

文章编号:1007-6735(2013)06-0586-05

不同热端温度条件下的两级制冷片性能分析

张美鑫, 柳建华, 张 良, 张慧晨, 刘 旗

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 在热电堆数量比 n 及无量纲电流 j 变化的条件下, 对两级热电制冷器在不同热端温度 T_h 条件下进行性能分析. 通过分析不同热端温度条件下净制冷量 q^* 和制冷系数 COP 的表达式, 对参数 n, j 进行优化, 给出了不同优化要求条件下 n, j 的取值范围.

关键词: 两级热电制冷; 热端温度; 性能系数; 制冷量

中图分类号: TB 61 **文献标志码:** A

Performance Analyses of the Two-stage Thermoelectric Refrigeration with Different Hot Side Temperature

ZHANG Mei-xin, LIU Jian-hua, ZHANG Liang, ZHANG Hui-chen, LIU Qi

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: With varied thermopile number n and varied dimensionless current j , the performance of a two-stage thermoelectric cooler was analyzed under different hot-side temperature. The parameters of n and j were then optimized through analysing the expression of maximum temperature difference between hot-side and cool-side, net cooling capacity, and refrigeration coefficient, under different hot-side temperature conditions. The corresponding optimal ranges of n and j were given out.

Key words: two-stage thermoelectric refrigerator; hot side temperature; refrigeration coefficient; cooling capacity

热电制冷器具有尺寸小、结构简单、无噪音及可靠等优点, 因此, 在很多特殊场所具有广泛的应用^[1-4]. 热电制冷器多为一级形式, 但由于热电材料的限制, 一级热电制冷器在热端温度等于室温的条件下, 冷端温度最低只能降低 70 K^[5]. 为满足更大的温度差以及更好的性能系数, 多级热电制冷器得

到了发展和应用. 2002 年 Xuan^[6-7]对两级热电制冷器的性能进行了分析, 讨论了两级热电制冷器在电流相同、电流成比例和电流相互独立这 3 种不同电流条件下的工作性能.

本文讨论了不同热端温度 T_h 下的热电制冷器, 在两级制冷器电流相互独立的条件下, 根据热电堆

收稿日期: 2013-06-07

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(S30503); 上海市研究生创新基金资助项目(JWCXSL1202)

第一作者: 张美鑫(1988-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 制冷系统测试及自动化. E-mail: zmxstudy2011@163.com

通讯作者: 柳建华(1956-), 男, 教授. 研究方向: 制冷技术、制冷空调节能. E-mail: lwnlwn_liu@163.com

数量比 n 和无量纲电流 j 的变化,对温差 T 、净制冷量 q^* 和制冷系数 COP 进行了优化,为两级热电制冷器的设计提供理论基础。

1 热电制冷基本原理

为简化设计和方便计算,提出以下假设: a. 热电制冷器的 N 型及 P 型热电材料的性能参数与温度无关。例如,塞贝克系数 α_N 和 α_P 、热导率 k_N 和 k_P 、电阻率 ρ_N 和 ρ_P 等物性参数与温度无关,本文中使用的各参数值是平均温度为 270 K 情况下对应的值($\alpha_P = -\alpha_N = 0.2 \times 10^{-3}$ V/K; $\rho_P = \rho_N = 0.95 \times 10^{-6}$ ($\Omega \cdot m$); $k_P = k_N = 1.77$ W/(m · K)); b. 热电制冷器两级间的换热温差和汤姆逊热的影响可以忽略^[3,8]; c. 热流量只从冷端、热端流出,其它接触面为绝热边界面^[9-10]。

独立电流条件下的两级热电制冷器结构如图 1 所示。假定第一层热电堆的数量为 N_0 ,热电堆数量比为 n ,则第二层热电制冷器的热电堆数量为 nN_0 。当 $n=0$ 时,则代表一级热电制冷器的情况。热电制冷器的电流值分别为 I, I_t 。图 1 中 T_c, T_h 分别为冷端、热端温度, T_m 为两级热电制冷器的中间换热温度。根据能量守恒定律,列出以下 4 个方程:

$$Q_{cl} = [I\alpha T_c - \frac{1}{2}I^2R - K(T_m - T_c)]N_0 \quad (1)$$

$$Q_{hl} = [I\alpha T_m + \frac{1}{2}I^2R - K(T_m - T_c)]N_0 \quad (2)$$

$$Q_{c2} = [I_t\alpha T_m - \frac{1}{2}I_t^2R - K(T_h - T_m)](nN_0) \quad (3)$$

$$Q_{h2} = [I_t\alpha T_h + \frac{1}{2}I_t^2R - K(T_h - T_m)](nN_0) \quad (4)$$

式中, Q_i 为制冷器不同端面的热量, i 为 $c1, h1, c2, h2$; α 为塞贝克系数; R 为总电阻率; K 为总热导率。

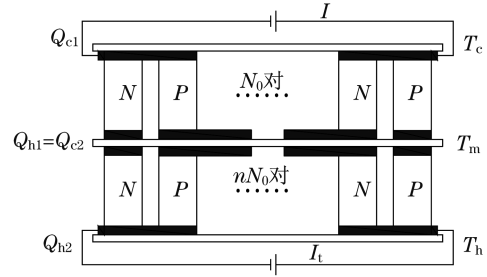


图 1 独立电流的两级热电制冷器示意图

Fig.1 Diagram of the two-stage thermoelectric refrigerator with independent electric current

$$\alpha = \alpha_P \alpha_N \quad (5)$$

$$R = \rho_P \frac{L_P}{A_P} + \rho_N \frac{L_N}{A_N} \quad (6)$$

$$K = k_P \frac{A_P}{L_P} + k_N \frac{A_N}{L_N} \quad (7)$$

式中, L_N, L_P 和 A_N, A_P 分别为相应热电材料的长度和横截面积。

利用能量转换定律可知 $Q_{hl} = Q_{c2}$, 消除未知参数 T_m , 得出表达式

$$q_c = \frac{j - \frac{1}{2}j^2 \frac{1}{ZT_c} \left(1 + \frac{1 + nt^2}{1 - j + n + njt}\right) - \frac{1 + n\theta}{1 - j + n + njt} + 1}{n + 1} \quad (8)$$

$$\varphi = 1 - \frac{1}{1 + COP} = \frac{Q_{cl}}{Q_{h2}} = \frac{j - \frac{1}{2}j^2 \frac{1}{ZT_c} \left(1 + \frac{1 + nt^2}{1 - j + n + njt}\right) - \frac{1 + n\theta}{1 - j + n + njt} + 1}{jt\theta - \theta - \frac{1}{2}j^2 T^2 \frac{1}{ZT_c} \left(1 + \frac{1 + nt^2}{1 - j + n + njt}\right) + \frac{1 + n\theta}{1 - j + n + njt}} \frac{1}{n} \quad (9)$$

式中, Z 为优质系数; φ 为制冷量与散热量之比; θ , j, q_c 分别为无量纲温度、无量纲电流和无量纲制冷量,其定义为

$$\theta = T_h/T_c \quad (10)$$

$$j = I\alpha/K \quad (11)$$

$$q_c = \frac{Q_{cl}}{N_0KT_c} \quad (12)$$

优质系数 Z 定义为 $\alpha^2/(RK)$, 取值范围由热电材料的物性参数值决定。同时定义热电堆的净制

冷量

$$q^* = \frac{Q_{cl}}{N_0(n+1)KT_c} = \frac{q_c}{n+1} \quad (13)$$

对于一个给定冷端、热端温度的热电制冷器, q^* 和 φ 可以表示为无量纲电流 j 、热电堆数量比 n 、电流比 t 和优质系数 Z 的关系式。当 Z 取最大值时,其关系式为

$$Z_{\max} = \frac{\alpha^2}{(\sqrt{k_N\rho_N} + \sqrt{k_P\rho_P})^2} \quad (14)$$

根据给定的物性参数值得到 Z 的优化值为 0.0024 K^{-1} .

2 热电制冷器性能分析

在 $q^* = 0$ 的条件下, 热电制冷器取得最大温度差, 令式(8)中 $q_c = 0$, 得到 θ 关于参数 j, t, n, Z 的表达式(其中 Z 取优化值 0.0024 K^{-1}).

$$\theta = 1 + j(1 + t) - \frac{1}{2}j^2 \frac{1}{ZT_c} \cdot \left(1 + tj + t^2 + \frac{2-j}{n} - 2 \frac{nt-1}{n} ZT_c\right) \quad (15)$$

满足式(15)的极值条件为: 偏导数 $\partial\theta/\partial t = 0$ 和 $\partial\theta/\partial j = 0$. 将 $\partial\theta/\partial t = 0$ 和 $\partial\theta/\partial j = 0$ 分别带入式(15)中, 得到无量纲温度 θ 与 n, t, j 的关系式. 利用数值软件, 对式(15)、式(13)和式(9)进行模拟分析, 结果如图2所示.

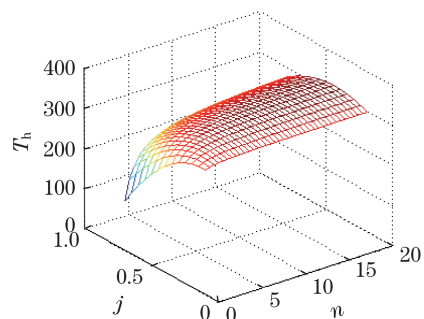
由图2(a)可知, 热端温度 T_h 的值随着热电堆数量比 n 的增加而增加, 而随着无量纲电流 j 的减小, T_h 的极值点变小. 由图2(b)可知, 净制冷量 q^* 在不同的 n 和 j 条件下都具有极值点. 由图2(c)可知, 在无量纲电流 j 和热电堆数量比 n 取较小值的情况下, 制冷系数 COP 能取得较大值.

为明确热端温度 T_h 与热电堆数量比 n 和无量纲电流 j 之间的关系, 对热端温度 T_h 与热电堆数量比 n 和无量纲电流 j 之间的关系进行单独分析, 如图3所示. 其中, 冷端温度分别为 $T_c = 175, 200, 225\text{ K}$. 由图3(a)可知, 热端温度 T_h 随着热电堆数量比 n 的增加而增加, 当 n 大于10以后, T_h 随着 n 的增加基本无增加的趋势, 同时极值点对应的无量纲电流 j 随着制冷温度的升高而升高, 由图3(b)可知, 要制取较低的制冷温度则需要较小的电流.

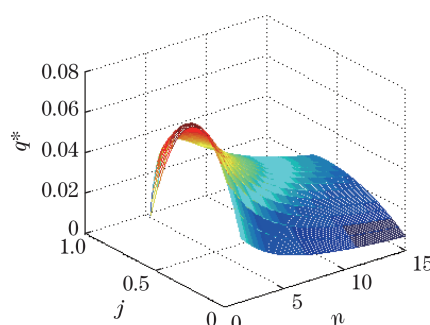
为明确净制冷量 q^* 与热电堆数量比 n 以及无量纲电流 j 之间的关系, 对净制冷量 q^* 与热电堆数量比 n 和无量纲电流 j 之间的关系进行单独分析, 如图4所示. 其中, 热端温度 $T_h = 275, 285, 295\text{ K}$.

由图4(a)可知, 净制冷量 q^* 不是随着热电堆数量比 n 的增加而增加, 在 n 小于2的范围内取得极值. 在 q^* 取极值的条件下, 热端温度 T_h 对 n 值影响较小. 从图4(b)可知, 在无量纲电流 j 变化的条件下, 净制冷量 q^* 能取得极大值, 同时 q^* 的极大值随着热端温度的升高而升高. 因此, 较小的电流同样有利于每个热电堆获得较高的制冷量.

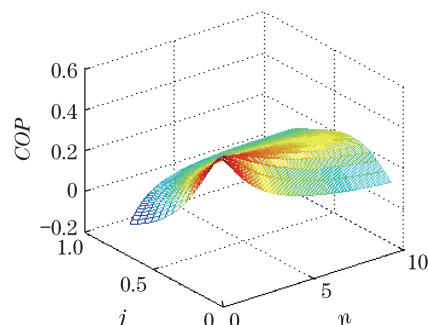
在不同的热端温度条件下, 对制冷系数 COP 进



(a) 热端温度 T_h 的变化规律 ($T_c = 200\text{ K}$)



(b) 净制冷量 q^* 的变化规律 ($T_h = 300\text{ K}$)



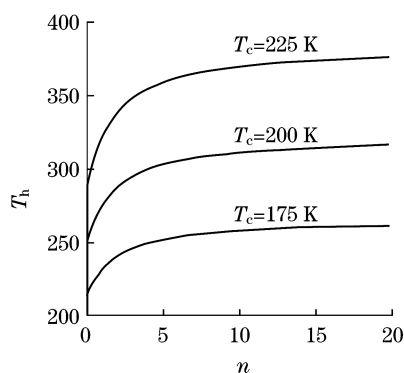
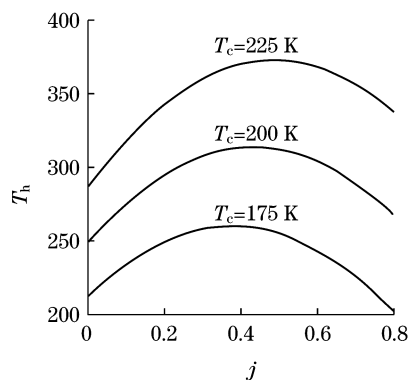
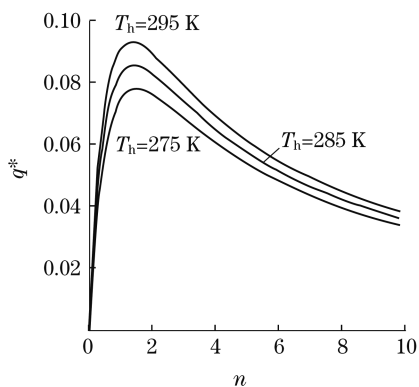
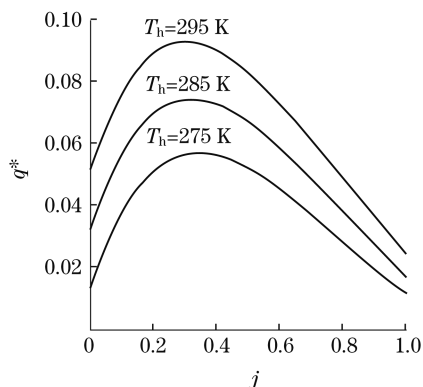
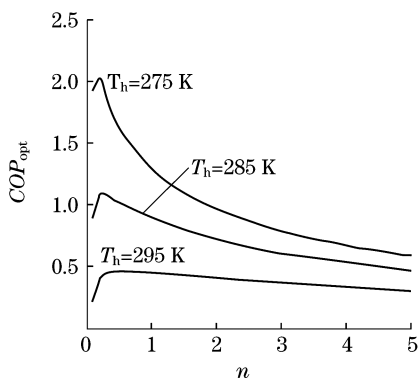
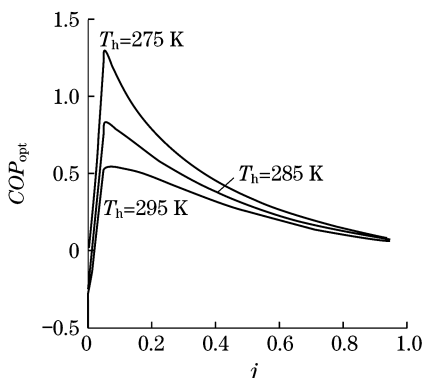
(c) 制冷系数 COP 的变化规律 ($T_c = 260\text{ K}, T_h = 300\text{ K}$)

图2 不同的热电堆数量比 n 和无量纲电流 j 条件下两级热电制冷器性能参数变化规律

Fig.2 Variation of the two thermoelectric cooling performance parameters under different thermopile quantity n and dimensionless current j

行优化, 优化制冷系数 COP_{opt} 与热电堆数量比 n 和无量纲电流 j 之间的关系如图5所示, 其中, 热端温度 $T_h = 295, 285, 275\text{ K}$.

由图5可知, 在热电堆数量比 n 及无量纲电流 j 取较小值的条件下, 优化制冷系数 COP_{opt} 取得较大值. 图5(a)显示, 减小热端温度即降低冷端和热端温度差, 可以很明显地提高优化制冷系数

(a) 热端温度 T_h 与热电堆数量比 n 曲线图(b) 热端温度 T_h 与无量纲电流 j 的曲线图图3 热端温度 T_h 与热电堆数量比 n 和无量纲电流 j 之间的变化关系Fig.3 Relationship of hot side temperature T_h to thermopile number n and dimensionless current j (a) 净制冷量 q^* 与热电堆数量比 n 曲线图(b) 净制冷量 q^* 与无量纲电流 j 的曲线图图4 净制冷量 q^* 与热电堆数量比 n 和无量纲电流 j 之间的变化关系Fig.4 Relationship of non-dimensional cooling rate to thermopile number n and dimensionless current j (a) 优化制冷参数 COP_{opt} 与热电堆数量比 n 曲线图(b) 优化制冷参数 COP_{opt} 与无量纲电流 j 的曲线图图5 优化制冷参数 COP_{opt} 与热电堆数量比 n 和无量纲电流 j 的关系图Fig.5 Relationship of optimum coefficient of performance COP_{opt} to thermopile number n and dimensionless current j

COP_{opt} . 在较大温差的制冷条件下, 热电堆数量比 n 对于 COP_{opt} 的影响较小, 随着 n 的增加, COP_{opt} 的值没有明显的下降, 同时较小的无量纲电流 j 有利于性能参数的提高.

3 结 论

分析了两级制冷器的热端温度 T_h 、净制冷量 q^* 和优化制冷系数 COP_{opt} , 随热电堆数量比 n 和无量纲电流 j 的变化情况, 得出以下结论:

a. 图 3 表明, 热端温度 T_h 随着热电堆数量比 n 的增加而增加, 当 n 取值大于 5 以后, 热电制冷器两端温度的温差增加趋于平缓.

b. 对于不同的热端温度 T_h 、净制冷量 q^* 和优化制冷系数 COP_{opt} , 无量纲电流 j 的取值有一个最佳范围. 如图 3(b) 中热端温度 T_h 对应 j 的最佳范围为 0.3~0.6, 图 4(b) 中净制冷量 q^* 对应 j 的最佳范围为 0.2~0.5, 图 5(b) 中制冷系数 COP 对应 j 的最大值约为 0.1.

c. 在较大的制冷温差情况下, 热电堆数量比 n 对性能系数 COP 的影响不大, 同时较小的无量纲电流 j 可以使性能系数 COP 以及无量纲净制冷量 q^* 得到优化.

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, 1992.
- [2] 王太峰, 欧阳新萍, 薛娜, 等. 半导体制冷保温容器制冷性能的实验研究[J]. 上海理工大学学报 2007, 29

(4): 341 - 344.

- [3] Huang M J, Yen R H, Wang A B. The influence of the Thomson effect on the performance of a thermoelectric cooler[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(2): 413 - 418.
- [4] Huang B J, Chin C J, Duang C L. A design method of thermoelectric cooler[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(3): 208 - 218.
- [5] Cheng Y H, Shih C. Maximizing the cooling capacity and COP of two-stage thermoelectric coolers through genetic algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(8): 937 - 947.
- [6] Xuan X C, Ng K C, Yap C, et al. The maximum temperature difference and polar characteristic of two-stage thermoelectric coolers[J]. Cryogenics, 2002, 42(5): 273 - 278.
- [7] Xuan X C. Analyses of the performance and polar characteristics of two-stage thermoelectric coolers[J]. Semiconductor Science and Technology, 2002, 17(5): 414.
- [8] Liu J Y, Wen C D. Examination of the cooling performance of a two-stage thermoelectric cooler considering the Thomson effect[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2011, 60(6): 519 - 542.
- [9] Yamanashi M. A new approach to optimum design in thermoelectric cooling systems[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 80(9): 5494 - 5502.
- [10] Meng F, Chen L, Sun F. Performance optimization for two-stage thermoelectric refrigerator system driven by two-stage thermoelectric generator[J]. Cryogenics, 2009, 49(2): 57 - 65.

(编辑: 石 瑛)