

史维鑫, 易锦俊, 王浩, 等. 马坑铁矿钻孔岩心红外光谱特征及蚀变分带特征研究[J]. 岩矿测试, 2020, 39(6): 934 – 943.
SHI Wei-xin, YI Jin-jun, WANG Hao, et al. Study on the Characteristics of the Infrared Spectrum and the Alteration Zoning of Drill Core in the Makeng Iron Deposit[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(6): 934 – 943.
【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202005060004】

马坑铁矿钻孔岩心红外光谱特征及蚀变分带特征研究

史维鑫, 易锦俊*, 王浩, 田荣军
(自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201)

摘要: 红外反射光谱技术可无损、快速、批量地识别出硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐等矿物, 近年来在矿物学研究、地质勘探与找矿、矿山选冶等方面取得了较显著进展。尤其是热红外波段(6000 ~ 14500nm)可识别出辉石、石榴子石、橄榄石等蚀变矿物以及长石、石英等造岩矿物, 对于矽卡岩型、铜镍硫化物型以及石英脉型等矿床地质找矿、矿床成因研究等具有重要意义。本文通过对国家实物地质资料馆藏的马坑铁矿钻孔岩心进行短波-热红外反射光谱测量与分析, 总结马坑铁矿各蚀变矿物光谱特征, 并快速厘定了该矿床的蚀变矿物类型及组合特征。马坑铁矿蚀变矿物主要有石榴子石、辉石、碳酸盐、绿泥石、绢(白)云母、角闪石、绿帘石、蒙脱石、石膏等。石榴子石热红外光谱特征是在 9199nm、9730nm、10500nm 及 11100nm 处具有明显的反射特征, 辉石热红外光谱特征主要是在 11500nm 和 12150nm 处具有明显的吸收特征。红外光谱分析表明蚀变矿物在空间上呈现出明显的分带性, 蚀变矿物组合及分布严格受围岩岩性和热液交代的双重控制。通过红外反射光谱蚀变矿物组合特征研究, “石榴子石+辉石”可作为矽卡岩型矿床的标型矿物组合, 蚀变分带特征也反映了主矿体从高温到低温的变化过程; 结合矿床地质特征, 推断出马坑铁矿为典型的层控矽卡岩型矿床。本研究可为矽卡岩型矿床的成矿规律认识和找矿勘探等方面提供科学支撑。

关键词: 钻孔岩心; 红外反射光谱; 蚀变分带; 矽卡岩型矿床; 马坑铁矿

要点:

- (1) 总结了马坑铁矿钻孔岩心蚀变矿物短波红外-热红外光谱特征。
- (2) 梳理钻孔岩心蚀变矿物分布特征, 探讨蚀变矿物组合与矿化的关系。
- (3) 分析马坑铁矿蚀变矿物分带规律, 探讨主矿体高温到低温的变化过程。

中图分类号: O657.33 **文献标识码:** B

矽卡岩型铁矿是我国主要的铁矿类型之一, 也是目前重要的富铁矿类型, 供应我国 60% 以上的富铁矿^[1-2], 长期以来, 该类型铁矿的研究引起了很多专家学者的兴趣。马坑铁矿是一个以铁钼为主、伴生铅锌的大型多金属矿床, 为华南地区最大的铁矿床^[3]。该矿床的成因认识一直存在着争议, 归纳起来有 4 种成因观点: 层控矽卡岩铁矿床说、复合叠生层状矿床说、陆源沉积-热液改造说、海相火山沉积-热液改造说^[4], 但主流观点认为马坑铁矿成因为

与花岗岩有关的层控矽卡岩型矿床^[2,4-5]。

围岩蚀变作用的研究、蚀变矿物与矿化分带特征研究对于矿床成因研究、成矿作用过程研究以及指导地质找矿方面都有着重要的意义。红外反射光谱技术为蚀变矿物精确识别、矿化分带特征等研究提供了一种更为成熟、有效的方法。红外反射光谱扫描技术能够快速、无损、准确地获取蚀变矿物和成矿矿物种类、分布和丰度等相关信息, 短波红外波段能够快速准确地识别出含羟基组分的硅酸盐、硫酸

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-08-05; 接受日期: 2020-09-19
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“实物地质资料汇集与服务”(DD20190411)
作者简介: 史维鑫, 硕士, 工程师, 主要从事岩心多参数数字化与应用研究工作。E-mail: shiweixincugb@163.com。
通讯作者: 易锦俊, 博士, 高级工程师, 研究方向为矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: 282062982@qq.com。

盐、碳酸盐等蚀变矿物并定量化获知岩石中含蚀变矿物的相对含量及组成^[6]。近年来,短波红外光谱技术逐渐成熟,在国外,短波红外光谱分析技术已经作为一种重要的工作手段广泛应用于各类矿床的勘查与研究中^[7],并取得了良好的应用效果^[8-12]。在我国,随着短波红外光谱技术逐渐走向成熟,许多学者利用短波红外光谱技术开展了斑岩型铜矿^[13-14]、中低温热液矿床^[7,15-17]等方面的研究,识别出与成矿密切相关的热液蚀变矿物,鉴定矿物组分的变化,分析了成矿环境,对指导找矿勘查、圈定热液中心、建立找矿勘查模型等方面起到了重要的作用。近年来,热红外光谱分析技术(波段为 6000~14500nm)也逐渐成为一种新的技术方法应用到地质研究中。热红外光谱扫描技术能快速识别出常见的造岩矿物(长石、石英、辉石、石榴子石、橄榄石等),该技术弥补了短波红外技术对石榴子石、辉石等矽卡岩矿物、石英、长石等造岩矿物及黑云母、角闪石等暗色矿物探测效果不理想的缺陷^[18],对矽卡岩型、石英脉型、铜镍硫化物型等矿床的勘查具有良好的应用前景^[19-21]。本文以马坑铁矿为例,利用短波-热红外光谱技术测量出岩心光谱数据,对钻孔岩心蚀变矿物进行了快速的解译、识别,厘定蚀变矿物特征及矿

化分带规律,可为矽卡岩型矿床矿物分带以及深部找矿等研究提供思路和方法。

1 矿床地质特征

马坑铁矿区位于华南加里东地槽褶皱系永梅晚古生代拗陷东部次一级龙潭复向斜南部,政和一大埔断裂北西侧^[4]。本区铁多金属矿床的产出,受地层和围岩岩性控制十分明显,集中赋存在两套碳酸盐岩建造,即黄龙组—栖霞组厚层灰岩与白云质灰岩,和大隆组—溪口组粉砂岩夹灰岩,以前者为主^[1]。马坑铁矿区出露地层从老到新依次为:奥陶—志留系(O-S)、下石炭统林地组(C_1L)、上石炭统经畚组—中二叠统栖霞组(C_2j-P_2q)、中二叠统文笔山组(P_2w)、中二叠统童子街组(P_2t)。马坑铁矿主矿体主要赋存于经畚—栖霞组碳酸盐岩(C_2j-P_2q)与下石炭统林地组 C_1L 砂岩的层间破碎带中,小矿体主要赋存在主矿体顶板的上石炭统经畚组—中二叠统栖霞组(C_2j-P_2q)灰岩中,少数分布在文笔山组(P_2w)与栖霞组(P_2q)接触面附近,亦有部分小矿体分布在主矿体顶板碳酸盐岩与辉绿岩脉的接触部位^[22](图1)。

矿区内围岩蚀变十分发育,蚀变岩以钙矽卡岩

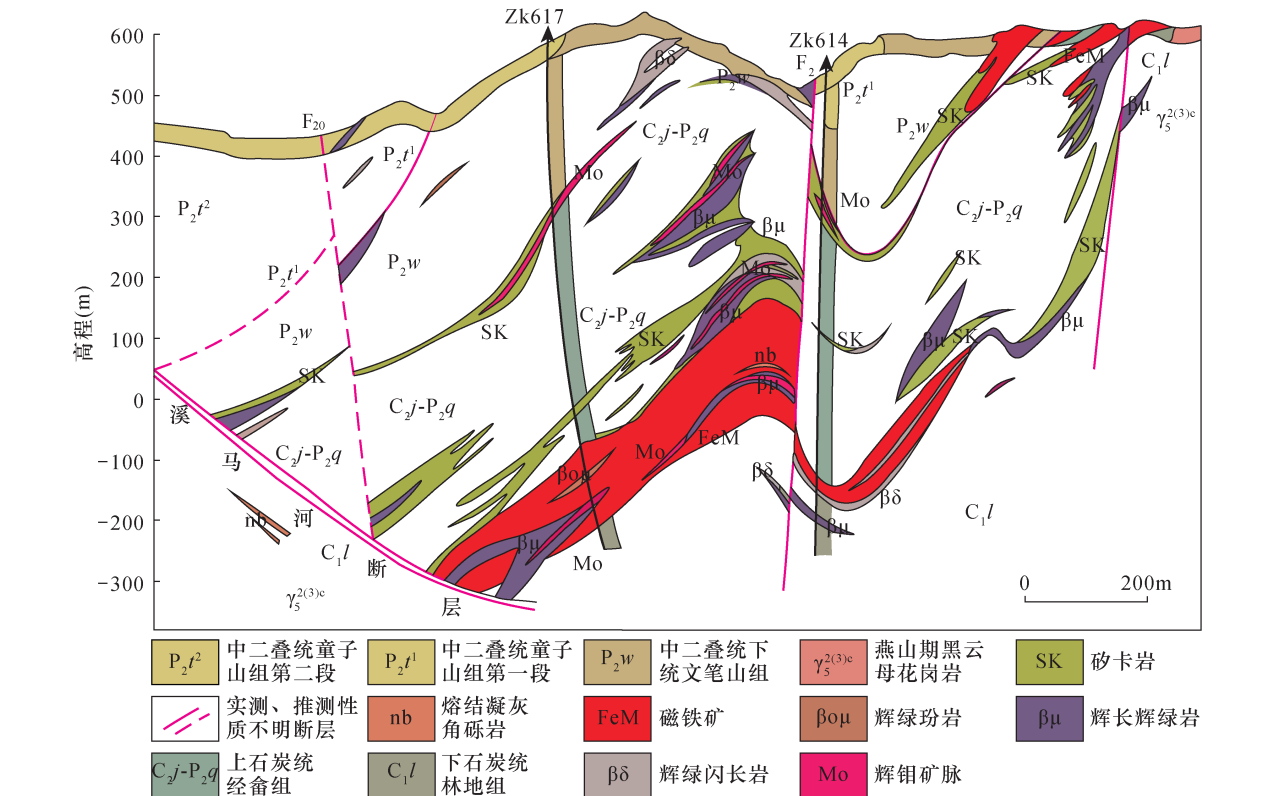


图1 马坑铁矿 61 线矿体剖面图^[4]
Fig. 1 Geological section No. 61 across Makeng iron deposit^[4]

为主,包括石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩等,伴以强烈的磁铁矿化,主矿体底板碎屑岩中发育强烈硅化。后期热液蚀变广泛叠加在早期矽卡岩上,主要发生含氯角闪石化、萤石化、绢云母化、辉钼矿化、硅化等^[1-2,23]。

2 实验部分

2.1 样品采集

本次测试样品是国家实物地质资料馆馆藏的马坑铁矿 ZK614 和 ZK617 两个钻孔的岩心。其中 ZK614 为主干孔,终孔深度 792m,钻孔穿透主矿体,毗邻断裂破碎带,从矿石类型、岩石、地层、地质构造等方面,该孔能够反映矿床总体概况;ZK617 钻孔为缩减孔,主要保存主矿体、各层位代表岩心及矿体顶部部分,保存的岩心段起止深度为 740~830.95m。

2.2 实验仪器与数据采集

本次红外光谱测量采用了澳大利亚的 HyLogge-1TM型岩心光谱扫描系统,对 ZK614 部分钻孔岩心采用升级后的 HyLogge-3TM型进行了补充测试。解译软件采用澳大利亚 CSIRO 的 TSG8.0 软件,基础数据库采用了 CRIRO 的矿物光谱库。

HyLogge-1TM型岩心光谱扫描系统主要由 4 部分组成:ASD 光谱仪,测量岩心样品 VNIR 到 SWIR 范围(400~2500nm)的光谱数据;岩心/切片托盘模式的自动化移动样品台;数字线扫描相机,获取高分辨率的彩色图像;激光表面测度仪,测量岩心的长度,同时检测岩心的破碎和断裂情况^[24]。升级后的 HyLogge-3TM型增加了热红外探头,光谱波段范围为 6000~14500nm。测试条件为反射,光谱分辨率 3nm VNIR(400~1100nm);10nm SWIR(1100~2500nm);18nm@6000nm;150nm@14000nm,扫描间隔为 1cm。

测试前仪器需开机预热半小时,并在控制台上放置标准矿物进行定标校准,若基线接近 100% 并保持平直则校准完成。测量前要对岩心进行清洁,保证岩心表面干燥、无尘,保证岩心温度与仪器所处环境温度保持一致。尽量将岩心油漆标记面向下,将岩心标签置于岩心箱内侧,保证岩心顺序连接,岩心表面无遮挡。

2.3 数据处理与解译

数据处理与解译使用光谱地质专家(TSG),TSG 软件全称为“The Spectral Geologist”,是专门针对光谱地质应用开发的软件,集合了各种地质光谱数据的分析算法、多重特征提取方法^[25]及澳大利

亚 CSIRO 专门测试的一套矿物光谱数据库,并以此为基础针对不同矿物的提取方法构建了各种模型^[6]。此次使用的是最新版本 TSG8.0。

将数据导入 TSG 软件中,使用其内部的核心算法 TSA(光谱助手)自动处理原始光谱数据。TSA 依据其内部的标准矿物光谱库自动将样品光谱与标准光谱进行最佳匹配,并估算其相对含量和拟合误差。然后采用人机交互的方式设置 TSA 匹配标量,过滤掉明显错误的矿物自动识别结果,并使用 TSG 构建的其他标量来验证这些矿物的识别结果。通过解译,马坑铁矿短波红外光谱波段共识别出碳酸盐、绢云母、角闪石、绿泥石、绿帘石、石膏、蒙脱石等蚀变矿物,热红外光谱波段识别出石英、石榴子石、辉石、斜长石、钾长石等矿物。

3 结果与讨论

3.1 样品红外光谱特征及矿物分布

(1)石榴子石(Gar)。石榴子石是矽卡岩矿床中常见的矿物之一,多形成于早期的矽卡岩阶段,常与透辉石、阳起石、透闪石、绿帘石等组成各类矽卡岩^[26]。CSIRO 矿物标准光谱库中该矿物的光谱特征是在 9199nm、9900nm、10400nm 及 10880nm 处具有明显的反射特征,ZK614 的石榴子石热红外光谱特征是在 9199nm、9730nm、10500nm 及 11100nm 处具有明显的反射特征(图 2a)。钻孔 ZK614 中石榴子石主要赋存于矽卡岩和石榴子石-磁铁矿层。张志等^[2]通过电子探针分析得出马坑铁矿石石榴子石属于钙铝-钙铁榴石系列,以钙铁榴石为主。

(2)辉石(Pyr)。辉石是一种常见的单链结构的硅酸盐造岩矿物,广泛存在于火成岩和变质岩中,也是矽卡岩的重要组成矿物。CSIRO 矿物标准光谱库中该矿物的热红外光谱特征是在 11430nm 和 12040nm 处具有明显的吸收峰。ZK614 的辉石热红外光谱特征主要是在 11500nm 和 12150nm 处具有明显的吸收特征(图 2b)。ZK614 中辉石主要赋存于矽卡岩中。前人通过镜下鉴定、电子探针分析得出,马坑铁矿辉石主要为透辉石、次透辉石、钙铁辉石^[2,22]。

(3)碳酸盐矿物(Carb)。碳酸盐矿物是金属阳离子与碳酸根相结合的化合物,根据结构中强健的分布,碳酸盐类矿物可分为岛状、链状和层状等亚类,其中以岛状的方解石族、白云石族、文石族和链状的孔雀石族碳酸盐最为重要^[27]。碳酸盐矿物显著的识别特征是 2300~2400nm 间具有单一的吸收

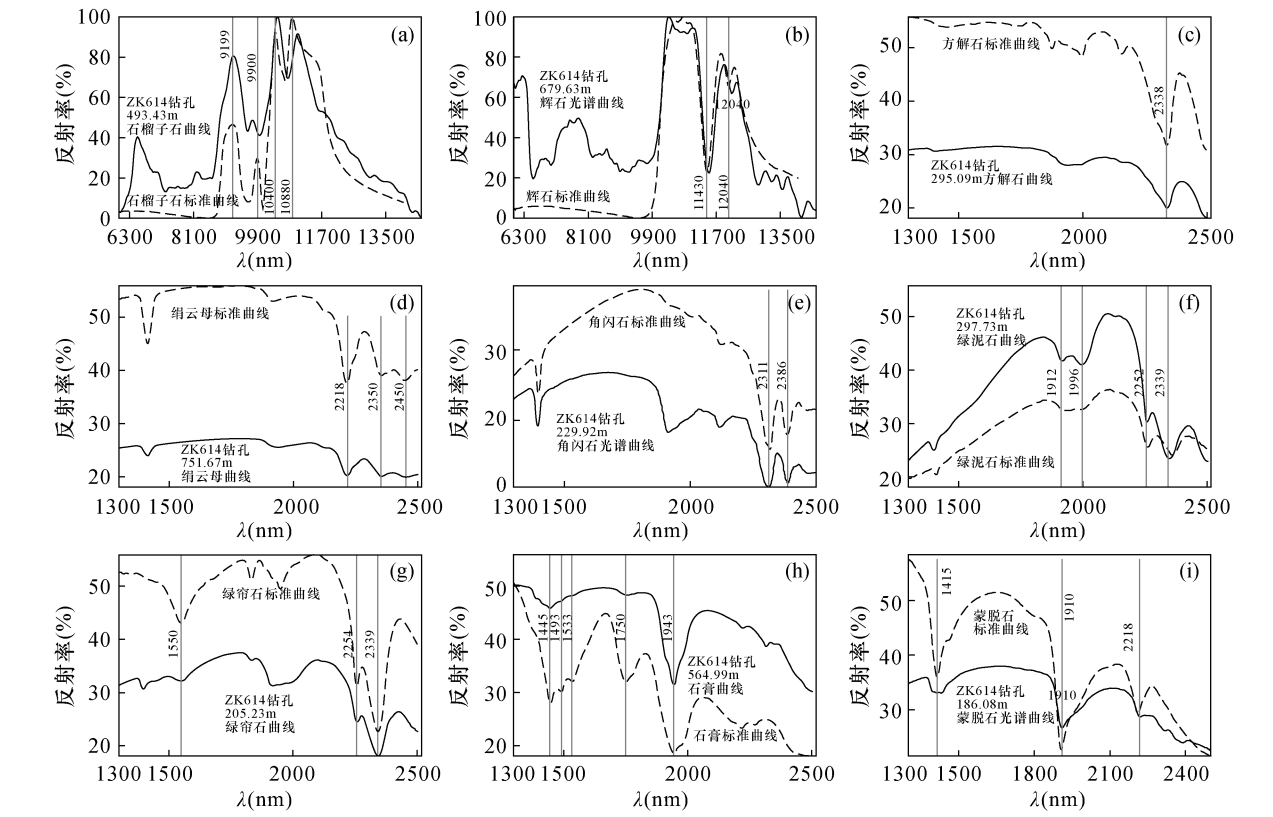


图2 马坑铁矿典型蚀变矿物光谱特征

Fig. 2 Spectral characteristics of typical altered minerals in Makeng iron deposit

特征,对称性左宽右窄,有别于其他矿物;同时绝大多数矿物在2100~2200nm及2500nm附近具有次一级特征吸收峰^[28]。以研究区钻孔ZK614为例,碳酸盐矿物的光谱特征主要在2339nm附近有明显吸收峰,对称性左宽右窄(图2c)。短波红外区间光谱特征显示碳酸盐矿物在钻孔ZK614中分布广泛,几乎贯穿于整个钻孔主体,矿物以方解石为主,显示了钻孔主体岩性主要是碳酸盐岩地层(包括灰岩、白云岩、大理岩等),与前人研究一致^[1,3,29]。

(4) 绢(白)云母(Ser)。绢(白)云母是重要的蚀变矿物,该矿物在短波红外区间具有非常明显的吸收特征,主要位于1408nm、2200nm、2348nm和2442nm^[15]。从绢(白)云母在钻孔中分布的波长变化来看,钻孔绢(白)云母的光谱吸收特征主要分布在2200nm附近有明显的吸收峰,在2340nm和2440nm附近有次级吸收峰(图2d)。绢(白)云母根据波长分为钠云母、普通绢(白)云母、多硅绢(白)云母,短波绢(白)云母被称作钠云母,特征吸收峰的波长值比较小,波长一般小于2203nm。长波绢(白)云母在识别中称为多硅绢(白)云母,表现出特征吸收峰波长值偏大的特征,波长一般大于

2208nm,具有贫Al、富Si的特点^[17]。研究区钻孔ZK614中云母的波长范围主要集中在2190~2218nm之间,以普通绢(白)云母和多硅绢(白)云母为主。绢(白)云母主要分布在顶部的砂卡岩与灰岩接触部位以及底部的石英砂岩、蚀变砂岩中(波长多大于2203nm),中部的碳酸盐岩地层和磁铁矿矿体中分布较少。

(5) 角闪石(Amp)。角闪石族矿物属于含(—OH)的镁、铁、钙、钠、铝的链状结构硅酸盐,类质同象普遍。角闪石在短波红外区间光谱特征是在2314nm、2388nm、1400nm及1908nm附近有吸收峰。ZK614钻孔内角闪石矿物在2310nm、2380nm附近有明显吸收峰(图2e)。两个钻孔显示,角闪石主要分布在砂卡岩以及磁铁矿矿体部位。以钻孔ZK614为例,角闪石在钻孔中部即灰岩、大理岩中也有分布,主要集中在条带砂卡岩或条带硅质灰岩中。张志等^[2]通过电子探针测试分析发现马坑铁角闪石类型以铁、镁闪石和阳起质透闪石为主,属钙铁角闪石亚类,常与磁铁矿紧密形成角闪石-磁铁矿。

(6) 绿泥石(Chl)。绿泥石属于含水层状硅酸

盐。在短波红外反射光谱中,绿泥石具有两类主要的诊断吸收特征,分别为 2260nm 及 2350nm 的 Fe—OH 吸收特征和 2250nm 及 2330 ~ 2340nm 的 Mg—OH 吸收特征,其中 2330 ~ 2350nm 特征吸收峰形较缓且不对称,2250 ~ 2260nm 吸收峰尖锐,此外 1910nm、2000nm 处水的双峰,1410nm 处羟基与水共同形成的吸收峰均是绿泥石诊断光谱峰位,但较不明显^[14]。该钻孔中绿泥石矿物的红外光谱特征主要表现为在 2250nm、2380nm 附近有明显吸收峰,在 1910nm 和 2000nm 附近含有水的吸收双峰,在 2380nm 处峰的形态较为对称(图 2f)。汪重午等(2014)^[14]将 2250nm 附近的吸收峰作为绿泥石特征吸收进行分析,吸收波长接近 2245nm 为富镁绿泥石,吸收波长接近 2265nm 为富铁绿泥石,从 ZK614 提取的绿泥石 Fe—OH 的诊断性吸收特征波长介于 2247 ~ 2256nm 之间来看,该钻孔绿泥石以镁铁绿泥石为主。绿泥石主要分布在钻孔上部的矽卡岩以及底部林地组(C_1l)地层砂岩、辉绿岩中。

(7)绿帘石(Epi)。绿帘石是岛状硅酸盐矿物,在短波红外光谱区间绿帘石光谱与绿泥石极易混淆,2000 ~ 2500nm 区间波谱几乎一致,但绿帘石在 1550nm、1830nm 处存在明显的次级吸收,能与绿泥石相区分^[14]。ZK614 钻孔短波红外光谱显示,该矿物的光谱特征在 1550nm、2250nm、2380nm 附近有明显的吸收峰,在 2380nm 处峰的形态不对称,右肩高于左肩(图 2g)。绿帘石在钻孔 ZK614 分布来看,其主要分布在钻孔上部的矽卡岩内,显示位置约为 200 ~ 210m。

(8)石膏(Gyp)。石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)是一种沉积岩和蒸发沉积物中典型的硫酸盐矿,形成于风化的沉积岩和火山岩,以及与矿床有关的热液蚀变系统中。石膏在短波红外区间的光谱特征是在 1750nm、1940nm 附近有明显的吸收峰,另外在 1447nm、1490nm、1537nm 附近,其光谱形成“三级台阶”(图 2h)。

(9)蒙脱石(Mont)。蒙脱石在热液蚀变系统中比较常见,属于一种低温、非酸性环境下的蚀变矿物,通常富 Fe、Mg,在各类岩石中都有可能出现。该矿物在 2218nm 附近表现出强烈的吸收特征,同时在 1410nm 和 1910nm 附近具有吸收特征(图 2i)。钻孔 ZK614 中蒙脱石主要赋存于钻孔顶部的灰岩以及中部的灰岩、泥质灰岩中,蒙脱石与绿泥石呈互层状产出。

3.2 蚀变矿物组合分布特征

蚀变矿物常与岩性之间存在着一定的相关关系,不同岩性中的蚀变矿物的周期性变化或突然转变也代表着岩性之间的依存关系或相关性^[15]。选取钻孔 ZK614 为研究对象,从岩性、蚀变矿物的分带可以获得以下特征。

(1)根据岩心编录结果,该钻孔从顶部到底部岩性分布为:灰岩→矽卡岩→硅质岩、灰岩、大理岩化灰岩→石榴子石、透辉石、磁铁矿→辉绿岩→石英岩化砂岩、蚀变砂岩。钻孔中的岩性是以灰岩为主,石英化砂岩、蚀变砂岩赋存于钻孔底部。

(2)蚀变矿物在空间上呈现出明显的分带性,短波红外测量钻孔显示,蚀变矿物划分组合从顶部到底部为:碳酸盐→绿泥石+角闪石+碳酸盐+少量蒙脱石+少量绿帘石→碳酸盐+角闪石+绿泥石+少量绿帘石→角闪石+碳酸盐+绿泥石→绿泥石+碳酸盐→绢(白)云母+绿泥石+碳酸盐。

(3)热红外波段测量钻孔显示,从顶部到底部矿物组合为:碳酸盐+石榴子石→碳酸盐+石英+石榴子石+辉石→碳酸盐+石英+蒙脱石→石榴子石+石英+碳酸盐→石英+绿泥石+碳酸盐+钾长石+斜长石→石英+碳酸盐+角闪石+斜长石+钾长石。

(4)矿体主要赋存于上石炭统经畚组一中二叠统栖霞组($C_{2j}-P_2q$)灰岩中(表 1)。

3.3 蚀变矿物与矿化分带关系

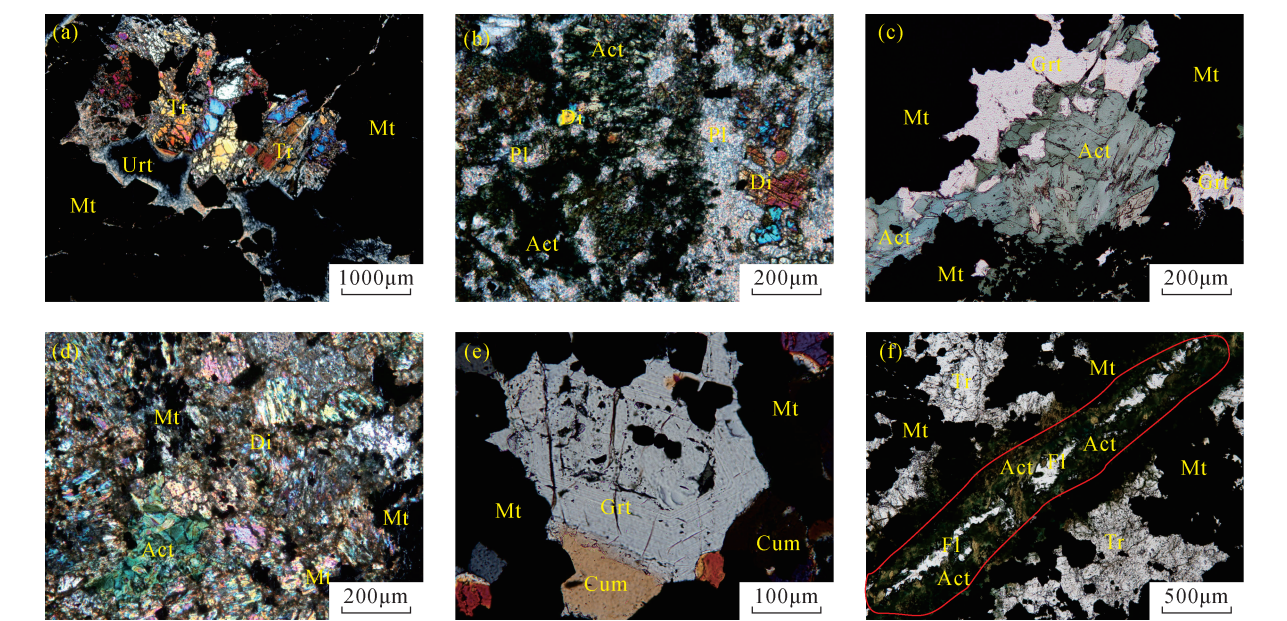
钻孔中的蚀变矿物主要有石榴子石、辉石、碳酸盐、绢(白)云母、绿泥石、角闪石、绿帘石、蒙脱石等。通过钻孔 ZK614 与 ZK617 主要蚀变矿物与赋存岩性对比分析,表明:①石榴子石、辉石主要赋存于矽卡岩、磁铁矿内,石榴子石+辉石的矿物组合代表了矿化处于“无水矽卡岩阶段”。②阳起石、透闪石、普通角闪石等角闪石族矿物分布比较广泛,与矽卡岩化分布范围基本一致;且钻孔 ZK617 显示,磁铁矿体中以出现大量的角闪石为特征。同时结合前人镜下鉴定结果^[22]也表明角闪石既可交代早期的矽卡岩矿物,又可与磁铁矿紧密伴生,组成角闪石-磁铁矿(图 3)。③绿泥石主要赋存于矽卡岩以及底部林地组(C_1l)砂岩、辉绿岩中,以镁铁绿泥石为主。④绢(白)云母+绿泥石主要在林地组(C_1l)砂岩中大量出现,表明其形成于较晚阶段,热液流体温度降低。

表 1 马坑铁矿蚀变矿物分布特征

Table 1 Distribution characteristics of altered minerals in Makeng iron deposit

地层	起始深度 (m)	终止深度 (m)	钻孔编录蚀变矿物组合	短波红外光谱识别矿物组合	热红外光谱识别矿物组合
C _{2j} - P _{2q} 灰岩	170.39	183.6	方解石	碳酸盐	碳酸盐 + 石榴子石
矽卡岩	183.6	245.76	石榴子石 + 透辉石 + 透闪石 + 方解石 + 绿帘石	绿泥石 + 角闪石 + 碳酸盐 + 少量蒙脱石 + 少量绿帘石	碳酸盐 + 石英 + 石榴子石 + 辉石
C _{2j} - P _{2q} 硅质岩、灰岩、大理岩化灰岩	245.76	665.15	方解石 + 绿泥石 + 阳起石 + 石榴子石 + 透辉石	碳酸盐 + 角闪石 + 绿泥石 + 少量绿帘石	碳酸盐 + 石英 + 蒙脱石 + 石榴子石。特别在 490m 矽卡岩处光谱识别为辉石 + 石榴子石 + 斜长石
石榴透辉磁铁矿	665.15	679.73	透辉石 + 透闪石 + 方解石 + 绿泥石	角闪石 + 碳酸盐 + 绿泥石	石榴子石 + 石英 + 碳酸盐
辉绿岩	679.73	692.28	绿泥石 + 透辉石 + 钾长石 + 石英	绿泥石 + 碳酸盐	石英 + 绿泥石 + 碳酸盐 + 钾长石 + 斜长石
C _{1l} 石英岩化砂岩、蚀变粉砂岩	692.28	792	绿泥石 + 钾长石 + 石英	绢(白)云母 + 绿泥石 + 碳酸盐	石英 + 碳酸盐 + 角闪石 + 斜长石 + 钾长石

注：本次热红外波段只测试了部分岩心段。



a—透闪石磁铁矿,透闪石呈柱状、粒状分布于磁铁矿粒间,二级干涉色明显(-); b—磁铁矿化辉绿岩,阳起石交代透辉石(+); c—阳起石磁铁矿,阳起石、石榴子石集合体呈条状聚集(-); d—阳起石交代透辉石(-); e—镁铁闪石交代石榴子石,可见残留的环带纹(+); f—阳起石、萤石脉沿着裂隙充填,切断早期形成的矽卡岩矿物和磁铁矿(-)。
Act—阳起石; Cum—镁铁闪石; Di—透辉石; Pl—萤石; Grt—石榴子石; Mt—磁铁矿; Pl—斜长石; Tr—透闪石; Urt—纤闪石。

图 3 马坑铁矿典型矿物特征图像^[22]

Fig. 3 Photomicrographs of typical minerals in Makeng iron deposit^[22]

单久库^[30]提到在围岩受成矿热液作用时,由内向外将会产生不同温度的温度递减带,富含有用组分

不同的蚀变矿物组合及分布严格受围岩岩性和热液交代的双重控制,且蚀变矿物随着温度递减带顺次出现。在早期无水矽卡岩阶段形成石榴子石与辉石矿物组合;在晚期含水矽卡岩阶段形成角闪石、绿帘石和阳起石等矿物,该阶段也是主要的矿化阶段。

而在更晚期的硫化物－碳酸盐阶段,方解石、绿泥石、石膏等低温蚀变矿物出现在较远端的砂岩、粉砂岩地层内(图4)。马坑铁矿的蚀变矿物分带明显,矽卡岩与矿化有密切的关系,矿物组合特点及分带表明马坑铁矿为层控矽卡岩型矿床。

4 结论

利用红外反射光谱技术快速获取了马坑铁矿蚀变矿物光谱特征,厘定了马坑铁矿的主要蚀变矿物以及组合特征。蚀变矿物在空间上呈现出明显的分带性,不同蚀变矿物的分布严格受围岩岩性和热液交代的双重控制。石榴子石+辉石是该类型矿床的重要蚀变矿物组合。蚀变分带特征反映了从主矿体从高温到低温的变化过程;结合矿床地质特征,推断出马坑铁矿为典型的层控矽卡岩型矿床。

短波－热红外光谱波段能无损、快速、批量地识别出岩石样品中的硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐等矿物,尤其是热红外波段(6000~14500nm)可以识别出常见的造岩矿物(长石、石英、辉石、石榴子石、橄榄石等),利用该技术可以准确厘定出辉石、石榴子石等蚀变矿物与马坑铁矿矿化的关系,从而可以快速地

圈定含矿矿体,为矽卡岩型矿床矿物分带以及深部找矿等研究提供思路和方法。

致谢: 实验及数据整理过程中得到了自然资源实物地质资料中心张弘、郭东旭等工程师的协助,论文撰写过程中得到了中国地质大学(北京)王瑞教授、河北地质大学刘新星老师的指导,诸位审稿专家对本文提出了许多建设性意见,在此一并表示感谢!

5 参考文献

[1] 赵一鸣,林文蔚,毕承思,等. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质出版社,2012.
Zhao Y M, Lin W W, Bi C S, et al. Skarn deposit of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.

[2] 张志,张承帅. 福建马坑铁(钼)矿床矽卡岩矿物学特征及分带研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(5): 1339-1354.
Zhang Z, Zhang C S. Skarn mineral characteristics and zonation of the Makeng Fe-Mo deposit in Fujian Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(5): 1339-1354.

[3] 李林,倪培,杨玉龙,等. 马坑铁钼铅锌多金属矿成矿

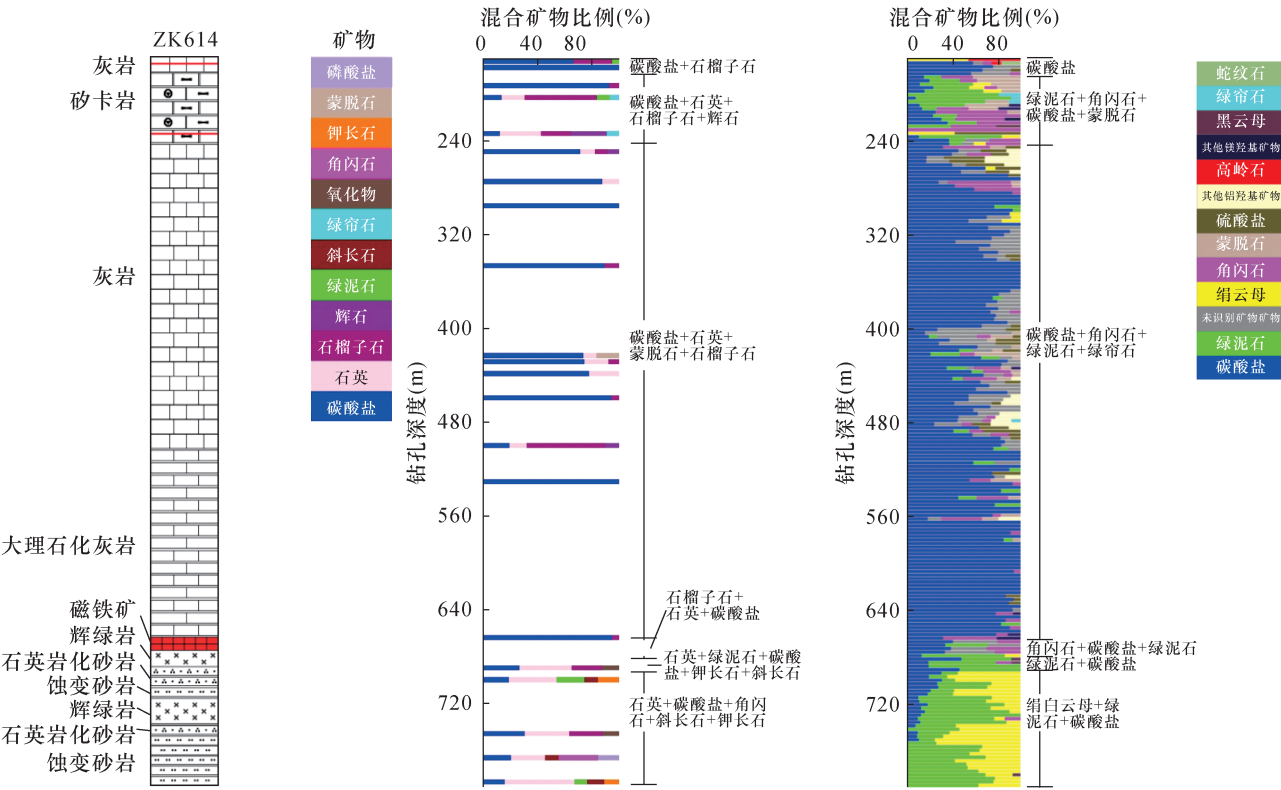


图4 马坑铁矿 ZK614 钻孔热红外及短波红外蚀变矿物－岩性分布柱状图
Fig. 4 Column charts of the relative contents of altered minerals analyzed by short-wave infrared and thermal infrared reflection technique as well as these corresponding lithology categories in drill ZK614, from Makeng iron deposit

- 流体演化及矿床成因类型[J]. 高校地质学报, 2016, 22(3): 401–412.
- Li L, Ni P, Yang Y L, et al. A discussion on ore – forming fluid evolution and genesis of Makeng Fe – Mo – Pb – Zn polymetallic deposit [J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(3): 401–412.
- [4] 狄永军, 张达, 吴淦国, 等. 武夷山覆盖区马坑式铁矿层位及找矿方向[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2012, 37(6): 1232–1242.
- Di Y J, Zhang D, Wu G G, et al. Strata hosted Makeng type iron deposits and prospecting orientation in the Wuyishan covered region[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(6): 1232–1242.
- [5] 王森, 张达, Absai V, 等. 福建龙岩大洋一莒舟花岗岩地球化学、年代学、铪同位素特征及其地质意义[J]. 地球化学, 2015, 44(5): 450–468.
- Wang S, Zhang D, Absai V, et al. Zircon U – Pb geochronology, geochemistry and Hf isotope compositions of the Dayang and Juzhou granites in Longyan, Fujian and their geological implications[J]. Geochimica, 2015, 44(5): 450–468.
- [6] 郭娜, 史维鑫, 黄一入, 等. 基于短波红外技术的西藏多龙矿集区铁格隆南矿床荣那矿段及其外围蚀变填图——勘查模型构建[J]. 地质通报, 2018, 37(2–3): 446–457.
- Guo N, Shi W X, Huang Y R, et al. Alteration mapping and prospecting model construction in the Tiegelongnan ore deposit of the Duolong ore concentration area, northern Tibet, based on shortwave infrared technique [J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(2–3): 446–457.
- [7] 刘鹤, 马宇, 任宏, 等. 福建铁帽山钨矿床围岩蚀变的短波红外光谱学研究[J]. 矿物学报, 2015, 35(2): 221–228.
- Liu H, Ma Y, Ren H, et al. Short – wave infrared spectroscopy study on wallrock alteration of the Tiemaoshan porphyry molybdenum deposit, Fujian Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2015, 35(2): 221–228.
- [8] Tappert M C, Rivard B, Giles D, et al. The mineral chemistry, near – infrared, and mid – infrared reflectance spectroscopy of phengite from the Olympic Dam IOCG deposit, South Australia[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 53: 26–38.
- [9] Carrino T A, Crósta A P, Toledo C L B, et al. Unveiling the hydrothermal mineralogy of the Chapi Chiara gold prospect, Peru, through reflectance spectroscopy, geochemical and petrographic data [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 64: 299–315.
- [10] Neal L C, Wilkinson J J, Mason P J, et al. Spectral characteristics of propylitic alteration minerals as a vectoring tool for porphyry copper deposits[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2018, 184: 179–198.
- [11] Duuring P, Hassan L, Zelic M, et al. Geochemical and spectral footprint of metamorphosed and deformed VMS – style mineralization in the Quinns District, Yilgarn Craton, western Australia[J]. Economic Geology, 2016, 111: 1411–1438.
- [12] Wang R, Cudahy T, Laukamp C, et al. White mica as a hyperspectral tool in exploration for the Sunrise Dam and Kanowna Belle gold deposits, western Australia [J]. Economic Geology, 2017, 112(5): 1153–1176.
- [13] 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 等. 短波红外光谱技术在浅剥蚀斑岩铜矿区勘查中的应用——以西藏念村矿区为例[J]. 矿床地质, 2012, 31(4): 699–717.
- Yang Z M, Hou Z Q, Yang Z S, et al. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu district: A case study of Niancun ore district, Tibet [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(4): 699–717.
- [14] 汪重午, 郭娜, 郭科, 等. 基于短波红外技术的斑岩 – 矽卡岩型矿床中绿泥石蚀变分布特征研究: 以西藏甲玛铜多金属矿为例[J]. 地质与勘探, 2014, 50(6): 1137–1146.
- Wang C W, Guo N, Guo K, et al. characteristics of the chlorite alteration in the porphyry – skarn deposit based on short – wave infrared technology: A case study of the Jiama copper – polymetallic deposit in Tibet [J]. Geology and Exploration, 2014, 50(6): 1137–1146.
- [15] 郭娜, 刘栋, 唐菊兴, 等. 基于短波红外技术的蚀变矿物特征及勘查模型——以斯弄多银铅锌矿床为例[J]. 矿床地质, 2018, 37(3): 556–570.
- Guo N, Liu D, Tang J X, et al. Characteristics of alteration minerals and prospecting model revealed by shortwave infrared technique: Take Sinongduo Ag – Pb – Zn deposit as an example [J]. Mineral Deposits, 2018, 37(3): 556–570.
- [16] 许超, 陈华勇, White N, 等. 福建紫金山矿田西南铜钨矿段蚀变矿化特征及 SWIR 勘查应用研究[J]. 矿床地质, 2017, 36(5): 1013–1038.
- Xu C, Chen H Y, White N, et al. Alteration and mineralization of Xinan Cu – Mo ore deposit in Zijinshan orefield, Fujian Province, and application of short wavelength infra – red technology (SWIR) to exploration [J]. Mineral Deposits, 2017, 36(5): 1013–1038.

- [17] 郭娜,黄一入,郑龙,等.高硫-低硫化浅成低温热液矿床的短波红外矿物分布特征及找矿模型——以西藏铁格隆南(荣那矿段)、斯弄多矿床为例[J].地球学报,2017,38(5):767-778.
- Guo N, Huang Y R, Zheng L, et al. Alteration zoning and prospecting model of epithermal deposit revealed by shortwave infrared technique: A case study of Tiegelongnan and Sinongduo deposits [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(5): 767-778.
- [18] 代晶晶,赵龙贤,姜琪,等.热红外高光谱技术在地质找矿中的应用综述[J].地质学报,2020,94(8):2520-2533.
- Dai J J, Zhao L X, Jiang Q, et al. Review of thermal-infrared spectroscopy applied in geological ore exploration[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 94(8): 2520-2533.
- [19] Burley L L, Barnes S J, Laukamp C, et al. Rapid mineralogical and geochemical characterisation of the Fisher East nickel sulphide prospects, western Australia, using hyperspectral and pXRF data[J]. Ore Geology Reviews, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.032>.
- [20] Lampinen H M, Laukamp C, Occhipinti S A, et al. Mineral footprints of the paleoproterozoic sediment-hosted Abra Pb-Zn-Cu deposit capricorn orogen, western Australia[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 104: 436-461.
- [21] Schodlok M C, Whitbourn L, Huntington J, et al. Hylogger-3, a visible to shortwave and thermal infrared reflectance spectrometer system for drill core logging: Functional description[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2016, 63(8): 929-940.
- [22] 易锦俊. 闽西南马坑铁矿成因机制与找矿模式研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
- Yi J J. Study on the genetic mechanism and prospecting model of Makeng iron deposit in southwest Fujian[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [23] 张承帅,毛景文,张长青,等.福建马坑矽卡岩型铁(钼)矿床流体包裹体特征及成矿机制研究[J].矿床地质,2013,32(2):289-307.
- Zhang C S, Mao J W, Zhang C Q, et al. Fluid inclusion characteristics and metallogenic mechanism of Makeng skarn Fe-Mo deposit in Fujian Province[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(2): 289-307.
- [24] 童鹏,刘鹏飞,赵英俊,等.基于改进后HyLogger岩芯测量系统的一种低反射率页岩气岩芯高光谱数据获取方法[J].中国矿业,2018,27(5):147-152.
- Tong P, Liu P F, Zhao Y J, et al. A method of high spectral data acquisition for low reflectivity shale gas core based on the improved HyLogger core scanning system [J]. China Mining Magazine, 2018, 27(5): 147-152.
- [25] Laukamp C, Caccetta M, Chia J, et al. The uses, abuses and opportunities for hyperspectral technologies and derived geoscience information[C]//Proceedings of Geo-computing Conference Brisbane: AIG Bulletin, 2010: 73-76.
- [26] 姚远,陈骏,陆建军,等.华南三类含钨锡矽卡岩中石榴子石的成分、微量元素及红外光谱[J].矿物学报,2013,33(3):315-328.
- Yao Y, Chen J, Lu J J, et al. Composition, trace element and infrared spectrum of garnet from three types of W-Sn bearing skarns in the south of China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(3): 315-328.
- [27] 李胜荣,许虹,申峻峰,等.结晶学与矿物学[M].北京:地质出版社,2008.
- Li S R, Xu H, Shen J F, et al. Crystallography and mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [28] 甘甫平,王润生.遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究[M].北京:地质出版社,2004.
- Gan F P, Wang R S. Research on the basis and technical method of remote sensing rock and mineral information extraction[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [29] 陈跃升.马坑铁矿开发过程中对矿床成因的新认识[J].金属矿山,2002(11):50-52.
- Chen Y S. New knowledge of the information cause of ore deposit during the exploitation process of Makeng iron mine[J]. Metal Mine, 2002(11): 50-52.
- [30] 单久库.黑龙江省翠宏山矽卡岩型铁多金属矿床的温度分带及意义[J].测绘与空间地理信息,2010,33(4):162-167.
- Shan J K. Temperature zoning and its significance of skarn-type polymetal deposits of Cuihong Mountain in Heilongjiang Province [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2010, 33(4): 162-167.

Study on the Characteristics of the Infrared Spectrum and the Alteration Zoning of Drill Core in the Makeng Iron Deposit

SHI Wei-xin, YI Jin-jun^{*}, WANG Hao, TIAN Rong-jun

(Core and Samples Center of Land and Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The SWIR – TIR infrared spectrum characteristics of altered minerals in the core of Makeng iron deposits were summarized.
- (2) The distribution characteristics of alteration minerals in the core of the borehole were summarized and the relationship between alteration mineral assemblage and mineralization was discussed.
- (3) Zoning of altered minerals in the Makeng iron deposit was investigated, and the formation process of the main ore body from high temperature to low temperature was also discussed.

ABSTRACT

BACKGROUND: Silicate, sulfate, carbonate and other minerals can be identified by infrared reflectance spectroscopy which is a non – destructive and rapid batch method. In recent years, infrared reflectance spectroscopy has played an important role in mineralogical research, mineral exploration and prospecting, mining and metallurgy. Altered minerals such as pyroxene, garnet, olivine and rock – forming minerals such as feldspar and quartz can be identified rapidly with thermal infrared (6000 – 14500nm, TIR), which is important for mineralogical research, mineral exploration and prospecting of skarn type, copper – nickel sulfide type and quartz – vein type deposits.

OBJECTIVES: To quickly characterize the type and assemblage of alteration minerals.

METHODS: Shortwave – thermal infrared reflectance spectroscopy was used to analyze the drill cores of the Makeng iron deposit in the National Geological Archives. The spectral characteristics of the altered minerals in this deposit were summarized, the type and assemblage of alteration minerals were quickly determined.

RESULTS: The results showed that the altered minerals in Makeng include garnet, pyroxene, carbonate, chlorite, sericite, hornblende, epidote, montmorillonite and gypsum. There were significant reflections at 9199nm, 9730nm, 10500nm and 11100nm for garnet. For pyroxene, the significant reflections were mainly located at 11500nm and 12150nm. Infrared spectroscopy analysis showed that altered minerals displayed obvious zoning in space, and the assemblage and distribution of altered minerals were strictly controlled by the lithology of country rocks and hydrothermal metasomatism. Garnet + pyroxene can be used as the typical mineral assemblage of skarn deposits, and the characteristics of alteration zoning indicated a process from high temperature to low temperature.

CONCLUSIONS: Combined with the geological features, the Makeng iron deposit can be defined as a stratabound skarn deposit. This research can provide scientific support for the understanding of skarn – type deposits and related prospecting and exploration.

KEY WORDS: cores; infrared reflectance spectrum; alteration bands; skarn deposit; Makeng iron deposit