

高齐云, 周丽, 易泽邦, 等. 颗粒度对喀斯特型铝土矿可见光-近红外光谱特征的影响[J]. 岩矿测试, 2024, 43(2): 234–246. DOI: [10.15898/j.ykcs.202308090133](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202308090133).

GAO Qiyun, ZHOU Li, YI Zebang, et al. Effect of Granularity on the Characteristic Visible-Near Infrared Spectra of Karst-Type Bauxite[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(2): 234–246. DOI: [10.15898/j.ykcs.202308090133](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202308090133).

颗粒度对喀斯特型铝土矿可见光-近红外光谱特征的影响

高齐云^{1,2}, 周丽¹, 易泽邦³, 陈正山^{1*}

- (1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵州 贵阳 550025;
3. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541006)

摘要: 岩矿反射光谱是智能矿山岩矿智能感知技术以及遥感信息识别的重要参考依据, 由于地物表面粗糙度对反射光谱的影响取决于粗糙高度值与波长关系对电磁波传播的影响, 因此颗粒度是影响岩石和矿物反射光谱特征的重要因素之一。喀斯特型铝土矿在中国分布广泛, 目前有关铝土矿的反射光谱基础数据还非常匮乏。为了探究颗粒度对喀斯特型铝土矿反射光谱的影响规律, 本文选取贵州省修文县小山坝喀斯特型铝土矿为研究对象, 采用地物光谱仪测试不同颗粒度铝土矿(铝土岩)样品的可见光-近红外反射光谱, 并结合铝土矿(铝土岩)主量元素和矿物组成分析讨论铝土矿与铝土岩的光谱差异。结果表明: 小山坝铝土矿(铝土岩)由于矿物组成的不同而呈现显著不同的光谱特征, 其中铝土矿的反射光谱特征主要与一水硬铝石一致, 在 1400nm 和 1800nm 波长处有明显的波谷特征, 由 OH 振动谱带所致; 铝土岩的反射光谱特征主要与高岭石一致, 在 1400nm、1900nm、2160nm 和 2200nm 波长处有显著的波谷特征, 分别由 OH 倍频合频、H₂O 的振动谱带以及 Al-OH 基团拉伸和弯曲振动的合频所致, 且在 2160~2200nm 波段呈双吸收峰特征。此外, 不同颗粒度铝土矿(铝土岩)的整体反射率均较高, 最高超过 28%, 且变化趋势基本相同。随着颗粒度从 <0.04mm 增加到 3mm, 铝土矿和铝土岩的反射率均逐渐减小, 且铝土矿特征波谷的整体吸收强度相对稳定, 而铝土岩特征波谷的吸收强度呈逐渐增大的趋势。本文研究认为可采用小颗粒度的粉末样品在 1800nm、1900nm、2160nm 和 2200nm 波长处的特征光谱进行铝土矿和铝土岩的区分。

关键词: 铝土矿; 铝土岩; 颗粒度; 可见光-近红外光谱; 反射光谱特征

要点:

- (1) 铝土矿(铝土岩)块状样品的反射率在整个波段最高超过 14%, 粒状样品最高超过 28%。
- (2) 铝土矿(铝土岩)随着颗粒度的减小光谱反射率均逐渐增大, 其反射光谱形态基本相似。
- (3) 铝土矿与铝土岩可通过小颗粒度的粉末样品在 1800nm、1900nm、2160nm 和 2200nm 波长处的特征光谱进行区分。

中图分类号: O657.33; P618.45

文献标识码: A

近年来随着卫星遥感技术的快速发展, 由于其便捷、快速、无损等优点, 利用高光谱遥感进行岩矿探测逐渐得到重视, 并成为智能矿山建设的关键问题^[1-2]。高光谱遥感技术的深入研究可为矿产勘查

提供新的工作方法以及在开发研究方面具有重要意义^[3-5]。张博等^[6]利用近红外光谱仪器研究分析了铀矿岩心中常见矿物的光谱特征, 对识别其他主要矿物类型以及空间分布特征具有重要作用。代晶

收稿日期: 2023-08-09; 修回日期: 2024-03-12; 接受日期: 2024-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42003066)

第一作者: 高齐云, 硕士研究生, 主要研究方向为高光谱地学应用。E-mail: 1035915893@qq.com。

通信作者: 陈正山, 博士, 地质高级工程师, 主要研究方向为矿物岩石矿床。E-mail: chenzhengshanzy@163.com。

晶等^[7-8]采用地物波谱仪对甲基卡典型岩石矿物开展波谱测试,建立了研究区波谱库以及利用1413nm、1911nm与2197nm波谱特征区分伟晶岩与围岩。

随着近红外光谱技术的广泛应用,许多学者针对岩矿的光谱特征及影响因素开展一系列的研究^[9-13],其中,影响岩矿光谱特征的内外因素众多^[14-15],例如矿物本身的组成成分、元素含量、粗糙度、孔隙度以及矿物颗粒度等,其中颗粒度是影响岩矿反射光谱特征最重要因素之一^[16-18]。王润生^[19]和闫柏琨等^[20]发现,随着颗粒度的变化,不同岩石矿物的反射光谱表现出不同的变化规律,并且不同等级的颗粒度也会对相同矿物的光谱特征产生差异。Salisbury等^[21]通过实验发现基频振动带强度与颗粒度大小呈负相关关系,认为颗粒孔隙度是造成这一现象的原因。蒙脱石和石英在不同颗粒度条件下,在900~2100nm波段,随着粒径的增加,样品反射率逐渐降低^[22]。块状与不同颗粒度的赤铁矿在近红外波段,颗粒度越小,反射率越高^[23],0.03~1mm粒度的赤铁矿的反射率最大变化幅度为30%左右,0.03~4mm粒度的磁铁矿在同一波长处的反射变化幅度不超过3%,赤铁矿的光谱反射率变幅比磁铁矿高,其受颗粒度的影响显著^[24-25]。高岭石、绿泥石、叶蛇纹石以及紫苏辉石分别在不同颗粒度,以及不同矿物在相同颗粒度条件下,其反射光谱特征的影响及变化规律不尽相同,高岭石在1380~1420nm、1900~1950nm以及2200nm附近出现较强的吸收峰;60~80 μ m粒度的绿泥石的反射峰出现在1380nm;叶蛇纹石在500nm附近有一个较宽的反射峰;紫苏辉石可利用720~1100nm波段进行识别^[26]。不同煤种在不同颗粒度的条件下也呈现出不同的反射光谱特征,在380~780nm波段随波长的增加逐渐降低,在780~2500nm波段则为逐渐增高的趋势;不同煤种的反射光谱曲线受颗粒度的响应程度不同,其中褐煤的影响最大,其次是烟煤,无烟煤的影响最小^[27-28]。Zhuang等^[29]通过测量13种具有不同表面反照率和1000nm吸收强度的火成岩的块状和粉末可见光-近红外光谱,发现样品的光谱斜率随着颗粒尺寸的增加而减小,其中辉长岩在1000nm波长附近出现显著波谷特征,并将光谱差异应用于嫦娥四号测量的数据分析。前人开展进行的光谱特征研究多集中在煤岩、铁矿等岩性差别较大的岩矿,而对于岩性差别较小的岩矿光谱特征研究相对较少,为提高野外勘查效率,需对岩性差别较小的岩矿光谱特征进行进一步的研究。

铝是世界上用途最为广泛的金属之一,铝土矿是生产金属铝的主要原料,同时也是建筑业与制造业的重要原材料^[30-31]。铝土矿空间分布广,类型多样,中国主要为喀斯特型铝土矿。对于可见光近红外技术在铝土矿上的应用研究,张生等^[32]利用可见光-近红外技术对桂西铝土矿进行反射光谱特征分析并总结其遥感找矿标志,利用典型的光谱吸收特征推断找矿有利地段,缩小找矿范围。由于地物表面粗糙度对反射光谱的影响取决于粗糙高度值与波长关系对电磁波传播的影响,其相互作用的内在机理较为复杂^[33]。颗粒度作为影响岩矿反射光谱特征的重要因素,可为高光谱矿物识别和光谱特征分析奠定一定的基础。为探究颗粒度对铝土矿反射光谱的影响规律,本文选取贵州省修文县小山坝九架炉组铝土矿为研究对象,利用ASD FieldSpec-4地物光谱仪对铝土矿(铝土岩)样品进行基于不同颗粒度条件下的可见光-近红外反射光谱特征研究,获取不同颗粒度的反射光谱曲线,并结合铝土矿(铝土岩)X射线荧光光谱(XRF)和X射线粉晶衍射(XRD)分析结果讨论铝土矿与铝土岩的光谱差异,为铝土矿光谱数据库的建立及其智能识别提供数据支撑。

1 实验部分

1.1 样品采集与制备

本研究选择的铝土矿(铝土岩)样品均采自贵州省修文县小山坝铝土矿,该铝土矿成矿类型为喀斯特型铝土矿床^[34],属于黔中铝土矿成矿带的一部分,是黔中铝土矿具有代表性的露天矿床之一^[35],其位于修文县城南东约5km处。样品采集区域出露的地层分别为:寒武系中上统娄山关组($C_{3-4}O_1$),石炭系下统九架炉组(C_{1ij})、摆佐组(C_1b),二叠系中统梁山组(P_2l)、栖霞组(P_2q),其中,本区的铝土矿含矿岩系为九架炉组,底板为娄山关组白云岩^[36-37]。本研究采集的样品为该矿银厂坡矿段九架炉组剖面(图1)的6件铝土矿(铝土岩),样品编号为XSB-1、XSB-2、XSB-3、XSB-4、XSB-5、XSB-6。其中XSB-1至XSB-4为土状铝土矿(铝土岩)样品,较疏松,有碎屑;XSB-5至XSB-6为致密块状铝土岩矿样品,硬度比前者高,结构为块状。

铝土矿在工业生产过程中,将矿石粉碎至4~0.8mm不同粒径的颗粒后进行球磨处理,得到粒径0.074mm的矿粉,再次进行选择磨矿-粗细粒分选等工艺,最终得到具有工业价值的精矿粉^[38]。

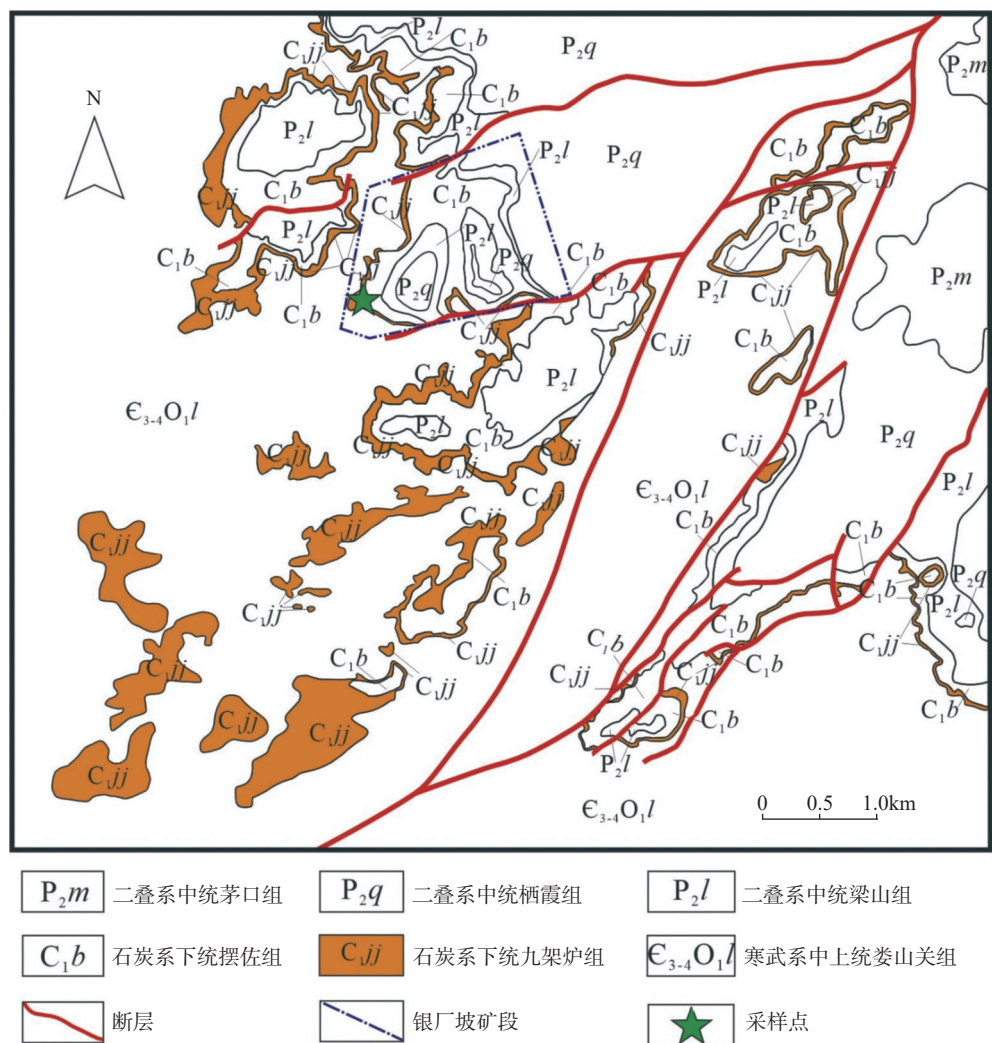


图1 小山坝铝土矿区地质简图与样品采样点 (根据陈群等^[37] 改编)

Fig. 1 Geological diagram and sampling points of Xiaoshanba bauxite mining area (Modified from Chen, et al^[37]).

以上过程中, 铝土矿的生产工艺粒径主要位于 2~0.010mm 之间^[39]。结合前人研究^[23-26, 28], 颗粒度等级从粗颗粒到细颗粒, 由于矿石颗粒大于 5mm 时, 会出现阴影从而影响光谱测试的结果^[24], 因此, 本文研究设计的颗粒等级为 9 个: 2~3mm, 1~2mm, 0.60~1mm, 0.30~0.60mm, 0.20~0.30mm, 0.08~0.20mm, 0.065~0.08mm, 0.04~0.065mm, <0.04mm。以上 9 个颗粒度等级控制在矿石工业生产粉碎的粒径范围内, 便于更好地识别颗粒度对铝土矿 (铝土岩) 的影响。按照以上设计制备不同粒径的粉末样品, 将破碎好的样品放置在玛瑙研磨机上磨制粉末, 再倒入筛网上筛出不同粒径的粉末, 分别得到 9 个颗粒等级的铝土矿 (铝土岩) 粉末样品。从图 2 可以看出, 粉末样品从左往右随着颗粒度的减小, 样品的颜色由灰黑色逐渐变为灰白色。此外, 作

为对比, 块状样品选择表面没有风化物的平整面, 清洁后晾干备用。

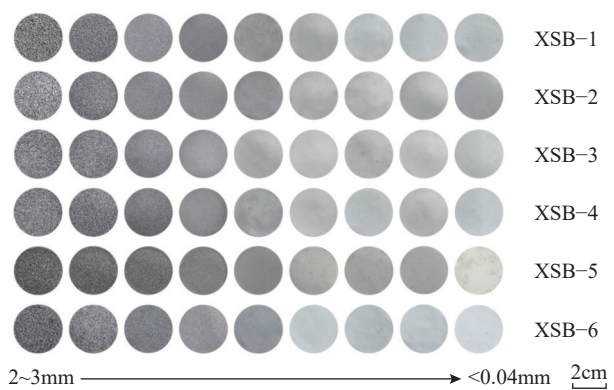


图2 不同颗粒度铝土矿 (铝土岩) 的粉状样品

Fig. 2 Powder samples of bauxite (bauxite-bearing rock) with different grain sizes.

1.2 样品光谱测试

本研究用于测试铝土矿(铝土岩)样品的可见光-近红外反射光谱曲线的仪器为 ASD FieldSpec-4 便携式地物光谱仪(美国),波段范围为 350~2500nm,通道数为 2151,在 350~1000nm 波段的光谱分辨率为 3nm,在 1000~2500nm 波段的光谱分辨率为 10nm。该仪器具有精度高、速度快、不污染样品、操作简单等优点。

为确保测试环境的稳定性,样品测试选择在自行搭建的暗室(图3)进行。采用 ASD 卤素灯(人工光源)作为室内唯一光源,用于模拟自然界中的太阳光线照射铝土矿(铝土岩)样品。根据仪器暗室测试标准,测试前,仪器需预热 30min,将探头(裸光纤)和光源固定在三脚架上,探头垂直架设,距离样品 10cm,光源照射方向与水平方向的夹角为 45°且距离样品 65cm,其次将已定标的灰板作为背景进行定标,获取标准参考白板。测试过程中,将粉末样品倒入直径为 6cm 的黑色小圆盘中并放置在黑色背景桌上,其与白板的几何位置要一致,且每隔 15min 进行白板定标一次。同时,为确保测试环境与操作步骤的可行性,在正式测试之前均进行单矿物与岩石的测试。为减少样品表面形态和随机误差的影响,每件样品测量 3 次,取平均值得到最终的光谱值。

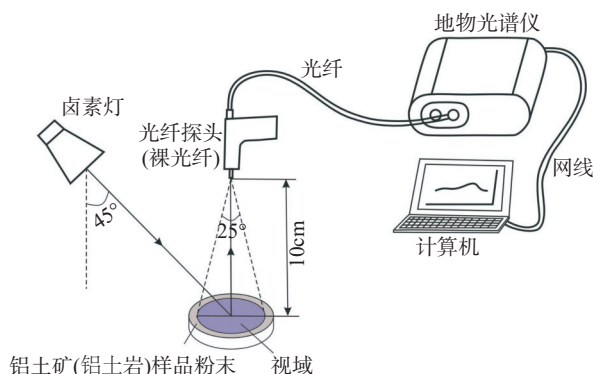


图3 铝土矿(铝土岩)反射光谱测试原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reflection spectrum testing principle for bauxite (bauxite-bearing rock).

1.3 X 射线荧光光谱分析

将每件铝土矿(铝土岩)样品研磨至 200 目,采用 ARL Perform'X 4200 型 X 射线荧光光谱仪(美国 ThermoFisher 公司)测定铝土矿(铝土岩)样品中的主量元素含量。仪器工作条件为: Rh 靶,电压 60kV,电流 140mA,50 管,端窗型 X 射线管,超薄 Be 窗,高

频固态高压发生器,自动双进样系统,64 位样品位。

1.4 X 射线粉晶衍射分析

将每件铝土矿(铝土岩)样品研磨至 200 目,采用 SmartLab 粉末 X 射线粉晶衍射仪(日本电子株式会社公司)对铝土矿(铝土岩)样品进行矿物成分分析。仪器工作条件为: Cu 靶,电压 40kV,步进扫描,工作电流 200mA,计数时间 3s/步,扫描范围 5°~90°,测试室温 26°,湿度 11%。在 MDI Jade6 软件中进行物相匹配与对比分析。

2 结果与讨论

2.1 颗粒度对铝土矿(铝土岩)反射光谱影响的共有特征

颗粒度对同一套地层的铝土矿(铝土岩)样品的影响非常明显,颗粒度对不同铝土矿(铝土岩)样品的光谱特征具有一些共性。从图4可知,相同颗粒度不同铝土矿(铝土岩)的反射光谱曲线存在差异。在可见光波段的反射率相对于近红外波段的差异较小,一般不超过 3%,但在 1400nm 波长后,差异逐渐明显,且随着波长的增加差异愈发明显。其中,样品 XSB-5、XSB-6 的反射率最高,样品 XSB-1 至 XSB-4 的反射率较低。样品 XSB-5、XSB-6 的光谱反射率曲线与其他样品有所区别,可以作为铝土矿识别的一个参考。

颗粒度对铝土矿(铝土岩)样品的光谱特征影响规律主要表现在近红外波段的反射光谱曲线的斜率。如图4所示,4 个大于 0.2mm 的颗粒度等级中,6 件铝土矿(铝土岩)样品在 1000~1340nm 波段的反射光谱曲线近似直线并平行分布,所有曲线的斜率先是逐渐增大,再趋于平缓,最后逐渐变小;在颗粒度小于 0.2mm 的 4 个颗粒度等级中,可见光波段的斜率较大。不同铝土矿(铝土岩)的反射光谱曲线斜率具有差异性,样品 XSB-1 至 XSB-4 的反射光谱斜率相比 XSB-5、XSB-6 要高。

如图4所示,所有铝土矿(铝土岩)样品的反射光谱曲线的反射率随颗粒度的变化而变化。在 0.06~3mm 颗粒度范围内,样品 XSB-1 的光谱反射率明显比其他样品高,XSB-5、XSB-6 呈现逐渐上升的趋势,XSB-2 至 XSB-4 的光谱反射率趋于稳定;在 0.04~0.60mm 颗粒度范围内,样品 XSB-6 的光谱反射率明显比其他样品高,且呈快速上升的趋势,其次是 XSB-5。整体上,样品 XSB-1 至 XSB-4 的光谱特征基本一致,反射率的变化较稳定,可归为一类;XSB-5、XSB-6 可为一类,其中样品 XSB-2、

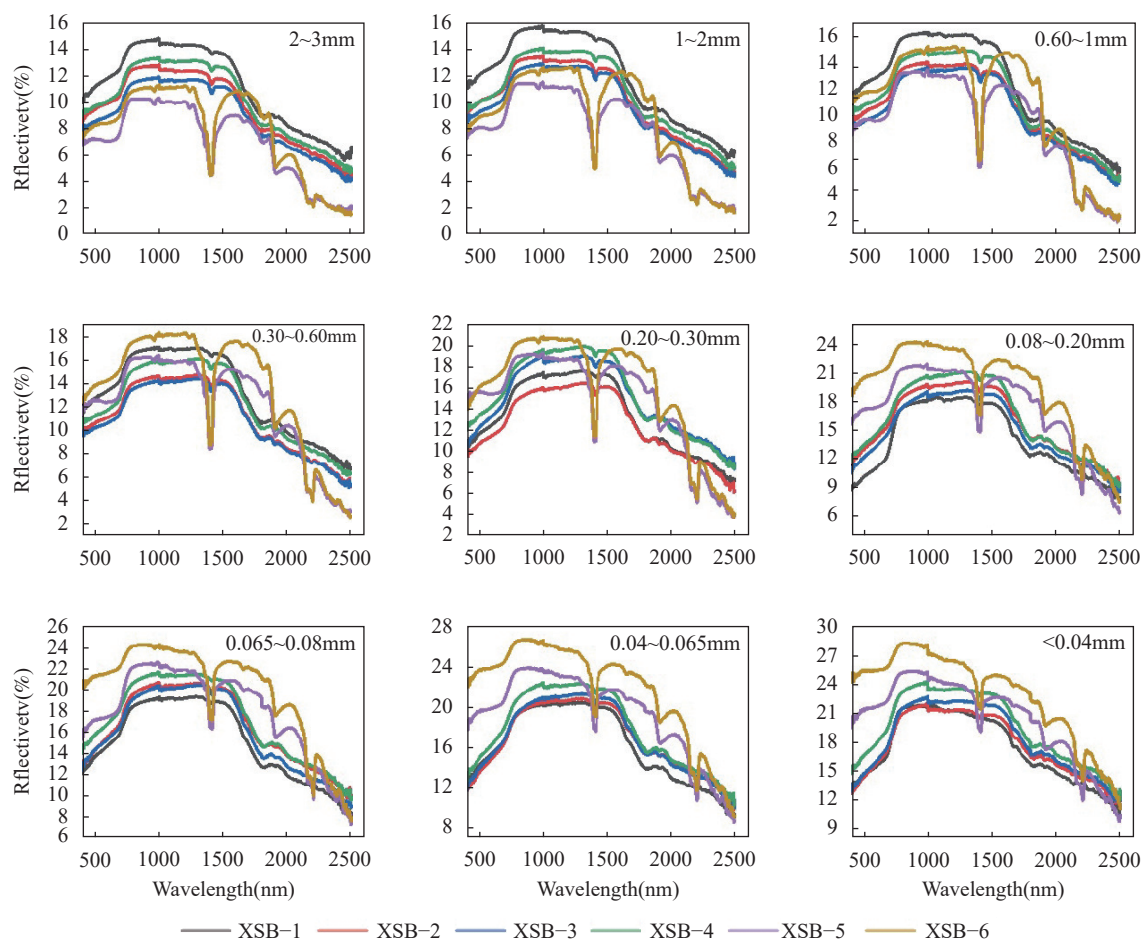


图4 相同颗粒度下不同铝土矿(铝土岩)样品的反射光谱曲线

Fig. 4 Reflection spectral curves of different types of bauxite (bauxite-bearing rock) samples with same particle size.

XSB-3 的光谱反射率曲线呈现出交错出现的趋势。其次, 样品 XSB-5、XSB-6 的光谱反射率随着颗粒度的降低而逐渐升高, 且 XSB-6 的反射率变化幅度比 XSB-5 大。

为进一步比较颗粒度与光谱反射率的关系, 如图 5 所示, 1400nm 波长处的不同颗粒度光谱反射率的变化显示, 所有样品的反射率随颗粒度的减小而增大, 样品 XSB-1 至 XSB-4 的反射率变化幅度整体上较为稳定, XSB-5 至 XSB-6 的反射率变化增幅较大, XSB-6 在 0.08 ~ 0.30mm 颗粒度范围内的反射率增幅最高为 5.41%。

2.2 颗粒度对铝土矿(铝土岩)反射光谱影响的差异性

图 6 为 6 件铝土矿(铝土岩)样品在 9 个颗粒度等级和块状条件下的反射光谱测试结果。从图中可知, 不同颗粒度对采集的铝土矿(铝土岩)样品的反射光谱曲线具有一些差异性, 反射光谱曲线随颗粒度不同呈现规律性变化, 主要如下。

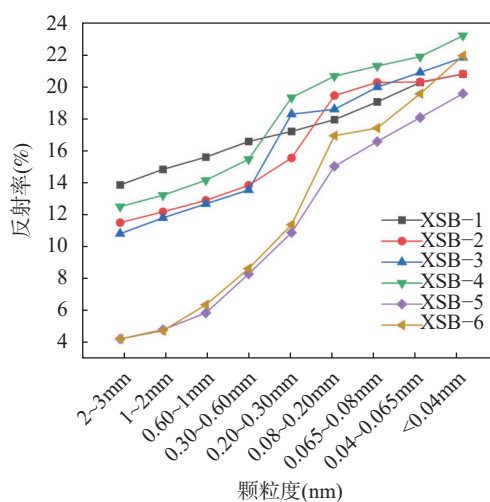


图5 颗粒度对铝土矿(铝土岩)在 1400nm 波长处反射率变化的影响

Fig. 5 The influence of particle size on the variation of reflectivity of bauxite (bauxite-bearing rock) at a wavelength of 1400nm.

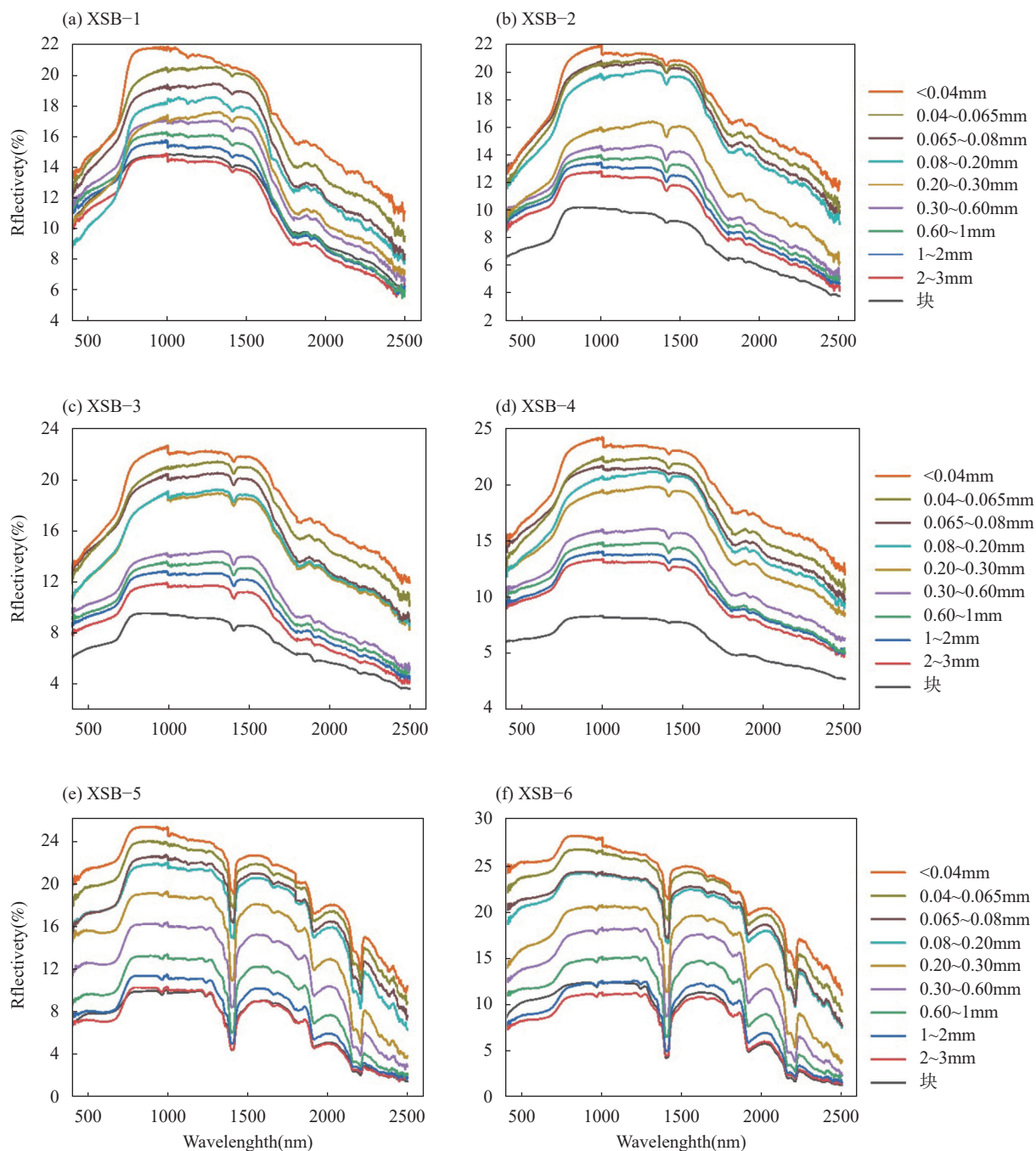


图6 不同颗粒度铝土矿(铝土岩)反射光谱曲线

Fig. 6 Reflection spectral curves of bauxite (bauxite-bearing rock) with different particle sizes.

从图6可知,铝土矿(铝土岩)样品的反射光谱曲线受到颗粒度的显著影响,当样品粒径变小时,其反射光谱的反射率就会变大,二者之间存在着一种负相关性。所有样品都采自同一套地层剖面,颜色主要为灰白色,因此反射率比较高。6件铝土矿(铝土岩)块状样品的光谱反射率在整个波段最高超过14%,粒状样品最高超过28%。

不同颗粒度铝土矿(铝土岩)样品的可见光-近

红外反射光谱形态基本相似,即在可见光波段(350~1000nm)的反射率都较高,基本在6.8%~28%范围内,且反射率会随着波长的增大而增大;在近红外波段(1001~2500nm),随着波长的逐渐增加,其反射率从28.1%~1.4%逐渐变低,总体上呈现降低的趋势。颗粒度对反射光谱的影响变得更为显著。在图6中a~d的350~1000nm波段内,随着波长的增加以及颗粒度的减小,光谱反射率也随之增大,颗

粒度愈小斜率愈大,呈负相关关系,说明当粒度越小时,颗粒间的相互作用越大。1000~1500nm波段的反射光谱曲线大致平行,如图 6a 反射率的变化幅度较小,最大变化值在 1.4% 左右,受颗粒度的影响较小;如图 6 中 b~d 反射率的变化幅度较大,最大变化值在 4.8% 左右,受颗粒度的影响较大,且 1100nm 波长处的波谷特征随着颗粒度的增大逐渐减弱,以及 1400nm 波长的波谷特征也非常显著。在 1500~2500nm 波段,在 1800nm、1900nm、2200nm 波长处的波谷特征有明显的特点,并且在波段范围内,光谱反射率有明显的下降趋势,该段反射光谱曲线受颗粒度的影响最为突出。如图 6 中 e、f 在 350~800nm 波段,光谱反射率随着波长的增加而逐渐增加,变化幅度最大在 4.3% 左右,受颗粒度的影响较大。在 800~1690nm 波段,反射光谱曲线大致表现为平行状态分布,变化幅度在 1~0.2mm 颗粒度之间最大,说明受颗粒度的影响较为显著;995nm 波长处波峰特征与 960nm、1240nm、1400nm、1660nm 波长处波谷特征比较显著。在 1690~2500nm 波段,随着波长的增加,该段的反射光谱曲线整体上呈现逐渐降低的趋势,且变化幅度先大后小,在 2230~2500nm 波段最为明显;其次,1915nm、2200nm 波长处波谷特征与 2235nm 波长处波峰特征尤为显著。

块状铝土矿(铝土岩)样品的反射光谱曲线与其他颗粒度曲线形态基本一致,其差异主要体现在反射率的大小,即图 6 中 a、e 与 f 的块状反射率大于颗粒度 0.6mm 的样品,图 6 中 b 和 d 的块状反射率小

于颗粒度 3mm 的样品。

2.3 可见光-近红外光谱区分铝土矿与铝土岩的机制分析

为分析图 4 中不同铝土矿(铝土岩)样品的组成成分可能对反射光谱产生影响,因此采用 XRF 方法获取其主要元素含量(表 1),在此基础上分析反射光谱特征与物质成分机制的关系。根据各样品中主量元素含量,将含铝岩系中 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 40\%$ 、 $\text{Al}/\text{Si} \geq 2.6$ 的样品划分为铝土矿,其余称为铝土岩^[40],成为划分矿与非矿的重要依据。其中样品 XSB-1 至 XSB-4 属于铝土矿,自然类型为土状;XSB-5、XSB-6 属于致密状铝土岩。从表 1 中的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量以及 Al/Si 比值来看,样品 XSB-1 至 XSB-4 的品位较高,符合铝土矿质量指标^[41]。

通过进一步对各铝土矿(铝土岩)样品的矿物组成进行 XRD 分析,如图 7 所示,铝土矿和铝土岩的 XRD 分析结果差异显著,土状铝土矿样品(XSB-1 至 XSB-4)的主要矿物成分是一水硬铝石 $[\text{AlO}(\text{OH})]$,铝土岩样品(XSB-5 和 XSB-6)的主要矿物成分是高岭石 $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ 。从图 4 可知,土状铝土矿样品(XSB-1 至 XSB-4)的反射光谱特征基本一致,整体的反射光谱的变化起伏较小,波谷特征较弱,反射光谱的吸收波段主要集中在 960~1000nm、1100~1150nm、1380~1440nm、1800~1850nm、1870~1930nm、2110~2200nm、2250~2295nm 波段。此外,土状铝土矿样品在 1400nm 和 1800nm 波长产生的吸收带特征主要是由于一水硬铝石 OH 引起的振动,这也

表 1 X 射线荧光光谱分析小山坝铝土矿(铝土岩)主量元素含量测定结果

Table 1 Major element content of Xiaoshanba bauxite (bauxite-bearing rock) determined by XRF.

主量元素	各样品主量元素含量 (%)					
	XSB-1	XSB-2	XSB-3	XSB-4	XSB-5	XSB-6
SiO_2	4.48	9.78	9.59	4.32	41.68	43.65
Al_2O_3	75.62	69.22	71.04	76.55	39.96	38.38
Fe_2O_3	0.76	0.87	0.76	0.73	0.69	0.61
MgO	0.25	0.52	0.56	0.26	0.98	0.70
CaO	0.20	0.15	0.13	0.11	0.17	0.17
Na_2O	0.05	0.07	0.05	0.04	0.10	0.05
K_2O	0.58	1.46	1.38	0.59	0.49	0.61
MnO	0.008	0.007	0.009	0.008	0.006	0.006
P_2O_5	0.452	0.315	0.188	0.141	0.059	0.056
TiO_2	3.305	4.131	2.634	3.141	2.259	1.883
S	0.034	0.042	0.006	0.062	0.002	0.182
LOI(烧失量)	14.14	13.04	13.22	14.10	13.29	13.30
合计	99.88	99.61	99.55	100.05	99.69	99.59
Al/Si 比值	16.88	7.08	7.41	17.72	0.96	0.88

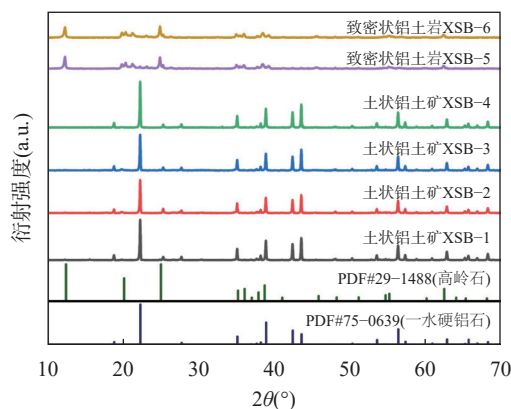


图7 不同铝土矿(铝土岩)样品的XRD分析谱图

Fig. 7 X-ray diffraction analysis spectra of different types of bauxite (bauxite-bearing rock) samples.

与图7的XRD分析结果相同。致密状铝土岩(XSB-5、XSB-6)的反射光谱曲线整体上呈现有规律的变化趋势,当颗粒度减小时,光谱反射率随之变大。在1260~2500nm波段,其光谱反射率呈现逐步下降的趋势,在1380~1420nm、1900~1920nm和2140~2240nm波段附近出现较强的吸收带。在1380~1420nm波段,1400nm波长处为特征光谱,因OH倍频和合频所致;在1900~1920nm波段,1900nm波长处为特征光谱,因H₂O的振动谱带所致;在2140~2240nm波段,2160nm和2200nm波长处为特征光谱,因Al-OH基团拉伸和弯曲振动的合频所致,2160nm和2200nm波长处呈现双吸收峰,且前者弱后者强^[14,42-44],这与图7的XRD分析结果一致,因此致密状铝土岩反射光谱不同于土状铝土矿。此外,颗粒度对铝土矿(铝土岩)反射光谱的影响,还因为颗粒度的变化影响光子的散射与吸收强度,即颗粒度越小,颗粒内部的光学路径越短,光子被吸收的强度越小,表面反射率则升高^[45],颗粒度越大则反之。因此,根据本文针对贵州省修文县小山坝喀斯特型铝土矿的可见光-近红外光谱研究结果,可采用小颗粒度的粉末样品在1800nm、1900nm、2160nm和

2200nm波长处的特征光谱进行铝土矿和铝土岩的区分。

3 结论

颗粒度作为影响岩矿光谱特征的最重要的因素之一,本文利用便携式地物光谱仪对铝土矿(铝土岩)进行可见光-近红外反射光谱测试,探讨铝土矿与铝土岩的差异性。研究表明:随着颗粒度从<0.04mm增加到3mm,铝土矿和铝土岩的反射率均逐渐减小,且铝土矿特征波谷的整体吸收强度相对稳定,而铝土岩特征波谷的吸收强度呈逐渐增大的趋势。由于两类岩(矿)石矿物组成的不同,其光谱特征差异显著,其中土状铝土矿的反射光谱特征主要与一水硬铝石一致,在1400nm和1800nm波长处有明显的波谷特征,由OH振动谱带所致;致密状铝土岩的反射光谱特征主要与高岭石一致,在1400nm、1900nm、2160和2200nm波长处有显著的波谷特征,分别由OH倍频合频、H₂O的振动谱带以及Al-OH基团拉伸和弯曲振动的合频所致,且在2160~2200nm波段呈双吸收峰特征,其中可采用小颗粒度的粉末样品在1800nm、1900nm、2160nm和2200nm波长处的特征光谱进行铝土矿和铝土岩的区分。因此,地物光谱可以作为识别矿与非矿的重要依据。

本文对露天矿床的喀斯特型铝土矿反射光谱特征进行了分析与总结,认为反射光谱特征可在野外勘查中快速识别铝土矿与铝土岩,为智能矿山建设以及找矿提供基础参考数据。今后研究可以考虑针对更多不同类型铝土矿与反射光谱特征之间的关系以及其他影响光谱特征变化的因素,开展进一步的工作。

致谢:感谢中国科学院地球化学研究所肖加飞研究员和贵州师范大学地理与环境科学学院周明忠教授在铝土矿(铝土岩)样品野外采集过程中给予的帮助与指导;感谢审稿专家提供的建设性意见。

Effect of Granularity on the Characteristic Visible-Near Infrared Spectra of Karst-Type Bauxite

GAO Qiyun^{1,2}, ZHOU Li¹, YI Zebang³, CHEN Zhengshan^{1*}

(1. School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;

2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550025, China;

3. School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The reflectivity of bauxite (bauxite-bearing rock) block samples exceeds 14% in the entire wavelength range, and the highest reflectivity of granular samples exceeds 28%.
- (2) As the particle size decreases, the spectral reflectance of bauxite (bauxite-bearing rock) gradually increases, and its reflective spectral morphology is similar.
- (3) Bauxite and bauxite-bearing rock can be distinguished by characteristic spectra of small particle powder samples at wavelengths of 1800nm, 1900nm, 2160nm, and 2200nm.

ABSTRACT: The reflection spectrum of rocks and minerals is an important reference for intelligent perception technology and remote sensing information recognition in intelligent mining. Particle size is one of the important factors affecting the reflection spectral characteristics of rocks and minerals. In order to reveal the reflection spectral characteristics of karst type bauxite with different particle sizes, the influence of particle size on the visible and near-infrared spectra of karst type bauxite is elucidated. In the study, the visible light near-infrared reflectance spectra of bauxite (bauxite-bearing rock) samples with different particle sizes were measured using the ASD FieldSpec-4 spectrophotometer. Bauxite and bauxite-bearing rock can be distinguished by characteristic spectra of small particle powder samples at wavelengths of 1800nm, 1900nm, 2160nm, and 2200nm. The research results indicate that as the particle size decreases, the spectral reflectance gradually increases. The BRIEF REPORT is available for this paper at <http://www.ykcs.ac.cn/en/article/doi/10.15898/j.ykcs.202308090133>.

KEY WORDS: bauxite; bauxite-bearing rock; granularity; visible-near infrared spectrum; reflectance spectral characteristics

BRIEF REPORT

Significance: Aluminum is one of the most widely used metals in the world, and bauxite is the main raw material for producing metallic aluminum^[30-31]. The use of hyperspectral remote sensing for rock and mineral exploration has gradually gained attention and become a key issue in the construction of intelligent mines^[1-2]. Studying the reflection spectral characteristics can quickly identify bauxite, which is beneficial for improving the reliability and precision of mineral information extraction. ASD FieldSpec-4 ground object spectrometer is used to study the visible near-infrared reflection spectral characteristics of bauxite (bauxite-bearing rock) samples under different particle size conditions. In the analysis results, the spectral differences between bauxite and bauxite-bearing rock are discussed, providing data support for the establishment of bauxite spectrum database and intelligent recognition. The results indicate that there is a significant difference in the reflection spectral characteristics between bauxite and bauxite-bearing rock, which can be distinguished by the reflection spectral characteristics.

Methods: The visible and near-infrared reflectance spectra of bauxite (bauxite-bearing rock) samples were tested by the ASD FieldSpec-4 portable ground object spectrometer (USA). The samples used were XSB-1, XSB-2, XSB-3, XSB-4, XSB-5, and XSB-6, each with a particle size of 9 levels: 2–3mm, 1–2mm, 0.60–1mm, 0.30–0.60mm, 0.20–0.30mm, 0.08–0.20mm, 0.065–0.08mm, 0.04–0.065mm, <0.04mm. Different particle size powder samples were tested in a dark room. The chemical composition of Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , etc. of bauxite (bauxite-bearing rock) samples was determined by X-ray fluorescence spectrometry (XRF); the mineral composition of bauxite (bauxite-bearing rock) samples was determined by X-ray powder diffraction (XRD). The commonalities and differences in reflectance spectra of bauxite (bauxite-bearing rock) with different particle sizes were analyzed. Combining the results of major element content and mineral composition, the intrinsic mechanism of bauxite and bauxite-bearing rock was analyzed.

Data and Results: Xiaoshanba bauxite (bauxite-bearing rock) exhibits significantly different spectral characteristics due to different mineral compositions, among which the reflection spectral characteristics of bauxite are mainly consistent with those of monohydrate alumina, with obvious trough characteristics at wavelengths of 1400nm and 1800nm, caused by OH vibration bands. The reflection spectral characteristics of bauxite-bearing rocks are mainly consistent with kaolinite, with significant trough characteristics at wavelengths of 1400nm, 1900nm, 2160nm, and 2200nm, respectively, caused by the combination of OH frequency doubling, H_2O vibration band, and Al-O-H bending fundamental harmonic vibration, and exhibit double absorption and absorption peaks in the 2160–2200nm wavelength range. The overall reflectivity of bauxite (bauxite-bearing rock) samples with different particle sizes is relatively high, with the highest reflectivity of block samples exceeding 14% in the entire wavelength band and the highest reflectivity of granular samples exceeding 28%, where the trend of change is basically the same. As the particle size increases from <0.04mm to 3mm, the reflectivity of both bauxite and bauxite-bearing rock gradually decreases, and the overall absorption intensity of bauxite characteristic valleys is relatively stable, while the absorption intensity of bauxite-bearing rock characteristic valleys shows a gradually decreasing trend.

参考文献

- [1] 刘善军, 王东, 毛亚纯, 等. 智能矿山中的岩矿光谱智能感知技术与研究进展[J]. 金属矿山, 2021(7): 1–15.
Liu S J, Wang D, Mao Y C, et al. Intelligent spectrum sensing technology and research progress of rock and ore in intelligent mine[J]. Metal Mine, 2021(7): 1–15.
- [2] 张瑞新, 毛善君, 赵红泽, 等. 智慧露天矿山建设基本框架及体系设计[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 1–23.
Zhang R X, Mao S J, Zhao H Z, et al. Framework and structure design of system construction for intelligent open-pit mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 1–23.
- [3] 刘新星, 张弘, 张娟, 等. 基于红外光谱技术研究内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿蚀变和矿化特征[J]. 岩矿测试, 2021, 40(1): 121–133.
Liu X X, Zhang H, Zhang J, et al. A study on alteration mineral assemblages and mineralization characteristics of a Wunugetushan porphyry copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, China based on infrared spectroscopy[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(1): 121–133.
- [4] 张永磊, 陶奇, 何宏平, 等. 近红外光谱对岩矿表面黏土矿物覆层的响应[J]. 地球化学, 2023, 52(1): 41–52.
Zhang Y L, Tao Q, He H P, et al. Response of near-infrared spectra to clay coatings on mineral surface[J]. Geochimica, 2023, 52(1): 41–52.
- [5] 郭东旭, 刘晓, 张海兰, 等. 基于红外光谱技术研究云南普朗斑岩铜矿的蚀变和矿化特征[J]. 岩矿测试, 2021, 40(5): 698–709.
Guo D X, Liu X, Zhang H L, et al. The infrared spectroscopy characteristics of alteration and mineralization in the porphyry copper deposit in Pulang, Yunnan Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(5): 698–709.
- [6] 张博, 司庆红, 苗培森, 等. 基于近红外岩心光谱扫描技术研究鄂尔多斯盆地彭阳铀矿床矿物分布特征[J]. 岩矿测试, 2022, 41(5): 733–743.

- Zhang B, Si Q H, Miao P S, et al. Mineral distribution characteristics of the Pengyang uranium deposit based on near infrared core spectral scanning technology[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(5): 733–743.
- [7] 代晶晶, 王登红, 代鸿章, 等. 川西甲基卡锂矿基地典型岩石及矿物反射波谱特征研究[J]. *岩矿测试*, 2018, 37(5): 507–517.
- Dai J J, Wang D H, Dai H Z, et al. Reflectance spectral characteristics of rocks and mineral in Jiajika lithium deposits in West Sichuan[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37(5): 507–517.
- [8] 代晶晶, 王登红, 令天宇. 基于地面反射波谱技术的锂含量定量反演研究[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(5): 992–997.
- Dai J J, Wang D H, Ling T Y. Quantitative estimation of content of lithium using reflectance spectroscopy[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(5): 992–997.
- [9] 韩海辉, 任广利, 张转, 等. 北山方山口地区典型蚀变岩矿的光谱特征研究[J]. *西北地质*, 2018, 51(4): 263–273.
- Han H H, Ren G L, Zhang Z, et al. Spectral characteristics of typical altered rocks and minerals from Fangshankou area in Beishan[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(4): 263–273.
- [10] Tan W, Qin X R, Liu J, et al. Visible/near infrared reflectance (VINR) spectral features of ion-exchangeable rare earth elements hosted by clay minerals: Potential use for exploration of regolith-hosted REE deposits[J]. *Applied Clay Science*, 2021, 215: 106320.
- [11] Tan W, Qin X R, Liu J, et al. Feasibility of visible short-wave infrared reflectance spectroscopy to characterize regolith-hosted rare earth element mineralization[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(2): 495–508.
- [12] Turner D J, Rivard B, Groat L A. Visible and short-wave infrared reflectance spectroscopy of selected REE-bearing silicate minerals[J]. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 2018, 103(6): 927–943.
- [13] Amer R, El Mezayen A, Hasanein M. ASTER spectral analysis for alteration minerals associated with gold mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 75: 239–251.
- [14] 燕守勋, 张兵, 赵永超, 等. 矿物与岩石的可见-近红外光谱特性综述[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(4): 191–201.
- Yan S X, Zhang B, Zhao Y C, et al. Summarizing the vis-NIR spectra of minerals and rocks[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(4): 191–201.
- [15] 盛洁, 刘展, 曾齐红, 等. 基于高光谱的砂岩露头孔隙度估算方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(6): 775–783, 789.
- Sheng J, Liu Z, Zeng Q H, et al. Porosity estimation method in sandstone outcrop based on hyperspectrum[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(6): 775–783, 789.
- [16] 王润生, 熊盛青, 聂洪峰, 等. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. *地质学报*, 2011, 85(11): 1699–1743.
- Wang R S, Xiong S Q, Nie H F, et al. Remote sensing technology and its application geological exploration acta[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(11): 1699–1743.
- [17] 甘甫平, 王润生, 马蔼乃, 等. 光谱遥感岩矿识别基础与技术研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2002, 17(3): 140–147.
- Gang F P, Wang R S, Ma A N, et al. The development and tendency of both basis and techniques of discrimination for minerals and rocks using spectral remote sensing data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2002, 17(3): 140–147.
- [18] 汪金花, 曹兰杰, 白洋, 等. 铁尾矿粒径和湿度因子对高光谱特征参量影响[J]. *矿产综合利用*, 2019, 40(2): 128–133.
- Wang J H, Cao L J, Bai Y, et al. Influence of iron tailings' particle size and humidity factor on hyperspectral characteristic parameters[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019, 40(2): 128–133.
- [19] 王润生. 遥感地质技术发展的战略思考[J]. *国土资源遥感*, 2008(1): 1–12, 42.
- Wang R S. On the development strategy of remote sensing technology in geology[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008(1): 1–12, 42.
- [20] 闫柏琨, 陈伟涛, 王润生, 等. 基于 Hapke 模型的矿物红外发射光谱随粒度与发射角的变异规律[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2009, 34(6): 946–954.
- Yan B K, Chen W T, Wang R S, et al. Variation law of

- mineral emissivity spectra with mineral granularity and emission angle based on Hapke model[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(6): 946–954.
- [21] Salisbury J W, Wald A. The role of volume scattering in reducing spectral contrast of reststrahlen bands in spectra of powdered minerals[J]. *Icarus*, 1992, 96(1): 121–128.
- [22] Okin G S, Painter T H. Effect of grain size on remotely sensed spectral reflectance of sandy desert surfaces[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 272–280.
- [23] 杨柏林, 王兴理, 王忠圣. 岩石和矿物的反射光谱特征及其应用[J]. *地球化学*, 1987(1): 89–96.
- Yang B L, Wang X L, Wang Z S. Reflective spectrum features of rocks and ores and their application[J]. *Geochimica*, 1987(1): 89–96.
- [24] 王东, 刘善军, 祁玉馨, 等. 颗粒度对鞍山式铁矿反射光谱特征的影响研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(5): 1513–1518.
- Wang D, Liu S J, Qi Y X, et al. Effect of particle size on reflectance spectra of Anshan iron ore[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(5): 1513–1518.
- [25] 刘海琪, 刘善军, 丁瑞波. 颗粒度对高品位赤铁矿可见光-近红外光谱的影响研究[J]. *金属矿山*, 2022(4): 158–162.
- Liu H Q, Liu S J, Ding R B. Effect of particle size on visible-near infrared spectral of high grade Hematite[J]. *Metal Mine*, 2022(4): 158–162.
- [26] 王延霞, 吴晃, 周亮广, 等. 不同粒度条件下矿物光谱变化分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(3): 803–808.
- Wang Y X, Wu J, Zhou L G, et al. Mineral spectrum change analysis under the conditions of different particle size[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(3): 803–808.
- [27] 杨恩, 王世博, 葛世荣. 典型煤系岩石的可见-近红外光谱特征研究[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(3): 45–51, 89.
- Yang E, Wang S B, Ge S R. Research on visible-near infrared spectrum features of typical coal measures rocks[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(3): 45–51, 89.
- [28] 张超, 刘善军, 易文华, 等. 颗粒度对不同煤种可见光-近红外光谱的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(12): 3858–3863.
- Zhang C, Liu S J, Yi W H, et al. Effect of granularity on the characteristics of visible-near infrared spectra of different coal particles[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(12): 3858–3863.
- [29] Zhuang Y, Zhang H, Ma P, et al. Visible and near-infrared reflectance spectra of igneous rocks and their powders[J]. *Icarus*, 2023, 391: 115346.
- [30] 王庆飞, 刘学飞, 杨淑娟, 等. 喀斯特型铝土矿是如何形成的?[J]. *地球科学*, 2022, 47(10): 3880–3881.
- Wang Q F, Liu X F, Yang S J, et al. How is karst bauxite formed?[J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3880–3881.
- [31] 杜远生, 余文超. 沉积型铝土矿的陆表淋滤成矿作用: 兼论铝土矿床的成因分类[J]. *古地理学报*, 2020, 22(5): 812–826.
- Du Y S, Yu W C. Subaerial leaching process of sedimentary bauxite and the discussion on classifications of bauxite deposits[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(5): 812–826.
- [32] 张生, 何卫军, 文明, 等. 近红外光谱分析方法在桂西地区沉积型铝土矿找矿中的研究[J]. *化工矿产地质*, 2023, 45(1): 58–65.
- Zhang S, He W J, Wen M, et al. Study on near infrared spectroscopy in sedimentary bauxite in Western Guangxi[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2022, 45(4): 58–65.
- [33] Thorsos E I. The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum[J]. *The Journal of Acoustical Society of America*, 1988, 83(1): 78–92.
- [34] 徐林刚, 孙莉, 孙凯. 中国铝土矿的成矿规律、关键科学问题与研究方法[J]. *矿床地质*, 2023, 42(1): 22–40.
- Xu L G, Sun L, Sun K. Metallogenic regularity, key scientific problems and research methods of bauxite in China[J]. *Mineral Deposits*, 2023, 42(1): 22–40.
- [35] 叶霖, 程曾涛, 潘自平. 贵州修文小山坝铝土矿中稀土元素地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(3): 228–233.
- Ye L, Cheng Z T, Pan Z P. The REE geochemical characteristics of the Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2007, 26(3): 228–233.
- [36] 兰永文, 王洪雨, 栗欢欢. 贵州修文小山铝土矿床地质特征及其成因探讨[J]. *西部探矿工程*, 2015, 27(8): 171–175.
- Lan Y W, Wang H Y, Li H H. Geological characteristics

- and genesis of Xiaoshan bauxite deposit in Xiuwen, Guizhou[J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 27(8): 171-175.
- [37] 陈群, 戴晓燕, 梁鹏, 等. 贵州省修文县石炭系小山坝铝土矿矿床地质特征[J]. 贵州地质, 2019, 36(4): 316-323.
- Chen Q, Dai X Y, Liang P, et al. Geological characteristics of Xiaoshanba bauxite deposit in carboniferous system of Xiuwen, Guizhou[J]. Guizhou Geology, 2019, 36(4): 316-323.
- [38] 窦增文. 西南地区某高泥堆积型铝土矿选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2022(7): 193-197.
- Dou Z W. Experimental study on beneficiation of a high mud accumulation type bauxite in southwestern district[J]. Metal Mine, 2022(7): 193-197.
- [39] 黄国智, 方启学, 石伟, 等. 放粗铝土矿选矿精矿粒度的可行性研究[J]. 轻金属, 2000(7): 7-10.
- Huang G Z, Fang Q X, Shi W, et al. Feasibility study of enlarging the coarseness of bauxite concentrate[J]. Light Metals, 2000(7): 7-10.
- [40] 李沛刚, 王登红, 赵芝, 等. 贵州大竹园铝土矿矿床地质、地球化学与成矿规律[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-217.
- Li P G, Wang D H, Zhao Z, et al. Geology, geochemistry and metallogenic regularity of Dazhuyuan bauxite deposit in Guizhou Province[M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-217.
- [41] 曹信禹. 岩溶堆积型铝土矿工业指标的初步探讨[J]. 轻金属, 1984(9): 1-4.
- Cao X Y. Preliminary discussion on industrial index of karst accumulation bauxite[J]. Light Metals, 1984(9): 1-4.
- [42] 秦效荣, 姚玉增, 何宏平, 等. 广东梅州花岗岩风化壳剖面的可见光-短波红外反射光谱特征及其对风化强度的指示[J]. 地球化学, 2020, 49(4): 422-434.
- Qin X R, Yao Y Z, He H P, et al. Visible to shortwave-infrared spectroscopic characteristics and weathering intensity indicators of a weathering-crust-type REE deposit in granite bedrock, from Meizhou, Guangdong Province[J]. Geochimica, 2020, 49(4): 422-434.
- [43] 代晶晶, 王润生. 常见透明矿物类波谱特征研究综述[J]. 地质科技情报, 2013, 32(2): 8-14.
- Dai J J, Wang R S. Spectral characteristics of typical transparent mineral groups[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(2): 8-14.
- [44] Clark R N. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy[M]//Manual of Remote Sensing. New York: Remote Sensing for the Earth Sciences, 1999: 3-58.
- [45] Vernazza P, Carry B, Emery J, et al. Mid-infrared spectral variability for compositionally similar asteroids: Implications for asteroid particle size distributions[J]. [Icarus](#), 2010, 207(2): 800-809.