

存储式高温高压钻孔测温仪的研制与应用

李忠, 赵燕来, 罗光强

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 611734)

摘要:为解决大于200℃高温环境下的测温难题,为高温地热和干热岩资源勘查提供技术支撑,利用铂电阻测温技术和真空绝热保温技术研发了存储式高温高压钻孔测温仪。存储式高温高压钻孔测温仪采用精密铂电阻温度传感器作为测量元件,具有技术成熟、性能稳定的特点。利用大容量高温锂电池供电,温度测量数据采用定时自动采集、存储的方式获取。仪器不需要测井电缆,一般采用钢丝绳绞车进行下放和提升,操作简单。仪器硬件部分主要包括承压管、保温管和测量探管。仪器配套的测量软件主要功能包括仪器时间的校正、测量时的记时以及测温数据的处理。该仪器设计适用工作环境温度为300℃,耐水压100MPa,主要用于高温高压环境下的钻孔测温。在广东惠州惠热1井和青海共和GH-01井进行了实测应用,满足目前钻遇到的孔底温度的测温要求。

关键词:铂电阻温度传感器;保温管;钻孔测温仪;高温钻井;高温测井;干热岩

中图分类号:P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)02-0035-07

Development and application of storage high temperature and high pressure borehole thermometer

LI Zhong, ZHAO Yanlai, LUO Guangqiang

(Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: In order to solve the problem of temperature measurement at high temperature above 200℃ and provide technical support for high-temperature geothermal and hot dry rock exploration, a storage high temperature and high pressure borehole thermometer was developed by using platinum resistance temperature measurement technology and vacuum insulation technology. The instrument is designed for working environment temperature of 300℃ and water pressure resistance of 100MPa. It can be used for borehole temperature measurement at high temperature and high pressure. The instrument has been used in Huire-1 well and GH-01 well, which can meet the borehole temperature measurement requirements.

Key words: platinum resistance temperature sensor; vacuum flask; borehole thermometer; high temperature drilling; high temperature logging; hot dry rock

0 引言

地热作为绿色、可再生资源,被世界各国确定为维系社会可持续发展的新“绿色能源”,地热资源的利用成为国际应对气候变化、调整能源结构、实

现绿色发展的有效途径,从而也成为全球新能源利用的热点。地热资源可分为2种类型:天然热水资源和高温岩体地热资源(又称干热岩)。高温岩体地热(HDR)是指温度>200℃的岩体中蕴藏的地热

收稿日期:2020-07-13; 修回日期:2020-11-04 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.02.005

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项“超高温钻孔轨迹测量仪开发和应用”(编号:2013YQ050791);中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号:DD20190587)、“青海共和盆地干热岩调查评价与勘查示范(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号:DD20201104)

作者简介:李忠,男,汉族,1972年生,教授级高级工程师,探矿工程专业,硕士,主要从事钻探器具及地质灾害监测仪器的研究和开发工作,四川省成都市郫都区红光镇港华路139号,379292752@qq.com。

引用格式:李忠,赵燕来,罗光强.存储式高温高压钻孔测温仪的研制与应用[J].钻探工程,2021,48(2):35-41.

LI Zhong, ZHAO Yanlai, LUO Guangqiang. Development and application of storage high temperature and high pressure borehole thermometer[J]. Drilling Engineering, 2021,48(2):35-41.

资源,可以经过人工开采,从岩体中直接提取出热水蒸汽而直接用于发电和热水利用,是可再生的“绿色能源”^[1-2]。

我国具有丰富的高温岩体地热资源,如西藏羊八井地区、云南腾冲地区、海南琼海地区、台湾及东南沿海地区、长白山天池等地区。地热资源的开发利用对改善我国能源结构,保证能源安全具有重大的战略意义^[3]。我国高度重视地热能的开发利用,相继出台了《可再生能源法》和《地热能开发利用“十三五”规划》等法规政策。自然资源部中国地质调查局按照国家统一部署,积极推动地热资源勘查开发,先后组织全国60多家单位3000多名技术人员,系统开展了全国地热资源调查,对全国水热型地热能和336个主要城市浅层地热能进行了评价,初步估算了全国3~10 km深度干热岩型地热能基础资源量^[4]。2017年在青海共和盆地3705 m深度钻获236℃的干热岩,实现了我国干热岩勘查的重要突破。目前正以青海共和盆地为试验区,实施干热岩资源勘查与试验性开发科技攻坚战。

当前,钻井仍是勘探和开发地热资源的主要手段,高温岩体地热钻井施工与其他油气钻井施工有着本质的区别,主要体现在施工岩层的环境温度较高,一般在150℃以上,钻井深度较大,一般为3000~6000 m,有时可达10000 m^[5]。对于地温梯度异常地区,地温梯度将达到10~15℃/100 m,温度还将更高,一口超过2000 m深的高温地热井或干热岩井,井底温度就有可能达到200~300℃。

对于地热和干热岩勘查,温度是最重要的测井指标,是正确评估其开发价值的重要依据,而干热岩勘查中的高温高压环境对于测温仪器提出了更高的要求。目前国内用于钻孔内测温的仪器大多只能用于200℃以内,采用的是接触式测温方式,传感器主要有铂电阻和分布式光纤两类。其中铂电阻测温技术成熟,方案简单,成本较低,应用广泛,测量效率稍低;分布式光纤测温是近年新发展的测温方法,可以实现分布式测温,能对钻孔全孔段的温度进行测量,测量效率较高,但成本也很高,技术层面还有需要进一步完善的地方。仪器数据采集方式分为有电缆式和无电缆(存储式),有电缆式一般用于温度<150℃的钻井,因为耐高温电缆的成本较高,在高温地热井一般采用无电缆(存储式)方式。

为了解决高温环境下的测温难题,为高温地热和干热岩勘查提供技术支撑,依托我所承担的国家重大科学仪器设备开发专项项目“超高温钻孔轨迹测量仪开发和应用”(编号:2013YQ050791)以及地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号:DD20190587)、“青海共和盆地干热岩调查评价与勘查示范(中国地质科学院探矿工艺研究所)”(编号:DD20201104)技术成果,研制了存储式高温高压钻孔测温仪,可用于300℃以内的钻孔测温。该仪器在广东惠州惠热1井和青海共和GH-01井进行了实测应用,取得了良好的效果。

1 仪器构成

存储式高温高压钻孔测温仪采用精密铂电阻温度传感器作为测量元件,具有技术成熟、性能稳定的特点,利用大容量高温锂电池供电,温度测量数据采用定时自动采集、存储的方式获取,仪器不需要测井电缆,一般采用钢丝绳绞车进行下放和提升,操作简单。

如图1所示,仪器硬件部分主要包括承压管、保温管和测量探管。承压管用于仪器的承压和密封保护,采用高强度的钢材加工,可以承受100 MPa的水压;保温管采用真空绝热保温技术制造,用于隔绝外部环境的高温,减缓外部环境的热向保温瓶内传递,为测井仪器赢得必要的工作时间,一定时间内将管内温度保持在电子器件工作的最高工作温度范围内,确保测井仪器能正常完成测井作业^[6-8];测量探管主要由铂电阻温度传感器、温度变送器、采集电路、存储电路、电源转换电路及高温锂电池等构成。



图1 仪器构成

Fig.1 Instrument composition

仪器配套的测量软件(如图2所示)主要功能包括仪器时间的校正、测量时的计时以及测温数据的处理。时间校正主要是对测量探管内置时钟进行校正,确保其时钟与电脑时钟保持一致;测量时的计时主要是记录测量时仪器到达一定孔深位置的时间,通过时间对应,便能正确获得该测点的测

温数据;测温数据的处理主要是对测量探管内自动存储的数据进行提取,可以提取存储的全部测温数据,也可以仅按记录的测点时间提取各孔深处的测温数据,所有测温数据均可导出为Excel文件,便于后续报表制作和绘图处理。



图2 测温仪软件

Fig.2 Thermometer software

2 仪器主要技术参数

测温范围:0~300℃;

测温精度:±0.5℃;

工作环境温度:0~300℃(加保温管,在最高温度下工作时长≥2h);

数据采集方式:自动;

数据保存方式:存储式;

耐水压:100MPa;

仪器尺寸:Ø60mm×2300mm。

3 测量原理

本仪器利用铂电阻温度传感器进行测温,铂电阻是常用的温度传感器之一,其测量精度高,稳定性好,具有一定的非线性,温度越高电阻变化率越

小。其测温原理是基于铂电阻的热效应,即铂电阻的阻值会随温度的变化而变化,呈现出一定的函数关系的特性^[9],因此,只要测量出感温铂电阻的阻值变化,就可以推算出温度。

常用于测温的铂电阻主要有PT100和PT1000两种。PT100表示在温度为0℃时,其电阻值为100Ω,PT1000表示在温度为0℃时,其电阻值为1000Ω。精度上PT1000要高于PT100,PT100主要用于-100~600℃,而PT1000最好是用于200℃以下,原因是其电阻值较大,在电流相同情况下,产生的自热较PT100要高,从而会影响其测量精度。因此存储式高温高压钻孔测温仪还是采用PT100作为温度传感器,PT100的测量范围为-200~850℃,其温度/阻值对应关系为^[10]:

$$-200\text{℃} < t < 0\text{℃时,}$$

$$R_t = 100[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)] \quad (1)$$

$0\text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 850\text{ }^\circ\text{C}$ 时,

$$R_t = 100(1 + At + Bt^2) \quad (2)$$

式中： t ——环境温度值， $^\circ\text{C}$ ； R_t ——温度 t 时的电阻值， Ω ； A 、 B 、 C ——系数， $A = 3.90802 \times 10^{-3}$ ， $B = -5.80195 \times 10^{-7}$ ， $C = -4.2735 \times 10^{-12}$ 。

PT100测温的本质是测量传感器的电阻，电阻信号常通过电桥电路转换为电压信号，再经放大处理及A/D转换，由单片机处理器换算出相应的温度值^[11]。

PT100的连接方式可以分为二线制、三线制和四线制。二线制连接时，由于引线电阻与PT100串联，增大了电阻，会影响测量精度；三线制连接时，对PT100额外增加了第三条线，由于引线电阻具有相同特性，能够对线缆电阻进行补偿，消除线缆电阻的影响^[12]；四线制能够严格地消除线缆电阻的影响，适用于测量精度要求较高的场合。实际使用中，由于三线制的三根线的线型相同，长度相同，只要连接时尽量减小接触电阻，引线的影晌基本可以忽略不计，因此，三线制在实际应用中更为普遍，本仪器也采用三线制接法。

仪器测量时，要求传感器必须暴露在高温高压环境中，因此在测温仪结构上，采用了绝大部分测温场合使用的装配式的铂电阻结构形式（如图3所示），主要由保护管、延长导线、测温铂电阻、氧化铝装配而成，产品结构简单，适用范围广，成本较低。为了确保仪器能承受钻孔内100 MPa的液柱压力而不被破坏，保护管采用了高强度的钢材，通过耐高温O形密封圈密封，延长的导线采用了可以耐高温300 $^\circ\text{C}$ 的高温线。这些技术措施，保证了传感器可以在高温高压环境状态下正常工作。

4 测温仪误差修正

由于环境温度对电阻和放大器性能的影响，铂电阻的电阻与温度之间也存在着非线性关系，同时温度变送器、采集电路A/D转换等在生产制造过程中均会出现一定的偏差^[13]，致使整个测温系统环境温度变化较大时会产生较大的误差，因此必须对仪器进行误差修正，消除各环节形成的误差。

钻孔测温仪测温传感器部分是暴露在高温环境中的，工作时的温度变化范围较大。而其余的温度变送器、采集电路A/D转换、电源转换电路及高

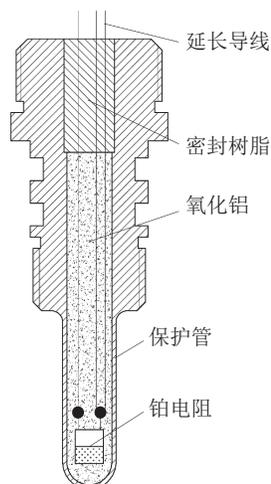


图3 铂电阻封装示意

Fig.3 Platinum resistance package

温锂电池等其他电路部分是全部置于保温管的内部的。由于保温管的保温作用，正常工作时长内，该部分工作时的温升一般在30~40 $^\circ\text{C}$ ，且温度不会超过电子器件自身的工作温度范围，该温升变化对测量精度的影响相对较小。因此本仪器未再对该电路部分的温度变化对测量精度的影响进行单独的修正，而是采用整机直接修正的方式进行。将铂电阻传感器、温度变送器、采集电路A/D转换的误差等作为一个整体进行修正，重点是对测温传感器部分的温度变化进行修正，以确保在满足仪器测量精度要求情况下降低修正工作量。当然，如果还要再进一步的提高仪器测量精度的话，还是可以先单独进行各部分的修正，然后再进行整个系统的修正。

仪器误差修正采用经过计量检定的高精度恒温油槽（如图4所示）进行。油槽温度范围-40~300 $^\circ\text{C}$ ，温度波动度 $\leq \pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}/30\text{ min}$ ，测量分辨率为0.001 $^\circ\text{C}$ ，温度均匀度 $\leq 0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 。以恒温油槽的温度值作为标准值，利用恒温油槽模拟不同的环境温度，将钻孔测温仪测温传感器部分放入到恒温油槽中（如图5所示），同步采集仪器测温数据。将采集到的各温度点下的测温数据与标准值进行3阶多项式拟合^[14-16]，即可得到误差修正系数，完成仪器的误差修正。

实际修正时，分别以25 $^\circ\text{C}$ 的间隔，由50 $^\circ\text{C}$ 开始，一直到275 $^\circ\text{C}$ （300 $^\circ\text{C}$ 的点由于硅油高温产生的油烟太严重而放弃）。在每个修正温度点下，恒温保持时间为30 min，所有修正点完成数据采集后，进行3



图4 恒温油槽

Fig.4 Thermostat bath



图5 测温仪误差修正

Fig.5 Error correction of the thermometer

阶多项式拟合,得到拟合公式如下:

$$T=1.21965+1.00126t+6.32763 \times 10^{-5}t^2-1.24233 \times 10^{-7}t^3 \quad (3)$$

式中: t ——修正前的测量值, $^{\circ}\text{C}$; T ——修正后的值, $^{\circ}\text{C}$ 。

利用拟合公式(3)即可对仪器的测量值进行修正,仪器修正前后的数据对比如表1所示。从表中可以看出,修正前仪器测量最大偏差为 3.8°C ,通过拟合修正后,最大偏差降低到 0.3°C ,仪器修正效果满足使用要求。

5 仪器应用

5.1 广东惠州惠热1井应用

惠热1井位于广东省惠州市惠城区横沥镇黄沙

表1 测温仪修正数据

Table 1 Correction data of the thermometer $^{\circ}\text{C}$

标准值	修正前		修正后	
	测量值	偏差值	测量值	偏差值
50	48.6	-1.4	50.0	0.0
75	73.4	-1.6	75.0	0.0
100	98.1	-1.9	99.9	-0.1
125	122.9	-2.1	125.0	0.0
150	147.6	-2.4	150.0	0.0
175	172.6	-2.4	175.3	0.3
200	196.8	-3.2	199.8	-0.2
225	221.6	-3.4	224.9	-0.1
250	246.7	-3.3	250.2	0.2
275	271.2	-3.8	274.9	-0.1

洞村,是为推进东南沿海地区地热资源调查而实施的干热岩地质调查井。钻井目的是根据靶区内干热岩成藏机理、温度特性,选择重点区开展深部高温岩体钻探,查明区内深部干热岩温度与热物性特征,为干热岩资源储量评价与开发利用提供相关参数。该井是东南沿海厦门-琼北地区首口地热深井,终孔井深 3009.17 m ,井口温度超过 100°C ,自喷涌水量 $100\sim 200\text{ m}^3/\text{h}$,井下压力大,地层结构复杂。

为了获得井底温度,2018年10月11—15日期间,受施工单位邀请,利用存储式高温高压钻孔测温仪进行了2次下井测温作业(如图6所示),图7为2次下井实测数据的对比图。可以看出2次测温数据一致性非常好,通过2次测量,获得井下最高温度数据为 127.7°C 。该井是迄今为止中国东部水温最高,压力和流量最大的高产能自喷地热井。本次测温对惠热1井的顺利完工提供了极大的帮助和技术支撑,受到了施工单位的好评和感谢。

5.2 青海共和GH-01井应用

GH-01井是中国地质调查局部署的青海共和盆地干热岩勘查与试验性开发科技攻坚战首眼钻井,位于青海省海南州共和县恰卜恰镇东侧 5 km 左右湖积台地上,井深 4000 m ,该井具有井深大、井温高、井下压力异常等难点。

为了准确了解该井的温度值,为后续相关技术设计工作提供依据,青海共和干热岩科技攻坚战指挥部组织中国地质调查局所属的中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所、中国地质调查局水

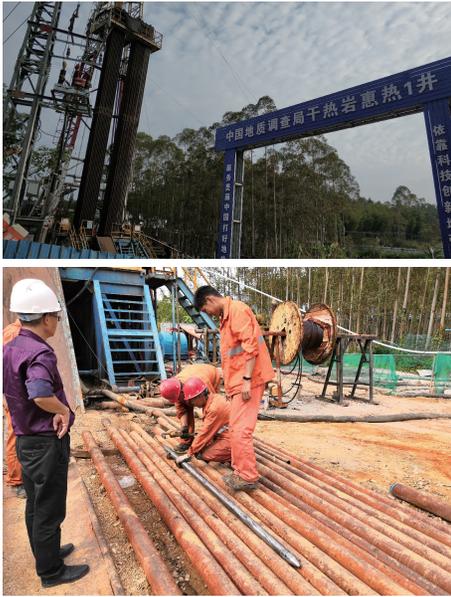


图6 惠热1井测温照片

Fig.6 Temperature measurement at Huire-1

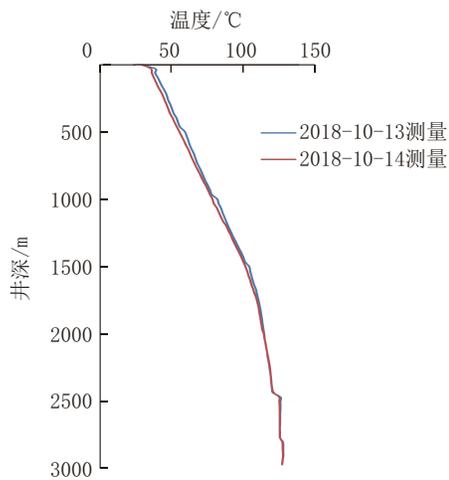


图7 惠热1井测温曲线

Fig.7 Temperature measurement curve of Huire-1

文地质环境地质调查中心和中国地质科学院探矿工艺研究所分别利用自主研发的高温高压测温设备开展GH-01井的测温工作。2019年10月20日,利用存储式高温高压钻孔测温仪对该井进行了测温(如图8所示),仪器在井内工作时长约8 h,受井底沉渣影响,仪器下放的最大深度为3980 m,井底最高温度 $>200^{\circ}\text{C}$ 。3家单位测得的井温曲线形态基本一致,井底最高温度值接近,说明仪器工作可靠,数据准确。



图8 GH-01井测温照片

Fig.8 Temperature measurement at GH-01

6 结语

利用精密铂电阻测温技术和真空绝热保温技术研发的存储式高温高压钻孔测温仪,具有技术成熟、测量精度高、适用工作环境温度高、使用操作简便等特点。在钻井实际测温中均取得了满意的效果,为高温高压环境下的钻孔测温提供了新的仪器选择。可满足高温地热及干热岩勘探开发钻孔测温需求,为深部地热能和干热岩勘查开发提供了技术支持。

参考文献(References):

- [1] 赵阳升,万志军,康建荣. 高温岩体地热开发导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, KANG Jianrong. Introduction of hot dry rock geothermal extraction[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 张伟. 高温岩体热能开发及钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 219-224.
ZHANG Wei. Extraction of high temperature rock mass heat energy and related drilling technologies[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10): 219-224.
- [3] 邵保平, 赵金昌, 赵阳升, 等. 高温岩体地热钻井施工关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2234-2243.
XI Baoping, ZHAO Jinchang, ZHAO Yangsheng, et al. Key technologies of hot dry rock drilling during construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2234-2243.
- [4] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学

- 报,2017,38(4):449-459.
- WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017,38(4):449-459.
- [5] 刘伟莉,马庆涛,付怀刚.干热岩地热开发钻井技术难点与对策[J].石油机械,2015,43(8):11-15.
- LIU Weili, MA Qingtao, FU Huaigang. Drilling difficulties and solutions for hot dry rock geothermal development[J]. China Petroleum Machinery, 2015,43(8):11-15.
- [6] 楚泽涵,袁祖贵,李云平.关于提高地球物理测井仪器温度性能指标问题[J].测井技术,2004,28(3):181-186.
- CHU Zhehan, YUAN Zugui, LI Yunping. On improvement of temperature index of petrophysical logging tools[J]. Well Logging Technology, 2004,28(3):181-186.
- [7] 王亚芳,沙荣钧.石油测井仪用小型保温瓶的研制[J].低温与特气,2002,20(6):26-28,37.
- WANG Yafang, SHA Rongjun. Research on mini vacuum flask for an apparatus used in petrol well[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2002,20(6):26-28,37.
- [8] 刘耀伟,侯振学,廖胜军,等.高温电成像仪器的研制与应用[J].海洋石油,2018,38(3):39-45.
- LIU Yaowei, HOU Zhenxue, LIAO Shengjun, et al. Development and application of high temperature electrical imaging tool[J]. Offshore Oil, 2018,38(3):39-45.
- [9] 郑耀中.铂电阻的非线性补偿方法研究[D].武汉:武汉大学,2008.
- ZHENG Yaozhong. Research on nonlinear compensation method of platinum resistance[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2008.
- [10] JJG 229—2010,工业铂、铜热电阻[S].
- JJG 229—2010, Industry platinum and copper resistance thermometers[S].
- [11] 兰羽,白洁.基于Pt100传感器的温度测量系统设计[J].机械与电子,2013(10):44-46.
- LAN Yu, BAI Jie. Design of temperature measurement system based on Pt100 sensor[J]. Machinery Electronics, 2013(10):44-46.
- [12] 陈志文,王玮.基于Pt100铂热电阻的温度变送器设计与实现[J].现代电子技术,2010(8):197-199.
- CHEN Zhiwen, WANG Wei. Design and realization of temperature transmitter based on Pt100 platinum thermal resistance[J]. Modern Electronics Technique, 2010(8):197-199.
- [13] 陆阳,韩江洪,魏臻,等.铂电阻测温系统温度补偿方法[J].仪器仪表学报,2000,21(3):255-257,262.
- LU Yang, HAN Jianghong, WEI Zhen, et al. Temperature compensation approach of Pt resistance temperature measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000,21(3):255-257,262.
- [14] 吴志祥,周祥才,黄亮,等.多项式直接拟合在铂电阻高精度测温中的研究[J].自动化与仪表,2014(2):57-60.
- WU Zhixiang, ZHOU Xiangcai, HUANG liang, et al. Research on the application of polynomial direct fitting to platinum high-precision temperature measurement[J]. Automation & Instrumentation, 2014(2):57-60.
- [15] 张元良,修伟,郎庆阳.石油产品检测中Pt100温度传感器动态补偿研究[J].大连理工大学学报,2010,50(3):351-355.
- ZHANG Yuanliang, XIU Wei, LANG Qingyang. Research on dynamic compensation of Pt100 Temperature Sensor in Petroleum Products Testing[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010,50(3):351-355.
- [16] 钱静,翁佩德,罗家融,等.Pt100温度计电阻和温度关系的拟合[J].低温与超导,2004,35(4):290-292.
- QIAN Jing, WENG Peide, LUO Jiarong, et al. Resistance-temperature relation fit of Pt100 thermometer[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2004,35(4):290-292.

(编辑 荐华)