

创新钒钛磁铁矿选矿过程中铁、钛计量方式的探讨

陈超, 杨耀辉, 李潇雨, 张裕书, 徐妍博

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 自然资源部战略性矿产综合利用工程技术创新中心, 四川 成都 610041)

摘要: 这是一篇矿物加工工程领域的论文。钒钛磁铁矿是我国重要的战略资源, 传统的元素计量方式难以直接回答钒钛磁铁矿综合利用的提升空间等问题, 不利于对钒钛磁铁矿生产企业的监管和及时有效提升钒钛磁铁矿的综合利用。使用元素计量加矿物计量的方式, 可以直观的反应出钒钛磁铁矿的分选过程特征, 有效促进钒钛磁铁矿资源的节约与综合利用。实现新的计量方式, 需加强钒钛磁铁矿矿物定量测试方法和矿物平衡计算方法的研究和标准的制定。

关键词: 矿物加工工程; 钒钛磁铁矿; 计量方式; 定量测试; 矿物平衡

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.04.009

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 04-0062-04

钒钛磁铁矿是我国重要的战略资源, 是铁、钛、钒等多种金属的主要载体^[1]。我国钒钛磁铁主要分布在四川攀西、河北承德、辽宁朝阳、陕西洋县、湖北均县、湖北襄阳、广东兴宁及山西代县等地区, 已探明钒钛磁铁矿储量约 100 亿 t, 远景储量在 300 亿 t 以上^[2]。其中铁矿资源占全国的 20% 左右, 钛资源占全国的 90% 左右, 钒资源占全国的 50% 左右^[3]。因此, 如何利用好我国具有优势的战略性矿产资源, 是当代科技工作者的重要使命。经过几代人的努力, 攀西地区钒钛磁铁矿中铁、钒、钛资源的利用率分别达到了 70%、44%、29%, 使传统认为不可用的资源, 得到了较好的开发利用^[4-5]。

攀西地区钒钛磁铁矿的综合利用率是否能继续提升, 其提升的空间如何, 单从钒钛磁铁矿产品中铁和钛的品位及回收率指标上来看, 难以准确回答, 需要从钒钛磁铁矿的性质说起。

钒钛磁铁矿中的主要工业矿物为钛磁铁矿和钛铁矿。钛磁铁矿是主要的含铁工业矿物, 亦是钛、钒、铬、锰、镓、钴等组分的主要载体, 是固溶体分离作用形成的产物, 由主晶磁铁矿和客

晶钛铁晶石、钛铁矿和镁尖晶石组成的复合型矿物, 钒以类质同像的形式存在于磁铁矿中^[6]。客晶矿物的含量与矿石品级相关, 变化范围为 22%~45%。攀枝花、白马、太和、红格四大矿区钛磁铁矿中铁含量的变化范围分别为 56.36%~61.36%、59.26%~60.60%、57.98%~61.87% 和 56.60%~62.32%^[7]。钛铁矿主要是指与钛磁铁矿密切共生的粒状钛铁矿, 是固溶体分离作用形成的产物, 是由主晶钛铁矿和客晶钛磁铁矿、镁铝尖晶石、赤铁矿和镁钛矿组成的复合型矿物。钛铁矿中 Fe^{2+} 与 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 间可为完全类质同像代替, 产于超基性岩、基性岩中的钛铁矿 MgO 含量通常较高。钛铁矿中 TiO_2 理论值为 52.65%, 实际上四大矿区钛铁矿的化学成分见表 1^[8]。

表 1 钛铁矿的主要化学成分/%
Table 1 Main chemical composition of ilmenite

矿区名称	TiO ₂	TFe	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Al ₂ O ₃
攀枝花	51.41	32.27	35.50	6.68	4.63	0.57	0.24	0.53
白马	51.14	33.30	38.39	4.94	2.89	0.79	0.34	0.54
太和	51.68	33.08	37.92	5.15	3.54	0.62	0.54	0.30
红格	51.20	32.85	38.54	4.14	3.94	0.80	0.27	0.31

收稿日期: 2022-06-02

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目 (DD20221697、DD20230354); 四川省科技计划项目 (2019YFS0452)

作者简介: 陈超 (1987-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事复杂难选矿产资源综合利用研究。

对于钒钛磁铁矿中主要回收的两种金属产品，钛磁铁矿和钛铁矿，均没有固定的化学成分，其主要成分均为铁和钛的氧化物，如果仅仅以传统的铁含量（TFe）和钛含量（TiO₂）来计量钒钛磁铁矿的品位和回收率等指标，难以直观的反映出该过程矿物组分的选别效果。例如，表2为白马铁精矿与密地铁精矿中铁含量对比，如果单从铁含量来看，白马铁精矿中铁含量明显高于密地铁精矿，但结合其理论含铁量，白马铁精矿的提升空间明显大于密地铁精矿，也就是说白马铁精矿中的杂质含量高于密地铁精矿。因此，创新钒钛磁铁矿的计量方式，用以更好的反映在钒钛磁铁矿资源加工过程中的分选指标，帮助客观评价钒钛磁铁矿综合利用率提升空间，为进一步实现钛磁铁矿或钛铁矿的高效资源化利用提供研究思路，从而有效促进钒钛磁铁矿综合利用水平

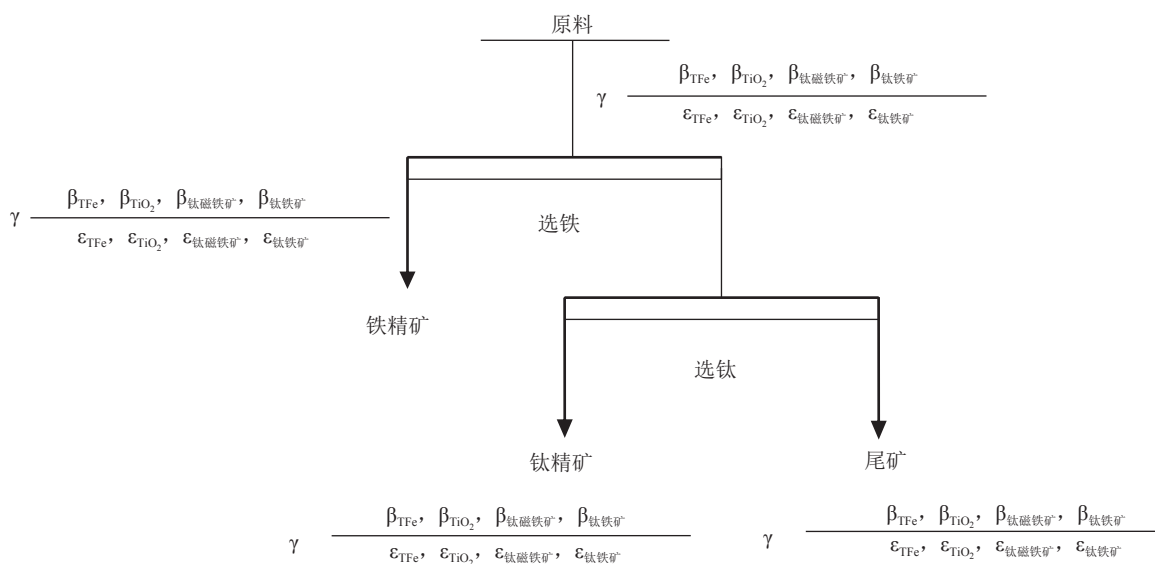
的提升，助力解决我国铁、钛资源短缺问题。

表2 白马铁精矿与密地铁精矿中铁含量对比/%
Table 2 Comparison of iron content between Baima iron concentrate and Midi iron concentrate

产地	铁精矿中TFe	铁精矿中钛磁铁矿	铁精矿理论TFe
白马	55.53	93.14	59.62
密地	54.14	95.25	56.83

1 新计量方式设想

计量是为实现单位统一，量值准确可靠的活动，计量在工业企业生产中起着基础性作用^[9]。新的计量方式既要反映出传统铁、钛资源的回收利用情况，也要结合钒钛磁铁矿资源的特点反应出加工过程的分选效果。因此，建议按照图1的方式来计量钒钛磁铁矿的选别过程。



（图中 γ 为产率， β 为含量， ε 为回收率，单位均为%）

图1 钒钛磁铁矿选矿过程中铁、钛计量方式示意

Fig.1 Schematic diagram of new measurement methods of iron and titanium in vanadium titanium magnetite beneficiation process

从图1中，除了可以清晰的了解到铁、钛金属的回收情况外，还可以清晰的看出钛磁铁矿和钛铁矿的纯度及在每个流程的损失情况，这样可以更具针对性的提出解决方案。

2 采用新计量方式需要加强的工作

新计量方式虽然可直观反应出每个作业的选别效果，但是也存在工作量较大、工作标准不统一的相关问题。因此，需从以下两个方面加以统

一和完善。

首先，是钛磁铁矿和钛铁矿的矿物定量测试问题。基于扫描电镜、能谱及相应软件组成的矿物自动分析系统，利用背散射电子图像区分不同物相，灵活利用能谱分析快速而不失全面准确鉴定矿物，再充分利用图像分析技术获取工艺矿物学相关参数，可以实现矿物的自动鉴定、单体解离度测定、矿石理论品位和回收率的计算等^[10]。但是，针对钛磁铁矿和钛铁矿等固溶体矿物，由

于没有相关的测试标准,各单位主要依据相关软件自带数据库和自己的相关经验来测定样品的矿物含量,存在一定的局限性。针对不同矿区的钛磁铁矿和钛铁矿,由于其固溶体特性差异,不能用一套数据库或标准样品来标定矿物含量,不同矿区的钛磁铁矿和钛铁矿的可比性较小,即便是同一矿区,不同深度的样品可能也存在较大的区别。因此,钛磁铁矿和钛铁矿的定量测试,需建立标准的测试方法和测试流程。该方法应综合考虑钛磁铁矿和钛铁矿的固溶体特性、选矿工艺流程特点等,结合扫描电镜、能谱、矿物自动分析系统等新兴分析测试方法工作原理,在统计矿物含量时,需按一定规则将钛磁铁矿中的部分钛铁晶石、片状钛铁矿等统计为钛磁铁矿,将钛铁矿中少量镁钛矿、钛磁铁矿等统计为钛铁矿,但在计算矿物利用品位时,需扣除杂质元素含量。

其次,是钛磁铁矿和钛铁矿的矿物平衡计算问题。新计量方式既要考虑元素的计量,也要考虑矿物组分的计量,且元素计量和矿物组分计量之间存在一定联系。如何准确计量和平衡计算,是实现新计量方式的一个重要挑战,需考虑以下两个方面的问题。

第一,元素平衡。针对某单一样品,需查清样品中的元素含量与固溶体矿物含量,以及其他矿物中所含主元素的含量,针对不同的测试数据,应满足以下公式:

$$\begin{aligned} \text{铁含量} = & \text{钛磁铁矿矿物含量} \times \\ & \text{钛磁铁矿中铁的含量(铁精矿理论品位)} + \\ & \text{钛铁矿矿物含量} \times \text{钛铁矿中铁的含量} + \\ & \text{其他含铁矿物含量} \times \text{该矿物中铁的含量}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{钛含量} = & \text{钛磁铁矿矿物含量} \times \text{钛磁铁矿中钛的含量} + \\ & \text{钛铁矿矿物含量} \times \text{钛铁矿中钛的含量(钛精矿理论品位)} + \\ & \text{其他含钛矿物含量} \times \text{该矿物中钛的含量}; \end{aligned} \quad (2)$$

由于各类测试方法均可能存在一定的误差,以上的公式不可能完全相等,因此需通过大量的样品分析测试,建立标准的方法体系来规范其误差范围和修正方法,以便于下一步矿物平衡的计算。

第二,矿物平衡。针对某一分选过程,矿物的平衡至关重要,可很好地反映出在分选过程中矿物组分的走向和在不同产品中的分布规律,反映出选别过程对矿物组分的分选效率。针对某一选别过程,需满足的公式如下:

$$\begin{aligned} \text{原矿产率} \times \text{原矿中钛磁铁矿含量} = & \text{精矿产率} \times \\ & \text{精矿中钛磁铁矿含量} + \text{尾矿产率} \times \\ & \text{尾矿中钛磁铁矿含量} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{原矿产率} \times \text{原矿中钛铁矿含量} = & \text{精矿产率} \times \\ & \text{精矿中钛铁矿含量} + \text{尾矿产率} \times \text{尾矿中钛铁矿含量} \end{aligned} \quad (4)$$

以上计算结果同样也需按照一定的方法修正误差。

3 结论与建议

(1) 创新钒钛磁铁矿选矿过程中铁、钛计量方式,直观反应出钒钛磁铁矿的分选过程特征,可强化钒钛磁铁矿资源中有价组分的有效监管,有效促进钒钛磁铁矿资源的节约与综合利用。

(2) 实现新的计量方式,需加强钒钛磁铁矿矿物定量测试方法的研究和测试标准的制定,在此基础上,制定矿物平衡的计算方法和误差控制方法,进而使该方法更具有科学性和普适性,适用于不同矿区、不同矿床深度的钒钛磁铁矿资源化利用过程的计量与监管。

参考文献:

- [1] 陈福林,杨晓军,蔡先炎,等.攀西地区白马辉长岩型超低位钒钛磁铁矿选铁试验研究[J].矿产综合利用,2020(6):26-30.
- CHEN F L, YANG X J, CAI X Y, et al. Experimental study on iron separation of Baima Gabbro-type ultra-low-grade vanadium-titanomagnetite in Panxi Area[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):26-30.
- [2] 胡克俊.攀西钒资源的开发与利用现状[C]//中国科协2002年学术年会,成都,2002.
- HU K J, Current situation of development and utilization of vanadium resources in Panxi [C]//2022 academic annual meeting of China Association for science and technology, Chengdu, 2002.
- [3] 严伟平,曾小波.攀西地区钒钛磁铁矿资源开发利用水平评估方法研究[J].矿产综合利用,2020(6):79-83.
- YAN W P, ZENG X B. Study on the evaluation method of development and utilization level of vanadium-titanium magnetite mine in Panxi District[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(6):79-83.
- [4] 谭其尤,陈波,张裕书,等.攀西地区钒钛磁铁矿资源特点与综合回收利用现状[J].矿产综合利用,2011(6):6-10.
- TAN Q Y, CHEN B, ZHANG Y S, et al. Characteristics and

current situation of comprehensive utilization of vanadium titano-magnetite resources in Panxi Region[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2011(6):6-10.

[5] 徐丽君, 李亮, 陈六限, 等. 攀西地区钒钛磁铁矿综合回收利用现状及发展方向[J]. *四川有色金属*, 2011(1):1-5.

XU L J, LI L, CHEN L X, et al. Comprehensive recycling situation and development direction of vanadium-titanium magnetite in PanXi[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2011(1):1-5.

[6] 陈超, 张裕书, 李潇雨, 等. 钛磁铁矿选矿技术研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2021(3):99-105.

CHEN C, ZHANG Y S, LI X Y, et al. Research progress in titanium-magnetite beneficiation technology[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(3):99-105.

[7] 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+28.

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(5):29-31+28.

[8] 中国地质科学院矿产综合利用研究所. 攀西钒钛磁铁矿资源及综合利用技术 [M]. 冶金工业出版社, 2015.

Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, CAGS. Panxi vanadium titanium magnetite resources and comprehensive utilization technology [M]. Metallurgical Industry Press, 2015.

[9] 谷馨, 刘殿业. 计量工作的重要性[J]. *品牌与标准化*, 2014(10):40.

GU X, LIU D Y. Importance of measurement[J]. *Enterprise Standardization*, 2014(10):40.

[10] 惠博, 曾令熙, 刘飞燕. 工艺矿物自动定量分析系统 (MLA) 测量原理, 方法及应用 [C]//全国地质分析与矿产资源综合利用技术学术研讨会, 延安, 2011.

HUI B, ZENG L X, LIU F Y. Measuring principle, method and application of automatic quantitative analysis system (MLA) for process minerals [C]//National Symposium on Geological Analysis and Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Yan'an, 2011.

Discussion on Novel Measurement Method of Iron and Titanium in Vanadium Titanium Magnetite Beneficiation Process

Chen Chao, Yang Yaohui, Li Xiaoyu, Zhang Yushu, Xu Yanbo

(Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Technology Innovation Center for Comprehensive Utilization of Strategic Minerals Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: This is an essay in the field of mineral processing engineering. Vanadium titanium magnetite is an important strategic resource in China. The traditional element measure method is difficult to directly answer the problems such as the promotion space of comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite, which is not conducive to the supervision of vanadium titanium magnetite production enterprises and the timely and effective improvement of comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite. The separation process characteristics of vanadium titanium magnetite can be directly reflected by the way of element measure and mineral measure, which can effectively promote the saving and comprehensive utilization of vanadium titanium magnetite resources. In order to realize the new measure method, it is necessary to strengthen the research on quantitative measurement method and mineral balance calculation method of vanadium titanium magnetite and to formulate the standard.

Keywords: Mineral processing engineering; Vanadium titanium magnetite; Measure methods; Quantitative measurement; Mineral balance