镜铁矿磁化焙烧前后矿物组成与嵌布结构变化分析

丁春江，陈铁军，黄献宝，马　浩，苏　涛，屈万刚

（武汉科技大学资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081）

摘　要： 镜铁矿因为矿物组成复杂、嵌布粒度细微，是一种难选矿，因此对其细粒粉矿，采用回转窑进行磁化焙烧—磁选试验研究。试验结果表明，原矿焙烧效果良好，在细磨至 -0.074 mm 占 85%，磁选强度为 144 kA/m 的工艺条件下，磁选精矿的铁品位仅为 55.22%，显微镜分析结果表明，磁铁矿未充分单体解离，影响精矿铁品位。通过分析焙烧过程中含铁矿物的物相及其微观结构，表明原矿经过磁化焙烧，菱铁矿、褐铁矿及其大多镜铁矿已经转变成磁铁矿，部分磁铁矿解离发育完全，颗粒疏松多孔。但大多数磁铁矿的矿石结构沿袭原矿中的镜铁矿，嵌布特征与嵌布粒度未发生明显变化，磁铁矿的矿石构造仍旧以粗粒条带状，稠密集与稀疏侵染状为主，并呈“不等粒”形式嵌布于脉石矿物之中，部分磁铁矿嵌布粒度较细，影响后续磨矿解离。

关键词： 镜铁矿；磁化焙烧；铁品位；微观组织

中图分类号： TF046.2　　**文献标志码：** A　**文章编号：** 1004-7638(2015)06-0117-06

DOI： 10.7513/j.issn.1004-7638.2015.06.022

The Mineral Composition and Disseminated Structure Change of Specularite in the Magnetic Roasting Process

Ding Chunjiang, Chen Tiejun, Huang Xianbao, Ma Hao, Su Tao, Qu Wangang

(College of Resource and Environment Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: Thanks to its complex composition and subtle disseminated extent, the specularite is a refractory iron ore. In this paper, a magnetic roasting experiment was implemented on specularite ore fines by a rotary kiln. The good roasting results had been achieved, and under the condition of grinding fineness (-0.074 mm) of about 85% and magnetic field intensity of 144 kA/m, a concentrate with Fe grade at 55.22% was obtained. The microscope analysis results indicated insufficient magnetite discrete which affecting the Fe grade of resulting concentrate. The phase analysis and microstructure of iron-bearing minerals during the roasting process suggested that that after magnetic roasting the siderite, limonite and most of specularite had been converted to magnetite, and some magnetite was dissociative, however, the resulting magnetite mainly remained the texture of the original specularite, and the embedded characteristics and disseminated extent was not changed significantly. The most magnetite had coarse band, dense and sparse infected structure, and unevenly embedded in gangue, while the disseminated extent of some magnetite was fine, all these had a significant effect on subsequent dissociation of magnetite.

Key words: specularite, magnetic roasting, Fe grade, microstructure

0　引言

“镜铁山”式铁矿是国内著名的难选红铁矿。有关研究表明，原矿中镜铁矿嵌布粒度细，褐铁矿与菱铁矿含量高，导致其可选性较差[1]。生产实践表明，粗粒级矿石采用竖炉焙烧—磁选的工艺流程，控

收稿日期： 2014-05-07

作者简介： 丁春江(1989—)，男，浙江嵊州人，硕士研究生，主要从事矿物提取技术研究。陈铁军(E-mail: ctj_56@163.com)。

制磨矿细度为-0.074 mm 占 82% ~85%，能够获得铁品位约 54%，回收率约 84% 的选矿结果[2]；细粒粉矿采用强磁选的选矿工艺，仅获得品位为 47% ~49%，回收率为 63% ~65% 的现场作业指标。

磁化焙烧仍是开发选别难选红铁矿的最为有效技术手段[3-5]，该选矿方法在选别富含菱铁矿、褐铁矿等难选铁矿石方面具有独特的优势。笔者经过试验发现，该类矿石即使磁化效果良好，其选矿指标也不尽理想，原因是磁选精矿的磁铁矿解离度低。因此针对该类矿石，对比分析原矿经过磁化焙烧之后发生的物相及其微观结构的变化，以此解释该类矿石即使经磁化焙烧、细磨磁选的方法，其磁铁矿仍未能有效单体解离的原因。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验采用的矿样为酒钢镜铁矿粉矿，其粒度为 1 ~5 mm，主要化学组成见表 1，主要矿物含量如表 2 所示。

从表 1 可知，该试样铁品位为 31.45%，Si 含量相对较高，其他元素的含量相对较低。

表 1 镜铁矿原矿主要化学成分

Table 1 Main components of raw ore in specularite %

TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	S	P	烧损
31.45	8.63	28.30	2.24	1.90	2.49	0.96	0.99	0.24	10.09

表 2 原矿主要矿物组成与含量(体积分数)

Table 2 Main mineral content of raw ore(volume fraction) %

镜铁矿	褐铁矿	菱铁矿	磁铁矿	黄铁矿	石英	铁白云石	绢云母	其他
28.4	9.2	14.6	1.8	2.3	28.3	7.8	6.9	0.7

金属矿物主要为镜铁矿(含量为 28.4%)，主要呈稠密浸染状或粗粒条带状、细粒稀疏浸染状以及褐红色细粒块状分布；其次为菱铁矿(含量为 14.6%)，主要呈粗粒块状分布；褐铁矿含量为 9.2%，主要呈粗粒块状及细粒脉状分布；而磁铁矿含量仅为 1.8%，多呈交代残余结构赋存于镜铁矿内部。

主要脉石矿物为石英，其含量高达 28.3%，其他脉石矿物分别为铁白云石、碧玉、千枚岩(石英与绢云母的混合物)、重晶石。而碧玉与千枚岩之中侵染少量细粒镜铁矿，提高了含铁矿物单体解离的难度。

表 3 为该镜铁矿在不同磨矿细度条件下的解离度分析结果，从表 3 可知，当原矿磨至-0.074 mm 占 75% 时，含铁矿物的单体解离度仅为 54.10%；细磨至-0.074 mm 占 85%，其解离度增加至 67.7%；即使磨至-0.074 mm 占 90%，其解离度也仅为 75.6%。而且镜下观察含铁矿物与脉石呈弯曲复杂连生，或以微细多包裹体形式存在的镜铁矿很难单体解离。因此认为，因为部分含铁矿物嵌布粒度细，即使进一步细磨也难以单体解离。

表 3 原矿铁矿物解离度分析

Table 3 The dissociation degree of raw ore

磨矿细度(-0.074 mm 比例)/%	单体含量/%	连生体颗粒含量/%			
		>3/4	3/4 ~1/2	1/2 ~1/4	<1/4
75	54.1	18.9	9.3	7.6	10.1
80	58.7	17.6	8.0	6.2	9.5
85	67.7	14.1	7.0	4.8	6.4
90	75.6	9.8	6.3	2.7	5.6

注：>3/4 是指磁铁矿含量大于 3/4 的连生体颗粒，3/4 ~1/2 指磁铁矿含量介于 3/4 与 1/2 之间的连生体颗粒，往下依次类推。

综合矿物工艺学分析，认为该矿石中主要金属矿物为镜铁矿、褐铁矿、磁铁矿以及黄铁矿等。其中成独立矿物的金属矿物几乎占有全部铁量的 70% ~80%，颗粒较为粗大，粒径多为 0.05 ~0.3 mm。而少量含铁矿物多以微细粒机械夹杂物的形式分布于碧玉、千枚岩中，颗粒较细，粒径多为 0.02 ~0.05 mm，由于这部分

细粒含铁矿物嵌布较细,提高了选别的难度。

1.2　试验方法

采用电热回转窑作为焙烧设备,其窑体内径为 210 mm,长度为 2 mm,通过窑体中部插入热电偶控制温度。

将粒度为 0 ~ 1 mm 的煤粉与原矿混匀(煤粉掺入量为 2.0%) ,之后加入焙烧温度为 830 ℃ 电热回转窑中进行焙烧 60 min,焙烧矿经过水淬冷却、烘干、破碎至 0 ~ 1 mm,再将其用 Ø240 mm×90 mm 型锥型球磨机进行磨矿至-0.074 mm 约占 90%,矿浆经过滤、干燥、混匀缩分之后用 CXG-99 型磁选管在磁场强度为 144 kA/m 的条件下进行磁选。

2　结果与分析

2.1　回转窑试验结果分析

焙烧矿含铁矿物物相分析见表 4,磁选精矿化学分析见表 5,铁精矿解离度分析见表 6,精矿显微照片见图 1。

从表 4 可知,焙烧矿中其磁性铁含量可达 93.23%,表明该试样在该焙烧条件下磁化效果良好,大多弱磁性矿物已经转变磁铁矿。

表 4　焙烧矿铁物相分析结果(质量分数)
Table 4　Iron phase s of roasted ore　%

磁性铁	赤褐铁	碳酸铁	硫化铁	硅酸铁
93.23	3.38	0.12	1.11	2.16

表 5　铁精矿主要化学成分
Table 5　Main components of concentrate　%

TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	S	P
55.22	18.26	11.69	1.98	0.89	2.92	1.50	0.22	0.05

表 6　铁精矿解离度分析
Table 6　The dissociation degree of concentrate

单体颗粒数目	连生体颗粒数目				单体解离度/%
	>3/4	3/4 ~ 1/2	1/2 ~ 1/4	<1/4	
289	64	78	21	19	69.98

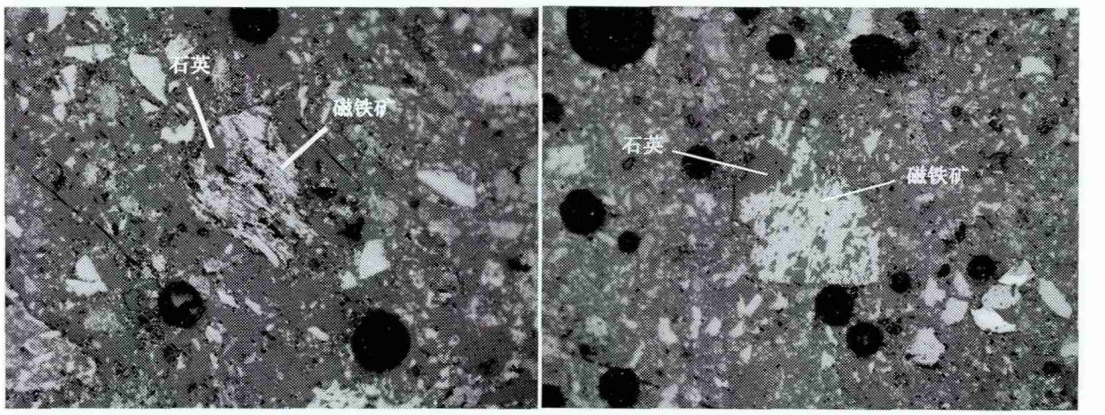


图 1　精矿显微分析
Fig. 1　Microstructure of concentrate

从表 5 可知,该精矿铁品位为 55.22%,SiO_2 含量相对较高,为 11.69%,其余元素含量均相对较低。

从表 6 可知,即使焙烧矿细磨至-0.074 mm 占 85%,精矿中磁铁矿的解离度也只有 69.98%,结合图 1,认为其中未解离的微细粒磁铁矿主要嵌布于石英之中,呈现连生体的形式存在。

通过以上分析,认为磁选精矿中的磁铁矿未能充分单体解离,部分细粒磁铁矿与石英连生,是造成精矿铁品位较低的主要原因。因此,有必要分析磁化焙烧前后岩相及物相转变情况,以此说明该类矿石即使采用磁化焙烧,细磨磁选的试验方法,仍然较难分选的主要原因。

2.2　焙烧前后微观结构变化分析

磁化焙烧前后物料含铁矿物微观结构的变化情况如图 2、3 所示。从图 2 可知,原矿中主要的含铁矿物为镜铁矿、褐铁矿与菱铁矿。镜铁矿多呈粗粒条带状,稠密集侵染状及细粒稀疏侵染状分布。

粗粒条带状镜铁矿多呈粗粒自型晶结构存在,与脉石的嵌布关系较为简单。而稠密集侵染状镜铁矿的嵌布特征较为复杂,多呈锯齿状及犬牙交错状嵌布于脉石之中。少量细粒粒状、针状镜铁矿则主要呈“星点状”稀疏侵染状嵌布于石英之中,而更细微的镜铁矿稀疏侵染于碧玉之中,粒径大于 0.02 mm 颗粒很少。

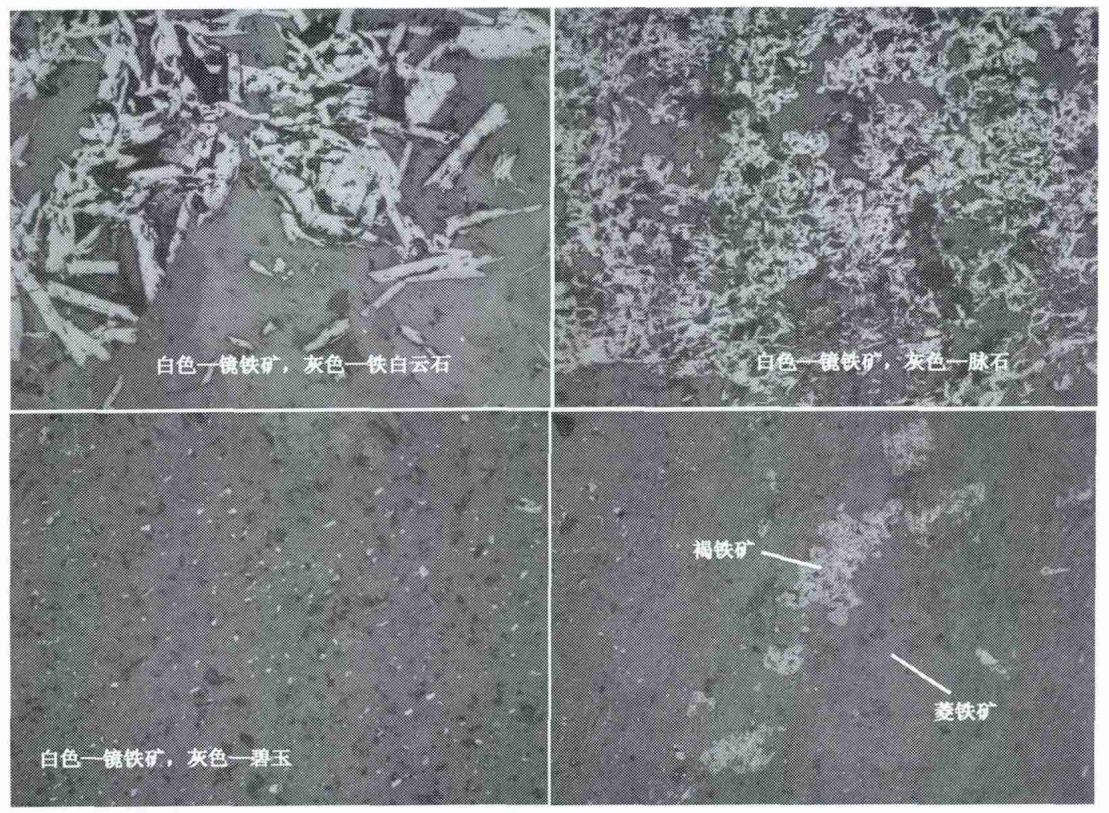


图 2 原矿微观分析

Fig. 2 Microscopic analysis of raw ore

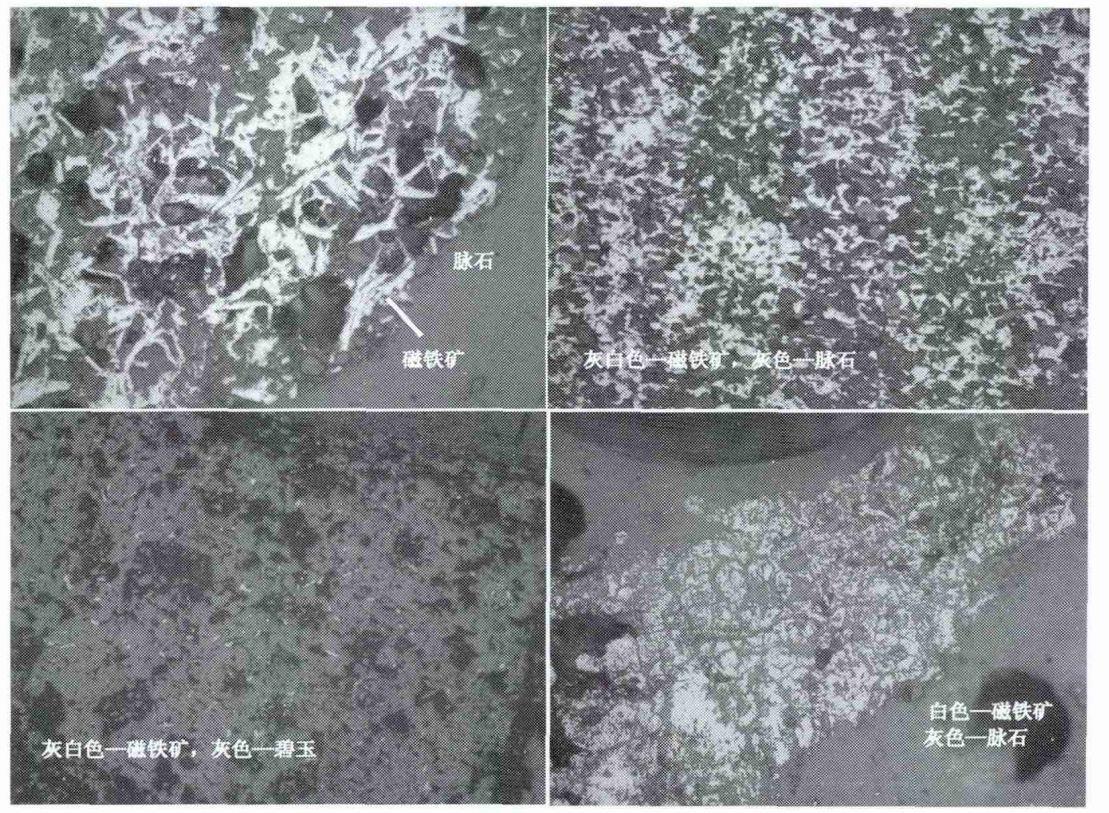


图 3 焙烧矿微观分析

Fig. 3 Microscopic analysis of roasted ore

菱铁矿多呈粗粒状嵌布于铁白云石之中,颗粒粒径较粗。而褐铁矿多呈土状及其块状集合体分布。

因此,原矿岩相分析结果表明,原矿中的褐铁矿与菱铁矿粒径较粗,分别呈胶结状与土状结构及粒状分布; 而镜铁矿主要呈粗粒条带状分布,稠密集侵染状分布与细粒稀疏侵染状分布,其中少量细粒镜铁矿嵌布于碧玉与铁白云石内部,磨矿解离较为困难。

从图 3 可知,原矿经过磁化焙烧之后,矿物组成已经发生明显变化,主要金属矿物已经从镜铁矿、褐铁矿及菱铁矿转变成磁铁矿,并且磁铁矿在镜下呈两种颜色,一类磁铁矿呈灰白色,而另一类磁铁矿内部含有 Mg 离子略显棕黄色。但脉石矿物未发生显著变化,仍为石英、绢云母。

该磁铁矿具有三种矿石构造: 稠密集侵染状或者条带状,细粒针板状及稀疏侵染状,其矿石结构基本沿袭了原矿中的镜铁矿。

呈粗粒条带状的磁铁矿多呈自型、半自型的假象结构产出,其矿石结构继承了镜铁矿,推测其为镜铁矿经磁化焙烧转化而来; 大多稠密集侵染状的磁铁矿呈半自型及其他型假象结构形式存在,与脉石的嵌布关系较为复杂,多呈锯齿状或犬牙交错的形式存在; 细粒稀疏侵染状磁铁矿多以粒状、针状形式产出,粒径较细,呈不等粒嵌布于脉石矿物之中。镜下发现铁白云石已经分解成方解石,但碧玉内部依然侵染少量细粒铁质。

部分棕黄色磁铁矿解离发育完全,龟裂结构较为发达,多呈角砾形式产出,推测其为褐铁矿或菱铁矿焙烧时产生挥发性气体导致颗粒发生破裂。

通过分析比较原矿及其焙烧矿的岩相变化,认为试样经过磁化焙烧,矿物组成已经发生明显变化,大多弱磁性含铁矿物已经转变成磁铁矿,部分磁铁矿解离发育完全。但焙烧矿中磁铁矿的矿石构造与结构并无明显变化,大多磁铁矿的嵌布特征依旧沿袭了原矿中的镜铁矿,其形貌多以板状、针状、脉状及网状结构为主,而细粒稀疏侵染状的磁铁矿仍然嵌布于碧玉中,磁铁矿完全单体解离仍然具有很大的难度。因此认为,试样经过磁化焙烧,含铁矿物的嵌布特征未能发生明显的变化。

2.3　磁化焙烧前后嵌布粒度变化分析

为了分析焙烧前后的含铁矿物的嵌布粒度的转变情况,特将原矿与焙烧矿的含铁矿物颗粒粒径进行统计分析,其结果如表 7 所示。

表 7　原矿与焙烧矿的含铁矿物嵌布粒度分析

Table 7　The disseminated particle sizes distribution of iron mineral in raw ore and roasted ore

粒度范围/mm	原矿		焙烧矿	
	含量分布/%	累积含量/%	含量分布/%	累积含量/%
-0.05 ~ +0.30	0	0	0	0
-0.30 ~ +0.17	28.23	28.23	24.03	24.03
-0.17 ~ +0.14	14.24	42.47	12.06	36.09
-0.14 ~ +0.105	12.73	55.20	18.97	55.06
-0.105 ~ +0.074	17.25	72.45	22.36	77.43
-0.074	27.55	100.00	22.57	100.00

从表 7 可知,原矿中约 28.23% 的含铁矿物颗粒粒径大于 0.17 mm,但仍有约 27.55% 的含铁矿物粒径小于 0.074 mm,可见该镜铁矿含铁矿物嵌布粒度较为复杂,该镜铁矿的含铁矿物呈“不等粒”嵌布于脉石矿物,部分含铁矿物的嵌布粒度极细,影响磨矿解离。

试样经过磁化焙烧,含铁矿物嵌布粒度仍然呈不均匀分布。约 24.03% 的铁矿物粒径大于 0.17 mm,但还是约有 22.57% 的铁矿物粒径小于 0.074 mm,其他各个粒级组成含量与原矿基本相似。

因此分析认为,原矿经过磁化焙烧,其嵌布粒度并没有发生显著的变化,仍然有相当数量的磁铁矿呈细粒嵌布于脉石矿物之中。

3　结论

1) 原矿矿物工艺学分析结果表明,试验原矿主要含铁矿物为镜铁矿、菱铁矿与褐铁矿,主要脉石矿物为石英与铁白云石。矿石组成复杂,铁矿物解离困难,是典型的难选红铁矿。

2) 试验结果表明,原矿焙烧效果良好,控制磨矿细度为-0.074 mm 占 85%,磁场强度为 144 kA/m,精矿铁品位仅为 55.22%。精矿显微结构分析表明,磁铁矿未充分单体解离,影响该精矿铁品位。

3) 显微镜分析结果表明,原矿经过磁化焙烧,

大多弱磁性矿物转变成强磁性矿物，部分磁铁矿解离发育完全，颗粒变得疏松多孔，但磁铁矿的嵌布特征基本沿袭了原矿中的镜铁矿，多以粗粒条带状，稠密集与稀疏侵染状嵌布于脉石矿物之中，磁铁矿嵌布粒度未能发生明显变化，仍呈现不等粒形式产生，仍有部分磁铁矿的嵌布粒度较细，影响后续的磨矿解离。

参考文献

[1] Liu Qianfan. Technologicall study on the pre-separation of the iron ore from Jingtieshan mine of JISCO [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
(刘千帆. 酒钢镜铁山铁矿石预选工艺研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.)

[2] Zhang Zhirong, Chen Zhou, Zhou Huahui, *et al*. The practice of improving the quality and production of magnetization roasting of shaft furnace of the concentrating and sinter plant of JISCO [J]. Ming and Metallurgical Engineering, 2012, 32: 121-123.
(张志荣, 陈洲, 周华辉, 等. 酒钢选烧厂提高磁化焙烧竖炉产质量实践 [J]. 矿冶工程, 2012, 32: 121-123.)

[3] Luo Liqun, Yu Yongfu, Zhang Jingshen. Flash magnetic roasting and microstructure characteristics and phase transformation of iron minerals [J]. Joumal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(5): 1173-1175.
(罗立群, 余永富, 张泾生. 闪速磁化焙烧及铁矿物的微观相变特征 [J]. 中南大学学报, 2009, 40(5): 1173-1175.)

[4] Ren Yafeng, Yu Yongfu. Present status and development orientation of magnetization roasting technology for refractory red iron ores [J]. Metal Mine, 2005(11): 20-21.
(任亚峰, 余永富. 难选红铁矿磁化焙烧技术现状及发展方向 [J]. 金属矿山, 2005(11): 20-21.)

[5] Zhang Yimin. The separation theory and technology of solid material [M]. Beijng: Metallurgical Industry Press, 2007: 166-167.
(张一敏. 固体物料分选理论与工艺 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 166-167.)

编辑 余文华

我国首个金属材料高新区在四川授牌

“攀枝花国家钒钛高新技术产业开发区”日前在四川授牌，这是经国务院批准的首个以金属材料产业开发为主要依托的国家级高新区，也是攀西战略资源创新开发的重大科技孵化平台和主要成果转化载体。

据了解，位于川西南和滇西北结合部的攀枝花市具有天然的资源和区位优势，近年来大力推进钒钛战略资源综合开发利用，目前已经成为世界第二大钒产品基地、中国最大钛原料基地和中国西部重要的钢铁生产基地，钒钛产业集群跻身中国产业集群 50 强，被命名为“中国钒钛之都”。

攀枝花钒钛高新区管委会主任赵中介绍，目前该区已引进企业 175 家，拥有国家级钒钛科技孵化器、钒钛资源综合利用国家重点实验室等，形成了以钒钛、化工、机械加工为主导，以现代服务业、生态农业、新材料为补充的现代产业体系。

（杨冬梅 摘自新浪网）