron content. Main iron mineral is magnetite, iron content in magnetite being 85.60% of the total iron content. Serpentine is the main gangue mineral. The dissemination relationship among szaibelyite, magnetite and serpentine is complex, and dissemination particle size distribution of different minerals is uneven. Dissemination particle sizes of szaibelyite, magnetite and serpentine are coarser, while that of paigeite is fine.

Key words: paigeite; mineralogy; mineral composition; dissemination characteristic; particle size distribution

辽宁翁泉沟硼铁矿是我国特大沉积变质型铁矿床,也是亚洲第一大硼铁矿床。目前已探明储量2.8亿t,其中B₂O₃储量为2184万t,占全国储量的58%左右,铁储量将近1亿t^[1-2]。该矿石含硼、镁、铁等多种有价元素,具有很高的利用价值^[3-5],但由于该矿石中有用矿物结晶粒度细,矿物嵌布关系复杂,所以选矿难度很大^[6-8],属于我国难选铁矿之一。随着国民经济的飞速发展,易选

硼矿资源不断减少,我国硼工业供求矛盾日益突出,因此加强对难选硼铁矿资源的开发利用意义重大。

详尽的工艺矿物学研究对于矿石的高效开发利用具有重要的指导意义,本文通过光学显微镜、X射线衍射、扫描电镜和EDS能谱等分析检测手段对硼铁矿石进行了详细的工艺矿物学研究,包括矿石的化学成分、元素赋存状态、矿物组成、有

收稿日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204033); 辽宁省教育厅一般项目(L2014088)。

作者简介: 李治杭(1990-),男,陕西安康人,东北大学博士研究生; 韩跃新(1961-),男,内蒙古赤峰人,东北大学教授,博士生导师。

用矿物的嵌布关系以及粒度分布等^[9-10]. 研究所用矿样由辽宁首钢硼铁公司提供, 代表性良好.

1 矿石的化学组成及元素赋存状态

硼铁矿石的化学成分(质量分数,%)为: B₂O₃ 6.15, Fe 26.26, SiO₂ 22.98, MgO 22.05, Al₂O₃ 2.83, CaO 1.33, S 0.77, C 0.33, Na₂O 0.81, K₂O 0.59. 硅和镁含量较高, 表明矿石中含有一定量石英和含硅酸盐矿物; 有害元素硫的

质量分数为 0.77%.

为确定矿石中硼、铁元素赋存状态, 对铁进行了物相分析, 由于硼没有现成的物相分析方法, 硼元素的分配比是结合化学分析、矿物含量分析和化学物相分析数据计算得出的. 分析结果分别见表 1 和表 2. 由表 1 知, 矿石中铁主要以磁铁矿形式存在, 其比例占全铁的 85.6%, 其余则分布于硅酸盐矿物、磁铁矿及磁黄铁矿等矿物中. 表 2 表明矿石中含硼矿物主要为硼镁石和硼铁矿, 硼主要赋存于硼镁石中, 所占比例为 89.01%.

表 1 原矿中铁的化学物相分析
Table 1 Chemical phase analysis of iron for the raw ore %

指标	磁铁矿	磁黄铁矿	黄铁矿	赤、褐铁矿	硅酸盐	TFe
质量分数	23.00	0.33	0.31	0.26	2.97	26.87
分布率	85.60	1.23	1.15	0.97	11.05	100.00

表 2 原矿中硼元素分布
Table 2 Distribution of boron for the raw ore %

指标	硼镁石	硼铁矿	累计
质量分数	1.70	0.21	1.91
分布率	89.01	10.99	100.00

2 矿石的矿物组成

利用扫描电镜、EDS 能谱、光学显微镜和 XRD 对矿石进行了物相分析, 矿石 XRD 分析结

果如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 该矿石矿物组成复杂, 种类繁多, 主要由磁铁矿、硼镁石、硼铁矿、蛇纹石、金云母、长石(钾长石、钠长石、斜长石)、辉石(透辉石、次透辉石等)、角闪石(透闪石、阳起石等)等组成, 另有少量或微量赤铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿、镁橄榄石、石英、白云石、绿泥石、电气石、石榴子石、磷灰石等. 矿石的矿物组成(质量分数,%)为: 硼镁石 13.22, 磁铁矿 31.41, 蛇纹石 25.14, 硼镁铁矿 4.61, 雌黄铁矿 1.28, 云母 7.04, 长石 7.03, 闪石 2.67, 辉石 1.64, 绿泥石 0.55.

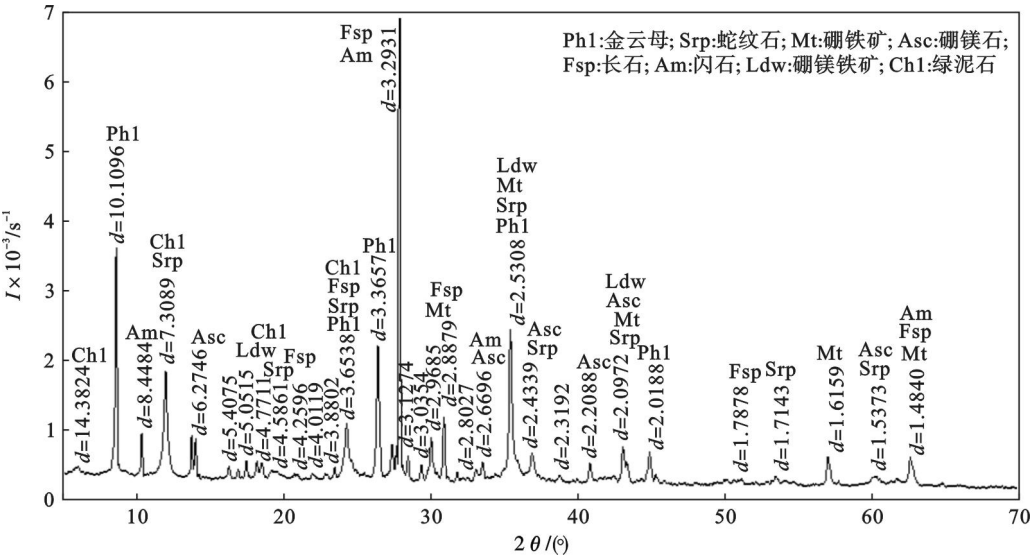


图 1 原矿 XRD 图谱
Fig. 1 XRD pattern of the raw ore

3 矿石中矿物嵌布特征

1) 硼镁石. 硼镁石是矿石中的主要含硼矿

物, 属于硼酸盐矿物. 能谱分析表明, 硼镁石主要由 B, Mg, O 组成, 含少量 Fe, 微量 Mn. 其中, B 的质量分数为 12.93%, Mg 的质量分数为 28.27%, Fe 的质量分数为 1.96%. 矿石中硼镁石

以粗粒胶结、细粒和脉状结构产出. 粗粒硼镁石中常见细粒的磁铁矿、磁黄铁矿、黄铁矿和蛇纹石包体, 这部分硼镁石粒度为 $74 \sim 589 \mu\text{m}$, 约占总量的 53.87%, 易与其他矿物有效分离; 细粒硼镁石

常和磁铁矿、硼铁矿形成矿物集合体嵌布于脉石中, 该部分硼镁石粒度大都在 $50 \mu\text{m}$ 以下; 在脉石中可见几十微米和几百微米的脉状硼镁石. 硼镁石嵌布关系见图 2.

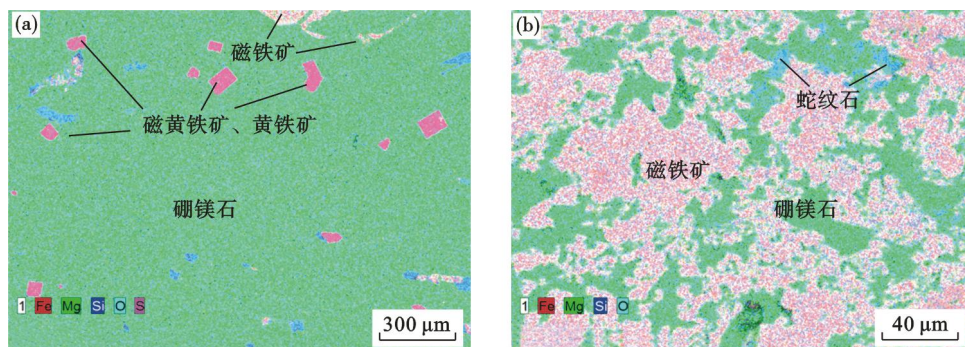


图 2 硼镁石与其他矿物嵌布关系图像

Fig. 2 Dissemination relationship between szaibelyite and other minerals

(a)—粗粒硼镁石; (b)—细粒硼镁石.

2) 硼铁矿. 矿石中另一种主要含硼矿物, 也属于硼酸盐矿物. 能谱分析表明, 矿物主要由 Fe, Mg, B, O 组成. 其中 B 的平均质量分数约 4.81%, Mg 的质量分数约 9.96%, Fe 的质量分数约 49.54%. 硼铁矿以粒状、叶片状、树枝状、脉状嵌布, 也见揉皱结构的硼铁矿. 硼铁矿与磁铁

矿、硼镁石关系密切. 如图 3 所示, 在硼铁矿裂隙间常见细粒状磁铁矿, 也常见细粒磁铁矿包裹于硼铁矿中, 或形成矿物集合体, 使得硼铁元素难以有效分离; 粗粒、脉状硼铁矿常与蛇纹石等矿物共生, 其间可见细粒和脉状结构硼镁石; 硼铁矿嵌布粒度较细, 其粒度分布主要集中在 $20 \sim 74 \mu\text{m}$.

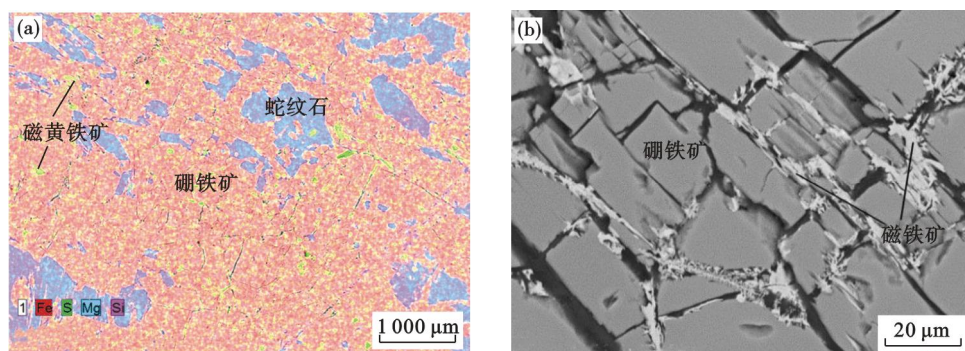


图 3 硼铁矿与其他矿物嵌布关系图像

Fig. 3 Dissemination relationship between paigeite and other minerals

(a)—粗粒硼铁矿; (b)—细粒硼铁矿.

3) 磁铁矿. 磁铁矿是矿石中主要含铁矿物, Fe 的平均质量分数为 71.64%, 镁的质量分数为 0.45%, 另含少量 Al, Si, Mn 等元素. 磁铁矿主要以自形、半自形、它形粒状、细粒状和脉状结构嵌布. 磁铁矿与硼铁矿、硼镁石连生关系密切, 矿石中常见由细粒磁铁矿与硼铁矿、硼镁石组成的集合体颗粒(图 4a), 粗粒磁铁矿间隙中嵌布有脉状硼镁石和细粒状硼铁矿(图 4b), 在蛇纹石和其他脉石矿物中也有细粒状及脉状磁铁矿. 磁铁矿嵌布粒度相对较粗, $74 \mu\text{m}$ 以上占 54.77%, $10 \mu\text{m}$ 以下占 5.6%.

4) 蛇纹石. 矿石中主要的脉石, 属于镁硅酸盐矿物, 质量分数约为 25.14%. 粒度相对较粗, $74 \mu\text{m}$ 以上占 55.57%, 粗粒蛇纹石以致密块状产出, 细粒多与磁铁矿、硼铁矿、硼镁石组成矿物集合体, 也见少量蛇纹石以脉状形态沿边缘交代橄榄石. 由于蛇纹石硬度较低, 易碎、易泥化, 微细粒蛇纹石通过静电作用吸附于硼镁石表面, 从而降低浮选回收率, 部分蛇纹石进入硼精矿中会降低精矿品位. 所以磨矿过程应尽量避免过磨. 蛇纹石与其他矿物嵌布关系如图 5 所示.

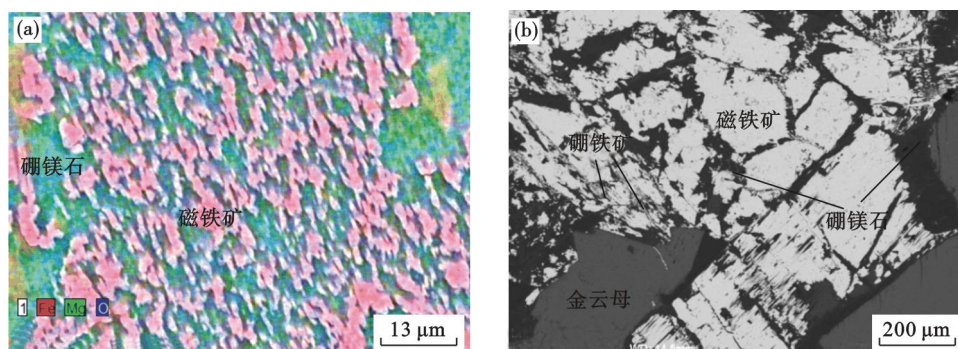


图4 磁铁矿与其他矿物嵌布关系图像

Fig. 4 Dissemination relationship between magnetite and other minerals

(a)—细粒磁铁矿; (b)—粗粒磁铁矿.

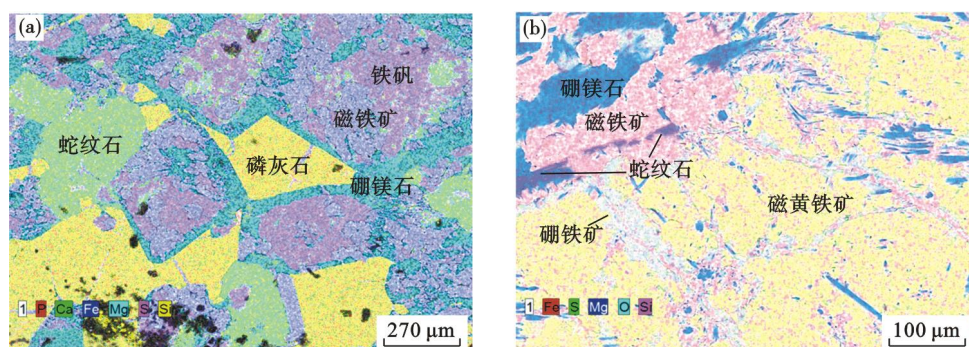


图5 蛇纹石与其他矿物嵌布关系图像

Fig. 5 Dissemination relationship between serpentine and other minerals

(a)—块状蛇纹石; (b)—细粒蛇纹石.

5) 其他矿物. 矿石中含有少量赤、褐铁矿, 其粒度较细, 常与磁铁矿连生, 在磁铁矿内部可见细粒赤铁矿包体. 脉石中也常见粒状赤铁矿. 矿石中也见少量磁黄铁矿和黄铁矿, 是矿石中主要的硫化物矿物, 磁黄铁矿含量较黄铁矿多.

矿石中还含有微量或少量电气石、磷灰石和铁矾. 电气石是矿石中的含硼矿物, 但是由于矿物量很少, 所以对硼回收影响不大. 磷灰石是矿石的含磷矿物, 对生产精矿不利; 磷灰石呈细粒状嵌布, 与其他矿物连生边界不复杂, 磨矿可使磷灰石与大部分目标矿物分离. 铁矾是一种铁镁硫酸盐, 粒度不大, 与磁铁矿和硼铁矿嵌布关系复杂, 磨矿难以使其与磁铁矿完全分离.

4 结 论

1) 该矿石组成复杂, 矿物种类繁多, 磁铁矿、硼镁石是矿石中主要的有用矿物, 蛇纹石是主要的脉石矿物. 硼主要赋存于硼镁石中, 少量存在于硼铁矿中. 铁主要赋存于磁铁矿中, 少量存在于磁黄铁矿、黄铁矿、硼铁矿和赤(褐)铁矿中. 主要含

镁矿物为蛇纹石, 有害元素硫主要以黄铁矿、磁黄铁矿形式存在.

2) 矿石中主要矿物嵌布关系复杂, 嵌布粒度粗细不均. 粗粒硼镁石中常见磁铁矿、硼铁矿、蛇纹石包体, 而脉状硼镁石因嵌布粒度细难以与其他矿物有效分离; 硼铁矿嵌布粒度细, 嵌布关系复杂, 因此回收硼铁矿中硼元素十分困难; 磁铁矿嵌布粒度较粗, 多与硼镁石、硼铁矿形成矿物集合体, 细粒级磁铁矿多分布于硼铁矿间隙和脉石中, 单体解离困难, 从而使得磁铁矿精矿中含硼量高; 蛇纹石嵌布粒度相对较粗, 多以致密块状和矿物集合体形式产出.

3) 影响该矿石选别的因素主要有两类: 一为部分硼镁石和磁铁矿嵌布粒度细, 与多种矿物密切连生, 矿物单体解离困难, 使得精矿品位难以提高; 二为蛇纹石泥化, 蛇纹石天然亲水, 可浮性差, 细粒的蛇纹石罩盖在硼镁石表面后, 影响浮选效果.

4) 该矿石性质复杂, 使用单一的浮选流程难以选别, 应使用磁重浮联合流程, 以达到综合利用硼、铁、镁元素的目的.

参考文献:

- [1] 张建良,蔡海涛.低品位硼铁矿中硼的富集[J].北京科技大学学报,2009,31(1):36-40.
(Zhang Jian-liang, Cai Hai-tao. Concentration of boron in low grade paigeite ore[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(1): 36-40.)
- [2] 安静,薛向欣,姜涛.硼铁矿火法分离工艺生态压力研究[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(4):542-545.
(An Jing, Xue Xiang-xin, Jiang Tao. Ecological pressure analysis of thermo metallurgical separation process of paigeite ore [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(4): 542-545.)
- [3] 张丽清,袁本福,周华峰,等.乙醇结晶法提取硼铁矿浸液中的硫酸镁[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(7):2681-2686.
(Zhang Li-qing, Yuan Ben-fu, Zhou Hua-feng, et al. Extracting magnesium sulfate from acid-leaching solution of ludwigite by ethanol crystallization [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(7): 2681-2686.)
- [4] 袁本福,张丽清,张凤军,等.硼铁矿中硼镁铁的硫酸法共浸出研究[J].沈阳化工大学学报,2013,27(1):20-24.
(Yuan Ben-fu, Zhang Li-qing, Zhang Feng-jun, et al. Extracting boron and magnesium from paigeite ore by sulfuric acid leaching method [J]. *Journal of Shenyang University of Chemical Technology*, 2013, 27(1): 20-24.)
- [5] 李艳军,韩跃新,朱一民.硼镁石浮选特性研究[J].东北大学学报(自然科学版),2007,28(7):1041-1044.
(Li Yan-jun, Han Yue-xin, Zhu Yi-min. Study on the characteristic of camsellite flotation [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28(7): 1041-1044.)
- [6] Olubambi P A, Ndlovu S, Potgieter J H, et al. Mineralogical characterization of Ishiagu (Nigeria) complex sulphide ore [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2008, 87(3/4): 83-89.
- [7] Mücke A, Farshad F. Whole-rock and mineralogical composition of phanerozoic ooidal ironstones; comparison and differentiation of types and subtypes [J]. *Ore Geology Reviews*, 2005, 26(3/4): 227-262.
- [8] 卢毅屏,龙涛,冯其明,等.微细粒蛇纹石的可浮性及其机理[J].中国有色金属学报,2009,19(8):1493-1497.
(Lu Yi-ping, Long Tao, Feng Qi-ming, et al. Flotation and its mechanism of fine serpentine [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(8): 1493-1497.)
- [9] Feng B, Feng Q M, Lu Y P. A novel method to limit the detrimental effect of serpentine on the flotation of pentlandite [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, 114: 11-13.
- [10] Lu Y P, Zhang M Q, Feng Q M, et al. Effect of sodium hexametaphosphate on separation of serpentine from pyrite [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(1): 208-213.
- [1] 杨任新.应用高压辊磨机的红格钒钛磁铁矿选矿工艺研究[J].金属矿山,2011(2):47-51.
(Yang Ren-xin. Investigation on beneficiation process of Hongge vanadium and titanium magnetite with application of high pressure roller mill [J]. *Metal Mine*, 2011(2): 47-51.)
- [2] Torres M, Casali A. A novel approach for the modeling of high-pressure grinding rolls [J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(13): 1137-1146.
- [3] Tavares L M. Particle weakening in high-pressure roll grinding [J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(7): 651-657.
- [4] 袁致涛,郭小飞,严洋,等.攀西钒钛磁铁矿高压辊磨的产品特性[J].东北大学学报(自然科学版),2012,33(1):124-128.
(Yuan Zhi-tao, Guo Xiao-fei, Yan Yang, et al. Product characteristics of vanadium-titanium magnetite from Panxi by high pressure grinding roller [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2012, 33(1): 124-128.)
- [5] Wu Z, Xiong D H. The latest application of Slon vertical ring and pulsating high-gradient magnetic separator [J]. *Minerals Engineering*, 2003, 16(6): 563-565.
- [6] 黄会春,狄家莲,秦恒浩.提高太和铁矿钛强磁选回收率的实验研究[J].金属矿山,2011(2):60-63.
(Huang Hui-chun, Di Jia-lian, Qin Heng-hao. Experimental research on titanium recovery rate in high intensity magnetic separation of Taihe Iron Mine [J]. *Metal Mine*, 2011(2): 60-63.)
- [7] Celik I B, Oner M. The influence of grinding mechanism on the liberation characteristics of clinker minerals [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(3): 422-427.
- [8] Svoboda J, Fujita T. Recent developments in magnetic methods of material separation [J]. *Minerals Engineering*, 2003, 16(9): 785-792.

(上接第 257 页)