郭东旭,张弘,高卿楠,等.钻孔岩心红外光谱 – 便携式 XRF – 磁化率测试在攀西太和钒钛磁铁矿床勘查中的应用[J]. 岩矿 测试,2022,41(1):43 – 53.

GUO Dong – xu, ZHANG Hong, GAO Qing – nan, et al. Infrared Spectroscopy, Portable XRF and Magnetic Susceptibility Analysis of Drill Core for Exploration of the Taihe Vanadium Titano – Magnetite Deposit in the Panxi Area, Sichuan Province [J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(1):43 – 53. [DOI: 10.15898/j. cnki. 11 – 2131/td. 202104030050]

钻孔岩心红外光谱 – 便携式 XRF – 磁化率测试在攀西太和 钒钛磁铁矿床勘查中的应用

郭东旭,张弘*,高卿楠,朱有峰,纪广轩 (自然资源实物地质资料中心,河北三河 065201)

摘要:近年来,红外光谱技术因其可以绿色、快速、无损、精确探测矿物和提高勘查效率而备受关注。攀西超 大型太和钒钛磁铁矿床位于镁铁质-超镁铁质层状岩体中,该矿床的典型矿物的红外光谱特征研究相对缺 乏,制约了勘查效率的提高。本文应用便携式傅里叶变换红外光谱仪对四川太和钒钛磁铁矿床钻孔 ZK1307 岩心开展热红外光谱测试工作,并辅以便携式 X 射线荧光光谱(XRF)元素含量分析和磁化率值的综合分 析,参考岩心编录情况,分析研究了钻孔岩性-矿物组合-元素含量-磁化率之间的对应关系。研究表明: 热红外光谱可以实现快速、无损对辉石特征吸收峰的信息提取,识别含磁铁辉石岩体分布范围,快速界定含 矿岩体;太合矿床 Fe、Ti、V 元素含量可以用磁化率值进行线性拟合,较高的 Fe、Ti、V 金属元素含量和磁化率 值可作为判断地质体矿化的指示信息。

关键词:太和;钒钛磁铁矿床;矿床勘查;红外光谱;磁化率;X射线荧光光谱 要点:

(1) 红外光谱可实现对辉石特征吸收峰的信息提取,从而快速圈定含磁铁辉石岩。

(2) Fe、Ti、V 元素含量可用磁化率值进行线性拟合。

(3) 较高的 Fe、Ti、V 金属元素含量和磁化率值,可作为判断地质体矿化的指示信息。

中图分类号: 0657.31 文献标识码: B

造岩矿物和蚀变矿物是构成地质体成岩、蚀变、 矿化信息的基本单元,对不同矿区内造岩矿物、蚀变 矿物的类型、组合特征、期次划分、空间展布及物理 化学性质等信息综合梳理和研究,不仅有利于加深 矿床成因理论的认识,而且有助于提高矿产勘查效 率^[1-3]。攀西(攀枝花一西昌的简称)地区地处峨 眉山大火成岩省的内带,是世界上最大的钒钛磁铁 矿集区,攀枝花、白马、红格、太和是其中典型的超大 型钒钛磁铁矿床,位于镁铁质 – 超镁铁质层状岩体 中^[4,5]。然而,对于矿物粒度较细的镁铁质 – 超镁 铁质岩石,仅依靠肉眼和传统野外工具,难以对其中 的矿物进行有效识别。精细梳理矿区内不同矿物特 征需结合电子探针成分分析(EPMA)和X射线衍射 光谱(XRD)等分析结果,经过制样、实验等流程,周 期长、效率低、成本高。因此,新的勘查技术的引入 以解决以上问题显得尤为重要。

太和矿床是攀西地区超大型钒钛磁铁矿床的典型代表,有关太和钒钛磁铁矿床的研究,主要体现在应用全岩地球化学分析、实验室 X 射线荧光光谱分析(XRF)、电感耦合等离子体质谱(ICP – MS)等测试技术,对矿床地质特征^[6-7]、矿床勘查^[8]、成岩成

收稿日期: 2021-04-03; 修回日期: 2021-09-10; 接受日期: 2021-09-21

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)

第一作者:郭东旭,硕士,助理工程师,研究方向为矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: gdx2016@163.com。

通信作者:张弘,硕士,工程师,研究方向为岩心红外光谱解译及应用。E-mail: 450865181@qq.com。

矿作用[9-14]等方面进行了探讨。近年来,红外光谱 技术作为一种新兴绿色地质找矿技术,因其可以快 速、无损、精确探测矿物而备受关注^[15]。按照波长 的不同,红外光谱可以划分为:可见光-近红外 (V-NIR,波长 380~1100nm,主要识别金属离子、 稀土元素等);短波红外(SWIR,波长1100~ 2500nm,主要识别含羟基矿物、含C-H键有机物、 碳酸盐、硫酸盐等);热红外(TIR,波长 6000~ 14000nm, 主要识别无水硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐等) 等^[16]。其中,热红外光谱技术可以快速识别出常见 的造岩矿物(长石、石英、辉石、石榴子石、橄榄石 等),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^[15]。矿物热红外 光谱库是通过实验室测试获得的各种矿物样品的参 考波谱集合,国外的矿物热红外光谱库的建立和发 展,为热红外光谱技术应用奠定了基础^[17-20]。 Thomas(2016)^[21]认为获取热红外光谱数据,并用光 谱解译软件获得矿物组合的分布信息、各种矿物相 对含量的变化规律、各种矿物成分的变化趋势等信 息,结合地球化学获得的主微量元素、金属含量等信 息,可以建立矿床热红外高光谱勘查模型,进而指导 找矿。在中国热红外光谱被广泛应用于固体矿产勘 查^[22-26]、岩性的粗略分类^[27]、矿山管理^[28-29]、土壤 调查^[30-31]等领域。然而,热红外光谱技术并没有应 用到镁铁质 - 超镁铁质钒钛磁铁矿的找矿勘查之 中,制约了该类矿床的勘查效率。

太和超大型钒钛磁铁矿床 13 号勘探线(图 1) ZK1307 钻孔较深,钻遇了太和矿区几乎所有的矿体 和岩体,矿化效果较好,为尝试热红外光谱在钒钛磁 铁矿床中的应用和光谱矿物识别提供了较大的研究 潜力。本文从太和钒钛磁铁矿床钻孔 ZK1307 岩心 出发,开展钒钛磁铁矿床岩心的热红外光谱测试工 作,并辅以岩心便携式 XRF 元素含量测试和磁化率 的综合分析,参考岩心编录情况,精准识别该钻孔岩 性 - 矿物组合 - 元素含量 - 磁化率之间的对应关 系,进一步为该矿床的矿体展布和找矿勘探提供借 鉴和参考。

1 地质概况

太和矿区位于峨眉山大火成岩省内带,西邻松 潘一甘孜造山带,是攀西地区钒钛磁铁矿集区中较 大的一个矿区。矿区内结晶基底为古元古界,褶皱 基底为中元古界,主构造线分别为近东西向和近南 北向^[9,11-12]。盖层由震旦系及以上地层组成,构造 以南北向较宽缓褶皱和断裂为主。太和岩体位于攀 西地区的北部,距四川省西昌市约12km,岩体出露 长约3km,宽约2km,厚约1.2km,岩体呈层状展布, 倾向东南,倾角50°~60°,含有大约810×10⁷t矿 石,全FeO平均品位约为33%,TiO₂平均品位约为 12%,V₂O₅平均品位约为0.3%^[5]。

根据岩石矿物组合和矿物含量变化,以及岩石 结构构造和韵律层的发育等岩相特征,太和岩体自 下而上可以划分为下部岩相带、中部岩相带和上部 岩相带。下部岩相带厚 200m 左右,由橄榄辉石岩、 (橄榄)辉长岩、不含磷灰石的块状 Fe-Ti 氧化物矿 石组成。橄榄辉石岩含有约60%单斜辉石、约30% 橄榄石、约10%的磁铁矿、钛铁矿,其中,部分辉石 蚀变为绿泥石,大部分的橄榄石蚀变为蛇纹石。 (橄榄)辉长岩呈花斑状灰黑色,中细粒辉长结构, 块状构造。主要含辉石(含量约50%)、斜长石(约 40%)、橄榄石(<5%)、磁铁矿+钛铁矿+黄铁矿 +黄铜矿(约5%),其中,部分辉石蚀变为绿泥石, 部分斜长石蚀变为绿帘石。块状矿层位于下部岩相 带的顶部,呈灰黑色,中细粒结构,块状构造,主要含 磁铁矿+钛铁矿(70%~75%)、辉石(约20%)、斜 长石(约10%)和少量黄铁矿。中部岩相带厚约 500m,韵律旋回发育,其中共有6个较大韵律旋回 $(I \sim VI)$ 。除了旋回 I 底部由磁铁辉石岩构成,旋 回Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ的底部均为磷灰石磁铁辉石岩, 而旋回上部均为(磷灰石)辉长岩。磁铁辉石岩主 要含磁铁矿(约10%)、钛铁矿(约10%)、单斜辉石 (约80%)和少量斜长石。自形的磷灰石常与半自 形 - 他形的 Fe - Ti 氧化物和硅酸盐矿物堆积在一 起。磷灰石磁铁辉石岩主要含单斜辉石(60%)、磁 铁矿(15%)、钛铁矿(10%)、磷灰石(10%)和少量 斜长石+角闪石(5%)。(磷灰石)辉长岩主要含 斜长石(约40%)、单斜辉石(约40%)、Fe-Ti氧化 物(约10%)、磷灰石和角闪石(10%)。中部岩相 带样品中半自形的橄榄石常包裹一些他形的Fe-Ti 氧化物。上部岩相带厚200m,主要岩石类型为磷灰 石辉长岩,主要组成矿物包括斜长石(约60%)、单 斜辉石(约30%)、钛铁矿(约2%)、磁铁矿(约 3%)、磷灰石+角闪石(约5%)。

2 实验部分

本文以四川省西昌市太和钒钛磁铁矿床的 13 号勘探线剖面(图1)07 号钻孔(ZK1307)为研究



图1 太和钒钛磁铁矿床第13号勘探线剖面图^[5]

Fig. 1 No. 13 exploration line section in Taihe vanadium titano – magnetite deposit^[5]

对象,该钻孔钻遇了矿区主要矿体和绝大部分围岩, 具有一定的代表性。为了更好地对比深入研究,本 次对同一深度、同一测试点分别进行热红外光谱、便 携式 XRF 元素分析以及磁化率测试。为了保证测 试效果,选择每1~2m 一个测试点,对整孔岩心系 统分析。

2.1 热红外光谱分析

为提高太和钒钛磁铁矿床的勘查效率,项目组尝 试将具有绿色、快速、无损、精确探测特点的热红外光 谱技术应用到太和钒钛磁铁矿床的钻孔岩心测试之 中。本文热红外数据测试使用的仪器为便携式傅里 叶变换红外光谱仪(Agilent 4300 Handheld FTIR),数 据测试均在室内进行,排除了环境因素对测试结果的 干扰,每个数据采集点通过3次测试求平均值的方法 提高数据质量。数据采集之后,将数据导入软件 TSG8.0中进行数据处理和解译工作。TSG是英文 "The Spectral Geologist"的简称,是光谱地质应用开发 的专业软件,其中囊括了海量的地质光谱数据的分析 算法和澳大利亚 CSIRO(联邦科学与工业研究组织) 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^[32]。

2.2 便携式 XRF 元素分析

经过热红外光谱测试之后,为进一步提升对太 和钒钛磁铁矿床钻孔岩心的地质认识,项目组针对 太和钒钛磁铁矿床的 ZK1307 钻孔岩心测试光谱的 点位,同时开展 XRF 元素分析工作。本次采用的仪 器是 Vanta VMW 型便携式 X 射线荧光光谱分析仪, 单个测试点测试时间为 90s,每个测试点同时测试 3 次,通过多次测试求平均值的方法提高测试精度, 从而降低便携式 XRF 测试误差,本次测试相对误差 <10%。

2.3 磁化率分析

为探究 Fe、Ti、V 金属元素含量与磁化率之间的 关系,提升太和钒钛磁铁矿床的找矿勘查效率,应用 KM-7型便携式磁化率测试仪对钻孔 ZK1307进行 测试。测试过程中,先将振荡器频率的测试保持线

— 45 —

圈离岩石之间的距离至少30cm,进行初始环境磁化 率测试,然后将线圈移到测试点表面进行数据采集, 最后将线圈放在离岩石至少30cm的距离,再次进 行测试,从而提高测试的灵敏度(灵敏度为1×10⁻⁶ SI)。根据频率的不同自动计算出磁化率,并在屏幕 上显示磁化率值。

3 结果与讨论

3.1 钻孔岩心热红外光谱特征

本文基于对太和钒钛磁铁矿床 13 号勘探线的 ZK1307 钻孔岩心开展热红外光谱测试工作采集的 光谱数据,结合钻孔地质编录,获取钻孔的矿物组 成。下部岩相带中,由深部到浅部,主要的矿物组合 为:斜长石+辉石+绿泥石→橄榄石+蛇纹石+辉 石+斜长石→斜长石+辉石+绿泥石→辉石+斜长 石+绿泥石。中部岩相带的旋回 I,从深部到浅部 主要矿物组合为:辉石+绿泥石+蛇纹石+斜长石 +金红石→斜长石+辉石+角闪石+蛇纹石。中部 岩相带的旋回Ⅱ到旋回Ⅵ,每一个旋回的矿物组合 基本相同,深部为:辉石+斜长石+绿泥石+磷灰 石,浅部为:斜长石+辉石+绿泥石+蛇纹石+磷灰 石。上部岩相带主要的矿物组合为:斜长石+辉石 +绿泥石+蛇纹石+磷灰石(图2)。整个钻孔的矿 物组合与该钻孔的岩性类别一一对应,矿石矿物主 要位于磷灰石磁铁辉石岩体中。

钻孔 ZK1307 中,光谱识别的辉石,主要有普通 辉石、透辉石、钙铁辉石,这三种辉石在整个钻孔中 基本都有分布。其中,典型普通辉石的光谱图如图 3a 所示。矿床内三种辉石的特征吸收峰的波长在 8360nm、9610nm、10050nm、10700nm 附近^[15]。因 此,通过 TSG 软件中的算法分别求得 8360nm、 9610nm、10050nm、10700nm 波段的相对吸收深度 (图 2),这些谱图显示矿化段的部分,其相对吸收深 度较高,对应的辉石含量也相对较高,矿化更明显。

钻孔 ZK1307 中的斜长石主要有更长石、中长石、拉长石、钙长石。其中,更长石主要位于钻孔的



图 2 太和钒钛磁铁矿床钻孔 ZK1307 热红外矿物相对含量与岩性、金属 Fe – Ti – V 元素含量、磁化率、辉石特征吸收峰相对 吸收深度信息对比图。其中,8360D、9610D、10050D、10700D 分别表示辉石的特征吸收峰的波长在 8360nm、9610nm、 10050nm、10700nm 波段的相对吸收深度

Fig. 2 Column chart of the relative contents of minerals identified by infrared spectroscopy, associated with the lithology categories, and the contents of iron, titanium, vanadium, as well as the magnetic susceptibility, the relative absorption depth of the characteristic absorption peak of pyroxene in 8360nm, 9610nm, 10050nm, 10700nm, from drilling ZK1307, Taihe vanadium titano – magnetite deposit, Sichuan Province



a一普通辉石实测和参考热红外光谱; b一斜长石实测和参考热红外光谱; c一磷灰石实测和参考热红外光谱; d一橄榄石实测和参考热红外 光谱; e一角闪石实测和参考热红外光谱; f一蛇纹石实测和参考光谱; g一绿帘石实测和参考光谱; h一绿泥石实测和参考光谱。

图 3 太和钒钛磁铁矿床典型矿物的实测和参考热红外光谱特征(参考光谱谱图来自 TSG 软件)

Fig. 3 Spectral characteristics of typical minerals identified by thermal infrared from the Taihe vanadium titano – magnetite deposit, Sichuan Province (The reference spectra are from TSG software manual)

- 47 -

上部,中长石和拉长石在整个钻孔中均有分布,而钙 长石主要位于钻孔的下部。典型的中长石光谱图如 图 3b 所示,中长石典型的波长在 8988nm 和 9599nm 附近,典型波谷的波长在 9228nm 左右。

磷灰石在太和钒钛磁铁矿床中是比较常见和重要的副矿物。攀西地区攀枝花、白马、红格钒钛磁铁 矿矿石中均不含或很少见到磷灰石,而太和矿区除 了下部岩相带的块状矿层不含磷灰石,其他岩性或 矿石中或多或少都含有磷灰石,尤其在中部岩相带 的磁铁辉石岩中,赋存有大量的磷灰石^[10,14]。磷灰 石的热红外光谱整体呈"M"型,典型吸收谷在 9200nm 附近(图 3c)。

橄榄石是基性岩和超基性岩中常见的造岩矿物,在太和矿床钻孔 ZK1307中,橄榄石主要位于下部岩相带的橄榄辉石岩体中,下部的辉长岩体中也有少量分布。橄榄石的热红外光谱的主要特征是在波长为10182nm、10644nm、11946nm 附近分别出现特征反射峰(图 3d),并且橄榄石的镁指数越高,特征峰的波长越向短波的方向移动。

角闪石主要位于下部岩相带和中部岩相带中, 磷灰石磁铁辉石岩和磷灰石辉长岩中都有分布,在 热红外光谱中,角闪石主要有一个特征峰在 10307nm附近,一个肩部在11427nm附近(图3e)。

钻孔 ZK1307 中的蛇纹石分布比较分散,含量 较少,主要由橄榄石、辉石、角闪石蚀变形成。其中, 与中部和上部岩相带相比,下部岩相带中的蛇纹石 相对较多。典型蛇纹石热红外光谱的反射特征峰波 长位于 9673nm 左右(图 3f)。

绿帘石主要位于下部岩相带的辉长岩中,由部分的斜长石蚀变而来。在热红外光谱中,绿帘石在 9472nm、10431nm、11250nm附近出现特征反射峰,在 9795nm、10840nm附近出现特征吸收谷(图3g)。

绿泥石主要位于下部岩相带,由橄榄辉石岩和 斜长岩中的辉石蚀变形成。在热红外光谱中,绿泥 石在9709nm附近出现特征反射峰,在10323nm附 近出现肩部(图3h)。

从太和钒钛磁铁矿床 ZK1307 整个钻孔上来 看,与矿化相关的岩性主要是辉石岩,包括橄榄辉石 岩、磁铁辉石岩、磷灰石磁铁辉石岩。而这些辉石岩 体中,最主要和含量最多的矿物就是辉石,热红外光 谱可以快速、无损地实现对辉石特征吸收峰的信息 提取(图2)。辉石特征峰的相对吸收深度 8360D、 9610D、10050D、10700D 值越高,对应的辉石含量越 高,矿化越明显。根据这些特征可以大概圈定辉石 岩体分布范围,快速圈定含矿岩体,为找矿勘查提供 高效的数据支撑。

3.2 钻孔岩心 Fe、Ti、V 元素含量特点

因岩性和 Fe - Ti 氧化物的含量具有一定的差 异,钻孔不同深度的岩心,Fe、Ti、V元素含量也不相 同(本文中铁含量包括二价铁和三价铁)。其中,少 量的 Ti 元素和大多数的 V 元素因含量低于检出限 而未能测试出来。矿化的钻孔岩心段的 V 能被测 试出来的,其含量为 300 × 10⁻⁶ ~ 2000 × 10⁻⁶ (图2)。第四系沉积物的 Fe 含量为10000×10⁻⁶~ 40000×10⁻⁶, Ti 含量为2000×10⁻⁶~10000×10⁻⁶; 磷灰石辉长岩中的 Fe 含量为40000×10⁻⁶~120000 ×10⁻⁶,Ti含量为10000×10⁻⁶~50000×10⁻⁶;磷灰 石磁铁辉石岩的 Fe 含量为 120000 × 10⁻⁶ ~ 200000 ×10⁻⁶, Ti 含量为 50000 × 10⁻⁶ ~ 100000 × 10⁻⁶; 磁 铁辉石岩的 Fe 含量为 120000~450000×10⁻⁶, Ti 含量为 50000 × 10⁻⁶ ~ 110000 × 10⁻⁶; 块状 Fe - Ti 氧化物矿石的 Fe 含量 > 160000 × 10⁻⁶, Ti 含量 >50000×10⁻⁶;辉长岩的 Fe 含量为 60000×10⁻⁶~ 110000×10⁻⁶,Ti含量一般为10000×10⁻⁶~40000 ×10⁻⁶;橄榄辉石岩因为被矿化,其Fe含量较高,为 100000×10⁻⁶~280000×10⁻⁶,Ti含量相对差别较 大,为20000×10⁻⁶~80000×10⁻⁶。

根据以上岩石岩性和含矿性及其 Fe、Ti、V 元素 含量,可以用便携式 XRF 测试的 Fe、Ti、V 元素含量 初步界定矿化界线。基于本次研究的数据和地质认 识,在钻孔 ZK1307 中, Fe 含量 > 120000 × 10⁻⁶, Ti 含量 > 50000 × 10⁻⁶, V 含量 > 300 × 10⁻⁶, 可作为圈 定矿化区的地球化学指标。因此,本次研究认为在 钒钛磁铁矿床勘查过程中,较高的 Fe、Ti、V 金属元 素含量可作为判断地质体矿化的指示信息。

3.3 钻孔岩心磁化率特点

不同的岩性,其磁化率的大小是不同的(图 2)。 第四系沉积物在地表,深度 0~80.35m,磁化率整体 较低,在 20×10⁻³ SI 以下,甚至有些测试点位的磁 化率小于零;磷灰石辉长岩主要在中部岩相带旋回 I 与旋回 VI 每个旋回的上部,深度位于 80.35~ 289.77m、329.18~414.80m、548.99~568.38m、 604.98~683.18m、778.44~792.74m、856.21~ 884.11m,磁化率为 20×10⁻³~160×10⁻³ SI;辉长 岩深度位于 1087.68~1164.73m、1225.91~ 1262.10m,磁化率为 50×10⁻³~160×10⁻³ SI;橄榄 辉石岩主要位于下部岩相带,深度在 1181.61~ 1225.91m,岩心被矿化,因此磁化率相对较高(200× 10⁻³~400×10⁻³SI);磷灰石磁铁辉石岩主要位于中 部岩相带旋回II与旋回VI每个旋回的下部,深度在 289.77~329.18m、414.80~548.99m、568.38~ 604.98m、683.18~778.44m、792.74~856.21m、 884.11~1002.07m,磁化率相对较高(160×10⁻³~ 400×10⁻³SI);磁铁辉石岩主要位于中部岩相带旋回I 下部,深度在884.11~1002.07m,磁化率较高(160× 10⁻³~900×10⁻³SI);块状Fe-Ti氧化物矿石主要位 于下部岩相带的顶部,深度在1002.07~1087.68m,磁 化率较高(一般磁化率>400×10⁻³SI)。

通过钻孔 ZK1307 岩性、含矿性与磁化率对比 分析认为:①不同的岩性的磁化率存在一定的差异, 岩性的磁化率相比较,整体上呈现的特征为:第四系 沉积物 <磷灰石辉长岩 ~ 辉长岩 <磷灰石磁铁辉石 岩 ~ 橄榄辉石岩(矿化) < 磁铁辉石岩 ~ 块状 Fe -Ti 氧化物矿石;②含矿的钻孔段,往往磁化率较高, 含矿性差的岩石或围岩,其磁化率较低。

综合分析,岩心 Fe - Ti 氧化物矿石含量和磁化 率越高,Fe、Ti、V 元素含量越高。考虑到 Fe、Ti、V 元素含量与磁化率呈明显正相关关系,利用 Pearson 相关系数,通过 SPSS 25.0 统计软件,分别获取 Fe、 Ti、V 含量与磁化率的一元线性回归方程(在线性回 归中,剔除了少量的 Ti 低于检出限的测试点和大量 V 低于检出限的测试点),其中,磁化率 k 的单位是 "×10⁻³ SI",元素 Fe、Ti、V 含量单位是"×10⁻⁶" (分别如图 4 中的 a、b、c 所示)。

Fe、Ti、V 含量(C) 与磁化率(k) 的回归方程 分别为:

 $C_{\rm Fe} = 462.97k + 45493.319$ ($R^2 = 0.869$)

 $C_{\text{Ti}} = 102.941k + 23796.4$ ($R^2 = 0.620$)

 $C_{\rm v} = 1.782k + 91.055$ ($R^2 = 0.753$)

基于 Fe、Ti、V 含量与磁化率强烈的相关性以及 所建立的线性回归方程,通过便携式磁化率分析仪, 可以快速、无损地获取目标点位的 Fe、Ti、V 含量。 同时,根据钒钛磁铁矿矿石磁性较高的特性,根据本 文获得的数据和研究认为,在太和钒钛磁铁矿床 ZK1307 钻孔岩心中,当磁化率 k > 160 × 10⁻³ SI,可 将该段岩心段判定为矿化段。因此,较高的磁化率 可作为判断地质体矿化的指示信息。

4 结论

以四川省攀西地区太和超大型钒钛磁铁矿为研 究对象,应用便携式傅里叶变换红外光谱仪对钻孔 ZK1307 整孔岩心进行数据采集,识别了该矿床典型



图4 磁化率与Fe、Ti、V 金属元素含量的线性拟合图

Fig. 4 Linear fitting diagrams of the magnetic susceptibility associated with the contents of Fe, Ti and V

矿物如辉石、斜长石、磷灰石、橄榄石、角闪石、蛇纹 石、绿帘石、绿泥石等,同时总结了辉石在热红外波 段的光谱特征,分别提取辉石在 8360nm、9610nm、 10050nm、10700nm 波段的相对吸收深度,并与岩心 矿化段、Fe - Ti - V 元素含量对比发现:矿化段的部 分,相对吸收深度较高。因此,热红外光谱可以快 速、无损地提取辉石特征吸收峰光谱信息,从而归纳 识别含磁铁辉石岩体分布范围,快速圈定含矿岩体, 提高钒钛磁铁矿床的勘查效率。

本文同时应用便携式 XRF 和 KM - 7 型磁化率 分析仪,对钻孔岩心热红外数据采集点进行测试。

— 49 —

发现 Fe、Ti、V 元素含量和磁化率与矿化程度高度正 相关,Fe、Ti、V 元素含量可以用磁化率进行线性拟 合。因此,较高的 Fe、Ti、V 金属元素含量和磁化率, 可作为判断地质体矿化的指示信息。

5 参考文献

- [1] 胡受奚,叶瑛,方长泉.交代蚀变岩岩石学及其找矿意义[M].北京:地质出版社,2004:1-109.
 Hu S X, Ye Y, Fang C Q. Petrology of metasomatic alteration rocks and its prospecting significance [M]. Beijing;Geological Publishing House,2004:1-109.
- [2] 张世涛,陈华勇,韩金生,等.鄂东南铜绿山大型铜铁金矿床成矿岩体年代学、地球化学特征及成矿意义
 [J].地球化学,2018,47(3):240-256.

Zhang S T, Chen H Y, Han J S, et al. Geochronology, geochemistry, and mineralization of quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglüshan Cu – Fe – Au deposit, Edongnan ore district, China [J]. Geochimica,2018,47(3):240-256.

- [3] 陈华勇,张世涛,初高彬,等.鄂东南矿集区典型砂卡 岩-斑岩矿床蚀变矿物短波红外(SWIR)光谱研究与 勘查应用[J].岩石学报,2019,35(12):3629-3643.
 Chen H Y, Zhang S T, Chu G B, et al. The short wave infrared (SWIR) spectral characteristics of alteration minerals and applications for ore exploration in the typical skarn - porphyry deposits, Edong ore district, eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35 (12):3629-3643.
- [4] Zhang Z C, Hou T, Santosh M, et al. Spatio temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57:247 – 263.
- [5] 佘宇伟.四川太和层状岩体及其富磷灰石钒钛磁铁矿床成因[D].北京:中国科学院大学,2015.
 She Y W. Petrogenesis and apatite rich Fe Ti V oxide mineralization of the Taihe mafic ultramafic layered intrusion in the Sichuan Province, SW China [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences,2015.
- [6] 魏宇,郭耀文,柳维,等. 西昌太和钒钛磁铁矿矿体特 征及成因[J]. 四川地质学报,2014,34(3):368-372.
 Wei Y, Guo Y W, Liu W, et al. Geological features and genesis for the Taihe vanadic titanomagnetite deposit
 [J]. Geological Journal of Sichuan, 2014, 34(3): 368-372.
- [7] 李松键,攀西太和钒钛磁铁矿含矿岩体及矿床地质特 征研究[D].成都:成都理工大学,2015.

Li S J. Characteristics of ore - bearing rocks and deposit

geology of Taihe vanadium titano – magnetite deposit in Panzhihua—Xichang District [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2015.

 [8] 童鹏,刘鹏飞,赵英俊,等.磁化率在太和钒钛磁铁矿 钻孔岩芯分析中的应用[J].中国矿业,2018,27(增刊 1):301-306.

Tong P, Liu P F, Zhao Y J, et al. Application of the magnetic susceptibility in the core analysis of Taihe vanadium titano – magnetite [J]. China Mining Magazine, 2018, 27 (Supplement 1): 301 – 306.

- [9] Hou T, Zhang Z C, Encarnacion J, et al. Petrogenesis and metallogenesis of the Taihe gabbroic intrusion associated with Fe – Ti – oxide ores in the Panxi District, Emeishan Large Igneous Province, southwest China [J]. Ore Geology Reviews, 2012, 49:109 – 127.
- [10] She Y W, Yu S Y, Song X Y, et al. The formation of P rich Fe – Ti oxide ore layers in the Taihe layered intrusion, SW China: Implications for magma – plumbing system process [J]. Ore Geology Reviews, 2014, 57: 539 – 559.
- She Y W, Song X Y, Yu S Y, et al. Variations of trace element concentration of magnetite and ilmenite from the Taihe layered intrusion, Emeishan Large Igneous Province, SW China: Implications for magmatic fractionation and origin of Fe Ti V oxide ore deposits
 J J. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 1117 1131.
- [12] She Y W, Song X Y, Yu S Y, et al. Apatite geochemistry of the Taihe layered intrusion, SW China: Implications for the magmatic differentiation and the origin of apatite – rich Fe – Ti oxide ores[J]. Ore Geology Reviews, 2016, 78:151 – 165.
- [13] 钟宏,徐桂文,朱维光,等. 峨眉山大火成岩省太和花 岗岩的成因及构造意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009,28(2):99-110.
 Zhong H, Xu G W, Zhu W G, et al. Petrogenesis of the Taihe granites in the Emeishan Large Igneous Province and its tectonic implications[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009,28(2):99-110.
- [14] 佘宇伟,宋谢炎,于宋月,等. 磁铁矿和钛铁矿成分对 四川太和富磷灰石钒钛磁铁矿床成因的约束[J]. 岩石学报,2014,30(5):1443-1456.
 She Y W, Song X Y, Yu S Y, et al. The compositions of magnetite and ilmenite of the Taihe layered intrusion, Sichuan Province: Constraints on the formation of the P-rich Fe-Ti oxide ores[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014,30(5):1443-1456.
- [15] 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):

-50 -

2520 - 2533.

Dai J J, Zhao L X, Jiang Q, et al. Review of thermal – infrared spectroscopy applied in geological ore exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94 (8): 2520 – 2533.

- [16] Van der Meer F D, Van der Werff H M A, Van Ruitenbeek F J A, et al. Multi – and hyperspectral geologic remote sensing: A review [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 14:112 – 128.
- [17] 张莹彤,肖青,闻建光,等. 地物波谱数据库建设进展及应用现状[J]. 遥感学报,2017,21(1):12-26.
 Zhang Y T, Xiao Q, Wen J G, et al. Progress and application status of ground object spectrum database
 [J]. Journal of Remote Sensing,2017,21(1):12-26.
- [18] 吴泽群,田淑芳.利用热红外遥感提取层状硅酸盐蚀 变矿物信息研究——以甘肃北山地区为例[J].西北 地质,2016,49(1):241-248.

Wu Z Q, Tian S F. Study on the extraction of layered silicate altered mineral information by thermal infrared remote sensing—A case study of Beishan Region, Gansu Province[J]. Geology of Northwest China, 2016, 49(1): 241 – 248.

- [19] Baldridge A M, Hook S J, Grove C I, et al. The ASTER spectral library Version 2. 0 [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(4):711-715.
- [20] Lampinen H M, Laukamp C, Occhipinti S A, et al. Mineral footprints of the paleoproterozoic sediment – hosted abra Pb – Zn – Cu – Au deposit Capricorn Orogen, western Australia [J]. Ore Geology Review, 2019,104:436-461.
- [21] Thomas C. Mineral mapping for exploration: An Australian journey of evolving spectral sensing technologies and industry collaboration [J]. Geosciences, 2016, 6 (4): 52 - 100.
- [22] 刘德长,邱骏挺,田丰,等.区域控矿断裂带的航空高 光谱遥感技术研究——以黑石山—花牛山深大断裂 带为例[J].地质与勘探,2015,51(2):366-375.
 Liu D C, Qiu J F, Tian F, et al. Application of airborne hyper - spectrum remote sensing to mapping of ore control faults: A case study of the Heishishan— Huaniushan Fault[J]. Geology and Exploration,2015,51 (2):366-375.
- [23] 刘德长,叶发旺,赵英俊,等. 航空高光谱遥感金矿床 定位模型及找矿应用——以甘肃北山柳园—方山口 地区为例[J]. 地球信息科学学报,2015,17(12): 1545-1553.

Liu D C, Ye F W, Zhao Y J, et al. Airborne hyperspectral remote sensing for gold prospecting around Liuyuan— Fangshankou area, Gansu Province, China[J]. Journal of Geo – Informatics Science, 2015, 17(12):1545 – 1553.

[24] 刘德长,闫柏琨,邱骏挺. 航空高光谱遥感固体矿产 预测方法与示范应用[J]. 地球学报,2016,37(3): 349-358.
Liu D C, Yan B K, Qiu J T. The application of airborne hyper - spectral remote sensing technology to mineral resources exploration [J]. Acta Geoscientica Sinica,

2016,37(3):349-358.

- [25] 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 W X, Yi J J, Wang H, et al. Study on the characteristics of infrared spectrum and the alteration zoning law of drill core in Makeng iron deposit[J]. Rock and Mineral Analysis,2020,39(6):934-943.
- [26] 回广骥,高卿楠,宋利强,等. 新疆可可托海稀有金属 矿床矿物和岩石热红外光谱特征[J]. 岩矿测试, 2021,40(1):134-144.
 Hui G J, Gao Q N, Song L Q, et al. Thermal infrared spectra characteristics of rare metal minerals and rock in the Keketuohai deposit, Xinjiang[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021,40(1):134-144.
- [27] 黄宇飞,李智慧,宁慧,等.应用 ASTER 遥感图像的岩 矿信息提取研究[J]. 航天器工程,2019,28(6): 130-135.
 Huang Y F,Li Z H,Ning H,et al. Research on rock and

mineral information extraction based on ASTER remote sensing image[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(6): 130 – 135.

- [28] 宋亮,刘善军,虞茉莉,等. 基于可见 近红外和热红 外光谱联合分析的煤和矸石分类方法研究[J]. 光谱 学与光谱分析,2017,37(2):416-422.
 Song L, Liu S J, Yu M L, et al. A classification method based on the combination of visible, near - infrared and thermal infrared spectrum for coal and gangue distinguishment[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017,37(2):416-422.
- [29] 王东,刘善军,毛亚纯,等. 鞍山式铁矿 SiO₂含量的热 红外光谱分析方法[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38
 (7):2101-2106.
 Wang D, Liu S J, Mao Y C, et al. A method based on thermal infrared spectrum for analysis of SiO₂ content in Anshan - type iron [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2018,38(7):2101-2106.
- [30] 夏军,张飞. 热红外光谱的干旱区土壤含盐量遥感反 演[J]. 光谱学与光谱分析,2019,39(4):1063-1069.
 Xia J, Zhang F. A study on remote sensing inversion of soil salt content in arid area based on thermal infrared spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2019,

-51 -

39(4):1063-1069.

[31] 侯艳军,塔西甫拉提·特依拜,张飞,等. 荒漠土壤全 磷含量热红外发射率光谱估算研究[J]. 光谱学与光 谱分析,2015,35(2):350-354.
Hou Y J,Tashpolat T,Zhang F, et al. Study on estimation of deserts soil total phosphorus content from thermal – infrared emissivity [J]. Spectroscopy and Spectral

Analysis, 2015, 35(2): 350 - 354.

[32] 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: Taking Sinongduo Ag - Pb - Zn deposit as an example[J]. Mineral Deposits,2018, 37(3):556-570.

Infrared Spectroscopy, Portable XRF and Magnetic Susceptibility Analysis of Drill Core for Exploration of the Taihe Vanadium Titano – Magnetite Deposit in the Panxi Area, Sichuan Province

GUO Dong – xu, ZHANG Hong^{*}, GAO Qing – nan, ZHU You – feng, JI Guang – xuan (Core and Samples Centre of Land and Resources, Sanhe 065201, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The relative absorption depth of the characteristic absorption peak of pyroxene can be identified by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, so that the ore bearing rock (i. e., magnetite bearing pyroxenite) can be delineated quickly.
- (2) The contents of Fe, Ti, and V can be linearly fitted by magnetic susceptibility value.
- (3) The higher content of Fe, Ti, V and the increasing value of magnetic susceptibility are excellent geochemical indices for prospecting in the Taihe vanadium titano magnetite deposit.



ABSTRACT

BACKGROUND: The Panxi super large – scale Taihe vanadium – titanium magnetite deposit is located in the mafic – ultramafic layered intrusions. Research on the characteristics of infrared spectroscopy of the typical minerals of this deposit is relatively lacking, restricting exploration efficiency. The Panxi area would benefit from the use of infrared spectroscopy technology, which in recent years has attracted much attention because of its green, fast, non – destructive and accurate detection of minerals, and improvement of exploration efficiency.

OBJECTIVES: To analyze the characteristics of different minerals and to efficiently identify ore – bearing intrusions and mineralized regions in the Taihe vanadium titano – magnetite deposit in the Panxi area, Sichuan Province.

METHODS: Minerals were identified using Handheld FTIR through thermal infrared (TIR). The contents of Fe, Ti, and V were analyzed by Vanta VMW portable XRF. The magnetic susceptibility was analyzed by KM – 7 portable magnetic susceptibility tester. Based on the core catalog, the relationship between borehole lithology, mineral assemblage, element content, and magnetic susceptibility value was studied.

RESULTS: TIR can be used to achieve rapid and non – destructive extraction of the characteristic absorption peaks of pyroxene, identify the distribution of magnetite – bearing pyroxenite, and quickly define ore – bearing rock masses. The contents of Fe, Ti, and V in the Taihe deposit can be linearly fitted by magnetic susceptibility values. Different kinds of rocks and ores have different contents of Fe, Ti, V and magnetic susceptibility value.

CONCLUSIONS: TIR technology is useful for prospecting magnetite – bearing rocks or deposits in unknown areas. The higher contents of Fe, Ti, and V and magnetic susceptibility values can be used as indicative information for judging the mineralization of geological bodies.

KEY WORDS: Taihe; vanadium titano – magnetite deposit; deposit exploration; infrared spectroscopy; magnetic susceptibility; X – ray fluorescence spectrometry