

文章编号:0253 - 4339(2015) 05 - 0101 - 06

doi:10. 3969/j. issn. 0253 - 4339. 2015. 05. 101

半导体制冷器除湿实验研究

罗 仲 张 旭 王胜己 李 翔

(同济大学机械与能源工程学院 上海 201804)

摘 要 为了探讨半导体制冷器用于家用除湿的潜力,本文利用半导体制冷器搭建了半导体除湿系统,待处理的湿空气先后流经冷热端肋片换热器,达到除湿的目的。在自然室温环境下,对空气温湿度、热电堆电压及处理风量等影响制冷器性能的因素进行了实验研究与分析,并通过实验方法优化了半导体制冷器实际运行时的除湿能力及除湿效率,为半导体除湿机的设计及改进提供了实验依据。结合最佳工作电压,最佳处理风量的选取,在环境温度 26 ℃,相对湿度 65% 工况下,本制冷器最大除湿量可达 150 g/h,除湿效率 0.37。

关键词 半导体制冷;除湿;性能优化;实验研究

中图分类号:TB66;TU831.5

文献标识码:A

Experimental Research on Performance Optimization of Thermoelectric Dehumidifier

Luo Zhong Zhang Xu Wang Shengji Li Xiang

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

Abstract In order to verify thermoelectric refrigerator's capability to be used as domestic dehumidifier, a typical single-stage thermoelectric dehumidification system was built by using a thermoelectric refrigerator. The moist air flowed through the cold side and the hot side in turn which condensed in the cold side and the heat dissipation was recycled in the hot side. The factors (voltage, temperature, mass flow rate etc.) which affect the thermoelectric dehumidification capacity and efficiency are analyzed. In addition, by conducting the experiment, the performance of this thermoelectric dehumidifier was optimally improved. For example, a test was carried out at atmospheric conditions of 26 ℃ and 65% humidity, the maximum amount of dehumidification of this device can reach 150 g/h, dehumidification efficiency can reach 0.37.

Keywords semiconductor refrigeration; dehumidification; optimal operation; experimental investigation

环境温度条件下,降低湿度会让人们感觉更加干燥和凉爽,过高或者过低的湿度环境都会增加人体的不舒适感,根据现有的研究^[1],当环境温度为 26 ℃ 时,相对湿度由 30% 变为 70% 而引起的 PMV 值上升 0.298,并且温度越高,由相对湿度引起的 PMV 值改变越大。传统的除湿技术包括冷冻除湿、液体除湿等虽被广泛应用,但仍有一定的不足,冷冻除湿机振动强、噪声大,液体除湿设备复杂,需要高温热源,且冷水耗量大^[2]。半导体制冷与传统制冷方法不同,既没有制冷剂,也没有复杂的机械设备以及管路系统,在半导体片上通上直流电源,由帕尔贴效应形成冷端从外界吸热,另一端形成热端向外界散热。

对半导体制冷现有的研究主要是针对如何提高制冷性能,如 1) 新型半导体材料的开发: Xhaxhiu K 等^[3]通过固态合成得到针状晶体 $\text{In}_5\text{Se}_5\text{Br}$ 材料,塞

贝克系数可达到 $8900 \mu\text{V/K}$ 。2) 改变热端散热方式:李茂德等^[4]在第三类边界条件下得出制冷性能与热端散热强度之间的解析关系式,随着热端散热强度增强,制冷性能有所提升,但不可无限制通过提高热端散热强度来提高制冷器的制冷性能;任欣等^[5]给出了半导体制冷器在有限的热端散热强度下不同制冷工况的实验研究,并推导出最佳工况下半导体制冷器的工作电流和制冷量的近似公式;Astrain D 等^[6]利用热虹吸管强化热端的散热,热阻比一般翅片换热器减少 36%,制冷系数提高 32%;代彦军等^[7]采用强迫对流换热和热端采用热管换热器对实际半导体制冷装置进行实验分析,提出了改善半导体制冷元件散热条件的具体措施。3) 改善冷热端换热器肋片尺寸、间距、排布形式等:金刚善等^[8]模拟小空间 (1 m^3) 的制冷环境,利用实验表明半导体热电堆两

端的散热器和散冷器的结构是影响半导体制冷效率的一个重要因素。随着研究的不断深入,对半导体制冷性能的研究已相对成熟,而对半导体制冷器除湿性能的研究较少,Vián J G 等^[9]基于半导体制冷技术及热电类比技术设计了一个 100 W 双级半导体除湿器,研究了双级制冷器的输入电压及空气流量对除湿性能的影响;Udomsakdigool C 等^[10]通过改变肋片散热器的尺寸提高制冷器除湿能力,肋片效率可达 0.95,除湿效率能达到 0.88;谢玲^[11]通过热端散热能力的改善对小型半导体制冷除湿器进行开发和研究;韩耀明^[12]模拟小空间恒温恒湿环境,对最大制冷量 50 W 半导体除湿器的除湿性能因素进行了分析并与化学干燥剂对比研究。杨秀荣等^[13]利用半导体制冷技术设计了一种适用于小型仪器的小空间控温除湿系统。综上所述:多项研究已验证半导体制冷器在小型空间的制冷及除湿具有很大的优势,而用于家用除湿的潜力并未得到开发,也缺乏实验模型的支撑。因此,本文利用半导体制冷器搭建了半导体除湿系统,通过多组工况实验的方法探究其制冷除湿能力,并开发其用于家用除湿的潜能。

1 实验方案与原理

1.1 除湿系统

实验半导体制冷器采用 16 片 TEC-12706 平板型半导体制冷器件构成,为了保证每片半导体制冷片上电压电流均匀分布,采用 4×4 排布方式,即单独 4 片串联后并联布置,具体布置如图 1 所示。制冷片外形尺寸为 39.5 mm×39.5 mm×3.82 mm,最大温差电流 6 A,最大温差电压 15.4 V,最大制冷量 53.1 W,最大温差 67℃,电阻 2.05 Ω。冷热端分别布置了两个铝制翅片散热器,热端肋片尺寸为 295 mm×360 mm×110 mm,冷端肋片尺寸为 295 mm×360 mm×60 mm,冷热端底板厚度均为 10 mm,在冷热端表面均涂有一层导热硅脂,减少接触热阻。冷热端散热器分别安装 6 个直流风扇,型号为 12038,风扇尺寸为 120 mm×120 mm×38 mm,用于控制处理空气流量。

实验系统如图 2 所示,待处理的湿空气由风扇的作用流经半导体制冷器的冷端,经冷凝除湿后,循环进入制冷器的热端,能够有效改善热端的散热情况,降低热端的温度,一定程度上提高了半导体的制冷性能。

需要测试的空气参数包括空气体积流量及分别流经半导体制冷器的空气状态点 1、2、3 的干湿球温度。处理风量通过测试空气流速及风管截面积所得,空气流速由 WFWZY-1 型热线风速风温记录仪测量,



图 1 半导体制冷片布置图
Fig. 1 Layout of semiconductor

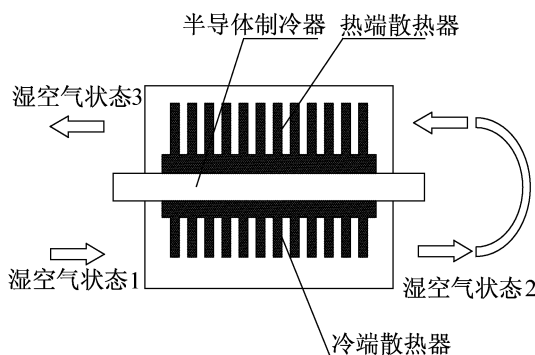


图 2 实验系统图

Fig. 2 Schematic of the experimental rig

测量精度为 0.05 ~ 30 m/s,温度 -20 ~ 80℃。空气干球温度采用铜-康铜热电偶测量,湿球温度采用湿纱布包裹的热电偶测量。

1.2 除湿原理

利用半导体冷端制冷量对空气冷凝除湿,除湿原理如图 3 所示,待处理的空气为状态点 1,吸收制冷器冷端产生的冷量冷凝除湿后变为状态点 2,由风扇作用强制将处理后的空气通过半导体制冷器的热端,吸热升温后变为状态点 3,最终送入室内。

除湿过程中,湿空气的含湿量由 d_1 降为 d_2 ,温度由 t_1 冷却为 t_2 ,除湿量为:

$$m = m_{da1} d_1 - m_{da2} d_2 \quad (1)$$

式中: m_{da1} , m_{da2} 分别为状态点 1、2 干空气的质量流量,kg/s; d_1 , d_2 分别为状态点 1、2 含湿量,g/(kg 干空气);而 $m_{da1} = G/v_1$, $m_{da2} = G/v_2$, G 为湿空气体积流量,m³/s; v_1 , v_2 分别为空气状态点 1、2 的比容,m³/kg。

因此,公式(1)可表示为:

$$m = G(d_1/v_1 - d_2/v_2) \quad (2)$$

1.3 实验可行性分析

根据帕尔贴效应,在半导体片上通入直流电压,

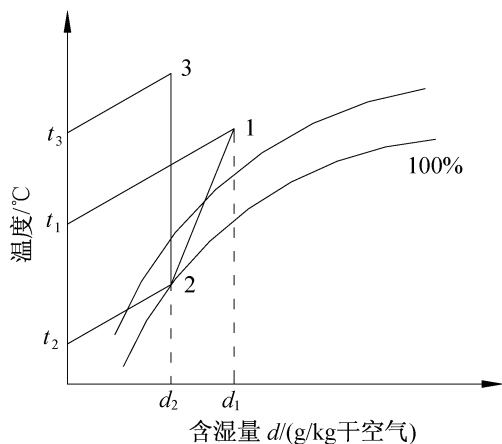


图 3 湿空气处理过程

Fig. 3 Air handling process

半导体的两侧分别形成冷热端,并伴随一定的冷量生成,热电堆产冷量^[14]表示为:

$$Q_0 = (\alpha_p - \alpha_n) I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - K \Delta T \quad (3)$$

结合热电堆输入电压关系式:

$$U = IR + (\alpha_p - \alpha_n) \Delta T \quad (4)$$

由公式(3)~(4)可得:

$$Q_0 = (\alpha_p - \alpha_n) I T_c - \frac{1}{2} I^2 R - \frac{K(U - IR)}{\alpha_p - \alpha_n} \quad (5)$$

式中: α_p 、 α_n 分别为 p 型及 n 型半导体温差电动势率, $\alpha_p = \alpha_n = 1.8 \times 10^{-4}$ V/K; M 为待处理空气质量流量,kg/s; U 、 I 、 P 分别为热电堆输入电压、电流和功率; ΔT 为半导体冷热端温差,℃; R 为半导体电偶臂电阻, $R = 1.81 \times 10^{-3} \Omega$; K 为半导体电偶臂总热导,W/K; $K = k_n S_n / l_n + k_p S_p / l_p$, $S_n = S_p = 1.4 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm}$, $l_n = l_p = 2.5 \text{ mm}$ 。

由公式(5)可知,为获取半导体理论制冷量,直接测量量有电流 I 、电压 U 及冷端温度 T_c 。因此,有 $Q_0 = f(I, U, T_c)$, 根据随机误差传递公式: $\delta Q_0 = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2}$, x_i 分别为 I, U, T_c 。在电流测量精度 0.1 A,电压测量精度 0.1 V,温度测量精度 0.1 ℃的条件下,做多组工况对比实验,可得 $\delta Q_{0_{\max}} = 0.503 \text{ W}$,而此时实际单半导体片制冷量为 23.2 W,相对误差仅为 2.17%,故从误差传递方面可保障理论制冷量的准确性。

而在实际除湿过程中,湿空气吸收的冷量为:

$$Q_1 = M(h_1 - h_2) \quad (6)$$

利用简化理论所得制冷量 Q_0 与实测制冷量 Q_1 进行对照,来验证实验的可靠性和实验数据的可信性。

由如图 4 可知,随着电压的升高,制冷量不断升

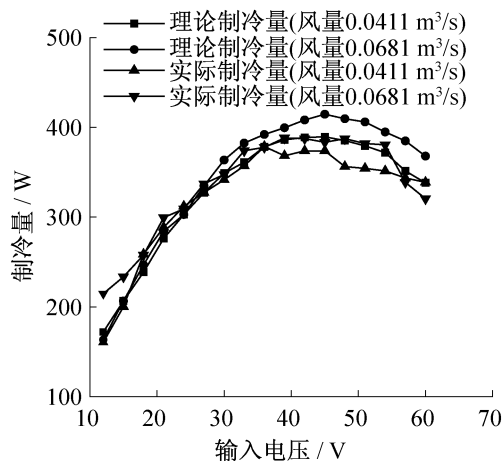


图 4 理论制冷量与实验制冷量对比

Fig. 4 Comparison of theoretical and experimental refrigeration capacity

高。在相同送风量条件下,电压大约为 39 V 时,制冷量达到最大值,制冷能力最强;然而随着电压的继续增大,制冷能力反而下降。根据理论及实验均可知,在制冷片冷热端散热能力有限的情况下,随着电压的增大,热端温度不断上升,冷热端温差不断增大,而热端散热能力不足,致使半导体内部蓄热,由提高电压而增加的制冷量低于由焦耳热产生的热量,出现制冷量下降的趋势。图中理论制冷量及实验制冷量变化趋势一致,并且拟合度较高,经过相对误差计算,大部分数值相对误差控制在 5% 以内,仅有少部分实验数据相对误差能达到 15%,因此证明,在实验误差允许范围内,理论和实验结果吻合较好,此研究方法是可靠的。

2 实验结果与分析

2.1 输入电压对除湿性能的影响

本实验设计多组实验工况,用两台数显直流开关电源分别控制半导体热电堆电压和直流风扇电压,实现热电堆输入电压和送风量的独立控制,开关电源脉动系数在 10% 以下。实验开始前,先对实验用制冷器运行 2 h 以上,待其稳定运行后,以 3 V 电压做递增实验,并采用 FLUKE2635A Hydra 数据采集仪记录状态点 1、2、3 干湿球温度以及制冷片冷热端温度。以下实验条件均为环境干球温度为 26 ℃,相对湿度为 65%。

通过改变处理风量以及半导体制冷片输入电压,分析半导体制冷器的除湿能力和除湿效率的变化情况,此处定义半导体除湿效率为:

$$\eta = \gamma m / 3600 P_0 \quad (7)$$

式中： γ 为水的汽化潜热， kJ/kg ； m 为除湿量， g/h ；系统消耗的总功率 P_0 应为热电堆输入功率 P 及风扇输入功率 P_F 之和， W ，即 $P_0 = P + P_F$ 。

由图 5 可知，随着电压的升高，除湿量不断升高。在各送风量条件下，电压大约为 39 V 时，制冷器除湿量达到最大值，除湿能力最强，然而随着电压的继续增大，除湿能力反而下降。由此可知，除湿量与制冷量的变化趋势是基本同步的，当电压小于 39 V 时，增大电压所增加的产冷量大于增加电压而产生的焦耳热，故除湿能力增强；反之，电压大于 39 V 时，增加的产冷量逐步小于增加的焦耳热，导致除湿能力的下降。然而，半导体的最佳除湿效率电压却在 21 V 附近，如图 6 所示，可知最佳除湿能力电压与最佳除湿效率电压并不一致。在半导体制冷器实际运行中，应同时兼顾除湿能力及除湿效率的匹配，结合不同送风量工况分析，除湿电压宜控制在 21 ~ 39 V 电压之间，即单制冷片电压于 5.25 ~ 9.75 V 为优。在此段电压下，电压的微小变化对除湿量的影响小于对半导体耗功率的影响，因此，制冷除湿能力在上升，而除湿效率却在下降。由实验结果可知，最大除湿量可达 150 g/h，即单片制冷片除湿量达 9.38 g/h，最大除湿效率可达 0.37。根据除湿机标准 GB/T19411—2003，换算得本制冷除湿器名义除湿量为 140.2 g/h，能够达到冷冻除湿机性能的 43.7%。

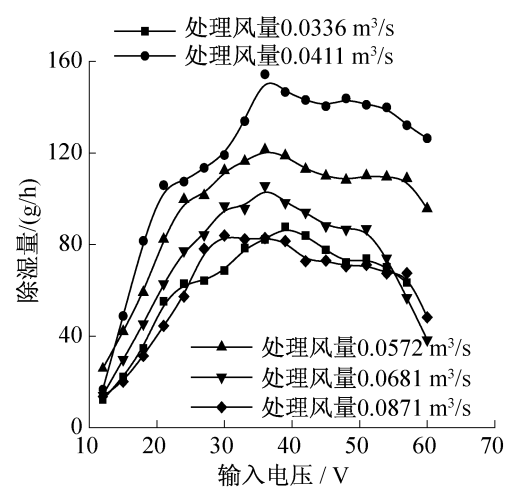


图 5 除湿量随输入电压的变化
Fig. 5 Dehumidification capacity with the variation of input voltage

2.2 处理风量对除湿性能的影响

调节直流风扇输入电压，控制送风量，对不同处理风量进行了实验研究，发现存在最佳处理风量。如图 7 和图 8 所示，在干球温度 26 ℃，相对湿度 65% 实验工况下，最佳处理风量为 0.045 m³/s，

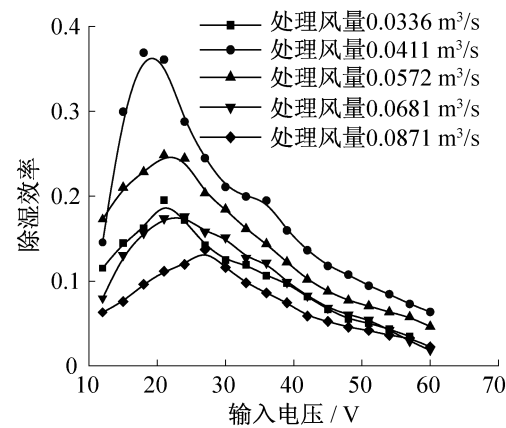


图 6 除湿效率随输入电压的变化
Fig. 6 Dehumidification efficiency with the variation of input voltage

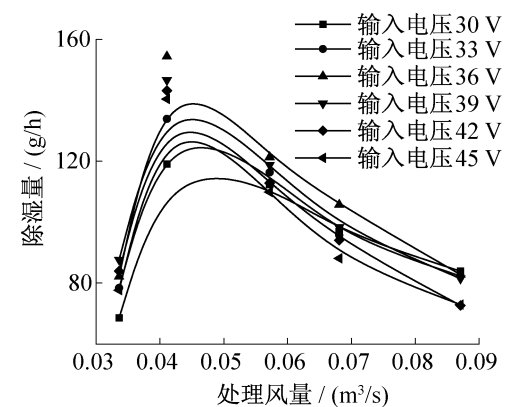


图 7 除湿量随处理风量的变化
Fig. 7 Dehumidification capacity with the variation of air flow rate

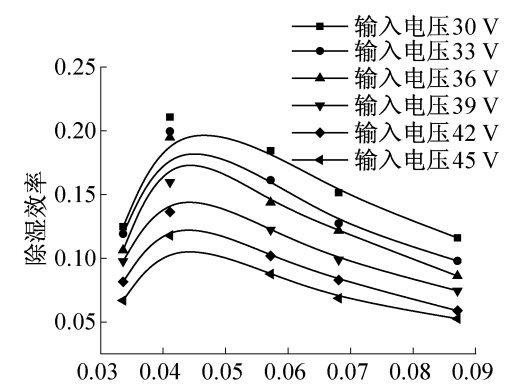


图 8 除湿效率随处理风量的变化
Fig. 8 Dehumidification efficiency with the variation of air flow rate

即单制冷片最佳处理风量为 10.1 m³/h。当送风量小于 0.045 m³/s 时，随着送风量的增大，能够有效加快制冷器冷热端与空气的热交换速度，降低半导

体制冷片冷热端温差,增大制冷量。并且此时空气流速并不大,与冷端肋片接触时间足够长,能够有效保证水蒸气的冷凝速度,从而增大除湿量。当处理风量超过 $0.045\text{ m}^3/\text{s}$ 后,即使加强了冷热端散热能力,但由于半导体片制冷能力有限,且空气流速较大,与冷端肋片接触时间短,造成空气中大部分水蒸气无法冷凝,只能除去部分水蒸气,除湿量下降,除湿效率也随之下降。

2.3 初始状态对除湿性能的影响

本研究的目的是探索半导体制冷器用于家用除湿的可能性。在不同的环境参数下,半导体制冷器除湿效果不同,如图 9 所示。随着环境温度的升高,除湿量与除湿效率均有升高的趋势。

我国长江中下游的一些地区,温湿度大是梅雨季节的主要特征,半导体制冷器在该地区可以达到很好的除湿效果,并得到较好的推广应用。

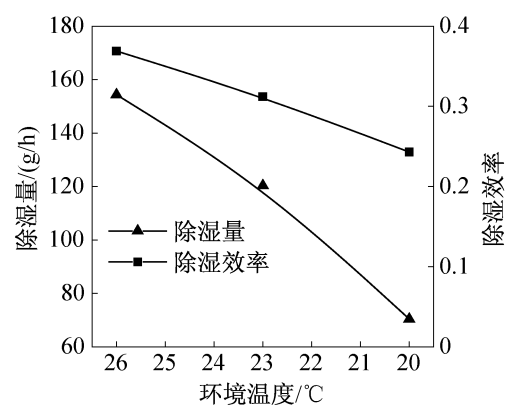


图 9 除湿量及除湿效率随环境温度的变化

Fig. 9 Dehumidification capacity and efficiency with the variation of environmental temperature

2.4 送风状态分析

除湿机处理的空气先经冷端冷凝除湿,后经热端加热升温。由空气处理过程可知,将半导体实际耗功率加载到空气中,会引起送风温度的升高,从而消除将冷空气直接排入室内的冷风感。利用降温除湿后的空气再次经过除湿机的热端,能够有效改善热端的散热,降低热端的温度,一定程度上提高半导体制冷性能。然而,冷空气在经过除湿机后,对送风的空气状态并未做详细研究,送风温度过高过低,均会引起 PMV 的偏移,因此,本实验对出风口空气状态进行了监测,如图 10 所示。处理风量越小,输入电压越大,送风进出口温差越大,且温差对输入电压呈线性增长。制冷器在低压段 $21\sim39\text{ V}$ 内运行,不仅能有效提高除湿量及除湿效率,还能有效控制送风状态。

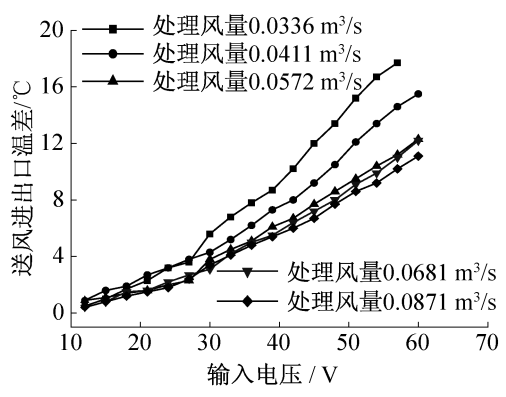


图 10 送风进出口温差随输入电压的变化

Fig. 10 Supply air temperature difference with the variation of input voltage

3 结论

为了验证新型半导体除湿技术的除湿性能,并开发其应用于家用除湿的潜力,本文利用半导体制冷器搭建了半导体除湿系统,通过多组工况实验的方法探究其制冷除湿能力。研究发现:

1) 在半导体冷热端散热能力有限的条件下,半导体制冷器最佳除湿量电压与最佳除湿效率电压不匹配,单制冷片电压适宜控制在 $5.25\sim9.75\text{ V}$ 低电压段;

2) 当半导体制冷片输入电压一定,其制冷能力受到限制,存在最佳处理风量。本制冷器最佳处理风量为 $0.045\text{ m}^3/\text{s}$,单片制冷片最佳除湿风量为 $10.1\text{ m}^3/\text{h}$ 。

3) 结合送风温度、最佳除湿量电压、最佳除湿效率电压和最佳处理风量的选取,制冷器最大除湿量可达 150 g/h ,单片制冷片最大除湿量能达 9.38 g/h ,最大除湿效率可达 0.37 ,最大除湿量可达到冷冻除湿机性能的 43.7% 。

参考文献

[1] 申欢迎,秦萍,董军. 环境因素对 PMV 指标的影响分析[J]. 制冷与空调(四川), 2003(4): 27-29. (Shen Huanying, Qin Ping, Dong Jun. Analysis on the environment factors affecting the PMV index[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2003(4): 27-29.)

[2] 张立志. 除湿技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 8-12.

[3] Xhaxhiu K, Kvarnström C, Damlin P, et al. Renewable energy in focus: $\text{In}_2\text{Se}_3\text{Br}$, a solid material with promising thermoelectric properties for industrial applications[J]. Materials Research Bulletin, 2014, 60: 88-96.

- [4] 李茂德, 卢希红. 热电制冷过程中散热强度对制冷参数的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(7): 811-813. (Li Maode, Lu Xihong. Influence of intensity of heat emission on performance of semiconductor refrigeration[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2002, 30(7): 811-813.)
- [5] 任欣, 张鹏. 有限散热强度下半导体制冷器性能的实验研究[J]. 低温工程, 2003(4): 57-62. (Ren Xin, Zhang Peng. An experimental research on performance of thermoelectric refrigerator under limited cooling intensity[J]. Cryogenics, 2003(4): 57-62.)
- [6] Astrain D, Viñ J G, Dominguez M. Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(17): 2183-2200.
- [7] 代彦军, 戴维涵, 王如竹. 半导体冰箱冷热端散热条件实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(Suppl.): 221-224. (Dai Yanjun, Dai Weihang, Wang Ruzhu. Experimental investigation on conditions of heat exchanging for both hot and cold sides in a thermoelectric refrigerator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(Suppl.): 221-224.)
- [8] 金刚善, 李彦, 刁永发. 小空间半导体制冷的实验研究[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(3): 51-54. (Jin Gangshan, Li Yan, Diao Yongfa. Experimental investigation of small semiconductor refrigeration[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004, 30(3): 51-54.)
- [9] Viñ J G, Astrain D, Dominguez M. Numerical modelling and a design of a thermoelectric dehumidifier[J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(4): 407-422.
- [10] Udamsakdigool C, Hirunlabh J, Khedari J, et al. Design optimization of a new hot heat sink with a rectangular fin array for thermoelectric dehumidifiers[J]. Heat Transfer Engineering, 2007, 28(7): 645-655.
- [11] 谢玲. 小型热电制冷(除湿)器的开发与研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [12] 韩耀明. 半导体制冷微型除湿器与化学干燥剂的对比试验研究[J]. 制冷, 2008, 27(2): 12-17. (Han Yaoming. Comparison between semiconductor refrigeration mini dehumidifier and chemical desiccant[J]. Refrigeration, 2008, 27(2): 12-17.)
- [13] 杨秀荣, 刘媛媛, 孟凡良, 等. 基于半导体制冷的小空间控温除湿系统研究[J]. 现代科学仪器, 2012, 26(3): 51-54. (Yang Xiurong, Liu Yuanyuan, Meng Fanliang, et al. Investigation of temperature controlling and dehumidification system for small space based on semiconductor cooler[J]. Modern Scientific Instruments, 2012, 26(3): 51-54.)
- [14] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术[M]. 2版. 上海: 上海交通大学出版社, 1999: 7-12.

通信作者简介

张旭,男,教授,博士生导师,同济大学暖通空调及燃气研究所所长,同济大学机械与能源工程学院, (021)65983605, E-mail: zhangxu-hvac@tongji.edu.cn. 研究方向: 建筑节能及新能源在建筑系统的应用, 建筑物能量系统生命周期评价方法及评价指标体系, 面向小城镇及农村的低成本能源系统的技术集成和新能源综合利用, 复杂空间通风技术。

About the corresponding author

Zhang Xu, male, professor, Ph. D. adviser, director of Department of HVAC and Thermal Engineering, School of Mechanical Engineering, Tongji University, + 86 21-65983605, E-mail: zhangxu-hvac@tongji.edu.cn. Research fields: energy conservation and renewable energy in building, LCA, low-exergy energy in rural area, ventilation in complicated space.

(上接第93页)

- [14] 唐俊. PSO 算法原理及应用[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(2): 213-216. (Tang Jun. Principle and application of PSO algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(2): 213-216.)
- [15] 熊伟丽, 徐保国. 基于 PSO 的 SVR 参数优化选择方法研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2442-2445. (Xiong Weili, Xu Baoguo. Study on optimization of SVR parameters selection based on PSO[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(9): 2442-2445.)
- [16] 练斯甄, 周璇, 闫军威. 基于改进 BP 神经网络的冷水机组 IPLV 预测方法[J]. 建筑科学, 2014, 30(6): 68-72. (Lian Sizhen, Zhou Xuan, Yan Junwei. Prediction technique of integrated part load value(IPLV) of water chillers based on improved BP neural network[J]. Building

Science, 2014, 30(6): 68-72.)

通信作者简介

周璇,女,副研究员,硕士生导师,华南理工大学机械与汽车工程学院, 13631378083, E-mail: zhouxuan@scut.edu.cn. 研究方向: 空调负荷预测、空调系统节能优化控制。

About the corresponding author

Zhou Xuan, female, associate professor, supervisor of postgraduate, School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, + 86 13631378083, E-mail: zhouxuan@scut.edu.cn. Research fields: energy energy-saving control of air-conditioning system, load forecasting of central air-conditioning system.