

文章编号: 1003-7837(2003)02-0130-06

单级半导体制冷器设计中 常用公式的推导

高远, 蒋玉思

(广州有色金属研究院化工冶金研究室, 广东 广州 510651)

摘要: 利用数学方法分析了半导体制冷器的最大制冷量、最大制冷温差和最大制冷系数, 讨论了半导体制冷器工作电流和使用参数的关系, 并归纳总结出一组公式, 如最大制冷量工况 $I = \frac{\alpha T_c}{R}$, $U = \alpha T_h$, 最佳制冷效率工况 $I_0 = \frac{\alpha \Delta T}{R(M-1)}$, $U = \frac{\alpha \Delta T M}{M-1}$, 其中 $M = \sqrt{1 + 0.5z(T_h + T_c)}$ 等。用该组公式对某制冷件进行计算, 计算值与实测结果非常接近, 说明公式的推导合理, 可信度较高。

关键词: 温差电致冷器; 珀尔帖效应; 制冷效率; 公式

中图分类号: O738 **文献标识码:** A

半导体制冷器^[1]是利用电能直接实现热能传递的一种特殊半导体组件, 与传统制冷器不同的是, 它既无制冷剂, 又无复杂的机械设备和管路系统, 结构小巧, 启动快, 控制灵活, 使用方便, 但是半导体制冷器存在制冷效率低、功率小等缺点。现在除了研究改善半导体制冷材料的性能和探索新型温差电材料外, 还研究在工程应用中如何结合实际使用条件, 优化其性能参数, 以获得最佳的应用效果。

1 热电制冷与制冷量

在制冷热电偶中, 一个结点放热, 而另一个结点吸热, 如图1所示。这两个结点有温差, 热从热结点流向冷结点。若热在电流为 I 的导体上达到平衡, 则传导给冷结点的纯热流可用一维傅立叶方程表示:

$$Q_{hc} = 0.5Q_j + Q_k, \quad (1)$$

式(1)中 Q_j 为焦耳热; Q_k 为从热结点到冷结点的传导热。

如果将热结点予以散热, 使它保持一定的

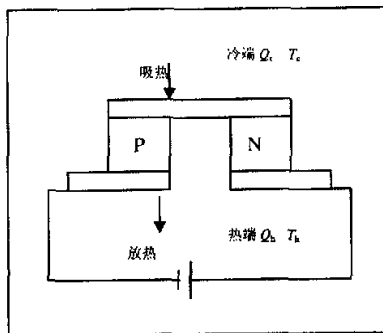


图1 热电制冷器基本单元
Fig. 1 Thermoelectric cooling unit

收稿日期: 2002-06-03

作者简介: 高远 (1970-), 男, 安徽太和人, 工程师, 硕士。

温度 T_h , 那么冷结点就开始冷却, 直到从周围介质传入冷结点的热量 Q_c 和沿着电偶臂传入的热量 Q_{hc} 的总和等于所吸收的珀尔帖热量 Q_p 时, 即 $Q_p = Q_c + Q_{hc}$, 此时冷结点的温度达到平衡, 设温度为 T_c .

假定 pn 型半导体制冷材料的侧面是绝热的, 并忽略汤姆逊热和接触电阻的影响, 以及假定制冷材料参数 (α, δ, k 等) 与温度无关, 制冷基本单元两臂形状、大小一致且参数完全相同, 于是便可得到热电偶的制冷量为:

$$Q_c = (\alpha_p - \alpha_n)IT_c - 0.5I^2R - k\Delta T, \quad (2)$$

式(2)中 Q_c 为温差电制冷组件的制冷量, 即制冷组件的制冷功率, W ; $\Delta T = T_h - T_c$, 其中 T_h, T_c 分别为温差电制冷组件工作时热面和冷面温度, K ; α_p/α_n 为 p/n 型制冷材料的温差电动势率, 又称塞贝克系数, V/K ; k 为温差电制冷材料的热导率, W/K .

2 常用公式推导

2.1 最大制冷量状态

对式(2) $Q_c = f(I)$ 求导, 得到半导体制冷器在最大制冷量状态下的最佳工作电流:

$$I_{\max} = (\alpha_p - \alpha_n)T_c/R. \quad (3)$$

所谓最大制冷量, 就是其它条件不变, 冷结点处于理想绝热, 即没有任何热量传入的情况 ($Q_c = 0$) 下, 电偶臂上建立的温差 $T_h - T_c$ 达到最大值 ΔT_{\max} ,

$$\Delta T_{\max} = 0.5zT_c^2, \quad (4)$$

式(4)中 $z = (\alpha_p - \alpha_n)^2/Rk$, 为热电材料的优值系数, K^{-1} , 它代表了热电材料的一种特性, 决定制冷元件所能达到的最大温差. 在这种条件下, 一对电偶上的电压降:

$$U_0 = IR + (\alpha_p - \alpha_n)\Delta T = (\alpha_p - \alpha_n)T_h. \quad (5)$$

可见, 电压降与制冷元件的尺寸无关.

2.2 最大制冷效率状态

实际应用中, 除要求最大温差工作状态外, 有时还要求制冷元件或制冷器工作在最大效率^[2]状态. 制冷系数 $\epsilon = \frac{Q_c}{P}$, 即单位电功率所能吸收的热量. 一对电偶消耗电功率为:

$$P_0 = I^2R + I(\alpha_p - \alpha_n)\Delta T. \quad (6)$$

一对电偶制冷系数为:

$$\epsilon = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)IT_c - \frac{1}{2}I^2R - k\Delta T}{I^2R + I(\alpha_p - \alpha_n)\Delta T} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)T_c - \frac{1}{2}U - \frac{k\Delta TR}{U}}{U + (\alpha_p - \alpha_n)\Delta T}. \quad (7)$$

可见, 影响 ϵ 值的内部条件是 $k \cdot R$ (电偶的热导率与电阻的乘积) 及 U (电偶的电压降), 因此优化要求分别对它们求导, 并令其导数为零来确定其优化条件.

$$(a) \quad k \cdot R = (\lambda_p \gamma_p + \lambda_n \gamma_n) \left(\frac{1}{\delta_p \gamma_p} + \frac{1}{\delta_n \gamma_n} \right), \quad k = \lambda \cdot \gamma \quad (8)$$

式(8)中, 制冷单元面高比 $\gamma = S/L$, cm ; L 为温差电制冷组件电堆高度, cm ; S 为温差电制冷组件电堆截面积, cm^2 ; δ 为温差电制冷材料的电导率, $(\Omega \cdot cm)^{-1}$; ρ 为温差电制冷材料的电导, $\Omega \cdot cm$; λ_p/λ_n 为 p/n 型温差电制冷材料的热导系数, $W/(cm \cdot K)$.

$$k \cdot R \text{ 对 } \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_n} \right) \text{ 求导, 且令 } (k \cdot R)' = 0, \text{ 可得优化条件 } \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_n} \right)_\epsilon = \sqrt{\frac{\lambda_p \rho_n}{\lambda_n \rho_p}},$$

所以 $(k \cdot R)_{\min} = (\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n})^2$.

(b) 将式(7)中 ϵ 对 U 求导并令其为零, 可求得 ϵ 达最大值时的电压降 U_c .

$$U_c = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) \Delta T}{\sqrt{1 + \frac{1}{2} z (T_h + T_c) - 1}}$$

则最佳制冷系数 ϵ_{\max} 下流过电偶的电流为:

$$I_c = U_c / R. \quad (9)$$

将 $k \cdot R = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{z}$, $U_c = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) \Delta T}{\sqrt{1 + \frac{1}{2} z (T_h + T_c) - 1}}$ 代入式(7), 可得 U 及 $k \cdot R$ 在优化条件下的

最佳制冷系数:

$$\epsilon_{\max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \times \frac{M - \frac{T_h}{T_c}}{M + 1}, \quad M = \sqrt{1 + \frac{1}{2} z (T_h + T_c)}. \quad (10)$$

在相同的已知条件(负载、温差、散热条件等)下, 按最大效率工作状态设计时, 效率高、耗电少, 热结点放出的热量少, 但需要的制冷元件多; 按最大温差工作状态设计时, 效率低、耗电多, 热结点放出的热量也多, 但需要的制冷元件少、省材料. 如果被冷却体的热负载小, 要求较大温差, 散热条件良好, 耗电量不是主要因素, 一般按最大温差工作状态设计; 如果被冷却体的热负载大, 则应考虑效率问题, 应按最大效率工作状态设计. 单级制冷器通常都选用最大温差工作状态设计, 最大制冷效率工作状态适用于多级制冷器的设计.

图2和图3分别给出了制冷量、制冷效率与温差的关系. 由图2, 3可见, 在同样热电材料特性和热结点温度的条件下, 按 ϵ_{\max} (最大制冷系数) 设计和按 Q_{\max} (最大制冷量) 设计, 得到的温差是不同的. 当 $\Delta T > 35$ K 时, 二者的效率十分接近; 当 $\Delta T < 20$ K 时, 二者的效率几乎相差1倍; 而当 $\Delta T \rightarrow 0$ 时, 二者的工作效率相差甚大. 温差越小, 两种工作状态的制冷系数差值就越大.

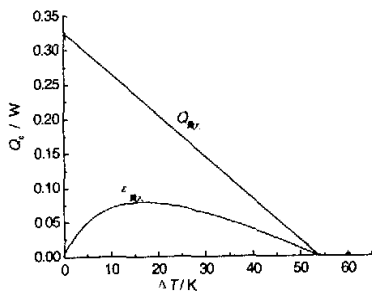


图2 制冷量与组件温差关系

Fig. 2 Relation between refrigeration capacity and temperature difference

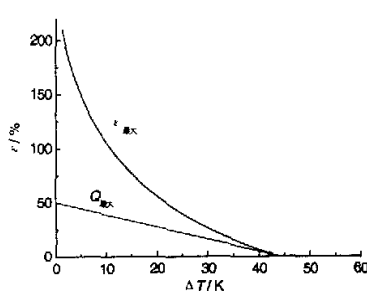


图3 制冷效率和组件温差关系

Fig. 3 Relation between refrigeration effect and temperature difference

2.3 常用公式总结

2.3.1 计算公式

将不同工况下的工作电流、制冷量等计算公式整理归纳后, 列于表1.

表 1 不同工况下单级热电堆的计算公式
Table 1 Design formulas of single-stage semiconductor refrigeration units

工况	工作电流/A	工作电压/V	消耗功率/W
一般工况	$I = \frac{U - a\Delta T}{R}$	$U = IR + a\Delta T$	$P = IU = I^2R + aI\Delta T$
最佳效率 工况 (ϵ_{max})	$I_0 = \frac{a\Delta T}{R(M-1)}$	$U = \frac{a\Delta TM}{M-1}$	$P_0 = \frac{a^2\Delta T^2 M}{R(M-1)^2}$
最大制冷量 工况 (Q_{max})	$I = \frac{aT_c}{R}$	$U = aT_h$	$P = \frac{a^2T_hT_c}{R}$
最低温度 工况 (T_{cmin})	$I = \frac{aT_c}{R}$	$U = aT_h$	$P = \frac{a^2T_hT_c}{R}$
工况	制冷量/W	制冷系数 ϵ	散热量/W
一般工况	$Q_c = aIT_c - 0.5I^2R - k\Delta T$	$\epsilon = \frac{Q_c}{P}$	$Q = Q_c + P$
最佳效率 工况 (ϵ_{max})	$Q_c = \frac{a^2M(MT_c - T_h)\Delta T}{R(M+1)(M-1)^2}$	$\epsilon_{max} = \frac{MT_c - T_h}{\Delta T(M+1)}$	$Q = \frac{aM(MT_h - T_c)\Delta T}{R(M+1)(M-1)^2}$
最大制冷量 工况 (Q_{max})	$Q_{cmax} = \frac{a^2}{R} \left(\frac{T_c}{2} - \frac{\Delta T}{z} \right)$	$\epsilon = \frac{1}{2T_h} \left(T_c - \frac{2\Delta T}{zT_c} \right)$	$Q = \frac{a^2}{R} \left(T_hT_c + \frac{T_c^2}{2} \right) - \frac{\Delta T}{z}$
最低温度 工况 (T_{cmin})	$Q_c = 0, T_{cmin} = \frac{\sqrt{1 + 2zT_h} - 1}{z}$	$\epsilon = 0$	$Q = \frac{a^2T_hT_c}{R}$

$$M = \sqrt{1 + 0.5z(T_h + T_c)}$$

2.3.2 估算公式

如果制冷元件的尺寸确定了, 制冷电堆在最大温差状态工作的最佳电流为:

$$I_{max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)T_c}{R} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)\delta_p\delta_nT_c}{\delta_p + \delta_n} \cdot \frac{S}{L}$$

目前, 对较好的半导体制冷材料, $\frac{(\alpha_p - \alpha_n)\delta_p\delta_nT_c}{\delta_p + \delta_n} \approx 50$, 则 $I_{max} \approx 50 \frac{S}{L}$.

对于最大制冷系数工作状态下的工作电流 $I_c \approx 25 \frac{S}{L}$.

制冷元件在最佳电流 (此时有最大温差或最大制冷量) 状态下工作时, 一对电偶的电压降 U_0 与其几何尺寸无关, $U_0 = 0.09 \sim 0.1$ V. 在最大效率状态下工作时, 制冷元件的工作电流约等于最大制冷量状态下电流的 60%, 相应的电压降为 0.05~0.06 V.

3 公式应用

以某公司生产的 TEC12705 型号的产品为例, 用表 1 中的公式进行计算.

该产品主要参数:

电偶臂结构尺寸: 长 1.42 mm, 宽 1.42 mm, 高 1.75 mm.

电导率: $\delta_n = 1050 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$, $\delta_p = 1100 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$, $\delta = \delta_n\delta_p / (\delta_n + \delta_p) = 537 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$.

导热系数: $\lambda_p = \lambda_n = 17 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $\lambda = \lambda_p + \lambda_n = 34 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$.

电偶臂热导率: $k = k_n + k_p = 3.92 \times 10^{-3} \text{ W}/\text{K}$.

温差电动势率: $\alpha_n = -205 \mu\text{V}/\text{K}$, $\alpha_p = 195 \mu\text{V}/\text{K}$, $\alpha = \alpha_p - \alpha_n = 400 \mu\text{V}/\text{K}$.

电偶臂电阻: $R=1.62 \times 10^{-2} \Omega$.

组件电阻: $R=2.057 \Omega$.

平均优值系数: $z = \frac{\delta\alpha^2}{\lambda} = 2.528 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

热结点水冷散热, $T_h=303 \text{ K}$, 温差 $\Delta T=67 \text{ K}$, 则 $T_c=236 \text{ K}$.

根据上面的公式可计算得到:

最大温差电流: $I=5.769 \text{ A}$.

最大工作电压: $U=15.392 \text{ V}$.

最大制冷量: $Q_{\max}=57.58 \text{ W}$, 此时温差为 0, $T_c=T_h=303 \text{ K}$.

最大温差 $\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} z T_c^2 = 70.4 \text{ } ^\circ\text{C}$.

任意取该公司生产的 TEC12705 型号产品 5 片, 在最大值工况下进行测试(真空模拟测试, 热结点温度 30°C), 测试结果列于表 2.

由表 2 可知, 实测最大温差 68.4°C , 最大温差电流 5.97 A , 最大制冷量 58.06 W , 组件电阻 2.243Ω , 平均优值系数 2.486 mK^{-1} , 与用公式计算的结果非常接近, 说明以上公式的推导是合理的.

表 2 实测结果

Table 1 Actual measuring results

序号	最大温差 / $^\circ\text{C}$	最大温差 电流/A	最大工作 电压/V	最大制冷 量/W	组件电阻 / Ω	平均优值系 数/ mK^{-1}
1	69.2	5.93	16.07	57.68	2.301	2.533
2	68.3	6.02	15.56	58.54	2.203	2.481
3	67.7	6.04	15.34	58.72	2.169	2.447
4	67.5	5.93	15.53	57.72	2.238	2.432
5	69.3	5.93	16.1	57.65	2.305	2.536
平均	68.4	5.97	15.72	58.06	2.243	2.486

4 结 论

根据制冷材料的作用机理, 推导出不同工况下单级热电堆的计算公式, 用公式计算的结果与实测结果基本一致, 说明公式的推导是合理的, 公式是可信的, 且对制冷组件的生产设计及应用具有一定的指导意义.

参考文献:

- [1] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
- [2] 滕明生, 秦涛. 半导体制冷器在电子设备冷却系统中使用性能的优化及电算程序[J]. 国防科技大学学报, 1996, 12(1): 34-39.
- [3] 许生龙, 何丹, 程开芳. 半导体制冷中的饱和电流[J]. 红外与激光工程, 1999, 26(1): 50-54.

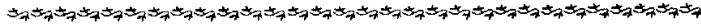
Derivation of equation used in designing single-stage semiconductor coolers

GAO Yuan, JIANG Yu-si

(Research Department of Chemical Engineering and Nonferrous Metallurgy, Guangzhou
Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510651, China)

Abstract: Maximum refrigeration capacity, maximum refrigeration temperature difference, and maximum refrigeration coefficient of semiconductor refrigerator are analyzed by mathematics, and the relationship between working current and parameter is discussed. Finally, some equations, such as $I = \frac{\alpha T_c}{R}$, $U = \alpha T_b$ in a condition of maximum refrigeration capacity, and $I_0 = \frac{\alpha \Delta T}{R(M-1)}$, $U = \frac{\alpha \Delta T M}{M-1}$ in a condition of maximum refrigeration efficiency, are obtained. Calculation values from the equations are coincident with results from actual measurement, which shows that the derivation is reasonable, and the equations are reliable.

Key words: thermoelectric refrigerators; Peltier effect; refrigeration efficiency; formulas



人造冰晶石

广州有色金属研究院生产的人造冰晶石是采用新工艺合成,再经离心过滤干燥而成。主要用作炼铝助熔剂、农作物杀虫剂、搪瓷釉药的熔融剂及乳浊剂,还可以用于乳白玻璃的制造,以及铝合金、铁合金和沸腾钢的生产。

人造冰晶石是氟化钠和氟化铝的复盐。本品为均匀细腻的白色粉末,密度 2.9~3.0 g/cm³,熔点约 1000 C,微溶于水。其水溶液呈酸性,遇硫酸即分解出 HF 气体。