

微区 X 射线荧光成像技术在岩心分析中的应用

张启燕¹, 刘 晓¹, 杨 玠^{2,3*}, 史维鑫¹, 高卿楠¹, 张 弘¹, 邓 晃¹

1. 自然资源实物地质资料中心, 北京 100083
2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083
3. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

摘 要 微区 X 射线荧光(Micro-XRF)分析技术是通过微小的 X 射线光束照射样品, 对样品进行原位成分观测的无损分析手段之一, 具有灵敏度高、速度快和准确性高的特点。采用微区 X 射线荧光光谱仪(M6 JETSTREAM)对安徽铜陵冬瓜山铜矿床四段岩心样品进行面扫描, 分析不同矿层共 17 种元素区域分布特征、空间分布规律及组合关系等, 结果表明: (1)Cu 和 Fe 两种成矿元素高值空间分布区域基本不重叠, S 与 Fe 分布范围高度重叠, 关系密切, 微量元素 Ni, Bi, Pb, Zn, Si, Na 与 Cu 密切相关, 而 Ti, Al, K 与 Fe 具有弱相关性; (2)垂向上, Fe 元素含量随深度增加逐步增大, 而 Cu 元素含量呈降低趋势, 其他元素也随深度呈下降趋势; (3)元素分布受石炭纪中期海底喷流沉积成矿作用和岩浆热液成矿作用叠加改造作用明显; (4)该钻孔矿石矿物以磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿为主, 垂向上组合规律明显, 脉石矿物以石英、石榴子石和透辉石为主。该技术通过分析元素空间分布规律、相关性以及矿物组合和分配关系等可对元素富集和运移以及对矿床的成矿机制、成因模式等地质环境和地质过程提供新认识和新证据。结合矿床地球化学特征的分布模式, 微量元素可作为寻找主矿种的指示元素, 为深部找矿提供依据。此外, 该技术能作为预分析技术快速筛选出感兴趣的信息和位置, 为后期各种更高精度的微区分析提供不同尺度、不同层次元素分布信息。

关键词 微区 X 射线荧光; 岩心分析; 元素分布; 冬瓜山铜矿

中图分类号: P575.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2200-07

引 言

微区 X 射线荧光(Micro X-ray fluorescence, Micro-XRF, μ XRF)分析主要通过激发源发射微小 X 射线束斑到样品, 通过荧光光谱分析元素分布一种无损分析技术。根据不同测试目的, 可将微区分析分为以成分分析为主的电子探针、离子探针、激光探针(包括激光光谱仪)等, 和以微观结构构造分析为主的扫描电子显微镜、分析电子显微镜、光电谱仪等^[1]。电子探针、同步辐射 X 探针以及质子探针等的分析精度达到了微米-亚微米-纳米水平, 而以 X 微束的分析技术在毫米-亚毫米水平, 属于微-毫区分析技术^[2]。此外, 相较于其他微区分析方法, 由于 X 射线在空气中有着良好的穿透性, Micro-XRF 并不依赖高真空的样品仓, 因此可以用于大

尺寸(几十厘米)、含水样品的测试分析。微区 X 射线荧光装置在测量时将样品放置在样品台上, 激发 X 光束照射在样品上, 样品中的元素会激发出二次 X 射线荧光, 由于不同元素的 X 射线荧光能谱不同, 探测系统通过测量不同能谱与强度, 将收集到的信息转化为样品中各种元素的种类及含量。Micro-XRF 可为物质成分分析研究等方面, 提供不同尺度、不同层次需求的技术支撑^[2]。

近年随着各类测试仪器及显微技术的发展, 微区 X 射线荧光分析技术广泛应用于地质领域, 通过扫描样品获取其元素时序信息^[3], 分析岩心组分和特征变化^[4], 通过对沉积物样品扫描分析研究古气候、古地理、环境演化过程^[5], 通过对矿石样品扫描, 分析成矿元素的含量及分布特征, 揭示物质来源, 研究成矿过程和成因^[6]。此外, 该技术在矿石鉴定^[7-8]和硫化物蚀变特征研究^[9]等方面具有重要作用。元素

收稿日期: 2021-04-29, 修订日期: 2021-08-25

基金项目: 地质调查项目(DD20201113)资助

作者简介: 张启燕, 1988 年生, 自然资源实物地质资料中心工程师
刘 晓, 1984 年生, 自然资源实物地质资料中心工程师
张启燕, 刘 晓: 并列第一作者 * 通讯作者

e-mail: zqy25105@163.com

e-mail: sea_251@163.com

e-mail: sinixyang@gmail.com

是地学研究的基本单位。各种元素在不同矿物相中的分布特征、分配系数不仅可为岩石学、矿物学、地球化学、岩石矿物成因与演化研究提供大量信息，而且对于元素在岩石矿物中的赋存状态、矿物加工与选冶研究也有重要意义^[10]。微区 X 射线荧光不仅可以获取样品表面信息，还可获取样品内部元素的分布特征^[11]。此外该技术不仅可以清晰刻画矿物形貌，也可以很好地显示常规测试中无法识别的矿物成因机制，并且结合同位素地球化学等方法，在地质年代划分和物源示踪、判别地质环境等方面也起到了重要作用^[12]。

1 实验部分

1.1 样品

长江中下游地区是我国主要斑岩型以及矽卡岩型铜矿的产地之一，铜陵矿集区在成矿复杂性、成矿规模以及成矿作用等方面均具有代表性，其中冬瓜山铜金矿床是目前该矿集

区内典型的“斑岩型-层控矽卡岩型-矽卡岩型”铜矿床(安徽省地质矿产局 321 地质队. 安徽铜陵狮子山矿区冬瓜山铜矿床南段勘探地质报告, 1995. 1-24)，其成矿地质背景、控矿因素、地质特征以及矿化特征等方面，在长江中下游地区具有典型性和代表性^[13]。冬瓜山矿床主要的成矿地层分布在二叠系和石炭系等。

本次样品取自冬瓜山铜矿床 ZK3801 钻孔，孔深 1 201.10 m，其中 490.20~1 160.15 m 内可观察到共有 10 层矿体，主要金属矿物为黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿。孔内可见石英闪长岩、角岩、矽卡岩、大理岩、硅质岩、细砂岩、石英砂岩等(安徽省地质矿产局 321 地质队. 安徽省铜陵市冬瓜山铜矿接替资源勘查项目总体设计, 2013. 1-73)。本次岩心样品分别从四个矿层部位获取，涉及地层为三叠系、二叠系和石炭系，岩心通过切割、研磨、抛光等手段，经过多次反复，制成薄片样品，尺寸约为 200 mm×50 mm×2 mm (表 1)。

表 1 岩心样品地质信息简表
Table 1 Geological information of core samples

样品名	起始深度/m	终止深度/m	样品尺寸/cm	地层	主要矿石矿物	主要脉石矿物
含铜角岩夹矽卡岩	492.23	492.40	17×5.0	三叠系下统小凉亭组	黄铜矿、黄铁矿	石英、石榴子石、透辉石、绿泥石、方解石
含铜硅质岩	852.68	852.90	22×4.5	二叠系下统栖霞组	黄铜矿	石英、石榴子石、透辉石
含铜矽卡岩	1 124.94	1 125.10	16×4.6	石炭系中、上统黄龙、船山组	黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿	石榴子石、透辉石、石英、绿泥石
含铜磁黄铁矿石	1 156.70	1 156.90	20×4.7	石炭系中、上统黄龙、船山组	磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿	绿泥石、透闪石

1.2 方法

实验在中国地质大学(北京)完成，采用德国布鲁克(Bruker)公司研发的微区 X 射线荧光光谱仪(M6 JET-STREAM)进行扫描。该设备可对大尺寸样品进行微区分析，是一种跨越宏观-微观尺度的分析设备。该仪器有效面积为 50 mm²、具有能量分辨率小于 145 eV(@MnK α)的硅漂移探

测器，装备有微束斑的直径低至 50 μ m 毛细管，可对 800 mm×600 mm 样品进行 Na 到 U 元素的面扫描。实验装置采用铑(Rh)靶 X 射线光管，电压为 50 kV，电流 600 μ A，光斑大小 50 μ m，每点时长约 10 ms 左右。本次数据使用 Golden Software Surfer 13 软件进行处理。具体参数如表 2 所示。

表 2 微区扫描参数一览表
Table 2 Scan parameters of Micro-XRF

样品名	宽/ pixel	高/ pixel	总像素/pixel	单像素大小/ μ m	停留时间/ (ms·pixel ⁻¹)	移动速度/ (mm·s ⁻¹)
含铜角岩夹矽卡岩	3 480	998	3 473 040	50	10	5
含铜硅质岩	4 545	901	4 095 045	50	8	6.3
含铜矽卡岩	3 398	932	3 166 936	50	8	6.3
含铜磁黄铁矿石	4 245	937	3 977 565	50	10	5

2 结果与讨论

本实验依次对四块岩心样品进行面扫描，共扫描分析了 Cu, Fe, S, Mn, Ni, Pb, Bi, Na, Os, P, Ti, V, Zn, Al,

Ca, K, Si 共 17 种元素，具体扫描结果如图 2—图 5 所示。

2.1 元素空间分布规律

从扫描结果可以看出，平面上，主要元素(Fe, Cu 和 S)呈条带状、团块状分布，而微量元素(Ni, Bi, Pb, Zn 等)呈零星状、脉状(图 1)分布，非金属元素(Al, Na 等)较均匀分

布。垂向上, Fe 含量随深度增加而增大, 而 Cu 和其他微量元素也随深度呈下降趋势。

Fe 和 Cu 呈高强度、大面积分布于岩心中, 两者高值区域分布范围基本不重叠, 分布特征具有差异性。S 同样呈大面积、高强度分布, 与 Fe 分布特征高度相似, 相关系数达 0.94, 而与 Cu 具有弱相关性, 说明该岩心金属矿物以含铁硫化物为主。在含铜硅质岩中 S, Fe, Cu 分布范围和分布特征基本一致, 三者密切相关, 该岩心样品金属矿物可能以黄铜矿为主。微量元素 Ni, Bi, Pb, Zn 与 Cu 关系密切, 而非金属元素 Si 和 Na 与 Cu 呈正相关, 相关系数均在 0.9 以上, Al, Ca 与 Cu 具有弱相关性, K 与 Cu 基本没有相关性, 而 Ti, Al, K 与 Fe 具有弱相关性, Si, Na, Ca 与 Fe 元素呈负相关。元素空间分布特征及相关性分析可以反映成矿环境和成矿作用, 比如 K 与 Fe 相关可能是由于酸性花岗岩岩浆热液的交代作用造成的, 而 Na 与 Cu 相关可能与中性岩浆热液活动或与早期的沉积成矿活动有关, 这种不同的相关性组合反映了该矿床多阶段的叠加成矿过程, 此外高值区域 Ca, Fe, Ti, Mn 等元素富集, 可能表明矽卡岩(石榴子石或透辉石)存在。

微区 X 射线荧光光谱仪对岩心样品进行面扫描, 可直接显示各元素分布特征, 反映元素之间的空间相关性, 通过分析元素空间分布规律及相关性, 可为元素组合和配比关系提供依据, 并在元素富集和运移以及成矿规律等方面均有指示性意义。此外, 微量元素结合同位素元素分析, 在地质年代划分和物源示踪、判别地质环境等方面具有重要作用。

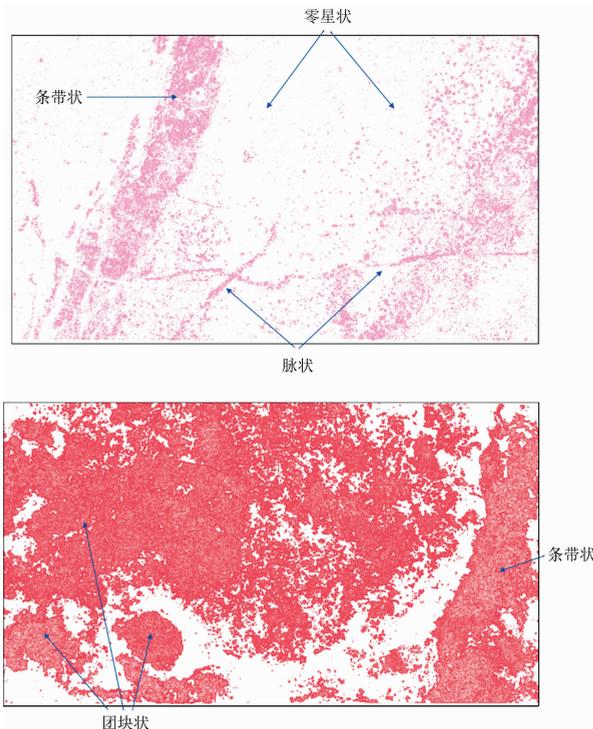


图 1 元素分布示意图

Fig. 1 The maps of element distribution

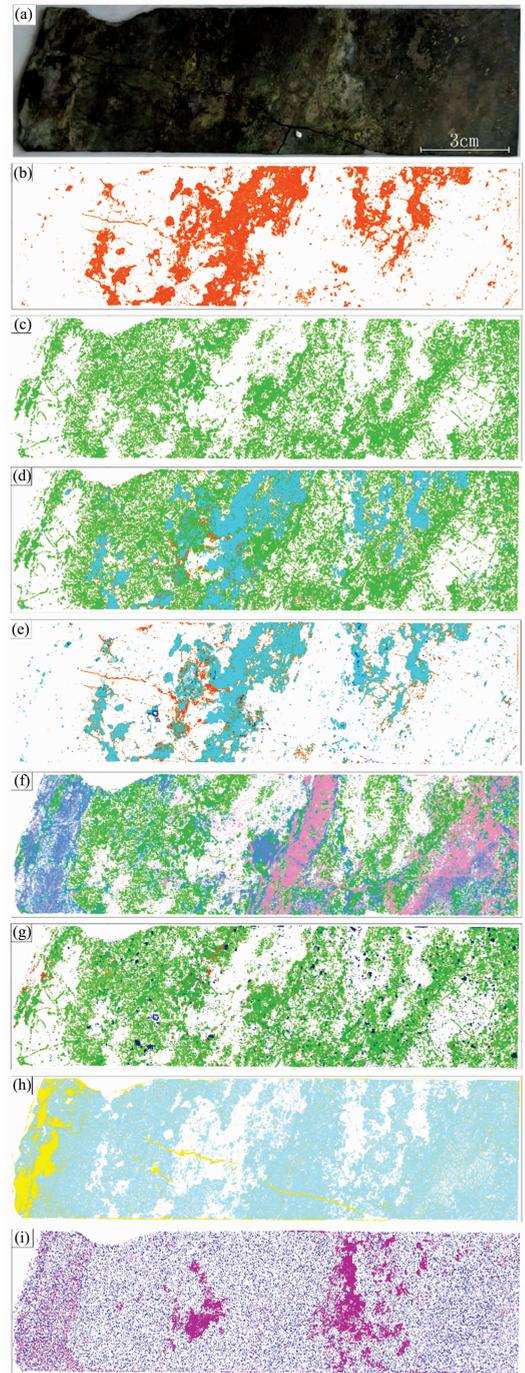


图 2 含铜角岩夹矽卡岩元素分布图

(a): 岩心照片; (b): Fe 元素; (c): Cu 元素; (d): Cu 元素(绿色)、Fe 元素(红色)和 S 元素(青色); (e): Fe 元素(红色)、Ni 元素(蓝色)和 S 元素(青色); (f): Cu 元素(绿色)、Mn 元素(蓝色)和 Ti 元素(粉色); (g): Cu 元素(绿色)、Ni 元素(蓝色)、V 元素(黑色)和 Zn 元素(红色); (h): Ca 元素(青色)和 K 元素(黄色); (i): Al 元素(蓝色)和 Si 元素(紫红色)

Fig. 2 Element distribution map of copper-bearing hornstones with skarn breccia

(a): Photo of sample; (b)–(i): Elemental maps using micro X-Ray Fluorescence

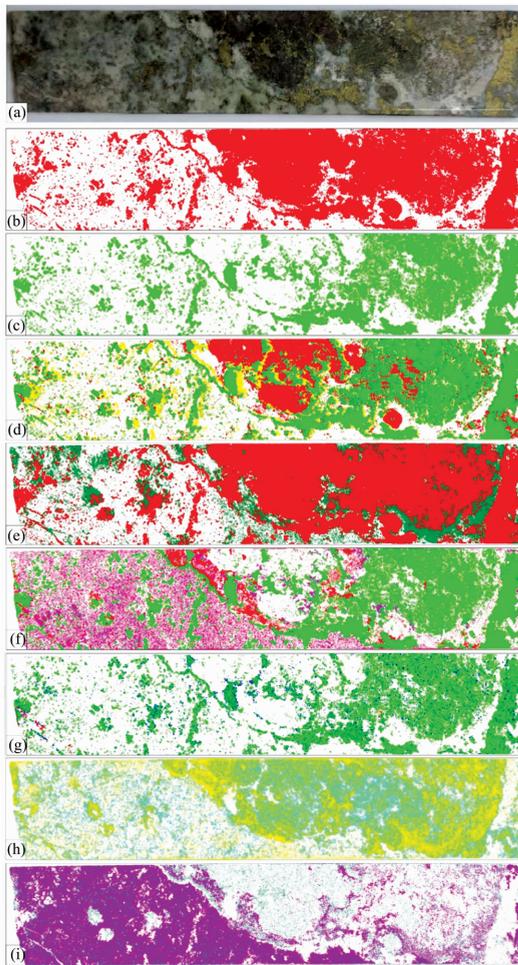


图 3 含铜硅质岩元素分布图

(a): 岩心照片; (b): Fe 元素; (c): Cu 元素; (d): Cu 元素(绿色)、Fe 元素(红色)和 S 元素(青色); (e): Fe 元素(红色)和 Mn 元素(绿色); (f): Cu 元素(绿色)与 Ni 元素(粉红色)和 Bi 元素(紫色); (g): Cu 元素(绿色)与 Zn 元素(蓝色)和 Pb 元素(红色); (h): Ca 元素(青色)和 K 元素(黄色); (i): Na 元素(绿色)和 Si 元素(紫红色);

Fig. 3 Element distribution map of copper-bearing siliceous rock

(a): Photo of sample; (b)–(i): Elemental maps using micro X-Ray Fluorescence

2.2 矿物组合关系分析

通过研究各元素空间分布规律以及元素之间的组合和配比关系,可以看出铜陵冬瓜山矿床以金属硫化物为主。结合矿物含量分析、比例组成及镜下矿物鉴定,本次岩心样品的主要矿石矿物从上到下依次为黄铁矿+黄铜矿,黄铜矿,磁黄铁矿+黄铁矿+黄铜矿,磁黄铁矿+黄铁矿+磁铁矿,矿石矿物以磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿为主,其次为磁铁矿,少量方铅矿、闪锌矿等其他矿物,常见黄铜矿交代磁黄铁矿和黄铁矿等硫化物形成环斑结构。脉石矿物以石英、石榴子石和透辉石为主,少量绿泥石、方解石及透闪石等。

根据前人研究冬瓜山成矿作用经历了两个阶段:第一成矿阶段,在石炭纪中期海底喷流作用形成了块状硫化物矿床,

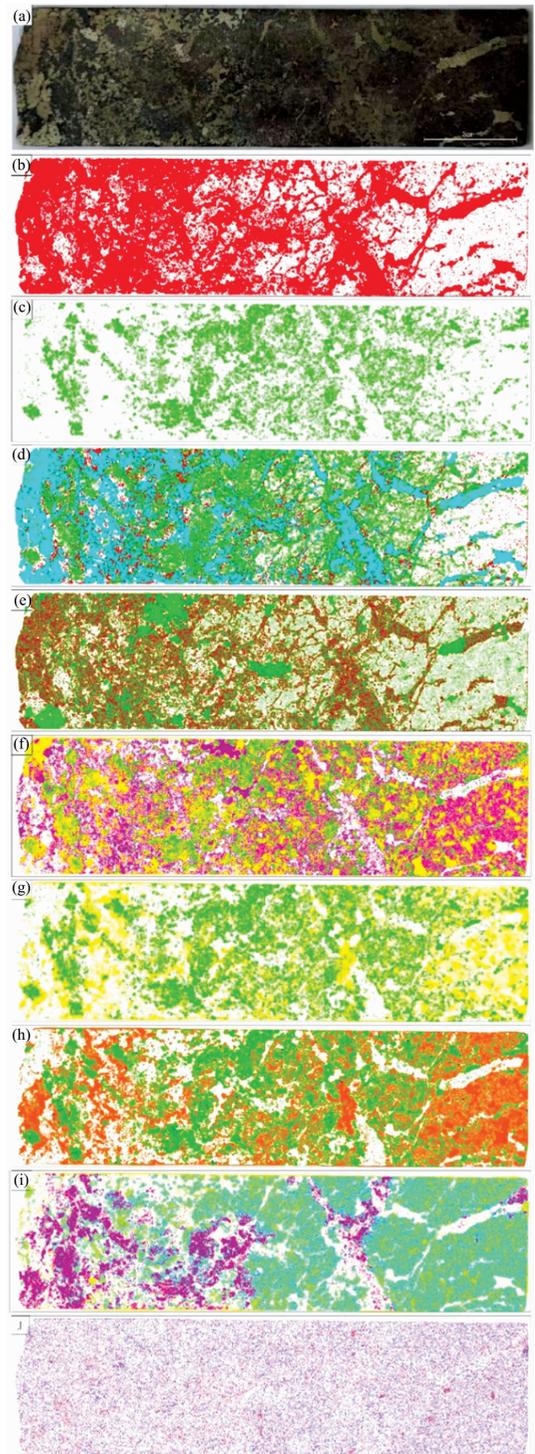


图 4 含铜矽卡岩元素分布图

(a): 岩心照片; (b): Fe 元素; (c): Cu 元素; (d): Cu 元素(绿色)、Fe 元素(红色)和 S 元素(青色); (e): Fe 元素(红色)和 Ti 元素(绿色); (f): Cu 元素(绿色)与 Ni 元素(黄色)和 Mn 元素(粉色); (g): Cu 元素(绿色)与 Bi 元素(黄色); (h): Cu 元素(绿色)与 Zn 元素(紫色)和 Pb 元素(橙色); (i): Si 元素(紫红色)、Ca 元素(青色)和 K 元素(黄色); (j): Al 元素(蓝色)和 Na 元素(红色)

Fig. 4 Element distribution map of copper-bearing skarn

(a): Photo of sample; (b)–(j): Elemental maps using micro X-Ray Fluorescence

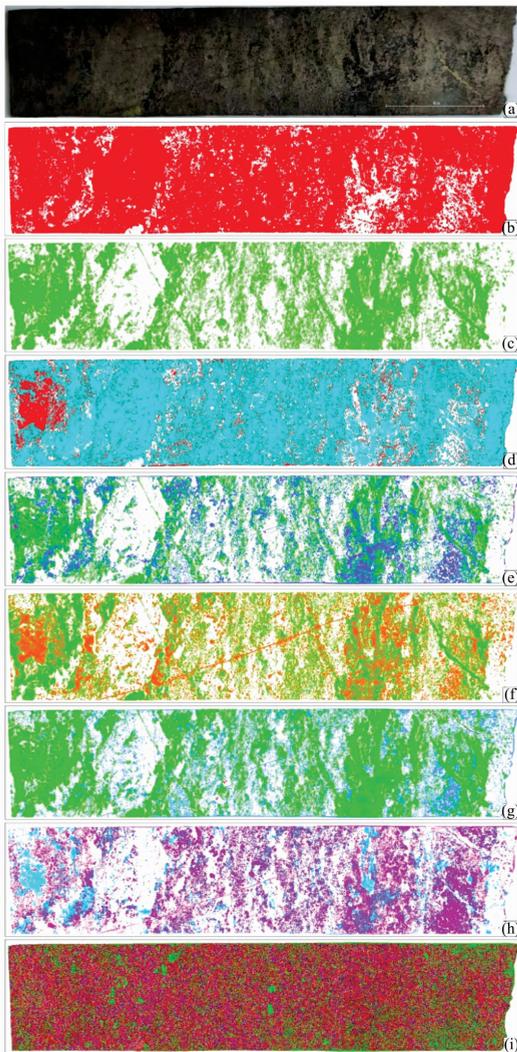


图 5 含铜磁黄铁矿石元素分布图

(a): 岩心照片; (b): Fe 元素; (c): Cu 元素; (d): Fe 元素(红色)和 S 元素(青色); (e): Cu 元素(绿色)与 Zn 元素(红色)和 Pb 元素(蓝色); (f): Cu 元素(绿色)与 Ni 元素(蓝色)和 Mn 元素(橙色); (g): Cu 元素(绿色)与 Ti 元素(红色)和 Bi 元素(蓝色); (h): Si 元素(紫红色)和 Ca 元素(青色); (i): Al 元素(蓝色)、K 元素(绿色)和 Na 元素(红色)

Fig. 5 Element distribution map of copper-bearing pyrrhotite ore

(a): Photo of sample; (b)—(i): Elemental maps using micro X-Ray Fluorescence

主要是含铁硫化物; 第二成矿阶段, 随着燕山期岩浆侵入上升, 一方面热液与围岩互相作用发生围岩蚀变, 形成矽卡岩型和斑岩型矿体, 另一方面岩浆热液对块状硫化物矿体进行改造, 致使块状硫化物矿物富集铜等成矿物质^[13-14]。黄铜矿化与围岩蚀变密切相关, 在岩体接触带附近的矿石中黄铜矿较多, 而远离接触带矿石中黄铜矿逐渐减少^[14]。通过元素相关性以及矿物组合关系分析显示, 含铜矽卡岩和含铜磁黄

铁矿石可能经历成矿第一阶段, 而含铜角闪岩和含铜硅质岩可能经历成矿第二阶段。

微区 X 射线荧光光谱仪可以进行线扫描和面扫描, 线扫描主要显示不同元素之间的线性关系, 为组分特征判别提供依据, 而面扫描可以显示各元素之间的组合和配比关系, 为成矿机制等地质过程提供新证据^[1]。通过本次微区分析结果, 可为冬瓜山成矿模式和成矿阶段等方面提供更多依据。

2.3 微量元素识别意义

微量元素在古环境研究、岩浆分异演化、变质岩原岩恢复、判断物质来源以及矿床成因和地质过程研究等方面具有重要意义。本次微区 X 射线荧光光谱仪除了识别主要元素(Cu, Fe 和 S)之外, 还识别了部分微量元素(Mn, Ni, Ti, Zn, Pb, Bi, Os, P 和 V 等元素)。经分析发现, 微量元素含量随深度的增加而呈下降趋势, 微量元素 Ni, Bi, Pb, Zn, Si, Na 与 Cu 密切相关, Al, Ca 与 Cu 具有弱相关性, 而 Ti, Al, K 与 Fe 具有相关性。在铜陵冬瓜山矿床, 从早期的石英-硫化物阶段, 阳离子以 K^+ , Na^+ 为主, 到了成矿晚期, 石英-碳酸盐阶段, 阳离子以 Ca^{2+} , Na^+ , K^+ 为主。由于 Ca^{2+} 的加入, 并且不断消耗流体中的 CO_2 , 从而形成大量方解石脉, 并且由于富碱(K^+ , Na^+) 和 Cl^- , SO_4^{2-} 热液的作用下, 致使围岩中的铜元素活化转移, 并在合适的位置和环境下, 铜等成矿物质分解并沉积富集成矿^[15]。因此 Ca 和 Na 富集可以作为成矿晚期与黄铜矿富集密切相关的标志之一。此外在该矿床中与 Cu 密切相关的微量元素 Ni, Bi, Pb 和 Zn, 可作为深部找矿的依据之一。

通过分析微量元素与主要元素之间相关性和分布规律, 可作为寻找主要矿种的指示元素。在冶炼过程中作为伴生元素进行综合利用, 提高矿床经济价值。

3 结 论

微区 X 射线荧光光谱仪在不破坏样品的前提下, 可以对大尺寸样品进行元素扫描成像, 对样品进行快速分析。通过分析元素空间分布规律、相关性、矿物组合和分配关系等对矿床的成矿机制、成因模式提供新认识、新证据。分析微量元素特征及相关性, 结合其他分析技术在元素示踪、地质环境研究等, 分析不同成矿阶段各个元素之间的相关性以及矿物成分、结构和构造的微观变化, 对元素富集和运移以及沉积、演化和形成的物理化学环境和地质过程提供新依据。与电子探针、扫描电镜等更小面积更高精度仪器相比, 该技术可快速筛选出所需的信息和位置, 操作简单, 人员要求不高, 可以作为前期筛选各种精细参数的手段之一。

该技术在停留时间与测量精度和效率之间存在矛盾, 扫描过程中每点停留时间越短, 扫描总时长越短, 效率越高, 且可以减少扫描时间过长带来的环境干扰。而驻留时间越长, 越有利于低强度的能谱峰被检测到, 有助于信号强度的提升, 从而减小误差, 但效率越低。

References

- [1] ZHANG Wei, ZHOU Xia-qing, SUN Cong-cong, et al(张伟, 周夏青, 孙聪聪, 等). Shandong Land and Resources(山东国土资源), 2019, (10): 38.
- [2] WAG Yi-yan, GAO Xin-hua, WANG Yi-min, et al(王祎亚, 高新华, 王毅民, 等). Metallurgical Analysis(冶金分析), 2020, (10): 86.
- [3] Tsuji K, Tsutsumimoto K, Nakano K. Advances in X-Ray Analysis, 2006, 49: 296.
- [4] Sorrel P, Oberhansli H, Boroffka N, et al. Quaternary Research, 2007, 67(3): 371.
- [5] Boning P, Bard E, Rose J. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2007, 8(5): Q05004.
- [6] YANG Li-hui, ZHENG Xiang-min, YE Wei(杨立辉, 郑祥民, 叶玮). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(6): 1955.
- [7] LIANG Shu-ting, LIU Yu-chun, LIU Tian, et al(梁述廷, 刘玉纯, 刘瑛, 等). Metallurgical Analysis(冶金分析), 2013, 33(11): 27.
- [8] LIU Chun, ZHEN Hong-tao, LIANG Shu-ting, et al(刘春, 郑洪涛, 梁述廷, 等). Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry(矿物岩石地球化学通报), 2019, 38(1): 169.
- [9] Dominique Genna, Damien Gaboury. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 108: 131.
- [10] ZHU Jie-qing, WANG Yi-min(朱节清, 王毅民). Rock Min. Anal.(岩矿测试), 1991, 20(4): 262.
- [11] XU Tao, LUO Li-qiang(许涛, 罗立强). Rock Min. Anal.(岩矿测试), 2011, (3): 375.
- [12] LIU Dun-yi(刘敦一). Geological Bulletin of China(地质通报), 2003, 22(3): 145.
- [13] WANG Yue, ZHU Xiang-kun, MAO Jing-wen, et al(王跃, 朱祥坤, 毛景文, 等). Acta Geologica Sinica(地质学报), 2014, 88(12): 2413.
- [14] LU Jian-jun, GUO Wei-min, XU Zhao-wen(陆建军, 郭维民, 徐兆文). Acta Mineralogy Sinica(矿物学报), 2007, 27(z1): 30.
- [15] HUANG Shun-sheng, XU Zhao-wen, NI Pei(黄顺生, 徐兆文, 倪培). Contributions to Geology and Mineral Resources Research(地质找矿论丛), 2003, (1): 34.

Application of Micro X-Ray Fluorescence Imaging Technology in Core Analysis

ZHANG Qi-yan¹, LIU Xiao¹, YANG Jie^{2,3*}, SHI Wei-xin¹, GAO Qing-nan¹, ZHANG Hong¹, DENG Huang¹

1. Core and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

3. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract Micro-XRF analysis technology is one of the non-destructive analysis methods that use tiny X-Ray beams to irradiate samples and then analyze fluorescence spectra and observe the components of the samples. It has the characteristics of high sensitivity, high efficiency and high accuracy. In this experiment, The Micro-XRF spectrometer (M6 JETSTREAM) was used to scan the core samples of the ZK3801 drilling in Dongguashan copper mine, Anhui province. It can analyze the distribution characteristics and combination relationships of 17 elements in different parts. The results show that (1) The high-value spatial distribution regions of Cu and Fe do not overlap basically, and the distribution ranges of S and Fe are highly overlapped, Ni, Bi, Pb, Zn, Si and Na are closely related to Cu, while Ti, Al and K have a weak correlation with Fe; (2) In the vertical direction, as increasing depth, the content of Fe increases gradually, while the content of Cu and other elements shows a decreasing trend; (3) The element distribution is modified by the middle Carboniferous submarine jet sedimentation and mineralization and magmatic-hydrothermal mineralization; (4) The ore minerals of the drill hole are mainly pyrrhotite, chalcopyrite and pyrite, with a certain combination law in the vertical direction. The gangue minerals are mainly quartz, garnet and diopside; Analyzing the spatial distribution of elements, correlations, and mineral combinations and distribution relationships can provide new understanding and new evidence for the enrichment and migration of elements, mineralization mechanisms, genetic models, and environmental, geological processes. Moreover, combined with the distribution pattern of the geochemical halo of the deposit, trace elements can be used as indicator elements to find the main mineral species and provide a basis for deep prospecting. Additionally, it can filter out the information and location that we are interested in quickly. It can provide powerful technical

support for different scales and different levels of requirements for screening various fine parameters in the later stage.

Keywords Micro X-ray fluorescence; Core analysis; Element distribution; Dongguashan Copper Mine

(Received Apr. 29, 2021; accepted Aug. 25, 2021)

ZHANG Qi-yan and LIU Xiao: joint first authors

* Corresponding author

敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社