

编 号: 0089

科学技术成果报告

外 延 炉 等 温 热 管

科学技术文献出版社

科学技术成果报告 (0089)

外延炉等温热管

(内部发行)

编辑者: 中国科学技术情报研究所

出版者: 科学技术文献出版社

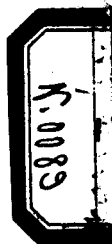
印刷者: 中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

开本 $787 \times 1092 \cdot \frac{1}{16}$ 1 印张 26 千字

统一书号: 15176 · 258 定价: 0.15元

1978年1月出版



目 录

前言	(1)
热管的设计	(1)
热管制造工艺	(5)
测试结果及分析	(7)
结束语	(12)
参考文献	(14)
附录：各项热阻分析	(14)

外延炉等温热管

中国科学院北京力学研究所

第七机械工业部502研究所

前 言

在伟大领袖毛主席的无产阶级革命路线指引下,中国科学院北京力学研究所从1972年起开始对钠热管的原理与性能进行了研究。最近,同七机部502所协作,研制了外延炉等温热管。

等温是热管的固有特点之一,它的等温性在任何金属材料都无法达到的,因此热管在等温方面的应用就日益为人们所重视。近年来,各种热管等温件相继出现,例如文献〔7〕提出把钠热管用于等温炉和热管黑体等。等温炉工作温度范围为 $500\sim 1000^{\circ}\text{C}$,测试结果在热管的 $3/4$ 长度内轴向温差 $\pm 2^{\circ}\text{K}$,径向温差 1°K ,而没有热管时为 10°K 。文献〔8〕介绍了热管等温炉及导热系数测量仪。等温炉在 400°C 范围内工作,等温精度可达 0.2°C 。利用热管制成的导热系数测量仪可以测量绝热材料(例如石棉板)的导热系数,其范围为 $10^{-3}\sim 10^{-7}$ 瓦/厘米 $^{\circ}\text{K}$ 。文献〔9〕则叙述了热管在晶体生长方面的应用,也是用于等温炉。其试验热管以锌作工质,壳体材料为石英。结果在 1065°C 下,在8厘米长度内温差 0.1°C 。热管炉除了用于创造等温环境以外,还可以产生均匀的金属蒸汽或金属蒸汽与气体的混合物,用于进行光谱测量或气体辐射研究等目的(文献〔10〕—〔12〕)。

本文叙述的是用于液相外延炉的等温钠热管的研制与测试结果。这种外延炉是激光半导体元件生产中必不可少的关键设备之一。它要求很高的等温性和稳定度。我国目前尚无这种高精度的液相外延炉,因此激光半导体元件的生产很难保证质量。把钠热管用于外延炉可以显著提高它的等温性。经初步测试结果,在热管的 $4/5$ 长度内(400毫米),温差在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内,达到了设计指标。

热 管 的 设

1. 技术指标: 根据液相外延生长工艺要求,热管应具有如下技术性能:

(1) 需长期适应的工作环境:

热管置于管式炉体的主控段内。炉子从室温约以 $15^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 的速度升温至 $850\sim 900^{\circ}\text{C}$,待稳定后以 $0.1\sim 1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 的速度按预定的折线降温,然后随炉冷却到室温,并能严格重复此过程。热管周围介质为大气。

炉子的加热、保温及程序降温,均以三点三段方式由电子调节器控制。

(2) 等温区大小:

直径75毫米,长为400毫米的圆柱形空间。

(3) 等温精度:

在等温区内等温精度应达到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。在程序降温过程中也应如此。

(4) 寿命要长,价格低廉。

2. 等温热管的设计:

对于作散热或传递功率的热管来说,设计时主要考虑的是如何使热管获得最大的传热能力,具体地说就是如何通过热管内部结构的最佳设计使热管在一定工作温度下具有尽可能大的功率极限。

等温热管不用于传递功率的目的,因而不要求具有最大传热能力。等温热管主要用以创造一种等温环境,例如等温炉。在炉子达到热平衡以后,热管传递的功率常常是比较小的,所以一般热管的各种工作极限、例如声速极限、携带极限、毛细力极限和沸腾极限等,在等温热管里都将碰不到。等温热管主要要求的是尽可能好的等温性,因此它在设计上主要考虑的方面与其他类型的热管不同。设计等温热管时应主要考虑以下几个要求:

(1) 热阻小:

从热源经过热管直到冷源的整个传热体系包括以下九个传热过程:热源到热管蒸发区外表面的外部传热;蒸发区管壁材料内部传热;蒸发区芯子内部传热;汽液交界面的蒸发传热;蒸汽流动传热;冷凝区汽液交界面的冷凝;冷凝区芯子内部传热;冷凝区管壁材料内部传热以及冷凝区外表面到冷源的外部传热。如果引入热阻的概念,则可以把由上述九个传热过程组成的热管的整个传热体系看作一个与电回路相仿的热回路。热阻的概念也与电阻类似,它代表各个过程的传热温差与热流之比。总热阻则是各项热阻的总和:

$$R_t = \Delta T / Q = \sum_1^9 R_n = \frac{1}{Q} \sum_1^9 \Delta T_n$$

从上式可以看出,只要计算出各项热阻 R_n ,并知道传热量 Q ,就可以算出各过程的传热温差 ΔT_n ,从而推算热管的等温性。

对各项热阻的分析详见附录。从分析中可看出,在九项热阻中,第一和第九两项是属于热管的外部传热,而对热管内部传热来说,管壁和芯子内部的热阻是主要的,蒸汽流动的热阻占的比例很少。对等温热管而言,由于热稳定后传递的功率一般比较少,也就是蒸汽质量流量小,所以蒸汽通道两端的压力损失比其他热管更小些,与压力损失相应的饱和蒸汽温度差也就很小。但这当然不是说蒸汽通道因此就可以无限制地缩小。在通道面积太小的情况下,蒸汽流动阻力又会成为不可忽视的因素。

另外,从上面的式子可以看到,影响传热温差的因素除了热阻以外还有传热量 Q 。在热阻一定时, Q 越大温差越大。这对轴向传热的热管影响尤其明显。在热流大时,蒸发段和冷凝段的径向传热温差都大,而这两个温差的方向是相反的,结果使热管外壁面的轴向温差变得更大。对等温炉用的热管,如果只有径向传热而且沿轴向热流分布是均匀的话,则径向热流与热阻都不会影响轴向温度分布。但如果热管有端部热损失(这在一般情况下都是难以完全避免的),则必然产生轴向热流,这导致通过热管内管壁的热流沿轴向分布不均匀,热流密度两端大中间小。假定内管热阻是均匀的。同时在轴向热流不是很大的情况下蒸汽温度降落很小(这在前面的热阻分析中已讨论过),上述热流分布不均匀的结果就使热管内壁面的温度两端低中间高。由此可见,端部热损失越大轴向温差就越大。同样,在有端部热损失的情况下内管热阻越大轴向温差也越大。因此在使用时要注意端部保温。等温性要求高时在两端附加有反馈控制的热补偿是必要的。

(2) 非冷凝气体少:

这是很重要的,因为在热管运行时这种不凝结气体被蒸汽驱赶到热管的某个区域,严重地影响热管的等温性。因此设计时应选择与工质化学相容的结构材料,并在热管封闭前把非冷凝气体尽可能排净。

(3) 所选择的工质应具有合适的饱和蒸汽压曲线:

对于等温热管,除了要求工质具有较高的品质因数 $N = \frac{\rho_l L \sigma}{\eta_l}$ (其中 ρ_l 、 η_l 分别代表液态工质的密度和粘度, L 为汽化潜热, σ 为表面张力系数),还要求在工作温度范围内工质的饱和蒸汽压随温度的变化比较陡。这样蒸汽温度在一定的蒸汽压降范围内变化很小,也就是等温性好。

(4) 冷凝区液体层厚度均匀:

一般圆柱形热管由于有过量工质,在冷端影响了热管的径向等温性。如果在内管外壁面上车以细牙(M0.2~0.3)螺纹槽并在上面复盖一层网格,可以对液体层厚度起均匀作用。

在设计外延炉等温热管时,由于不知道热流大小,特别是传热方向包括径向与轴向两方

面,因而蒸汽流动也是二维甚至是三维的,热流在不同方向上如何分配也不得而知,因此温度分布还无法计算。但从热阻的表示式可看出,减少管壁和芯子的厚度是有利的,不过这受到强度和结构稳定性等方面要求的限制。设计时主要参考过去的试验资料,并考虑上述要求选定管壁和毛细芯子的厚度。

以上讨论的是在等温性方面的考虑,其他方面的要求与别的类型的热管差不多。

为了使热管获得较长的寿命,制造钠热管用的管壳和芯子材料应具有以下性能:抗高温氧化;抗钠腐蚀;与工质钠化学相容。适用的材料有纯镍、高镍基不锈钢等。由于条件所限,本文叙述的试验热管选用了普通的1Cr18Ni9Ti耐热不锈钢。

3. 热管结构〔2〕:

(1) 外形尺寸及重量:热管外形见图1。

总长:530毫米(其中热管本体长500毫米),外径:114毫米,内径:76毫米,重量:7490克。

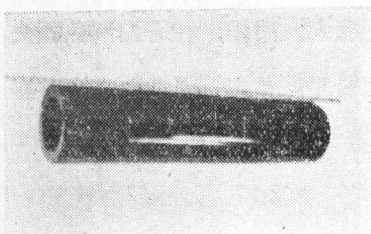


图 1

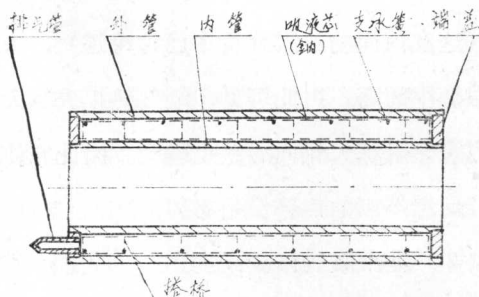


图 2 热管结构

(2) 结构:热管结构见图2。结构为同心套管形,由外壳、毛细芯子及其支承弹簧和工质组成。

外壳包括外管、内管、端盖及排气管。排气管为外径8毫米壁厚1毫米的退火镍管。其他零件均采用1Cr18Ni9Ti不锈钢。管壁厚度为2~2.5毫米,端盖厚度为5毫米。内外管之间的间隔为14毫米。端盖与内外管及排气管的一端用氩气保护的电弧焊焊接,排气管的另一端则在灌钠后用冷焊钳冷焊,冷焊头再用电子束焊加固。

毛细芯是由140目(丝径0.075毫米)的1Cr18Ni9Ti不锈钢网格组合而成。在外管内壁上用直径2.5毫米的不锈钢弹簧把芯子压紧在内壁上。芯子为五层网格,并点焊成整体,厚度1.5毫米(包括间隙)。在内管外壁面上包了两层网格,并用点焊直接焊在内管上。在两端盖内侧也各贴紧两层和它形状相同的网格。内外管之间设置了如图3所示的扇形搭桥片,其

一端（窄端）用点焊固定在內管的网格上，而另一端只略折边，依靠弹性使其与外管的网格接触。六个搭桥片均布于同一截面上。搭桥片之间为蒸汽通道。这样在这个横截面上的蒸汽流通面积约占全截面积的 $\frac{1}{4}$ 。沿轴向共有六排搭桥。在端盖与外管网格之间也有长方形连通桥四片。详见图4照片。

工质是经过蒸馏提纯的金属钠，灌注量为340克。

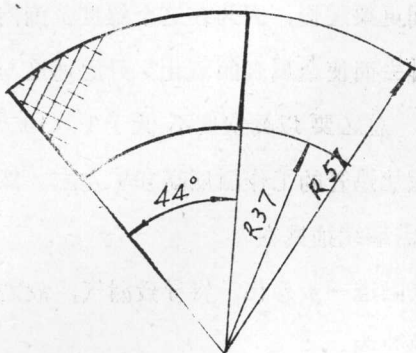


图3 搭桥片

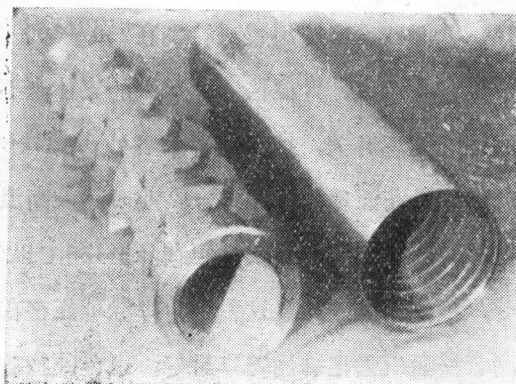


图4

热管制造工艺

热管制造工艺大致包括下列13项工序：

1. 机械加工：按图纸加工所有零件。
2. 清洗：目的是去掉零件表面的氧化层及油污，所有机械加工的零件均经碱水浸泡、酸液中和以及丙酮刷洗，这项清洗要反复进行，直至洗净为止。有条件时最好使用超声波清洗机，可以提高清洗质量。清洗后所有零件均需在清洁环境中保存。
3. 组装：把网格按要求整平、裁剪后用弹簧或点焊固定在壳体上。组装过程力求清洁。
4. 最后清洗：组装后再用丙酮把零部件在组装过程中沾染的油污或杂质清洗掉，并用蒸馏水冲洗，然后烘干保存。
5. 焊接：把内外管及排气管分别依次与端盖焊接。采用氩气保护焊，焊缝形式应按氩弧焊要求设计，焊缝不得漏气，焊接过程要尽量避免氧化。
6. 检漏：采用灵敏度为 5×10^{-10} 毛升/秒的6104A或JLH-1型氦质谱检漏仪反复检查所有焊缝，以确保焊缝的真空密封。如发现漏气，则必须予以补焊，直至完全不漏气为止。

止。

7. 除气: 为了保持热管的静真空, 热管在组装后灌钠前必须进行高温真空除气。除气的目的是去除吸附于金属表面以及存在于材料内部的气体。除气在真空炉内进行。抽真空的目的在于排去金属放出的气体并保证金属不氧化。对不锈钢来说, 真空度必须不低于 1×10^{-5} 毛, 方可避免金属表面的明显氧化。因此在整个除气过程中, 也就是升温、保温以及降温过程中均需保持不低于 1×10^{-5} 毛的真空度。除气时, 先把真空抽至 1×10^{-5} 毛, 然后开始加热。升温速度必须缓慢, 特别在 $250 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 之间更要缓慢, 因为在这个温度范围内不锈钢的放气量比较大, 升温快会使放出的气体来不及排去而使金属表面氧化。升温速度与真空机组的抽气速率有关, 抽气速率大者可升温快一些, 总之要以真空度不低于 1×10^{-5} 毛为准。升温到最高温度后保温 1—2 小时。最高温度应比热管的工作温度高 50°C 左右。然后开始降温, 降温速度可以很快, 但在降至 150°C 以前仍需继续抽真空。

8. 检漏: 由于除气过程中, 焊缝可能存在的缺陷进一步恶化, 将导致漏气, 故需再进行检漏。检漏后需把排气管口封好, 以免脏物进入热管内。

9. 灌钠: 这个工序实际上就是钠的蒸馏、注入以及冷焊等工序的统称。应按灌钠系统的操作规程进行。采用动真空蒸馏法, 即在蒸馏灌入的过程中系统一直在抽真空。机组的真空度应不低于 5×10^{-5} 毛。为了获得较高的真空度, 整个系统需在 $150 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 下烘烤。蒸馏完毕后继续抽真空。对本系统而言, 应在机组真空度到达 1×10^{-6} 毛后再抽 2—3 小时方可进行冷焊。冷焊是用冷焊钳把热管从系统中切断并封口的机械方法, 目的在于切断排气管时仍能保持热管内的真空。这是关系到热管能否制成的一项关键工艺, 操作时必须特别小心。冷焊后也应把冷焊口妥加保护, 使之不受机械碰击, 以免漏气破坏真空。

10. 焊接: 把排气管封口处用电子束焊接方法进行热焊加固。焊接在真空室内进行, 真空室内的真空度应不低于 5×10^{-5} 毛。这次焊接所使用的电子束电压为 20,000 伏。

11. 烘烤: 把热管置于炉内, 以 $5 \sim 6^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 的速度从室温加热至 700°C 左右, 保温 3—4 小时, 其目的是使工作介质均匀润湿毛细芯子。对等温热管来说, 烘烤工序的必要性问题有待进一步实践确定。

12. 喷涂: 外延炉炉体的发热体直接接触热管, 为了防止短路, 热管外表面必须涂以高温电绝缘层。若该涂层能够提高热管的抗氧化能力, 则应涂于全表面。用等离子喷涂法涂氧化铅细粉或用高温烧结法涂高温电绝缘珐琅层, 是目前认为可以采用的方法。

13. 测试性能。

综上所述, 热管制造工艺流程可用图 5 方框图来表示

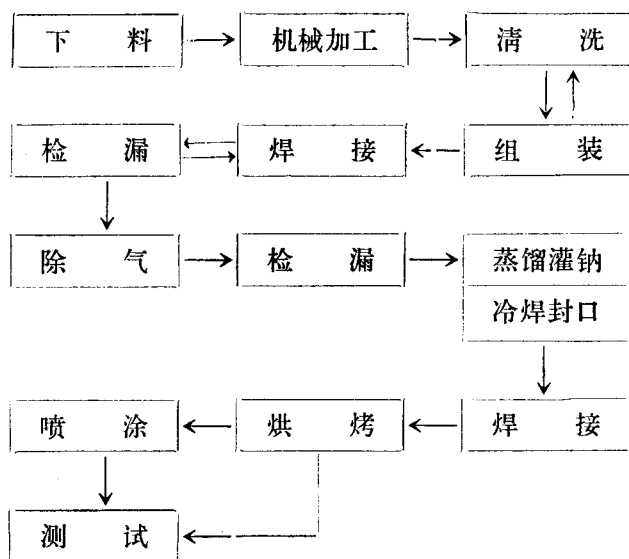


图5 热管制造工艺流程方框图

测试结果及分析

1. 测试方法及设备:

图6为测试系统示意图。系统主要由试验炉及测量设备两个部分组成。

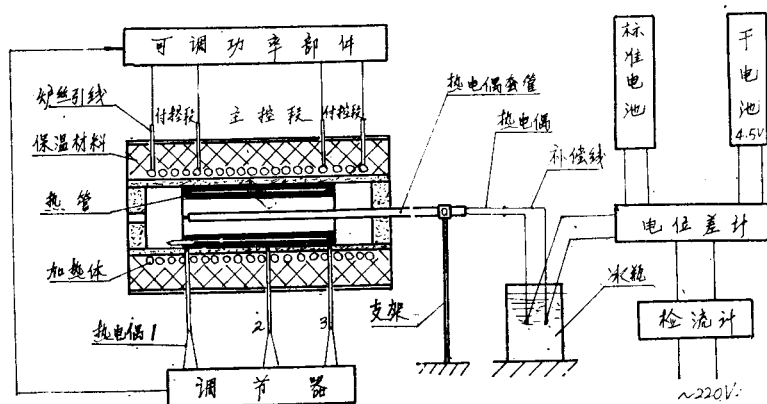


图6 热管测试系统示意图

试验炉是ZKL-1高精度自动控制温度的扩散炉^[3]，其炉膛口径为120毫米，炉体长度为1200毫米。热管置于炉膛中心。

测量设备包括：

铂—铂铈（10%）热电偶及补偿导线；

UJ 5 型低电阻直流电位差计；

AC9/3型直流复射式检流计；

冰瓶。

测量时将热电偶热接点放在所测部位，再用支架固定，用刻度为 1 毫米的钢板尺（或卷尺）确定热电偶的移动位置。

2. 测试内容、结果与分析：

（1）热管轴向等温性的测量：

步骤：（a）热管放入炉膛中心，按某一确定的温度开炉升温并保温。

（b）热电偶置于炉膛中心，开始时其热接点置于热管的一端。

（c）联接测试系统，测量该点温度，而后每次按 50 毫米为间隔沿轴向移动热电偶，依次测量相应各点的温度。

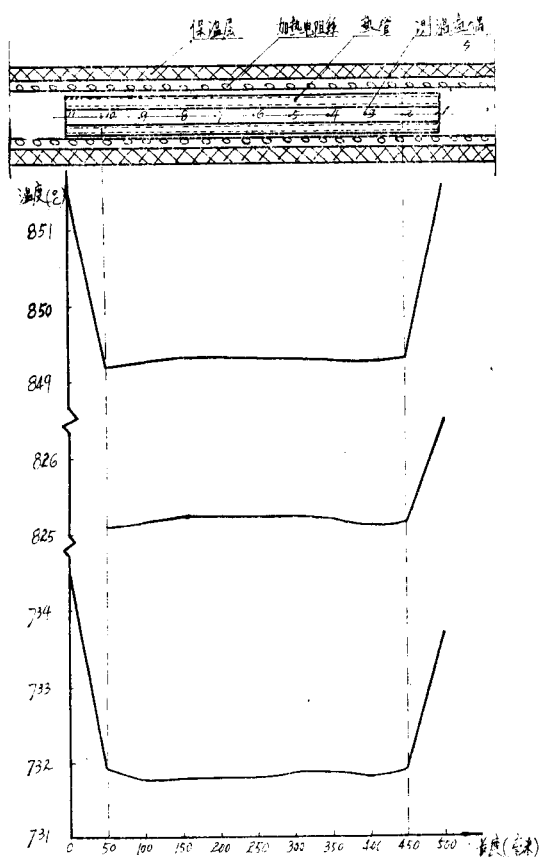


图 7 炉膛中心（有热管）轴向温度分布

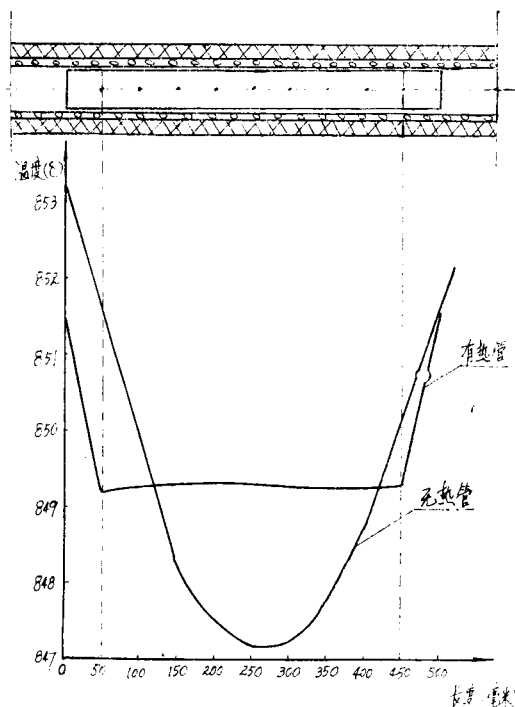


图 8 有热管与无热管时炉膛中心的轴向温度分布比较（控调不变）

(d) 调节炉子的副控定值, 改变温度分布, 使热管在400毫米长度内 (即热偶测点2与10之间) 的温差最小, 即调到最佳工况。

(e) 改变炉子的主控定值, 重复上述过程, 可测得热管在各种不同温度下中心的轴向温度分布。

结果: 测试结果列于表1与图7中。可以看出, 在400毫米长度内, 中心轴向温差均在 0.1°C 以下, 等温性很好。在热管的两端 (热偶测点1与11) 的温度比较高, 这是因为端部没有保温措施, 辐射损失很大。所以副控段需要加大功率, 提高热管两端温度才能补偿热管端部的辐射热损失。

(2) 有热管与无热管时, 炉内轴向等温性的比较:

(a) 在同一工况下, 炉温为 849°C 时, 把炉子调到有热管时的最佳工况, 测出轴向温度分布以后, 取出热管, 不改变其他参数, 待温度重新稳定后测量炉膛中心相应各点的轴向温度。测试结果列于表1和图8中。从图8可以清楚地看出, 当从炉膛内取出热管后, 由于炉子本身不是在最佳工况, 所以炉膛中心轴向温差很大, 在400毫米长度内温差达 $\pm 2.24^{\circ}\text{C}$, 等温区很短, 在中间200毫米长度内, 温差为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。而有热管时, 等温性大大提高, 在400毫米长度内炉膛中心轴向温差仅为 $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$ 。这说明了在端损失得到充分补偿的条件下, 热管可以把多大的温差拉平的能力。

(b) 均为最佳工况: 接着上面的试验, 调节炉子的副控定值, 使炉膛在无热管时中心轴向温差最小, 即最佳工况, 测出炉膛中心轴向温度分布。结果

列在表1与图9中。图9为均在最佳工况下有热管与无热管时, 炉膛中心轴向温度分布的比较。有热管时, 在400毫米内轴向温差为 $\pm 0.06^{\circ}\text{C}$; 无热管时, 轴向温差为 $\pm 0.41^{\circ}\text{C}$ 。这表明炉膛内有热管时炉子的等温精度比无热管时提高6.8倍。

(3) 横截面等温性的比较:

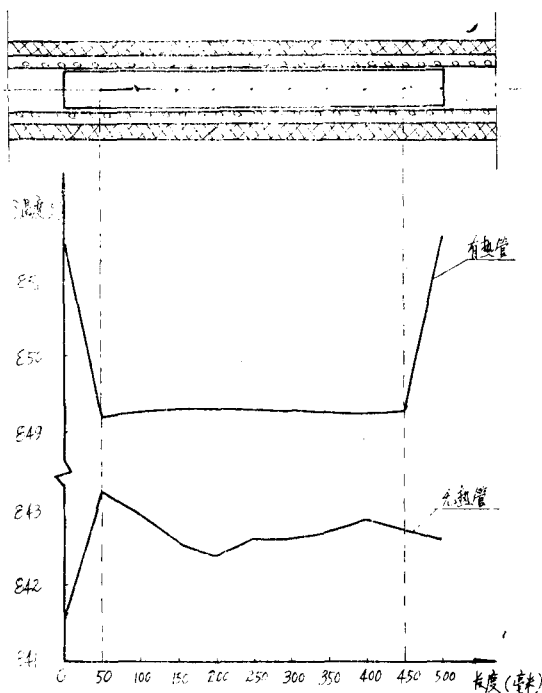


图9 有热管与无热管时炉膛中心轴向温度分布 (均在最佳控调情况下) 的比较

表一、热管（或炉膛）中心轴向温度分布数据表

工 况	工作温度	热 偶 测 点 (°C)										热偶 2 至10 间最大温度 差	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11
有热管	729°C	728.90	729.27	729.30	729.30	729.30	729.30	729.30	729.30	729.27	729.24	731.45	±0.04°C
	731°C	733.67	731.92	731.81	731.86	731.87	731.79	731.79	731.79	731.76	731.92	734.54	±0.08°C
	825°C	826.47	825.15	825.11	825.19	825.23	825.23	825.23	825.23	825.14	825.09		±0.069°C
	826°C	828.04	826.90	826.86	826.89	826.89	826.93	826.90	826.91	826.88	826.80		±0.063°C
	849°C	851.56	849.29	849.24	849.25	849.29	849.30	849.32	849.32	849.27	849.20	851.54	±0.060°C
无热管	842°C	842.60	842.73	842.85	842.69	849.59	842.60	842.39	842.56	842.93	843.20	841.54	±0.41°C
	850°C	851.64	850.23	848.76	847.77	847.22	847.16	847.51	848.21	849.95	851.64	853.22	±2.24°C

分别测量有热管和无热管时二个横截面上的温度分布（均在最佳工况下）。一个横截面是在热管的中间，即热偶测点6处，另一个横截面是在等温区的边缘，即离热管端部50毫米的热偶2处。无热管时，横截面的位置相当于有热管时的位置。以下简称这二个横截面为截面6和截面2。每个截面上测量五点温度。沿热管（或炉膛）内壁圆周方向每隔90°测量一点（由于热偶带有瓷套管，所以热偶测点离管壁约距0.5—3毫米），以及截面圆心一点，测量结果列入表2及图10图11中。图10中，纵坐标以管内壁温度与圆心温度之差表示。可以看出，有热管与无热管时，截面6上的径向最大温差（ $t_a - t_0$ ）分别为0.08℃和0.48℃。也就是有了热管后，截面6上等温精度提高了7倍。在截面2上，有热管与无热管时的最大温差分别为0.46℃和2.83℃。也就是有了热管后，截面2上等温精度提高5倍。由此可知，只要实

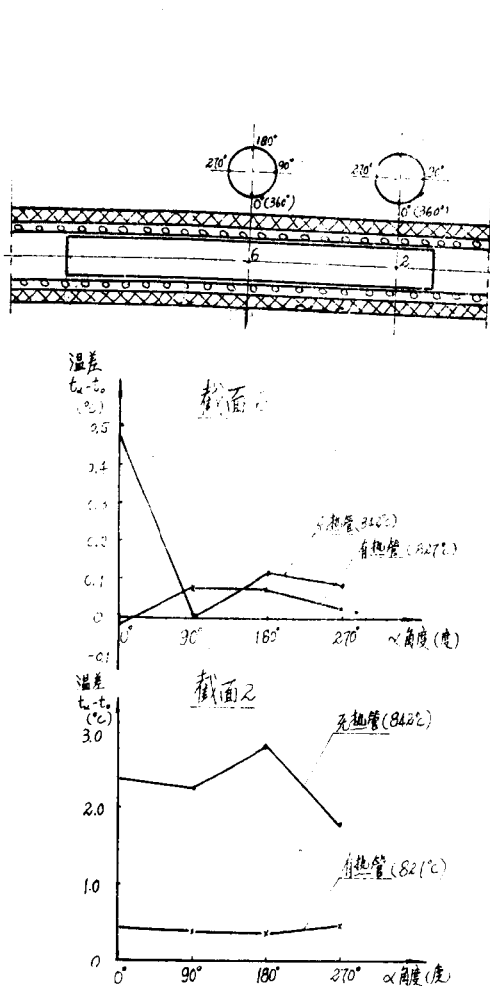


图10 有热管与无热管时横截面径向温差分布比较
 t_a —炉膛内壁附近（距内壁3毫米）的温度。
 t_0 —炉膛横截面上中心温度。

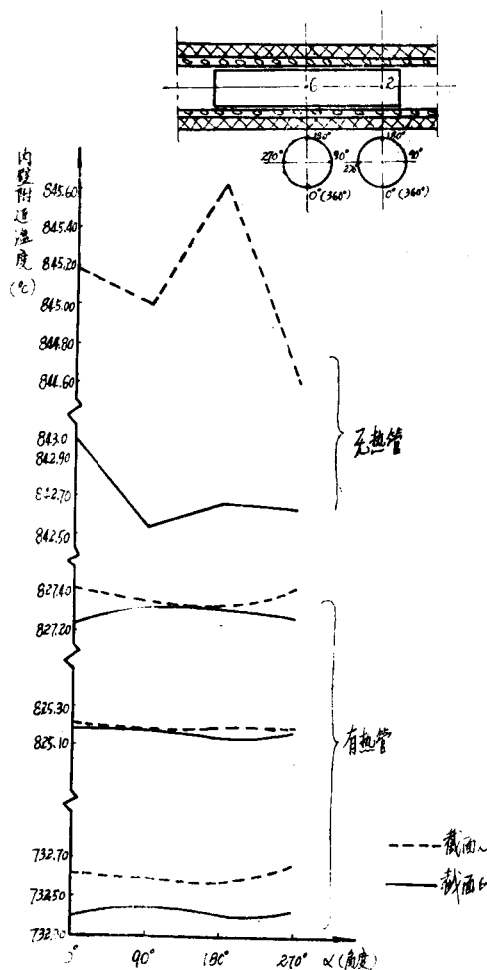


图11 炉膛内壁附近的周向温度分布（热偶测点离内壁3毫米）

表二、热管（或炉膛）内二个横截面上的径向温度分布数据表

工 况	工作温度 ℃	截面	热 偶 测 点 (℃)					(t _a - t ₀)最大
			横截面中心 t ₀	热管（或炉膛）内壁 (t _a)				
				0°	90°	180°	270°	
有 热 管	732	2	732.10	732.62	732.60	732.58	732.68	0.58
		6	732.35	732.39	732.44	732.42	732.44	0.09
	825	2	825.03	825.23	825.19	825.20	825.20	0.20
		6	825.11	825.19	825.19	825.10	825.19	0.08
	827	2	826.98	827.41	827.36	827.34	827.44	0.46
		6	827.25	827.23	827.33	827.33	827.28	0.08
	828	6	827.94	828.05	828.08	828.05	828.07	0.14
无 热 管	828	6	828.10	828.75	829.07	828.98	828.74	0.97
	842	2	842.80	845.19	845.05	845.63	844.60	2.83
		6	842.55	843.03	842.55	842.67	842.64	0.48

验炉本身在400毫米等温区内的等温精度达到 $\pm 0.50^\circ\text{C}$ ，则有了热管后，等温精度可以达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。由于辐射与空气对流的影响，圆心的温度比内壁温度低，截面2靠近热管端部，热损失更大些，影响了径向等温性。如果加强热管的端部保温，即在热管端部放置与热管同样直径的瓷套管，充分补偿端部热损失，则靠端部的径向等温性可进一步提高。

在图11中，纵座标以内壁附近温度表示。可以看出，热管内壁附近的温度分布曲线比较平，温差小于 0.1°C ，充分显示了热管本身的等温特性。而无热管时，炉膛内壁附近温度相差比较大，截面6上达 0.48°C ，截面2上达 1.03°C 。

结 束 语

1. 初步试验结果表明，炉膛内有热管时，在400毫米等温区内的等温精度比无热管时提高5—7倍。因此，如果实验炉本身在400毫米等温区内等温精度达到 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，则有了热管后，等温精度可提高到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，达到设计要求。

2. 此热管迄今已运行200小时，工作正常，现在仍继续进行寿命试验。如果制造热管的每一道工艺都很严格，热管的材料也能改用纯镍或高镍基合金钢，则热管的寿命可望延长。从初步试验结果可以预期，热管在等温炉领域内将得到推广应用。

补充：前面所述系用扩散炉及热电偶进行试验，由于炉子的稳定性和热电偶的测量精度还不够高，测出的等温精度是偏低的。因此以后又将热管放在专门制作的稳定性很高的外延炉（24小时内温度稳定性为 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ）内，用高精度的铂电阻温度计进行了测量。测量结果：在

400毫米长度内,温度为680℃时,等温精度为 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$, 约比无热管时提高25倍。结果见表三。

表三 试验炉为外延炉时炉膛中心的轴向温差 $\leq \pm 0.02^{\circ}\text{C}$
(用铂电阻温差计测量, 其测量长度为30毫米)

测点位置 (毫米)	(温差 $^{\circ}\text{C}$)	测点位置 (毫米)	温差($^{\circ}\text{C}$)
-200	0.002	50	0.02
-150	0.004	100	0.01
-100	0.016	150	0.012
-50	0.022	200	—
0	0.022	225	0.036

参 考 文 献

- [1] 外延炉简介
七机部五〇二所七室, 1975年6月
- [2] 外延炉等温热管设计图ZWL-1-1-0 (11-0) 或Hr-1,
中国科学院北京力学研究所热管组, 七机部五〇二研究所七室, 1975年
- [3] ZWC-1型自动控温扩散炉使用说明书,
七机部五〇二所七室 1973年
- [4] 复合芯子钠热管性能实验研究
中国科学院北京力学研究所热管组, 1974年
- [5] G. A. A. Asselman, D. B. Green, Heat Pipes, Philips Technical Review vol. 33, №4, 1973.
- [6] T. P. Cotter, Theory of Heat Pipes, LA-3246-MS 1965.
- [7] O. Brost, M. Groll, etc, Industrial Applications of alkali-metal heat pipes, International Heat Pipe Conference 1973, 11-3
- [8] Das Wärmerohr, Steuerungstechnik 1972, V. 5 №4
- [9] Application of heat pipes technology to crystal growth, Journal of Crystal Growth, vol. 13/14 May, 1972
- [10] C. R. Vidal, J. Cooper, Heat Pipe Oven: A new well defined metal vapor device for spectroscopic measurements, Journal of Applied Physics, vol. 40, July, 1969
- [11] M. M. Hessel, P. Jankowski, Two-metal heat pipe oven: operation, dynamics and use in spectroscopic measurements, J. Appl. Physics vol. 43, Jan., 1972
- [12] C. R. Vidal, F. B. Haller, Heat pipe oven applications,
I. Isothermal heater of well defined temperature
II. Production of metal vapor-gas mixtures Review of Scientific Instruments, vol. 42, №12, 1972
- [13] B. D. Marcus, On the operation of heat pipes, Adv. in Heat Transfer vor. 7, P. 307, 1971

附录：各项热阻分析

各项热阻是与各个传热过程相联系的，所以分析各个传热的物理过程，就可以得出相应的各项热阻的计算方法。下面简单分析一下热管蒸发区的几个传热过程。以圆柱形轴向热管为例。

1. 从热源到热管表面的传热；这个过程的传热方式可以是各种各样的，视加热方法而定。加热方法可以有热气体、热固体、热辐射、高频感应或电子轰击等。如果热量来自热气体，则传热方式为对流换热。它服从以下规律：

$$q = \alpha \Delta T$$

式中 q 为热流密度（即通过单位面积的热流量）， ΔT 为传热温差，即热气体与热管表面的温差。这时热阻的值按其定义可以下式表示：

$$R_1 = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{1}{\alpha F}$$

F 为热流通过的面积， $Q = qF$ 。

如果热源是热的固体时，例如管式炉中电炉丝与热管之间有陶瓷炉管，而炉管则与热管表面直接接触的情况。这时从炉丝到热管表面的传热过程为热传导，传热规律为

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta T$$

λ 为炉管材料的导热系数， δ 为炉管的厚度。热阻为 $R_1 = \frac{\delta}{\lambda F}$

对于热辐射热源，传热规律为

$$q = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

ε 为辐射物体的黑度， C_0 为绝对黑体的辐射系数。如果用一个当量的换热系数 α' 来表示热流与传热温差的关系， $q = \alpha' \Delta T$ ，则有

$$\alpha' = \frac{\varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\Delta T}$$

热阻为

$$R_1 = \frac{\Delta T}{\varepsilon C_0 F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]},$$

可见在辐射换热的情况下，热阻是温度的函数。