

可控硅超音频感应式中温黑体

赵勤尧

(华东电子管厂)

摘要——本文提出一种使黑体温度保持恒定和均匀的新方法，即可控硅超音频感应加热法。文中论述了可控硅超音频感应式中温黑体的工作原理，给出了设计方法。模拟实验表明，这类黑体是可供实用的。文中还分析讨论了超音频交流方波的感应磁场给黑体均温性测量带来的误差，给出了消除这类黑体对低噪声前置放大器的干扰的两个条件。

一、引言

自从一八六〇年基尔霍夫提出制作黑体所必须满足的条件以来，人们为了使黑体腔满足真正的等温条件而作了不懈的努力，先后出现过保持黑体温度恒定和均匀的三种方法：1) 电阻加热法；2) 恒温液流法；3) 热管加热法。美国标准局的低温黑体以及大多数中、高温黑体，都采用电阻加热控温的方法。也有部分黑体采用热管方法。然而，电阻加热不能使腔体得到均匀等温加热，热管加热和恒温液流法加热虽然可以对腔体进行均匀的等温加热，但无法抑制两头由于空气对流和热传导造成的变温区。

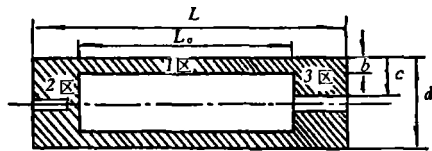


图1 感应黑体的腔体结构示意图

理想的加热方法必须具备以下两个条件：第一，对图1中的1区均匀加热；第二，对图1中的2区、3区均匀重加热，以补偿两头由于外界空气对流和热传导造成的能量损失，使中部恒温区不受破坏。可控硅超音频感应加热方法正是基于以上两点考虑提出来的。

二、设计思想

1. 依据

当交变电流通过感应器时，线圈的周围就感应出同样频率的交变磁场。由楞次定律可知，这个交变磁场在腔体上产生感应电动势，由于腔体的电阻很小，所以腔体上的感应电动

势就会在线圈的平面上(即与磁力线的轴垂直的平面上)产生涡电流 I_0 , 腔体中产生的涡电流密度在腔体的外表面上达到最大值, 沿着半径方向按指数衰减。涡电流的透入深度 Δ 可由下列公式计算^[4]:

$$\Delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}, \quad (1)$$

式中: ρ 为腔体的电阻率, μ_r 为相对导磁率, f 为工作电流的频率。

对圆柱型腔体而言, 产生涡流所需的最小工作频率为:

$$f_{\min} = 25 \times 10^8 \frac{\rho}{d^2}, \quad (2)$$

式中 d 为柱体外径。当频率足够高时, 腔体中的涡流 I_0 的相位将与感应器工作电流 I 的相位相反。 I_0 与 I 在数值上将相差一个因子 n , n 是感应器的线圈匝数, 即 $I_0 = In$ 。于是, 腔体中产生的热能为^[5]:

$$W_0 = 2\pi^2 I^2 n^2 \frac{d}{L} \sqrt{\rho \mu_r f \times 10^{-7}}, \quad (3)$$

式中 L 为腔体长度。

式(1)、(2)、(3)构成了超音频感应黑体的设计依据。若 $\Delta \leq b$, 则图1中的1、2、3区都均匀加热; 若 $b < \Delta \leq c$, 则图1中2、3区产生的涡流热比1区大, 这时部分电磁波透过1区; 若 $\Delta \gg d$, 则绝大部分电磁波透过1、2、3区, 整个腔体只产生很少的热量。

如果通过感应器的工作电流是如图2所示的交流方波, 则可以分解为各种频率成分的迭加:

$$i(\omega t) = \frac{8A}{J} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right), \quad (4)$$

其中每一种频率对应于一个透入深度, 由式(1)决定。只要改变交流方波的频率, 就可对腔体两头均匀加热的程度进行调节, 从而保证黑体在不同环境温度下都具有好的均温性。

2. 工作原理

图3是可控硅超音频感应黑体的原理框图。其中电源由交流稳压、可控整流、可控斩波、钳位器组成。由可控硅半控桥式整流得到的连续可调直流电压, 经可控硅斩波器和钳位器后, 输出频率在 $10 \sim 50$ kHz 范围内连续可调的交流方波。

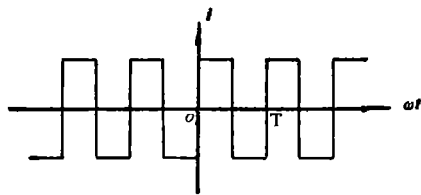


图2 工作电流波形

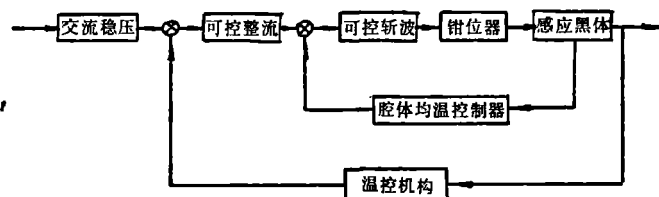


图3 可控硅超音频感应黑体的原理框图

腔体均温控制器实施腔体均温控制。在中温黑体的加热过程中, 若腔口处的温度梯度大于腔体均温控制器的灵敏度 k , 则腔体均温控制器发出信号, 驱使可控硅斩波的触发器相应动作, 降低交流方波的频率, 使两头加热加重。反之, 则腔体均温控制器使交流方波的频率增加, 两头加热减轻。这样, 在黑体工作期间, 腔体均温控制器始终把腔体两头的温度梯度控制在小于或等于 $\pm k$ 。温控机构实现黑体的温度控制。当黑体的温度不断变化时, 由

热敏元件输出的温度电信号,经比较后送入控温机构,驱使可控硅半控桥式整流的触发器动作,以便相应地调节输出电流,这种连续自动补偿使温度稳定在预期值上。这就形成了所谓变频、变幅复合连续式闭环自动控制。

3. 材料和结构

对于 500~1300 K 的中温黑体而言,铬镍钛(1Cr18Ni9Ti)不锈钢是一种合适的材料。它在高温氧化后,其热辐射效率可大大地提高,且近于漫反射体。表 1 给出了它在各种温度下氧化处理后的热辐射效率^[3]。不仅如此,1Cr18Ni9Ti 对于超音频感应加热也是适宜的,因为不锈钢属于奥氏体钢($\mu_r=1$),在可控硅超音频感应加热中不存在“环带效应”^[4]。

表 1 1Cr18Ni9Ti 在各种温度下氧化处理后的热辐射效率

温 度	300°C	500°C	750°C
ϵ	0.95	0.93	0.90

材料选定之后,可根据具体要求选取腔体直径 d 。由式(2)得出在一定的 ρ 、 d 下,产生涡流所需的最小频率 f_{\min} 。于是工作频率取为:

$$f_0 = \alpha f_{\min}, \quad (5)$$

其中 α 为常数, $\alpha=4.1\sim 4.8$ 。

令 $3f_0$ 时所对应的透入深度为 b , 由式(1)可得:

$$b = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r 3 f_0}} \quad (6)$$

$$c = \beta b, \quad (7)$$

其中 β 为常数, $\beta=8.4\sim 8.6$ 。

$$D = \frac{2L_0}{(d-2b)}, \quad (8)$$

其中 D 为腔长比,一般使 $8 \leq D \leq 10$; L_0 为空腔长。

因此,当 ρ 、 d 确定之后,式(5)、(6)、(7)、(8)就确定了黑体腔的基本结构。

4. 测温元件的埋设法

黑体控温机构的热电信号由温差电偶提供。均温控制器的热电信号由直径为 0.03mm 的铂电阻提供。图 4 给出测温元件的埋设示意图。

铂电阻按图 5(a)先绕制成栅型带状,然后卷成图 5(b)的圆筒状,形成栅型电阻。最后插入图 4 中的 2 处。均温控制器的热敏电阻埋设在腔口处,这是为了便于感受环境温度的变化,减小频率调节的惰性。显然,按图 5 方法绕制的铂电阻可

最大限度地减轻涡流的影响。这是因为涡流在垂直于磁力线轴的平面上流动,图 5(b)的栅状结构阻止了环绕圆筒截面的涡流形成,而把它限制在每根细丝的小截面上。作者曾用准确度为 $\pm 0.2\%$ 的 QJ 23 型便携式直流单电桥,在超音频交变磁场中,测量由涡流热引起的这个直径为 0.03mm 的铂丝栅状型热敏电阻的阻值变化。结果开机时的阻值与未开机时的阻值几乎不变。以后又在更高的频率和更高的功率下(8kW, 500kHz)进行这项实验,其

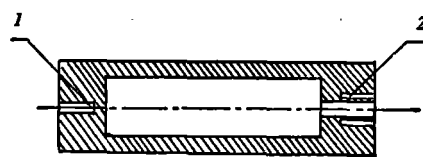


图 4 测温元件埋设示意图

- 1—控温机构温差电偶的埋设点;
- 2—均温控制器的铂电阻埋设点

阻值仍然基本不变。

因此,直径为 0.03mm 的铂丝栅状型热敏电阻,可直接埋设在感应加热炉腔体上。

5. “控制设定温度”和“控制设定均温性”的确定法

采用图 6 所示的装置,在室温为 20°C 的条件下,确定“控制设定温度”和“控制设定均温性”。

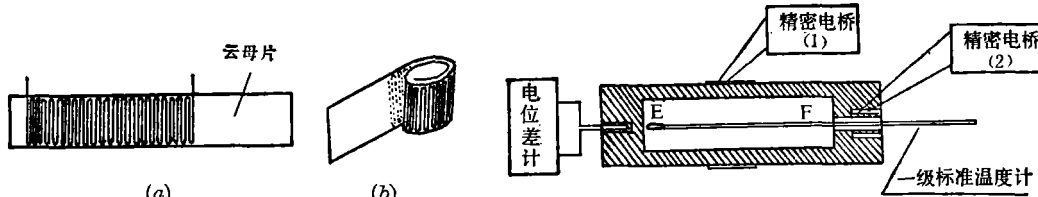


图 5 栅状型铂热敏电阻绕制示意图

图 6 确定自控参数的装置示意图

在黑体的升温过程中,当一级标准温度计的指示在 $(500 + \gamma) \text{K}$ 时 (γ 为修正系数),同时记下电位差计的指示值 V_0 和精密电桥 (1) 的阻值 R_{10} 。然后关机,并把一级标准温度计的测温点从 B 处移到 F 处。二十分钟后开机,待温度计指示在 450 K 时,开始调节频率。同时观察精密电桥 (1)、精密电桥 (2)、温度计,使 $R_1 = R_{10}$ 时,温度计的指示 T_F 尽量接近 $(500 + \gamma) \text{K}$, 并记下这时精密电桥 (2) 指示的阻值 R_{20} 。于是得到控制设定温度 V_0 和控制设定均温性 $k = 500 + \gamma - T_F$ 。这一方法不但简单,更重要的是所得结果几乎完全排除了涡流和系统的影响。

三、实际试验

按设计要求,腔体材料应选为铬镍钛 (1Cr18Ni9Ti) 不锈钢,作者限于条件,以黄铜作代用品 (铜的导磁率与不锈钢一样,并不影响黑体均温性的测定及其实用问题的验证)。感应器由直径为 1.2mm 的 QST 漆包线密排均匀绕制而成。共绕三层、550 匝,各层之间用云母片隔开。以手控变频为辅,配合连续式变幅闭环自动控温,使这个黑体的均温性达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。图 7 为这个中温黑体的原理框图。图 8 是可控硅超音频感应式中温黑体的结构示意图。图 9 给出这个黑体的响应曲线及动态指标。

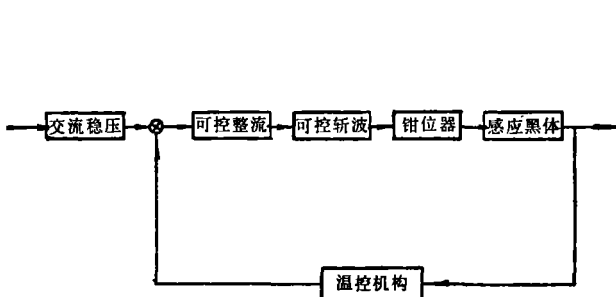


图 7 可控硅超音频感应式中温黑体的原理框图

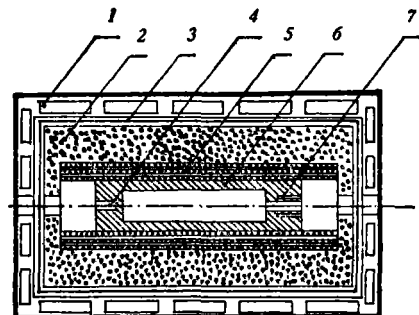


图 8 可控硅超音频感应式中温黑体结构示意图

1—水冷管; 2—绝热层; 3—电磁屏蔽层; 4—温差电偶埋设点; 5—感应器; 6—黑体腔体; 7—铂热敏电阻埋设点。

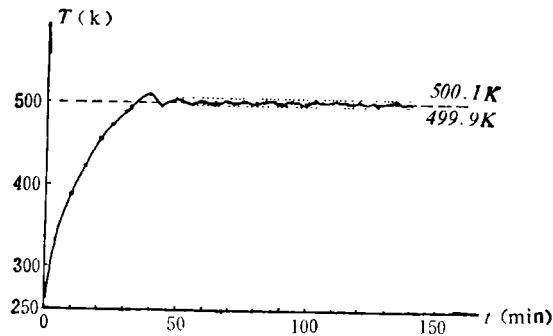


图9 可控硅超音频感应式中温黑体的响应曲线

四、温度均匀性讨论

我们采用文献[5]推荐的从腔底中心沿轴线测量黑体温度分布的方法,先用一级标准水银温度计进行了初步观察,发现温度计的指示随测温点的变化在 0.1°C 的范围内变动,无法读数。然后采用标准等级为0.05级的UJ33a型携带式直流电位差计,配以铂铑-铂温差电偶(自由端温度为 0°C)。在腔体未加绝热层、加绝热层和加绝热层且电磁屏蔽三种不同

表2 可控硅超音频感应式中温黑体的腔体温度分布

测量次序	第一次		第二次		第三次	
	电压(mV)	温度($^{\circ}\text{C}$)	电压(mV)	温度($^{\circ}\text{C}$)	电压(mV)	温度($^{\circ}\text{C}$)
0	1.6691	227.23	1.6622	226.36	1.6631	226.45
1	1.6691	227.23	1.6622	226.36	1.6631	226.45
2	1.6691	227.23	1.6622	226.36	1.6631	226.45
3	1.6692	227.24	1.6622	226.36	1.6631	226.45
4	1.6694	227.27	1.6623	226.37	1.6632	226.47
5	1.6694	227.27	1.6625	226.39	1.6634	226.49
6	1.6697	227.30	1.6625	226.39	1.6635	226.50
7	1.6700	227.33	1.6630	226.44	1.6639	226.54
8	1.6700	227.33	1.6630	226.44	1.6639	226.54
9	1.6698	227.31	1.6630	226.44	1.6639	226.54
10	1.6697	227.30	1.6629	226.43	1.6639	226.54
11	1.6695	227.28	1.6629	226.43	1.6637	226.52
12	1.6693	227.26	1.6627	226.41	1.6637	226.52
13	1.6692	227.24	1.6625	226.39	1.6635	226.50
14	1.6691	227.23	1.6622	226.36	1.6634	226.49
15	1.6690	227.22	1.6620	226.33	1.6632	226.47
16	1.6688	227.20	1.6619	226.32	1.6631	226.45

条件下, 分别从腔底中心沿轴线实测腔体各点的电压值以及相应的温度。得到相应的均温性结果, 分别为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.03^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 0.08^{\circ}\text{C}$ 。表 2 给出了腔体加绝热层且电磁屏蔽后的温度分布, 由此得到这个黑体的均温性结果如表 3 所示。

表 3 可控硅超音频感应式中温黑体的均温性

测量次序	第一次	第二次	第三次	平均
$ T_0 - T_{1/3} (^{\circ}\text{C})$	0.04	0.03	0.04	0.04
$ T_0 - T_{2/3} (^{\circ}\text{C})$	0.07	0.07	0.09	0.08
$ T_0 - T_{\text{腔口}} (^{\circ}\text{C})$	0.03	0.04	0.00	0.02
备注	T_0 为腔底的温度; $T_{\text{腔口}}$ 为腔口处的温度; $T_{1/3}$ 、 $T_{2/3}$ 分别为 $\frac{1}{3} L_0$ 和 $\frac{2}{3} L_0$ 处的温度, L_0 为腔长。			

涡电流密度由腔体表面向内沿径向按指数衰减。由电磁感应产生的涡流密度的分布随着频率的降低也有向圆柱形导体内部扩张的趋势。但无论在怎样低的频率下, 也得不到均匀分布的电流, 其中心线上的电流密度始终为零^[6]。当然, 温差电偶的工作端有一定的尺寸, 测温过程中又无法保证绝对的沿轴线移动, 因此, 温差电偶的工作端不可避免地存在涡电流。然而, 我们感兴趣的是: 由此产生的涡电流是否对测试结果有影响? 这个影响究竟有多大? 应该根据零件尺寸相对地理解电流频率的高低^[7]。对于我们采用的直径为 0.3 mm 温差电偶来说, 22 kHz 是低频。作者曾用图 10 所示的装置, 测量超音频磁场对温差电偶的影响, 在开机与未开机两种情况下, 分别测量图中 O 、 P 、 G 、 H 四点, 结果电位差计的指示值几乎不变。

从前面的分析可知, 由于腔体直径远大于温差电偶的直径, 在同一频率下, 腔体涡流热导致的温升总是远大于温差电偶电流引起的温升。测温过程中只要满足涡流效应对单位体积的温差电偶提供的涡流热始终低于对单位体积的腔体提供的涡流热, 那么, 涡流效应将不影响测温结果的准确性, 而我们这个测温系统恰恰是这种情况。

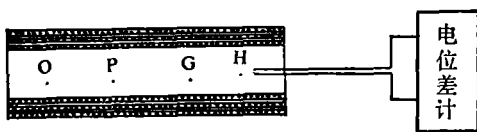


图 10 温差电偶涡流效应的测试装置

总之, 22 kHz 的交变磁场感应 0.3 mm 的温差电偶丝所产生的涡流热不会给这个温差电偶测温系统带来大的误差。

黑体的均温性是一个相对值。对于相对测量来说, 系统误差中不随时间变化的误差可以不考虑, 剩下的就是随时间有规律变化的误差。由于我们使用的 UJ 33a 型电位差计的灵敏度在 500 K 附近是 0.1 K , 而表 2 中三组测量值的最大温度不均匀性为 0.08 K , 可以认为这个可控硅超音频感应式中温黑体的均温性至少在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

五、电磁屏蔽问题

我们分别用厚 0.15 mm 的紫铜皮和厚 0.1 mm 的玻莫合金皮对感应黑体进行电屏蔽和磁屏蔽。以红外探测器 D^* 测试仪中的前置放大器(带宽 $3\sim 16\text{ kHz}$ 、放大倍数 530)和 50

元热象仪中的前置放大器(带宽 60~230 kHz、放大倍数 1000)作为例子, 试验感应加热对放大器的干扰影响。

红外探测器 D^* 测试仪前置放大器用紫铜皮和玻莫合金皮进行电、磁屏蔽。在输入端短路的情况下, 距感应黑体 1 m 和 0.5 m 处, 测得干扰电压为零。

50 元热象仪用前置放大器经黄铜皮和玻莫合金皮电磁屏蔽。在距离感应黑体 0.5 m 处, 当输入端接 8.2 k Ω 的金属膜电阻及将输入端短路时, 均测得超音频感应黑体对前置放大器的干扰电压为 0.2 μ V。

实验表明, 当前放带宽的上限小于超音频感应黑体的工作频率时, 感应黑体若采取紫铜皮和玻莫合金皮电磁屏蔽措施后, 可以完全消除超音频交流方波的干扰。此外, 还发现在这种屏蔽措施下, 使用铁质水冷壳, 不会产生发热问题。

电磁屏蔽问题是可控硅超音频感应黑体在使用中遇到的特殊问题, 可能影响低噪声前置放大器的正常工作。对此我们进行了初步的实验。

致谢——本文得到西北电讯工程学院技术物理系方湖宝副教授的指导以及白长城、许金伙、伍长恋和刘微等同志的支持。上海计量技术研究所朱国柱老师对作者用温差电偶测温的误差问题, 提供了许多宝贵意见。本文还得到华东电子管厂有关同志的支持。在此一并表示谢意。

参 考 文 献

- [1] 可控硅中频技术及其应用编写组, 可控硅中频技术及其应用, 电力工业出版社, (1981), 2~3.
- [2] 耶德聂拉尔 Ф. И., 电冶金学(上册), 龙门联合书局出版(1953), 327.
- [3] 李文书等, HTL-A/500 K 辐射源(中国光学学会红外探测器参数检测标准讨论会会议资料)(1981).
- [4] 洛津斯基 М. Г., 感应加热的工业应用, 上海科学技术出版社, (1962), 33~37.
- [5] 常 进, 中温黑体的鉴定和使用实验分析, 中国光学学会红外探测器参数检测标准讨论会会议资料, (1981).
- [6] 可控硅中频技术及其应用编写组, 可控硅中频技术及其应用, 电力工业出版社(1981), 3.
- [7] 福盖尔 А. А., 高频电流在工业上的应用, 上海科学技术出版社, (1962), 44.

AN ULTRASONIC-FREQUENCY-INDUCTION-TYPE MIDDLE TEMPERATURE BLACKBODY WITH SCR

ZHAO QINYAO

(East China Electron Tube Factory)

ABSTRACT

A new method to keep the temperature of a blackbody constant and homogeneous, i.e., a heating method using silicon controlled rectifier by ultrasonic-frequency-induction, is advanced in this paper. The operating principle of the ultrasonic-frequency induction-type middle temperature blackbody is dealt with, and the design method of it is given. It is shown from a series of analogue experiments that this kind of blackbody can be used in practical applications. The error caused by the induced magnetic field of the ultrasonic-frequency alternating square wave in the measurement of the temperature homogeneity of the blackbody is analysed and discussed. In order to eliminate completely the interference from this kind of blackbody with the low-noise preamplifier, two conditions should be ensured, and they are also given in the paper.