2024年9月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2024)09-0975-08

# 基于 THz-TDS 技术定量分析煤炭中的灰分和挥发分

朱立江1, 吴玫晓\*2, 闫雪清1

(1. 国家能源集团煤焦化有限责任公司,内蒙古 乌海 016000; 2. 华太极光光电技术有限公司,上海 200091)

摘 要:为提高煤炭中灰分、挥发分定量分析的效率,减少污染,提出一种基于太赫兹时域 光谱(THz-TDS)技术的煤炭灰分、挥发分定量分析方法。研究煤炭太赫兹吸收特性与灰分的关系, 结果表明,煤炭的太赫兹有效频谱范围为0.2~2.2 THz,在0.2~2.2 THz没有明显的吸收峰,灰分 含量是影响太赫兹波段吸收特性的主要因素;对比预处理方法、支持向量机(SVM)模型和偏最小二 乘(PLS)模型对预测效果的影响,采用样品数的3/4建立模型,其余1/4作为外部验证集进行验证, 结果表明,Savitzky-Golay 平滑和移动窗口平均(MAF)平滑对外部验证集的预测效果没有提升; SVM模型对灰分、挥发分的预测效果优于PLS模型。灰分、挥发分的SVM模型的外部验证集的相 关系数(*R*<sub>p</sub>)分别为0.933、0.724;预测均方根误差(RMSEP)分别为3.223、5.772。太赫兹技术结合 SVM算法对煤炭灰分、挥发分进行预测,可将分析时间缩短至10 min内,提升分析效率。

关键词:太赫兹;煤炭;灰分;挥发分;定量分析

中图分类号: O433.4 文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023193

## Quantitative analysis of ash and volatile in coal based on THz-TDS

ZHU Lijiang<sup>1</sup>, WU Meixiao<sup>\*2</sup>, YAN Xueqing<sup>1</sup>

(1.National Energy Group Coal Coking Co., Ltd., Wuhai Inner Mongolia 016000, China;2.Tera Aurora Electro-Optics Technology Co., Ltd, Shanghai 200091, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of quantitative analysis of ash and volatile content in coal and reduce pollution, a method for quantitative analysis of coal ash and volatile content based on THz Time Domain Spectroscopy(THz–TDS) is proposed. In this paper, the relationship between terahertz absorption characteristics and ash content in coal is studied. The results show that the effective spectrum range of coal is  $0.2\sim2.2$  THz, and there is no obvious absorption peak in  $0.2\sim2.2$  THz; the ash content is the main factor affecting the absorption characteristics of the terahertz band. The effects of preprocessing methods, Support Vector Machine(SVM) model and Partial Least Squares(PLS) model on the prediction effect are compared. The results show that Savitzky–Golay smoothing and Moving Average Filter(MAF) smoothing do not improve the prediction effect of external validation sets, and the prediction coefficients( $R_p$ ) and Root Mean Square Error of Prediction(RMSEP) of the external validation set of ash and volatile of SVM models are 0.933, 3.223, 0.724 and 5.772, respectively. The terahertz technology combined with SVM model can predict ash and volatile content in coal, and the analysis time can be shortened to be less than 10 minutes, which has improved the analysis efficiency.

Keywords: terahertz; coal; ash; volatile; quantitative analysis

我国是煤炭生产大国,原煤年产量40亿吨左右,煤炭在采购入厂前需进行化学成分分析,以确定其质量等级和采购价格。目前,煤炭中灰分、挥发分的分析方法主要为传统的差量减重方法<sup>[1]</sup>,这些方法操作繁琐,检测周期长,污染大。因此,开发一种简便快速、测量准确的分析煤炭中灰分、挥发分的方法很有意义。太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术是近些年发展起来的新型测量技术,它的特征频段为0.1~10 THz,太赫兹光谱包含物质丰

富的物理和化学信息<sup>[2]</sup>,其光子能量与大部分有机分子的振转能级跃迁的能量相当,因此分子间弱相互作用(如 氢键、色散力)、大分子的骨架振动及晶格的低频振动导致的吸收处于太赫兹波段<sup>[3]</sup>。太赫兹技术因其测定快速、 有特征吸收等优势,已在公共安全、化工检测、物质鉴别、生物医学等领域有了初步应用,展现出重大的科学 价值和诱人的应用前景。

太赫兹技术对煤质分析的研究,国内外已有相关报道<sup>[4-11]</sup>。许长虹等<sup>[4]</sup>采用太赫兹技术研究了 8 种煤炭在 0.2~1.5 THz内的太赫兹光谱,氢含量与挥发分都与 1.2 THz处的吸收系数呈负线性关系。膝学明等<sup>[5]</sup>研究了 5 种煤炭在 0.2~1.5 THz内的太赫兹光谱,其太赫兹吸收谱的曲线斜率随灰分含量增加而呈指数递增,随碳含量增加 而呈指数递减。ZHU等<sup>[6]</sup>采用太赫兹介电常数谱结合机器学习算法识别氧化煤和未氧化煤,基于高斯核函数的 支持向量机(SVM)算法获得了最佳分类结果,准确率为 87.50%。YANG 等<sup>[7]</sup>用X射线衍射和太赫兹光谱研究了烟煤随热处理温度的升高(400~1 000 °C),太赫兹光谱的变化,以及与碳、氢等元素、芳香性(Aromaticity,f\_)和煤 等级的关系。王昕等<sup>[8]</sup>研究了烟煤的太赫兹光谱特性,表明烟煤的变质程度和灰分含量是影响太赫兹频段物理特性的主要因素。詹洪磊等<sup>[9]</sup>对煤炭标准物质进行太赫兹光谱聚类分析,表明碳含量是影响煤炭折射率的主要因素,氢氮含量是影响吸收效应的主要因素。DENG 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于太赫兹光谱法从粉末矿物中识别煤粉的方法。WANG 等<sup>[11]</sup>采用太赫兹光谱对煤炭和岩石进行表征和分类,结合主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)、SVM,煤/岩石识别率达到100%。

本文在前人研究的基础上,采用 THz-TDS 技术对 39 种煤样进行定量分析检测。采集煤样的太赫兹吸收谱, 采用不同预处理方法处理光谱数据,分别建立原始光谱和预处理后光谱的灰分、挥发分 SVM 回归模型,并与偏 最小二乘(PLS)模型预测结果进行分析比较,获得最优模型,为煤炭中灰分、挥发分的快速检测提供有效方法。

#### 1 实验部分

#### 1.1 材料与试剂

本研究共收集 39 种煤样,其中 9 种为国家标准样品,30 种为国家能源集团煤焦化有限责任公司提供的已定 值样品,包含无烟煤、1/3 焦煤、肥煤、气煤、弱粘煤、烟煤等,所有煤样均为粉状,目数小于 80 目。煤炭样品 的灰分、挥发分采用 GB/T 212-2008<sup>[1]</sup>国家标准方法测定。39 种煤样的灰分、挥发分含量见表 1。

sample number	ash	volatile	sample number	ash	volatile
1	5.55	8.31	21	12.01	31.02
2	23.50	28.96	22	9.29	31.21
3	3.88	35.50	23	4.58	36.85
4	10.96	15.62	24	11.66	30.32
5	9.02	29.39	25	10.61	31.24
6	11.61	32.15	26	10.52	29.16
7	13.20	9.97	27	10.54	37.05
8	10.54	33.51	28	9.64	31.77
9	4.91	39.00	29	10.44	31.09
10	5.52	7.40	30	10.72	30.99
11	10.48	31.85	31	3.95	6.97
12	3.68	38.37	32	10.75	33.28
13	10.72	31.70	33	11.48	30.05
14	5.18	38.77	34	33.56	13.50
15	10.15	30.83	35	8.00	31.29
16	43.85	11.81	36	3.88	36.99
17	8.80	29.12	37	6.97	33.18
18	10.81	27.29	38	11.06	23.77
19	11.87	32.07	39	10.57	29.53
20	11.17	26.81			

## 表1 煤炭样品的灰分、挥发分含量(单位:%)

## 1.2 仪器与设备

测试仪器为多功能太赫兹时域光谱仪(华太极光光电技术有限公司),多功能太赫兹时域光谱仪可通过更换透射、反射、衰减全反射模块实现相应的探测方式。采用透射模块进行实验,其频谱范围为0.1~4.5 THz,最大动态范围≥65 dB,频谱分辨力<5 GHz,谱线采集速度≥20 Hz(延时范围60 ps)。多功能太赫兹时域光谱仪,采用基

于光纤耦合的光电导天线辐射探测对、音圈电机驱动的快速延迟线作为系统的基本架构。激光源为飞秒光纤激 光器,其输出的两路飞秒激光信号,分别作为太赫兹发射天线的泵浦光和接收天线的探测门:其中一路接入光 纤耦合太赫兹发射天线,发射天线通过高压模块调制,和飞秒激光共同作用激发产生太赫兹脉冲波;太赫兹脉 冲波通过透射探头,辐射在载物台的被测样品上,与样品相互作用后进入接收天线;另一路飞秒激光通过快速 延迟线接入接收天线,以异步采样的方式,恢复出皮秒量级的太赫兹时域脉冲信号。通过对采集到的太赫兹时 域信号进行数据处理,获得时域谱、频域谱、吸收谱、折射率谱等光学参数。多功能太赫兹时域光谱仪透射模 块的工作原理如图1所示。





Fig.2 Image of coal samples 图 2 煤炭样品图片

Fig.1 The working principle of transmission module of multifunctional terahertz time-domain spectrometer 图1 多功能太赫兹时域光谱仪透射模块的工作原理图

称量装置为HC1204电子天平(上海花潮实业有限公司),压片装置为3887.4NE0000压片机(CARVER, INC.)。

## 1.3 试验方法

单独的煤粉样品压片无法成型,经过试验探索,发现加适量高密度聚乙烯(High Density Polyethylene, HDPE) 粉末后有较好的成型效果。因此,选择煤粉样品量 60 mg,掺杂 HDPE 粉末 40 mg进行压片。称量 60 mg 煤粉与 40 mg HDPE 粉末,均匀混合,将混合后样品置于压片模具中,压片机采用 8 t压力压制 2 min,形成片状待测样。压制的片状样品应保证两平面平行、表面无多余粉末。最终成型的样片厚度约为 0.75~0.80 mm,直径约 13 mm。每种煤粉各制备 3 个样品,样品如图 2 所示。为减少空气中水分对测定结果的干扰,对样品仓充高纯氮进行透射测试,保证样品仓中空气相对湿度 <5%。室温下进行测试,分别测试参考信号和样品,参考信号为高纯氮气。参考信号和样品各采集 128 次,128 次时域谱取平均获得 1 个时域谱,每种样品各获得 3 个时域谱,共117 个样品时域谱数据。

### 1.4 数据处理和光谱预处理

将参考信号和样品的时域谱平均值通过傅里叶变换得到频域谱,根据TDDORNEY和LDUVILLARET 等<sup>[12-14]</sup>提出的材料光学参数的物理模型和菲涅尔法则,获得样品相对于参考信号的太赫兹波的相对吸收强度*A*:

$$A = T_{\rm ref} - T_{\rm sam} \tag{1}$$

式中T<sub>sam</sub>和T<sub>ref</sub>分别为样品和参考信号经傅里叶变换后的频谱强度。

Savitzky-Golay(S-G)平滑与移动窗口平均(MAF)平滑是两种常用的预处理方法,可消除无关噪声、颗粒度等因素对光谱的影响。本文采用一次多项式3点平滑对吸收谱进行S-G平滑,采用3点平滑进行MAF平滑。

## 1.5 模型的建立与评价

#### 1.5.1 建模方法

SVM 是通过将光谱数据非线性变换到高维空间后,在高维空间进行线性回归<sup>[15]</sup>。这种非线性变换是通过核

$$K(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \varphi(\mathbf{x})^{\mathrm{T}} \varphi(\mathbf{y}) = \mathrm{e}^{-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{y}\|}$$
(2)

模型:

$$\min_{w,b,\xi,\xi'} \frac{1}{2} w^{\mathrm{T}} w + C \sum_{i=0}^{N} \xi_{i} + C \sum_{i=0}^{N} \xi_{i}^{*}$$
(3)

模型限制条件:

$$\begin{cases} -\varepsilon - \boldsymbol{\xi}_i^* \leq \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\varphi}(A_i) + b - Y_i \leq \varepsilon + \boldsymbol{\xi}_i \\ 0 \leq \boldsymbol{\xi}_i, \boldsymbol{\xi}_i^*, \ i = 1 \sim N \end{cases}$$
(4)

模型输出:

$$Y_i = \boldsymbol{w}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\varphi} \left( \boldsymbol{A}_i \right) + \boldsymbol{b} \tag{5}$$

式中: $\gamma$ 、 $\varepsilon$ 、C为模型参数;x、y为输入向量;w为 $\varphi(A_i)$ 的线性组合, $A_i$ 为一条输入的吸收谱;N为光谱数据的个数; $\xi$ 与 $\xi$ \*为含N个元素的列向量;b为模型的截距; $Y_i$ 为该输入吸收谱通过模型计算得到的得分。

PLS 是一种多因变量对多自变量的回归分析方法,能够将典型相关及多元线性回归、主成分分析的优点有机结合,很好地解决多重共线性的问题<sup>[16]</sup>。本文采用单因变量 PLS 模型进行定量分析:

$$Y = \sum_{i=1}^{M} \beta \lambda_i + B \tag{6}$$

式中: *Y*为采用PLS模型得到的灰分或挥发分的预测值; *M*为吸收谱数据的变量数; *i*为光谱第*i*个变量; β为吸收谱强度; λ为回归系数; *B*为模型的截距。

采用样品数的3/4作为校正集,其余1/4作为外部验证集。选择校正集时,应保证含量最大和最小的样品在校正集中。采用校正集数据建立定量模型,并对外部验证集进行预测。

1.5.2 模型评价

采用校正集的相关系数( $R_c$ )、交叉验证的校正均方根误差(Root Mean Square Error of Cross Validation, RMSECV)、外部验证集的相关系数( $R_p$ )、预测均方根误差(RMSEP)对模型进行评价:

$$R_{\rm e}, R_{\rm p} = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y}_i)^2}}$$
(7)

$$E_{\rm RMSCV}, E_{\rm RMSP} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)^2}$$
(8)

式中: $\hat{y}_i$ 为预测值; $y_i$ 为参考值; $\bar{y}_i$ 为参考值的平均值;n为校正集或外部验证集的样品个数。

## 2 结果与分析

#### 2.1 煤炭样品太赫兹光谱

对参考信号和煤炭样品进行太赫兹光谱采集和数据处理,获得频域谱,如图3所示。由图3可知,参考信号的有效频谱范围约为0.1~4.5 THz,样品对 THz 波有一定程度的吸收,频域谱幅度相对参考信号有所下降。样品的有效频谱范围约为0.2~2.5 THz, 2.5 THz 后部分样品趋于吸收饱和,样品在0.2~2.5 THz 范围内,对 THz 波的吸收强度约在 0~30 dB 范围内。

随机选取7种煤炭样品,其太赫兹吸收谱如图4所示。可以看出,灰分含量高时,太赫兹波段有更强的吸收:如,34#样品,灰分含量33.56%,其在1.2~2.5 THz吸收强度最强;9#样品,灰分含量4.91%,虽然挥发分含量高达39.00%,但其太赫兹吸收强度仍比较小。因此,认为灰分是影响太赫兹波段吸收特性的主要因素,但灰

分含量与太赫兹吸收强度并不是线性相关的,原因是太赫兹吸收强度受煤炭中各种成分差异的综合影响<sup>18</sup>。煤炭 是以有机质为主体的一类物质,其中,碳氢氧占有机质的95%以上,随着煤化程度不同,有机质中的元素组成 呈规律变化<sup>117]</sup>。本研究采用无烟煤、焦煤、烟煤等多种不同煤化程度的煤种,其有机质组成不同,在太赫兹波 段吸收强度也呈现出不同的变化。煤炭样品在0.2~2.5 THz范围内无明显吸收峰,说明了煤炭作为复杂有机混合 物,在太赫兹波段没有占主导的吸收物质[4]。







Fig.4 THz absorption spectra of coal samples 图4 煤炭样品的THz吸收谱

#### 2.2 光谱预处理及 SVM 建模分析

第9期

从图 3、图 4 可以看出,在大于 2.5 THz 范围内部分煤炭样品吸收饱和, 2.2~2.5 THz 范围内部分样品信噪 比较差,因此选择0.2~2.2 THz波段范围进行后续分析。原始的太赫兹吸收谱包含噪声、颗粒散射等的影响, 因此采用 S-G 平滑、MAF 平滑对其进行预处理,以放大特征,减小无效噪声的干扰。煤炭在 0.2~2.2 THz 范 围内的太赫兹吸收谱的曲线斜率是与含量相关的重要因素,因此并未采用归一化、基线校正等方法进行预 处理。

采用 SVM 模型的评价指标、相关系数和均方根误差评价不同预处理方法的好坏。在 SVM 模型中,惩罚因子 C和核函数参数y是模型的2个重要参数。惩罚因子C平衡最大化边界和最小化训练误差,C越小,训练数据越易欠 拟合; C越大, 越易过拟合。核函数的参数y决定了数据映射到新空间后的分布, y越大, 支持向量越少; y越小, 支 持向量越多,支持向量的个数影响模型的准确率和泛化性能。对这2个参数使用网格法寻优,并采用5折交叉验证进 行优化。此外, SVM模型参数中, 不敏感损失函数  $\varepsilon$ 是对训练误差的要求,  $\varepsilon$ 越小, 预测精确度越高,  $\varepsilon$ 取值 0.1。不 同预处理方法后,煤炭中灰分、挥发分的SVM模型结果见表2。

表2 不同预处理方法的SVM模型结果

Table2 SVM model results for different preprocessing methods							
component	preprocessing method	С	γ	R <sub>c</sub>	RMSECV	$R_{\rm p}$	RMSEP
	original	3.482	0.031	0.966	1.802	0.933	3.223
ash	S-G smoothing	1.516	0.033	0.963	1.876	0.929	3.322
	MAF smoothing	1.516	0.036	0.963	1.856	0.928	3.336
	original	3.482	0.125	0.976	2.210	0.724	5.772
volatile	S-G smoothing	3.732	0.125	0.972	2.375	0.720	5.882
	MAF smoothing	4.000	0.125	0.975	2.283	0.722	5.864

比较原始光谱与预处理后的指标值可知,预处理对 SVM 建模效果无明显提升。原始光谱的灰分、挥发分 SVM 模型预测精确度更高, 灰分的 RMSEP 为 3.223, R, 为 0.933; 挥发分的 RMSEP 为 5.772, R, 为 0.724。从 SVM 预测结果看,灰分预测效果较好,而挥发分预测效果较差。图5、图6为灰分原始光谱的校正集、外部验证集的 SVM模型预测结果,图7、图8为挥发分原始光谱的校正集、外部验证集的SVM模型预测结果。横轴为采用国 家标准方法得到的参考值,纵轴是采用SVM模型得到的预测结果。灰分校正集的RMSECV为1.802, R。为0.966, 外部验证集的 RMSEP 为 3.223, R, 为 0.933, 预测结果与参考值均有较好的相关性。挥发分校正集的 RMSECV 为 2.210, R<sub>c</sub>为0.976, 外部验证集的 RMSEP 为5.772, R<sub>b</sub>为0.724, 预测结果与参考值的相关性一般。



Fig.5 SVM model prediction results for the calibration set of ash 图5 灰分校正集的 SVM 模型预测结果



Fig.7 SVM model prediction results for the calibration set of volatile 图7 挥发分校正集的SVM模型预测结果



Fig.6 SVM model prediction results for the external validation set of ash 图 6 灰分外部验证集的 SVM 模型预测结果



Fig.8 SVM model prediction results for the external validation set of volatile 图 8 挥发分外部验证集的 SVM 模型预测结果

#### 2.3 建模方法的比较

PLS方法是一种应用非常广泛的线性回归方法,按照1.5.1所述,随机抽取2组外部验证集进行PLS预测效果与SVM预测效果的对比。由表3可以看出,对于灰分,两种模型的*R*<sub>p</sub>均大于0.9,具有较好的预测能力,SVM模型的*R*<sub>p</sub>略大于PLS模型。同时,SVM模型的RMSEP稍小于PLS模型,说明SVM模型对于灰分的预测能力更强;对于挥发分,SVM模型的预测能力也优于PLS模型。但整体看,两种模型的预测能力均不够优秀。这是因为太赫兹频段吸收强度与灰分含量相关性较大<sup>[9]</sup>,而与挥发分的相关性不大。

	Table 3	Comparison of Sv	wi and FLS prediction	results		
method	group -	ash		volatile		
		R <sub>p</sub>	RMSEP	R <sub>p</sub>	RMSEP	
SVM	group 1	0.933	3.223	0.724	5.772	
	group 2	0.944	2.902	0.736	5.489	
PLS	group 1	0.932	3.349	0.578	7.423	
	group 2	0.907	4.027	0.592	7.228	

	表3 SVM与PLS预测结果对比
Table 3	Comparison of SVM and PLS prediction result

SVM作为一种非线性模型,处理成分含量和光谱数据间的非线性能力更强。在煤炭灰分预测中,SVM表现 更好,原因可能是煤炭中灰分与太赫兹吸收谱之间非线性信息更多。

## 2.4 煤质分析效率的提升

传统的煤炭灰分、挥发分的分析方法(GB/T 212-2008)采用马弗炉灰化法或差重法进行测定,根据分析指标的不同,分析时间需要1~6h不等。基于太赫兹技术结合SVM算法对煤炭灰分、挥发分的预测,可将分析时间 缩短至10 min 以内,有效提高分析效率,并能降低人员接触高温马弗炉的潜在危害。传统方法与太赫兹时域光 谱方法的对比如表4所示。

/01
-----

	Taote i companison of aaaaa		inani speculoseopy	
analysis techniques	analysis index	analysis method	analysis instrument	analysis time
traditional method	ash	ash method	muffle furnace, balance	3~6 h
(GB/T 212-2008)	volatile	weight difference method	muffle furnace, balance	1~3 h
TH- TDC	simultaneous determination of ash	terahertz technology combined with	terahertz time-domain spectrometer,	5 10
THZ-TDS	and volatile	SVM algorithm	balance	5~10 min

表4 传统方法与太赫兹时域光谱法对比 Table4 Comparison of traditional method and terahertz time\_domain spectroscopy

2	4±	*
5	5日	15

本文提出了一种基于太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术的煤炭灰分、挥发分定量分析方法,研究了煤炭太赫兹 吸收特性与灰分的关系,对比了 S-G 平滑和 MAF 平滑两种预处理方法、支持向量机(SVM)模型和偏最小二乘 (PLS)模型对预测效果的影响。39种煤炭在太赫兹有效谱段范围(0.2~2.2 THz)内无明显吸收峰,表明灰分是影响 太赫兹波段吸收特性的主要因素; S-G 平滑和 MAF 平滑对 SVM 模型外部验证集预测效果无明显提升; SVM 模型对煤炭中灰分、挥发分的预测效果优于 PLS 模型。灰分 SVM 模型的外部验证集的相关系数(*R*<sub>p</sub>)为 0.933, RMSEP 为 3.223;挥发分 SVM 模型外部验证集的预测相关系数(*R*<sub>p</sub>)为 0.724, RMSEP 为 5.772。太赫兹技术结合 SVM 算法对煤炭灰分、挥发分进行预测,可有效提高分析效率,将分析时间缩短至 10 min 内。

本研究为煤炭中灰分、挥发分的含量预测提供了一种新思路,但受限于样本量少、灰分和挥发分含量分布 不均匀等因素,模型并不够完善。未来将通过增加样本量、增加含量分布均匀性等方法来进一步完善模型,以 探索更加准确的煤炭中灰分、挥发分的含量预测模型。本研究对实现煤质快速分析、多参数同时分析具有良好 的应用意义。

## 参考文献:

- [1] 韩立亭,林玉佳,陈科全. 煤的工业分析方法:GB/T 212-2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008. (HAN Liting,LIN Yujia,CHEN Kequan. Proximate analysis of coal:GB/T 212-2008[S]. Beijing:Standards Press of China, 2008.)
- [2] 杜秀洋.基于太赫兹时域光谱技术的稻米品质检测研究[D].南昌:华东交通大学, 2020. (DU Xiuyang. Research on rice quality detection based on terahertz time domain spectroscopy[D]. Nanchang, China:East China Jiaotong University, 2020.) doi: 10.27147/d.cnki.ghdju.2020.000122.
- [3] 盘书宝.基于太赫兹光谱的中草药快速识别及含量检测方法研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学, 2022. (PAN Shubao. Research method for rapid identification and content detection of Chinese herbals based on terahertz spectroscopy[D]. Guilin, China:Guilin University of Electronic Technology, 2022.) doi:10.27049/d.cnki.ggldc.2022.000014.
- [4] 许长虹,滕学明,赵卉,等. 煤炭中氢含量与挥发分的太赫兹时域光谱研究[J]. 现代科学仪器, 2013(4):228-230. (XU Changhong, TENG Xueming, ZHAO Hui, et al. Analysis of hydrogen and volatile content in coal maceral using time-resolved terahertz spectroscopy[J]. Modern Scientific Instruments, 2013(4):228-230.)
- [5] 滕学明,赵昆,赵卉,等.利用太赫兹技术研究煤炭中的灰分含量与碳含量[J].现代科学仪器, 2011(6):19-21. (TENG Xueming,ZHAO Kun,ZHAO Hui, et al. Analysis of time-resolved terahertz spectroscopy of ash contents and carbon contents of coal[J]. Modern Scientific Instruments, 2011(6):19-21.)
- [6] ZHU Hongqing, WANG Haoran, LIU Jiuli, et al. Application of terahertz dielectric constant spectroscopy for discrimination of oxidized coal and unoxidized coal by machine learning algorithms[J]. Fuel, 2021(293):120470. doi:10.1016/j.fuel.2021.120470.
- [7] YANG Menghan,ZOU Bin,JIANG Chen, et al. Elucidation of elemental and structural changes in high-volatile bituminous coal during thermal treatment by X-ray diffraction and terahertz time-domain spectroscopy[J]. Fuel, 2021(293): 120410. doi: 10.1016/j.fuel.2021.120410.
- [8] 王昕,赵端,胡克想,等. 烟煤的太赫兹光谱特性研究[J]. 煤炭学报, 2018,43(4):1146-1154. (WANG Xin,ZHAO Duan,HU Kexiang, et al. Terahertz spectrum characteristics of bituminous coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018,43(4):1146-1154.) doi:10.13225/j.enki.jecs.2017.0924.
- [9] 詹洪磊,王玉霞,王雪松,等. 煤炭标准物质的太赫兹光谱聚类分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):26-30.
  (ZHAN Honglei,WANG Yuxia,WANG Xuesong, et al. Cluster analysis concerning the terahertz spectroscopy of coal materials[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):26-30.) doi:10.11805/TKYDA201601.0026.
- [10] DENG Jingjing, ORNIK J, ZHAO Kai, et al. Recognition of coal from other minerals in powder form using terahertz spectroscopy[J]. Optics Express, 2020, 28(21):30943-30951. doi:10.1364/OE.405438.
- [11] WANG Xin, HU Kexiang, ZHANG Lei, et al. Characterization and classification of coals and rocks using Terahertz Time-Domain

闫雪清(1973-),女,大专,工程师,主要研究方向为

(b) DS26C32ATM works abnormally

Spectroscopy[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2017,38(2):248-260. doi:10.1007/s10762-016-0317-2.

- DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with Terahertz Time-Domain Spectroscopy[J]. [12] Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision, 2001, 18(7): 1562-1571. doi: 10.1364/JOSAA. 18.001562.
- [13] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. A reliable method for extraction of material parameters in Terahertz Time-Domain Spectroscopy[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996,2(3):739-746. doi:10.1109/2944.571775.
- [14] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in Terahertz Time-Domain Spectroscopy[J]. Applied Optics, 1999,38(2):409-415. doi:10.1364/A0.38.000409.
- [15] 丁世飞,齐丙娟,谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011,40(1):1-10. (DING Shifei, QI Bingjuan, TAN Hongvan. An overview on theory and algorithm of support vector machines[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011,40(1):1-10.) doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.01.001.
- [16] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1999:210-222. (WANG Huiwen. Partial least-squares regression-method and applications[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1999:210-222.)
- [17] 谢克昌,高晋升.煤的热解、炼焦和煤焦油加工[M].北京:化学工业出版社, 2010:17-23. (XIE Kechang, GAO Jinsheng, Coal pyrolysis, coking, and coal tar processing [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010:17-23.)

煤炭深加工与利用.

作者简介:

朱立江(1972-),男,学士,工程师,主要研究方向为 新型分析仪器开发.email:2931229817@gg.com.

吴玫晓(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 太赫兹时域光谱技术.

```
勘误:《太赫兹科学与电子信息学报》2023年第12期第1502页中图8进行勘误。
```

t/ms

(a) DS26C32ATM works normally

原图:



修改为:

