

# 低温装置中温度测量的热沉问题

白红宇

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230031)

TB942

TH 811

**【摘要】**文中讨论了低温装置中的热沉问题。为减少因电引线导热对温度计的热负荷, 提高温度测量的精度, 在温度计的引线中加入热沉将是非常必要而且有效的手段。文中解决了不同边界条件下所需的热沉长度的求解问题, 并讨论了其实际应用。

**关键词:** 热沉, 温度测量, 低温装置

温度计, 电引线, 精度

10-14  
②

## 1 引言

温度测量是基于温度传感器于被测物体之间达到热平衡, 即温度相同来进行的。然而在低温装置中, 各种漏热, 如固体传导热、残余气体导热及辐射热总是存在的, 对于温度计, 还存在自热问题, 所有这些热负荷都会导致温度计与被测物体之间存在一定的温差。要实现温度的精确测量, 必须尽量减少这一温差。减少温度计与被测物体之间的温差, 共有两条途径: 一是减小温度计与被测物体之间的热阻, 在低温下, 尤其是在高真空环境中, 物体间的热接触往往较差, 而且温度计与被测物体间是电绝缘的, 电绝缘的材料导热性一般较差, 这些使得减少温度计与被测物体之间的热阻受到限制; 另一途径则是减少温度计上的热负荷。下面我们以工作于液氮温度的 TVO 温度计为例, 对它的各种热负荷进行比较。

表 1

	热负荷数量级	计算条件
热辐射	$10^{-6} \text{W}$	从 80K 到 4.2K, 辐射率为 0.1, 面积 $A = 5 \text{mm}^2$
残余气体导热	$10^{-7} \text{W}$	从 80K 到 4.2K, 真空为 $1.0 \times 10^{-6} \text{mbar}$ , 面积 $A = 5 \text{mm}^2$
温度计自热	$10^{-7} \text{W}$	电流 $I = 8 \mu\text{A}$ , 温度计电阻 $R = 3 \text{k}\Omega$ (4.2K)
电引线导热	$10^{-4} \text{W}$	4 根铜引线从 80K 到 4.2K, 长 1m, 直径为 0.1mm

由上表可知, 电引线导热比其它热负荷高 2~3 个数量级。所以要减少温度计上的热负荷, 首先要减少由电引线导入温度计的热量。自然我们可以增加电引线的长度来减少其导热, 然而我们将看到此方法并不可取, 而利用热沉将很好的解决此问题。

热沉问题就是如何有效的将电引线的导热沉积在热沉上, 从而减少甚至消除由引线传导至温度计上的热量。它是一个同时要保证良好的热接触和电绝缘的问题。

## 2 热沉模型及其分析

• 本文于 2000 年 4 月 24 日收到。

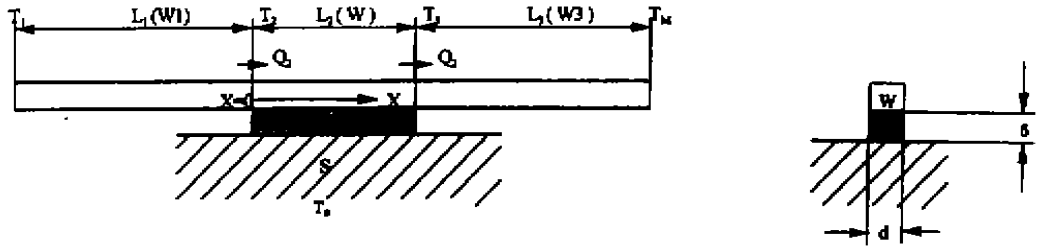


图 1 热沉分析模型简图

电引线与热沉之间的安装简图如图 1 所示。在此模型中, 温度计的电引线被分成三段: W1, W, W3。高温段 W1, 它长度为  $L_1$ , 其两端温度为  $T_1, T_2$ , 热量从高温端  $T_1$  传导至低温端  $T_2$ 。中间段 W, 即热沉段, 为附着在热沉上的电引线部分, 它与热沉 S (温度为  $T_0$ ) 之间保持良好的热接触, 其长度为  $L_2$ 。中间段于热沉 S 间由一层绝缘材料 C 隔开, 其厚度为  $\delta$ 。末段 W3 为从热沉到温度传感器的引线, 它与热沉连接的一端温度为  $T_3$ , 与温度计连接的一端温度为  $T_M$ ,  $T_M$  则是所测量的温度。这里将以此模型分析不同边界条件下, 为减少或消除由电引线导入温度计的热量, 得出所需要附着在热沉上的电引线的长度  $L_2$  的计算公式。

由于热辐射、气体导热和电引线自热相对于传导热都很小, 这里我们忽略它们的影响。由于引线段 W 的热导率  $k_w$  远大于材料 C 的热导率  $k_c$ , 因此中间段 W 的传热可以被看作是一维导热问题。根据一维导热方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$\dot{q}$  是物体单位体积的产热率。在这里,  $\dot{q}$  则为引线 W 单位体积通过隔膜 C 传给热沉 S 的热量, 即  $\dot{q} = -k_c d \frac{\theta}{\delta} \frac{1}{A_w}$  (2)

$\theta$  为引线温度与热沉温度  $T_0$  之差, 即  $\theta = T - T_0$ ,  $d$  为隔膜 C 导热的有效宽度,  $A_w$  为引线 W 的横截面积。

对于稳态导热,  $\partial T / \partial t = 0$ , 若  $k_w$  为常数, 则方程 (1) 可化为

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} = \frac{1}{\alpha^2} \theta, \text{ 其中 } \alpha = \left( \frac{k_w A_w \delta}{k_c d} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$\alpha$  为特征长度, 它具有长度量纲。

方程 (3) 的通解为:  $\theta = C_1 e^{\frac{x}{\alpha}} + C_2 e^{-\frac{x}{\alpha}}$

$C_1$  和  $C_2$  为常数, 其值有引线热沉段 W 两端的边界条件确定。

J. G. Hust 采用如下边界条件<sup>[1,2]</sup>, 首先给出了求解所需引线附着在热沉上长度  $L_2$  的方法。

$$(1) \ x = L_2, \theta = \theta_3; \quad (2) \ x = L_2, d\theta/dx = 0$$

于是得到引线 W 段的温度分布

$$\theta = \frac{\theta_3}{2} \left( e^{\frac{x-L_2}{\alpha}} + e^{-\frac{x-L_2}{\alpha}} \right) = \theta_3 \cdot \text{ch} \frac{L_2 - x}{\alpha} \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\theta_3}{2\alpha} \left( e^{\frac{x-L_2}{\alpha}} - e^{-\frac{x-L_2}{\alpha}} \right) = -\frac{\theta_3}{\alpha} \cdot \text{sh} \frac{L_2 - x}{\alpha} \quad (6)$$

根据上式的温度梯度可得出 W1 段与 W 段连接处, 即  $x = 0$  处的热流量

$$Q_1 = -k_w(T_2)A_w \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{k_w(T_2)A_w\theta_3}{\alpha} \operatorname{sh} \frac{L_2}{\alpha} \quad (7)$$

于是, 若已知  $\theta_3$ , 如为 0.001K, 则可计算出所需热接触的长度  $L_2$

$$L_2 = \alpha \cdot \operatorname{arsh} B = \alpha \cdot \ln(B + \sqrt{B^2 + 1}) \quad (8)$$

这里,  $B = \frac{\alpha Q_1}{k_w(T_2)A_w\theta_3}$ ,  $Q_1$  就是从温度  $T_1$  通过引线 W1 传至  $T_2$  的热量,

$$Q_1 = \frac{A_{w1}}{L_1} \int_{T_2}^{T_1} k_{w1}(T) dT \quad (9)$$

如果  $B \gg 1$ , 则等式(8)简化为  $L_2 = \alpha \cdot \operatorname{arsh} B = \alpha \cdot \ln(2B)$

由于热导率  $k_w$  与温度有关, 而  $T_2$  开始是未知的, 我们可假设它接近于  $T_3$ , 从而就可求出  $L_2$ 。这第一次求出的  $L_2$  值已有足够的精度。如果要得到更为精确的  $L_2$ , 则可将第一次求得的  $L_2$  代入式(5)中, 求得  $T_2$ , 再根据式(8)第二次计算出  $L_2$ 。如此重复迭代计算几次, 就可得到比较精确的  $L_2$  值。

根据上面的边界条件, 当  $x = L_2$  时,  $d\theta/dx = 0$ 。但事实上,  $d\theta/dx \Big|_{x=L_2} \neq 0$ 。即边界条件应为

$$(1) x = L_2, \theta = \theta_1; (2) x = L_2, \frac{d\theta}{dx} = -\frac{Q_2}{k_w(T_3)A_w}$$

$Q_2$  为引线热沉段 W 与引线末段 W3 之间的导热热量。于是

$$T_3 = \frac{Q_2 L_3 (T_3 - T_M)}{A_{w3} \int_{T_M}^{T_3} k_{w3}(T) dT} + T_M \quad (11)$$

若  $T_0 = T_M$ ,  $k_{w3}(T_3) \approx k_{w3}(T_M)$ , 根据上式可得

$$\theta_1 = \frac{Q_2 L_3}{A_{w3} k_{w3}(T_3)} \quad (12)$$

$$\frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=L_2} = -\frac{\theta_1}{L_3} \quad (13)$$

于是根据式(4), 可得

$$\theta = \theta_3 \cdot \operatorname{ch} \frac{L_2 - x}{\alpha} + \frac{\alpha \theta_1}{L_3} \cdot \operatorname{sh} \frac{L_2 - x}{\alpha} \quad (14)$$

$$Q_1 = -k_w(T_2)A_w \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{k_w(T_2)A_w\theta_3}{\alpha} \left( \operatorname{sh} \frac{L_2}{\alpha} + \frac{\alpha}{L_3} \operatorname{ch} \frac{L_2}{\alpha} \right) \quad (15)$$

$L_2$  有如下的唯一解,

$$L_2 = \alpha \cdot \ln \left[ (B + \sqrt{B^2 + 1 - (\frac{\alpha}{L_3})^2}) / (1 + \frac{\alpha}{L_3}) \right] \quad (16)$$

当  $L_3 = 0.1 \text{ m}$  时,  $L_2$  与  $\alpha$  和  $B$  的关系如图 2 所示。若已知  $\alpha$  和  $B$  的值, 则可根据此图查得所需的热沉长度  $L_2$ 。若  $L_3 \gg \alpha$ , 则式(16)可简化为

$$L_2 = \alpha \cdot \operatorname{arsh} B = \alpha \cdot \ln(B + \sqrt{B^2 + 1}) \quad (17)$$

这一结果与前面得到的等式(8)相同。

若  $B \gg 1$ , 则式(16)简化为  $L_2 = \alpha \cdot \ln[2B / (1 + \frac{\alpha}{L_3})]$  (18)

当  $L_3 \gg \alpha$ , 且  $B \gg 1$ , 则  $L_2 = \alpha \cdot \operatorname{arsh} B = \alpha \cdot \ln(2B)$ , 此式与等式(10)一致。

### 3 热沉的应用

这里以测量温度为 4.2K 的温度计的安装为例来说明热沉的应用。

假设其铜引线从 300K 到 4.2K 共有两个热沉,一个温度为 80K,另一个温度为 4.2K。若我们用 AWG28/7 铜引线,它由 7 根直径为 0.127mm 的铜线绕成,热沉粘合处绝

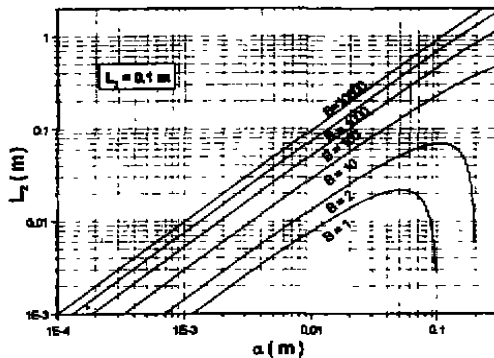


图 2  $L_3 = 0.1\text{m}$  时,长度  $L_2$  与  $\alpha$  的关系  
(参照式(16))

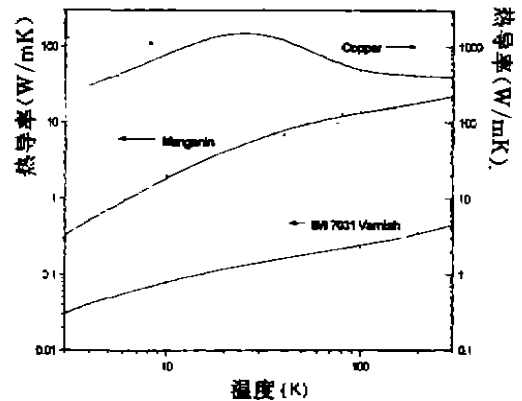


图 3 电解铜、Manganin、IMI7031 漆的热导率  
与温度的关系<sup>[3,4]</sup>

缘材料选用 IMI7031 漆。它与铜的导热率如图 3 所示。假设引线从 300K 到 80K 热沉以及从 80K 热沉到 4.2K 热沉长度均为 0.5m。

对于 80K 热沉,引线的截面积  $A_{w1} = A_w = A_{w3} = 8.9 \times 10^{-8} \text{m}^2$ ,  $L_1 = L_3 = 0.5\text{m}$ 。假设  $T_2$  接近于 80K,于是从 300K 传导至 80K 的热量  $Q_1 = 0.016\text{W}$ ,  $K_w(T_2) = 600\text{W/m} \cdot \text{K}$ ,  $K_c(T_2) = 0.23\text{W/m} \cdot \text{K}$ ,  $\delta = 0.1\text{mm}$ ,  $d = 7 \times 0.127 = 0.89\text{mm}$ 。则  $\alpha = 0.0051\text{m}$ 。若  $\theta_3 = 0.1\text{K}$ ,则  $B = 15.3$ 。根据公式(10)计算得所需的热沉段长度  $L_2 = 17.5\text{mm}$ 。

对于 4.2K 热沉,  $A_{w1} = A_w = A_{w3} = 8.9 \times 10^{-8} \text{m}^2$ ,  $L_1 = 0.5\text{m}$ ,  $L_3 = 0.1\text{m}$ 。假设  $T_2$  接近于 4.2K,于是  $Q_1 = 0.0135\text{W}$ ,  $K_w(T_2) = 350\text{W/m} \cdot \text{K}$ ,  $K_c(T_2) = 0.04\text{W/m} \cdot \text{K}$ ,  $\delta = 0.1\text{mm}$ ,  $d = 0.89\text{mm}$ 。则  $\alpha = 0.0094\text{m}$ 。若  $\theta_3 = 0.001\text{K}$ ,则  $B = 4074$ 。根据公式(18)计算的所需的热沉段长度  $L_2 = 84\text{mm}$ 。此时传导至温度计上的热负荷  $Q_2 = 3 \times 10^{-7}\text{W}$ 。

由上可知,从 300K 到 4.2K 引线总长约为 1.2m,此时从引线导入温度计上的热负荷量级为  $10^{-7}\text{W}$ 。若不用热沉,要使热负荷降低到同样的程度则需引线长为 48km,所以利用热沉可以有效的减少温度计上的热负荷。

为减小 4.2K 热沉段的长度,并能保证有效地减少温度计上的传导热,我们可以利用热沉片<sup>[4]</sup>或印刷电路热沉<sup>[5]</sup>,也可把引线末段 W3 换成热导率小的材料。若 W3 选用线 MW-36,其材料为 Manganin,直径为 0.127mm,截面积  $A_{w3} = 1.27 \times 10^{-8} \text{m}^2$ ,热导率  $K_{w3}(T_3) = 0.5\text{W/m} \cdot \text{K}$ 。若热负荷保持与上面一样,且  $L_3 = 0.05\text{m}$ ,则  $\theta_3 = 2.4\text{K}$ 。于是  $B = 1.7$ ,根据公式(16)计算所需的热沉段长度  $L_2 = 11\text{mm}$ 。这样使 4.2K 热沉的长度从 84mm 减少到 11mm。

## 参 考 文 献

- [1] Hust J G, Thermal anchoring of wires in cryogenic apparatus, Rev. Sci. Instrum, 1970; 41: 622
- [2] Velichkov I V, On the problem of thermal heat sinks in cryogenics, Cryogenics, 1990; 30: 527
- [3] 阎守胜, 陆果, 低温物理实验的原理与方法, 北京: 科学出版社, 1985
- [4] LakeShore Product Catalog and Reference, Temperature measurement and control, 1995
- [5] Bentley P D, Wooster W G, The use of printed circuits in cryogenics as heat sinks for electrical temperature sensor leads, Cryogenics, 1977; 17: 331~334

## Heat Sink for Temperature Measurement in the Cryogenic Equipment

Bai Hongyu

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031)

**ABSTRACT:** The problem of heat sinks in cryogenic equipment is discussed. To reduce the heat conduction to the temperature sensors through the electrical leads and to improve the accuracy of temperature measurement, it is very important and efficient to dump the heat load into the heat sink. The calculation of heat sink length in different boundary conditions and their applications are presented in this paper.

**KEYWORDS:** Heat sink, Temperature measurement, Cryogenic equipment



**作者简介:** 白红宇, 男, 1971年生, 博士研究生。现在中科院等离子体物理研究所, 主要从事大型超导磁体冷却方面的研究工作。