

煤质热值检测方法的比较与选择

刘志芳

国家能源集团内蒙古上海庙发电有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 016200

摘要: 煤质热值是评价煤炭质量的核心指标,直接影响燃烧效率、设备选型与交易定价。本文系统梳理了热值的基本概念与分类,阐述了氧弹量热法的原理、操作流程及精度影响因素,分析了近红外光谱法、X射线荧光法、热重分析法及在线检测技术等快速检测方法的特点。从精度准确度、检测速度、成本投入、操作复杂度四个维度对各类方法进行了系统比较。建议实验室检测优先采用氧弹量热法,现场筛查与过程控制宜选用快速检测技术,多方法组合应用可兼顾精度与效率。

关键词: 煤质分析; 热值检测; 氧弹量热法; 快速检测

引言: 煤炭作为我国主体能源,其质量直接关系到燃烧效率、设备安全与经济效益。热值作为衡量煤炭质量的核心指标,反映了单位质量煤完全燃烧所释放的热量,广泛应用于煤炭贸易计价、锅炉燃烧优化、碳排放核算等场景。准确、高效的热值检测方法对于煤炭生产、运输、使用各环节均具有重要意义。本文系统比较各类热值检测方法的原理、特点与适用条件,旨在为不同场景下的方法选择提供科学依据。

1 煤质热值检测方法概述

1.1 热值的基本概念与分类

热值是指单位质量煤完全燃烧所释放的热量,是评价煤炭品质最核心的指标。根据燃烧产物中水蒸气状态,热值可分为高位热值和低位热值。高位热值是指包含水蒸气全部冷凝为液态水时所释放的总热量,反映煤炭理论上的最大发热能力。低位热值是指水蒸气以气态形式存在时所释放的热量,等于高位热值减去水的汽化潜热。在实际工业应用中,由于烟气排放温度通常高于水蒸气凝结温度,低位热值更接近实际利用的热量,因此锅炉设计和煤炭贸易中多采用低位热值。热值与煤的水分、灰分、挥发分等指标密切相关,通常水分和灰分越高,热值越低;固定碳和挥发分越高,热值越高。理解热值的基本概念是选择合适检测方法、准确解读检测结果的前提。

1.2 标准检测方法

氧弹量热法是测定煤质热值的标准方法,被国内外标准广泛采用,包括GB/T 213、ISO 1928及ASTM D5865。该方法的核心原理是将煤样置于充有过量氧气的氧弹中密封燃烧,通过测量量热计中水的温升计算燃烧热。该方法具有测量精度高、重复性好、结果可追溯等优势,是煤炭贸易结算、仲裁检测及实验室质量控制的

基准方法。标准方法对样品制备、仪器校准、操作环境有严格规定:煤样需粉碎至0.2mm以下并干燥至恒重;量热计需定期用苯甲酸标定;环境温度波动应控制在1℃以内。该方法的主要局限在于检测周期较长,单次测试耗时15-30分钟,需专业实验室条件和培训人员,无法满足现场快速检测需求。但作为仲裁方法,其地位不可替代。

1.3 快速检测方法

为满足煤炭生产、运输过程中的快速检测需求,多种快速检测技术应运而生。近红外光谱法利用煤中有机物化学键的特征吸收,结合化学计量学建立热值预测模型,可在1-3分钟内完成检测。X射线荧光法通过测定煤中主要元素含量,依据元素组成与热值的经验关系推算热值,适用于批量样品快速筛查。热重分析法通过记录煤样质量随温度的变化,由燃烧失重曲线推算热值,用样量少且可获得热解特性。在线检测技术如中子活化分析和激光诱导击穿光谱,可实现输送皮带上的实时连续监测。快速检测方法的共同特点是速度快、样品制备简单,适合现场筛查和过程控制,但其精度相对偏低,且高度依赖校准模型,需定期用标准方法验证^[1]。

2 氧弹量热法原理与操作要点

2.1 测量原理

氧弹量热法的基本原理是热力学第一定律。将精确称量的煤样置于充有2.8-3.0MPa氧气的氧弹中,通过点火丝引燃煤样,燃烧释放的热量传递给量热桶中的水,通过测量温升计算热值。量热系统的热容需用苯甲酸标准物质标定,标定公式为热容等于标准物质发热量除以实测温升。待测煤样热值计算公式为 $Q = C \times \Delta T / m$,其中C为热容, ΔT 为经热交换校正的有效温升,m为煤样质量。由于燃烧在恒容条件下进行,测得的是恒容燃烧热。实际应用中需将高位热值换算为工业应用所需的低

位热值。理解测量原理有助于正确操作仪器、分析误差来源、合理解读检测结果。

2.2 仪器设备与操作流程

氧弹量热仪根据热交换控制方式可分为恒温式、绝热式和自动式。恒温式结构简单但需人工校正；绝热式自动消除热交换影响；自动式集成充氧、点火、测温、计算功能，是主流配置。标准操作流程包括：样品制备，粉碎至0.2mm以下并干燥；称样，精确称取约1g煤样；安装氧弹，装入点火丝，充入2.8-3.0MPa氧气；将氧弹置于量热桶中启动测量；记录温度并计算温升值；根据热容和煤样质量计算热值。操作中需注意称量精度、充氧压力、点火成功率等关键环节。自动式量热仪可自动完成计算并输出结果，规范操作是保证检测准确可靠的基础。

2.3 操作要点与注意事项

氧弹量热法的操作质量直接影响检测结果准确性。样品制备方面，煤样必须粉碎至规定细度并充分干燥，否则会导致燃烧不完全。称量精度控制在 $\pm 0.0002\text{g}$ 以内。充氧压力稳定在2.8-3.0MPa，氧弹必须气密检查合格。点火丝安装应紧贴煤样，点火条件需满足快速引燃要求。燃烧完全的判断通过检查氧弹内有无未燃烧残渣进行^[2]。量热计热容应定期用苯甲酸标定，每更换部件或季节交替时应重新标定。环境温度应保持稳定，波动不超过1℃。常见故障包括点火失败、燃烧不完全、氧弹漏气等，应根据原因采取相应措施。规范操作是保证检测结果准确可靠的基础。

2.4 精度与影响因素

氧弹量热法的重复性标准差在0.1%-0.2%，再现性标准差在0.2%-0.3%，是当前精度最高的热值检测方法。影响精度的因素包括：样品代表性、粉碎细度、干燥程度；称量误差直接影响计算结果；热交换校正的准确性取决于测温点选择和计算程序可靠性；热容标定误差会系统性影响所有结果；氧气纯度、充氧压力、点火能量影响燃烧完全程度；操作人员技能差异是影响再现性的重要因素。通过严格控制上述因素，可获得高度精确和可靠的检测结果。

3 快速检测方法原理与特点

3.1 近红外光谱法

近红外光谱法利用煤中C-H、O-H、N-H等基团在780-2500nm波长的特征吸收，通过采集大量已知热值煤样的光谱数据，运用偏最小二乘法等化学计量学方法建立热值预测模型。该方法样品制备简单，只需粉碎至适当粒度，无需化学试剂，检测仅需1-2分钟，可同时测定

水分、挥发分、灰分等信息。局限性在于模型建立和维护成本较高，需足够数量且有代表性的样本，模型适用性受煤种变化影响大，煤源变化时预测精度可能下降。适用于煤种相对稳定的企业质量控制和批量样品快速筛查。

3.2 X射线荧光法(XRF)

X射线荧光法通过测定煤中碳、氢、氧等主要元素含量，依据元素组成与热值的经验关系推算热值。当X射线照射煤样时，元素释放特征荧光，强度与含量成正比。该方法分析速度快，单个样品3-5分钟，可同时测定多种元素。优势在于元素分析精度高，对重金属检测灵敏。局限性在于轻元素（特别是碳和氧）检测灵敏度较低，影响热值计算准确性；设备成本高；对样品基体效应敏感。适用于需要同时了解元素组成和热值的情况，对于煤种稳定的样品，热值预测精度可满足过程控制需求^[3]。

3.3 热重分析法

热重分析法通过程序控温记录煤样质量随温度的变化曲线，由燃烧失重特征推算热值。在惰性气氛下加热时，煤样发生热解反应释放挥发分，继续加热至燃点后通入氧气，固定碳燃烧氧化，通过分析热失重曲线可以获得挥发分、固定碳、灰分含量等工业分析指标，进而利用经验公式计算热值。该方法用样量少，通常仅需10-20mg；可同时获得热解特性、燃烧特性等信息；自动化程度高，减少人为误差。热重分析法的检测时间相对较长，单次测试需40-60分钟，不适合快速筛查。仪器设备投资中等，对操作人员技术要求较高。热重分析特别适合煤质综合评价和研究性分析，可深入了解煤的燃烧行为和热反应特性。用于热值推算时，其精度取决于工业分析指标的准确性以及经验公式的适用性。该方法可作为氧弹量热法的补充，在科研开发和煤质深入研究中具有独特价值。

3.4 在线检测技术

在线检测技术实现了煤质热值的实时连续监测，是煤炭质量检测技术的重要发展方向。中子活化分析利用中子与煤中原子核发生俘获反应，释放特征 γ 射线，通过分析 γ 能谱确定元素组成从而推算热值。该技术穿透能力强，适合大流量皮带输送条件下的在线检测，代表性好。激光诱导击穿光谱利用高能脉冲激光烧蚀煤样表面产生等离子体，通过分析等离子体发射光谱测定元素组成。该技术无需放射源，安全环保，设备紧凑。在线检测技术的显著优势是实时性，可连续输出检测结果，及时发现煤质波动，为配煤控制和燃烧优化提供即时数据；无需取样制样，避免了采样误差。其局限性在于设备投资大，中子活化分析设备投资通常在数百万元；维

护要求高,需要专业技术人员;检测精度相对实验室方法偏低,适合趋势监测而非绝对量测量。在线检测技术主要应用于大型燃煤电厂、煤炭港口等需要实时煤质监控的场景。

4 检测方法的比较分析

4.1 精度与准确度比较

各类热值检测方法的精度与准确度存在显著差异。氧弹量热法作为标准仲裁方法,具有最高精度,重复性标准差可控制在0.1%-0.2%,再现性标准差约0.2%-0.3%,检测结果具有计量溯源性,是贸易结算和法律仲裁的唯一依据。近红外光谱法的预测精度取决于校准模型的质量,对于模型覆盖范围内的煤种,预测标准差约为0.3%-0.5%,可满足过程控制需求,但模型外推时误差会显著增大。X射线荧光法受轻元素检测灵敏度限制,热值预测标准差一般在0.5%-0.8%之间,适用于快速筛查。热重分析法推算热值的精度取决于工业分析指标的准确性,综合误差约0.5%-1.0%。在线检测技术的精度相对较低,误差范围在1%-2%,主要用于趋势监测和配煤过程控制,不适用于贸易结算。在选择检测方法时,应根据使用场景对精度的要求进行合理匹配,结算仲裁必须采用氧弹量热法,过程控制和快速筛查可选用快速检测方法^[4]。

4.2 检测速度与效率比较

不同检测方法的检测速度和批量处理效率差异显著。氧弹量热法单次检测耗时15-30分钟,若计入样品制备时间,单个样品总耗时约1-2小时。该方法的效率瓶颈在于冷却等待和样品制备环节,不适用于大批量样品的快速检测。近红外光谱法和X射线荧光法单样检测仅需1-5分钟,且样品制备简单,特别适合大批量样品的快速筛查,在煤炭生产和贸易中的入场验收环节具有显著效率优势。热重分析法单次测试需40-60分钟,但可同时测定多个样品,批量检测时效率有所提升。在线检测技术可实现连续实时监测,检测频率可达每分钟1次以上,效率最高,特别适合对煤质波动敏感的场景。在批量样品检测需求大的情况下,优先考虑近红外或XRF法;需要实时监控煤质变化时,在线检测不可替代;仲裁检测和精确定值仍须采用氧弹量热法,难以在速度上与其他方法竞争。

4.3 操作复杂度与人员要求

各类检测方法对操作人员的技术要求差异显著,直接影响方法的应用推广。氧弹量热法操作流程标准化,但步骤较多,需要操作人员熟悉仪器操作规程,掌握样品制备技术,能够判断燃烧是否完全和处理常见故障。通过专业培训,一般实验室技术人员可熟练掌握。近红外光谱法的仪器操作相对简单,但模型建立和维护需要较深的化学计量学知识和数据建模经验。对于模型建立后日常检测,操作人员只需进行简单样品处理和仪器操作,门槛较低。X射线荧光法操作相对简便,现代仪器具备自动校准和定性定量分析功能,但谱图解析和异常结果判断需要一定专业知识。热重分析法对操作人员的技术要求较高,需要理解热分析原理,能够正确解析热失重曲线,具备故障排除能力。在线检测系统操作相对自动化,但设备维护和校准需要专业技术支持,系统调试和模型维护需要跨学科知识背景。不同场景下人员配置条件差异较大,实验室条件优越的可选择技术门槛较高的方法,现场快速检测应优先考虑操作简便的技术。

结束语

煤质热值检测方法各有优劣。氧弹量热法精度最高,是仲裁检测的唯一选择,但周期较长。快速检测技术速度快、适合批量筛查,但精度偏低且依赖模型。在线检测实现实时监测,但设备成本高。实际应用应根据精度需求、样品数量、预算等条件综合选择,推荐多方法组合:日常以快速检测为主,定期用标准法校验;交易结算以标准法为准;大型企业可配置在线系统实时监控。未来检测技术将向更快速、精准、智能的方向发展。

参考文献

- [1]雷志伟,张剑,欧阳官喆.基于弱稳态检测的燃煤锅炉热值校正方法[J].锅炉技术,2024,55(2):20-26,38.
- [2]张彬彬.研磨时间对不同种类煤种煤质检测结果的影响[J].化工管理,2025(11):81-84.
- [3]张冬练,王庆松,荏方,等.用于激光诱导击穿光谱煤质定量检测的算法模型对比研究[J].能源与环保,2025,47(9):129-135,142.
- [4]王文毓,弓林娟,王林,等.基于煤质在线检测的燃烧优化及自适应协调控制研究[J].动力工程学报,2023,43(2):143-150.