

生物质及典型煤样发热量测定中雷诺温度校正法与国标方法的对比研究

李亭举¹, 隋媛媛¹, 王超², 王驰宇¹, 张雪松^{1*}

¹辽宁科技大学化学工程学院, 辽宁 鞍山

²鞍山钢铁集团研究院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年4月17日; 录用日期: 2026年8月6日; 发布日期: 2026年8月17日

摘要

生物质作为重要的可再生能源, 其发热量的准确测定对能源化利用具有重要意义。本文以玉米棒、稻草、秸秆等五种典型生物质及五种煤样为研究对象, 采用氧弹式量热法, 分别依据国家标准(GB/T 30727—2014)和物理化学实验课程中所学的雷诺温度校正法测定其发热量, 系统比较两种方法的测定差异, 误差来源及其对测定结果的影响。结果表明, 雷诺温度校正法在特定条件下能更准确地反映生物质及煤燃烧过程中的温度变化, 尤其适用于非稳态热损失较大的情况(挥发分含量高、灰分含量高、燃烧速率快、热稳定性差等), 而国标方法操作规范性强、适用范围广。本研究为高等学校基础化学实验改革提供了思路, 为生物质及煤发热量测定方法的选择提供了实验依据, 对生物质及煤能源化利用中的能量评价具有参考价值。

关键词

物理化学实验, 发热量, 雷诺温度校正法, 国标法

Comparative Study of Reynolds Temperature Correction Method and National Standard Method in the Determination of Calorific Value of Biomass and Typical Coal Samples

Tingju Li¹, Yuanyuan Sui¹, Chao Wang², Chiyu Wang¹, Xuesong Zhang^{1*}

¹College of Chemical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

*通讯作者。

文章引用: 李亭举, 隋媛媛, 王超, 王驰宇, 张雪松. 生物质及典型煤样发热量测定中雷诺温度校正法与国标方法的对比研究[J]. 物理化学进展, 2026, 15(3): 258-265. DOI: 10.12677/japc.2026.153025

²Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan Liaoning

Received: April 17, 2026; accepted: August 6, 2026; published: August 17, 2026

Abstract

As a vital form of renewable energy, accurate determination of biomass calorific value is of great significance for its energy-oriented utilization. In this study, five typical biomass feedstocks including corn cobs, rice straw and crop stalks, as well as five coal samples, were taken as research subjects. Oxygen bomb calorimetry was employed to measure their calorific values, and temperature correction was implemented respectively following the national standard GB/T 30727—2014 and the Reynolds temperature correction method. Systematic comparative analysis was carried out on the measurement discrepancies between the two approaches, the origins of testing errors and their influences on calorific test results. The experimental results reveal that the Reynolds temperature correction method can more precisely reflect the temperature evolution during the combustion of biomass and coal under specific test conditions, which is particularly applicable to fuel systems with remarkable unsteady-state heat loss, such as fuels with high volatile matter, high ash yield, fast combustion rate and poor thermal stability. By contrast, the national standard method boasts standardized operation procedures and wide applicability. This research provides experimental support for the selection of calorific value measurement methods for biomass and coal, and offers referential fundamentals for energy performance evaluation in the energy conversion of biomass and coal.

Keywords

Physical Chemistry Experiments, Calorific Value, Reynolds Temperature Correction Method, National Standard Method

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

我国是农业大国, 生物质作为重要的可再生能源, 其发热量特性的准确表征对能源化利用具有关键指导作用。煤作为不可再生能源, 其合理利用关系到能源安全, 目前国家供暖、冶金等行业仍然将传统的煤资源和生物质材料作为主要的供热来源。生物质能是可再生能源的重要组成部分, 其高效利用对实现“双碳”目标、推动能源结构转型具有重要意义。发热量是评价生物质及煤燃料能量品质的核心参数, 直接影响燃烧设备设计、能源系统优化及燃料经济性评价。因此, 精确测量生物质的发热量至关重要。目前, 国内主要依据《固体生物质燃料发热量测定方法》(GB/T 30727—2014)¹进行测定, 该方法规范性强, 但受环境影响较大。而温度校正法主要包括雷诺温度校正法、彭曼法、国标两点法, 动态的补偿法, 其中雷诺温度校正法作为一种经典的热损失校正方法, 可有效地矫正非稳态条件下系统与环境的换热, 在大学课程《物理化学实验》“燃烧热的实验”中进行了系统的学习。笔者将所学习的雷诺温度校正法与本校的专业特点和所在地区的生物质特点相结合, 将雷诺温度校正法应用于煤及生物质发热量测定中。在目前已有的文章中, 没有系统对比雷诺温度校正法与国标法在生物质或煤样两类物质理化性质方

¹https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/showGb?type=online&hcno=230FFB9AE8688C57B6437064D4A9779A&request_locale=zh

面的测定差异,即未将发热量与样品挥发分、灰分及燃烧速率等理化性质相关联。本文用氧弹式热量计测定秸秆、玉米芯、稻草等五种生物质及鞍钢车间五种典型煤样在富氧条件下燃烧的温度变化,并按照雷诺温度校正法和国标(GB/T 30727—2014)法,用 Origin 软件绘图,进行数据处理并分析其不同,系统地比较了两种方法的差异,对提升生物质及煤样发热量测定的准确性与适用性具有现实意义[1]。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

氧弹式热量计(HR-15 型,长沙长兴高教仪器设备)、热量计多功能控制箱(长沙长兴高教仪器设备)、玻璃称量瓶、分析天平、干燥器、马弗炉、灰皿、耐热瓷板、瓷坩埚、坩埚架、坩埚架夹、秒表、氧气钢瓶及减压阀、立式充氧器(长沙长兴高教仪器设备)、电子天平(沈阳龙腾)、万用表、引火丝、擦镜纸、苯甲酸、容量瓶(2L、1L)、生物质燃料(来自辽宁省鞍山市腾鳌镇将军村的玉米秸秆、稻草、松枝(学校后山)、红木头(红木来源于某作坊)、玉米棒)、煤炭(来源于鞍钢炼焦车间)。

2.2. 原料预处理

将生物质[2]自然晾干后置于烘箱中 105℃烘干 2 小时,将生物质样品切割、粉碎至粒径小于 1 mm,并按 GB/T 28730 制备为一般分析试样。将煤按照国标(GB/T 213-2008)粉煤过筛,得到粒径 0.2 mm 煤样;将生物质和煤预处理后的样品放入干燥器中保存[3]。

2.3. 实验方法

- (1) 将已知热值的擦镜纸四折叠后精准称量其重,再称取 1.0 ± 0.1 g 试样,用擦镜纸包紧放入燃烧皿中。
- (2) 连接已知质量的点火丝至氧弹电极。拧紧氧弹盖后在压力为 2.5~3.0 MPa 充氧 35 s~40 s。
- (3) 内筒加入 3000 g 蒸馏水,使氧弹盖顶面淹没。
- (4) 将氧弹放入内筒。放置内筒于热量计绝缘架,接好点火电极。温度计对准氧弹主体中部,避免接触氧弹或内筒。
- (5) 开启搅拌器,5 分钟后记录内筒温度(t_0),随即点火。记录外筒温度(t_j)和露出柱温度(t_c)。
- (6) 温度稳定后,以 30 s 为间隔连续读取内筒温度,直至连续三次读数极差 ≤ 0.001 K,取最高值为终点温度 t_n 。
- (7) 停止搅拌和加热,取出氧弹。测量未燃尽的点火丝长度,用于计算实际消耗量[4]。

3. 实验结果分析与讨论

利用 Origin 来描绘每个样品的雷诺温度校正曲线图,精确确定曲线上的点火点、终点、内外筒理论温度及拐点等,记录温度变化曲线并计算温度差、发热量及误差。

生物质及煤样的发热量计算公式如下:

$$Q = \{EH[(t_n + t_h) - (t_0 + h_0)] - (q_1 + q_2)\} / m \quad [5]$$

Q——固体生物质燃料空气干燥试样的弹筒发热量,单位为焦耳每克(J/g);

E——热量计的热容量,单位为焦耳每开尔文(J/K);

q_1 ——点火热,单位为焦耳(J);

q_2 ——添加物如包纸等产生的总热量,单位为焦耳(J);

m——称取的试样质量,单位为克(g);

H——贝克曼温度计的平均分度值；使用数字显示温度计时，H = 1；
h₀——t₀ 的孔径修正值，使用数字显示温度计时，h₀ = 0；
经此方法计算得到的煤样发热量如表 1 所示，计算得到的生物质发热量如表 3 所示。

3.1. 煤样国标法及雷诺温度校正法发热量测定对比

误差 = |(雷诺法测的发热量 - 国标法测的发热量)| / 国标法测得发热量 × 100%

通过图 1 可知，对于煤样 6K2FS：通过国标法所作曲线读取温差为 2.343 K，按此计算得到的发热量为 34004.96 J/g，而雷诺法为温差为 2.312 K，发热量为 33551.00 J/g，发热量差值约为 453.96 J/g；误差为 1.3%，由此可以看出，雷诺温度校正法所得到的温差与国标法计算得到的温差不同，雷诺温度校正法校正了测试过程中因搅拌和系统从量热计夹套及周围的环境吸收的热量，以及测试即将结束时，系统搅拌带入热量和系统向夹套和环境释放的热量，更准确的反应了煤样燃烧所释放的全部热量，对煤作为热源的能源化利用具有指导意义。

煤炭的工业分析结果和煤炭发热量结果如表 1、表 2，所得到的煤样发热量测定的温度 - 时间图见表 1。图 1(a)和图 1(b)和图 2(a)、图 2(b)，由表 1、表 2 数据可知其中高灰分和高挥发分且燃烧过程温度变化最快的样品 6K2FS，相比于其他样品其经雷诺温度校正法和国标法数据处理所得到的结果相差较大。其中灰分不参与燃烧，但其在高温条件下，在焦炭表面会形成一层致密的渣层，会阻隔氧气与挥发分的传质过程，引发不完全燃烧与大幅温度波动[6]。同时高含量挥发分受热瞬时大量析出，气相氧化反应剧烈、整体燃烧速率显著加快(如图 3) [7]，因此，雷诺校正法可以较好的校正煤炭剧烈燃烧过程中热损失复杂情况的热量耗散。对于煤样 M4048 由于其灰分和挥发分相比于 6K2FS 均有较大程度降低，燃烧过程稳定，系统与环境之间交换的热量较少，雷诺温度校正法和国标法所得到的温差和发热量数据基本一致，因此对于热量散失较少的系统，国标法更简便适用[8]。

Table 1. Data on calorific value of coal samples
表 1. 煤样发热量数据

样品名称	雷诺法温差/K - 国标温差/K	国标发热量/(J/g)	雷诺发热量/(J/g)	误差/%
J4048	0.003	27647.47663	27603.59800	0.16
M4049	0.013	33108.69551	33298.55200	0.57
6K2FS	0.031	34004.95844	33551.00221	1.30
义堂	0.002	34632.19633	34661.45751	0.08
M4048	0.005	33409.22643	33365.65224	0.13

Table 2. Industrial analysis data of coal samples
表 2. 煤样的工业分析数据

样品名称	水分/%	灰分/%	挥发分/%
J4048	0.58	13.46	0.84
M4049	0.88	9.37	20.01
6K2FS	9.08	23.16	25.47
义堂	0.71	8.51	16.10
M4048	0.97	9.83	22.49

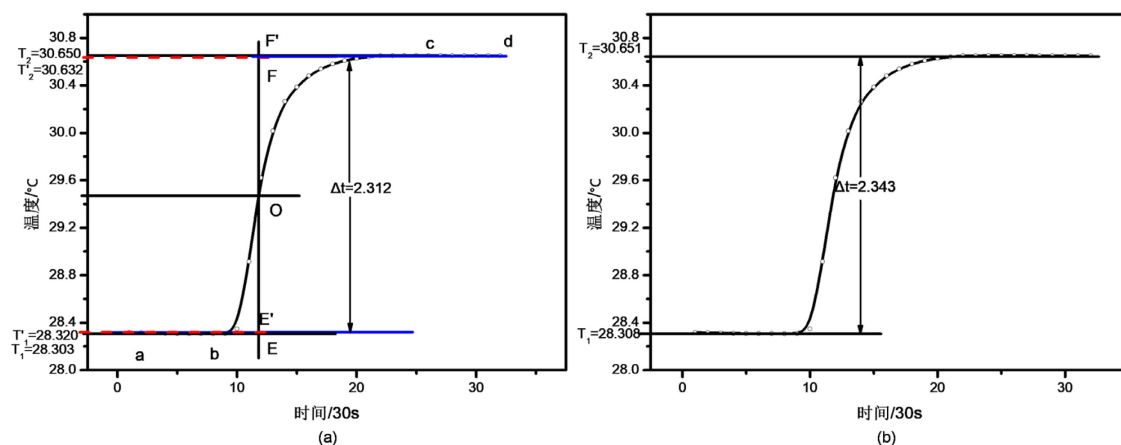


Figure 1. (a) Temperature-time curves for 6K2FS via the Reynolds method; (b) temperature-time curves for 6K2FS via the Chinese national standard method

图 1. (a) 6K2FS 的温度 - 时间图(雷诺法); (b) 6K2FS 的温度 - 时间图(国标法)

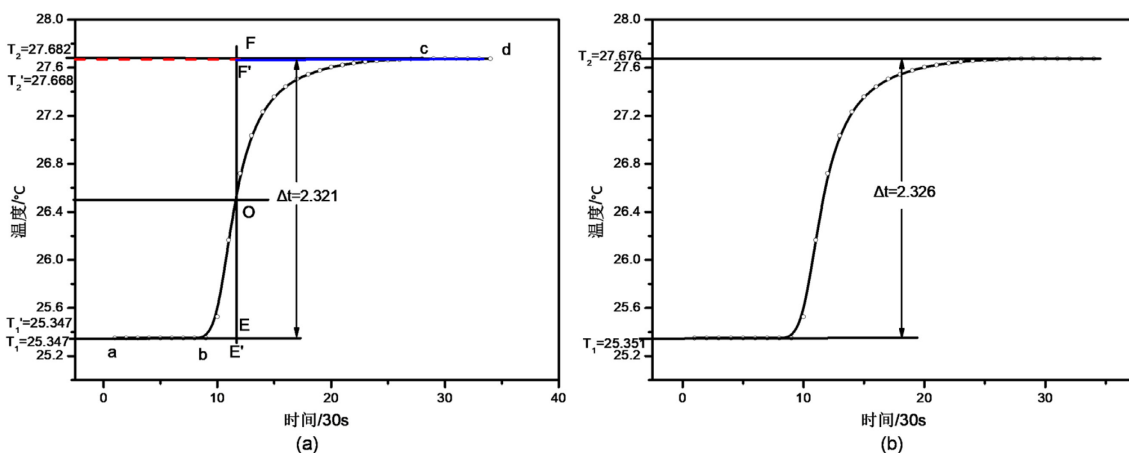


Figure 2. (a) Temperature-time curves for M4048 via the Reynolds method; (b) temperature-time curves for M4048 via the Chinese national standard method

图 2. (a) M4048 的温度 - 时间图(雷诺法); (b) M4048 的温度 - 时间图(国标法)

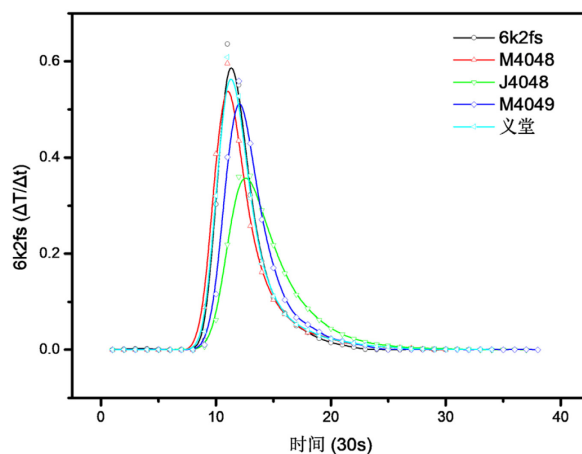


Figure 3. Temperature change rate versus time for coal samples during combustion

图 3. 煤样燃烧温度变化速率对比图

3.2. 生物质国标法及雷诺温度校正法发热量测定对比

对于生物质松枝：通过国标法所做曲线读取温差为 1.522 K，按此计算得到的发热量约为 19040.09 J/g，而雷诺法校正法读取温差为 1.498 K，发热量为约 18691.08 J/g，雷诺温度校正法与国标法测定发热量的差值约为 349.01 J/g。误差为 1.83%。所得到的生物质发热量测定的温度 - 时间图，如图 4(a)、图 4(b) 和图 5(a)、图 5(b)。

从表 3、表 4 生物质发热量测定和工业分析结果可知，松枝属于灰分和挥发分较高的生物质，燃烧过程的温度变化较为激烈，雷诺温度校正法测定发热量与国标法测定的发热量计算出的热值差值大，灰分为惰性不可燃组分，松枝燃烧时，高温生成的灰层会阻隔氧气扩散，并阻碍析出后的挥发分向外逸散，致使燃烧温度波动剧烈；而高含量挥发分受热快速大量释放，气相氧化反应剧烈，整体燃烧速率显著提升。(如图 6) [9]，雷诺温度校正法可对热损耗有更强的矫正能力，可选择雷诺温度校正法，而红木头灰分远低于松枝，挥发分相近，但燃烧速率较低(如图 6)，热损失较小，发热量误差较小，可选择相对来说较简单的国标法测定发热量[10]。

雷诺温度校正法对温度变化曲线的拟合更精细，在热损失较大的体系中，能更准确地反映实际放热过程。从图 4(a)，图 4(b)、图 5(a)，图 5(b)的温差 - 时间图可以看出，雷诺法能够更清晰地识别点火点、终点及温度变化拐点，对温度曲线的拟合更符合实际燃烧过程。尤其是在生物质样品(如松枝)中，燃烧过程不稳定，雷诺法更能捕捉温度波动，减少环境热损失带来的误差。而国标方法要求系统具有更好的热稳定性，其具有更好的操作规范性和稳定性，国标法在数据处理上简化，适合工业大批量样品的常规检测，易于推广使用。在燃烧过程稳定、热损失可控的实验条件下，国标法结果与雷诺法差异不大，仍具有较高的实用价值。

Table 3. Calorific value of biomass

表 3. 生物质发热量

样品名称	雷诺法温差/K - 国标温差/K	国标发热量/(J/g)	雷诺发热量/(J/g)	误差/%
稻草	0.034	15943.82718	15493.38197	2.82
秸秆	0.005	17240.24325	17167.51146	0.42
松枝	0.024	19040.08903	18691.08039	1.83
红木头	0.011	18545.82165	18574.98094	0.15
玉米棒	0.003	17950.11881	17906.46241	0.24

Table 4. Industrial analysis data for biomass

表 4. 生物质的工业分析数据

样品名称	水分/%	灰分/%	挥发分/%	固定碳/%
稻草	6.55	1.38	76.68	15.39
秸秆	5.97	1.18	66.86	25.99
松枝	6.12	7.77	78.81	16.32
红木头	6.61	1.44	77.64	14.31
玉米棒	5.99	1.58	76.51	15.92

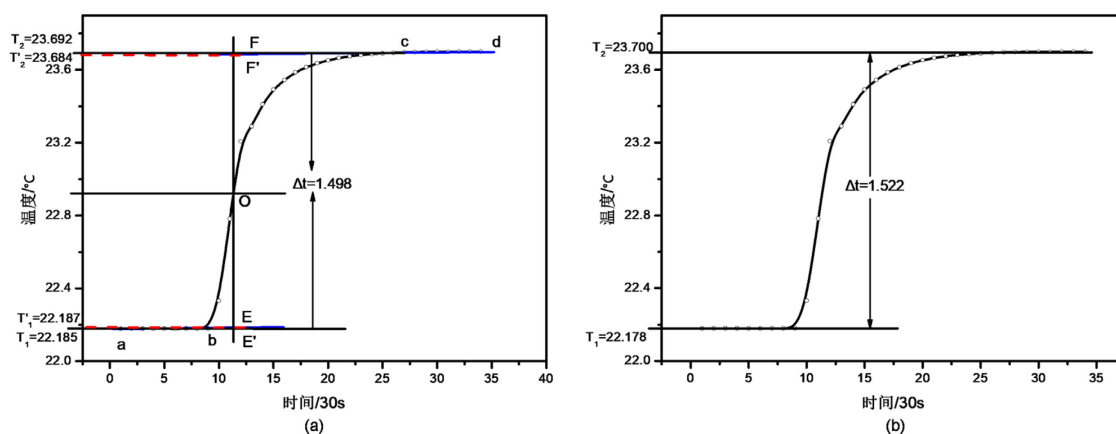


Figure 4. (a) Temperature-time curves for pine branch via the Reynolds method; (b) temperature-time curves for pine branch via the Chinese national standard method

图 4. (a) 松枝的温度 - 时间图(雷诺法); (b) 松枝的温度 - 时间图(国标法)

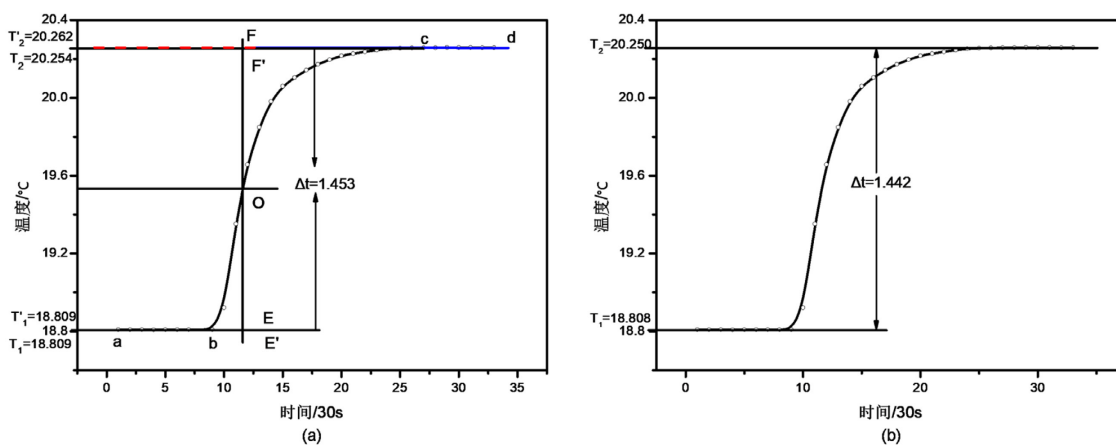


Figure 5. (a) Temperature-time curves for red wood via the Reynolds method; (b) temperature-time curves for red wood via the Chinese national standard method

图 5. (a) 红木头的温度 - 时间图(雷诺法); (b) 红木头的温度 - 时间图(国标法)

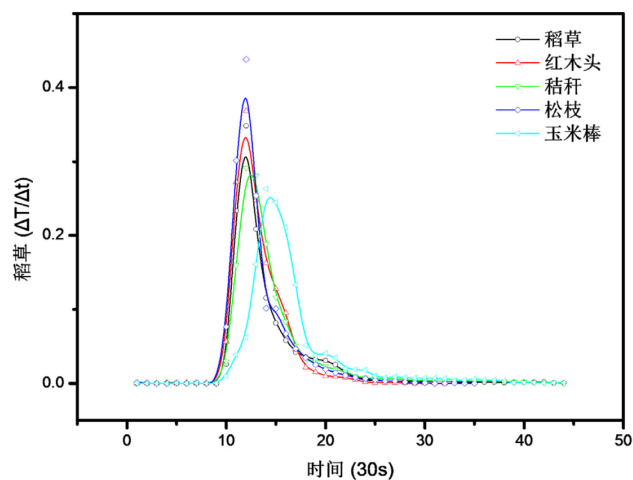


Figure 6. Comparison of temperature change rates for biomass samples during combustion

图 6. 生物质燃烧温度变化速率对比图

4. 结论

本研究以本校物理化学实验为基础,以本校煤化工特色专业为依托,采用 Origin 作图,系统地比较了雷诺温度校正法与国标方法在煤和生物质发热量测定中的差异。其中高挥发分会带来快速剧烈燃烧,热量交换的波动较大;高灰分会导致传热困难,燃烧不完全。因此雷诺温度校正法在非稳态热损失较大(高挥发分、高灰分)的情况下具有优势,适用于研究性实验与精确校正。对于低挥发、低灰分的煤样及生物质燃料,其燃烧稳定,热损失较少,可使用国标法进行检测。国标方法适用于标准化、大批量样品的常规检测。因此在实际应用中可以根据实验条件、样品的理化性质与精度要求选择合适方法,用来提升生物质及煤炭发热量测定的科学性与实用性,为代替煤等不可再生燃料提供基础数据。

基金项目

辽宁科技大学大学生创新训练项目 X202610146289。

参考文献

- [1] 杨小勇,李伯全.用生物质燃料替换“燃烧热测定”实验中萘的尝试[J].实验室科学,2018,21(1):40-41.
- [2] 庄文昌,闫繁华,王欲晓.氧弹式量热法测定农业秸秆的燃烧热[J].科教导刊(上旬刊),2014(3):187-188.
- [3] 崔景健,李洪强,刘丽芳,蔡澄汉.芦苇杆制备高热值可燃颗粒实验研究[J].可再生能源,2025,43(6):727-734.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 30727-2014 固体生物质燃料发热量测定方法[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [5] 中国煤炭工业协会.GB/T 213-2008 煤的发热量测定方法[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [6] 张欢.高灰分煤灰成分及其对燃烧特性的影响研究[J].粘接,2026,53(5):1389-1391+1395.
- [7] 王红岩.煤的粘结性对挥发分析出及焦炭燃烧的影响[D]:[硕士学位论文].杭州:浙江大学,2005.
- [8] 杨圣超,陆超,张依萱,等.富氧燃烧法快速测定煤灰分[J].实验室检测,2026,4(4):75-78.
- [9] 方向.典型生物质燃烧特性研究[D]:[硕士学位论文].北京:北京交通大学,2011.
- [10] 赵峥,苏胜,宋亚伟,等.基于 PLIF 检测的生物质挥发分燃烧多环芳烃生成特性[J].燃烧科学与技术,2024,30(4):359-369.