

红格钒钛磁铁矿中铁、铬的赋存状态研究

王利珍, 姜楚灵, 朱家祥, 阳华玲, 易 密

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘 要:通过化学多元素分析、物相分析、X 射线衍射分析、光学显微镜和 MLA 等多种现代测试手段对攀枝花红格高铬型钒钛磁铁矿的化学组成、矿物种类及含量、含铬矿物的能谱微区成分分析-平衡概算-产出形式、钛磁铁矿的粒度及解离度等方面进行详细研究, 查清了铬的分布状态及其富集趋势和铁精矿的理论指标, 综合分析了磨矿细度及其对应铁精矿的理想指标, 明确了影响选矿效果的主要矿物学因素, 为综合开发利用红格钒钛磁铁矿提供了详细的科学依据。

关键词:钒钛磁铁矿; 红格矿区; 工艺矿物学; 矿石性质; 铬; 赋存状态

中图分类号: TD981, TD92

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)02-0102-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.02.015

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the occurrence state of iron and chromium in Hongge vanadium-titanomagnetite ore

Wang Lizhen, Jiang Chuling, Zhu Jiaxiang, Yang Hualing, Yi Luan

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co. Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: By means of chemical multi-element analysis, phase analysis, X-ray diffraction analysis, optical microscopy, MLA and other modern testing methods, this paper studied in detail the chemical composition, mineral species and content, microcomponent analysis of energy spectrum for chromium-containing minerals, equilibrium estimate for chromium, the occurrence state for chromium-containing minerals, particle size and liberation degree of titanomagnetite in Panzhihua Hongge high chromium vanadium-titanium magnetite ore. The distribution and enrichment trend of chromium and the theoretical index of iron concentrate were ascertained. The grinding fineness and the ideal index of iron concentrate were analyzed comprehensively. The main mineralogical factors affecting the sorting effect were identified, which provided a detailed scientific basis for the comprehensive development and utilization of Hongge vanadium-titanium magnetite.

Key words: vanadium-titanomagnetite, Hongge mining area, process mineralogy, ore properties, chromium, occurrence state

0 引言

铬(Cr)具有质硬耐磨、耐热、耐腐蚀等特性, 广

泛用于冶金、化工、国防、汽车、建筑及其他各种工业中, 是全球性的稀缺物资。随着国内经济发展的增速, 对铬需求量日益提高, 但由于资源贫乏, 铬严

收稿日期: 2023-12-06

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(2013CB63200); 973 计划项目(2013CB632602)。

作者简介: 王利珍, 1986 年出生, 女, 湖南郴州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事工艺矿物学研究, E-mail: 360296048@qq.com。

重依赖于进口。攀西地区红格钒钛磁铁矿中铬储量是全国已探明储量的近两倍,是目前我国最大的铬矿资源^[1-3]。红格矿区拥有我国最大的钒钛磁铁矿床,探明储量达 35.45 亿 t,可采(表内)储量 18.29 亿 t。至今红格矿区仍处在国家调规阶段,铁、铬、钒、钛等有用元素均未得到综合回收,造成了资源的严重浪费^[4-11]。因此充分开发利用红格钒钛磁铁矿尤为迫切。为此,笔者针对红格钒钛磁铁矿进

行详细的工艺矿物学研究,查明了矿石中铁、铬的分布状态及其富集趋势,为设计合理的选矿工艺流程,达到处理攀西红格钒钛磁铁矿资源效益最大化提供了有力的数据支撑。

1 矿石物质组成

1.1 化学多元素分析

矿石的化学多元素分析结果列于表 1。

表 1 矿石的多元素化学分析结果
Table 1 Chemical elements of ores

TFe	FeO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Co	Ni	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S
27.57	16.49	9.36	0.25	0.74	0.021	0.095	24.64	6.20	5.47	11.23	0.053	0.10

由表 1 可知,需选矿回收的 Fe、Cr₂O₃、V₂O₅ 和 TiO₂ 含量分别为 27.57%、0.74%、0.25% 和 9.36%; TFe/FeO 为 1.67,碱性系数 0.54; SiO₂ 和 MgO 是选矿要排除的主要组分。

1.2 物相分析

矿石中铁、钛和铬的物相分析结果列于表 2~4,由结果可知:

1) 矿石中铁 79.00% 存在于钛磁铁矿中,这是弱磁选铁精矿中铁的理论回收率;分布于钛铁矿和硅酸盐的铁分别为 8.45% 和 8.96%,二者将分别进入钛精矿和尾矿。

表 2 矿石中铁的化学物相分析结果
Table 2 Chemical phase analysis results of iron in ore %

铁相	含量	分布率
钛磁铁矿中铁	21.78	79.00
赤(褐)铁矿中铁	0.79	2.86
钛铁矿中铁	2.33	8.45
碳酸盐中铁	0.14	0.51
硫化物中铁	0.06	0.22
硅酸盐中铁	2.47	8.96
合计	27.57	100.00

表 3 矿石中钛的化学物相分析结果
Table 3 Chemical phase analysis results of titanium in ores %

钛相	含量	分布率
钛磁铁矿中TiO ₂	5.24	55.98
钛铁矿中TiO ₂	3.30	35.26
脉石中TiO ₂	0.82	8.76
合计	9.36	100.00

表 4 矿石中铬的化学物相分析结果
Table 4 Chemical phase analysis results of chromium in ore %

铬相	含量	分布率
钛磁铁矿中Cr ₂ O ₃	0.69	93.24
钛铁矿中Cr ₂ O ₃	0.01	1.35
脉石中Cr ₂ O ₃	0.04	5.41
合计	0.74	100.00

2) 矿石中 TiO₂ 主要是以钛铁矿和钛磁铁矿存在,分布率分别为 35.26% 和 55.98%,其中以钛磁铁矿存在的 TiO₂ 将进入铁精矿,因此钛精矿的理论回收率仅 35.26%。

3) 矿石中 Cr₂O₃ 的存在形式相对较为简单,分布在钛磁铁矿中的 Cr₂O₃ 占 93.24%,其余则散布在钛铁矿或脉石中,分布率分别为 1.35% 和 5.41%。据此推断 Cr₂O₃ 将在弱磁选铁精矿中有较大程度的富集。

1.3 矿物组成及含量

采用矿物参数自动分析系统(MLA)对矿石中主要矿物的重量含量进行了统计,结果列于表 5,其中铁矿物主要是钛磁铁矿,次为磁铁矿,偶见赤铁矿和褐铁矿,因含量极低统一纳入其他中;钛矿物除钛铁矿以外,尚见少量金红石、钙钛矿、锐钛矿和榍石零星分布;金属硫化物含量甚微,以黄铁矿(包括镍黄铁矿)为主,偶见磁黄铁矿和黄铜矿;脉石矿物较常见的有钛辉石、钛闪石和绿泥石,次为橄榄石、蛇纹石、长石和蒙脱石,其他微量矿物尚见尖晶石、方解石、白云石、菱铁矿、云母、滑石、石英、黝帘石、锆石、绿帘石和磷灰石等。

表5 矿石中主要矿物的含量
Table 5 Weight content of major minerals in ores

%

钛磁铁矿	磁铁矿	钛铁矿	黄铁矿	钛闪石、钛辉石	长石	绿泥石、蛇纹石	蒙脱石	楣石	尖晶石	磷灰石	其他
35.44	1.87	6.27	0.29	22.42	5.81	19.84	4.78	1.42	0.28	0.24	1.34

2 含铬矿物的能谱微区成分分析

为查明矿物中 Cr_2O_3 含量,采用 MLA 对表 5 中的矿物进行能谱微区成分分析。随机选取上述矿物的 30 多个颗粒进行测定,发现矿石中仅钛磁铁矿、

磁铁矿、钛铁矿及尖晶石中含 Cr_2O_3 ,现将含铬矿物的平均含量列于表 6。由结果可知,尖晶石和钛磁铁矿中 Cr_2O_3 含量为 9.82% 和 1.89%,是选矿回收铬的主要目的矿物;而磁铁矿和钛铁矿中的 Cr_2O_3 含量均较低。

表6 含铬矿物的能谱微区成分分析结果
Table 6 Results of microcomponent analysis of energy spectrum of chrome-containing minerals

%

矿物	Cr_2O_3	Fe	TiO_2	V_2O_5	MnO	CaO	MgO	Al_2O_3
钛磁铁矿	1.89	58.49	14.03	0.61	0.4	0.06	0.91	1.31
磁铁矿	0.57	69.81	1.70	0.42	0.25	0.06	0.21	0.37
钛铁矿	0.06	35.70	51.64		0.75		1.60	
尖晶石	9.82	9.76	0.28				15.45	62.04

3 含铬矿物的平衡概算

为进一步查明 Cr_2O_3 在矿石中的分布特点,根据矿石中含铬矿物的含量以及含铬矿物中 Cr_2O_3 的含量进行平衡概算,由表 7 可知,矿石中没有独立的铬矿物, Cr_2O_3 是以类质同像形式赋存在钛磁铁矿、磁铁矿、钛铁矿及尖晶石的晶格中。其中钛磁铁矿是矿石中铬最主要的赋存矿物,且通过机械选矿方法不可能达到铬-铁的有效分离。

表7 矿石中 Cr_2O_3 的平衡计算结果
Table 7 Results of balance calculation of Cr_2O_3 in ore

%

矿物名称	矿物含量	矿物中 Cr_2O_3 品位	Cr_2O_3 金属量	Cr_2O_3 在 各矿物中的分布率
钛磁铁矿	35.44	1.89	0.670	93.97
磁铁矿	1.87	0.57	0.011	1.54
钛铁矿	6.27	0.06	0.004	0.56
尖晶石	0.28	9.82	0.028	3.93
其他	56.42			
合计		0.713		100.00
原矿			0.74	
平衡系数			0.96	

4 含铬矿物的产出形式

4.1 钛磁铁矿

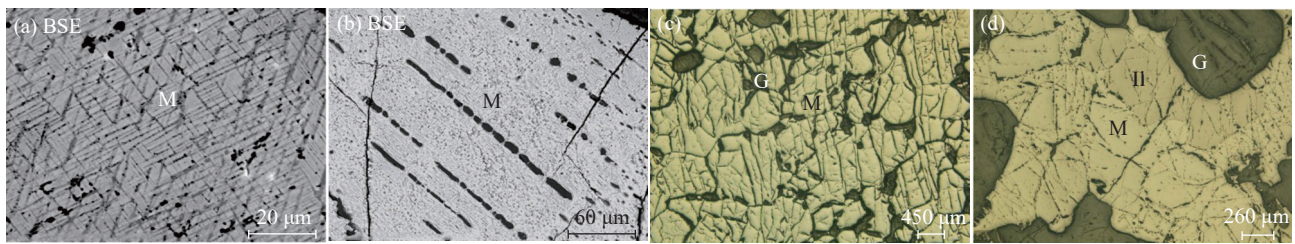
钛磁铁矿是选矿回收铁、铬的目的矿物,呈粒状,内部普遍分布钛铁矿片晶或尖晶石微粒(图 1(a)、(b)),常呈团块状、浸染状沿边缘、粒间分布脉石或少量钛铁矿(图 1(c)、(d)),粒度变化较为悬殊,少数粗者可达 3.0 mm 左右,通常变化为 0.1 ~ 1.0 mm。其中团块状、稠密浸染状、中等稠密浸染状和稀

疏~星散浸染状大致比例为 20 : 50 : 25 : 5。由于矿石中钛磁铁矿的含量较高、分布广泛、形态较为规则、粒度较粗、与其他矿物的接触界线较为规则,预计在适当的磨矿细度条件下,绝大部分钛磁铁矿均可获得较充分的解离,而呈稀疏~星散浸染状产出的钛磁铁矿因粒度相对细小,因此可能有少数将以钛磁铁矿-脉石连生体的形式进入弱磁选铁精矿,但因其含量低,所以对铁精矿的质量影响程度较为有限。

矿石中钛磁铁矿氧化较少,相对而言,褐铁矿化出现的频率较高、赤铁矿化的蚀变程度略为强烈,楣石化则十分少见。褐铁矿、赤铁矿或楣石交代少数钛磁铁矿,随着交代强度的提高,钛磁铁矿残余逐渐减少,甚至发育为不含钛磁铁矿残余的赤铁矿。显然,颗粒中钛磁铁矿残余的多少不仅反映了蚀变的强度,同时也决定了其在选矿过程中的富集趋势,预计那些不含钛磁铁矿残余的赤铁矿弱磁选过程中将不可避免地作为弱磁性矿物排入尾矿,从而降低铁的回收率。

4.2 磁铁矿

分布零星,仅少数矿块中见及。以内部不含钛铁矿片晶和尖晶石微粒而有别于钛磁铁矿。主要呈极微细的尘粒状,以不规则细脉浸染状嵌布在脉石中,少数可交代钛磁铁矿或钛铁矿,脉宽变化较大,部分粗者可至 0.3 mm 左右。虽磁铁矿含量较低,但与脉石矿物的镶嵌关系十分复杂,磨矿过程中较难充分解离,因此弱磁选过程中将不可避免地以磁铁矿-脉石连生体的形式进入铁精矿。



(a) 钛磁铁矿(M)中分布网格状钛磁铁矿(灰色),背散射电子图像;(b) 钛磁铁矿(M)中包裹串珠状尖晶石(灰色),背散射电子图像;(c) 钛磁铁矿(M)呈稠密浸染状嵌布于脉石(G)中,反光;(d) 钛磁铁矿(M)边缘分布钛磁铁矿(II),反光

图1 钛磁铁矿的嵌布关系

Fig. 1 Distribution relationship of titanomagnetite

4.3 钛铁矿

钛铁矿具有两种类型:一是呈粒状,为选钛对象,常分布于钛磁铁矿边缘、粒间,少数零星散布在脉石中,粒度相对较粗,个别约达1.5 mm,一般多介于0.05~0.5 mm(图1(d));二是呈微片晶,常与钛磁铁矿、钛辉石或钛闪石构成极为复杂的串珠状、网格状、布纹状(图1(a)),部分甚至构成次显微结构,当出溶物为乳滴状或蠕虫状时则与钛磁铁矿构成文像结构,片晶边缘多较为平直,宽度一般0.001~0.01 mm,极少超过0.02 mm。

钛铁矿内部杂质极少,仅个别矿块中的钛铁矿可发生不同程度的蚀变,特征是褐铁矿、金红石、榍石或绿泥石常呈细脉状、蠕虫状、乳滴状、不规则状沿个别钛铁矿晶粒的晶面、边缘、解理或孔洞交代构成镶嵌关系较为复杂的斑块状,局部甚至可完全被榍石、绿泥石替代,但仍保留了原钛铁矿自形、半自形板片状晶体的外形。

4.4 尖晶石

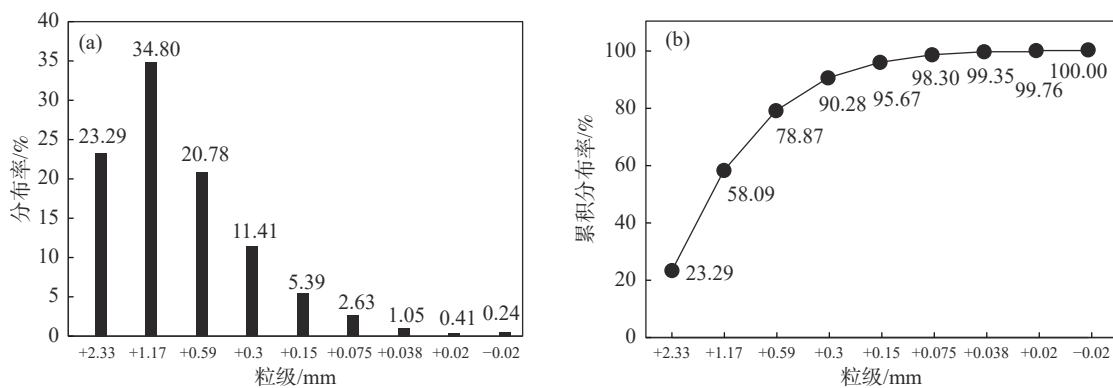
常呈圆粒状或具四边形外形的粒状不均匀嵌布在大部分钛磁铁矿中,少数聚集成串珠状、针线状、麦穗状,沿钛磁铁矿晶面呈格状分布,以致形态上类似于钛铁矿一样的片晶嵌布在钛磁铁矿基底中,不

过其连续性部分相对较差,可与钛铁矿片晶见于同一钛磁铁矿晶粒内部,粒度个别粗者可至0.015 mm左右,一般0.001~0.005 mm(图1(b))。因矿石中尖晶石含量极低、粒度过于微细、分散程度高,与钛磁铁矿镶嵌关系十分复杂,即使超细磨也不可能实现解离,因此弱磁选过程中其将不可避免地随同钛磁铁矿主晶一起进入铁精矿。

总体来看,矿石中磁铁矿因具有强磁性,尖晶石则因粒度普遍过于微细,加之绝大部分包裹于钛磁铁矿中,预计即使采用超细磨工艺磁铁矿和尖晶石均将进入弱磁铁精矿中。

5 钛磁铁矿的粒度

由矿石中钛磁铁矿的粒度统计结果(图2)可知,钛磁铁矿粒度大小极不均匀,微粒者少,绝大部分介于中粗粒的范围。+2.33、-2.33~+1.17 mm和-1.17~+0.59 mm等3个粒级钛磁铁矿的分布率均较高,分别达23.29%、34.80%和20.78%,三者合计分布率占78.87%;当粒级为+0.15 mm时,钛磁铁矿的正累积分布率达95.67%,预计该细度条件下钛磁铁矿可获得较充分的解离。



(a) 分布率; (b) 累积分布率

图2 钛磁铁矿的粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of titanomagnetite

6 不同磨矿细度条件下原矿中钛磁铁矿的解离度

采用 MLA 对 -0.21 、 -0.15 mm 和 -0.105 mm 等三种不同磨矿细度条件下原矿中钛磁铁矿的解离度进行了测定,由图 3 可知,当磨矿细度为 -0.21 mm 时,钛磁铁矿单体较低仅为 88.39%;随着磨矿细度的提高,呈单体状态产出的钛磁铁矿所占比例逐渐增加,当细磨至 -0.15 mm 时,钛磁铁矿单体已达 94.13%,这与根据钛磁铁矿的粒度统计结果推荐的磨矿细度基本吻合。当磨矿细度为 -0.105 mm 时,钛磁铁矿单体则高达 96.82%,此时完全能获得高品位铁精矿。

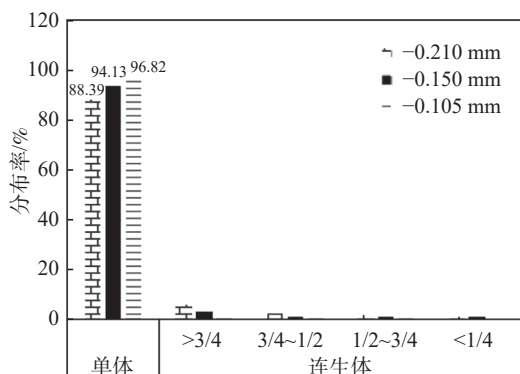


图 3 不同细度下原矿中钛磁铁矿的解离度

Fig. 3 Dissociation degree of titanomagnetite in raw ore with different fineness

7 铁精矿的指标预测

结合矿石的物质组成及其各矿物学参数,可以推算铁精矿的理论指标:产率为 37.31%, Fe 和 Cr_2O_3 品位分别为 59.06%、1.88%, Fe 的回收率 79.00%。在不同磨矿细度条件下从原矿中分选铁精矿所对应的选铁理想指标如表 8~10 所示。

表 8 -0.21 mm 细度下铁精矿理想指标预测

Table 8 Ideal index prediction of iron concentrate in -0.21 mm fineness

理想指标	产率	Fe品位	Cr_2O_3 品位	Fe回收率
仅回收单体	32.98	59.06	1.88	63.58
回收单体及 $>3/4$ 连生体	35.43	58.55	1.86	73.73
回收单体及 $>1/2$ 连生体	37.16	57.54	1.83	76.00
回收单体及 $>1/4$ 连生体	38.97	55.90	1.78	77.43
回收所有含钛铁矿颗粒	42.40	51.97	1.65	78.33

表 9 -0.15 mm 细度下铁精矿理想指标预测

Table 9 Ideal index prediction of iron concentrate in -0.15 mm fineness

理想指标	产率	Fe品位	Cr_2O_3 品位	Fe回收率
仅回收单体	35.12	59.06	1.88	67.71
回收单体及 $>3/4$ 连生体	36.57	58.77	1.87	76.39
回收单体及 $>1/2$ 连生体	37.42	58.27	1.85	77.51
回收单体及 $>1/4$ 连生体	38.07	57.65	1.84	78.02
回收所有含钛铁矿颗粒	39.23	56.16	1.79	78.33

表 10 -0.105 mm 细度下铁精矿理想指标预测

Table 10 Ideal index prediction of iron concentrate in -0.105 mm fineness

理想指标	产率	Fe品位	Cr_2O_3 品位	Fe回收率
仅回收单体	36.12	59.06	1.88	69.64
回收单体及 $>3/4$ 连生体	37.04	58.88	1.87	77.51
回收单体及 $>1/2$ 连生体	37.41	58.66	1.87	78.00
回收单体及 $>1/4$ 连生体	37.74	58.33	1.86	78.26
回收所有含钛铁矿颗粒	38.28	57.56	1.83	78.33

由表 8~10 可知,磨矿细度分别为 -0.21 、 -0.15 mm 和 -0.105 mm 时,从原矿中获得的铁精矿 Fe 品位均可达 57% 以上,此时 -0.21 mm 细度下铁精矿的产率及铁的回收率分别为 37.16% 和 76.00%, -0.15 mm 和 -0.105 mm 细度下铁精矿的产率及铁的回收率则约为 38% 和 78%。磨矿细度从 -0.21 mm 提高到 -0.15 mm 时,铁精矿的产率及铁的回收率分别提高了 1 个和 2 个百分点;而磨矿细度从 -0.15 mm 提高到 -0.105 mm 时,铁精矿的产率及铁的回收率变化不大。

综合考虑认为, -0.15 mm 的磨矿细度最为合适,此时从原矿获得的铁精矿中 Cr_2O_3 品位最高为 1.84%、Fe 品位 57.65%、铁精矿的产率为 38.07%、铁的回收率为 78.02%。

8 结论

1) 矿石中 Fe 和 Cr_2O_3 含量分别为 27.57% 和 0.74%, 分布于钛磁铁矿中的 Fe 和 Cr_2O_3 分别占 79.00% 和 93.24%, 显然, 钛磁铁矿是富集回收铁和铬的主要目的矿物。

2) 含铬矿物-钛磁铁矿、磁铁矿、钛铁矿和尖晶石中 Cr_2O_3 含量分别为 1.89%、0.57%、0.06% 和 9.82%。矿石中磁铁矿因具有强磁性, 尖晶石因粒

度普遍过于微细,加之绝大部分包裹于钛磁铁矿中,即使采用超细磨工艺磁铁矿和尖晶石均将进入弱磁铁精矿中。据此推断进入铁精矿中的 Cr_2O_3 理论上分布率高达 99.44%,铁精矿中理论指标:产率为 37.31%,Fe 和 Cr_2O_3 品位分别为 59.06%、1.88%,铁的回收率 79.00%。

3)由钛磁铁矿的粒度及解离度可知, -0.15 mm 的磨矿细度最为合适,此时从原矿获得的铁精矿理想

技术指标为: Cr_2O_3 品位最高为 1.84%、Fe 品位 57.65%、铁精矿的产率为 38.07%、铁的回收率为 78.02%。

4)矿石中钛磁铁矿部分富含由固溶体分离作用析出形成的尖晶石微粒或微细钛铁矿片晶,部分则含有因固溶体分离作用不完全而以类质同象形式存在于钛磁铁矿晶格中的 TiO_2 ,这是造成弱磁选铁精矿铁品位偏低, Cr_2O_3 及 TiO_2 含量偏高的主要因素。

参考文献

- [1] Luo Jinhua. Distribution of main elements of Hongge vanadium titanomagnetite in mineral processing[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2015(3): 55-58.
(罗金华. 红格钒钛磁铁矿主要元素在选矿中的分布[J]. 矿产综合利用, 2015(3): 55-58.)
- [2] Wang Lizhen, Liu Yang, Zhong Biao, *et al.* Mineralogical characteristics and separation performance of ilmenomagnetite ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016(5): 57-59.
(王利珍, 刘洋, 钟彪, 等. 某钒钛磁铁矿矿物学特征及分析性能研究[J]. 矿冶工程, 2016(5): 57-59.)
- [3] Zhang Jianting. The occurrence distribution and recovery technologies of chromium in Hongge ore[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2005(1): 1-4.
(张建廷. 红格铁铬的赋存、分布与回收利用[J]. 四川有色金属, 2005(1): 1-4.)
- [4] Luo Jinhua, Qiu Kehui, Zhang Peicong, *et al.* Study on mineralogical characteristics of titanium-magnetite in Hongge vanadium-titanium magnetite[J]. Mineral Rock, 2013(3): 1-6.
(罗金华, 邱克辉, 张佩聪, 等. 红格钒钛磁铁矿中钛磁铁矿的矿物学特征研究[J]. 矿物岩石, 2013(3): 1-6.)
- [5] Han Qisheng. Pilot test for Hongge V-bearing titaniferous magnetite dressing[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1994(8): 34-38.
(韩启盛. 红格钒钛磁铁矿选矿半工业试验研究[J]. 钢铁钒钛, 1994(8): 34-38.)
- [6] Tan Qiyue, Chen Bo, Zhang Yushu, *et al.* The characteristics of vanadium titanomagnetite resources and the status quo of comprehensive recovery and utilization in panxi area[J]. Utilization of Mineral Resources, 2011(6): 6-9.
(谭其元, 陈波, 张裕书, 等. 攀西地区钒钛磁铁矿资源特点与回收利用[J]. 矿产综合利用, 2011(6): 6-9.)
- [7] Wu Benxian. Study on occurrence and comprehensive utilization of main beneficial elements of vanadium titanium-magnetite[J]. Mineral Rocks, 1982: 105-106.
(吴本羡. 钒钛磁铁矿主要有益元素赋存状态的研究与综合利用[J]. 矿物岩石, 1982: 105-106.)
- [8] Cao Yuchuan, Li Huiyue, Li Luhong, *et al.* Experimental study on titanium concentrate separation from Panxi vanadium-titanium magnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021(2): 91-98.
(曹玉川, 李辉跃, 李禄宏, 等. 攀西地区某钒钛磁铁矿选钛工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2021(2): 91-98.)
- [9] Zheng Fulin, An Dengji. Reclaiming ilmenite resources from flotation slime in titanium concentrator of Pan-Xi region[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023(3): 84-88.
(郑涪麟, 安登极. 攀西地区某生产细泥中钛铁矿的可选性研究[J]. 矿冶工程, 2023(3): 84-88.)
- [10] An Dengji. Study on enrichment and recovery of the -0.038 mm grade size ilmenite in Panxi region[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016, 36(8): 70-73.
(安登极. 攀西某地 -0.038 mm 粒级钛铁矿富集回收研究[J]. 矿冶工程, 2016, 36(8): 70-73.)
- [11] Cao Yuchuan, An Dengji, Li Huiyue, *et al.* Research on pre-concentration of a low grade ilmenite ore in Panxi region[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(1): 106-110.
(曹玉川, 安登极, 李辉跃, 等. 攀西某低品位钛铁矿预选试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(1): 106-110.)