

沉积型钛铁矿品位计算方法

彭程

海南国际资源(集团)股份有限公司,海口, 570206



Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

内容提要: 沉积型钛铁矿品位计算中时常出现简化计算公式,忽视钛铁矿中 TiO₂ 实际含量和钛物相分布中钛铁矿占比等因素,导致钛铁矿品位计算数据偏差,影响钛铁矿储量计算和项目经济测算。为了减少钛铁矿品位计算的错误,本文以莫桑比克和马拉维钛铁矿项目勘查资料数据为基础,论述钛铁矿物中 TiO₂ 实测含量及钛物相分析中钛铁矿占比的意义,正确运用钛铁矿品位计算公式,使沉积型钛铁矿品位计算更接近实际,为提升钛铁矿砂矿资源储量和项目经济性测算的准确性提供重要支撑。

关键词: 钛铁矿; 钛矿品位; 品位计算; 钛铁砂矿; 物相分析

随着中国、日本和美国等世界强国将钛资源列入关键性资源目录,钛铁矿资源的战略意义和市场热度逐渐提升。在国内环境保护压力下,国内钛铁矿资源研究缺乏实践数据支撑,近年来,对莫桑比克和马拉维沉积型钛铁矿项目逐步加深研究和开发,为弥补国内沉积型钛铁矿项目研究补充提供大量实践经验和数据资料。

本文以莫桑比克和马拉维沉积型钛铁矿项目为支撑,针对沉积型钛铁矿品位计算存在简化公式和理解误差等现象(卢建国,2021a,2021b),以理论结合实际案例的角度出发,以钛铁矿中 TiO₂ 实测含量和钛物相分布中钛铁矿占比详细论述了钛铁矿品位计算的影响因素和过程,探讨计算过程中容易出现的问题,为准确计算钛砂矿品位和资源储量提供参考,保证地质勘查报告准确性有重要意义。

1 钛铁矿品位影响因素

1.1 原矿砂 TiO₂ 含量

原矿砂 TiO₂ 含量对钛铁矿品位起到决定性作用,直接决定钛铁矿品位高低,是地质勘查最为重视的数据。原矿砂在实施 TiO₂ 化学分析前一般进行淘洗浓缩,在非洲钛铁矿砂勘查实践中常在现场对原矿砂淘洗、烘干并计算淘洗率,然后将淘洗样在国内化验后折算原矿砂中 TiO₂ 含量。专业淘洗的基本样品对尾砂反复淘洗至最后两次未见重矿物为止,并对 10% 的基本样品尾砂重复淘洗获得检查样,确保淘洗系数不大于 1.02;考虑成本和效率,在不断实践中,逐渐由地质人员采用简单淘洗方式,减少尾矿量以保障回收率,提升淘洗后样品化验的准确性。不同淘洗过程化学分析结果见表 1。

1.2 钛铁矿物 TiO₂ 实测含量

钛铁矿的化学式为 FeTiO₃, TiO₂ 和 FeO 理论含量为 52.66% 和 47.34%,而原矿砂钛铁矿中 TiO₂ 实测含量基本不等于理论含量,优质钛铁矿中实测 TiO₂ 含量略高于理论值,难选钛铁矿则相反,该含量对钛铁矿品位计算存在一定影响,不同地区钛铁矿的能谱分析结果见表 2。

表 1 不同淘洗过程化学分析结果

项目/淘洗方式	样品数 (个)	淘洗率 (%)	TiO ₂ 含量(%)	
			淘洗前	淘洗后
莫桑比克项目专业淘洗	1234	4.61	0.81	17.49
马拉维项目简单淘洗	2050	19.30	1.53	7.92

表 2 钛铁矿的能谱分析测定

项目	能谱分析(%)						
	TiO ₂	FeO	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Nb ₂ O ₅
莫桑比克项目	52.93	37.30	9.77	0	0	0	0
马拉维项目	48.86	48.60	1.44	0.48	0.18	0.38	0.06

主要原因是钛铁矿中的 Fe²⁺ 与 Mn²⁺ 或 Mg²⁺ 等离子之间存在类质同象,由于分子量不同导致钛铁矿物中 TiO₂ 实际含量变化,钛铁矿物中钛和铁的固溶体分离或氧化蚀变形成赤铁矿或磁铁矿及金红石(彭程等,2022)(图 1),少量的钛铁矿物中存在石英、榍石等包裹体或连生体及其他杂质(图 2),这些综合因素对钛铁矿物中 TiO₂ 的含量影响。其中较为普遍的 Mn²⁺ 离子类质同象、赤铁矿化和包裹体等粒径多数在 0.01mm 左右,即使通过磨矿难以达到单体分离效果,见单体解离度表 3。

表 3 钛铁矿单体解离度测定

项目	单体解离度(%)
莫桑比克项目	98.80
马拉维项目	84.87

1.3 钛的物相分析

钛的物相分析是查明钛矿物分布,多数沉积型钛矿中含 TiO₂ 的矿物类型较多,主要取决于母岩矿物成分、搬运和沉积过程的分选和聚集等因素,常以钛铁矿为主、金红石(白钛石)为辅,少量的榍石、(钛)磁铁矿、赤铁矿和硅酸盐等矿

物。对马拉维项目同一矿区的不同来源样品进行物相分析,见表 4,原矿砂混合重选样(彭程等,2021)(原矿砂样混合后的重选样品)与重选混合样品(原矿砂重选样的混合样品)的分析结果基本一致,因此,一般仅对有代表性样品进行物相分析;混合重选样和重选混合样的物相分析结果与踏勘原矿砂混合样直接物相分析结果存在差异。

由于原矿石中 TiO_2 化学分析为实验室淘洗后测定结果,一般以重选的混合粗精矿物相分析数据进行标定,不同地区重选样品钛的物相分析见表 5。

1.4 矿石体重

矿石体重为实测实方体重,不同矿区实测实方体重测量结果略有差异,但滨海、滨湖砂矿实方体重一般在 $1520\sim 1630\text{kg}/\text{m}^3$ 范围内,与粒度级配和重矿物含量相关,一般重砂含量越高,矿石体重较大,其中莫桑比克滨海钛铁砂矿和马拉维滨湖钛铁矿的矿石平均干体重分别为 $1549.50\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1596.15\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2 钛铁矿品位计算与探讨

2.1 钛铁矿品位计算

综合考虑钛铁矿品位影响因素,结合沉积型钛铁矿的长期实践工作经验,一般钛铁矿的品位计算公式如下:

钛铁矿品位 =

$$\frac{\text{原矿砂 TiO}_2 \text{ 含量} \times \text{物相分析中钛铁矿含量} \times \text{矿石体重}}{\text{钛铁矿物中 TiO}_2 \text{ 含量}}$$

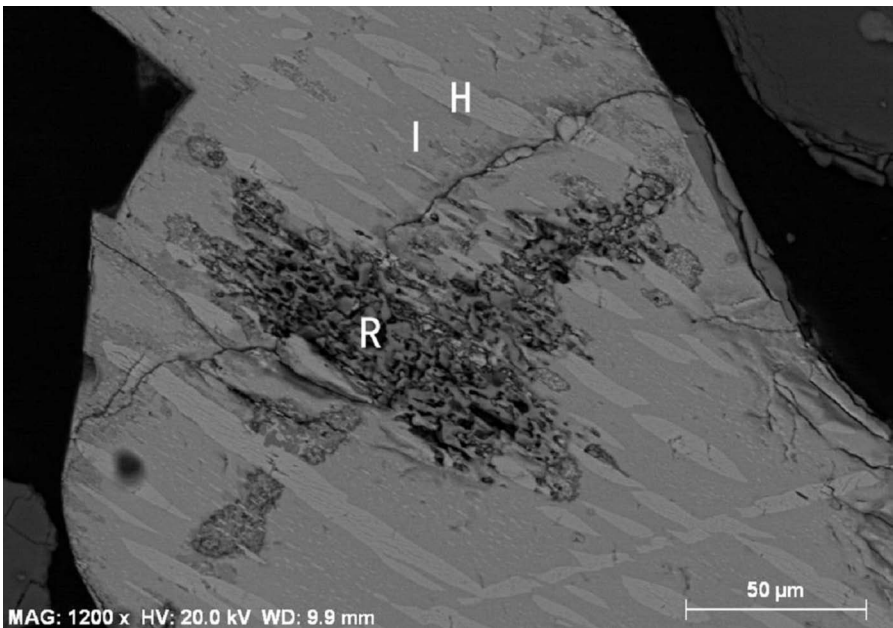


图 1 钛铁矿中赤铁矿(H)和金红石(R)

按上述钛铁矿品位公式计算马拉维和莫桑比克矿区钛铁矿品位分别为 $21.53\text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $40.21\text{ kg}/\text{m}^3$,见表 6。

2.2 钛铁矿品位的探讨

钛铁矿品位计算公式中较易忽略的影响因素是钛铁矿物中 TiO_2 的能谱分析和钛的物相分析。其中钛铁矿物中实际 TiO_2 含量与理论含量 52.66% 之间没有绝对大小关系,如莫桑比克滨海型钛铁矿砂中 TiO_2 平均实测含量普遍在 52~54% 之间,马拉维滨湖型钛铁矿砂中 TiO_2 平均实测含量普遍在 46~50% 之间,海南岛滨海型钛铁矿砂中 TiO_2 平均实测含量普遍在 50~52% 之间宋家伟等(2021),结合前期收集其他国家钛铁矿原矿砂样品和精矿产品数据,基本表明同一矿带或地区钛铁矿物中 TiO_2 实测含量基本一致,具备借鉴参考性,但同一地区不同成因的矿区钛铁矿砂中 TiO_2 含量可能存在一定差异,该差异需要特别注意,可能影响钛铁矿精矿产品质量,对钛矿产品的市场价格和项目经济效益有重大影响。

钛的物相分析对品位计算结果影响较大,不考虑钛的物相分析结果会导致钛铁矿品位增加;但直接采用原矿砂的物相分析结果计算将导致钛铁矿品位降低。在同一矿区,甚至同一批样品的原矿砂物相分析和重选混合样存在较大差异,主要是原矿砂中石英、长石和云母等脉石矿物中含有一定量的 TiO_2 ,且脉石矿物占比有绝对优势,如莫桑比克和马拉维

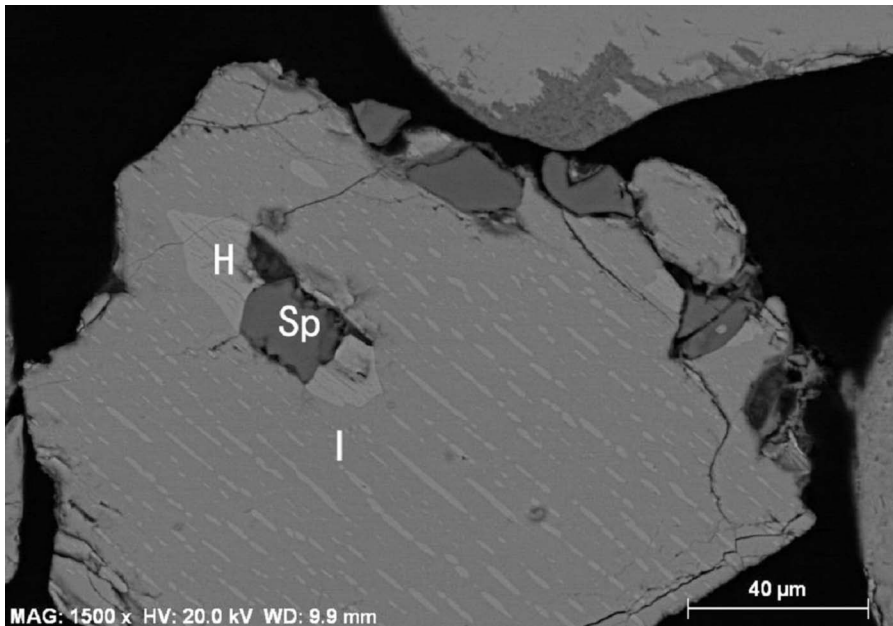


图 2 钛铁矿(I)中包裹的细粒脉石(Sp)

表 4 同一矿区钛的物相分析

样品来源	内容	钛铁矿	赤铁矿	金红石/ 白钛石	磁铁矿	其他	小计
踏勘原矿砂 混合样	含量	1.72		0.12	0.01	0.24	2.09
	分布率	81.89		6.06	0.58	11.47	100
详查原矿砂 混合重选样	含量	18.98		0.52	0.45	0.47	20.42
	分布率	92.95		2.55	2.20	2.30	100
原矿砂螺旋溜 槽重选混合样	含量	24.54	4.01	0.69	0.58	0	29.82
	分布率	82.29	13.45	2.31	1.95	0	100

说明：其他矿物在踏勘混样中为石英、长石和云母及楣石，详查混样中为硅酸盐；前期考虑钛铁矿与赤铁矿固溶体合并计算，后研究表明部分赤铁矿以单体形式存在则拆分计算；分布率为矿物中 TiO₂ 含量在 TiO₂ 总含量中占比。

表 5 不同项目钛的化学物相分析(%)

项目	内容	钛铁矿	金红石	楣石	磁铁矿	赤铁矿	小计
莫桑比克 项目	含量	40.25	3.44	1.81	0.17	0	45.67
	分布率	88.13	7.53	3.96	0.37	0	100.00
马拉维 项目	含量	24.54	0.69	0	0.58	4.01	29.82
	分布率	82.29	2.31	0	1.95	13.45	100.00

表 6 钛铁矿品位计算

项目	影响因素				品位 (kg/m ³)
	原矿砂 TiO ₂ 含量(%)	物相分析中钛 铁矿含量(%)	矿石体重 (kg/m ³)	钛铁矿物中 TiO ₂ 实测含量(%)	
莫桑比克项目	0.81	88.13	1596.15	52.93	21.53
马拉维项目	1.53	82.29	1549.50	48.86	39.92

某沉积型钛铁矿原矿砂钛的物相分析的脉石矿物中 TiO₂%占比分别为 12.03%和 10.15%，由于钛铁矿样品的化学分析都经过淘洗，为了保证钛铁矿品位计算数据一致性，尽量采用淘洗后的重矿混合物样品的物相分析结果。从马拉维表 4 数据来看，同一矿区淘洗后的重矿物中钛物相分析数据基本一致，结合莫桑比克矿区工作经验，基本上同一矿带或地区原矿砂重选混合样品的钛物相分析数据一致。

勘查报告中莫桑比克项目和马拉维项目中钛铁矿品位计算结果分别为 18.85 kg/m³ 和 42.73 kg/m³，与本文计算数据 21.53 kg/m³ 和 39.92 kg/m³ 存在一定差异。主要原因是两处计算顺序差异导致：一是原矿砂中 TiO₂ 含量计算时，本文考虑篇幅和数据一致性，先算平均淘洗率再计算淘洗后的 TiO₂ 含量，实际勘查报告应先按单个样品计算淘洗后的 TiO₂ 含量，减少钻孔单样样品长度不一致导致平均计算的误差；二是在计算钛铁矿品位中，本文利用原矿砂平均 TiO₂ 含量计算整个矿物钛铁矿含量，而实际勘查工作中应按单个样品计算钛铁矿品位，然后结合样品长度平均和矿层厚度计算单孔品位和矿区品位。

3 结论

(1) 钛铁矿品位影响因素有原矿砂和钛铁矿中 TiO₂ 含

量、钛物相分析中钛铁矿占比和矿石体重，钛铁矿品位计算与钛铁矿中 TiO₂ 成反比，在原矿砂 TiO₂ 含量一定条件下与其他三项影响因素成正比。

(2) 原矿砂中 TiO₂ 含量对钛铁品位计算起决定性作用，是地质勘查报告中最关注的的数据。

(3) 钛铁矿品位计算不能简单采用钛铁矿物中 TiO₂ 的理论含量，其理论含量与钛铁矿中 TiO₂ 的实际含量一般存在差异；研究表明钛铁矿中 TiO₂ 实测含量在同一矿带或地区基本一致，具备借鉴参考意义。

(4) 钛的物相分析是钛铁矿品位计算容易忽略的因素，应选择与化学分析一致的淘洗或重选样品进行物相分析，查明钛物相分布中钛铁矿占比，消除原矿砂中占比大、TiO₂ 含量低的脉石和占比少、TiO₂ 含量高的金红石等矿物影响。

(5) 钛铁矿品位计算应先计算单个样品的钛铁矿品位，再结合样品长度计算单孔钛铁矿品位，最后结合矿层厚度计算矿区储量，并反算原矿砂中 TiO₂ 含量，避免直接通过加权平均原矿砂中 TiO₂ 含量计算单孔或矿区的钛铁矿平均品位。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

卢建国. 2021a. 关于修改完善钛砂矿地质勘探规范部分内容的建议[J]. 地质论评, 67(3): 681, 735.

卢建国. 2021b. 风化型钛砂矿地质报告的典型错误分析[J]. 地质论评, 67(6): 1748, 1750.

彭程, 周迎春, 李国杰, 吉榆师, 张华, 潘炳. 2021. 马拉维湖滨型钛铁砂矿选冶分离试验研究[J]. 矿冶工程, 41(4): 52-56.

彭程, 周迎春, 李国杰, 吉榆师, 喻连香, 汤优优. 2022. 还原焙烧—磁选工艺回收马拉维某钛粗精矿中的钛和铁[J]. 矿产保护与利用, 42(1): 150-157.

宋家伟, 伍德明, 陈飞, 邓开章. 2021. 海南岛东部浅海表层沉积物锆、钛地球化学特征及资源潜力分析[J]. 中国矿业, 30(1): 217-221.

Lu Jianguo. 2021a#. Suggestions on revising and perfecting some contents of geological exploration specifications for titanium placer deposi[J]. Geological Review, 67(3): 681, 735.

Lu Jianguo. 2021b#. Analysis of typical errors in geological report of weathered titanium placer[J]. Geological Review, 67(6): 1748, 1750.

Peng Cheng, Zhou Yingchun, Li Guojie, Ji Yushi, Yu Lianxiang, Tang Youyou. 2022&. Recovery of Titanium and Iron from Titanium rough concent ratein Malawi by Reduction Roasting-Magnetic Separation Process[J]. Conservation and utilization of Mineral Resource, 42(1): 150-157.

Peng Cheng, Zhou Yingchun, Li Guojie, Ji Yushi, Zhang Hua, Pan Bing . 2021&. Study on Process Mineralogy and separation and Enrichment of Lakeside Ilmenite Placer in Malawi[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 41(4): 52-56.

Song Jiawei. Wu Deming. Chen Fei. Deng Kaizhang. 2021&. Geochemical characteristics and resource potential of Zr and Ti in shallow sea surface sediments in the east of Hainan island, [J]. China Mining Magazine,30(1):217-221.

Calculation method for grade of sedimentary ilmenite

PENG Cheng

Hainan International Resources Group Co. ,Ltd, Haikou

Abstract: Simplified calculation formula often appears in the grade calculation of sedimentary ilmenite, ignoring factors such as TiO₂ content in ilmenite minerals and the proportion of ilmenite in titanium phase, which leads to deviation in the calculation data of ilmenite grade and affects the calculation of ilmenite reserves and the economic calculation of the project. In order to reduce the error in the calculation of ilmenite grade, based on the exploration data of the ilmenite projects in Mozambique and Malawi, this paper discusses the actual content of TiO₂ in the ilmenite mineral and the significance of the proportion of ilmenite in the titanium phase analysis, and correctly uses the calculation formula of ilmenite grade to make the calculation of the grade of sedimentary ilmenite closer to the actual content, It provides important support for improving the accuracy of ilmenite placer resource reserves and project economic estimation.

Keywords: ilmenite;titanium ore grade; grade calculation; ferrotitanium placer; phase analysis

Manuscript received on: 2022-11-03; Accepted on: 2023-01-05; Published online on: 2023-01-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2023. 01. 055

Edited by: ZHANG Yuxu

