

## 颗粒度对鞍山式铁矿反射光谱特征的影响研究

王东, 刘善军\*, 祁玉馨, 刘海琪

东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

**摘要** 岩矿反射光谱的决定因素是其成分及含量, 变异因素主要为颗粒度、粗糙度、观测角度、表面形态等。为明确颗粒度与鞍山式铁矿反射光谱之间的关系, 采用 SVC HR-1024 便携式地物光谱仪对鞍山式铁矿的两种主要铁矿石(赤铁矿、磁铁矿)进行不同颗粒度下的可见光-近红外光谱测试, 分析颗粒度对赤铁矿、磁铁矿反射光谱的影响规律, 并明确颗粒度的敏感波段与稳定波段, 为以后的定量反演工作提供参考。结果表明, 颗粒度对赤铁矿、磁铁矿反射光谱的影响规律具有显著差异。当赤铁矿试样粒径由 0.03 mm 增加到 1 mm 时, 光谱反射率随颗粒度增加而逐渐减小, 二者呈现显著负相关关系。但是在不同的波段处, 赤铁矿反射光谱受颗粒度的影响程度不同, 在 350~550 nm 波段, 反射光谱受颗粒度影响非常微弱, 为赤铁矿反射光谱对颗粒度的稳定波段; 在 550~950 nm 波段, 反射光谱受颗粒度影响较微弱; 在 950~1 250 nm 波段, 反射光谱受颗粒度影响较显著; 在 1 250~2 500 nm 波段, 反射光谱受颗粒度影响非常显著, 为赤铁矿反射光谱对颗粒度的敏感波段。当赤铁矿试样粒径大于 1 mm 之后, 赤铁矿反射光谱多重叠, 受颗粒度影响显著减弱, 且二者无明显相关性。当磁铁矿试样粒径由 0.03 mm 增加到 4 mm 时, 磁铁矿反射光谱对颗粒度的响应非常微弱, 颗粒度引起的光谱反射率变化不超过 3%, 且颗粒度与磁铁矿反射光谱间无相关性, 二者间联系微弱。该研究揭示了颗粒度对鞍山式铁矿反射光谱的影响规律, 定量分析了颗粒度对赤铁矿、磁铁矿反射光谱的影响程度, 并确定了颗粒度与试样反射率符合的函数分布关系, 为提高鞍山式铁矿的品位反演精度奠定了良好基础。

**关键词** 鞍山式铁矿; 颗粒度; 反射光谱; 定量分析

**中图分类号:** P237 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)05-1513-06

### 引言

高光谱分析技术是 20 世纪 80 年代新兴的一种定量分析技术, 其与传统方法相比具有快速、无损、便携等优点, 因此, 被广泛应用于岩矿分析与矿物加工等领域<sup>[1-3]</sup>。国内外学者对多种矿物与岩石的反射光谱特性及产生原因进行了深入研究, 结果表明, 岩矿反射光谱主要受其成分、含量及结构等内在决定因素影响, 但是岩矿反射光谱不仅取决于其内在决定因素, 还受到试样颗粒度、粗糙度、观测角度、孔隙度、风化程度、表面形态等诸多变异因素的影响。颗粒度作为影响岩矿反射光谱的重要变异因素, 已引起众学者的关注。杨柏林等<sup>[4]</sup>发现岩矿的反射光谱特征与颗粒度等表面状态有关, 并提取了颗粒度的敏感波段。Salisbury 等<sup>[5]</sup>通过实验发现基频振动带强度随粒径减小而增加, 并认为此现象是

由粒径减小而增大的孔隙率造成的。Okin 等<sup>[6]</sup>对蒙脱石和石英的反射光谱和粒径之间关系进行研究, 发现在 50~750  $\mu\text{m}$  粒径范围, 试样光谱反射率随粒径减小而逐渐升高。汪金花等<sup>[7]</sup>通过对铁尾矿的反射光谱与粒径之间的关系进行研究, 发现铁尾矿试样的光谱反射率随粒径的减小逐渐增大。Carli 和 Hatcher 等学者<sup>[8-9]</sup>发现试样反射率随颗粒度的减小呈指数增长。马创等<sup>[10]</sup>发现试样光谱反射率随粒径的减小呈幂函数增长, 1 mm 为阈值, 当颗粒度大于 1 mm 之后, 试样光谱受颗粒度影响较小。王延霞等<sup>[11]</sup>通过成像光谱仪获取了多种矿物在不同颗粒度下的反射光谱曲线, 发现试样光谱特征随颗粒度的不同发生明显变化, 但是不同矿物其光谱特征随颗粒度的变化规律存在显著差异。

上述研究表明, 颗粒度作为影响岩矿反射光谱特征的重要变异因素, 对试样的反射光谱有显著影响, 但是岩矿种类不同, 试样光谱特征受颗粒度的影响规律也不同, 具有明显

收稿日期: 2020-05-08, 修订日期: 2020-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771404, 71790614)资助

作者简介: 王东, 1991 年生, 东北大学资源与土木工程学院博士研究生 e-mail: 15032925070@163.com

\* 通讯作者 e-mail: liusjdr@126.com

的差异性。鞍山式铁矿,国际上称之为条带状铁建造(banded iron formations, BIF),是我国乃至世界最重要的一种铁矿类型。从鞍山式铁矿的采矿到选矿整个流程中,颗粒状铁矿石始终存在且居多,但是,颗粒度对鞍山式铁矿反射光谱特征的影响规律及影响程度尚未明确。因此,本文以鞍山式铁矿为实验样品,通过测试不同颗粒度试样的反射光谱曲线,研究颗粒度对试样反射光谱的影响规律,并确定颗粒度的敏感波段、稳定波段及颗粒度对试样反射光谱的影响程度,为铁矿石品位的高光谱反演模型的建立奠定实验基础。

## 1 实验部分

### 1.1 样品采集

辽宁省鞍山一本溪地区是我国最主要的鞍山式铁矿床富集区,该地区铁矿储量约占全国铁矿资源总储量的 20%,居全国首位,且易于开采,具有极大的工业价值。因此,以辽宁省鞍钢集团下属的矿山为试验区,采集典型的块状赤铁矿、磁铁矿实验样品若干。然后进行破碎、研磨加工处理,以备后续实验需要。

### 1.2 样品设计

矿山实际生产过程中,需要将块状矿石破碎成粒径为 0~10 mm 不等的颗粒,然后进行球磨处理,得到粒径约为 0.03 mm 的矿粉,再将矿粉经过重磁浮选与过滤处理,最终得到具有工业使用价值的精矿粉。在上述生产过程中,铁矿石粒径主要分布在 0.03~10 mm 范围。由于矿石粒径位于 5~10 mm 范围时,会出现明显的阴影现象,严重影响光谱测试的结果。因此,本研究设计了 <0.03, 0.03~0.05, 0.05~0.07, 0.07~0.11, 0.11~0.15, 0.15~0.23, 0.23~0.3, 0.3~0.6, 0.6~1, 1~2, 2~3 和 3~4 mm, 12 个颗粒度等级的实验样品,如表 1 所示。

表 1 试样颗粒度设计表

Table 1 The particle size of samples

颗粒度等级	粒径范围/mm	颗粒度等级	粒径范围/mm
颗粒度 1	<0.03	颗粒度 7	0.23~0.3
颗粒度 2	0.03~0.05	颗粒度 8	0.3~0.6
颗粒度 3	0.05~0.07	颗粒度 9	0.6~1
颗粒度 4	0.07~0.11	颗粒度 10	1~2
颗粒度 5	0.11~0.15	颗粒度 11	2~3
颗粒度 6	0.15~0.23	颗粒度 12	3~4

### 1.3 样品制备

鞍山式铁矿的矿石类型主要为赤铁矿和磁铁矿,其中赤铁矿为贫铁矿,铁品位多位于 20%~35% 之间,而磁铁矿铁品位较高,铁品位多位于 30%~60% 之间。因此,本研究以实际赋存品位为依据,选取品位为 30% 的赤铁矿和品位为 50% 的磁铁矿,按照上述设计进行不同颗粒度实验样品的制备。将破碎好的铁矿石放置在筛网上,在微振动条件下,由粗粒到细粒逐级筛选,得到 12 个颗粒度等级的实验样品,将制备的实验样品放进圆形的黑色样品盒中保存,如图 1 所示。图中上面一行为赤铁矿试样,下面一行为磁铁矿试样,

由左至右,试样粒径由 3~4 mm 逐渐减小至 <0.03 mm。由图可知,随试样粒径的减小,赤铁矿颜色逐渐由黑色变为樱红色,而磁铁矿颜色逐渐由黑色变为灰黑色。产生此现象的原因,主要是在较大的颗粒形态下,试样颜色受假色和他色影响严重,而其自身的颜色被抑制,因此较大粒径的赤铁矿和磁铁矿呈现的均是假色(黑色);而当试样粒径较小时,假色现象便会消除,他色作用也会减弱,此时便呈现出试样的自色,赤铁矿的自色为樱红色,而磁铁矿的自色为灰黑色。



图 1 不同颗粒度的实验样品

Fig. 1 Samples of different particle sizes

### 1.4 光谱测试

采用 SVC HR-1024 便携式地物光谱仪对制备好的实验样品进行反射光谱测试,光谱仪波长范围 350~2 500 nm,通道数 1 024,光谱分辨率 ≤8.5 nm,光谱精度优于 ±0.5 nm,最小积分时间为 1 s。为减弱外界环境的影响,本实验选择在室内条件下,以卤素灯作为唯一光源进行光谱测试。测试前以标准白板为背景进行定标,测试过程中,每 10 min 进行一次白板定标。为减弱样品表面形态的影响,每个试样测三次光谱曲线,以样品光谱曲线的均值作为试样的反射率,通过上述步骤可减弱其他因素的干扰,获取可靠的光谱曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 颗粒度对赤铁矿反射光谱的影响

由于赤铁矿和磁铁矿的反射光谱具有显著的差异,而且颗粒度对两种铁矿石反射光谱的影响规律也不尽一致,因此对两种铁矿石试样的反射光谱分开进行分析。首先对赤铁矿试样反射光谱进行分析,图 2 为不同颗粒度赤铁矿试样的反射光谱曲线,由图可知,实验样品反射光谱曲线随颗粒度不

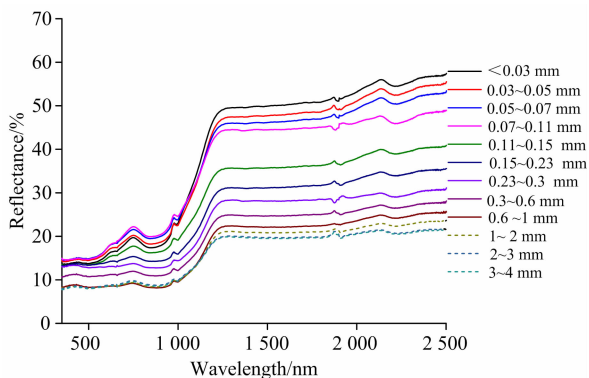


图 2 不同颗粒度赤铁矿试样反射光谱曲线

Fig. 2 The reflectance spectra of hematite with different particle sizes

同呈规律性变化,具体如下所述。

### 2.1.1 总体影响分析

(1)如图 2 所示,赤铁矿试样的反射光谱曲线受颗粒度影响显著,随试样颗粒度增加,其光谱反射率不断降低,二者呈负相关关系。

(2)如图 2 中实线所示,试样颗粒度由 0.03 mm 增加至 1 mm,其光谱反射率显著降低;如图 2 中虚线所示,试样颗粒度由 1 mm 增加至 4 mm,其光谱反射率降低速度明显减缓,反射光谱受颗粒度影响较弱,尤以 350~1 250 nm 波段最为显著,其光谱曲线多重叠。由此可知颗粒度以 1 mm 为阈值,试样颗粒度小于 1 mm 时,反射光谱受颗粒度影响显著,试样颗粒度大于 1 mm 时,反射光谱受颗粒度影响微弱。

(3)试样光谱反射率随颗粒度增加呈现逐渐降低的趋势,但是在不同的波段处,反射光谱受颗粒度的影响规律及影响程度存在显著差异,整体表现为,波长越长,反射光谱受颗粒度影响越显著,具体如下。

在 350~550 nm 波段,反射光谱曲线多平行分布,且变化幅度较小,该波段反射光谱受颗粒度影响较微弱。在 550~950 nm 波段,当颗粒度较小时,750 nm 波峰特征与 850 nm 波谷特征非常显著,随颗粒度增加,750 nm 波峰特征与 850 nm 波谷特征越来越微弱,当颗粒度大于 1 mm 之后,铁离子光谱特征受到抑制,光谱曲线近乎平直。在 950~1 250 nm 波段,颗粒度的变化对反射光谱上升的斜率有显著影响,随颗粒度增加,该波段光谱的斜率逐渐降低,二者呈现负相关关系。在 1 250~2 500 nm 波段,颗粒度对光谱反射率的高低影响显著,随颗粒度的增加,光谱反射率依次降低,且其变化幅值较大,该波段反射光谱受颗粒度影响非常显著。

### 2.1.2 定量影响分析

#### (1)相关性分析

由上可知,赤铁矿颗粒度的变化对试样反射光谱影响显著,为深入了解颗粒度对赤铁矿反射光谱的影响,本文对颗粒度与反射光谱进行相关性分析,确定出反射光谱对颗粒度的敏感波段和非敏感波段,后者亦称稳定波段。由于粒径大于 1 mm 时,试样反射光谱受颗粒度影响很微弱,因此本文仅对 0.03~1 mm 的颗粒度与赤铁矿反射光谱之间的关系进行分析。

由文献[8-10]可知,颗粒度与反射光谱之间呈现非线性相关关系。Charles Spearman 提出的 Spearman 秩相关系数( $\rho$ ),是一种与分布无关的无参数检验,可很好的刻画二个变量之间的非线性相关关系<sup>[12]</sup>。因此,应用 Spearman 秩相关系数( $\rho$ )对试样光谱反射率与颗粒度进行相关性分析,结果如图 3 所示。由图 3 可知,在 350~950 nm 波段,二者相关系数位于-0.67~-0.73 之间,光谱反射率与颗粒度相关性中等;在 950~1 150 nm 波段,光谱反射率与颗粒度的相关性逐渐增强,相关系数由-0.67 增加至-0.99;在 1 150~2 500 nm 波段,光谱反射率与颗粒度相关性非常显著,相关系数为-0.99。

然后对相关性非常显著的 1 150~2 500 nm 波段的反射率与颗粒度之间的关系进行进一步研究。由于不同颗粒度试

样 1 150~2 500 nm 波段反射光谱曲线多平行分布,因此对 1 150~2 500 nm 波段的反射率取均值,然后确定反射率均值与颗粒度的回归函数关系,结果如图 4 所示。

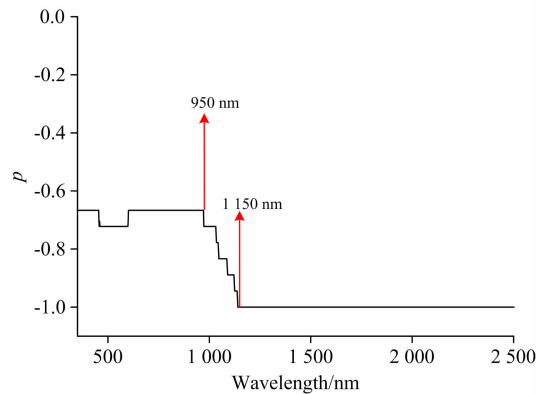


图 3 赤铁矿光谱反射率与颗粒度的相关性分析图

Fig. 3 The correlation analysis of reflectivity and the particle size of hematite

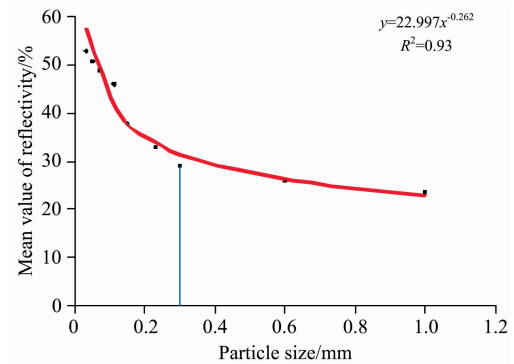


图 4 颗粒度与赤铁矿 1 150~2 500 nm 反射率均值拟合结果

Fig. 4 The fitting result of particle size and mean reflectivity in 1 150~2 500 nm of hematite

由图 4 可知,颗粒度与 1 150~2 500 nm 波段反射率均值呈现较显著的幂函数分布关系,其  $R^2$  为 0.93,此结果与文献[8-10]相一致。但是,本文发现,将颗粒度 0.3 mm 作为分界点,对颗粒度进行分段分析,能更清晰反映试样反射率受颗粒度的影响规律。对 0.03~0.3 mm 颗粒度与反射率的关系进行分析,结果如图 5 所示,由图可知,试样颗粒度与反射率符合显著的线性负相关关系,相关系数为-0.98,  $R^2$  为 0.95。

对 0.3~1 mm 颗粒度与试样反射率关系进行分析,结果如图 6 所示,由图可知,试样颗粒度与反射率亦符合较显著的线性负相关关系,二者相关系数为-0.98,  $R^2$  为 0.96。但是,对比图 5 和图 6,可发现,颗粒度大于 0.3 mm 后,反射率随颗粒度增加而下降的速度明显减缓。

#### (2)影响程度分析

Spearman 秩相关系数反映了颗粒度与光谱反射率之间的相关性,但无法反映二者之间的影响程度。为此,应用反射率变化幅度(简称“反射率变幅”)指标分析各个波长的光谱反射率受颗粒度的影响程度。图 7 为赤铁矿颗粒度由 0.03

mm 增加到 1 mm, 试样反射光谱在不同波长处的反射率变幅统计分析结果。由图 7 可知, 在 350~550 nm 波段, 反射率变幅最小, 约 5%; 在 550~950 nm 波段, 反射率变幅于 5%~10% 之间波动; 在 950~1 250 nm 波段, 反射率变幅急剧增加, 由 10% 左右增加到了 25%; 在 1 250~2 500 nm 波

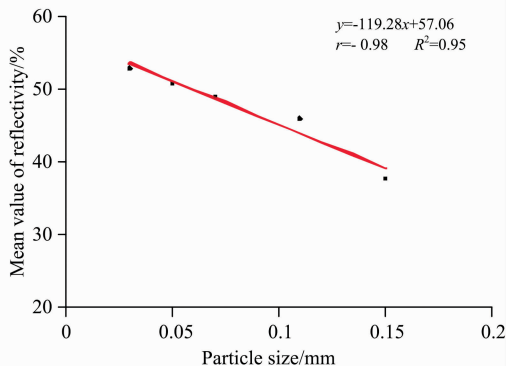


图 5 0.03~0.3 mm 颗粒度与赤铁矿 1 150~2 500 nm 波段反射率均值拟合结果

Fig. 5 The fitting result of 0.03~0.3 mm particle size and mean reflectivity in 1 150~2 500 nm of hematite

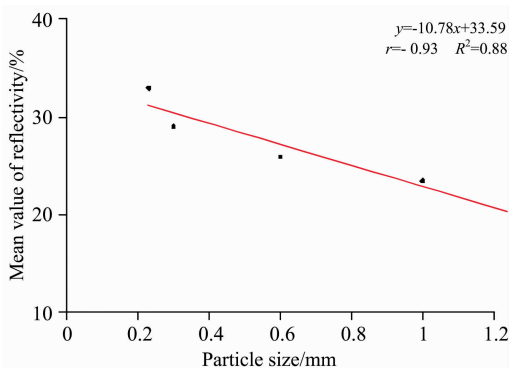


图 6 0.3~1 mm 颗粒度与赤铁矿 1 150~2 500 nm 波段反射率均值拟合结果

Fig. 6 The fitting result of 0.3~1 mm particle size and mean reflectivity in 1 150~2 500 nm of hematite

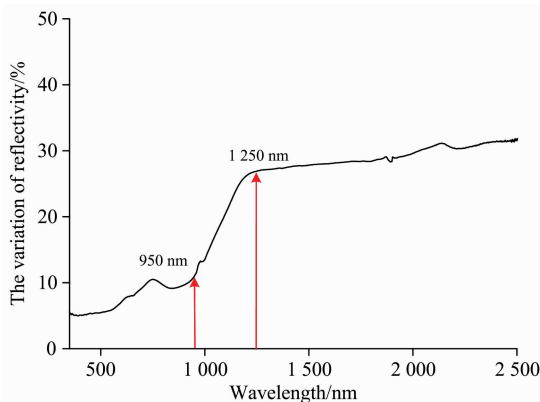


图 7 不同颗粒度赤铁矿 350~2 500 nm 波段反射率变幅  
Fig. 7 The reflectivity variation of hematite with different particle size in 350~2 500 nm

段, 反射率变幅维持在 30% 左右, 该波段反射变化幅值较大, 表明该波段反射光谱受颗粒度影响非常显著。由此可知, 试样反射率变幅随波长的增加整体呈现逐渐增加的趋势, 且该曲线与图 2 中的不同颗粒度光谱曲线具有高度相似性。

对上述两个指标进行综合分析, 最终确定颗粒度对赤铁矿反射光谱影响的敏感波段与稳定波段, 结果如表 2 所示。

表 2 试样光谱敏感性统计结果

Table 2 The statistical results of spectral sensibility with particle size

波段/nm	相关系数	反射率变幅/%	敏感性
350~550	-0.67~-0.73	5	稳定
550~950	-0.67~-0.73	5~10	较稳定
950~1 250	-0.67~-0.99	10~25	较敏感
1 250~2 500	≈-1	≈30	敏感

由表 2 可知, 在 350~550 nm 波段, 二者相关系数位于 -0.67~-0.73 之间, 反射率变幅为 5%, 反射光谱受颗粒度影响最小, 因此确定该波段为赤铁矿反射光谱对颗粒度的稳定波段; 在 550~950 nm 波段, 二者相关系数位于 -0.67~-0.73 之间, 反射率变幅位于 5%~10% 之间, 反射光谱受颗粒度影响较微弱; 在 950~1 250 nm 波段, 二者相关系数位于 -0.67~-0.99 之间, 反射率变幅位于 10%~25% 之间, 反射光谱受颗粒度影响较显著; 在 1 250~2 500 nm 波段, 二者相关系数近似为 -1, 反射率变幅约为 30%, 反射光谱受颗粒度影响非常显著, 因此确定该波段为赤铁矿反射光谱对颗粒度的敏感波段。

综上所述, 当赤铁矿颗粒度大于 1 mm 时, 赤铁矿试样的反射光谱受颗粒度影响较微弱, 对赤铁矿的成分进行定量反演时, 可忽略颗粒度对赤铁矿反射光谱的影响; 当赤铁矿颗粒度小于 1 mm 时, 350~550 nm 波段, 为赤铁矿反射光谱对颗粒度的稳定波段, 该波段反射光谱受颗粒度影响非常微弱, 而其他波段受颗粒度影响则相对较大, 在基于光谱特征进行矿石品位反演时需考虑颗粒度的影响。

### 2.2 颗粒度对磁铁矿反射光谱的影响

图 8 为不同颗粒度磁铁矿试样的反射光谱曲线, 从图看

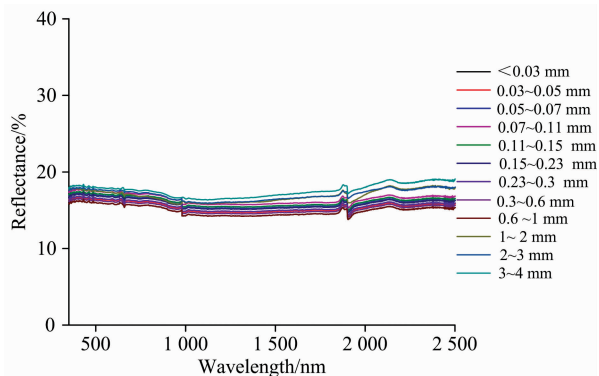


图 8 不同颗粒度磁铁矿的反射光谱曲线  
Fig. 8 The reflectance spectra of magnetite with different particle size

出, 磁铁矿试样反射率全波段均较低, 分布在 15%~18% 之间, 而且光谱曲线较平直, 无明显光谱特征。颗粒度对磁铁矿实验样品反射光谱曲线的影响规律具体如下所述。

### 2.2.1 总体影响分析

(1) 不同颗粒度磁铁矿的反射光谱多平行分布, 表明颗粒度不会影响反射光谱的形态, 仅会影响反射光谱的高低。

(2) 不同颗粒度磁铁矿的反射光谱几乎重叠, 试样反射率变幅较小, 均不足 3%, 表明反射光谱受颗粒度影响较弱。

### 2.2.2 定量影响分析

#### (1) 相关性分析

为进一步了解颗粒度对磁铁矿反射光谱的影响, 采用“Spearman 秩相关系数”分析颗粒度与磁铁矿反射光谱的相关性, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 磁铁矿光谱反射率与颗粒度的相关系数非常小, 而且在 350~2 500 nm 波段, 二者相关系数无明显变化, 约为 0.1, 表明颗粒度与磁铁矿反射光谱无较明显的相关关系。

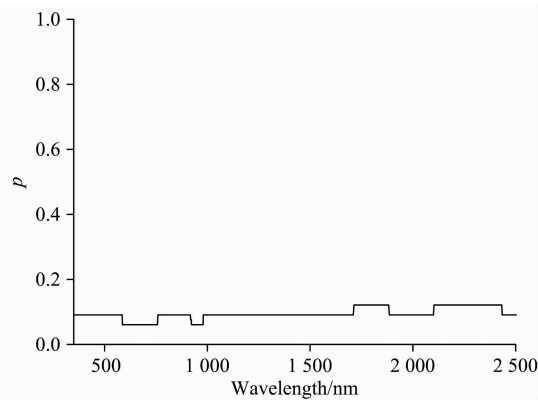


图 9 磁铁矿光谱反射率与颗粒度的相关性分析图

Fig. 9 The correlation analysis of reflectivity and the particle size of magnetite

#### (2) 影响程度分析

由于颗粒度不会影响磁铁矿反射光谱形态, 仅会影响反射光谱高低。因此, 对磁铁矿 350~2 500 nm 波段反射率取均值, 确定反射率均值与颗粒度关系, 即可确定颗粒度对磁铁矿反射光谱影响程度, 结果如图 10 所示。由图可知, 在颗粒度 0.03~4 mm 范围, 磁铁矿反射率位于 15%~18%, 反射率变化幅度较小, 不超过 3%, 表明颗粒度对磁铁矿反射光谱影响非常微弱。

综上所述, 颗粒度对磁铁矿反射光谱影响非常微弱, 对磁铁矿的成分含量进行定量反演时, 可不考虑颗粒度对磁铁矿反射光谱的影响。

### 2.3 机理分析

颗粒度的大小直接决定光子的散射与吸收强度, 根据比尔定律, 颗粒度越小, 颗粒内部光学路径越短, 光子被吸收的强度越小; 颗粒度越大, 颗粒内部光学路径越长, 光子被

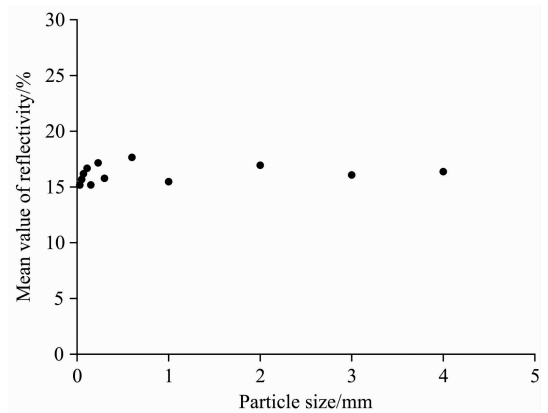


图 10 不同颗粒度磁铁矿的光谱反射率均值

Fig. 10 The mean reflectivity of magnetite with different particle size

吸收的强度越大, 表面反射率相应降低<sup>[13-14]</sup>。但是, 反射率不会随颗粒度增加而持续降低。当颗粒度增加到一定程度, 会达到一个极限状态, 产生吸收饱和效应, 此时反射光谱仅由初次表面反射决定, 光谱反射率将不会发生变化。因此, 赤铁矿颗粒度由 0.03 mm 增加到 1 mm, 试样反射光谱不断降低, 当颗粒度大于 1 mm 以后, 试样反射光谱几乎不再变化。

磁铁矿属于黑色矿物, 颜色较深, 对光线吸收能力较强, 反射能力较弱, 因此其光谱反射率较低, 且反射光谱无明显特征, 近乎平直。由于磁铁矿光吸收能力极强, 颗粒度不同引起的光子散射与吸收效应对其影响极其微弱, 所以磁铁矿反射光谱受颗粒度影响非常微弱。

## 3 结论

通过对不同颗粒度赤铁矿和磁铁矿进行反射光谱测试, 分析了颗粒度对实验样品反射光谱的影响规律, 得到以下结论:

(1) 颗粒度对赤铁矿反射光谱影响较大。赤铁矿颗粒度小于 1 mm 时, 赤铁矿反射光谱受颗粒度影响显著, 但是不同波段处影响特征不同。在 350~550 nm 波段, 反射光谱受颗粒度影响非常微弱, 为反射光谱对颗粒度的稳定波段; 550~950 nm 波段, 反射光谱受颗粒度影响较微弱; 950~1 250 nm 波段, 反射光谱受颗粒度影响较显著; 1 250~2 500 nm 波段, 反射光谱受颗粒度影响非常显著, 为反射光谱对颗粒度的敏感波段。赤铁矿颗粒度大于 1 mm, 颗粒度对反射光谱影响较弱, 此时在利用光谱进行赤铁矿品位含量反演时, 可忽略颗粒度的影响。

(2) 颗粒度对磁铁矿反射光谱影响较小, 颗粒度在 0.03~4 mm 范围, 同一波长处反射率变化不超过 3%, 表明应用光谱分析技术对磁铁矿品位进行反演时, 在精度允许的前提下可忽略颗粒度对磁铁矿反射光谱的影响。

## References

- [ 1 ] Walid S, Mourtada E A, Reinhard G. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2015, 136(5): 1816.
- [ 2 ] Feng Q C, Wen S M, Bai X, et al. *Minerals Engineering*, 2019, 137: 1.
- [ 3 ] Zhao W J, Liu D W, Feng Q C, et al. *Minerals Engineering*, 2019, 141: 105846.
- [ 4 ] YANG Bai-lin, WANG Xing-li, WANG Zhong-sheng(杨柏林, 王兴理, 王忠圣). *Geochimica(地球化学)*, 1987, (1): 89.
- [ 5 ] Salisbury J W, Wald A. *ICARUS*, 1992, 96(1): 121.
- [ 6 ] Okin G S, Painter T H. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 272.
- [ 7 ] WANG Jin-hua, CAO Lan-jie, BAI Yang, et al(汪金花, 曹兰杰, 白 洋, 等). *Multipurpose Utilization of Mineral Resources(矿产综合利用)*, 2019, (2): 128.
- [ 8 ] Carli C, Roush T L, Pedrazzi G. *ICARUS*, 2016, 266: 267.
- [ 9 ] Hatcher A, Hill P, Grant P, et al. *Marine Geology*, 2000, 168: 115.
- [10] MA Chuang, SHEN Guang-rong, WANG Zi-jun, et al(马 创, 申广荣, 王紫君, 等). *Chinese Journal of Soil Science(土壤通报)*, 2015, 46(2): 292.
- [11] WANG Yan-xia, WU Jian, ZHOU Liang-guang, et al(王延霞, 吴 见, 周亮广, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2015, 35(3): 803.
- [12] WANG Tao(王 涛). *Science Technology and Engineering(科学技术与工程)*, 2017, 17(2): 234.
- [13] Mi J R, Zhang L D, Zhao L L, et al. *Frontiers of Optoelectronics*, 2013, 6(2): 216.
- [14] Vernazza P, Carry B, Emery J, et al. *ICARUS*, 2010, 207: 800.

## Effect of Particle Size on Reflectance Spectra of Anshan Iron Ore

WANG Dong, LIU Shan-jun\*, QI Yu-xin, LIU Hai-qi

School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

**Abstract** Generally, the influence factors of the reflectance spectrum of rocks and minerals can be divided into the decisive factors related to composition and content, and the variant factors, including the particle size, roughness, observation angle and surface morphology. The study is focused on the relationship between the reflectance spectrum and the particle size of Anshan iron ore. Firstly, the reflectance spectra of the two main iron ores (hematite ore and magnetite ore) with different particle sizes are obtained by SVC HR-1024. Then, the influence of particle size on the reflectance spectra of both hematite and magnetite is analyzed. The sensitive waveband and stable waveband of the reflectance spectra related to particle size are extracted. The study indicates the following results. Firstly, the effects of particle size on the reflectance spectra of hematite and magnetite are different. For the hematite, the reflectance decreases with the particle size increase when the particle size is in the range of 0.03 to 1 mm. The effects are different in different waveband for the reflectance spectra of hematite. In the wave range of 350~550 nm, the particle size's effect can be neglected and this waveband can be regarded as the stable waveband. The influence is weak in the range of 550~950 nm and become obvious in the 950~1 250 nm range. In the range of 1 250~2 500 nm, the reflectance changes obviously with the particle size. Therefore, this waveband can be regarded as a sensitive waveband. However, when the particle size of the hematite is larger than 1 mm, the particle size's effect decreased obviously without correlation. For the magnetite, the reflectance changes weakly with an amplitude of less than 3% when the particle size is in the range of 0.03 to 4 mm. There is no correlation between the reflectance and the particle size. This study revealed the quantitative relationship between the reflectance spectrum and the particle size for Anshan iron ore. The results can provide the foundation for improving the inversion accuracy of the ore grading for the Anshan iron.

**Keywords** Anshan iron mine; Particle size; Reflectance spectra; Quantitative analysis

(Received May 8, 2020; accepted Sep. 11, 2020)