



钛磁铁矿选矿技术研究进展

陈超^{1,2}, 张裕书¹, 李潇雨¹, 刘能云¹

(1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 我国是铁矿资源消费大国, 钛磁铁矿源占全国铁矿资源储量的10%以上。本文从钛磁铁矿的工艺矿物学性质、钛磁铁矿选矿工艺、钛磁铁矿精矿提铁降杂及钛磁铁矿选矿过程中元素走向等方面综述了钛磁铁矿的选矿技术研究进展, 指出了今后的重点研究方向。

关键词: 钛磁铁矿; 工艺矿物学; 阶段选; 提铁降杂

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.03.016

中图分类号: TD951 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2021)03-0101-07

我国是铁矿资源消费大国, 2016~2018年连续三年进口铁矿石超过10亿t, 铁矿石对外依存度居高不下。四川攀枝花—西昌地区蕴藏着丰富的钒钛磁铁矿资源, 目前已探明的资源储量达100亿t以上^[1], 铁资源储量占全国铁矿资源储量的10%^[2], 另外承德地区、陕西地区、新疆地区、辽西地区等也有一定的钒钛磁铁矿。因此, 针对巨量的钒钛磁铁矿, 如何获得优质的钛磁铁矿精矿对保障国内铁矿资源供给、降低钢铁行业能耗有重要意义。

1 钛磁铁矿工艺矿物学

钛磁铁矿是攀枝花钒钛磁铁矿可工业利用的复合铁矿物, 亦是钛、钒、铬、锰、镓、钴等组分的主要载体矿物。钛磁铁矿系固溶体分解作用形成的产物, 固溶体中含量较多的溶剂组分所形成的矿物为主晶矿物即磁铁矿, 含量较少的溶质组分形成的矿物称客晶矿物, 即钛铁晶石、钛铁矿、镁铝尖晶石。钛磁铁矿是由主晶矿物和客晶

矿物组成的复合矿物, 客晶矿物一般粒度0.005~0.05 mm, 少数可达0.1 mm。客晶矿物的多寡和矿物的品级有一定关系, Fe1至Fe4, 客晶矿物的含量可从45%降至22%, 攀枝花、白马、太和、红格四大矿区中钛磁铁矿含铁量变化范围分别为56.36%~61.36%、59.26%~60.60%、57.98%~61.87%和56.60%~62.32%^[3]。罗金华等^[4]对红格钒钛磁铁矿的工艺矿物学研究表明, 钛磁铁矿中Fe, Ti, V, Cr是其主要化学成分, 其中Fe与V, Cr元素紧密正相关, Fe与Ti紧密负相关; Ti与Fe, V, Cr呈负相关; V与Cr, Fe呈正相关; 而V-Ti负相关。姚江成等^[5]对攀枝花、白马矿区钛磁铁矿磁性研究结果表明, 攀枝花和白马钛磁铁矿合理的磁选场强分别为90.2~98.4 kA/m和72.6~79.2 kA/m, 它们-0.074 mm粒级合理的脱磁场强分别为63.24~88.55 kA/m和41~57.4 kA/m。李俊翰等^[6]针对凉山州的钒钛磁铁矿工艺矿物学的研究结果表明, 钛磁铁矿的矿物组成主要有钛磁铁矿(68%~90%)、钛铁矿(8%~30%)、钛铁晶石(1%~

收稿日期: 2020-01-11

基金项目: 四川省科技计划项目(2019YFS0452、2019YFS0451); 中国地质调查项目(DD20189501)

作者简介: 陈超(1987-), 男, 助理研究员, 主要从事复杂难选矿产资源综合利用技术研究。

5%)、尖晶石 (0.5% ~ 1.5%)。化学组成主要为铁和钛, 其次为钒、铬和锰, 还含有少量的钙、镁、铝和硅, 部分矿样还含有微量的钴和镍。TFe 含量大致为 48% ~ 63%, TiO_2 为 14% ~ 30%, V_2O_5 约为 1.0% ~ 1.5%, Cr_2O_3 和 MnO 分别约为 0.4% 和 0.5%。钛和锰元素的含量均与铁元素含量呈显著的一元线性负相关关系, 钒和铬均与铁呈显著的一元线性正相关关系。

刘洋等^[7]对西北某钒钛磁铁矿的工艺矿物学研究结果表明, 钛磁铁矿主要呈稀疏—星散浸染状充填于脉石粒间, 少数聚合成不规则团块状, 沿边缘或粒间可见粒状钛铁矿, 粒度较为细小, 一般 0.02 ~ 0.3 mm。矿石中钛磁铁矿次生变化较常见的是赤铁矿化、绿泥石化和榍石化, 主要表现为赤铁矿、绿泥石或榍石沿钛磁铁矿的表面、边缘、粒间、裂隙或解理缝充填交代, 随着蚀变程度的增强, 钛磁铁矿可呈残余状分布。能谱微区成分分析结果显示, 矿石中钛磁铁矿晶体平均含 Fe_3O_4 92.91%、 TiO_2 6.54%、 V_2O_5 0.55%。

许承宝^[8]针对辽西地区低品位风化型钒钛磁铁矿的研究表明, 钛磁铁矿矿石形态较为规则, 主要呈浸染状零星散布在脉石中, 部分与钛铁矿镶嵌, 内部偶见极少量的微粒黄铁矿分布, 粒度一般为 0.02 ~ 0.3 mm。钛磁铁矿的次生变化较为强烈, 绝大部分钛磁铁矿已发生不同程度的蚀变, 主要蚀变类型有假象赤铁矿化和榍石化。假象赤铁矿的能谱微区成分分析结果显示假象赤铁矿中平均含 Fe_2O_3 90.74%、 TiO_2 5.21%、 V_2O_5 0.59%、 SiO_2 0.48%。

李青翠等^[9]对吉林钒钛磁铁矿工艺矿物学研究表明, 钛磁铁矿包括均一的钛磁铁矿和磁铁矿包裹钛铁矿、钛铁晶石固溶体晶片而成的钛磁铁矿。钛磁铁矿晶体最大超过 3 mm, 由于熔蚀钛辉石而多形成海绵陨铁结构, 并部分被钛磁赤铁矿

交代, 形成反应边结构; 钛辉石析出的钛磁铁矿, 矿物颗粒细小, 呈乳滴状、微脉条状, 粒径一般小于 0.074 mm, 部分呈超微粒; 碱性辉绿玢岩中的钛磁铁矿, 颗粒较细, 一般 -0.05 mm, 个别样中小于 0.01 mm, 该矿物多呈骸晶状, 完整的颗粒见内含钛铁晶石细微片晶。粒度统计结果表明, +0.074 mm 80.33%, -0.074 mm 19.67%。

以上研究表明, 不同地区钛磁铁矿成分存在一定的差异, 主要是因为不同地区钛磁铁矿成矿地质条件不同, 导致钛磁铁矿固溶体分离结构存在差异, 攀西地区钛磁铁矿理论含铁量在 56% ~ 62% 左右, 而北方地区钛磁铁矿的理论含铁量可达 65% 左右。

2 钛磁铁矿选矿工艺

碎磨能耗占选矿厂总能耗的 60% ~ 70%, 而磨矿能耗占碎磨能耗的 80% ~ 90%, 多碎少磨可有效平衡磨矿能耗, 磨前预选可大幅提高磨矿效率。但钛磁铁矿的磨前预选需同时考虑钛铁矿的回收率, 利用传统的湿式预选技术, 钛损失率较高。近几年针对攀西钒钛磁铁矿, 开发出一种新型外磁内流式永磁筒式磁选机, 针对磨前粗粒综合预选进行了大量的技术探索与应用。目前, 国内主要有长沙矿冶研究院矿冶装备公司研制的 ZCLA 重磁拉选矿机和北京矿冶研究总院机械所研制的 NLCT(G) 外磁筒式磁选机^[10]。这两个磁选机可以在抛掉大量合格尾矿的同时, 可确保铁、钛的回收率在 90% 左右, 具有良好的预选抛尾性能^[13-14]。

由于钛磁铁矿中的钛铁晶石粒度过于微细, 用机械磨矿方法不易解离出来^[15], 以钛磁铁矿的复合矿物相作为选别目标, 主要目的矿物结晶粒度较粗, 因此钛磁铁矿阶段磨矿 - 阶段选别工艺一直是钛磁铁矿选矿工艺的研究重点。廖祥文等^[16]针对攀西某含 TFe 24.44%、 TiO_2 6.76% 的低品位矿石开展了多种选铁工艺流程的比较实验研究, 结果

表明：若不考虑钛铁矿的回收利用，同时考虑生产过程易行，采用3~0 mm的粗粒抛尾工艺是选铁的较佳工艺流程；若要综合利用钛铁矿，则以原矿一段球磨磨至-0.074 mm 65%左右的两段球磨磁选选铁工艺为较佳选铁工艺流程。为充分利用矿石中钒钛磁铁矿具有较高的剩磁和较强的矫顽力，有利于采用无外加磁场的剩磁团聚重选法这个特点，张裕书^[17]采用磁团聚重选工艺对白马茱茱坪混合矿开展了小型实验和扩大连续实验，当最终精矿粒度为-0.076 mm 40%时，获得了TFe品位57%以上，回收率为69%左右的高质量铁精矿。李红玲等^[18]针对某含TFe 18.43%、TiO₂ 8.63%低品位钒钛磁铁矿，进行了原矿磨矿-磁选工艺和粗粒抛尾-阶段选别工艺的对比实验。由实验结果表明粗粒抛尾-阶段选别工艺更适合该矿石。对粗粒抛尾所得的精矿进行了细磨-弱磁精选工艺和粗磨-磁团聚工艺的对比实验，实验结果表明采用粗磨-磁团聚工艺更经济、更合理。随着开采深度的增加，攀西地区采出矿石辉长岩、辉石岩含量逐渐降低，而橄辉岩含量逐渐提高，导致企业采用原工艺无法获得合格的铁精矿产品，为给红格中深部难选橄辉岩型钒钛磁铁矿石合理选矿工艺确定提供依据，杨耀辉等^[19]对TFe品位为14.75%、TiO₂含量为5.59%的红格中深部钒钛磁铁矿，破碎至-3 mm经湿式预选抛尾，可以获得TFe品位为21.05%、回收率为83.61%的预选精矿，预选精矿经磨矿-弱磁选-搅拌磨再磨-弱磁粗选-磁团聚重选机精选，可以获得TFe品位为57.25%、回收率为46.54%的精矿，铁精矿TiO₂含量为9.55%。

高压辊磨机由于其具有结构简单、噪声小、磨碎比大、占地面积小、高效、节能等一些细碎设备所不能比拟的优点，近年来成了处理钒钛磁铁矿的研究热点。杨任新^[20]针对攀西红格低品位钒钛磁铁矿采用原矿高压辊磨-粗粒湿式磁选抛

尾-阶段磨矿、阶段弱磁选选铁，获得了铁品位为57.41%、铁回收率为52.88%的铁精矿，通过采用高压辊磨技术，可使选铁过程磨选量减少34.18%。李丽匣等^[21]对攀西钒钛磁铁矿进行了高压辊磨超细碎及其选别实验，当P80为1.55 mm时，采用“铁钛平行分选”工艺对高压辊磨超细碎的-3.2 mm攀西钒钛磁铁矿进行了选别实验，选铁流程在磨矿细度在-0.074 mm 45%时，铁精矿TFe品位可达55.05%，回收率70.64%。王凡^[22]对高压辊磨实验粒度进行了筛分实验，结果表明，原矿经过高压辊磨机后，细粒级含量大幅度提高，可以筛分出部分合格粒级，降低球磨入料量，符合“多破少磨”的选矿思想，还对其相对可磨度进行了研究，在入磨粒度为6~0 mm时，经高压辊磨后磨矿效率得到了显著提高。

筛分是提高铁精矿品位及降低磨矿粒度的有效手段之一。钟君^[23]针对攀西某钒钛磁铁矿选矿工艺流程存在的原流程中旋流筛筛分效率低、效果差，已单体解离的矿物再次进入2次磨矿循环系统产生过磨，造成2次循环量大，影响精矿品位和回收率的提高且制约1次磨机台时能力提高等一系列问题，采用GPS1410-3型高频振动细筛替代原旋流筛进行2段磨矿分级，改造后筛分效率平均达72.70%，质效率达53.34%，最终过滤精矿TFe品位达54.78%，有效降低了入磨量。

磁场筛是在尽量均匀设置的磁场中，将入选磁性物磁化连接成平行于磁力线的链状磁聚体，同时用尽量平行于磁力线设置的筛面将未磁化的分散颗粒杂质筛除，它可有效的清除磁性产品中的连生体杂质，并可分选粒度范围较宽的物料^[24]。付冠文^[25]针对太和一段精矿再磨前直接经磁筛精选，可预先获得一部分铁品位为56%以上的合格精矿，且减少约60%的再磨量。刘长森等^[26]针对云南安益钛磁铁矿，采用“弱磁粗选-磁筛精选”流程，

控制磨矿细度为 -0.074 mm 50%，可获得 TFe 品位 55.85%、回收率为 59.16% 的钛磁铁矿精矿。

3 钛磁铁矿精矿提铁降杂

提高钒钛磁铁矿铁精矿铁品位对降低高炉渣量、提高高炉产率、降低焦比有着显著的效果^[27]。2004 年攀钢矿业公司实施了阶磨阶选改造，将攀精矿的品位由 52.5% 全部提高到 54.0% 以上，分析表明，采用高品位精矿替代进口矿、增加中品位加工粉配比方案，烧结原料成本下降 7.7 元/t，炼铁原料成本下降 12 元/t^[28]。因此，对铁精矿的提质降杂具有重要意义。吴雪红^[29]通过对密地选厂七段阶磨阶选的极限探索实验，最终将铁精矿 TFe 品位提高至接近其理论品位，达到 57.30%。李国平等^[30]应用 SXCT 湿式高频谐波磁场磁选机，通过产生高频磁扰动来打破磁团聚，大幅提高分选精度，经工业考察可实现 TFe 品位提高 1.85%、铁回收率达 96.12%。陈超等^[31]针对攀枝花铁精矿分别采用细磨深选、粗细粒级分别分选、复合力场分选（包括新型提铁降杂磁选机磁选、磁选柱分选、磁场筛分选）等工艺进行了提铁降杂实验研究，结果表明，无论采用何种磁选工艺，均可有效提高攀枝花铁精矿品位 2 个百分点以上，且能保证回收率在 97% 以上。库建刚^[32]研究了钛磁铁矿磁选行为及磁链形成机理，针对钛磁铁矿粗细粒级磁性的差异，提出了粗细粒级分别磁选的工艺，结合不同粒级磁选行为的差异，建立了单个矿粒模型和磁链模型，并运用磁链模型较好地解释了磁团聚对磁选精矿指标的影响。

攀枝花地区钒钛磁铁矿普遍分布有硫化物。硫化物的矿物量，不同矿区不同层位有差别，攀枝花矿区 8.72%~0.05%；白马矿区 2.59%~0.4%；太和矿区 4.03%~0.34%，红格矿区 7.15%~0.13%。硫化物的矿物种类很多，主要是磁黄铁矿，占硫化物总数的 80% 以上，在选矿过程中，进入铁精

矿中的硫化物以磁黄铁矿为主，黄铁矿次之，两者占硫化物总量的 25%~30%^[33-34]。随着攀西地区开采深度的加深，其硫含量也越来越高，甚至部分已经影响到了铁精矿的后续利用，现阶段攀枝花密地选厂铁精矿含 S 0.8% 左右，白马选厂铁精矿含 S 0.5% 左右，且有升高的趋势。普通高炉冶炼钒钛磁铁矿，因其高钛型炉渣冶炼的特殊性，炉渣脱硫能力低，致生铁含硫偏高^[35]，因此，对冶炼原料提出了更高的要求。

陈超等^[36]针对攀枝花铁精矿开展了磨矿-磁选-浮选提铁降杂实验，TFe 品位从 53.65% 提高到了 56.60%，S 含量从 0.81% 降低到了 0.32%，铁回收率在 95% 左右，提铁降杂效果明显。熊涛等^[37]对云南某钛磁铁矿进行了磁选提铁和精矿反浮选降硫实验，可获得铁品位 67.04%、S 含量 0.11% 的优质钛磁铁矿精矿。谢美芳等^[38]针对 TFe 含量 53.52% 的钛磁铁矿精矿，经磁选-浮选后获得了 TFe 品位 57.17%，S 含量 0.26% 的铁精矿，铁回收率为 89.94%。由此可以看出，钛磁铁矿精矿中的硫通过常规浮选，可有效降低铁精矿中的硫含量。

4 钛磁铁矿选矿过程元素走向

陈超等^[39]针对某低品位钒钛磁铁矿采用干式预选抛尾-阶段磨矿阶段选别，获得了 TFe 品位 60.57% 的铁精矿，还研究了主要元素在选铁过程中的走向，经过干式粗粒抛尾以后，铁、钛、钒、铬、钨、钴、镍等元素皆主要在粗抛精矿中富集；经过湿式磁选以后，铁精矿中钒、铬得到了较好的富集，钴、镍有一定程度的富集，而钨主要富集在弱磁选尾矿中，硫在干式尾矿中含量较低，在铁精矿中有一定程度富集。罗金华等^[40]研究了红格钒钛磁铁矿在选矿过程中的元素分布，红格钒钛磁铁矿属高钛高铬型磁铁矿，其化学成分主要含有 Fe、Ti、V、Cr、Si、Mg、Ca、Al、Cu、Co、Ni、Mn、S 等元素。Fe、Ti、V、Cr 在

钛磁铁矿中的分配率分别为77.274%、42.228%、83.362%、95.527%，Fe、V、Cr主要赋存在钛磁铁矿中。铁精矿中Fe、Ti、V、Cr的品位分别为56.44%、11.96%、0.82%、1.76%。

5 结论与建议

目前钛磁铁矿选矿技术较为成熟，针对钛磁铁矿的选矿主要集中在预选技术、多碎少磨和阶段磨矿阶段选别工艺的开发。提铁降杂近年来铁矿选矿研究的热点，近十多年实施的“提铁降杂”战略主要聚焦于提高钛磁铁矿精矿中的铁品位，且取得了显著的成效。今后应重点关注铁精矿中有害组分的脱除和有害组分的综合利用，因此在钛磁铁矿选别过程中，需尤为注意各元素的分布与走向，尽可能的综合利用其中的有益元素，同时降低有害组分对后续工艺的影响。

参考文献：

- [1] 邓君, 薛逊, 刘功国. 攀钢钒钛磁铁矿资源综合利用现状与发展[J]. 材料与冶金学报, 2007(2):83-86+93.
DENG J, XUE X, LIU G G. Present situation and development of comprehensive utilization of vanadium titanomagnetite resources in Panzhihua iron and steel group [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2007(2): 83-86+93.
- [2] 邱克辉, 恭迎春, 张佩聪, 等. 科学可持续发展攀枝花钒钛产业[J]. 钢铁钒钛, 2009, 30(3):17-20.
QIU K H, GONG Y, ZHANG P C, et al. Discussion on scientific sustainable development of vanadium and titanium industry in Panzhihua[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2009(3):17-20.
- [3] 周满赓, 李潇雨, 王婧. 攀枝花钛磁铁矿性质变化对铁精矿品位的影响[J]. 矿产综合利用, 2012(5):29-31.
ZHOU M G, LI X Y, WANG J. Influence of property changes of Panzhihua titanium magnetite on iron concentrate grade[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2012, 000(005):29-31,28.
- [4] 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, 33(3):1-6.
LUO J H, QIU K H, ZHANG P C, et al. Study of mineralogical characteristics of titano-magnetite in Hongge vanadium titano-magnetite[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2013(3):1-6.
- [5] 姚江成, 程希翱. 攀枝花、白马矿区钛磁铁矿磁性研究[J]. 矿冶工程, 1991, 11(4):37-40.
RAO J C, CHENG X. Study on magnetic properties of titanomagnetite ore at Baima Mining area, Panzhihua mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1991(4):37-40.
- [6] 李俊翰, 孙宁, 马兰, 等. 攀西某钒钛磁铁矿中钛磁铁矿的矿物特征研究[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(5):104-111.
LI J H, SUN N, MA L, et al. Study on the mineralogical characteristics of titano-magnetite of V-Ti magnetite ore in Panxi region[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018(5):104-111.
- [7] 刘洋, 王利珍. 西北某钒钛磁铁矿矿石的工艺矿物学研究[J]. 矿产与地质, 2016(6):988-992.
LIU Y, WANG L. Process mineralogy of ores from a certain vanadium titano-magnetite deposit in northwest China. Mineral Resources and Geology, 2016(6):988-992.
- [8] 许承宝. 辽西钒钛磁铁矿工艺矿物学及选矿预富集工艺研究[D].
XU C B. Process mineralogy and pre-concentration technology of vanadium-titanium magnetite ore from western Liaoning[D]. Wuhan:Wuhan University of science and technology, 2018.
- [9] 李青翠, 逯东霞, 雷引玲, 等. 吉林省某钒钛磁铁矿工艺矿物学研究[J]. 矿业工程, 2013, 11(4):6-9.
LI Q C, LU D X, LEI Y L, et al. Jilin some vanadium titano magnetite processing mineralogy research[J]. Mining Engineering, 2013(4):6-9.
- [10] 胡永会, 尚红亮. 攀西地区新型外磁磁选技术探索与实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(3):76-83+96.
HU Y H, SHANG H. Exploration and application of new external-magnetic magnetic separation technique in Panxi region. Non-ferrous metals (mineral processing section), 2018(3):76-83+96.
- [11] 曾尚林, 曾维龙, 李辉跃, 等. 攀枝花白马钒钛磁铁矿选矿新技术研究[J]. 矿冶工程, 2015(z1):9-13.
ZENG S L, ZENG W L, LI H Y, et al. New processing technique for the vanadium-titanomagnetite from Panzhihua Baima iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2015(z1):9-13.
- [12] 成磊, 尚红亮. 新型外磁磁选机用于某钒钛磁铁矿的预选试验[C]. 中国矿业科技文汇—2015:32-35.
CHENG L, SHANG H L. Application of new external magnetic separator in the preconcentration of a vanadium titanium magnetite [C]. China mining science and technology collection

- 2015.2-35

[13] 朱俊士. 中国钒钛磁铁矿选矿 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.

ZHU J S. Beneficiation of vanadium titanium magnetite in China [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.

[14] 廖祥文, 张裕书, 陈达. 攀西某低品位钒钛磁铁矿选铁试验研究 [J]. 矿产综合利用, 2006(3):3-6.

LIAO X, ZHANG Y S, CHEN D. Experimental research on the technology for iron separation from low-grade vanadiferous titanomagnetite ore in Panxi [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2006(3):3-6.

[15] 张裕书. 白马钒钛磁铁矿磁团聚重选法选铁实验研究 [J]. 矿产综合利用, 1992(5):5-10.

ZHANG Y S. Experimental study on magnetic agglomeration gravity separation of Baima vanadium titanium magnetite [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1992 (5): 5-10

[16] 李红玲, 董小骥. 攀枝花某低品位钒钛磁铁矿选铁工艺对比实验 [J]. 矿产保护与利用, 2013(3):28-30.

LI H L, DONG X J. Contrast experiment of iron separation technology for a low-grade vanadium-titanium magnetite in Panzhihua [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2013(3):28-30.

[17] 杨耀辉, 惠博, 廖祥文, 等. 红格低品位难选微辉岩型钒钛磁铁矿石选矿实验 [J]. 金属矿山, 2016, 45(10):77-82.

YANG Y H, HUI B, LIAO X, et al. Beneficiation test on low-grade and refractory olivine-pyroxenite type vanadium-titanium magnetic ore from Hongge [J]. Metal Mine, 201645(10):77-82.

[18] 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):47-50.

YANG R X. Investigation on beneficiation process of Hongge vanadium and titanium magnetite with application of high pressure roller mill [J]. Metal Mine, 2011(2):47-50.

[19] 李丽匣, 袁致涛, 郭小飞, 等. 高压辊磨超细碎对攀西钒钛磁铁矿分选的影响 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2013, 34(9):1335-1338.

LI L X, YUAN Z T, GUO X F, et al. Influence of ultra-fine comminution by HPGR on separation of V-Ti magnetite in Panxi [J]. Journal of Northeastern University(Natural ence), 2013(9):1335-1338.

[20] 王凡. 某钒钛磁铁矿高压辊磨碎矿试验 [J]. 现代矿业, 2015(1):189-190.

WANG F. High pressure roller grinding test of a vanadium titanium magnetite [J]. Modern mining, 2015 (1): 189-190

[21] 钟君. GPS1410-3 高频振动细筛在攀西某钒钛磁铁矿流

程改造中的应用 [J]. 现代矿业, 2012, 28(9):101-104.

ZHONG J. Application of GPS1410-3 high frequency vibrating fine screen in process transformation of a vanadium titanium magnetite ore in Panxi [J]. Modern mining, 2012, 28 (9): 101-104

[22] 王成学, 简少芳, 付民. 磁场筛选法及其设备:CN1132118[P]. 1996.

WANG C X, JIAN S F, FU M. magnetic field screening method and its equipment: CN1132118 [P]. 1996

[23] 付冠文. 太和铁矿一段铁精矿磁筛精选实验研究 [J]. 金属矿山, 2010, 39(8):59-62.

FU G W. Experimental Research on the Magnetic Screening for Crude Concentrate at Taihe Iron Mine [J]. Metal Mine, 2010, 39 (8):59-62.

[24] 刘长淼, 吴东印. 云南安益钛磁铁矿选铁实验研究 [J]. 中国矿业, 2014(2):116-119.

LIU C M, WU D Y. Experimental of recovering titanite magnetite from Anyi mine in Yunnan province. China Mining Magazine, 2014(2):116-119.

[25] 张建树, 冯成建. 提高钒钛铁精矿品位及其对高炉生产的影响 [J]. 钢铁钒钛, 1999(2):17-23.

ZHANG J S, FENG C J. Improvement of concentrate grade of vanadic titanomagnetite and its effect on operation of blast furnace. Iron steel vanadium titanium, 1999(2):17-23.

[26] 饶家庭, 王敦旭, 康斌, 等. 攀钢低成本炼铁技术现状与建议 [J]. 四川冶金, 2013, 35(1):7-13.

RAO J T, WANG D X, KANG B, et al. Current situation and proposals of low cost iron-making of pangang [J]. Sichuan Metallurgy, 2013, 35(1):7-13.

[27] 吴雪红. 提高密地选矿厂铁精矿品位的试验研究 [J]. 矿冶工程, 2013, 33(6):38-41.

WU X H. Experimental study on improving TFe grade of iron concentrate in Midi concentrator [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(6):38-41.

[28] 李国平, 赵海亮, 尚红亮, 等. SXCT 型湿式高频谐波磁场磁选机在攀西钒钛磁铁矿中的应用 [J]. 有色金属 (选矿部分), 2019(01):100-104.

LI G P, ZHAO H L, SHANG H L, et al. Application of the SXCT wet type high frequency harmonic magnetic separator in the separation of Panxi V-Ti magnetite [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2019(01):100-104.

[29] 陈超, 张裕书, 张少翔, 等. 攀枝花铁精矿磁选提铁降杂工艺研究 [J]. 矿产保护与利用, 2018, 214(2):69-73.

CHEN C, ZHANG Y S, ZHANG S X, et al. Improving

quality of Panzhihua iron concentrate by magnetic separation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018, 214(2):69-73.

[30] 库建刚. 钛磁铁矿磁选行为及磁链形成机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.

KU J G. Magnetic separation behavior and flux linkage formation mechanism of titanomagnetite [D]. Kunming: Kunming University of science and technology, 2007.

[31] 李潇雨, 周满赓, 王婧, 等. 攀西钒钛磁铁矿硫族元素工艺矿物学研究[J]. 中国矿业, 2016, 25(1):118-124.

LI X Y, ZHOU M G, WANG J, et al. Craft mineralogy research of chalcogens in Panxi vanadium-titanium magnetite. China Mining Magazine, 2016, 25(1):118-124.

[32] 胡厚勤. 攀枝花钒钛磁铁矿中硫化物的工艺矿物学研究[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(5):57-62.

HU H Q. Process mineralogy study on sulfide in Panzhihua vanadium-titanium magnetite[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2015, 36(5):57-62.

[33] 何绍刚. 攀钢高炉提高生铁质量的实践[J]. 四川冶金, 1998(1):19-21.

HE S G. Practice of improving pig iron quality in blast furnace of Pangang [J]. Sichuan Metallurgy, 1998 (1): 19-21

[34] 陈超, 张裕书, 张少翔, 等. 攀枝花铁精矿特性及提铁降杂实验研究[J]. 矿产综合利用, 2018(03):61-64.

CHEN C, ZHANG Y S, ZHANG S X, et al. Characteristics

of Panzhihua iron concentrate and its experimental research on improving iron content by decreasing impurities[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(03):61-64.

[35] 熊涛, 谢美芳, 苏卫. 某钛磁铁矿选矿工艺实验研究[J]. 矿冶工程, 2014, 34(1):51-53.

XIONG T, XIE M F, SU W. Experimental study on beneficiation process of a titanomagnetite [J]. Mining and metallurgical engineering, 2014, 34 (1): 51-53

[36] 谢美芳, 文书明, 郑海雷. 钒钛磁铁矿精矿提铁降硫工艺实验研究[J]. 金属矿山, 2010(7):44-46.

XIE M F, WEN S M, ZHENG H L. Experimental study on iron improvement and desulphurization of a vanadium-titanium magnetite concentrate[J]. Metal Mine, 2010(7):44-46.

[37] 陈超, 张裕书, 张少翔, 等. 某低品位钒钛磁铁矿选铁实验及选铁过程中元素走向[J]. 钢铁钒钛, 2018(2):85-91.

CHEN C, ZHANG Y S, ZHANG S X, et al. Iron recovery of a low grade vanadium-titanium magnetite and the element distributions in the process[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018(2):85-91.

[38] 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.

LUO J H. Distribution of main elements of Hongge vanadium titanium-magnetite in mineral processing[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2015(3):55-58.

Research Progress in Titanium-magnetite Beneficiation Technology

Chen Chao^{1,2}, Zhang Yushu¹, Li Xiaoyu¹, Liu Nengyun¹

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan, China; 2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China)

Abstract: China is a major consumer of iron ore resources. Titanium-magnetite accounts for more than 10% of the country's iron ore reserves. In this paper, the research progress of titanium-magnetite beneficiation technology is reviewed from the aspects of titanium-magnetite process mineralogy characteristics, titanomagnetite beneficiation technology, titanium-magnetite concentrate iron and impurity reduction, and element trend in the titanomagnetite beneficiation process. The research directions in the future are pointed out.

Keywords: Titanium-magnetite; Process mineralogy; Staged grinding staged concentration; Iron upgrading and impurity reducing