第 57 卷 第 4 期 2024 年 (总 236 期)

北地 西 质

NORTHWESTERN GEOLOGY



引文格式:孙宁岳,闫国英,李国武,等.白云鄂博矿区矿石中磁铁矿及萤石的 X 射线粉晶衍射半定量分析方法及 矿物三维空间分布模型[J].西北地质,2024,57(4):113-120.DOI:10.12401/j.nwg.2024021

Citation: SUN Ningyue, YAN Guoying, LI Guowu, et al. Semi-quantitative Analysis of Magnetite and Fluorite by X-ray Powder Crystal Diffraction and Three-dimensional Distribution Model of Minerals in Bayan Obo Mining Area[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 113–120. DOI: 10.12401/j.nwg.2024021

白云鄂博矿区矿石中磁铁矿及萤石的 X 射线粉晶衍射 半定量分析方法及矿物三维空间分布模型

孙宁岳¹,闫国英²,李国武^{1,*},王昭静²,申俊峰³,徐渴鑫³,孟文祥²,李凤坤¹

(1. 中国地质大学(北京)科学研究院晶体结构实验室,北京 100083; 2. 包头钢铁(集团)有限责任公司矿山研究院(有限 责任公司),内蒙古包头 014010; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院成因矿物学研究中心,北京 100083)

摘 要: 白云鄂博超大型铁-稀土-铌矿床,伴生大量萤石等资源。现阶段,矿山资源评价采用的 是多元素定量分析方法,该方法存在不能客观的表征出可用资源的矿物组成和赋存状态的缺陷。 为了较为准确地确定元素赋存形式及磁铁矿、萤石矿物含量,本研究选用粉晶X射线衍射K值 法定量分析法,通过以白云鄂博白云石为参比物质分别调配1:1比例产自白云鄂博的磁铁矿、 萤石与白云石单矿物样品,获得以白云石为参比的磁铁矿参比强度K_{Fe304}'=0.61、萤石参比强度 K_{CaF2}'=2.51,同时,精选了白云鄂博其他常见共生矿物的K值,以实现对白云鄂博不同矿石类型 中矿物含量的半定量分析,通过测试已知标样验证了改进优化K值的正确性和适用性。利用大 量实际岩心矿石样品矿物定量分析数据,通过克里金插值法获得白云鄂博主矿磁铁矿和萤石矿 物的空间分布三维模型,初步呈现了资源矿物的空间分布特征,推测在矿区深部仍存在巨大的 找矿潜力。X射线粉晶衍射定量分析技术直接对可回收资源的矿物半定量分析研究,为矿山精 准分采和资源综合利用探索了新的解决思路,也为选矿流程的优化提供的重要的技术参考。 关键词:白云鄂博;磁铁矿;萤石;X射线粉晶衍射;矿物组分;半定量分析 **中图分类号:**P575.5 文献标志码:A 文章编号:1009-6248(2024)04-0113-08

Semi-quantitative Analysis of Magnetite and Fluorite by X-ray Powder Crystal Diffraction and Three-dimensional Distribution Model of Minerals in Bayan Obo Mining Area

SUN Ningyue¹, YAN Guoying², LI Guowu^{1, *}, WANG Zhaojing², SHEN Junfeng³, XU Kexin³, MENG Wenxiang², LI Fengkun¹

Laboratory of Crystal Structure, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
 Minging Research Institute of Baotou Steel (Group) Corp., Baotou 014010, Inner Mongolia, China;
 Research Center of Genetic Mineralogy, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

收稿日期: 2023-09-18; 修回日期: 2024-01-16; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目:包头钢铁(集团)有限责任公司矿山研究院(有限责任公司)2021年A类重点项目"白云鄂博稀土-铌-铁资源矿物标型学研究(BGKY-ZH-2021-Z-017)"资助。

作者简介:孙宁岳(1998-),男,博士研究生,研究方向矿物晶体结构与晶体化学。E-mail: sunningyue1998@163.com。

^{*}通讯作者:李国武(1964-),男,教授,博士,从事矿物晶体结构与晶体化学研究。E-mail:liguowu@cugb.edu.cn。

Abstract: Bayan obo super large Fe-RE-Nb deposit, associated with a large amount of fluorite and other resources. At present, the multi-element quantitative analysis method is used in the evaluation of mine resources, which can not objectively characterize the mineral composition and occurrence state of available resources. In order to determine the occurrence form of elements and the content of magnetite and fluorite minerals more accurately, this study uses the powder crystal X-ray diffraction K-value method for quantitative analysis, and uses dolomite as the reference material to prepare 1:1 proportion of single mineral samples of magnetite, fluorite and dolomite produced in Bayan Obo, the reference intensity of magnetite with dolomite as the reference is $K_{Fe304} = 0.61$, and the reference intensity of fluorite is $K_{CaF2} = 2.51$. At the same time, the K value of other common co-minerals in Bayan Obo is selected. In order to realize the semi-quantitative analysis of the mineral content in different ore types of Bayan Obo, the correctness and applicability of the improved optimization K are verified by testing the known standard samples. Based on the quantitative analysis data of a large number of actual core ore samples, a three-dimensional model of spatial distribution of magnetite and fluorite minerals in Bayan Obo main mine was obtained by Kriegin interpolation method, and the spatial distribution characteristics of resource minerals were preliminarily presented. It is speculated that there is still a huge prospecting potential in the deep part of the mine area. X-ray powder diffraction quantitative analysis technology can directly study the semi-quantitative analysis of minerals in recoverable resources, which explores a new solution for precise mining and comprehensive utilization of resources, and also provides an important technical reference for the optimization of mineral processing process.

Keywords: Bayan Obo; magnetite; fluorite; powder X-ray diffraction; mineral compositions; semi-quantitative analysis

白云鄂博矿床不仅是超大型铁矿、特大型稀土、 铌矿床,同时也具有丰富的萤石资源(王凯怡等,2018; 于俊芳等, 2018; Yang et al., 2019; 柯昌辉等, 2021)。通 常磁铁矿和萤石伴生,就白云鄂博主矿和东矿而言, 铁矿石中所含的萤石资源就有 1.3 亿 t(杨波等, 2022)。 目前,白云鄂博矿山的生产过程主要遵循"以铁为主, 综合利用"的生产原则,其中,多种可回收资源的评 价仍然是采用多元素定量分析方法。元素分析的优 势在于分析技术方法成熟、含量分析结果趋势相对稳 定,不足之处在于其结果不能直接反应矿石中的矿物 组成,需要结合物相鉴定结果来推断矿物组成及含量, 元素含量与矿物含量有时有较大偏差。例如在实际 生产中,矿石中除磁铁矿外,其他含铁矿物中的Fe元 素是难以被回收利用的。因此,以化学元素分析表征 矿石中的全铁含量并不能代表可回收资源的真正铁 含量。同理,矿区另一类主要可回收资源萤石也存在 类似的问题。目前萤石的定量方法主要有差减法、直 接测定法和快速经验修正法,这些测定方法均是基于 对矿石中钙或氟元素含量进行分析,通过化学式计量

比值关系,间接计算萤石矿物的含量。但由于白云鄂 博矿物组合十分复杂,受到含钙碳酸盐矿物及含氟矿 物如氟碳铈矿、磷灰石等矿物的影响,因此,用钙或氟 的元素含量来推断萤石的含量有相当大的不确定性。

基于矿山分采及选矿等实际需求,对白云鄂博矿 石开展磁铁矿和萤石矿物定量分析研究有重要的实 际意义。粉晶X射线衍射定量分析是一种成熟的矿 物半定量分析技术,地质工作者在矿物定量分析工作 中总结了大量的实践经验(焦景慧等,1996;贾建业, 1996;薛雍等,2010;潘小菲等,2012;迟广成等,2015; 付伟等,2018),其中K值法是基于不同矿物的衍射能 力强弱,利用矿物与刚玉的参比值(K值)来计算获得 样品中不同矿物的含量,在实际操作中无须另外加入 标准物质,具有操作简单,实用性强的特点,其准确性 主要依赖于K值的确定(袁珂等,2011)。白云鄂博矿 区由于矿物粒度极其细小并富含稀土和放射性元素 钍等的影响,矿物的结晶程度相对较差且晶体缺陷较 多(杨波等,2021,2022;李丹煜等,2020),这对X射线 衍射强度影响较大,因此通常默认的K值不能完全适 用于白云鄂博的矿物定量分析工作。本次研究选用 白云鄂博矿区广泛存在且结晶度较好的白云石为参 比物质,对两种资源性矿物磁铁矿和萤石的 K 值进行 了优化改进,通过分别调配磁铁矿、萤石与白云石单 矿物标样,重新精确测定了以白云石为参比物的萤石 及磁铁矿的 K 值,除此之外还验证了其他常见矿物可 用的 K 值。利用本次得到的 K 值,对白云鄂博不同矿 石类型中的矿物含量进行了半定量分析。通过大量 岩心矿石样品的测试数据,利用克里金插值法获得白 云鄂博主矿萤石与磁铁矿空间分布模型,初步得到了 资源性矿物磁铁矿与萤石在空间上的分布特征,推测 在矿区深部仍存在巨大的找矿潜力。

白云鄂博矿区磁铁矿、萤石单矿物 K值确定

1.1 样品及实验方法

选取需要定量的主要目标矿物磁铁矿、萤石和白 云石,3种矿物取自白云鄂博主矿的萤石型磁铁矿矿 石和白云石型磁铁矿矿石两种类型的岩心样品,对样 品进行破碎研磨充分解离后,从200目以下粒径中磁 选选出磁铁矿单矿物,萤石和白云石单矿物纯样是经 淘洗后人工挑选出,单矿物纯度 98% 以上。

将高纯单矿物磁铁矿、萤石和白云石按比例混合制备成已知比例的标样,配比过程采用电子天平分别称量,并使混合样总质量控制为 0.500(3)g。测定磁铁矿 K 值时,选取磁铁矿和白云石按 1:1比例混合;测定萤石的 K 值时,萤石和白云石按 1:1比例混合。除此之外,将磁铁矿、萤石和白云石三种矿物按不同比例混合制成已知标样,用于检验 K 值的正确性,一共配制了 66 个样品(称量不确定度<0.003)。

粉晶衍射实验在中国地质大学(北京)矿物标型 实验室和粉晶 X 射线衍射实验室进行, 萤石及磁铁矿 K 值测定使用布鲁克 D2 PHASER 粉晶衍射仪, 铜靶 X 射线光源, 功率 300 W, 管压为 30 kV, 管流为 10 mA; 步进扫描, 扫描范围(2 θ角)为 5°~90°, 步长为 0.02°/步; 扫描速度为 0.3 s /步。

1.2 磁铁矿与萤石 K 值测定

在常规K值法中,通常以刚玉作为参比物质,通 过实验计算得出K值(袁珂等, 2011)。在晶体学衍射 数据库中,磁铁矿的参比强度被标定为 K_{Fe304} = 4.04 (PDF 19-629), 而萤石的参比强度则被标定 K_{CaF2} = 4.90 (PDF 88-2301)。然而,通过本次研究发现,白云鄂博 矿区的磁铁矿和萤石的衍射强度通常低于数据库中 提供的标准值。这导致使用数据库中的K值进行定 量分析时,结果的准确性受限,半定量分析结果与实 际配制样品的比例存在显著差异(图1)。这可能是因 为白云鄂博矿区大量富集元素钍,矿物可能受到了放 射性影响,晶格遭到了破坏(杨波等,2021,2022;李丹 煜等, 2020), 从而使得衍射强度变低。因此, 为了适 应白云鄂博矿区的矿物定量分析,笔者对磁铁矿和萤 石的K值进行了改进,选用矿区最常见的结晶较好的 白云石(根据 SY/T 5163-2010, K = 2.64)作为参比物质, 获取白云鄂博矿区磁铁矿、萤石新的参比强度 K。参 比强度 K 值的计算公式如下:

$$K_{\rm i} = (I_{\rm i}/I_{\rm c})_{50/50} \tag{1}$$

式中, I_c 为参比物相的最强线的积分强度; I_i 为 i 物相最强衍射峰积分强度; K_i 为 i 物相的参比强度。

在给定的测试条件下,分别测定磁铁矿和白云石的1:1混合样,萤石和白云石的1:1混合样,萤石和白云石的1:1混合样的粉晶 X射线衍射,获得相应的X射线粉晶衍射图谱并利用 Jade 软件获得相应矿物最强峰的积分强度,并计算出



图1 配制样品中矿物百分含量与 K值法计算结果的线性相关分析(K值来源晶体学数据库)

Fig. 1 Linear correlation analysis between the percentage of minerals in the prepared samples and the results calculated by the *K* value method (*K*-values sourced from the crystallography database)

K值,计算过程中将白云石 K = 2.64 为基准。实验计 算获得磁铁矿参比强度 K_{Fe304} = 0.61, 萤石参比强度 K_{CaF2} = 2.51。

1.3 不同矿石类型矿物组合及其它矿物的 K 值

白云鄂博矿区除常见的磁铁矿、萤石、白云石外, 其他矿物种类虽然较繁多,但含量普遍不高。稀土矿 物主要为异解石、独居石、氟碳铈矿,其他矿物磷灰 石、重晶石,还常见钠闪石、霓石及云母等蚀变矿物, 此外还有少量硫化物和硫酸盐矿物,如:黄铁矿、方铅 矿等(刘玉龙等,2005; Liu et al., 2018; 王维维等, 2020; 秦玉芳等, 2021)。矿石类型有萤石型磁铁矿矿石、白 云石型磁铁矿矿石、萤石型赤铁矿矿石、云母型磁铁 矿矿石、霓石型磁铁矿矿石和钠闪石型磁铁矿矿石等 多种矿石(李强等, 2021; 于俊芳等, 2022)。通过对岩 心样品进行 X 射线粉晶衍射矿物定性分析,不同矿石 类型中典型矿物组合见表 1。 虽然其他矿物含量较少,但对其定量分析极其重要,其他常见矿物的 K 值参考文献和粉晶衍射数据库 (ICDD)的 PDF 卡片获得,经过计算验证,可适用于白 云鄂博矿区粉晶 X 射线衍射 K 值法定量分析的 K 值 参数如表 2。对于其他稀土矿物,由于受放射性影响 结晶度差(如易解石非晶质性),还需要探索或测试合 适的 K 值,后续工作将解决稀土矿物的衍射定量问题。

1.4 优化 K 值半定量分析结果评价

为了验证改进的 K 值在实际分析中的正确性与 可靠性,利用本次配制的 66 件标样进行了测试分析, 实际分析的矿物含量与配制已知含量的相关性分析 如图 2 所示,其结果的关性拟合度 r 大于 0.95 的拟合 线,呈强正相关关系,完全满足 X 射线衍射半定量分 析结果要求。这表明改进优化 K 值所做的半定量分 析结果对于白云鄂博矿区矿物定量是较为可靠的,其 结果可以在实际工作使用。

勘探	钻孔号	样品原	标高	主要矿物种类(%)*	矿石类型
线号		始编号	(m)		9 1 7 1
3副	3F-6	45	1 339	磁铁矿(9.98 51.81)、霓石(61.13 26.93)、萤石(6.59 6.85)、白云石(12.63 8.16)、方铅矿(9.98 6.25)	霓石型磁铁矿矿石
4	4-4	50	1 364	磁铁矿(17.66 57.80)、萤石(34.81 22.83)、白云石(9.83 4.00)、 重晶石(37.66 15.35)	萤石型磁铁矿矿石
8	8-6	106	1 210	磁铁矿(3.80 22.86)、萤石(11.33 13.65)、白云石(81.06 60.66)、 重晶石(3.79 2.84)	白云石型磁铁矿矿石
9	9-5	30	1 397	磁铁矿(18.89 62.08)、萤石(19.02 12.52)、白云石(15.26 6.24)、 重晶石(46.84 19.16)、霓石、氟碳铈矿、独居石	萤石型磁铁矿矿石
8	8-7	23	1 416	萤石(36.04 30.33)、磁铁矿(7.29 35.4)、赤铁矿(19.46 11.77)、 白云石(16.79 10.15)、重晶石(13.04 7.89)、石英(7.38 4.46)	萤石型磁(赤)铁矿矿石
8	8-01	237	912	磁铁矿(7.28 38.08)、白云石(77.47 50.46)、萤石(3.8 3.98)、 重晶石(11.84 7.48)	白云石型磁铁矿矿石
8	8-01	141	1 157	磁铁矿(1.79 11.53)、云母(24.8 19.9)、萤石(11.42 18.8)、 白云石(5.78 4.64)、长石(56.24 45.13)	云母型磁铁矿矿石
8	8-01	212	977	磁铁矿(21.65 54.73)、钠闪石(28.45 13.21)、萤石(21.78 19.01)、 云母(24.38 11.32)、白云石(3.71 1.72)	萤石石型磁铁矿矿石
8	8-6	55	1 348	磁铁矿(44.16 70.63)、钠闪石(15.18 4.46)、白云石(4.4 1.29)、 长石(5.51 1.62)、萤石(9.44 15.76)、云母(21.22 6.23)	萤石石型磁铁矿矿石
8副	8F-12	110	1 218	磁铁矿(56.1972.98)、萤石(22.321.88)、白云石(8.432.01)、 云母(4.701.12)、钠闪石(8.372.00)	萤石型磁铁矿矿石
9副	9F-12	120	1 193	磁铁矿(11.27 47.92)、钠闪石(42.82 24.84)、萤石(1.72 1.61)、 云母(15.34 8.9)、白云石(4.04 2.34)、重晶石(24.81 14.39)	钠闪石型磁铁矿矿石
13	WK13-01	10	1 521	磁铁矿(16.47 43.27)、钠闪石(8.09 3.90)、萤石(33.09 32.39)、 白云石(25.33 12.22)、黄铁矿(13.78 6.65)、云母(3.24 1.56)	萤石石型磁铁矿矿石

表1 代表矿石类型样品中典型矿物种类

Tab. 1 Typical mineral species represented in samples of different ore types

注:*未加粗的数值代表使用相关文献中的萤石与磁铁矿K值进行矿物含量半定量计算,而加粗显示的数值则基于本研究所获得的K值测定。鉴于目前尚未获取适宜于稀土矿物的K值,这些矿物未被纳入本研究的定量分析范畴。因此,含有稀土矿物的样品所得到的矿物半定量分析结果,实为除稀土矿物外其他组分的归一化结果。

矿物种类	hkl	20(°)	D(nm)	K 值	来源
白云石	104	30.95	0.288 6	2.64	SY/T 5163-2010
萤石	111	28.28	0.315 0	2.51	本次实测
磁铁矿	113	35.44	0.253 0	0.61	本次实测
石英	100	20.86	0.425 5	0.91	SY/T 5163-2010
方解石	104	29.42	0.303 4	2.86	SY/T 5163-2010
铁白云石	104	30.84	0.2894	2.60	SY/T 5163-2010
重晶石	211	31.56	0.283 3	0.87	SY/T 5163-2010
黄铁矿	200	33.00	0.271 2	2.06	SY/T 5163-2010
方铅矿	200	30.09	0.296 8	4.95	PDF 65-0241
赤铁矿	104	33.09	0.700 0	2.40	PDF 33-0664
霓(辉)石	-221	31.02	0.298 5	0.80	PDF 41-1370
闪石(族)	110	_	0.82-0.85	1.36	PDF 89-7282
云母(族)	001	_	0.98-1.00	3.4	PDF 42-1437
长石(族)	—	_	0.32-0.33	1.22	俞旭等,1984

表 2 适用于白云鄂博矿区常见矿物的 K 值参数

Tab. 2 Selection parameters of different minerals' K-values in Bayan Obo district

注: SY/T5163-2010来源中华人民共和国行业标准; PDF卡片来源为粉晶衍射数据库(ICDD); 2θ(°) 角度对应Cu靶数据。

2 矿区矿石中磁铁矿、萤石及白云石 的 K 值法半定量分析

2.1 样品及测试

用于 X 射线粉晶衍射矿物半定量分析的矿石样 品取自白云鄂博主矿,来自 17个钻孔,共 292个样品, 取样钻孔位置如图 3,基本覆盖主矿区,由东至西,由 浅到深位置。该类样品为钻孔全铁分析保留的副样, 为 3 m 岩心粉碎混合样,具有代表性。

矿石样品使用日本理学 SmartLab 粉晶衍射仪测 试,铜靶,功率9kW,管压为45kV,管流为200mA;连 续扫描(2θ角)为3°~70°。衍射仪均配有减弱荧光 配件,减少样品中铁元素在铜靶 X 射线源下的荧光对 结果的影响。

测试样品使用玛瑙研钵研磨至 200 目以下, 压片 装样测试。物相鉴定及 K 值法半定量分析软件使用 XrayRun2018 软件进行, 萤石与磁铁矿空间分布图使 用 Volxer 软件成图。

2.2 测试结果

在垂向方向上矿物的分布以钻孔 8-1 的分析结果 为例,定量分析结果显示了钻孔中磁铁矿、萤石、白 云石的分布情况(图 4),图中横坐标条形图表示磁铁 矿、萤石与白云石的质量百分含量,曲线为化学分析 法得到的矿区全铁数据。磁铁矿含量与全铁数据之 间呈现良好的协同性和一致的变化趋势,其中白云石 在整个矿体中存在,磁铁矿主要分布于标高 900m 到1000m 范围内,萤石主要分布于标高 900m 以下的深部,以磁



图2 配制样品中矿物百分含量与 K 值法计算结果线性相关分析(K 值来源本次研究实测)

Fig. 2 Linear correlation analysis between the percentage of minerals in the prepared samples and the results calculated by the *K* value method (*K*-values derived from measurements in this study)



图3 采样钻孔位置在白云鄂博主矿区分布图(据徐志豪等, 2023 修改) Fig. 3 Distribution map of sampling locations in the main pit of Bayan Obo







铁矿矿物表示的矿体更能体现矿体分布特征。

矿区 292 件岩心样品磁铁矿含量的分析结果与 矿区资料全铁含量的相关性分析见图 5,相关性拟合 度 r = 0.86 的拟合直线,呈强正相关关系,图中分布于 拟合直线上部区域的点代表了化学分析全铁数据大 于 K 值法测得的磁铁矿含量,这些样品中含有较多其 他含铁矿物,同时说明化学元素分析表征矿石中全铁 含量并不能代表有用矿物磁铁矿的真实含量。拟合 线截距为 13.06,代表了磁铁矿的大致检出限,基本满 足划分矿体大于全铁元素含量大于 10% 的测试标准, 斜率为 0.80 说明 K 值法半定量结果略大于化学分析 全铁,这可能由于其他低于检出限未识别矿物的存在



图5 K值法分析与化学元素全铁分析线性相关分析 Fig. 5 Linear correlation analysis between K-value method analysis and total iron analysis of chemical elements

导致总量偏高有关,通过细致的岩相学工作,减少定量计算中未识别矿物种类,可进一步优化拟合结果。利用实测的 K 值法计算矿石中磁铁矿、萤石和白云石矿物含量,结果表明对白云鄂博矿石样品的半定量分析结果精度更高,适用性较好。

3 矿区磁铁矿及萤石矿物的空间分布 模型

通过 K 值法矿物定量分析数据结合三维空间克 里金插值法, 笔者构建了主矿矿体的三维模型(图 6)。 在此模型中, 正方形色块表示测试样品的空间位置, 紫色和绿色不规则球体分别代表磁铁矿和萤石含量 超过 30% 的区域。磁铁矿的分布显示, 在主矿西部的 标高 1 250 m 至 1 450 m 之间存在较大矿体; 而在主矿 中部, 标高 1 150 m 至 1 350 m 范围内出现了"西低东 高"的串珠状分布, 且在标高 1 100 m 以下还存在大 面积矿体, 显示出向深部延伸的趋势。



图6 白云鄂博主矿萤石及磁铁矿分布模型(坐标轴字母代 表方位 S:南 E:东)

Fig. 6 Distribution map of fluorite and magnetite ore deposits in the main pit of Bayan Obo

萤石矿体虽与磁铁矿部分重合,但表现出明显的 分带性,通常位于磁铁矿矿体的顶底板。特别是在中 部标高1000m以下,萤石矿体可能存在较大区域且 向深部延伸。这些观察结果表明,尽管深部萤石含量 呈增加趋势,其分布与磁铁矿存在一定差异。因此, 虽然萤石在深部显示出较大的找矿潜力,但对整体矿 区的成矿潜力(包括铁和稀土等资源),需要更加细致 和全面的考量。

4 结论

(1)实验获得了适用于白云鄂博矿区以白云石参 比的磁铁矿、萤石精确的 K 值数据, K_{Fe304}=0.61, K_{CaF2}= 2.51。标样验证实验表明, 其结果能够实现不同矿石 类型中磁铁矿、萤石的 X 射线粉晶衍射半定量分析, 其分析结果精度更高, 适用性较好。

(2)利用 X 射线粉晶衍射定量分析方法直接对矿 物进行定量分析有效避免了由于其他含铁矿物如赤 铁矿、菱铁矿、铁白云石、黄铁矿、含铁云母、霓石等 在化学分析中导致的全铁含量偏高问题。同时 X 射 线粉晶衍射定量分析也解决了难以用化学成分确定 萤石矿物的含量问题,为萤石矿体划分和分采提供了 可行的思路。用矿物含量直接表征矿体有利于矿山 的分采及选矿优化。

(3)矿区钻孔矿物定量分析数据,进行三维空间 克里金差值法插值得到了主矿矿体矿物分布的初步 三维模型,磁铁矿与萤石空间分布模型图显示,磁铁 矿与萤石具有一定的分带性。且萤石在深部显示出 较大的找矿潜力,但对整体矿区的成矿潜力,需要更 加细致和全面的考量。

参考文献(References):

- 迟广成,肖刚,汪寅夫,等.铁矿石矿物组分的 X 射线粉晶衍射 半定量分析[J].冶金分析,2015,35(1):38-44.
- CHI Guangcheng, XIAO Gang, WANG Yinfu, et al. Semi-quantitative analysis of the mineral components of iron ores by X-ray powder diffraction[J]. Metallurgical Analysis, 2015, 35(1): 38-44.
- 付伟,彭召,曾祥伟,等.基于 XRD-Rietveld 全谱拟合技术定量 分析花岗岩风化壳中矿物组成[J].光谱学与光谱分析, 2018,38(7):2290-2295.
- FU Wei, PENG Zhao, ZENG Xiangwei, et al. Quantitative Analysis of Mineral Composition in Granite Regolith Based on XRD-Rietveld Full-Spectrum Fitting Method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2290–2295.
- 贾建业. 黄铁矿的 X 射线衍射谱及其找矿意义[J]. 西北地质, 1996(3): 38-45.
- JIA Jianye. X-ray diffraction spectrum of pyrite and its prospecting significance[J]. Northwestern Geology, 1996(3): 38–45.
- 焦景慧,陈天明.X射线法粉煤灰形成莫来石影响因素的研究

[J]. 粉煤灰综合利用, 1996(3): 6-11.

- JIAO Jinghui, CHEN Tianming. Research on the Transformation of Fly Ash into Mullite with X-Ray Diffractometry[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 1996(3): 6–11.
- 柯昌辉,李以科,李立兴,等.白云鄂博矿区赋矿"白云岩"地 质特征与成因再认识[J].中南大学学报(自然科学版), 2021,52(9):3047-3063.
- KE Changhui, LI Yike, LI Lixing, et al. Petrogenesis of ore-bearing "dolostone" in Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China: insights from geological features[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(9): 3047– 3063.
- 李丹煜,杨莉,王金龙,等.白云鄂博萤石分布特征及放射性钍 元素的影响[J].包钢科技,2020,46(3):6-9.
- LI Danyu, YANG Li, WANG Jinlong, et al. Distribution Characteristics of Fluorite and Effects of Radioactive Element Thorium in Bayan Obo Deposit[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2020, 46(3); 6–9.
- 李强,杨占峰.白云鄂博主矿各矿石类型稀土配分特征研究[J]. 稀土,2021,42(5):36-42.
- LI Qiang, YANG Zhanfeng. Study on REE Distribution Characteristics of Different Ore Types in Bayan Obo Main Orebody[J]. Chinese Rare Earths, 2021, 42(5); 36–42.
- 刘玉龙,杨刚,陈江峰,等.白云鄂博超大型稀土-铌-铁矿床黄铁 矿 Re-Os 定年[J].科学通报,2005,50(2):172-175.
- LIU Yulong, YANG Gang, CHEN Jiangfeng, et al. Re-Os Dating of pyrite from Baiyunebo Super Large REE-Nb-Fe Deposit[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(2): 172–175.
- 潘小菲,张天福,李岩,等.德兴斑岩铜(钼金)矿床蚀变岩石的
 X粉晶衍射分析及地质意义[J].矿床地质,2012,31(S1):
 335-336.
- PAN Xiaofei, ZHANG Tianfu, LI Yan, el al. X-ray powder diffraction analysis of altered rocks and its geological significance of Tongchang Cu(-Mo-Au) porphyric deposit, Jiangxi Province [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(S1): 335–336.
- 秦玉芳,李娜,王其伟,等.白云鄂博选铁尾矿稀土的工艺矿物 学研究[J].中国稀土学报,2021,39(5):796-804.
- QIN Yufang, LI Na, WANG Qiwei, et al. Technological Mineralogy of Rare Earth in Bayan Obo Iron Tailings[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2021, 39(5): 796–804.
- 王凯怡,张继恩,方爱民,等.白云鄂博矿床成因——矿体内霓 长岩化成矿作用与赋矿白云岩的联系[J].岩石学报,2018, 34(3):785-798.
- WANG Kaiyi, ZHANG Ji'en, FANG Aimin, et al. Genesis of the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia: The f enitized mineralization in the ore bodies and its relation to the ore-bearing dolomite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(3): 785–798.
- 王维维,李二斗,金海龙,等.白云鄂博萤石型稀土-铁矿石工艺 矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2020(6):14-18.
- WANG Weiwei, LI Erdou, JIN Hailong, et al. Study on the Technological Mineralogy of Fluorite Type REE-Fe Ores from Bayan Obo Mine[J]. Nonferrous metals (beneficiation part), 2020(6): 14–18.
- 徐志豪,闫国英,杨宗锋,等.白云鄂博矿床磁铁矿成分标型与

深部富铁矿体预测[J]. 地学前缘, 2023, 30(2): 426-439.

- XU Zhihao, YAN Guoying, YANG Zongfeng, et al. Typomorphic characteristics of magnetite and prediction of deep iron-rich orebody in the Bayan Obo ore deposit[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(2): 426–439.
- 薛雍,江向峰,钟玉锋.标准曲线法 X 射线粉晶衍射直接分析滑 石中微量石棉[J].岩矿测试,2010,29(3):322-324.
- XUE Yong, JIANG Xiangfeng, ZHONG Yufeng. Quantitative Determination of Trace Asbestos inTalcum by X-ray Powder Diffraction with External Standardization[J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29(3): 322–324.
- 杨波,杨莉,孟文祥,等.利用探针片进行 X 射线粉晶衍射分析 在白云鄂博矿床中的应用[J].有色金属(选矿部分), 2021(6):34-42.
- YANG Bo, YANG Li, MENG Wenxiang, et al. Application of X-ray Powder Diffraction Analysis in Bayan Obo Deposit with Microprobe Slice[J]. Nonferrous Metals (Beneficiation Part), 2021(6): 34–42.
- 杨波,于俊芳,杨莉,等.白云鄂博主矿和东矿不同类型矿石中 萤石矿物学特征[J].稀土,2022,43(1):90-97.
- YANG Bo, YU Junfang, YANG Li, et al. Mineralogical Characteristics of Fluorite in Different Kinds of Ores of Main and East Orebodies of Bayan Obo Deposit[J]. Chinese Rare Earths, 2022, 43(1): 90–97.
- 俞旭, 江超华. 现代海洋沉积矿物及其 X 射线衍射研究 [M].北 京: 科学出版社, 1984.
- YU Xu, JANG Chaohua. Modern Marine sedimentary minerals and their X-ray diffraction studies[M]. Beijing:Science Press, 1984.
- 于俊芳,沈茂森,郭爰芳.白云鄂博矿萤石浮选分析[J].现代矿 业,2018,593(9):245-246.
- YU Junfang, SHEN Maosen, GUO Aifang. Flotation Analysis of Fluorite in Baiyunebo Mine[J]. Modern Mining, 2018, 593(9): 245-246.
- 于俊芳,沈茂森,杨波,等.白云鄂博东矿白云石型矿石特征分析[J].包钢科技,2022,48(3):10-13.
- YU Junfang, SHEN Maosen, YANG Bo, et al. Analysis on Characteristics of Dolomite Type Orein East Mine of Bayan Obo[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2022, 48(3): 10–13.
- 袁珂,廖立兵,万红波,等.膨润土中方石英和α-石英的定量相 分析——X射线衍射外标法和K值法的对比[J].硅酸盐 学报,2011,39(2):377-382.
- YUAN Ke, LIAO Libing, WAN Hongbo, et al. Quantitative Analysis of Cristobalite and α-Quartz in Bentonite by X-Ray Powder Diffraction-Comparison Between External Standard and K-Value Method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2011, 39(2): 377–382.
- Liu Yulong, Ling Mingxing, Williams I S, et al. The formation of the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, North China, Mesoproterozoic carbonatite and overprinted Paleozoic dolomitization[J]. Ore Geology Reviews, 2018, 92: 73–83.
- Yang Kuifeng, Fan Hongrui, Pirajno Franco, et al. The Bayan Obo (China) giant REE accumulation conundrum elucidated by intense magmatic differentiation of carbonatite[J]. Geology, 2019, 47(12): 1198–1202.