

一种抗环境热辐射的热偶真空规

赵新华

(北京市计量科学研究所)

内容提要: 热偶真空规受外界环境热学因素的影响较大, 一直作为粗低真空的测量仪器使用。以前认为影响测量精度的因素是环境温度变化, 而通过实验研究和分析则认为, 影响热偶真空规测量精度的主要因素之一是环境热辐射。介绍了设计出的一种抗环境热辐射的热偶规。

主题词: 真空规、热辐射、真空测量。

一、环境因素对热偶真空规的影响

在我国近十万台的真空计中热偶真空计约占三分之一。与这些真空计配套使用的热偶真空规年产约十万支。其第一代产品是ZJ—51系列, 第二代为ZJ—51B~C和ZJ—53B~C系列。第二代产品在测量范围、测量精度、响应时间、抗污染能力等方面已达到国外同类产品水平。但是, 热偶真空规受环境因素的影响较大, 测量精度较低。传统的观点认为影响热偶真空规测量精度的因素主要是环境温度的变化。

为了验证环境温度的影响, 采用白炽灯照射玻璃热偶真空规的方法以改变规的环境温度。取一支开封的规, 通以一定的加热电流, 定为试样1[#]; 一支未开封的规通以一定的加热电流, 定为试样2[#]; 一支未开封的、不通加热电流的规, 定为试样3[#]。将三种样规在环境温度为20℃时放在总功率为100W的两只白炽灯下照射。记录照射时间、环境温度变化及各样规输出的热电势如表1所示。

表 1

照射时间(min)	0	6	11	18	26	35	终止光照	冷光源照射
环境温度(℃)	20	25	30	35	40	45	45	20
1 [#] 试样输出的热电势(mV)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
2 [#] 试样输出的热电势(mV)	7.4	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	7.4	7.4
3 [#] 试样输出的热电势(mV)	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0	0

当白炽灯打开后, 环境温度随白炽灯的热传导及热辐射逐渐升高。1[#]试样输出的热电势没有变化; 2[#]试样输出的热电势逐渐增大后进而保持不变; 3[#]试样输出的热电势由零增至0.6mV后保持不变。环境温度与各样规输出的热电势的关系如图1。

由图1可见, 虽然环境温度对2[#]、3[#]规

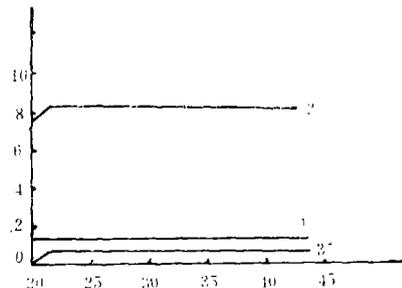


图1 环境温度对热电势的影响

的起始热电势有一定的动态影响,但在环境温度由25℃上升到45℃的过程中各样规输出的热电势并没有变化,因而环境温度对热偶真空规的影响并没有人们想象的那么大。在45℃时终止光照,此时环境温度仍为45℃。而2*、3*样规输出的热电势立刻恢复到20℃时的情况,故得出结论,环境温度的动态变化不影响热偶真空规。

究竟是什么因素在光照0~6min内影响了2*、3*规的输出热电势?分析白炽灯的工作机理,白炽灯工作时产生:1.热量。热量使环境温度升高,该因素可排除。2.热辐射。3.光辐射。在和表1同样的试验条件下,用冷光源照射样规1*、2*、3*,各规输出的热电势没有变化。可见单纯的光辐射对热偶真空规没有影响,有影响的只是热辐射。

二、热辐射对热偶真空规的影响

热偶真空规是热传导型真空规的一种,其结构如图2所示。规管中一根通以恒定电流的加热丝FF'与气体进行热交换,连同自身的辐射将其热量逸散于环境中。另有一个由金属a、b构成的小热电偶AB,通过一短金属丝与加热丝的中点D相接触。

其热电势可表示为

$$\varepsilon_{AB} = \pi_{ab} + \int_{T_0}^{T_1} (\sigma_a - \sigma_b) dT \quad (1)$$

式中, π_{ab} 为Peltier电动势, T_1 、 T_0 分别为热电偶热端C和冷端(环境)温度, σ 为金属的Thomson系数。在一次近似下可表示为

$$\varepsilon_{AB} = \alpha (T_1 - T_0) \quad (2)$$

式中, α 为热电偶的温差电动势系数。对于常用的康铜—镍铬合金,在常温到100℃间,大约 $\alpha = 56 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

热偶真空规中的热偶丝直径约0.05~0.08mm,其支杆直径约0.8mm,有良好的热导性能。故可以认为热电偶与支杆端接处(A、B点)的温度为环境温度 T_0 ,而热点温度 T_1 与加热丝的温度 T_i 有关。

在压力低于 $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{Pa}$,即达到了热偶真空规在工作压力下限时,气体的热传导可以忽略。通常热电偶的温度在150℃以下,其自身的辐射损失可忽略不计。这时加热丝与热电偶间的热交换仅取决于短金属丝的热传导。这样,为了计算热偶C点的温度 T_1 ,可合并a、b为一均匀的金属丝OC,加热丝FF',合并为DE,并认为短金属丝CD与OC、DE具有相同的性质。其温度传导率皆为K。

$$K = \frac{k}{\rho C} \quad (3)$$

式中, k 为导热率; ρ 为材料密度; C 为比热容。

从而可以考虑如图3的一维热传导过程。

现考虑热偶真空规处于均匀的光热辐射场中,这时热电偶单位长度在单位时间内接受有辐射热量下,可得有源热传导方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} - K \nabla^2 u = f \quad (4)$$

式中 $f = F/\rho c$; u 为 x 点的温度。在热平衡下 u 对 t 的偏导数等于零,即得稳定的温度分布如

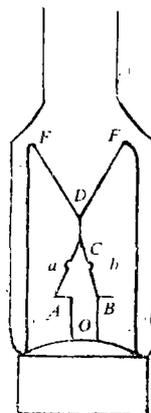


图2 热偶真空规的结构示意图

Poisson方程

描述

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -f/K \quad (5)$$

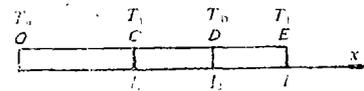


图3 一维热传导模型

其边界条件可认为 $u|_{x=0} = T_0$ 和 $u|_{x=l} = T_f$ 。此处 l 为 OE 的长度。

可解得温度的分布函数为

$$u(x) = (l-x)xf/2K + (T_f - T_0)x/l + T_0 \quad (6)$$

设 OC 长度为 l_1 ，令 $x=l_1$ ，可求得热电偶热端 C 的温度为

$$T_1 = (T_f - T_0)l_1/l + T_0 + (l-l_1) \cdot f \cdot l_1/2K \quad (7)$$

显然前两项是 T_0 和 T_f 的线性项，第三项为热辐射的贡献。将式(7)代入式(2)，可得温度稳定时的热电势为

$$\varepsilon_{AB} = \alpha(T_f - T_0)l_1/l + \alpha(l-l_1) \cdot f \cdot l_1/2K \quad (8)$$

该式可简化为

$$\varepsilon_{AB} = \alpha_1 \cdot \Delta T + \alpha_2 \cdot L \quad (9)$$

ΔT 为 $(T_f - T_0)$ ，即加热丝与环境的温差； L 为环境热辐射的强度。可见热偶真空规的热电势由两部分组成，一部分为正比于加热丝与环境的温差，另一部分为正比于环境热辐射的强度。当气压较高时，气体的热传导成为主要的热损耗方式。这时环境热辐射对热电势输出的影响被大大削弱了。表1的实验中，1[#]试样输出的热电势便没有变化。

在环境温度基本恒定和背景光热辐射可以忽略的情况下，以色温为2900K的钨丝光源为辐射点源。调节光源与热偶真空规的距离 r ，可以获得不同的辐射通量强度

$$L = P/4\pi r^2 \quad (10)$$

式中， P 为光源的热功率。显然，式(4)中的 f 正比于 L 。用不同的辐射通量强度 L 照射试样2[#]、试样3[#]，可得出热电势与辐射通量强度 L 的关系如图4。

图4的实验结果是在环境温度基本不变的条件下得出的，即热电势与辐射通量强度基本成线性关系，这就验证了式(9)的可靠性。若以热偶真空规输出的热电势为不变量，调节加热电流与辐射通量强度 L 的关系，可得到图5的实验结果。

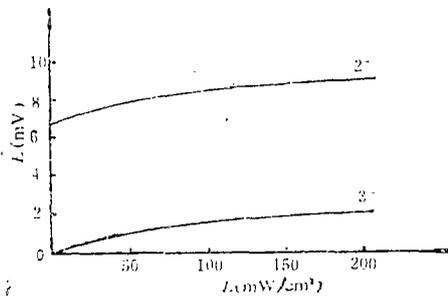


图4 热电势与辐射通量强度的关系

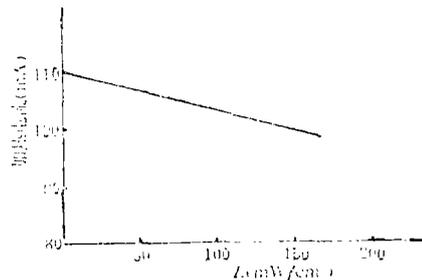


图5 加热电流与辐射通量的关系

从理论分析及实验结果来看，在热偶真空规的压力测量下限，热辐射对其影响是很大的。当 $L=200\text{mV}/\text{cm}^2$ 时，使热电势产生的偏差达 2mV 。对应于热偶真空规的测量值可相差两个数量级。为此，必须对现有的热偶真空规做改进设计。

三、抗热辐射型热偶真空规

一种改进型热偶真空规不久前已经出现¹。该规力图改善热偶真空规对环境的热学因素影响。但在表1的实验条件下,该种规输出的热电势产生的偏差仍有0.2mV。

要消除热辐射对热偶真空规的影响,必须在加热丝和热电偶外增设一屏蔽层,使环境热辐射被屏蔽于加热丝和热电偶以外,这样热辐射就无法作用于加热丝和热电偶上了。为此设计了三种形式的抗热辐射型热偶真空规。

1. 玻璃壳外屏蔽型

在现有热偶真空规的玻璃壳外表面增设一屏蔽层(图6)。屏蔽层的长度要从管基起直达管颈,并且完全封闭,以确保屏蔽管芯。

2. 玻璃壳内表面屏蔽型

在普通热偶真空规的玻璃壳内表面增设一屏蔽层(图7)。屏蔽层长度及封闭要求同外表面屏蔽型相同。

3. 玻璃壳内屏蔽型

在现有热偶真空规的玻璃壳内和管芯外增设一金属屏蔽罩(图8)。金属屏蔽罩的长度要长于管芯,并确保能屏蔽管芯。

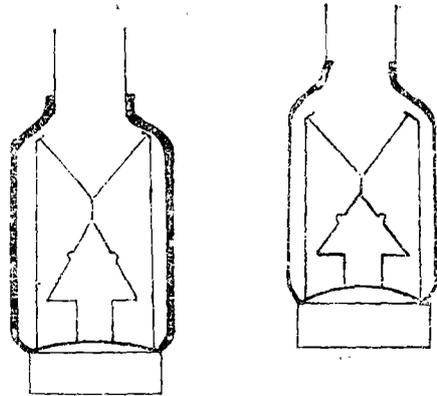


图6 玻璃壳外屏蔽型抗热辐射热偶真空规

图7 玻璃壳内表面屏蔽型抗热辐射热偶真空规

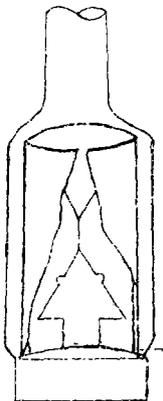


图8 玻璃壳内屏蔽型抗热辐射热偶真空规

取一种抗热辐射的热偶真空规两支,一支通以一定的加热电流定为试样4#,另一支不通加热电流定为试样5#。在环境温度为20℃时做与表1同样的试验,记录辐射时间、环境温度及各样规的输出热电势列于表2。从表2的试验结果来看,抗热辐射热偶真空规不受热辐射影响及环境温度的影响。

表2

照射时间(min)	0	6	11	18	26	35
环境温度(℃)	20	25	30	35	40	45
4#试样输出的热电势(mV)	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
5#试样输出的热电势(mV)	0	0	0	0	0	0

与抗热辐射热偶真空规配套使用的高精度新型数字热偶真空计已研制成功²,其测量误差小于±10%,即将投入批量生产。

参考文献

- 1 罗世敏. 一种改进型热偶规管. 真空与低温, 1990, 9(4): 10
- 2 赵新华, 陈曦. 仿真技术在真空工程中的应用. 真空与低温, 1991, 10(4): 10