Vol.45 No.2 February, 2019

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018020004



# Rossini 型气体热量计电校正实验与分析

王玉刚<sup>1,2</sup>, 吴 军<sup>1</sup>, 叶方平<sup>3</sup>, 潘 江<sup>1</sup>, 张洪军<sup>1</sup> (1.中国计量大学计量测试工程学院, 浙江杭州 310018; 2. 计量技术实验教学中心, 浙江杭州 310018; 3. 浙江新劲空调设备有限公司, 浙江龙泉 323700)

摘 要: Rossini 型气体热量计是目前测量准确度最高的气体热值测定装置,在研制过程中,量热容器的当量热容是实验装置的一个重要参数,采用电校正方法能够准确地测量其当量热容。为保证电校正实验与燃烧实验的一致性,实验中要做到电加热功率与燃烧功率完全相同,之后通过测量燃烧器周围吸热介质的温升分析得到量热容器的当量热容。实验结果表明:在电加热功率与燃烧功率一致的情况下,两种实验中燃烧器周围吸热介质的温升曲线完全吻合,测得量热容器的当量热容为 19 023 J/K,当量热容测量不确定度为 28 J/K,其相对不确定度为 0.15%。
 关键词: Rossini 型; 气体热量计; 当量热容; 电校正
 中图分类号: TB941
 文献标志码: A
 文章编号: 1674–5124(2019)02–0083–06

# The experiment and analysis of electrical calibration in Rossini type gas calorimeter

WANG Yugang<sup>1,2</sup>, WU Jun<sup>1</sup>, YE Fangping<sup>3</sup>, PAN Jiang<sup>1</sup>, ZHANG Hongjun<sup>1</sup>

(1. College of Metrology and Measurement, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Experimental teaching center for metrology & measurement, Hangzhou 310018, China;

3. Zhejiang XinJing Air Conditioning Equipment Co., Ltd., Longquan 323700, China)

**Abstract**: The Rossini type gas calorimeter is the most accurate device in the current measurement of the heat capacity of the calorimeter. In the process of development, the capacity of the calorimeter is an important parameter about this experiment device. The experiment of electrical calibration can measure the heat capacity of the calorimeter accurately. In order to ensure the consistency of the electrical calibration and the combustion experiment, the power of electric heating is the same as the power of combustion exactly. The heat capacity of the calorimeter is analyzed by measuring the temperature rise of the heat medium. The results of two experiments show that the curves of temperature rise of the heat medium coincide when the electric heating power is the same as the burning power. The experiment determines the heat capacity of the calorimeter is 19 023 J/K. The uncertainty of the heat capacity of the calorimeter is 28 J/K, and the relative uncertainty is 0.15%.

Keywords: Rossini type; gas calorimeter; the heat capacity of the calorimeter; electrical calibration

收稿日期: 2018-02-20; 收到修改稿日期: 2018-05-08

基金项目:国家质检公益性行业科研专项项目 (201410133)

作者简介:王玉刚 (1972-), 男, 河北宁晋县人, 副教授, 主要从事能源计量研究工作。

#### 0 3 言

气体热量计有氧弹热量计、气体吸收式热量 计、水流式热量计、Rossini 型热量计, 其中 Rossini 型气体热量计是目前测量准确度最高的气体热值测 定装置,在近几年来具有相当高的研究价值。其基 本工作原理是:将待测气体定压燃烧,燃烧释放的 热量被吸热介质吸收,最后通过测量吸热介质的温 升和参与燃烧气体的质量计算得到气体燃烧热值。 Rossini 型气体热量计<sup>11</sup>电校正实验的目的是测定量 热容器的当量热容。20世纪初由美国的 Rossini 首 次发明了纯甲烷气体的热值测定方法以及装置,几 十年来相关学者在 Rossini 的研究基础上不断完善 和优化实验装置,大大降低了该装置的测量不确定 度。Pittam 等<sup>[2]</sup>基于 Rossini 热量计的原理,设计了 一套纯气体热值测量装置并做了相关实验,实验中 所测量的纯气体热值与 Rossini 的数据相比偏差小 于 0.017%。Andrew Dale 等<sup>13</sup>优化改进了气体样品 质量的测定方法,使气体质量测量不确定度更加精 确。M. Jaeschke 等<sup>44</sup>提出温度和质量是实验总不确 定度的主要影响因素,并在此理论基础上研究了一 款不确定度可达到 0.01% 的自动测量与校准装 置。F. Haloua 等同研究出一套等环境气体热量计, 并通过实验测得燃烧中大约有 90% 的热量被吸热 介质吸收,只有约10%的热量被周围量热容器和其 他辅助设备所吸收。P. Schley 等回设计了一款基准 气体热量计,该装置通过德国物理技术研究院完成 测试,测试结果显示该热量计测量纯甲烷的热值不 确定度可达 0.05%。我国对气体热量计的研究相比 国外起步较晚, 胡日恒等四研究者在 20 世纪 80 年 代研制了我国第一套精密氧弹热量计。此后,我国 还研制了水流式热量计,测定纯甲烷的不确定度为 1.0%(k=2)<sup>18</sup>。近年来中国计量科学院改进优化了 氧弹热量计,使该热量计的不确定度可以达到 0.6% 。最近,中国石油西南油田分公司天然气研 究院依据 Rossini 燃烧测量原理, 正在研制一套不 确定度可达 0.25% 的气体热值测定装置[19]。

以上研究表明,在测量气体热值方面,提高 Rossini 型气体热值测量装置的测量不确定度具有 重要意义。与德国、法国等欧洲国家相比,我国在 气体热值测量方面的研究还存在较大的不足。基于 以上背景,本文按照自行设计的一套 Rossini 型气 体热量计展开实验。在改进和优化该装置后做了电 校正实验,根据实验中所测得的数据分析该装置的 测量不确定度,为以后的实验研究做好铺垫。本实 验在一定程度上填补了我国在气体热值计量方面的 研究空白。

#### 实验装置搭建 1

Rossini 型气体热量计的电校正实验示意图如 图1所示。整套实验装置放置在恒温间内,燃烧器 外壁面缠有电加热带,整个燃烧器位于量热容器的 吸热介质(水浴)中,而量热容器又被悬挂浸没在恒 温槽中。系统中制冷模块主要功能是调节量热容器 内吸热介质的初始温度,与制冷模块相连的是U型 管换热器,其作用是给吸热介质降温。其中制冷模 块通过硅胶管与U型管换热器连接,硅胶管中流有 循环水。实验中为维持恒温间内温度的稳定而设计 了风道,通过风道可将恒温槽工作时产生的热风排 到恒温间外环境中。图 2 为电加热电路模块实物连 接图。实验中使用 Fluke 8508A 型参考级 81/2 位数 字多用表和计算机监测、采集实验数据,用 Agilent 6634B 可编程直流电源为电加热带提供恒定电压, 用半导体预冷单元来调节量热容器内吸热介质的温 度。表1为上述所选仪器在特定量程内的使用参数。



#### 2 实 验

#### 2.1 实验原理

当量热容采用电校正方法"则定,其基本测定 原理为:在电加热带两端给予恒定的电压,根据电 加热带消耗的电能和吸热介质温升计算得到装置的 当量热容,具体计算过程为

$$C_{\rm eq} = \frac{E_{\rm eq}}{\Delta T_{\rm eq}} \tag{1}$$



#### 图 2 电加热模块实物连接图

衣 I 所远议 品 参 考 参 数					
所需仪器	仪器类型	仪器参数			
温度计	标准铂电阻温度计	<i>U</i> =1.5 mK, <i>k</i> =2			
数字万用表	Fluke 8508A	量程 2 V, <i>U</i> =2.9×10 <sup>-6</sup> V, <i>k</i> =2; 量程 200 V, <i>U</i> =4.2×10 <sup>-6</sup> V, <i>k</i> =2			
直流电源	Agilent 6634B	量程 100 V, U=50 mV, k=2			

式中: C<sub>eq</sub>——当量热容, J/K;

$$E_{eq}$$
——电加热能量, J;  
 $\Delta T_{eq}$ ——吸热介质的温升, K。  
 $E_{eq} = \sum_{i} \frac{U_{\text{heat},i} U_{\text{ref},i}}{R_{\text{ref},i}} \Delta t_{i}$ 

式中:
$$U_{heat,}$$
——电加热带两端的电压,V;  
 $U_{ref,i}$ ——参考电阻两端的电压,V;  
 $R_{ref,i}$ ——参考电阻的阻值, $\Omega$ ;  
 $\Delta t$ ——加热时间, $s_0$ 

#### 2.2 实验环境温度控制

2.2.1 恒温间内环境温度控制

本实验对于温度环境的要求非常高,要求环境 温度维持在 (25±0.05)℃,因此专门搭建了一个恒温 间。恒温间由铝合金型材和铝塑板搭建而成,长3m、 宽 2.5 m、高 2.5 m。如图 3 所示,通过恒温间的墙 体来削弱和延迟外环境温度的变化,增加恒温间内 温度的稳定性<sup>[12]</sup>。



与此同时还在恒温槽出风口设计了一个排风风 道,可将恒温槽工作中冷凝器产生的热风排到外环 境中,尽量减少恒温室中的热源。而且在恒温间内 还安装了两台风扇,加速恒温间内空气的流动,保 证恒温间内温度均匀。恒温间内部与外界主要通过 顶部的铝塑板与外界进行换热。为了时刻监测恒温 间内的温度变化,还在恒温间内放置了6个温度传 感器,确保将环境的影响因素做到最小。

2.2.2 恒温间外环境温度控制

为了更精确地控制恒温间内环境温度的稳定, 专门设计了恒温间外环境控制模块。恒温间内仪器 工作会产生热负荷,这部分热负荷需要通过热传递 排到外环境中。故实验中在外环境安装了佳力图机 房专用空调,空调采用顶棚孔板式送风。恒温间外 环境的温度在 20~30℃,控制精度可达±0.5℃,相对 湿度控制可达±2%。

实验时为了达到仪器工作产生的热负荷和空调 制冷量相对平衡。需要先打开实验仪器和空调并稳定 工作 12 h, 直到恒温间内温度达到稳定值后开始实验。

温度控制结果:外环境温度控制可达 (23±0.5)℃, 内环境温度控制可达 (25±0.05)℃。根据传热设计, 内外环境的 2℃ 温差刚好将恒温室内的实验仪器产 生的热负荷带走。

### 2.3 实验过程

(2)

实验开始前,先连接好所有仪器并检查连接是 否正常。接着打开恒温槽,温度设定 25℃;打开空 调,温度设定 23℃;打开量热容器上的搅拌电机,根 据前期数值模拟的结果,将转速设定为 420 r/min<sup>[13]</sup>。 经过 12 h 后,当恒温间内环境温度稳定在 25℃ 时, 开始电校正实验。

具体实验过程为:1)打开数据采集系统和制冷 系统,通过U型管换热器将热量计内吸热介质的温 度降至23℃;2)关闭制冷系统,此时热量计内吸热 介质通过量热容器壳体与恒温槽水浴缓慢换热,换 热时间设定为20min;3)打开恒流源,在电加热带 两端加恒定电压工作20min;4)关闭恒流源,此时 热量计内吸热介质通过量热容器壳体与恒温槽水浴 缓慢换热,换热时间20min;5)保存数据重复以上 步骤,记录下9组数据。

3 实验结果与分析

## 3.1 绝热温升 ΔT<sub>ad</sub> 的测定

如图 4 所示为电校正实验吸热介质时间-温度



图 4 电校正实验吸热介质时间-温度曲线

曲线。当量热容器内吸热介质温度冷却到 23 ℃ 时 开始实验。由于点火前量热容器内吸热介质与恒温 槽水浴会缓慢地换热,此时吸热介质温度上升很 慢,20 min 温升仅为 0.2 ℃,这个阶段被称为初始阶 段。在初始阶段结束后,电加热带开始工作,吸热 介质由于电加热带释放热量,此时温度上升很快, 20 min 温升达 3.8 ℃,这个阶段被称为主阶段。在 电加热带停止加热后,吸热介质的温度由于传热还 略有上升。在热量完全释放和分配之后,结束阶段 开始,此时吸热介质和恒温槽水浴进行缓慢地换 热,温度曲线平缓下降。

在初始阶段吸热介质从恒温槽中吸收热量,在 结束阶段吸热介质向恒温槽中释放热量,这两部分 热量刚好抵消,对实验结果不产生影响。

吸热介质的绝热温升是对环境温度修正后的 值,该温升可由下式计算得到:

 $\Delta T_{\rm ad} = T_{\rm e} - T_{\rm b} - \delta T \tag{3}$ 

式中: $\Delta T_{ad}$ ——吸热介质绝热温升, ℃;

*T*<sub>b</sub>——开始加热时的温度, ℃;

 $T_{e}$ —结束加热时的温度, ℃;

*δT*——温度修正项,℃。

热量计在初始阶段和结束阶段的温度变化率可 根据牛顿冷却定律推导得到:

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = u(t) + k(T_0 - T(t)) \tag{4}$$

$$T_0$$
——恒温槽水浴温度, ℃;

u(t)——温度随时间变化速率, ℃/s;

*t*——时间,s;

k——冷却常数。

当热量计稳定一段时间后,吸热介质将达到平衡温度 T<sub>a</sub>,该温度高于恒温槽水浴的温度。在这种

$$u(t) = k(T_{\infty} - T_0) \tag{5}$$

$$dT/dt = k(T_{\infty} - T(t))$$
(6)

故初始阶段和结束阶段都可以用指数函数表 示为

$$T_i(t) = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_{\rm b}) \cdot \exp(-k(t - t_{\rm b}))$$
(7)

式中:t,——电加热开始时间, min;

*T*<sub>b</sub>——该时刻吸热介质温度值, ℃;

k——冷却常数;

T。——平衡温度,℃。

其中冷却常数和平衡温度均可通过吸热介质温 升曲线的指数回归分析得到。主阶段的吸热介质绝 热温度修正项δT可由下式计算得到:

$$\delta T = k \int_{t_{\rm b}}^{t_{\rm e}} (T_{\infty} - T(t)) \mathrm{d}t \tag{8}$$

#### 3.2 实验测量结果

本实验为了避免偶然性和粗大误差,做了9次 重复性实验,对保存的实验数据处理后,得到实验 结果如表2所示。从9组实验中可以发现:吸热介 质的平均温升 3.863℃,测得的平均当量热容为 19 023 J/K。

表 2 气体热量计的等效热容测量的实验结果

序号	电加热能量 $E_{eq}/J$	温升 ΔT <sub>eq</sub> /K	当量热容 $C_{eq}/(J \cdot K^{-1})$
1	73 485	3.850	19 087
2	73 498	3.854	19 069
3	73 459	3.830	19 179
4	73 488	3.841	19 137
5	73 472	3.861	19 034
6	73 495	3.903	18 844
7	73 479	3.870	18 987
8	73 465	3.909	18 789
9	73 469	3.849	19 082

如图 5 所示为电加热实验和燃烧实验中热量计 主体内吸热介质温度比较图。其中横坐标为时间, 纵坐标为电加热与燃烧实验吸热介质温度的差值。 由图可知:两种实验吸热介质的温度差小于 6 mK, 说明电加热实验与燃烧实验吸热介质温升曲线吻合 较好。曲线存在明显的下降趋势,主要原因是阶段 一中并未电加热或燃烧,吸热介质温升数值较小, 此时环境温度影响很大;阶段二中开始电加热或燃 烧,此时吸热介质温升数值增大,环境温度对其影





响越来越小;阶段三中曲线又有略微上升的趋势,

是因为此时电加热或燃烧结束,吸热介质向周围环 境放热后温度会略微下降,此时环境温度对其影响 又开始慢慢变大。

### 4 不确定度分析

气体热量计电校正实验测得的当量热容,其不确定度主要与电加热不确定度和绝热温升不确定度 相关。根据文献[14]中铂电阻的标准不确定度评定 方法,只要计算出这两部分的不确定度,就可以计 算出当量热容的不确定度。

#### 4.1 电加热引入的不确定度分析

根据电加热能量计算公式和合成标准不确定度的方法,推导出不确定度分量 *u*(*B*<sub>i</sub>)和电加热能量不确定度 *u*(*E*<sub>st</sub>),具体计算过程为

$$u(B_i) = \sqrt{(\bar{U}_{\text{ref}} \cdot \overline{\Delta t})^2 u^2 (U_{\text{heat},i}) + (\bar{U}_{\text{heat}} \cdot \overline{\Delta t})^2 u^2 (U_{\text{ref},i}) + (\bar{U}_{\text{heat}} \cdot \bar{U}_{\text{ref}})^2 u^2 (\Delta t_i)}$$
(9)

$$u(E_{\rm eq}) = \sqrt{n \left(\frac{1}{R_{\rm ref}} u(B_i)\right)^2 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n B_i u(R_{\rm ref})}{R_{\rm ref}^2}\right)^2 + \frac{n(n-1)}{R_{\rm ref}^2} u(B_i, B_j)}$$
(10)

电加热能量含多个不确定影响因素。实验中涉 及到的重要不确定度分量如表 3 所示。

表 3 电加热引入的不确定度分量

不确定度分量	不确定度评定方法	标准不确定度
$u_1$	A类不确定度评定	$1.072 \times 10^{-3} V$
$u_2$	B类不确定度评定	$3.941 \times 10^{-4} V$
$u_3$	A类不确定度评定	$1.436 \times 10^{-5} V$
$u_4$	B类不确定度评定	2.734×10 <sup>-6</sup> V

表 3 中 u<sub>1</sub> 指电加热带两端电压重复测量引入 的不确定度; u<sub>2</sub> 指使 Fluke 8508A 测量电加热带两 端电压,其示值误差引入的不确定度; u<sub>3</sub> 指参考电 阻两端电压重复测量引入的不确定度; u<sub>4</sub> 指 Fluke 8508A 测量参考电阻两端电压,其示值误差引入的 不确定度。

根据表 3 中的不确定度数据计算得到电加热带 的不确定度  $u(U_{heat,i})=1.100\times10^{-3}$  J; 参考电阻的不确 定度  $u(U_{ret,i})=1.462\times10^{-6}$  Ω; 时间测量不确定度  $u(\Delta t_i)=3.5\times10^{-4}$  s。最后将测量值 $\overline{U}_{heat,i}$ 、 $\overline{U}_{ref,i}$ 和  $\Delta t_i$ 代入公式(9)计算得到 $u(B_i)=0.165$  J。假设不确 定度分量 $B_i$ 和 $B_j$ 相互独立,由 $u(R_{ret})=0.002$  Ω代入 公式(10)计算得到 $u(E_{ext})=104$  J。

#### 4.2 绝热温升引入的不确定度分析

从绝热温升的计算公式中可发现绝热温升的不 确定度主要影响因素有:温度修正项δT、温度值 T<sub>b</sub>、 温度值 T<sub>e</sub>。其中修正项的不确定度与其它两项不 确定度相比可忽略不计。因此,关于温度测量的不 确定度推导公式如下:

$$u(\Delta T_{eq}) = \sqrt{u^2(T_e) + u^2(T_b) + u^2(\delta T) - 2u(T_e, T_b) - 2u(T_e, \delta T) + 2u(T_b, \delta T)}$$
(11)

绝热温升包含的不确定影响因素如表 4 所示。 表中  $u_s$  指温度  $T_b$  重复测量引入的不确定度;  $u_6$  指 Fluke 8508A 测量温度  $T_b$  时,其示值误差引入的不 确定度;  $u_7$  指吸热介质温度均匀性引入的不确定 度;  $u_8$  指温度  $T_c$  重复测量引入的不确定度;  $u_9$  指 Fluke 8508A 测量温度  $T_c$  时,其示值误差引入的不 确定度。

根据不确定度计算方法计算得到  $u(T_b)=4.275 \times 10^{-3}$  ℃,  $u(T_c)=4.081 \times 10^{-3}$  ℃。式 (11) 中第 3 项与前 两项相比可忽略不计且 3 个参数之间相关系数几乎 为零。将  $u(T_b)$  和  $u(T_c)$  代入式 (11) 可以计算得到  $u(\Delta T_{cc})=5.91 \times 10^{-3}$  ℃。

#### 4.3 当量热容不确定度分量分析

当量热容合成不确定度为

$$u^{2}(C_{\rm eq}) = \left(\frac{1}{\Delta T_{\rm eq}}\right)^{2} u^{2}(E_{\rm eq}) + \left(\frac{E_{\rm eq}}{\Delta T_{\rm eq}^{2}}\right)^{2} u^{2}(T_{\rm eq})$$
(12)

其中:

$$u^{2}(E_{eq}) = \left(\frac{U_{ref,i}\Delta t_{i}}{R_{ref,i}}\right)^{2} u^{2}(U_{heat,i}) + \left(\frac{U_{heat,i}\Delta t_{i}}{R_{ref,i}}\right)^{2} u^{2}(U_{ref,i}) + \left(\frac{U_{heat,i}U_{ref,i}\Delta t_{i}}{R_{ref,i}^{2}}\right)^{2} u^{2}(R_{ref,i})$$
$$u(\Delta T_{eq}) = \sqrt{u^{2}(T_{e}) + u^{2}(T_{b}) + u^{2}(\delta T) - 2u(T_{e}, T_{b}) - 2u(T_{e}, \delta T) + 2u(T_{b}, \delta T)}$$

综上所述,可以计算得到 *u*(*C*<sub>eq</sub>)=28 J/K,这里包 含因子 *k* 取 2,则当量热容的扩展不确定度为 56 J/K, 所得的当量热容则可表示为 (19 023±56) J/K (*k*=2)。

为了更明确分析和对比各不确定度分量,引进 了标准不确定度和相对不确定度,结果如表5所示。

	-	
不确定度分量	不确定度评定方法	标准不确定度
$u_5$	A类不确定度评定	3.142×10 <sup>−3</sup> °C
$u_6$	B类不确定度评定	2.551×10 <sup>−4</sup> °C
$u_7$	B类不确定度评定	2.887×10 <sup>-3</sup> ℃
$u_{s}$	A类不确定度评定	2.873×10 <sup>-3</sup> °C
$u_9$	B类不确定度评定	2.574×10 <sup>−4</sup> °C

表 4 绝热温升引入的不确定度分量

表 5 当量热容不确定度分量

不确定度分量	实验所测平均值	标准不确定度	相对不确定度
$u(E_{eq})$	73 479 J	104 J	0.14%
$u(\Delta T_{eq})$	3.864 K	5.91 mK	0.15%
$u(C_{eq})$	19 023 J/K	28 J/K	0.15%

从表 5 中可发现: 电加热能量和绝热温升的相 对不确定度差不多, 但绝热温升的相对不确定度相 比之下较容易降低。绝热温升不确定度较大的原因 是: 热量计内吸热介质在空间上温度分布不够均 匀, 造成温度多次测量中数据偏差较大, 引入的重 复性测量不确定度较大。在今后的实验中会重点考 虑该影响因素, 提高装置的测量准确度。

#### 5 结束语

本文应用 Rossini 型气体热量计完成了电校正 实验。实验中包括实验装置的搭建、实验环境温度 的控制、实验方案设计、实验数据处理与分析。电 校正实验当量热容测量不确定度为 0.15%, 不确定 度较大的主要原因是测量仪器准确度还有欠缺, 在 今后的研究中, 将考虑引进准确度更高的仪器。本 次实验填补了我国在气体热值计量研究领域的部分 空白,为之后气体热值测量的研究提供了实验和数据参考。

#### 参考文献

- ROSSIINI F D. The heat of formation of water[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1930, 16(11): 694-699.
- [2] PITTAM D A, PELCHER G. Measurements of heats of combustion by flame calorimetry. part 8.-methane, ethane, propane, n-butane and 2-methylpropane[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transaction1: Physical Chemis-try in Condensed Phases Transactions, 1972(68): 2224-2229.
- [3] DALE A, LYTHALLI C, AUCOTT J, et al. High precision calorimetry to determine the enthalpy of combustion of methane[J]. Thermochimica Acta, 2002, 382(1): 47-54.
- [4] JAESCHKE M, BENITO S A, CREMONESI P L, et al. GERG Project: Development and set-up of a new reference calorimeter[J]. Gartenbauwissens-chaft, 2004, 54(4): 179-184.
- [5] HALOUA F, HAY B, FILTZ J R. New French reference calorimeter for gas calorific value measurements[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 97(2): 673-678.
- [6] SCHLEY P, BECK M, UHRIG M, et al. Measurements of the calorific value of methane with the new GERG reference calorimeter[J]. International Journal of Thermophysics, 2010, 31(4): 665-679.
- [7] 胡日恒, 安绪武, 谈夫. 精密氧弹量热计及苯甲酸燃烧热的 测定[J]. 化学学报, 1981(S1): 18-26.
- [8] 苏毅, 骆科东. 我国天然气流量计量技术现状及发展趋势分析[J]. 石油仪器, 2015(5): 8-12.
- [9] 王海峰,李佳,孙国华,等.基准气体热量计研究进展[J].石 油与天然气化工,2014(2):196-199.
- [10] 李克, 潘春锋, 张宇, 等. 天然气发热量直接测量及赋值技术 [J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(3): 297-301.
- [11] HALOUA F, HAY B, FOULON E. Uncertainty analysis of theoretical methods for adiabatic temperature rise determination of methane[J]. Therm Anal Calorim, 2013, 111: 985-994.
- [12] 廖绍凯, 牛志荣, 庄伟晨. 保温层对墙体温度场的延迟和衰减[J]. 建筑节能, 2013(5): 41-44.
- [13] 杜军燕, 王玉刚, 潘江, 等. Rossini 型气体热量计非稳态温度 场的优化分析[J]. 中国测试, 2017, 43(8): 119-124.
- [14] 陈桂生, 付志勇, 朱育红, 等. 工业铂热电阻不同检定方法检 定结果可信度研究[J]. 中国测试, 2014, 40(6): 17-21.

(编辑:刘杨)