

一种基于 TEC 的智能温控材料系统探索研究

The Exploration of Intelligent Temperature Control Material System Based on Thermoelectric Cooler

廖芳平, 王小群, 王宏鹏

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

LIAO Fang-ping, WANG Xiao-qun, WANG Hong-peng

(School of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 研制了一种基于热电制冷器(TEC)的智能温控材料系统,系统地考察了材料周边环境、散热方式、控制算法、工作电流等因素对系统温控效果的影响。在此基础上,确定了该智能温控材料系统合理的工作条件,对温控效果的实验分析表明:该智能温控材料温度可以根据目标温度的复杂变化快速做出响应,表现出良好的智能温控能力。

关键词: 智能材料; 温度控制; 热电制冷

中图分类号: TB381 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)06-0016-05

Abstract: First, an intelligent temperature control material system based on thermoelectric cooler was presented. Effects of thermal environment around the material system, cooling mode, control algorithm, and working current were studied on the performance of the thermal control material system. Then, the appropriate working conditions were determined of this thermal control material system. Finally, the results showed that the intelligent temperature control material system can change its surface temperature according to the vibration of aimed temperature, exhibiting outstanding ability of intelligent temperature controlling

Key words: intelligent material; temperature control; thermoelectric cool

热电制冷是一种用电能作动力、以珀尔帖效应为基础的制冷方法。与传统压缩制冷方法相比,热电制冷具有体积小、重量轻、作用速度快、可靠性高、寿命长、无噪声和无需维护等特点,特别适合替代超重状态下不能使用的常规制冷方式,在航空航天等领域有取代机械制冷的趋势^[1]。另外,热电模块不仅可以制冷,而且在改变输入电流方向后还具有加热功能。这一特征使热电制冷器(Thermoelectric cooler, TEC)可以更为理想地控制温度或在工作中根据需要加热或冷却介质,从而实现智能温控^[2]。近年来,随着热电制冷器件制造技术的不断提高,热电温控已经在航空航天^[1]、电子设备冷却^[3-5]、空间实验技术^[6]以及生物工程^[7]等领域得到了广泛的应用。

在实际应用中,通常需要对温控对象进行动态温度控制,如精密的高低温试验仪器^[8]、注塑和挤压等热加工工艺中的模具^[9]、车载冷暖两用箱、用作智能材料微驱动器的形状记忆合金^[10]等。其中,尽可能地缩短TEC温控的响应时间,扩大温度控制范围具有重要意义。比如在智能结构中起驱动作用的形状记忆合金,

决定其性能优劣的一个关键参数是响应频率,它主要受加热或冷却速度的影响^[11-13]。因此全面地考察在实际用于中的各种因素如环境、工作电流等对TEC温控效果的影响,实现快速、准确、精密的温度控制,对充分发挥温控对象的特殊性能具有重要的意义。

本研究基于TEC的工作特点,选用导热性好的铝合金与TEC结合,设计了一种新型智能温控材料,系统地考察了材料周边环境、散热方式、控制算法、工作电流等因素对响应时间和温控范围的影响,为智能温控材料系统的实际应用提供了大量重要的基础数据。

1 智能温控材料系统的工作原理及制作工艺

如图1所示,智能温控材料系统主要由热电制冷器(TEC)、温控对象(铝合金)、温度传感器、控制器、驱动电路和散热器等六个部分组成。控制器将温度传感器采集到的温控对象的实际温度与目标温度或预定温度进行对比计算,通过驱动电路调整输入TEC的电流

大小和方向,进而调节 TEC 两端吸收或放出的热量,实现对温控对象的智能温度控制。另外,为了确保智能温控材料系统能够正常工作,需要将 TEC 热端产生的热量通过散热器及时散失到周围环境中。

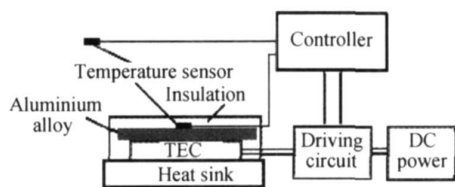


图 1 智能温控材料系统结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of intelligent thermal control material system

实验中热电制冷器选用天津精易公司生产的 TEC1-4905,其最大产冷量达 15.8W。选取 2mm 厚铝合金片作为温度控制对象,铝合金与 TEC 冷端通过导热性能良好的导热硅胶粘结固定。散热器采用铝制翅片式散热片,在散热片下方使用风扇进行强迫风冷散热或通过水流进行水冷散热。控制器以 ATmega8535 单片机为核心,采用 Pt100 铂电阻温度传感器分别采集铝合金温度和目标温度。驱动电路采用能量转换效率较高的 H 桥驱动电路,由四个场效应管组成。单片机通过内置的 A/D 转换对铂电阻采集到的温度信号进行处理得到温度值,根据铝合金温度和目标温度的偏差调节 TEC 工作电流的大小和方向,使铝合金表面温度迅速对目标温度的变化做出响应。此外,在温控系统中设计 RS232 串口与计算机进行通讯,可以实时采集温度数据。

2 智能温控材料系统温控性能的影响因素分析

提高智能温控材料的响应速度是保证智能材料的温度跟随目标温度的变化或者预定指令做出快速响应的重要参数。为了提高温控响应速度,除了选择具有较大制冷能力的 TEC、降低系统内各个接触面的热阻外,另一个重要途径就是优化系统工作参数,保证系统在一定温度控制精度基础上,发挥 TEC 的最大制冷或加热的能力。

影响智能温控材料温控效果的主要因素包括 TEC 冷端合金周边的热环境、热端的散热方式、控制系统的控制算法、TEC 的工作电流等。

2.1 合金周边环境的影响

为考察周边环境对于智能温控材料表面温度变化的影响,使用聚氨酯泡沫(导热系数 $0.034 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)

对 TEC 冷端负载即铝合金片周围进行隔热(环境 1),与不采取隔热措施(环境 2)比较,在其他工作参数相同的情况下铝合金温度变化如图 2 所示。由图 2 可知,在开始降温阶段,两种环境下合金的降温速率基本相同,说明环境对智能材料的响应时间影响不大;然而,环境 1 对应的平衡温度(即最低温度)小于环境 2,表明更有利于制冷。

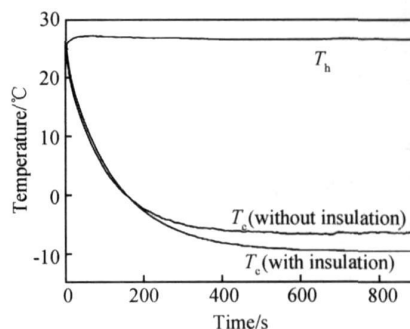


图 2 周边环境对系统温控性能的影响

Fig 2 Effect of thermal environment on the temperature control performance

根据半导体制冷理论,TEC 的产冷量 Q_0 可由下述公式计算^[7]:

$$Q_0 = \alpha T_c - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (1)$$

式中: α 为塞贝克系数 (V/K),由组成 TEC 的半导体材料种类决定; I 是通过 TEC 的电流 (A); R 和 K 分别是 TEC 的电阻 (Ω) 和热导 (W/K); T_c 是 TEC 冷端温度 (K); ΔT 为 TEC 热端温度 T_h 与冷端温度 T_c 之差 (K)。

由公式 (1) 可推测,当其它条件不变时,产冷量 Q_0 越小,则 T_c 越小,意味着铝合金能够达到更低的平衡温度,这种情况下智能温控材料系统的温控范围稍大。

2.2 散热方式的影响

TEC 热端散热采用强迫风冷和水冷两种方式,分别测试在通过相同电流时两种散热方式下铝合金温度变化,结果见图 3。在其它工作参数相同的前提下,与风冷相比,采用水冷进行散热时铝合金能够达到更低的平衡温度。这是因为水冷散热效率较高,可以吸收更多的热量使 TEC 热端温度保持在一个更低的水平,从而降低了合金温度。但两种散热方式下铝合金片的降温速率接近,初始阶段其降温速率均为 1.1°C/s 。考虑到实际应用中水冷的实现较为复杂,而且也不能提高系统的变温速率,因此在后面的实验中均采用强迫风冷形式对 TEC 热端进行散热。

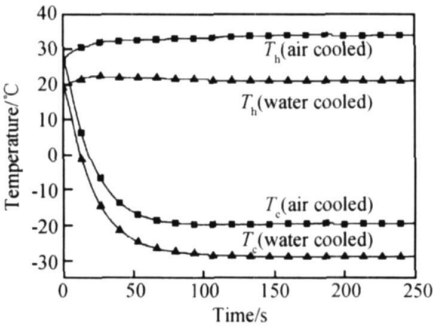


图 3 散热方式对温控效果的影响
Fig. 3 Influence of cooling mode on temperature control performance

2 3 控制算法的影响

目前应用最为广泛的控制算法为 PID 控制。本工作通过实验调试出合理的控制参数,使温控材料在保证一定控制精度的基础上,提高系统响应速度。如图 5 所示,采用 PID 控制温度精度较高(±0.3℃),但是响应时间较长(82s)。

为了进一步提高响应速度,本工作对算法进行了改进,即设定一个阈值,当合金温度与目标温度的偏差大于阈值时,控制 TEC 工作电流恒定在最大工作电流值,从而使铝合金获得最大降温速率;当合金温度与目标温度的偏差小于阈值时,进行 PID 控制使铝合金温度稳定在目标温度。从理论上讲,这个阈值越接近零,越有利于提高响应速度。然而在实际应用中,如图 4 所示,当设定阈值较小时,合金可以在较短时间内降至目标温度,但会继续降温至目标温度以下,然后逐渐回升至目标温度并达到稳定,即存在温度过冲;而设定阈值过大时,铝合金温度在控制过程中虽然没有过冲现

象,但响应时间较长。不同阈值对系统温控效果的影响如表 1 所示。由表 1 的数据可知,在本实验条件下取阈值为 4℃时,智能温控材料没有发生过冲现象,而且响应时间很小(与阈值为 1℃相近)。因此,在改进 PID 控制中确定阈值为 4℃。

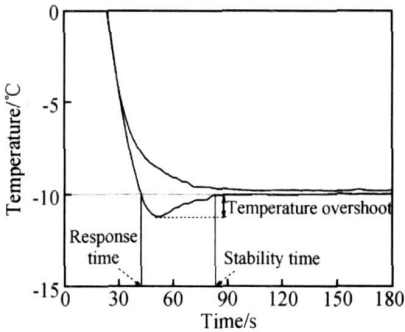


图 4 不同阈值下铝合金温度曲线
Fig. 4 Temperature response curves at different thresholds

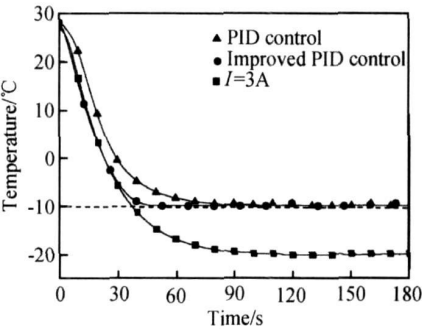


图 5 两种控制算法下温度-时间的响应曲线
Fig. 5 Temperature response curve s under different control algorithm

表 1 不同阈值下温度-时间响应参数

Table 1 Parameters of temperature-time at different thresholds

Threshold/℃	1	2	3	4	6	8	10
Response time/s	41.8	42.1	42.9	45.8	72.3	79.9	84.5
Temperature overshoot/℃	1.6	0.8	0.4	0	0	0	0
Stability time/s	79.7	69.9	61.2	45.8	72.3	79.9	84.5

由图 5 可知,改进 PID 控制的响应时间为 45s,远远小于改进前 PID 控制下合金降温曲线对应的响应时间(82s);进一步地,将改进 PID 控制的合金降温曲线与给 TEC 通过恒定最大工作电流(3A)时的合金降温曲线进行比较,可以看出改进 PID 控制算法下合金温度下降速率与恒定最大工作电流下的降温速率几乎相等,而且响应时间也极为接近,说明改进 PID 算法

下降温速率已接近该实验条件下系统的极限降温速率,即基本达到了最小的响应时间。

2 4 电流的影响

由公式(1)可知,不同工作电流下 TEC 的制冷量不同,从而对系统的温控效果如响应时间和温控范围产生显著影响。

在实验中调节 TEC 的输入电流分别为 0.5, 1.0,

1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 A, 设定目标温度为 0℃, 采用改进 PID 算法, 得到的合金温度与时间的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 随着电流的提高, 合金的温度响应时间逐渐减小, 当电流等于 3.5A 时, 响应时间为仅为 20.5s。

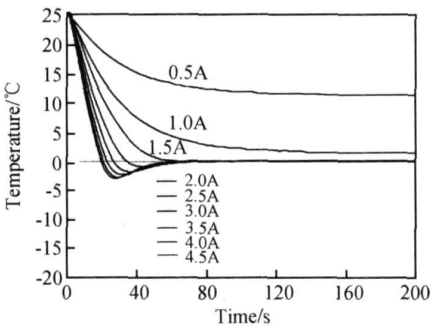


图 6 改进 PID 控制下工作电流对响应时间的影响(目标温度 0℃)

Fig 6 Temperature response curves at different working current (aimed temperature 0℃)

在实验中不设定目标温度, 分别给 TEC 输入一系列工作电流, 则根据铝合金能达到的最低温度确定该条件下智能温控材料的温控范围, 如图 7 所示。由图 7 可知, 随着电流增大, 铝合金达到的最低温度逐渐下降, 当工作电流为 3.5~ 4.5A 时, 铝合金能够达到的最低温度为- 22℃左右。

由此可见, 随着 TEC 工作电流的增大, 铝合金降温速率增大, 可达到的最低温度降低, 因此温控范围也随之增大, 但电流超过 3.5A 增幅逐渐减小。由公式 (1) 可知, TEC 的产冷量与电流呈二次函数关系, 因此随着电流的增大, TEC 的产冷量随之增大, 但当电流增加到一定程度产冷量的增加幅度变小。电流增大到一定程度后, 再增大电流反而会降低 TEC 的产冷量,

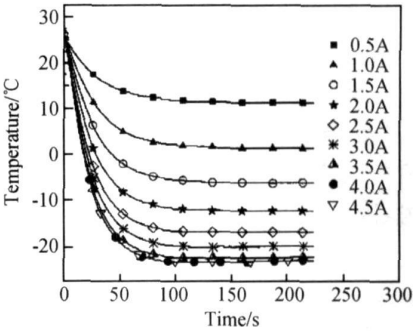


图 7 不控制电流下工作电流对合金最低温度的影响

Fig 7 Effect of working current on the temperature of aluminium alloy

同时增大电流也导致系统的消耗电功率增大, 所以针对一个具体的应用具有一个合适的电流。

3 智能温控材料系统的温控效果分析

智能温控系统设计的目标是通过温度传感器不断感知外部目标温度的变化, 通过控制器和驱动电路调节 TEC 的工作电流使系统中铝合金的温度随目标温度变化做出快速响应, 因此对智能温控材料系统温控效果的分析是系统研制中的一个重要组成部分。

在温控效果分析实验中, 所用的智能温控材料系统采用改进的 PID 控制算法, 热端通过强迫风冷进行散热, 调节直流电源输出电流为 3.5A, 并在铝合金和 TEC 周围覆盖隔热材料以减少环境的影响, 目标温度的复杂变化通过另一个 TEC 来实现。图 8 是智能温控材料随目标温度变化的响应曲线。当目标温度变化较慢时, 如图 8a 所示, 在整个变化过程中合金温度和目标温度两条曲线几乎重合在一起, 表明该智能温控材料可以根据目标温度的变化快速响应, 使合金温度

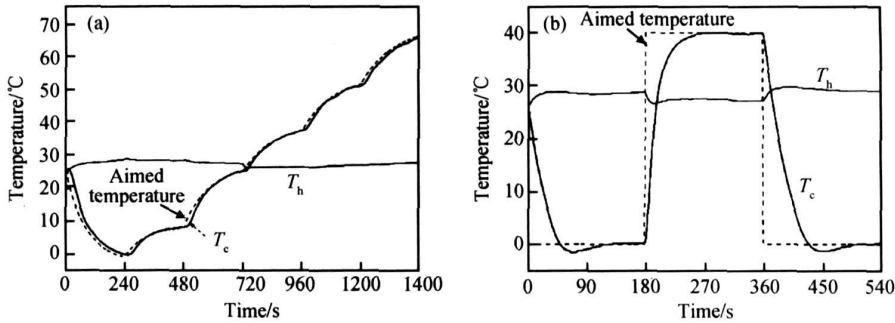


图 8 对合金表面温度的智能控制

(a) 目标温度变化较慢; (b) 目标温度发生阶跃变化

Fig 8 Temperature response curves

(a) aimed temperature changed slowly; (b) aimed temperature changed rapidly

与目标温度保持一致;当目标温度发生阶跃变化时,如图 8b 所示,合金温度需要经过一定时间才能达到目标温度,此时合金的变温速率是本实验条件下的极限变温速率。显然,当目标温度的变化速率小于该极限变温速率,智能温控材料系统能够对目标温度的变化形成很好的跟随。

4 结论

(1) 与采用强迫风冷相比,水冷时智能温控材料系统的温控范围更大,但两种散热方式下铝合金片的降温速率基本一致,即在散热能力满足需求的条件下使用风冷可以达到相同的变温能力。

(2) 采用 PID 控制不能充分发挥 TEC 的制冷能力,特别是当 TEC 冷端温度与目标温度接近时这种问题更为突出,采用引入阈值的改进的 PID 控制算法可以显著地降低智能温控材料达到目标温度的响应时间。

(3) 工作电流对温控效果影响较大,工作电流越大,合金能达到的最低温度越小,系统响应时间越小,但随着电流的增加可达到的最低温度和响应时间变化的幅度逐渐变小,当电流增大到一定程度后温控范围和响应时间基本不变,继续增大电流反而增加功耗,降低系统制冷效率。

(4) 智能温控材料系统的最大变温速率由系统硬件组成、算法和工作条件决定,当目标温度的变化速率小于系统的最大变温速率时,智能温控材料可以根据目标温度的复杂变化做出快速响应,使合金温度与目标温度始终保持一致。

参考文献

[1] 王小群,杜善义. 热电制冷技术在航空航天领域的应用[J], 中国航天, 2006, 10: 22- 24.

- [2] 王宏鹏,王小群,王振清. 表面自适应变温材料系统中的控制设计[J]. 微计算机信息, 2007, 19: 1- 4.
- [3] DISALVO F J. Thermoelectric cooling and power generation[J]. Science, 1999, 285(5428): 703- 706.
- [4] 李腾,刘静. 芯片冷却技术的最新研究进展及评价[J]. 制冷学报, 2004, (3): 22- 32.
- [5] CHEN Re+yu, HU ANG Guan-ming. Thermoelectric cooler application in electronic cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24: 2207- 2217.
- [6] ZU Tie-zhu, QI Ya-qing, ZHANG Jian-zhong, et al. Thermoelectric cooler for space microgravity experiment[A]. 18th International Conference on Thermoelectrics[C]. Baltimore: IEEE, 1999. 325- 327.
- [7] 徐德胜. 半导体致冷与应用技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999.
- [8] 郑永明, 方方, 徐建一, 等. 半导体致冷原理及其应用系统设计研究[J]. 中国测试技术, 2006, 32(2): 49- 52.
- [9] 李雪梅, 王红飞. 智能控制在模具温控成形中的应用[J]. 机械设计与制造, 2007, (1): 173- 174.
- [10] 徐惠彬, 仲伟虹, 田蔚. 智能复合材料的发展现状与应用现状[J]. 航空精密制造技术, 1997, 33(4): 11- 14.
- [11] BHATTACHARYYA A, LAGOUDAS D C, WANG Y, et al. On the role of thermoelectric heat transfer in the design of SMA actuators: theoretical modeling and experiment[J]. Smart Materials and Structures, 1995, (4): 252- 263.
- [12] BENZAOU I H, LEXCELLENT C, CHAILLET N, et al. Experimental study and modeling of a TiNi shape memory alloy wire actuator[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1997, 8(7): 619- 629.
- [13] 苏景芳, 杨君友, 朱文, 等. 热电激励形状记忆智能材料研究进展[J]. 材料导报, 2004, 18(7): 37- 41.

收稿日期: 2007-07-25; 修订日期: 2007-12-05

作者简介: 廖芳平(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事功能材料与器件的研究, 联系地址: 北京市海淀区学院路 37 号北京航空航天大学材料学院复合材料实验室(100083)。E-mail: liaofp@yahoo.com

(上接第 15 页)

and Technology, 1972, 45(1): 307- 328. [10] YOUNG D G. Fatigue and fracture of elastomeric materials[J]. Rubber World, 1991, (3): 30- 34.

[11] HAMED G R. Molecular aspects of the fatigue and fracture of rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1994, 67(3): 529- 535.

[12] FORSTER M J, PERTTYMAN L B. A new improved tirecord fatigue tester[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1969, 42(4): 1000- 1008.

[13] CAUSA A G. Fatigue testing of polymeric reinforcing cords[J]. Tire Technology International, 1996, 22(4): 1101- 1103.

[14] POKLUDA I. Fatigue of steel cords[J]. Kautsch Gummi Kunstst, 1989, 42(5): 410- 414.

- [15] ANDREAS T E, BJORN E, LEIF B. Lifetime and Young's modulus changes of glass/phenolic and glass/polyester composites under fatigue[J]. Composites, 1995, 26(1): 10- 16.
- [16] TIAN Z H, SONG H W, WAN Z M, et al. Fatigue properties of steel cord-rubber composite[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2001, 33(4): 283- 296.

基金项目: 哈尔滨市科技攻关计划项目(2005AA5CG044); 黑龙江省博士后科研启动基金项目

收稿日期: 2007-05-08; 修订日期: 2007-12-06

作者简介: 田振辉(1973—), 男, 博士, 副研究员, 从事柔性复合材料、空间充气结构研究, 联系地址: 哈尔滨工业大学行政楼 168 信箱(150001)。E-mail: tianzh@hit.edu.cn