

高光谱相机成像用于煤炭表面含水率监测的可行性研究

刘晓光 满毅 康雯雯

国能(天津)港务有限责任公司 天津 300450

摘要: 本文聚焦高光谱相机成像用于煤炭表面含水率监测的可行性,阐述了煤炭含水率检测现状与技术需求,介绍现有检测方法及其不足,凸显高光谱成像技术优势。接着说明实验设计与数据采集过程,分析光谱响应特征,构建定量反演模型,开展含水率可视化分析。因此,高光谱成像技术能准确监测煤炭含水率,特征波段PLSR模型实用价值高,可视化分析可直观呈现水分分布,为煤炭含水率监测提供新方法。

关键词: 高光谱成像; 煤炭含水率; 光谱特征分析; 机器学习; 在线监测

引言: 煤炭含水率对工业生产影响重大,在燃烧、运输储存、贸易结算等环节,准确测定含水率意义非凡。当前检测方法有实验室和现场快速两类,但存在检测速度、准确性、代表性难以兼顾的问题。高光谱成像技术具有图谱合一优势,能获取煤炭表面光谱与空间信息,且无需接触样品、检测速度快,具备在线应用潜力。水分子在近红外区域的振动吸收特性,为高光谱监测煤炭含水率提供了理论支撑,故开展此项研究。

1 煤炭含水率检测现状与技术需求

1.1 煤炭含水率的影响及检测意义

煤炭中的水分以游离水和结晶水两种形式存在,其中表面游离水对工业生产影响最为直接。在燃烧利用环节,水分每增加1%,燃烧温度约下降十至二十摄氏度,导致热效率显著降低。山西大同某电厂运行数据显示,入炉煤含水率每升高一个百分点,发电标煤耗增加约三克每千瓦时。在运输储存环节,高水分煤炭易发生冻结、霉变,造成经济损失和安全风险。每年冬季,从内蒙古鄂尔多斯运往东北地区的煤炭列车,因含水率过高导致冻车现象时有发生,严重影响运输效率。在贸易结算环节,含水率直接关系到煤炭计价重量,影响交易公平性。秦皇岛港煤炭交易市场规定,煤炭含水率超过合同约定值时需进行重量扣减。因此,准确测定煤炭含水率对于指导生产、保障安全、维护权益具有重要意义。

1.2 现有检测方法分析

当前煤炭含水率检测方法可分为实验室方法和现场快速方法两大类。实验室烘箱干燥法为仲裁方法,将煤样在105至110摄氏度环境下干燥至恒重,通过质量差计算含水率。该方法精度高但耗时长,单次检测需三至四小时,难以满足生产实时控制需求。河北唐山某选煤厂统计显示,由于检测结果滞后,因水分控制不当造成的产品质量波动每月发生五至六次。电容法利用水和煤

介电常数差异实现快速测量,响应速度快但易受煤炭种类、压实密度等因素干扰。山东兖州矿区应用电容法在线水分仪时发现,煤种变化导致测量偏差超过两个百分点。微波法穿透能力强但设备成本高,单套系统投资超过三十万元,且受煤炭粒度影响较大。红外反射法可测表面水分但仅能获取点状信息,代表性不足。综合分析,现有方法在检测速度、准确性、代表性之间难以兼顾,亟需发展新型检测技术。

1.3 高光谱成像技术优势

高光谱成像技术具有图谱合一的独特优势,可同时获取煤炭表面数十至数百个波段的光谱信息和空间分布信息。与点光谱测量相比,高光谱成像能够反映水分在煤炭表面的不均匀分布特征;与多光谱成像相比,高光谱包含连续光谱信息,可深入挖掘水分敏感波段;与传统检测方法相比,高光谱技术无需接触样品、无需化学试剂、检测速度快,具备在线应用潜力。水分子在近红外区域存在明显的O-H基团振动吸收,其中970纳米对应二级倍频吸收,1200纳米对应合频吸收,1450纳米对应一级倍频吸收,这为高光谱技术监测煤炭含水率提供了理论依据。

2 实验设计与数据采集

2.1 实验材料

选取内蒙古鄂尔多斯地区东胜煤田烟煤作为研究对象,该煤田煤炭储量丰富,煤质具有代表性。将原煤破碎筛分至粒径三至五毫米范围,去除明显杂质后充分混合以保证样本均匀性。称取等质量煤样二十四份,采用喷雾加湿方式制备不同含水率梯度样本,加湿后密封静置二十四小时使水分分布均衡。参照国标GB/T 211-2017方法测定每份样本真实含水率,梯度范围覆盖3%至16%,基本涵盖工业生产常见区间。样本按照含水率排序后,采用Kennard-Stone算法划分校正集十八份和预测集六份。

2.2 高光谱成像系统

实验采用四川双利合谱科技有限公司生产的GaiaField-Pro便携式高光谱成像系统,光谱范围400至1700纳米,光谱分辨率5纳米,空间分辨率1024像素。系统配备四组50瓦卤素灯光源提供稳定照明,电动位移台控制扫描过程。数据采集前进行黑板校正,以消除光照不均匀和暗电流影响。白板校正采用聚四氟乙烯标准白板,黑板校正通过关闭快门采集暗电流。采集时将煤样均匀平铺于样品盘,保持表面平整,每个样本采集三次取平均光谱。实验在温度22摄氏度、湿度30%的恒温恒湿环境下进行,以保证数据稳定性。

2.3 数据处理方法

提取感兴趣区域平均光谱作为样本代表光谱,感兴趣区域选取样本中心位置一百乘一百像素范围。采用Savitzky-Golay卷积平滑法消除随机噪声,窗口宽度为9,多项式阶数为2。采用多元散射校正消除颗粒散射影响,以校正集平均光谱作为参考光谱。采用标准正态变量变换进一步强化吸收特征。光谱数据预处理在ENVI 5.3软件中完成,模型构建在MATLAB R2020a平台实现。采用偏最小二乘回归建立定量模型,以决定系数、均方根误差和相对分析误差评价模型性能。

3 光谱响应特征分析

3.1 不同含水率光谱曲线特征

对比不同含水率煤样的反射光谱曲线,发现随着含水率增加,整体反射率呈现下降趋势。这是由于水分子对入射光的吸收作用增强,导致反射能量减弱。含水率4%的煤样在1450纳米处反射率约为32%,含水率15%的煤样在相同波段反射率降至21%,下降幅度超过30%。在近红外区域,970纳米、1200纳米和1450纳米附近出现明显吸收谷,且吸收深度随含水率增加而加深。其中1450纳米处吸收最为显著,对应O-H基团的一级倍频吸收,是水分监测的敏感波段。1200纳米处吸收峰较宽,可能与煤炭有机质中碳氢基团的叠加吸收有关。970纳米处吸收相对较弱,但在高含水率条件下仍可识别。

3.2 特征波段选择

通过相关性分析方法计算各波段光谱值与含水率的相关系数,结果显示1450纳米附近相关系数绝对值超过0.88,呈现强相关关系。1200纳米和970纳米处相关系数分别为0.79和0.74,亦达到显著水平。在可见光区域500至700纳米范围,光谱与含水率相关系数低于0.3,说明煤炭颜色对水分检测干扰较小。进一步采用竞争性自适应重加权采样算法筛选特征波长,算法迭代五百次后选择二十个波长变量,主要分布在1420至1480纳米、1180至

1240纳米和950至1000纳米三个区间,与相关性分析结果高度一致。基于以上分析,确定以1400至1500纳米、1150至1250纳米和950至1000纳米区域作为水分敏感波段。

3.3 光谱预处理效果

对比不同预处理方法对光谱质量的影响,Savitzky-Golay平滑能有效去除高频噪声同时保留吸收峰特征,信噪比由原始光谱的45分贝提升至62分贝。多元散射校正消除了颗粒散射造成的基线偏移,使相同含水率样本光谱一致性提高,同一样本三次采集光谱变异系数由5.6%降至2.1%。标准正态变量变换进一步强化了吸收特征,使吸收峰深度增加约15%。综合采用平滑加散射校正预处理后,光谱质量满足建模要求。预处理后光谱的主成分分析显示,前三个主成分累计贡献率达到91%,其中第一主成分载荷在1450纳米处呈现高峰,证实该波段对水分变化最为敏感。

4 定量反演模型构建

4.1 全波段模型

利用全波段光谱数据建立PLSR回归模型,通过交叉验证确定最佳主成分数为八。模型对校正集的决定系数为0.95,均方根误差为0.68%;对预测集的决定系数为0.92,均方根误差为0.83%。预测值与实测值散点图显示,数据点紧密分布在 $y=x$ 直线两侧,表明模型具有良好的预测能力。但全波段模型涉及二百五十六个波长变量,变量之间存在严重共线性,模型解释性较差,且计算复杂度高,不利于实际在线应用。

4.2 特征波段模型

基于第三章筛选的特征波段,分别建立PLSR模型。采用1400至1500纳米单波段建模时,预测决定系数为0.89,均方根误差为1.01%。采用1150至1250纳米单波段建模时,预测决定系数为0.84,均方根误差为1.23%。采用950至1000纳米单波段建模时,预测决定系数仅为0.76,均方根误差为1.52%。采用三个特征波段联合建模时,预测决定系数提升至0.93,均方根误差降至0.79%。特征波段联合模型在保证预测精度的同时将变量数量减少至42个,模型简洁性显著提高,计算时间由全波段的0.8秒缩短至0.2秒。

4.3 不同模型对比

将特征波段PLSR模型与支持向量机回归模型进行对比。SVR模型采用径向基核函数,经网格搜索优化参数后,惩罚系数C取10,核函数参数 γ 取0.1,预测决定系数为0.94,均方根误差为0.76%,略优于PLSR模型。但SVR模型训练时间长达35秒,且参数优化过程复杂,模型可解释性较差。同时建立BP神经网络模型,网络结构为42-10-1,经2000次迭代训练后,预测决定系数为0.91,

均方根误差为0.88%，出现过拟合现象。综合考虑预测精度、计算效率、模型稳定性和可解释性，特征波段PLSR模型更具实用价值，适宜作为煤炭含水率监测的基础模型。

5 含水率可视化分析

5.1 可视化原理

高光谱成像的空间分辨率特性使得每个像素点都包含完整光谱信息。将最优PLSR模型系数应用于每个像素点的光谱值，可计算该像素点对应的含水率预测值。计算过程在ENVI软件中进行波段运算，将42个特征波段的反射率值与对应回归系数相乘后求和，加上常数项，得到每个像素的含水率预测值。将各像素点含水率值线性映射至0至255灰度范围，采用彩虹色表进行伪彩色显示，红色代表高含水率，蓝色代表低含水率，即可得到煤炭表面含水率分布图像，直观反映水分空间分布特征。

5.2 分布特征分析

对同一煤样进行含水率可视化制图，发现煤炭表面水分分布存在明显不均匀性。颗粒凹陷区域和颗粒接触位置水分积聚较多，呈现高含水率红色区域，含水率值在13%至15%之间。颗粒凸起边缘水分较少，呈现低含水率蓝色区域，含水率值在8%至10%之间。颗粒表面局部区域出现水分斑块状分布，可能与煤炭表面孔隙结构有关。与传统点测量相比，可视化图像全面反映了水分空间变异特征，为理解水分附着机制提供了新视角。通过统计全图像素含水率分布，可获取含水率均值、标准差、变异系数等统计参数，为煤炭质量综合评价提供更多信息。

5.3 可视化验证

将可视化图像中五个感兴趣区域的平均含水率与对

应位置点采样实测值对比，最大相对误差为6.2%，最小相对误差为2.1%，平均相对误差在4%以内，验证了可视化结果的可靠性。同时发现，随着平均含水率升高，水分分布不均匀性加剧，表现为图像颜色差异增大和像素值标准差增加。含水率8%的样本像素值标准差为1.2，含水率15%的样本像素值标准差增至2.5，这与高水分状态下水分表面张力作用导致水分聚集有关。可视化图像还揭示了水分沿颗粒边缘的流动痕迹，为研究水分在煤炭表面的迁移规律提供了直观依据。

结束语

本研究表明，高光谱相机成像在煤炭表面含水率监测方面具有显著优势。通过实验设计与数据采集，深入分析光谱响应特征，构建的定量反演模型中，特征波段PLSR模型兼顾预测精度与计算效率，实用价值突出。含水率可视化分析直观呈现了水分空间分布特征，为理解水分附着机制和迁移规律提供了新视角。该技术有望应用于煤炭工业生产，为指导生产、保障安全、维护权益提供有力支持，推动煤炭含水率监测技术发展。

参考文献

- [1]夏阳超,桂夏辉,邢耀文,等.浮选捕收剂分子与煤炭表面微观黏附作用[J].煤炭学报,2022,47(12):4526-4534.
- [2]辛林,王欣,王若男,等.高温作用下煤炭地下气化覆岩表面变形及破裂特性[J].煤炭学报,2025,50(8):3731-3741.
- [3]白向平.基于表面活性剂在煤炭浮选中的应用研究[J].矿业装备,2024(3):28-30.
- [4]卜祥宁,童正,孙玉金,等.矿物表面粗糙度对颗粒-气泡相互作用影响的研究进展[J].煤炭学报,2023,48(11):4171-4182.