

文章编号:0253-4339(2020) 01-0131-10  
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.01.131

应用半导体制冷的冷藏链用储藏箱性能实验研究

邱兰兰 王瑜 朱洁茹 鲍俊 刘金祥

(南京工业大学城市建设学院 南京 210009)

**摘 要** 半导体制冷片因其体积小、制冷速度快的优点在冷藏链运输领域具有很强的应用潜力。为测试半导体制冷箱的制冷效率,本文搭建了制冷储藏箱性能测试实验台,对应用两片 TEC1-12706 型及 TEC1-12712 型半导体制冷片的制冷储藏箱的工作性能进行实验研究。实验中分别在储藏箱中加入 2 000 mL 冰块开始实验及应用 1 500 mL 冰块与 3 kg 食材及 3 瓶 500 mL 矿泉水的组合开始实验,两次实验中同时改变热端散热方式及冷端风扇吹风方式。结果表明:对于同型号半导体制冷片,水冷方式时制冷效果更好,但持久性不强;同型号半导体制冷片冷端风扇下吹方式与侧吹方式相比气流组织更好。当容积为 0.1 m<sup>3</sup> 的储藏箱面向冷藏需求时,可应用两片采取热端风冷方式的 TEC1-12706 型半导体制冷片,此时 10 h 内箱体中心温度最大约为 6 ℃,最小约为 0 ℃;当容积为 0.1 m<sup>3</sup> 的储藏箱面向冷冻需求时,可应用两片 TEC1-12712 型半导体制冷片结合水冷式热端和风扇下吹式冷端,能维持 3 h 箱体内温度不高于 0 ℃。

**关键词** 冷藏链;半导体制冷;制冷性能实验;温度场;运行工况

中图分类号:TB61<sup>+</sup>1;TN37

文献标识码:A

Experimental Research on the Performance of Storage Box with Semiconductor Refrigeration Applied in Cold Chain

Qiu Lanlan Wang Yu Zhu Jieru Bao Jun Liu Jinxiang

(College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing, 210009, China)

**Abstract** Despite its small volume and quick refrigeration, semiconductor refrigeration plates have good application potential in refrigerated transportation. To examine the cooling capacity of the storage box with a semiconductor, an experimental bench was established to investigate the working performance of a storage box with two semiconductors types, namely, TEC1-12706 and TEC1-12712. The twice experiments started with 2 000 mL ice cubes and the combination with 1 500 mL ice cubes, 3 kg foodstuffs, and 3 bottles of mineral water with a volume of 500 mL respectively in the storage box. Meanwhile, different heat dissipation method of the hot side and fan arrangement of the cold side were both considered during the test. The results show that the TEC1-12712 with water-cooling has a larger cooling capacity than the TEC1-12706 with air-cooling. Comparing the performance of same type of refrigeration chip using water and air-cooling, it was inferred that the water-cooling has a better cooling effect and a shorter resistance time. Moreover, a better airflow distribution appears when the fan is arranged below the cold side of the refrigeration chip rather than beside it. With the cold storage demand for a volume of 0.1 m<sup>3</sup>, two chips of the TEC1-12706 type with air-cooling on the hot side are preferred. Over 10 hours, the center temperature of the box was maintained at 6 ℃ and the minimum value in the box was approximately 0 ℃. With the freezing demand, two chips of type TEC1-12712 with water-cooling on the hot side and the fan below the cold side are preferred. With this application method, the center temperature is controlled below 0 ℃ within 3 hours.

**Keywords** cold chain; semiconductor refrigeration; refrigeration performance test; temperature field; operating conditions

半导体制冷(也称热电制冷,thermo electric cooler, TEC)技术具有体积小、无运动部件、无噪音、无制冷剂、制冷速度快、易于维护等优点,被认为是最具潜力的制冷技术之一<sup>[1-2]</sup>。半导体制冷的特点决定了其适用于制冷量较小,且要求装置小型化的场合。目

前已广泛应用于军事、航空、医疗卫生、微电子散热等领域,以实现电子元件和惯导设备的快速冷却或高精度温度控制<sup>[3-6]</sup>。随着人们生活水平的提高,半导体制冷也开始应用于小批量果蔬短距离冷藏链配送<sup>[7]</sup>。目前由冷库到配送站多用冷藏车,由配送站

到客户多用泡沫箱加冰块,从配送站到客户这一最后阶段缺乏关键设备。因此,研发一种便捷可靠的储藏箱,在短途运输中将冷藏产品送到客户成为冷藏链领域迫切的需求。

在半导体制冷片发展方面,如何提高制冷效果是急需研究的方向。提高半导体制冷技术的关键是:1)新型半导体材料的开发。K. Xhaxhiu 等<sup>[8]</sup>通过固态合成得到针状晶体  $\text{In}_5\text{Se}_3\text{Br}$  材料,塞贝克系数最大可达  $8\,900\,\mu\text{V}/\text{K}$ 。S. W. Kim 等<sup>[9]</sup>以  $\text{TiNiSn}$  为基底,在惰性气体保护氛围下,结合热压成型和粉末冶金技术,实现了超高热电性能合金材料的制造,使其具有  $0.004\,5\,\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})^2$  功率因子(仅当温度为  $670\,\text{K}$  时),其热电优值高达  $0.7\sim 0.8$ ,热电性能较为显著。2)半导体制冷热端散热的改善。李茂德等<sup>[10]</sup>对热电制冷电偶对在第三类边界条件下进行求解,得出热电制冷性能与热端散热强度之间的解析关系式,同时得出随着热端散热强度的增强,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。D. Astrain 等<sup>[11]</sup>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  $32\%$ 。梁斯麒<sup>[12]</sup>通过实验分析指出半导体制冷系统的优化、节能与半导体的材料、精细的加工工艺、良好的结构设计和热端适宜散热强度有直接关系。

在半导体应用领域,罗仲等<sup>[13]</sup>利用半导体制冷器设计了一种适用于家用的半导体除湿系统。张晓芳<sup>[14]</sup>通过对比风冷、循环水和恒温水条件下半导体制冷冰箱的制冷性能,设计了一种水冷散热半导体制冷冰箱。赵新杰等<sup>[15]</sup>设计了一种基于半导体制冷的 LED 前照灯。赵福云等<sup>[16]</sup>设计了一种半导体制冷箱,研究了半导体制冷片工作压力和冷热端散热风扇电压对半导体制冷片冷热端温度、制冷箱内部温度、

制冷量及制冷系数的影响,结果表明:半导体制冷片在最佳工作电压运行时,制冷箱内温度达最低;冷热端风扇电压在最佳工作区间运行时,制冷箱内部温度能降到最低。戴源德等<sup>[17]</sup>研制了一台热管散热型半导体制冷箱,通过实验表明:在最佳工况下,相对于风冷和水冷散热方式,热端采用热管散热可使系统获得更低制冷温度,且热端散热半导体制冷系统的制冷效果最佳。半导体制冷技术已广泛运用于各个领域,并出现在食品制冷储藏箱领域。但针对小型食品制冷储藏箱的实际应用效果的定量研究较为缺乏,且无法量化半导体热端散热方式对非空载状态下箱体内实际温度的影响。另外,部分已提出的半导体配送箱虽有一定制冷效果,但适用范围受限。王亚娟等<sup>[7]</sup>提出的半导体制冷果蔬配送箱所适用的环境温度不能高于  $26\,^{\circ}\text{C}$ ,无法满足夏季的配送任务需求。

为了寻找半导体制冷片与制冷箱的最佳匹配方式,达到节约能源、提高经济效率的目的,本文首先设计了一种应用半导体制冷的便捷可靠的冷藏链用储藏箱并搭建了半导体制冷箱样机及其参数测试实验装置,分析不同半导体制冷片、不同热端散热方式和冷端风扇布置方式对半导体制冷系统制冷性能的影响,并根据不同的应用背景归纳应用两种半导体制冷片的储藏箱的应用场合。

1 实验方案与原理

1.1 实验台及组成部分

本文设计的冷藏链用半导体制冷储藏箱实验平台由保温箱体、半导体制冷单元、潜水泵、保温水箱等组成,实验原理如图 1 所示。半导体制冷储藏箱及保温水箱实物图如图 2 所示。实验工况如表 1 所示。

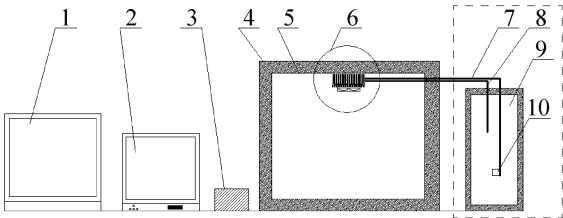
表 1 实验工况  
Tab.1 Operating conditions

| 储藏箱尺寸/mm |     |     | 环境温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 保温层       | 半导体片数 | 热端散热方式 |    | 实验食材及初始温度/ $^{\circ}\text{C}$ |    |    |     | 冰块       |
|----------|-----|-----|--------------------------|-----------|-------|--------|----|-------------------------------|----|----|-----|----------|
| 长        | 宽   | 高   | 30                       | 聚氨酯 20 mm | 2 片   | 风冷     | 水冷 | 青菜                            | 冰盒 | 冻肉 | 矿泉水 | 2 000 mL |
| 560      | 405 | 445 |                          |           |       |        |    | 10                            | -7 | -2 | 1   |          |

外覆 20 mm 的聚氨酯保温材料,内覆热反射膜。实验采用的半导体制冷片数目均为两片,且半导体制冷片冷端接导冷铝板,热端接导热铝板。实验用储藏箱体积约为  $0.1\,\text{m}^3$ ,一个半导体制冷片无法有效、快速降低箱体温度;本文前期实验证明两个半导体已能满足该容积储藏箱的冷量需求。另外,本

文侧重研究为热端散热方式及冷端吹风方式对半导体制冷性能的影响,后续会再针对箱体体积和半导体数目进一步优化,促进箱体的实用化发展。如图 1 所示,虚线内是半导体制冷片热端为水冷方式时的示意图,保温水箱内装入足量的冰水混合物,冷却水通过潜水泵驱动,经过进水管流经导冷铝板

与 TEC 片热端传热换热,经过出水管流入保温水箱中,并在水路中循环。冷端风扇位于导冷翅片上端,当保温箱体工作时,导冷风扇驱动气流循环,气流在导冷铝板处吸收冷能,并导流至半导体制冷箱体内部,实现制冷降温过程。



1 计算机;2 数据采集仪;3 开关电源;4 保温箱体;  
5 热反射膜;6 半导体制冷单元;7 进水管;8 出水管;  
9 保温水箱;10 潜水泵。

图 1 半导体制冷箱实验平台原理

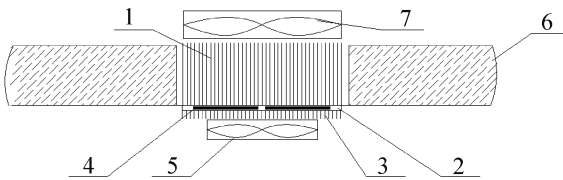
Fig.1 The principle of the experimental bench for the semiconductor refrigeration storage box



图 2 半导体制冷储藏箱及保温水箱实物图

Fig.2 Physical map of the semiconductor refrigeration storage box and its water tank

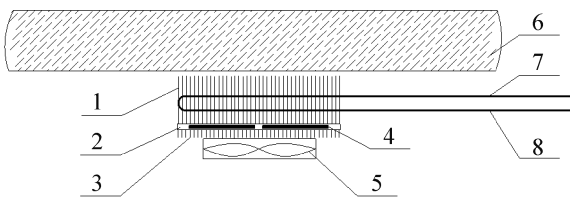
图 3 所示为半导体制冷片热端为风冷方式时,半导体制冷单元结构。图 4 所示为半导体制冷片热端为水冷方式且冷端风扇下吹和侧吹时,半导体制冷单元结构。



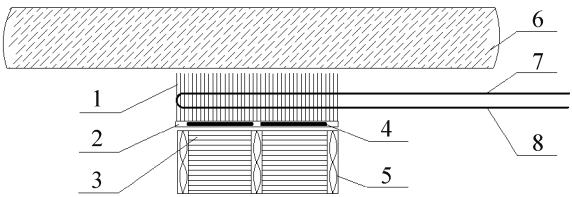
1 导热铝板;2 硬质隔热板;3 导冷铝板;4 半导体制冷片  
(两片);5 冷端风扇;6 保温箱体;7 热端风扇。

图 3 风冷式半导体制冷单元结构

Fig.3 Structure of semiconductor refrigeration unit with air cooling for the hot side



(a) 下吹



(b) 侧吹

1 导热铝板;2 硬质隔热板;3 导冷铝板;4 半导体制冷片  
(两片);5 冷端风扇;6 保温箱体;7 进水管;8 出水管。

图 4 冷端风扇下吹及侧吹水冷式半导体制冷单元结构

Fig.4 Structure of semiconductor refrigeration unit with water cooling for the hot side and the fan installed below and beside the cold side

片及两片 TEC1-12712 型半导体制冷片进行测试,制冷片参数如表 2 所示。箱体内分别装入冰块和食材,如图 5 所示。如图 5(a) 所示,实验时每次装入相同体积的冰块,具体为:冰盒 4 个(500 mL/个),冰块体积为 2 000 mL。如图 5(b) 所示,实验时每次装入食材相同,具体为:青菜 2.5 kg、冰盒 3 个(500 mL/个)、冻肉 0.5 kg、矿泉水 3 瓶(500 mL/瓶),青菜提前已放入冷藏箱保鲜。

表 2 半导体制冷片型号参数

Tab.2 Parameters of the semiconductor refrigeration chip

| 型号         | 尺寸/mm |    |      | 额定工作最大电<br>电压/V | 最大制<br>流/A | 最大制<br>冷量/W |
|------------|-------|----|------|-----------------|------------|-------------|
|            | 长     | 宽  | 高    |                 |            |             |
| TEC1-12706 | 40    | 40 | 3.08 | 12              | 6          | 52.8        |
| TEC1-12712 | 40    | 40 | 2.38 | 12              | 12         | 103.0       |

1.2 实验步骤

1)通过直流稳压电源对半导体制冷系统供电,实验中使用空调控制室内温度,使每次实验时,室内温度保持在约 30 ℃。

2)考虑到从配送站到客户运输的冷藏产品均具有一定冷量,为模拟配送环境,箱体内分别放入冰块和具备一定初始温度的食材,且箱体尺寸为长×宽×高:560 mm×405 mm×445 mm;采用两片半导体制冷片,在最佳工作状态下,分别改变半导体芯片型号、热端散热方式、冷端风扇吹风方向,对比箱体内部及

实验时分别使用两片 TEC1-12706 型半导体制冷

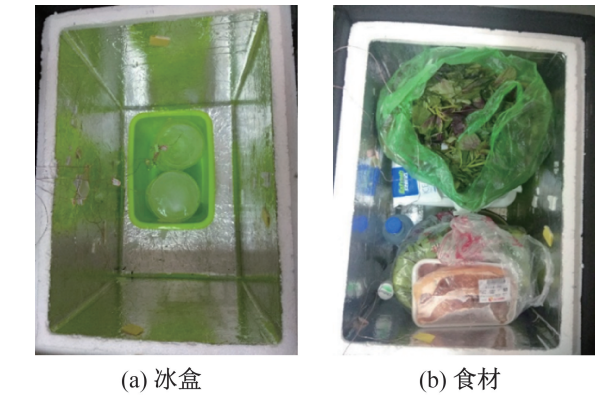


图 5 实验用冰盒及食材

Fig.5 The ice box and food applied in the experiment

TEC 片冷端温度变化。

3) 为便于观察和操作,采用热电偶记录温度,数据采集仪传输数据至电脑;考虑到 TEC 片冷端温度难以测定,测试导冷翅片的温度代替 TEC 片冷端温度;箱体装冰块时测点为冷端翅片、冷端出风、冷却水、热端出水、箱体中心和冰块中心位置;箱体装食材时测点为冷端翅片、冷端出风、冷却水、热端出水、青菜表面、肉表面、箱体下侧边缘位置。

1.3 仪器及误差

实验用测温仪器为数据采集仪,型号为 Agilent 34 972 A,利用 K 型热电偶测量温度,利用万用表测量电流和电压,测量仪器型号及其相对误差如表 3 所示。

| 表 3 实验仪器及其误差                                    |             |                  |      |
|-------------------------------------------------|-------------|------------------|------|
| Tab.3 Type and uncertainties of the instruments |             |                  |      |
| 项目                                              | 型号          | 范围               | 误差/% |
| 热电偶                                             | TT-K-30-SLE | -200 ℃ ~260 ℃    | ±0.4 |
|                                                 |             | 200 mV/2 V/20 V/ | ±0.5 |
| 万用表                                             | UT39C       | 200 V/1 000 V    | ±0.8 |
|                                                 |             | 2 mA/200 mA/20 A |      |

2 实验结果与分析

2.1 TEC1-12706 型热端风冷与 TEC1-12712 型热端风冷对比

实验时分别使用热端风冷和冷端风扇下吹的两片 TEC1-12706 型半导体制冷片及两片 TEC1-12712 型半导体制冷片进行测试。箱体内分别加入冰盒,箱体内各温度测点温度随时间的变化如图 6 所示,功率变化如图 7 所示。

1) 箱体内加冰块。

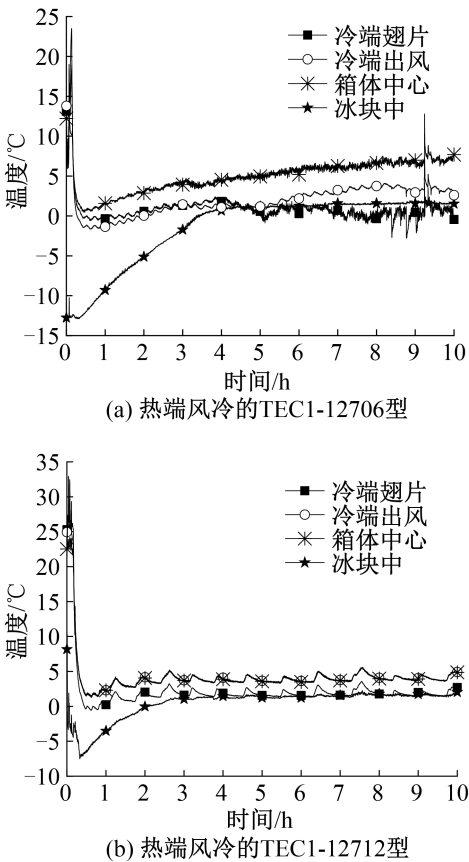


图 6 半导体制冷箱内加冰块时各测点温度随时间的变化  
Fig.6 Temperature variation of each measuring point after adding ice cubes in the storage box

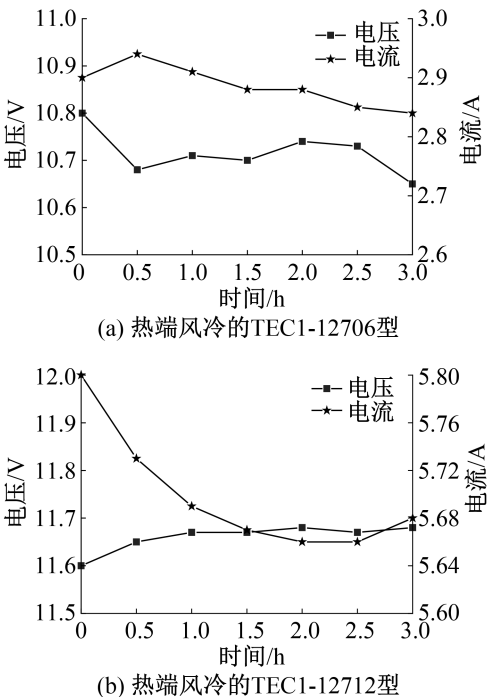


图 7 热端风冷的半导体制冷片的工作电压电流随时间变化  
Fig.7 Variations of the voltage and current of semiconductor refrigeration chip with the air cooling for the hot side

由表 4 可知,箱体内放入 2 000 mL 冰块时,化冰量分别为 238 mL 和 250 mL,约为 12%,因此可以推断,大部分冷量是由半导体制冷片提供,从而维持大部分冰块不融化,冰块融化潜热仅占箱内冷量的一小部分。由图 6 可知,热端风冷方式的 TEC1-12712 型工作时,热端产热量较大,常规风冷方式不能满足热

端散热需求,热端无法及时散热,影响制冷效率,故冷端翅片平均温度较高,因此 TEC1-12712 型半导体制冷片工作时,更应搭配水冷散热方式。10 h 内两种工况下箱体中心温度均适合冷藏食品,故热端风冷方式的 TEC1-12706 型和 TEC1-12712 型工作时,均适合作冷藏箱。

表 4 热端风冷的 TEC1-12706 型和 TEC1-12712 型半导体制冷片工作时测温点参数分析  
Tab.4 Parameter analysis for the measuring points of the semiconductor type TEC1-12706 and TEC1-12712 with air cooling for the hot side

| 半导体组件                | 冰块化冰量/mL | 冷端翅片平均温度/℃ | 冷端出风平均温度/℃ | 箱体中心平均温度/℃ | 时间/h |
|----------------------|----------|------------|------------|------------|------|
| 热端风冷方式的 TEC1-12706 型 | 238      | -1         | 0          | 4          | 10   |
| 热端风冷方式的 TEC1-12712 型 | 250      | 0          | 3          | 3          | 10   |

2) 功率对比。  
由图 7(a) 可知,两片 TEC1-12706 型半导体制冷片工作时,电压平均值为 10.7 V,电流平均值为 2.9 A,平均功率为:

$$P=UI=10.7\times2.9=31.03\text{ W}\tag{1}$$

由图 7(b) 可知,两片 TEC1-12712 型半导体制冷片工作时,电压平均值为 11.7 V,电流平均值为 5.7 A,平均功率为:

$$P=UI=11.7\times5.7=66.69\text{ W}\tag{2}$$

由图 6 和图 7 可知,热端风冷式的 TEC1-12706 型和 TEC1-12712 型半导体制冷片工作时,储藏箱均适合作冷藏箱,且低温状态能维持 10 h;功率分别约为 31.03 W 和 66.69 W。综上所述,热端风冷式的 TEC1-12706 型半导体制冷片能耗更低,效率更好。下一节中将对同样使用 TEC1-12706 型半导体的制冷箱,变换不同热端冷却方式,进一步研究放入食材的实际性能。

2.2 TEC1-12706 型热端风冷与 TEC1-12706 型热端水冷

实验时分别使用热端风冷与热端水冷且冷端风扇下吹的两片 TEC1-12706 型半导体制冷片进行测试。箱体内分别加入冰块、食材,箱体内各测点温度随时间的变化如图 6(a)、图 8 和图 9 所示。

1) 箱体内加冰块。  
由图 6(a)、图 8 和表 5 可得,热端水冷方式的 TEC1-12706 型工作时,热端能及时有效散热,TEC1-12706 型制冷效率较高,故冷端翅片平均温度约为 -13 ℃,冷端出风平均温度约为 -10 ℃,箱体中心温度达到 -10 ℃,可维持约 4 h;3.7 h 后,热端冷却水温度迅速增大,影响热端散热和制冷效果。热端风冷方

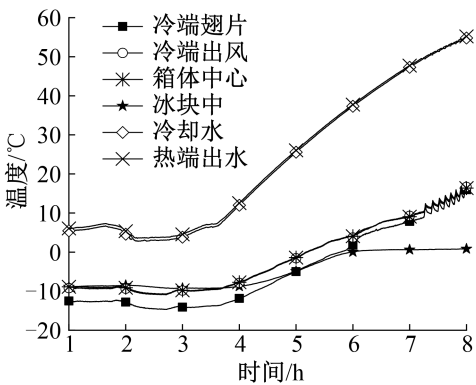


图 8 热端水冷的 TEC1-12706 型半导体制冷片工作时各测点温度随时间的变化  
Fig.8 Temperature variation of each measuring point with the semiconductor type TEC1-12706 and water cooling of the hot side

式的 TEC1-12706 型工作时,箱体中心温度约为 4 ℃,可维持约 10 h。

2) 箱体内加食材。  
由图 9 和表 6 可知,热端水冷方式的 TEC1-12706 型工作时,青菜表面平均温度约为 1 ℃,温度过低,不适合保鲜青菜;肉表面平均温度约为 0 ℃,不适合冷冻肉质品,肉质品易化出血水;箱体下测点温度约为 0 ℃,可维持约 6 h;1.5 h 后,热端冷却水温度迅速升高,若不能更换热端冷却水,将影响热端散热和制冷效果。热端风冷方式的 TEC1-12706 型工作时,青菜表面平均温度约为 7 ℃,适合保鲜青菜,肉表面平均温度约为 -1 ℃,不易化出血水,箱体下测点温度约为 6 ℃,可维持约 10 h。

综上所述,热端水冷方式的 TEC1-12706 型工作时,存在冷藏温度过低、冷冻温度过高的问

题,且制冷性能受冷却水影响很大,冷藏箱、冷冻箱均不适用。热端风冷方式的 TEC1-12706 型工作时,适合作长途运输用冷藏箱。由于 TEC1-

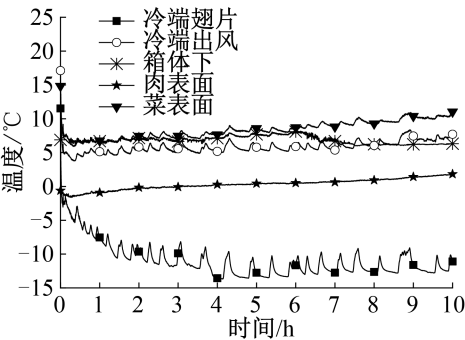
12712 型半导体制冷量更大,应可用于冷冻箱,所以下一节将重点研究 TEC1-12712 型半导体制冷片的性能。

表 5 半导体制冷箱内加冰块时热端风冷与热端水冷的 TEC1-12706 型半导体制冷片工作时测温点参数分析  
Tab.5 Parameter analysis for the measuring points of the semiconductor type TEC1-12706 with air cooling and water cooling for the hot side when adding ice cubes in the storage box

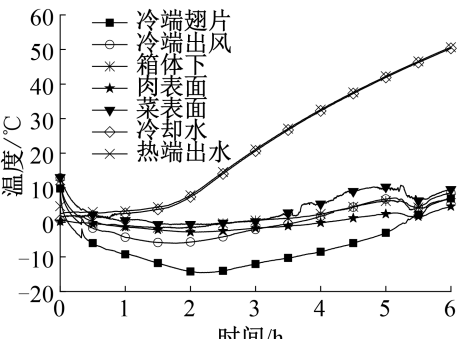
| TEC1-12706 型半导体组件 | 冷端翅片平均<br>温度/℃ | 冷端出风平均<br>温度/℃ | 冷却水平均<br>温度/℃ | 箱体中心平均<br>温度/℃ | 时间/h |
|-------------------|----------------|----------------|---------------|----------------|------|
| 热端风冷              | -1             | 0              | —             | 4              | 10   |
| 热端水冷              | -13            | -10            | 5             | -10            | 4    |

表 6 半导体制冷箱内加食材时热端风冷与热端水冷的 TEC1-12706 型半导体制冷片工作时测温点参数分析  
Tab.6 Parameter analysis for the measuring points of the semiconductor type TEC1-12706 with air cooling and water cooling for the hot side when adding food in the storage box

| TEC1-12706 型半导体组件 | 冷端出风平均<br>温度/℃ | 青菜表面平均<br>温度/℃ | 肉表面平均<br>温度/℃ | 箱体下测点<br>温度/℃ | 时间/h |
|-------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|------|
| 热端风冷              | 5              | 7              | 0             | 6             | 10   |
| 热端水冷              | -1             | 1              | -1            | 0             | 6    |



(a) 热端风冷的TEC1-12706型



(b) 热端水冷的TEC1-12706型

图 9 半导体制冷箱内加食材时各测点温度随时间的变化  
Fig.9 Temperature variation of each measuring point after adding food in the storage box

2.3 TEC1-12712 型热端水冷且冷端风扇下吹与侧吹

实验时分别使用热端水冷且冷端风扇下吹与侧

吹的两片 TEC1-12712 型半导体制冷片进行测试,吹风方式如图 4 所示。箱体内分别加入冰块、食材,箱体内各温度测点温度随时间的变化如图 10 和图 11 所示。

1) 箱体内加冰块。

由图 10 和表 7 可知,冷端风扇下吹方式的 TEC1-12712 型工作时,箱体中心温度最低为-11℃,3 h 后箱体中心温度大于 0℃;冷端翅片温度最低为-15℃,3 h 内冷端翅片与箱体中心平均温差约为 5℃,从冷端翅片与箱体中心温差可知冷端风扇下吹时冷量传递效果良好。冷端风扇侧吹方式的 TEC1-12712 型工作时,箱体中心温度最低为 0℃,1.5 h 后箱体中心温度大于 0℃;冷端翅片温度最低为-20℃;3 h 内冷端翅片与箱体中心平均温差约为 15℃,从冷端翅片与箱体中心温差可知冷端风扇侧吹时冷量传递效果差。

2) 箱体内加食材。

由图 11 和表 8 可知,冷端风扇下吹方式的 TEC1-12712 型工作时,2 h 内青菜表面平均温度约为 2℃,2 h 后青菜表面温度逐渐增加;2 h 内肉表面平均温度约为-6℃,-6℃适合冷冻肉制品,3.5 h 内肉表面温度不超过 0℃;冷端翅片温度最低为-22℃,2 h 内冷端翅片与箱体下侧平均温差约为 10℃,3 h 内箱体下侧温度不超过 0℃,因此该储藏箱在 3 h 内可维持箱体温度在 0℃以下。冷端风扇侧吹方式

的 TEC1-12712 型工作时,2 h 内青菜表面平均温度约为 8 ℃,肉表面平均温度约为-2 ℃,箱体下测点平均温度约为 8 ℃;冷端翅片温度最低为-10 ℃,2 h 内冷端翅片与箱体中心平均温差约为 18 ℃,3 h

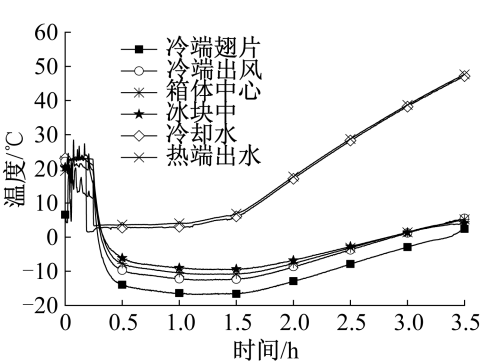
内青菜表面、箱体下侧温度均超过 0 ℃。热端冷却水温度随时间不断升高,不能持续为制冷片热端散热,导致半导体制冷片制冷效率降低,因此持续时间较短。

表 7 半导体制冷箱内加冰块时热端水冷且冷端风扇下吹与侧吹的 TEC1-12712 型半导体制冷片工作时测温点参数分析  
Tab.7 Parameter analysis for the measuring points of the semiconductor type TEC1-12712 with water cooling of the hot side and the fan below or beside the cold side when adding ice cubes in the storage box

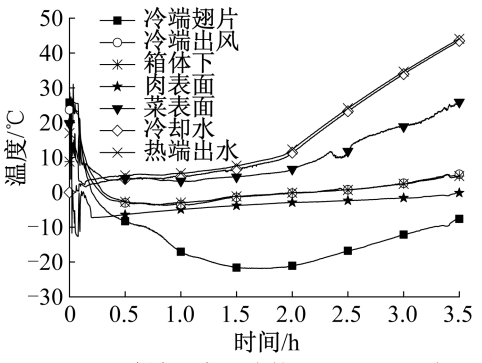
| 半导体组件  | 冷端翅片平均<br>温度/℃ | 冷端出风平均<br>温度/℃ | 冷却水平均<br>温度/℃ | 箱体中心平均<br>温度/℃ | 时间/h |
|--------|----------------|----------------|---------------|----------------|------|
| 冷端风扇下吹 | -15            | -11            | 3             | -10            | 1.5  |
| 冷端风扇侧吹 | -20            | 0              | 2             | 1              | 1.5  |

表 8 半导体制冷箱内加食材时热端水冷且冷端风扇下吹与侧吹的 TEC1-12712 型半导体制冷片工作时测温点参数分析  
Tab.8 Parameter analysis for the measuring points of the semiconductor type TEC1-12712 with water cooling for the hot side and the fan or beside the cold side when adding food in the storage box

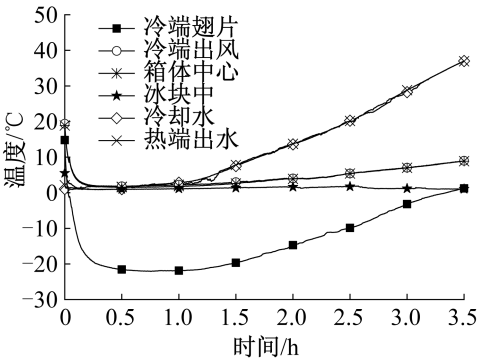
| 半导体组件  | 冷端出风平均<br>温度/℃ | 青菜表面平均<br>温度/℃ | 肉表面平均<br>温度/℃ | 箱体下测点<br>温度/℃ | 时间/h |
|--------|----------------|----------------|---------------|---------------|------|
| 冷端风扇下吹 | -4             | 2              | -6            | -3            | 2    |
| 冷端风扇侧吹 | 6              | 8              | -2            | 8             | 2    |



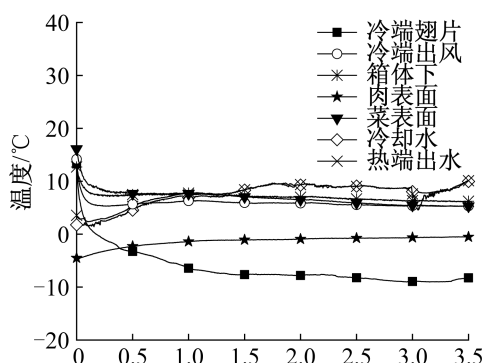
(a) 冷端风扇下吹的TEC1-12712型



(a) 冷端风扇下吹的TEC1-12712型



(b) 冷端风扇侧吹的TEC1-12712型



(b) 冷端风扇侧吹的TEC1-12712型

图 10 半导体制冷箱内加冰块时各测点温度随时间的变化  
Fig.10 Temperature variation of each measuring point after adding ice cubes in the storage box

图 11 半导体制冷箱内加食材时各测点温度随时间的变化  
Fig.11 Temperature variation of each measuring point after adding food in the storage box

表 9 热端风冷的 TEC1-12706 型和热端水冷的 TEC1-12712 型半导体制冷片工作时测温点的分析

Tab.9 Parameter analysis for the measuring points of the semiconductor type TEC1-12706 with air cooling of the hot side and TEC1-12712 with water cooling of the hot side

| 半导体组件 |                             | 冷端出风平均<br>温度/℃  | 冷端翅片平均<br>温度/℃ | 箱体中心平均<br>温度/℃ | 时间/h |
|-------|-----------------------------|-----------------|----------------|----------------|------|
| 加冰块   | 热端风冷且冷端风扇下吹方式的 TEC1-12706 型 | -0.5            | -0.5           | 3              | 5    |
|       |                             | 0               | -1.0           | 4              | 10   |
|       | 热端水冷且冷端风扇下吹方式的 TEC1-12712 型 | -11.0           | -15.0          | -10            | 1.5  |
|       |                             | -5.0            | -10.0          | -4             | 3    |
| 半导体组件 |                             | 箱体下测点平均<br>温度/℃ | 青菜表面平均<br>温度/℃ | 肉表面平均<br>温度/℃  | 时间/h |
| 加食材   | 热端风冷且冷端风扇下吹方式的 TEC1-12706 型 | 6               | 6              | -1             | 5    |
|       |                             | 6               | 7              | 0              | 10   |
|       | 热端水冷且冷端风扇下吹方式的 TEC1-12712 型 | -3              | 2              | -6             | 2    |
|       |                             | -2              | 5              | -4             | 3    |

综上所述,冷端风扇侧送风时,冷端翅片与箱体中心温度相差较大,冷端翅片不能及时将冷量传入箱体内,气流组织较差,影响半导体制冷效果,则箱体温度难以降低;而冷端风扇下送风时,冷端翅片与箱体中心温度相差较小,冷端翅片与箱体空气更易换热,冷端翅片能有效将冷量传入箱体内,则箱体温度能快速降低。这是因为侧送风时冷端风扇与半导体制冷片垂直(如图 4(b)),送风过程中伴随着速度的衰减和冷量的散失;下送风时冷端风扇与半导体制冷片贴合紧密(如图 4(a)),送风过程中冷风参数保持较好。

因此,冷端风扇下吹方式的 TEC1-12712 型工作时,适合作短途冷藏链用冷冻箱;冷端风扇侧吹方式的 TEC1-12712 型工作时,不适合作冷冻箱。

2.4 最优工况的 TEC1-12712 型和 TEC1-12706 型半导体制冷片性能对比

实验时分别使用热端风冷和冷端风扇下吹的两片 TEC1-12706 型半导体制冷片及热端水冷和冷端风扇下吹的两片 TEC1-12712 型半导体制冷片进行测试。箱体内分别加入冰块、食材,箱体内各温度测点温度随时间变化值如图 6(a)、图 9(a)、图 10(a)、图 11(a)所示。

1)数据对比。

由图 6(a)、图 9(a)、图 10(a)、图 11(a)和表 9 可知,在 30℃的环境温度下,热端风冷方式的 TEC1-12706 型工作时,箱体放冰块时,10 h 内箱体中心平均

温度约为 4℃;箱体放食材时,10 h 内箱体下测点平均温度约为 6℃。热端水冷方式的 TEC1-12712 型工作时,箱体放冰块时,1.5 h 内箱体中心平均温度约为-10℃,3 h 内箱体中心温度约为-4℃;箱体放食材时,3 h 内箱体下测点温度缓慢增加,箱体下测点温度最低约为-5℃,3 h 时箱体下测点温度约为 0℃,因此该储藏箱在 3 h 内可维持箱体温度在 0℃以下。

2)适用范围对比。

由表 9 的对比可知,热端风冷方式的 TEC1-12706 型半导体制冷片工作时适合作长途冷藏链用冷藏箱,而热端水冷方式的 TEC1-12712 型半导体制冷片在冷却水热端若不能及时更换冷却水,则只适合作短途冷藏链用冷冻箱。

3 结论

本文搭建应用 TEC1-12706 和 TEC1-12712 型半导体制冷片、热端冷却方式可选的半导体制冷储藏箱实验台,研究了半导体芯片功率、冷端风扇下吹风 and 侧吹风、热端风冷和水冷对箱体内测点温度分布的影响,得到主要结论如下:

1)在实验中应用两片热端风冷方式的 TEC1-12706 型半导体制冷片,当环境温度为 30℃时,放置食材时容积为 0.1 m<sup>3</sup> 的箱体内部平均温度约为 6℃,且能维持 10 h;应用该型制冷片的冷藏箱适合作为长途冷藏链用冷藏箱。

2)在实验中应用两片热端水冷且冷端风扇下吹方式的 TEC1-12712 型制冷片,当环境温度为 30℃

时,放置食材时容积为  $0.1\text{ m}^3$  的箱体内部平均温度约为  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且能维持 3 h;应用该型制冷片的冷藏箱适合作为短途冷藏链用冷冻箱。

3)较之冷端风扇侧吹方式,冷端风扇下吹时箱内气流组织较好,冷端冷量可及时传输到箱体内,因此在半导体制冷冷藏链运输箱设计时应尽量使用风扇下吹方式。

4)TEC1-12712 型的最大制冷量较大,若应用在储藏箱中时热端能持续使用良好的散热方式,实际制冷效果则高于 TEC1-12706 型半导体制冷片,因此如能保证冷却水的供应,TEC1-12712 型制冷片应在长途冷藏链用冷冻箱领域有更好的应用潜力。

本文受江苏省高校自然科学基金项目(18KJB560007)和江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX18\_0336)资助。(The project was supported by Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (No. 18KJB560007) and Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No. SJCX18\_0336).)

#### 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: 7-11. (XU Desheng. Semiconductor refrigeration and application technology [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992: 7-11.)
- [2] TASSOUS A, LEWIS J S, GE Y T, et al. A review of emerging technologies for food refrigeration applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(4): 263-276.
- [3] 赵培聪, 袁广超, 陈恩, 等. 半导体制冷片对电子元件降温效果的试验研究[J]. 流体机械, 2012, 40(3): 64-66, 70. (ZHAO Peicong, YUAN Guangchao, CHEN En, et al. Experimental study on electronic components cooling effect by semiconductor refrigeration[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(3): 64-66, 70.)
- [4] LIU Di, ZHAO Fuyun, YANG Hongxing, et al. Thermoelectric mini cooler coupled with micro thermosiphon for CPU cooling system[J]. Energy, 2015, 83: 29-36.
- [5] 杨盛林, 马林, 张宇飞, 等. 半导体自循环水冷系统在惯导设备上的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(1): 14-17. (YANG Shenglin, MA Lin, ZHANG Yufei, et al. Application of semiconductor self-circulation water cooling system in inertial navigation equipment[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(1): 14-17.)
- [6] 侯传勋, 张志利, 赵亮清, 等. 基于典型工况的半导体制冷系统优化方式探讨[J]. 低温与超导, 2011, 39(3): 16-22, 44. (HOU Chuanxun, ZHANG Zhili, ZHAO Liangqing, et al. Discussion on semiconductor refrigeration system optimization based on typical operating states[J]. Cryogenics, 2011, 39(3): 16-22, 44.)
- [7] 王亚娟, 赵俊宏, 郭嘉明, 等. 半导体制冷果蔬配送箱水冷散热参数优化试验研究[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(3): 41-46. (WANG Yajuan, ZHAO Junhong, GUO Jiaming, et al. Experimental research on optimization of water cooling parameters of semiconductor refrigeration distribution box for fruit and vegetable[J]. Storage and Process, 2017, 17(3): 41-46.)
- [8] XHAXHIU K, KVARNSTROM C, DAMLIN P, et al. Renewable energy in focus:  $\text{In}_5\text{Se}_5\text{Br}$ , a solid material with promising thermoelectric properties for industrial applications[J]. Materials Research Bulletin, 2014, 60: 88-96.
- [9] KIM S W, KIMURA Y, MISHIMA Y. High temperature thermoelectric properties of  $\text{TiNiSn}$ -based half-Heusler compounds[J]. Intermetallics, 2007, 15(3): 349-356.
- [10] 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, 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, 2002, 30(7): 811-813.)
- [11] ASTRAIN D, VIAN J G, DOMINGUEZ M, et al. Increase of COP in the thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipation[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(17): 2183-2200.
- [12] 梁斯麒. 半导体制冷技术在小型恒温箱的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011. (LIANG Silin. Research on the application of semiconductor refrigeration technology in small incubator[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.)
- [13] 罗仲, 张旭, 王胜己, 等. 半导体制冷器除湿实验研究[J]. 制冷学报, 2015, 36(5): 101-106. (LUO Zhong, ZHANG Xu, WANG Shengji, et al. Experimental research on performance optimization of thermoelectric dehumidifier[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(5): 101-106.)
- [14] 张晓芳. 水冷式半导体冰箱制冷性能的研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012. (ZHANG Xiaofang. Water cooling effects on thermoelectric refrigerators[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2012.)
- [15] 赵新杰, 蔡忆昔, 王静, 等. 基于半导体制冷技术的 LED 前照灯散热器设计与优化[J]. 发光学报, 2014, 35(10): 1269-1275. (ZHAO Xinjie, CAI Yixi, WANG Jing, et al. Thermal model design and optimize of LED headlamp cooling device based on semiconductor refrigeration[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(10): 1269-1275.)
- [16] 赵福云, 常菁菁, 刘娣, 等. 半导体制冷箱实验研究与性能分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(3):

476–480. (ZHAO Fuyun, CHANG Jingjing, LIU Di, et al. Experimental investigation and performance analysis of a semiconductor refrigerator[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(3): 476–480.)

[17] 戴源德, 温鸿, 于娜, 等. 热管散热半导体制冷系统的实验研究[J]. 南昌大学学报(工科版), 2013, 35(1): 54–57. (DAI Yuande, WEN Hong, YU Na, et al. Experimental study on semiconductor refrigeration system with a heat pipe radiator[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2013, 35(1): 54–57.)

**通信作者简介**

王瑜,男,博士,讲师/系副主任,南京工业大学城市建设学院, (025)83239533, E-mail: yu-wang@njtech.edu.cn。研究方向: 高效换热及环境控制技术。

**About the corresponding author**

Wang Yu, male, Ph. D., lecturer, College of Urban Construction, Nanjing Tech University, +86 25–83239533, E-mail: yu-wang@njtech.edu.cn. Research fields: efficient heat transfer and control technology for environment parameters.