

气控钠热管炉热特性实验研究

唐志伟¹, 杜文伟², 宋卫岗¹, 闫小克², 李杰³, 杨金环⁴

(1. 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100013;
(3. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 4. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 为探索气控热管在计量领域的应用, 研究气控钠热管炉热特性. 在未控压的状态下, 找出加热炉最佳控温点, 研究气控钠热管在同一温度计阱不同位置上和不同温度计阱中的温度稳定性和温度场均匀性, 对加热炉丝 2 种不同的绕制方式进行讨论. 实验结果表明, 将热管内温度控制在 655 °C、气路压力控制在 7.840 kPa 的状态下, 热管温度稳定性在 15 min 内达到 ± 0.8364 mK.

关键词: 气控钠热管; 温度放大器; 计量; 炉温控制; 温度稳定性

中图分类号: TK 172.4

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)08-1276-05

Thermal Characteristics of Gas-controlled Sodium Heat-pipe Furnace

TANG Zhi-wei¹, DU Wen-wei², SONG Wei-gang¹, YAN Xiao-ke², LI Jie³, YANG Jin-huan⁴

(1. College of Environment & Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China;

3. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: To explore the application of the gas-controlled heat-pipe in metrology, the thermal characteristics of the gas-controlled sodium heat-pipe furnace is researched. The best temperature control position of the furnace is found without pressure control, the temperature stability and uniformity both in the single thermometer well and among different thermometer wells are studied, and two different winding modes of heating wires are discussed. Experimental results show that the temperature stability reaches ± 0.8364 mK within 15 min, controlling heat-pipe inner temperature at 655 °C, and the gas line pressure at 7.840 kPa.

Key words: gas-controlled sodium heat-pipe; temperature amplifier; metrology; furnace temperature control; temperature stability

气控钠热管(gas-controlled sodium heat-pipe)是一种特殊的可控热管. 早期的研究主要关注其在航天领域的应用. 近年来, 意大利的研究者 Marcarino 提出将一组充有不同工质的气控热管通过压力线相连组成“温度放大器”^[1]. “温度放大器”克服了高温标准铂电阻温度计(high temperature standard platinum resistance thermometer)引入温标的非唯一

性^[2], 未来可能在铝和银固定点之间温区(660 ~ 962 °C)取代 HTSPRT 作为内插仪器定义热力学温标, 欧洲 9 国的计量机构在 2004 年已就开展温度放大器的研究达成一致^[3]. 中国计量科学研究院(National Institute of Metrology)与意大利国家计量院(Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica)在计量方面达成了合作协议^[4].

收稿日期: 2010-04-28.

基金项目: 中国计量科学研究院基本科研项目(AKY0838).

作者简介: 唐志伟(1966—), 男, 副教授, 主要从事热管技术、工业余热回收、建筑节能等方面的研究, E-mail: tangzhiw@263.net.

重点讨论在不进行压力控制的条件下气控钠热管炉的热特性, 通过实验分析气控钠热管炉的垂直温度场, 找出气控钠热管温度稳定性最佳的控温位置. 在该控温点下, 研究了沿气控钠热管温度计阱方向的温度场分布、同一温度计阱不同位置及不同温度计阱长时间温度稳定性. 实验中还对 2 种不同加热炉炉丝绕制方式对温度稳定性的影响进行了比较. 最后, 进行了控压条件下的实验, 得出初步的温度稳定性数据.

1 实验原理及装置

1.1 气控热管的原理

不同工质的热管在同一饱和压力下温度可差别很大, 气控热管就是基于这一原理, 通过连接惰性气体的气路可直接进行控制压力. 气控热管内部存在 2 个分界面, 分别是热管工质的汽液相分界面和蒸汽与管内控制气体形成的分界面. 在进行高精度温度测量时, 汽液分界面必须充满整个热管内腔, 蒸汽与管内控制气体形成的分界面在热管冷却端. 汽液分界面的温度, 即工质的饱和温度, 与管内工质的压力有关, 管内工质的压力可通过控制气路气压进行调节. 蒸汽与管内控制气体分界面的位置沿着热管轴向, 随工质、控制气体、气压、加热功率和冷却能力的不同而不同. 选用惰性气体氦气作为控制气体^[5].

通常认为气控热管管内温度 T 等于汽液分界面的温度 T_i ; 同时认为管内气压 p_v 与管外的气压 p_m 相等^[6-7], 得出如下关系

$$T = T_i(p_v) = T_i(p_m) \quad (1)$$

式(1)表明热管内腔温度和压力都与气控热管工质的蒸汽压力有关. 由克劳修斯-克拉贝龙方程和理想气体状态方程可知

$$\frac{dT_i}{T_i} = \frac{RT_i dp_v}{ML p_v} \quad (2)$$

式中: R 为理想气体常数; M 为蒸汽的摩尔质量; L 为汽化比热. 由式(1)可知

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{RT \Delta p_m}{ML p_m} \quad (3)$$

至此, 热管工质温度与气体控制压力有了一一对应关系, 这就是气控热管的基本原理.

1.2 实验原理

启动加热炉缓慢加热, 当热管内测量温度达到 97 °C 时, 升温曲线会出现一明显凸台, 该温度点为钠相变点, 热管开始启动, 如图 1 所示. 当温度成功稳定在 650 °C 后, 可进行垂直温场测试和温度稳定

性测试.

在进行加热炉垂直温场测试时, 调整 2# 控温热电偶距炉膛底部 20 cm, 将 3# 热电偶 1 cm/min 从底部向上提升至 30 cm, 温度稳定后 1 cm/min 向下移动(2#、3# 热电偶位置见图 2).

在进行热管垂直温场测试时, HTSPRT 从计阱底部每分钟向上提高 1 cm 位置, 至距底部 10 cm 后每分钟下降 1 cm 高度, 至底部.

在进行热管温度稳定性测试时, 将 HTSPRT 固定在计阱中某位置, 测试其在连续时间的温度变化.

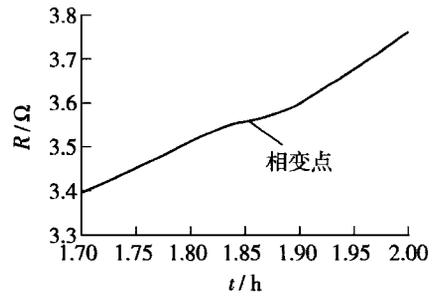


图 1 气控钠热管的启动

Fig. 1 Startup of the GCSHP

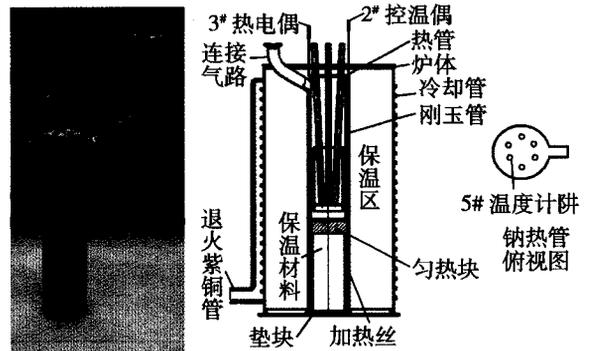


图 2 NIM 的气控钠热管及加热炉

Fig. 2 NIM GCSHP and furnace

1.3 钠热管及加热炉的设计

实验用的钠热管及炉体示意图如图 2 所示. 热管筒体使用耐高温不锈钢管(1Cr18Ni9Ti), 主要为了满足热管强度、刚度、抗腐蚀性、耐高温以及与工质相容性的要求. 热管筒体内壁布置了金属丝网, 金属丝网的规格为 90 目/cm². 6 个测温管与轴向成 3° 夹角均匀插入热管顶部, 测温管下侧安装在内腔防热辐射金属盒内, 定位于内腔底部内套筒上. 碳化硅插入测温管内侧, 对易碎的 HTSPRT 玻璃外壳有保护作用. 通过顶部支管把热管与实验气路控制系统连接起来, 冷却水套布置在连接处外侧. 热管工质选用高纯度碱金属钠, 充装过程在德国

MBRAUN 生产的手套箱中进行. 加热炉选用镍铜合金炉丝,沿炉膛圆周方向缠绕. 温度控制系统采用 FP-23 和 SR-23 模块.

1.4 气控钠热管实验台设计

实验台示意图及实物图分别见图 3、4. 气控钠

热管上侧与气路连接,通过 DHI350K 高精度压力控制仪同时连接到 2 个 6 L 的缓冲罐,精确控制气路中氦气压力. 气路系统布置 1 台 VARIAN 真空泵用来清洗气路. HTSPRT03293 插入钠热管温度计阱中,连接 GUIDLINE6622A 高精电桥来测量电阻值.

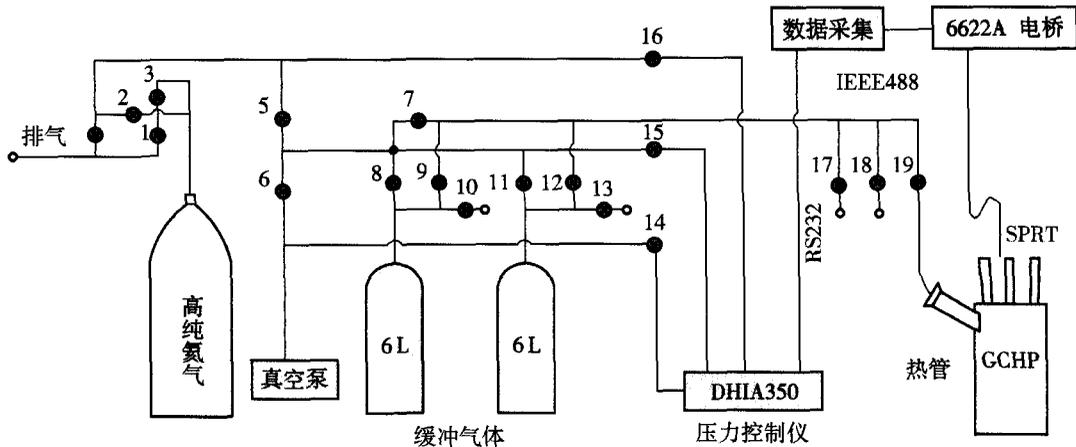


图 3 气控钠热管实验系统

Fig. 3 Schematic view of the GCSHP experimental plant



图 4 NIM 气控钠热管实验系统

Fig. 4 NIM GCSHP experimental system

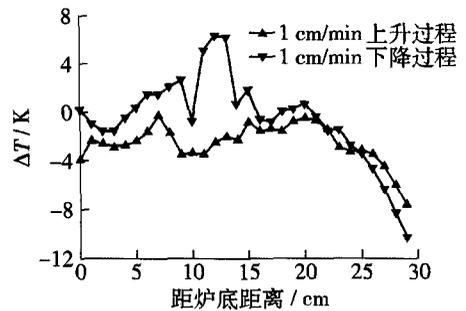


图 5 加热炉轴向温度场分布

Fig. 5 Immersion temperature distribution of the furnace

2 结果与分析

2.1 加热炉与气控热管轴向温度场分析

图 5 为加热炉轴向温度场变化曲线. 加热炉温度上升、下降过程温度变化规律一致,上升过程波动小于下降过程. 在加热炉轴向 0 ~ 20 cm 内温度波动在 5 °C 内,加热炉底部温度场有波动;加热炉轴向 10 ~ 15 cm 处加热丝绕制较密,局部受热不均引起明显峰值;由于加热炉轴向 20 cm 以上没有加热丝,温度急剧下降. 因此,距加热炉炉膛底部 15 ~ 20 cm 是较理想的控温位置.

图 6 为气控钠热管距底部 10 cm 范围的轴向温度场. 对比图 5 和 6,实验中的气控钠热管表现了良好的等温性,在加热炉温降过程中,气控钠热管温度波动范围为 30 mK. 温度场波动主要的原因是测量

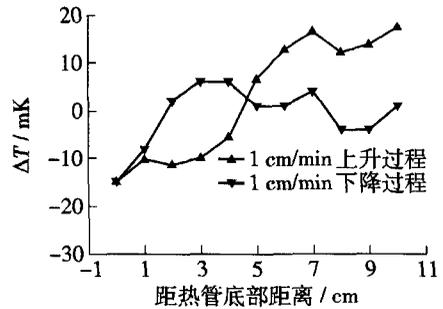


图 6 气控钠热管轴向温度场分布

Fig. 6 Immersion temperature distribution of the sodium heat-pipe

方法. 向上移动 HTSPRT 时,受热的 HTSPRT 与室内空气进行热交换,引起热管内局部饱和钠蒸汽放热,从而引起温度变化. 另外,工质高纯度钠中的少

量杂质也会对温度场也会产生一定影响. Hill 等^[8]在实验中说明:在 660 °C 温度下,2 种包含不同成分杂质的钠蒸汽的温度稳定性相差达 34 mK.

2.2 控温偶不同位置时的温度稳定性分析

图 7 表明控温偶在不同位置控温时气控钠热管的温度稳定性情况. 通过温度曲线可得出,距气控钠热管底部 20 cm 控温时稳定性最佳,7 h 内温度波

动范围 ± 150 mK.

2.3 HTSPRT 在同一温度计阱不同位置的温度稳定性分析

由图 8 可知,HTSPRT 在计阱底部的温度稳定性好于其他位置,10 h 稳定性小于 300 mK,1 h 内稳定性小于 50 mK. 沿温度计阱方向温度稳定性逐渐降低,饱和钠蒸汽有明显的动压降变化.

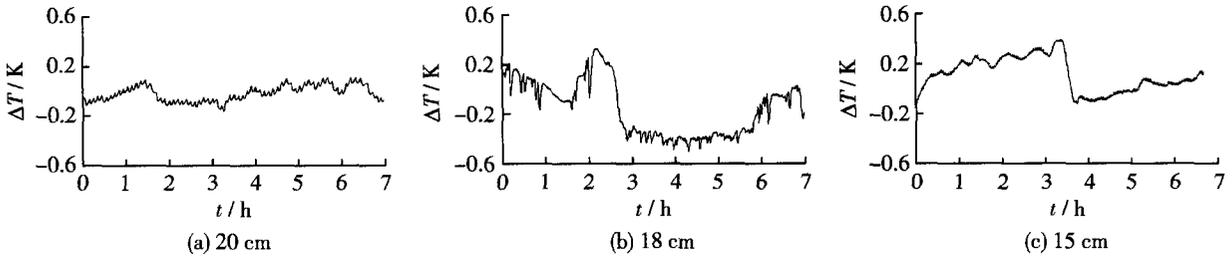


图 7 不同控温位置时的温度稳定性

Fig.7 Temperature stability at different temperature control positions

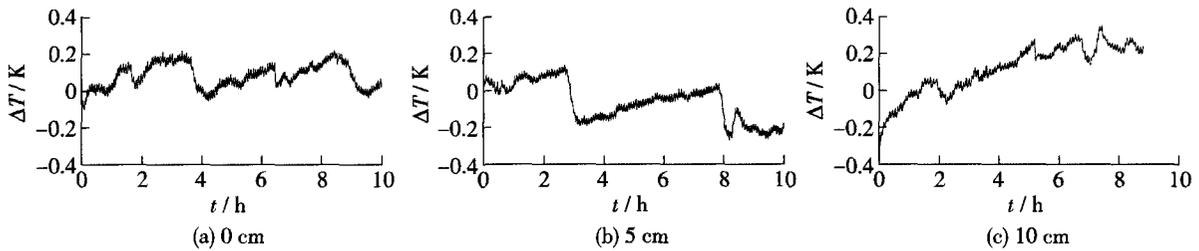


图 8 同一计阱不同位置的温度稳定性

Fig.8 Temperature stability at different positions of the same thermometer well

2.4 不同温度计阱中的实验结果分析

将 HTSPRT 依次插入 5[#]、2[#]和 6[#]温度计阱中 1 h,温度变化情况如图 9 所示. HTSPRT 在 5[#]计阱中温度稳定性好于其他计阱,其中 2[#]计阱中 HTSPRT 稳定性较差. 计阱内壁金属丝网缠绕层数不同是稳定性不同的根源. 5[#]计阱丝网缠绕层数最多,稳定性最好. 金属丝网对热辐射有明显的屏蔽作用,缠绕越多,屏蔽作用越好.

2.5 不同炉丝绕制方式对稳定性影响

比较 2 种不同炉丝绕制方式对温度稳定性的影响. 图 10 表明采用 1 段加热丝,稳定性好于 2 段加热丝. 2 段炉丝中间断开,造成热管蒸发段受热不均匀,管内饱和钠蒸汽的流动稳定性受到了影响.

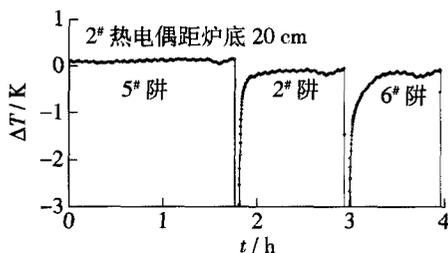


图 9 不同计阱中的温度稳定性

Fig.9 Temperature stability of different thermometer wells

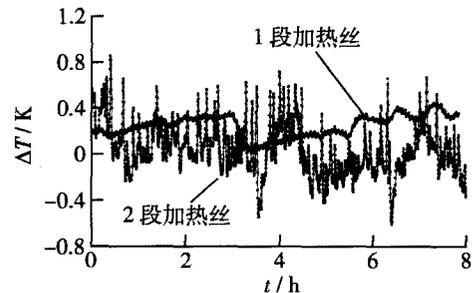


图 10 加热丝绕制方式对温度稳定性影响

Fig.10 Effects of different winding modes of heating wires on temperature stability

2.6 控压下的温度稳定性测试分析

HTSPRT 放置在气控钠热管 5[#]距温度计阱底部

5 cm 的位置,气控钠热管处于压力 7.840 kPa、温度 655 °C 的稳定状态,测量 15 min 内高温铂电阻温度计最大温度变化值,将该差值的 $\pm 1/2$ 作为气控钠热管在压力 7.840 kPa 时的温度稳定性,如表 1 所

示. 结果表明,实时压力控制下的温度稳定性在 15 min 内达到了 ± 0.8364 mK,远优于未控压情况下的稳定性.

表 1 控压 7.840 kPa 时的温度稳定性

Table 1 Temperature stability with pressure controlled at 7.840 kPa

序号	SPRT 电阻值/ Ω	序号	SPRT 电阻值/ Ω	序号	SPRT 电阻值/ Ω
1	0.848 527 701	11	0.848 528 291	21	0.848 527 054
2	0.848 527 743	12	0.848 528 291	22	0.848 527 019
3	0.848 527 733	13	0.848 528 212	23	0.848 527 187
4	0.848 527 814	14	0.848 527 855	24	0.848 527 339
5	0.848 527 926	15	0.848 527 841	25	0.848 527 179
6	0.848 528 024	16	0.848 527 773	26	0.848 527 104
7	0.848 528 158	17	0.848 527 693	27	0.848 527 036
8	0.848 528 259	18	0.848 527 715	28	0.848 526 987
9	0.848 528 276	19	0.848 527 478	29	0.848 526 934
10	0.848 528 289	20	0.848 527 336	30	0.848 526 940

3 结论

1) 距加热炉炉膛底部轴向 20 cm 位置处为气控钠热管炉最佳控温点位置.

2) 热管稳定性与温度计阱内壁丝网缠绕层数有关系,缠绕多层丝网的温度计阱稳定性优于单层情况.

3) 采用 1 段加热丝时温度稳定性优于采用 2 段的情况.

4) 气路压力稳定在 7.840 kPa、气控热管温度控制在 655 °C 时,15 min 内热管温度稳定性达到了 ± 0.8364 mK.

参考文献:

- [1] MERLONE A, MARCRINO P. The "Temperature Amplifier" for very accurate temperature measurements between Al and Ag fixed points [C] // Proceedings of TEMPMEKO2004 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science. Zagerb, Croatia; FSB/LPM, 2005: 227-232.
- [2] MARCRINO P, MERLONE A. Towards new temperature standards for contact thermometry above 660 °C [J]. Metrologia, 2002, 39: 395-398.
- [3] MERLONE A. The euromet project 772 on the temperature amplifier, from its proposal to the present status [J]. International Journal of Thermophysics, 2008, 29: 1858-1866.
- [4] MERLONE A, ZHANG Jin-tao, YAN Xiao-ke, et al. INRIM and NIM cooperation on the temperature amplifier [J]. International Journal of Thermophysics, 2008, 29: 1867-1875.
- [5] CHIS W. Heat pipe theory and practice [M]. Washington DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1976: 140-148.
- [6] MERLONE A. Gas-controlled heat-pipes for platinum resistance thermometry [M]. Torino: Politecnico di Torino, 2002: 7-9.
- [7] MARCRINO P, MERLONE A. Thermodynamic temperature amplification by means of two coupled gas-controlled heat-pipes [C] // Temperature: its Measurement and Control in Science and Industry. Chicago, USA: American Institute of Physics, 2003: 951-956.
- [8] HILL K D, GOTOH M. The vapor of sodium between 660 °C and 960 °C [J]. Metrologia, 1996, 33: 49-60.

(责任编辑 杨开英)