



文章编号:1671-251X(2019)03-0045-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018090047

典型煤系岩石的可见-近红外光谱特征研究

杨恩, 王世博, 葛世荣

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)



扫码移动阅读

摘要:为研究基于可见-近红外光谱技术的煤岩识别方法,从山西、山东4个煤矿收集了页岩、砂岩、灰岩三大类11种典型煤系岩石,测定了其可见-近红外波段(400~2 450 nm)的反射光谱,分析了其矿物、元素组成对反射光谱特征的影响,获得了碳质物质含量对煤系页岩反射光谱曲线特征参数的影响规律。研究结果表明:①绝大多数煤系岩石的反射光谱曲线在可见光波段(400~780 nm)和短波近红外波段(780~1 100 nm)呈现出随波长增加的多重吸收谷。在长波近红外波段(1 100~2 450 nm),明显的吸收谷主要集中在1 400,1 900,2 200,2 350 nm波长,页岩、灰岩吸收谷的波长相对固定,而不同砂岩吸收谷的波长呈现出多种变化。②除碳质物质含量较高的碳质页岩外,同一煤矿各类煤系岩石与煤的可见-近红外波段反射光谱吸收特征差异明显。③当煤系页岩中碳质物质含量增大时,可见-近红外波段反射光谱曲线的光谱斜率和各明显吸收谷深度均呈先快速减小后趋于平缓的特点。

关键词:煤岩识别;煤系岩石;可见-近红外光谱;反射光谱特征;光谱吸收特征;吸收谷;碳质页岩
中图分类号:TD67 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20190220.1725.002.html>

Research on visible-near infrared spectrum features of typical coal measures rocks

YANG En, WANG Shibo, GE Shirong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to study coal-rock identification method based on visible-near infrared spectrum technology, 11 types of typical coal measures rocks including three main categories namely shale, sandstone and limestone were collected from four coal mines of Shanxi and Shandong provinces. Their reflectance spectra in visible-near infrared band (400-2 450 nm) were measured and influences of mineral and elemental compositions on spectrum features were studied. Differences between reflectance spectrum curves of coal measures rocks and the ones of coals from the four coal mines were analyzed, and influence laws of carbonaceous matter content on characteristic parameters of reflectance spectra curves of coal measures shale were obtained. The study results show that reflectance spectrum curves of the most coal measures rocks show multiple absorption valleys with increasing wavelength in visible light band (400-780 nm) and shortwave near infrared band (780-1 100 nm). In longwave near infrared band (1 100-

收稿日期:2018-09-16;修回日期:2019-01-23;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(U1610251, U1510116);国家重点研发计划资助项目(2018YFC0604503);江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)。

作者简介:杨恩(1986—),男,山东巨野人,博士研究生,研究方向为煤岩识别,E-mail:yangen635@126.com。通信作者:王世博(1979—),男,河北新河人,教授,博士,研究方向为煤矿智能化开采,E-mail:wangshb@cumt.edu.cn。

引用格式: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.

YANG En, WANG Shibo, GE Shirong. Research on visible-near infrared spectrum features of typical coal measures rocks[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(3): 45-51.

2 450 nm), distinct absorption valleys are mainly located near 1 400 nm, 1 900 nm, 2 200 nm and 2 350 nm wave length. The wave length of absorption valleys of shale and limestone are relatively fixed while the ones of different sandstones show a variety of changes. Except for carbonaceous shale without distinct absorption features, absorption features of reflectance spectra of coal measures rocks and coals from the same coal mine are obviously different in visible-near infrared band. With increase of carbonaceous matter content of coal measures shale, a common feature is presented that spectral slope of reflectance spectrum curves and depth of each distinct absorption valley in visible-near infrared band both decrease rapidly at first and then tend to be flat.

Key words: coal-rock identification; coal measures rock; visible-near infrared spectrum; reflectance spectrum feature; spectrum absorption feature; absorption valley; carbonaceous shale

0 引言

煤岩识别是实现煤矿无人化开采尚未解决的核心难题^[1]。半个世纪以来,人们研究了多种区分煤与相邻岩石的方法,如煤岩天然 γ 射线探测^[2]、声波探测^[3]、热红外探测^[4]、图像分析^[5]、太赫兹光谱探测^[6]等,然而还未有从煤和岩的物质本质属性上进行区分的研究。可见-近红外(理论波长范围 380~2 526 nm)光谱分析是一种基于物质成分的原位、快速、低成本物性探测方法,其中反射光谱是获取物质属性的主要途径,其机理为被测物质所含的特定化学成分和组成结构在特定波长处产生特定的光谱反射吸收特性,已在煤矿遥感探测^[7]、煤矸石堆积遥感监测^[8]、钻孔岩心高光谱识别^[9]等煤矿、岩矿遥感探测领域得到了较多应用。这些应用为煤岩识别方法的研究提供了新思路,其中获取煤系岩石的可见-近红外光谱特征,是研究基于可见-近红外光谱技术的煤岩识别方法的基础。

煤层顶底板岩石是煤系岩石的主要组成部分,也是煤岩识别研究中需要识别的主要赋存岩石,主要包括页岩、砂岩、灰岩三大类沉积岩,受沉积环境影响多含有机碳质物质成分^[10-11],其可见-近红外光谱特征与地表沉积岩相比具有一定的特殊性,仅有少数学者对其进行了部分研究。Mao Yachun 等^[12]测定了内蒙古霍林河和山西霍州煤矿砂岩、泥灰岩、碳质页岩等煤系岩石的反射光谱,得出该两地区煤系砂岩反射率整体较高,1 400,1 900,2 200 nm 波长吸收谷较强,2 350 nm 波长出现弱吸收谷,而泥灰岩和碳质页岩吸收较弱,碳质页岩反射曲线最平缓。Song Zeyang 等^[13]研究了内蒙古乌达煤矿烟煤与页岩煤矸混合物的反射光谱,发现烟煤含量的增加使得煤矸混合物在 2 200~2 500 nm 范围出现光谱曲线的频繁波动。宋亮等^[14]对辽宁铁法煤矿的砂岩、粉砂岩、泥岩、碳质页岩等煤系岩石反射光谱进行了研究,发现除碳质页岩外,大部分煤系岩石

反射率均大于 10%,且 1 400,1 900,2 200 nm 波长处吸收谷明显,而碳质页岩与烟煤的吸收特征较弱,光谱相似度较高,难以区分;对碳质页岩中的碳质物质分布进行了偏光显微镜观察,发现黑褐色的碳质物质分布占比较多,使样本整体呈现黑色,造成碳质页岩与煤出现“异物同谱”现象。Mao Yachun 等^[12]、宋亮等^[14]及 Le Batuan 等^[15]的研究均表明碳质页岩是影响矿区煤矸分布遥感光谱预测精度的主要岩石种类。Yang En 等^[16]对山西马兰煤矿中典型烟煤和碳质页岩的可见-近红外光谱特征进行了分析,并给出了一种较有效的利用烟煤和碳质页岩的可见-近红外反射光谱的识别模型。然而还未有针对各类煤系岩石可见-近红外波段反射光谱特征的系统性研究。研究各类典型煤系岩石的反射光谱特征及产生机理,并分析碳质物质含量对煤系岩石反射光谱曲线特征参数的影响规律,可为研究基于可见-近红外光谱技术的煤岩识别方法提供基础,同时也为煤矿和煤矸石高光谱遥感领域中煤系岩石光谱数据库的建立提供依据。

本文针对 4 个典型煤矿收集的页岩、砂岩、灰岩三大类 11 种典型煤系岩石,在可见-近红外波段(400~2 450 nm)获取了其反射光谱,研究了其矿物、元素组成对光谱特征的影响,分析了该 4 个典型煤矿中煤系岩石与煤的反射光谱曲线的差异性,获得了碳质物质含量对煤系页岩反射光谱曲线特征参数的影响规律。

1 煤系岩石试样及实验

从山西、山东 4 个煤矿煤层顶底板收集了 11 种煤系岩石试样,涵盖了煤系岩石中常见的页岩、砂岩、灰岩三大类沉积岩,试样的类型、外观特征、来源等见表 1。

G. R. Hunt 等^[17-18]指出,当利用反射光谱探测块状沉积岩表面的组成成分时,其 0.25~1.2 mm 粒度粉末试样抹平表面与块状粗糙表面的反射光谱

表 1 煤系岩石试样类型、外观特征及来源					
Table 1 Types, appearance features and sources of coal measures rock samples					
试样编号	岩石类型	煤系岩石试样	外观特征	煤层分布	产地煤矿
1	页岩	碳质页岩	黑色,层理结构	伪顶	山西马兰煤矿
2	页岩	黑色页岩 1	黑色,层理结构	直接底	山西马兰煤矿
3	页岩	黑色页岩 2	黑色,层理结构	直接顶	山西新景煤矿
4	页岩	砂质页岩 1	灰黑色,层理结构,含少量化石	直接底	山东东风煤矿
5	页岩	砂质页岩 2	灰黑色,层理结构	直接底	山东兴隆庄煤矿
6	砂岩	中粒砂岩	灰色,无明显层理,含少量煤屑	直接顶	山东东风煤矿
7	砂岩	细砂岩	灰色,无明显层理,含少量煤屑	直接顶	山东东风煤矿
8	砂岩	粉砂岩 1	灰白色,薄层理结构	直接顶	山西马兰煤矿
9	砂岩	粉砂岩 2	灰白色,无明显层理	直接顶	山东兴隆庄煤矿
10	灰岩	泥质灰岩 1	暗灰色,无明显层理,含细粒煤屑	直接底	山东兴隆庄煤矿
11	灰岩	泥质灰岩 2	浅灰色,无明显层理	直接顶	山东兴隆庄煤矿

特征相似,并给出了光谱相似性的产生机理。JPL ASTER Spectral Library 光谱数据库 2.0 版中沉积岩反射光谱数据的附属文件指出,沉积岩和变质岩块状试样新鲜粗糙表面的反射光谱等效于其 0.5~1.5 mm 粒度粉末试样抹平表面的反射光谱^[19]。N. Zaini 等^[20]利用 0.125~0.5 mm 粒度成分已知灰岩粉末抹平表面的反射光谱模拟了自然块状灰岩新鲜表面的反射光谱,并以此测定了自然块状灰岩表面的成分。Yang En 等^[16]基于 0.5 mm 粒度烟煤和碳质页岩粉末抹平表面的反射光谱,利用机器学习建立了煤-碳质页岩预测模型,并利用该模型和块状试样表面反射光谱对块状试样类别进行了精确预测。本实验所收集煤系岩石均为沉积岩,依据以上文献,同时为获取原状块状煤系岩石表面稳定、标准的反射光谱曲线,本文采用 0.5 mm 粒度粉末抹平表面的反射光谱代替块状试样表面的反射光谱。

首先对煤系岩石试样进行粉碎、过筛至 0.5 mm 粒度。将试样放置于 Binder FD115 干燥箱和 Sartorius BS124S 电子天平进行空气干燥直至质量恒定。试样干燥后放置于培养皿中,用培养皿盖抹平粉末试样表面,放置于暗室黑色背景实验台上,利用卤素灯光源(入射角为 45°)和 ASD FieldSpec 地物光谱仪对试样表面进行光谱采集,如图 1 所示。光谱仪光纤探头位于试样表面中心正上方 15 cm,所测光谱为光纤探头 25°视角所形成圆锥在试样表面的直径 6.5 cm、面积约 33.2 cm² 底面圆区域的平均反射光谱。测量每个试样表面时,光纤探头固定,水平面内每隔 90°顺时针旋转 1 次试样,在每个方向采集 10 次光谱数据,即每个试样 4 个方向共采集 40 条光谱曲线,取这 40 条光谱曲线的均值作为

该试样的光谱曲线。光谱仪波长范围为 350~2 500 nm,光谱仪测量范围的 2 个边缘波段——350~399,2 451~2 500 nm 的光谱曲线信噪比较低,因此只取 400~2 450 nm 波段光谱曲线,包括可见光波段(400~780 nm)、短波近红外波段(780~1 100 nm)、长波近红外波段(1 100~2 450 nm)。

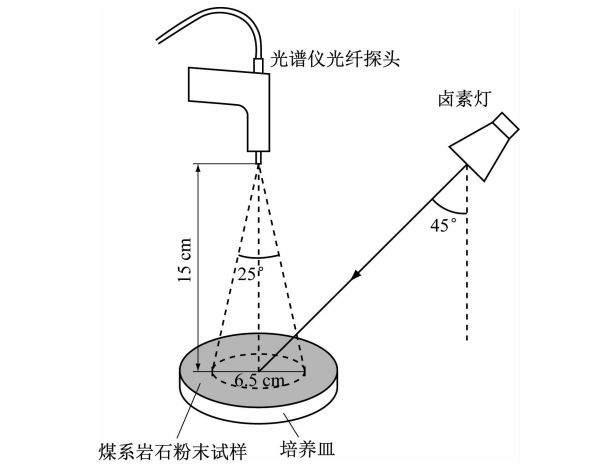


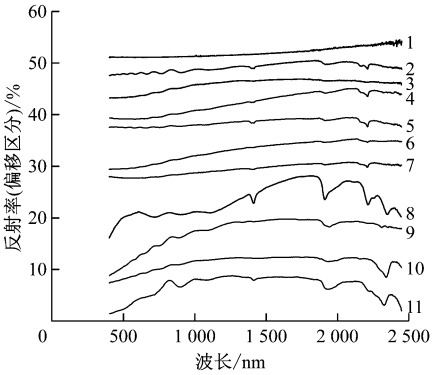
图 1 煤系岩石反射光谱采集实验
Fig.1 Reflectance spectra acquisition experiment of coal measures rocks

将采集完光谱数据的每种煤系岩石样品分成 2 份研磨至 200 目,分别采用 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)和 X 射线荧光(X-Ray Fluorescence, XRF)方法进行矿物和元素成分分析,所用仪器分别为 D8 Advance XRD 分析仪和 Spectrometer S8 Tiger XRF 分析仪。

2 煤系岩石的反射光谱特征及产生机理

2.1 煤系岩石反射光谱曲线特征

表 1 中各煤系岩石的反射光谱曲线如图 2 所示。



1—碳质页岩；2—黑色页岩 1；3—黑色页岩 2；4—砂质页岩 1；
5—砂质页岩 2；6—中粒砂岩；7—细砂岩；8—粉砂岩 1；
9—粉砂岩 2；10—泥质灰岩 1；11—泥质灰岩 2

图 2 典型煤系岩石的反射光谱曲线

Fig. 2 Reflectance spectra curves of typical coal measures rocks

从图 2 可看出，绝大多数试样的反射光谱曲线在 400~1 100 nm 波段呈现出随波长增加的多重吸收谷，不同试样吸收强度各异，只有碳质页岩没有出现明显的多重吸收谷，且只有碳质页岩全波段曲线整体呈凹形，其余为凸形。所有试样的反射光谱曲线在 1 100~2 450 nm 波段随波长增加的吸收谷相对较少，较为明显的吸收谷出现在 1 400, 1 900, 2 200, 2 350 nm 波长附近。其中碳质页岩和黑色页

岩 1, 2 在 1 100~2 450 nm 波段的反射光谱曲线在所有试样中最光滑，只有极微弱的吸收谷。

从三大类煤系岩石来看，图 2 中所有页岩的反射光谱曲线在 1 100~2 450 nm 波段的吸收谷均出现在 1 400, 1 900, 2 200 nm 波长附近，其中黑色页岩 1、砂质页岩 1、砂质页岩 2 吸收较强，而碳质页岩、黑色页岩 2 吸收极微弱，且二者的反射光谱曲线在 2 350~2 450 nm 波段均呈现出随波长增加的频繁波动。不同砂岩的反射光谱曲线在 1 100~2 450 nm 波段较为明显的吸收谷出现位置不同，中粒砂岩和细砂岩在 1 400, 1 900, 2 200 nm 波长附近出现较弱吸收谷，粉砂岩 1 在 1 400, 1 900, 2 200, 2 350 nm 波长附近均出现较强吸收谷，而粉砂岩 2 只在 1 900 nm 波长附近出现较强吸收谷。2 种灰岩的反射光谱曲线均在 1 900, 2 350 nm 波长附近出现较强吸收谷，其中泥质灰岩 2 在 1 400, 2 200 nm 波长出现相对较弱吸收谷。

2.2 煤系岩石成分对反射光谱特征的影响分析

为分析图 2 中各煤系岩石反射光谱特征产生的物质成分机理，采用 XRF 方法获得典型煤系岩石的主要元素含量，结果见表 2；采用 XRD 方法分析矿物成分，结果如图 3 所示。

表 2 典型煤系岩石的主要元素含量

Table 2 Main elemental concentrations of typical coal measures rocks												%
试样编号	煤系岩石试样	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	CaO	S	P	Cl	基质
1	碳质页岩	31.11	18.19	1.66	1.05	0.45	0.64	0.15	0.15	—	—	46.25
2	黑色页岩 1	47.02	30.21	3.64	0.64	0.60	1.62	2.58	—	—	—	13.24
3	黑色页岩 2	42.36	27.83	2.74	1.27	0.22	0.08	0.30	0.09	—	0.02	24.80
4	砂质页岩 1	64.51	15.40	2.77	2.29	1.73	0.12	2.73	0.11	0.02	0.04	9.89
5	砂质页岩 2	64.17	14.96	2.93	1.90	1.45	—	2.61	0.16	0.02	0.05	11.35
6	中粒砂岩	79.17	8.72	1.95	1.14	0.52	0.53	0.37	0.09	—	—	7.26
7	细砂岩	77.47	9.04	1.76	1.10	1.30	0.16	2.48	—	—	—	6.17
8	粉砂岩 1	56.13	13.21	4.50	2.47	1.42	1.42	7.82	—	0.04	0.10	12.73
9	粉砂岩 2	82.06	1.66	3.51	1.37	2.48	0.77	2.69	0.20	0.04	0.08	4.87
10	泥质灰岩 1	17.28	12.08	2.59	1.89	4.93	1.22	28.90	0.16	—	0.12	30.56
11	泥质灰岩 2	13.50	11.22	3.06	2.07	16.70	—	26.56	0.02	0.02	0.05	26.40

由表 2 可知，所有煤系岩石样品都含有铁元素；从图 3 可看出，部分样品含有菱铁矿(FeCO₃)成分。含铁矿物中 Fe²⁺, Fe³⁺ 的电子跃迁过程所产生的主要吸收位置：Fe²⁺——430, 450, 510, 550, 1 000~1 100, 1 800~1 900 nm；Fe³⁺——400, 450, 490, 520, 700, 870 nm。少量 Fe²⁺, Fe³⁺ 即可产生较大光谱吸收强度^[21-22]，因此，除 2 价铁矿物外，部分样品还可能含有少量 3 价铁矿物。以 Fe 为主的过渡金属

元素使得绝大多数煤系岩石光谱反射曲线在 400~1 100 nm 波段呈现出多重吸收谷^[21]。

由表 2 和图 3 可知，光谱特征最不明显的碳质页岩和黑色页岩 2 的主要矿物成分包括石英(SiO₂)和高岭石(Al₂Si₂O₅(OH)₄)，但二者的基质成分较高，其基质成分主要包括有机 C, H, O 元素，使得高岭石羟基在 1 400, 2 200 nm 波长，石英包体水(乳石英)在 1 900 nm 波长的吸收受到不透明碳质物质

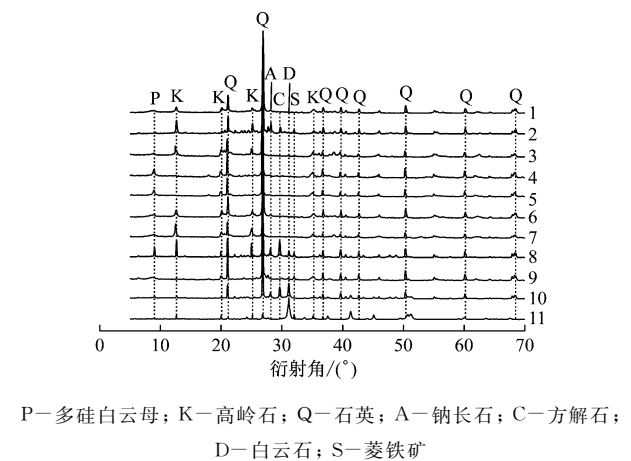


图3 典型煤系岩石的XRD分析谱图

Fig.3 X-ray diffraction spectra of typical coal measures rocks

的掩蔽,只显示出了极微弱吸收谷^[18,23]。此外,基质成分中多种有机基团的倍频和合频使得二者反射光谱曲线在2 350~2 450 nm波段呈现出随波长增加的频繁波动^[13]。而黑色页岩1的基质成分相对较低,使得高岭石、石英包体水在1 400,1 900,2 200 nm波长的吸收较明显。砂质页岩1,2所表现出的在1 400,2 200 nm波长的吸收谷主要是由黏土矿物多硅白云母($K(Al,Fe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2$)、高岭石羟基所引起的,1 900 nm波长的吸收谷主要是由石英包体水造成的^[23]。

使中粒砂岩和细砂岩在1 400,1 900,2 200 nm波长产生吸收谷的主要成分为高岭石和石英包体水。粉砂岩1的XRD分析结果显示其矿物成分种类较多,影响其1 400,2 200 nm波长反射光谱特征的主要矿物有高岭石、多硅白云母、钠长石($Na(AlSi_3O_8)$),其中钠长石在2 200 nm波长可产生由Al蚀变引起的Al-OH振动,影响其1 900,2 350 nm波长反射光谱特征的主要矿物是方解石($(Mg_{0.03}Ca_{0.97})(CO_3)$)^[21]。粉砂岩2中含少量黏土矿物和大量石英矿物,使其在1 900 nm波长附近产生明显吸收谷的主要成分是石英包体水,少量Mg使得Mg-OH振动在2 300 nm波长附近产生微弱吸收^[21]。

灰岩XRF基质成分既包括有机碳质物质中的C,又包括碳酸盐中的C。因 CO_3^{2-} 的倍频和合频振动产生的吸收谱带主要在1 880,2 350 nm波长附近^[21],泥质灰岩1和泥质灰岩2在1 900,2 350 nm波长附近的吸收谷主要由其所含的大量方解石、白云石($CaMg(CO_3)_2$)产生。颜色较深的泥质灰岩1中的碳质物质成分掩蔽了其所含钠长石和黏土矿物在1 400,2 200 nm波长的吸收特征,而颜色较浅的泥质灰岩2中的高岭石在1 400,2 200 nm波长产

生相对明显的吸收谷^[18, 21, 23]。

3 煤系岩石与煤的反射光谱差异性

为了将图2中各煤系岩石的反射光谱与煤的反射光谱进行对比,采用与本文典型煤系岩石相同的实验条件,获取表1中4个煤矿的典型煤种0.5 mm粒度粉末的反射光谱,如图4所示,其中包括了图2中光谱吸收特征较弱的碳质页岩和黑色页岩2的反射光谱曲线。

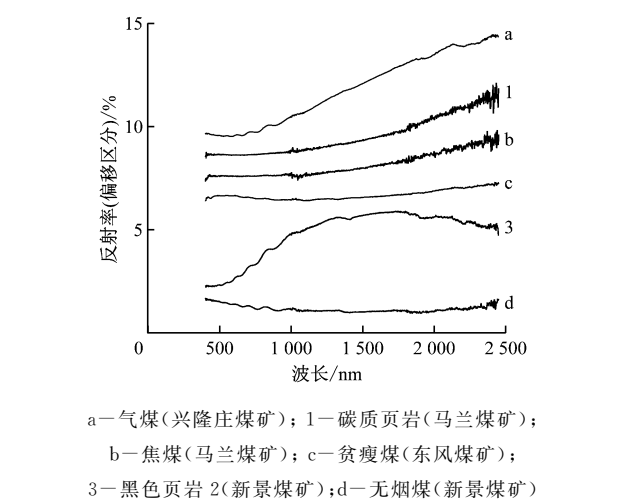


图4 4个煤矿的典型煤种及吸收特征较弱的2种页岩的反射光谱曲线

Fig.4 Reflectance spectra curves of typical coal types from four coal mines and two shale types with weak absorption features

由图4可知,4个煤矿的典型煤种的反射光谱在1 100~2 450 nm波段没有较强吸收特征,与图2中同一煤矿的煤系岩石光谱吸收特征相比,大部分差别明显。经放大后的黑色页岩2反射光谱曲线与同一煤矿的无烟煤差别也较明显。而基质含量达46.25%的碳质页岩与同一煤矿的焦煤相比,均没有明显的吸收特征,且二者全波段反射光谱曲线整体均呈凹形,较为相似,难以区分。

4 碳质物质含量对煤系页岩反射光谱曲线特征参数的影响

为研究碳质物质含量对碳质页岩等煤系页岩反射光谱的影响,文献^[16]采用0.5 mm粒度的特低灰烟煤粉末(灰分产率2%)作为碳质物质,与0.5 mm煤系岩石的黏土粉末(含高岭石62%、石英19%、水云母10%、蒙脱石4%、褐铁矿3%、伊利石1.2%及其他微量元素)按质量比0:100,5:95,...,100:0均匀混合,进行了碳质物质含量对碳质页岩反射光谱影响的模拟实验,结果如图5所示。由图5可近似推测,随着页岩中碳质物质含量的增加,光谱

反射率呈减小趋势,尤其是在近红外波段(780~2 450 nm),当碳质物质含量达到 30%~35%时,1 400,1 900,2 200 nm 3 个波长处吸收谷开始变得不明显,同时反射光谱曲线整体由凸形变为凹形,逐渐趋于平缓^[16]。

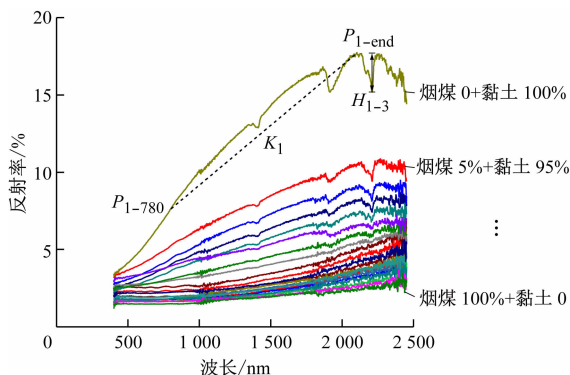


图 5 特低灰烟煤与黏土粉末混合物随混合比例变化的反射光谱曲线

Fig. 5 Reflectance spectra curves of mixtures of ultralow ash bituminite and clay powder under changing mixing ratios

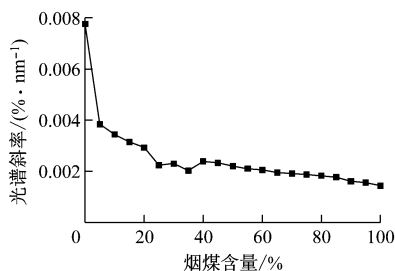
为表征上述特低灰烟煤与黏土混合物反射光谱曲线随烟煤含量的变化趋势,使用光谱斜率、吸收谷深度 2 种反射光谱曲线特征参数进行定量描述。由图 5 可知,在近红外波段(780~2 450 nm),反射光谱曲线变化更明显,采用近红外波段(780~2 450 nm)起始波长 λ_{start} (780 nm) 在反射光谱曲线上的反射率坐标点 P_{i-780} 为起点,反射光谱曲线上最高点 P_{i-end} 为终点,两点连线的斜率 K_i 定义为光谱斜率,即

$$K_i = \frac{R_{i-end} - R_{i-780}}{\lambda_{i-end} - \lambda_{start}} \quad (1)$$

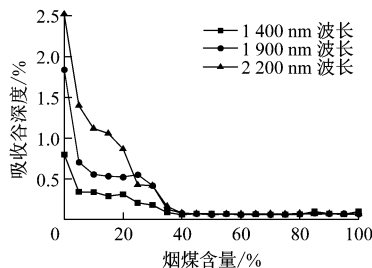
式中: i 为烟煤与黏土粉末混合物编号, $i=1, 2, \dots, 21$,分别对应烟煤含量为 0, 5%, ..., 100% 的混合物; R_{i-end} 为最大反射率; R_{i-780} 为 780 nm 波长对应的反射率; λ_{i-end} 为反射光谱曲线最高点对应的波长。

采用 K_i 表征反射光谱曲线的平缓程度,如图 5 中 K_1 。采用反射光谱曲线吸收谷深度 H_{i-j} 表征反射光谱吸收谷的吸收程度^[24],其中 $j=1, 2, 3$,分别对应吸收谷所在波长 1 400, 1 900, 2 200 nm,如图 5 中 H_{1-3} 。特低灰烟煤含量对图 5 中 21 种粉末试样的光谱斜率、吸收谷深度这 2 种反射光谱曲线特征参数的影响如图 6 所示。

由图 6 可近似推测,在煤系页岩中碳质物质含量 $\leq 35\%$ 的范围,随着碳质物质含量的增加,煤系页岩可见-近红外波段反射光谱曲线的光谱斜率及 1 400, 1 900, 2 200 nm 波长吸收谷深度均呈下降趋势,当碳质物质含量由 0 变到约 5% 时,光谱斜率及



(a) 光谱斜率



(b) 吸收谷深度

图 6 特低灰烟煤含量对混合物反射光谱曲线特征参数的影响

Fig. 6 Influence of ultralow ash bituminite content on characteristic parameters of reflectance spectra curves of the mixtures

1 400, 1 900, 2 200 nm 波长吸收谷深度均快速下降。当碳质物质含量 $> 35\%$ 时,随着碳质物质含量的增加,光谱斜率整体呈缓慢减小的趋势,而 1 400, 1 900, 2 200 nm 波长吸收谷深度均呈接近于零的水平趋势。

5 结论

(1) 绝大多数煤系岩石的反射光谱曲线在可见光波段(400~780 nm)和短波近红外波段(780~1 100 nm)呈现出随波长增加的多重吸收谷。在长波近红外波段(1 100~2 450 nm),明显的吸收谷主要集中在 1 400, 1 900, 2 200, 2 350 nm 波长附近,其中页岩、灰岩吸收谷的波长相对固定,而不同砂岩吸收谷的波长呈现出多种变化。

(2) 除碳质物质含量较高的碳质页岩外,同一煤矿各类煤系岩石与煤的可见-近红外波段反射光谱吸收特征差异明显,而碳质页岩与同一煤矿煤的可见-近红外波段反射光谱吸收特征较相似。

(3) 当煤系页岩中碳质物质含量增大时,可见-近红外波段反射光谱曲线的光谱斜率和各明显吸收谷深度均呈先快速减小后趋于平缓的特点。当煤系页岩中碳质物质含量 $> 35\%$ 时,随着碳质物质含量的增加,可见-近红外波段反射光谱曲线的光谱斜率呈缓慢减小的趋势,1 400, 1 900, 2 200 nm 波长吸收谷深度均接近于零。

(4) 获取典型煤系岩石的可见-近红外波段反

射光谱特性,为煤岩识别光谱传感器设计中波段的选择提供了参考,同时也为基于可见-近红外光谱技术的煤岩识别方法研究提供了理论基础。

参考文献(References):

- [1] 吴婕萍,李国辉.煤岩界面自动识别技术发展现状及其趋势[J].工矿自动化,2015,41(12):44-49.
WU Jieping, LI Guohui. Development status and tendency of automatic identification technologies of coal-rock interface [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(12): 44-49.
- [2] BESSINGER S L, NELSON M G. Remnant roof coal thickness measurement with passive gamma ray instruments in coal mines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(3): 562-565.
- [3] XU Jing, WANG Zhongbin, WANG Jiabiao, et al. Acoustic-based cutting pattern recognition for shearer through fuzzy C-means and a hybrid optimization algorithm[J]. Applied Sciences, 2016, 6(10): 294.
- [4] RALSTON J C, STRANGE A D. Developing selective mining capability for longwall shearers using thermal infrared-based seam tracking [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(1): 47-53.
- [5] 伍云霞,张宏.基于 Curvelet 变换和压缩感知的煤岩识别方法[J].煤炭学报,2017,42(5):1331-1338.
WU Yunxia, ZHANG Hong. Recognition method of coal-rock images based on Curvelet transform and compressed sensing [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1331-1338.
- [6] 王昕,胡克想,俞啸,等.基于太赫兹时域光谱技术的煤岩界面识别[J].工矿自动化,2017,43(1):29-34.
WANG Xin, HU Kexiang, YU Xiao, et al. Coal-rock interface recognition based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(1): 29-34.
- [7] XIAO Dong, LE Batuan, MAO Yachun, et al. Research on coal exploration technology based on satellite remote sensing[J]. Journal of Sensors, 2016 (1): 1-9.
- [8] 王鹏,刘庆生,刘高焕,等.煤矸石堆场信息遥感提取方法对比[J].地球信息科学学报,2013,15(5):768-774.
WANG Peng, LIU Qingsheng, LIU Gaohuan, et al. Method comparison of extraction of gangue yard based on remote sensing [J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(5): 768-774.
- [9] 张川,叶发旺,徐清俊,等.钻孔岩心高光谱技术系统及其在矿产勘查中的应用[J].地质科技情报,2016, 35(6):177-183.
- ZHANG Chuan, YE Fawang, XU Qingjun, et al. Drill core hyperspectral technology system and its application in mineral prospecting [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35 (6): 177-183.
- [10] PERMANA A K, WARD C R, LI Z, et al. Distribution and origin of minerals in high-rank coals of the South Walker Creek area, Bowen Basin, Australia[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 116: 185-207.
- [11] 高德懿,胡宝林,刘会虎,等.淮南煤田泥页岩地球化学特征分析及生烃潜力评价[J].煤炭科学技术, 2017, 45(5): 198-204.
GAO Deyi, HU Baolin, LIU Huihu, et al. Analysis on geochemical characteristics of mud shale and potential evaluation of hydrocarbon generation in Huainan Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (5): 198-204.
- [12] MAO Yachun, MA Baodong, LIU Shanjun, et al. Study and validation of a remote sensing model for coal extraction based on reflectance spectrum features [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2014, 40 (5): 327-335.
- [13] SONG Zeyang, KUENZER C. Spectral reflectance (400-2 500 nm) properties of coals, adjacent sediments, metamorphic and pyrometamorphic rocks in coal-fire areas: a case study of Wuda coalfield and its surrounding areas, northern China [J]. International Journal of Coal Geology, 2017, 171: 142-152.
- [14] 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 Liang, LIU Shanjun, YU Moli, 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.
- [15] LE Batuan, XIAO Dong, OKELLO D, et al. Coal exploration technology based on visible-infrared spectra and remote sensing data [J]. Spectroscopy Letters, 2017, 50(8): 440-450.
- [16] YANG En, GE Shirong, WANG Shibo. Characterization and identification of coal and carbonaceous shale using visible and near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Spectroscopy, 2018, 2018: 1-13.
- [17] HUNT G R, VINCENT R K. The behavior of spectral features in the infrared emission from particulate surfaces of various grain sizes[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(18): 6039-6046.
- [18] HUNT G R, SALISBURY J W. Visible and near-

- infrared spectra of minerals and rocks: XI. Sedimentary rocks [J]. *Modern Geology*, 1976, 5: 211-217.
- [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] ZAINI N, VAN DER MEER F, VAN DER WERFF H. Determination of carbonate rock chemistry using laboratory-based hyperspectral imagery [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(5): 4149-4172.
- [21] 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 Shouxun, ZHANG Bing, ZHAO Yongchao, et al. Summarizing the VIS-NIR spectra of minerals and rocks [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(4): 191-201.
- [22] SGAVETTI M, POMPILIO L, MELI S. Reflectance spectroscopy (0.3-2.5 μm) at various scales for bulk-rock identification [J]. *Geosphere*, 2006, 2(3): 142-160.
- [23] HUNT G R, SALISBURY J W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I silicate minerals [J]. *Modern geology*, 1970, 1: 283-300.
- [24] 王晋年, 郑兰芬, 童庆禧. 成象光谱图象光谱吸收鉴别模型与矿物填图研究 [J]. *环境遥感*, 1996, 11(1): 20-31.
WANG Jinnian, ZHENG Lanfen, TONG Qingxi. The spectral absorption identification model and mineral mapping by imaging spectrometer data [J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1996, 11(1): 20-31.