

半导体热电效应在制冷设备的应用研究

廖辉

广东美的制冷设备有限公司, 广东 佛山 528000

DOI:10.61369/ETQM.2025070004

摘要：传统制冷设备主要采用压缩机冷却方式，但存在噪音大、体积大、整体能耗高等问题。随着技术革新，半导体制冷片广泛应用到热电制冷设备领域，对比传统压缩机冷却方式体积小、噪音小，设备总体运行能耗更低，现阶段已经在制冷设备领域广泛应用。文章围绕制冷设备中半导体热电效应的应用情况展开研究，以期制冷领域有效应用提供指导建议。

关键词：制冷设备；半导体热电效应；应用；能耗

Application Research of Semiconductor Thermoelectric Effect in Refrigeration Equipment

Liao Hui

Guangdong Midea Refrigeration Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000

Abstract： Traditional refrigeration equipment mainly adopts compressor cooling method, but there are problems of large noise, large volume and high overall energy consumption. With the technological innovation, semiconductor refrigeration chip is widely used in the field of thermoelectric refrigeration equipment. Compared with the traditional compressor cooling method, it has small volume and small noise, and the overall operation energy consumption of the equipment is lower. At present, it has been widely used in the field of refrigeration equipment. This paper focuses on the application of semiconductor thermoelectric effect in refrigeration equipment, in order to provide guidance for effective application in refrigeration field.

Keywords： refrigeration equipment; semiconductor thermoelectric effect; application; energy consumption

半导体热电片属于半导体热电偶，即P-N结，将P型半导体和N型半导体有机整合在一起。根据帕尔贴效应原理，发挥半导体材料中载流子运动，不需要制冷剂的情况即可实现热能和电能有效转换。也正是这一制冷原理，使得半导体热电制冷效应结构简单、不需要机械运动部件的优势得以充分展现，在实际应用中可以有效调节电流大小、方向，精准控制制冷量和温度，从而减少机械磨损带来的维护成本和能耗问题。加之半导体热电效应可以最大程度上规避制冷剂泄漏对环境的污染破坏，充分契合低碳、环保理念，在缓解能源紧张问题同时，推动制冷设备制造领域转型发展。

一、半导体热电效应概述

(一) 半导体热电效应制冷原理

半导体热电效应制冷基于帕尔贴效应形成，直流电经由P型半导体以及N型半导体构成的回路时，半导体材料连接区域会产生或吸收热量。P型半导体中多数载流子为空穴，从高电位向低电位移动；N型半导体中的载流子多为电子，从低电位向高电位移动。电流流经两种导体连接区域时，使得两种材料能量状态显著转变。P型半导体朝着N型半导体流动的空穴，从N型半导体朝着P型半导体流动的电子，流经两个半导体连接区域时会消耗一定的能量，并吸收环境中的热量，从而实现制冷效果^[1]。基于多个PN结串联构成热电堆，能够产生理想的制冷效果，避免制冷剂应用产生的能耗和污染问题。

(二) 半导体热电效应制冷特点

根据半导体热电效应制冷效应制成的制冷设备，其特点表现在以下几点：

(1) 结构简单、体积小。半导体热电制冷设备对比传统制冷设备而言，不需要压缩机、蒸发器和冷凝器等部件，只需要组合散热装置、热元件以及电路控制元件即可。此种结构缺少机械运动部件，设备整体结构简单、体积小，能够有效避免机械磨损诱发故障问题，提高设备运行稳定性和安全性，降低设备后期维护成本。

(2) 精准控温。半导体热电制冷设备具有精准控温优势特点，合理化调节输入电流方向、大小精准控制制冷量、制冷温度，减少不必要的资源损耗，较窄的温度范围内精准控温^[2]。例如，医疗领域很多药品和疫苗均需要冷藏设备存储，控制温度在

一定范围内,而半导体热电制冷设备即可满足这一需求。电子设备散热方面,依据芯片运行状态实时监控与调节制冷量,使得芯片保持最佳运行温度。

(3) 快速制冷与热效应。半导体材料具有较小的热惯性特点,连接电源后促使大量载流子定向移动,快速完成热量的释放和吸收过程。相较于传统制冷方式,短期内即可达成目标制冷温度,而且在环境温度波动剧烈情况下,设备即可动态调整制冷量,保证制冷空间温度趋于恒定^[3]。

(4) 节能环保。传统制冷设备需要氟利昂等制冷剂提供支持,这些制冷剂对环境污染较大。而半导体热电制冷设备不需要添加制冷剂,有效避免制冷剂泄漏对环境的污染,最大程度上杜绝温室气体排放,充分响应绿色环保理念。未来随着环保法规逐步健全和完善,半导体热电效应制冷技术的环保优势将得到进一步展现,对于制冷行业转型发展具有重要意义^[4]。

二、半导体热电效应在制冷设备的应用

(一) 材料选择

在半导体热电效应实验中,采用市场上常见型号的半导体温差电片,具体性能参数如表1。本次实验所选择的半导体热电片样品极限电流均为10A、6A、1A。

表1 不同P-N结对数制冷片样品的性能参数

序号	1	2	3	4
尺寸/mm	10×10	20×20	30×30	40×40
参考内阻 R/Q	0.07	0.27	0.63	1.12
热电偶对数 /n	7	31	71	127
极限电压 /V	0.82	3.65	8.4	15
最大电流 /A	10	10	10	10
最大制冷量 /W	4.7	20.1	47.2	84
最大温差 /C	66	66	66	66

(二) 实验方法

将半导体温差电片置于实验平台上,平台具有良好的隔热性能,能够有效避免工作热量过量损失。直流电源可以为半导体温差电片提供相较于稳定的直流电,根据实验需求在特定范围内精准调整电流、电压值大小。半导体温差电片热端安装散热系统,可以将热电效应产生的热量及时释放,避免温度过高导致制冷效果下降^[5]。本次实验中采用风冷散热片+散热风扇组合方式,将热端热量快速释放到环境中。温度测量系统多选择高精度的温度传感器,在半导体温差电片热端与冷端两侧区域设置;数据采集系统与直流电源和温度传感器连接,能够实时采集记录不同时间点温度、电压、电流等数据^[6]。

实验开始后,开启直流电源流经半导体温差电片,散热风扇同步启动。间隔1min记录半导体温差电片冷端温度、电压、电流数值大小。实验期间,实验人员应实时观察装置运行状况,检查是否存在短路和异常发热等问题。实验时间30min,同步记录不同时段的数据,随后调整直流电源输出电流、电压值,重复上述步骤,获得不同电流条件下实验数据。针对采集的电压、电流和温度等数据全面整理,剔除异常数据,使用 Origin 数据处理软

件对数据进行处理,绘制不同电流条件下,随着时间变化半导体温差电片冷端温度变化曲线、热端温度变化曲线,以及制冷量对电流影响的关系曲线。基于绘制此类曲线,直观掌握不同工况下半导体温差电片制冷性能规律,从而掌握半导体热电效应在制冷设备应用中的特性,为后续制冷设备优化设计提供支持^[7]。

(三) 结果与讨论

1.P-N结对数对热电片制冷性能的影响

P-N结对数与热电片制冷性能之间存在密切联系,本次实验中四种不同型号半导体温差电片样品进行实验,P-N结对数从7对增加到127对。如,1号样品的P-N结对数为7,最大制冷量4.7W。随着P-N结对数增加,4号样品P-N结对数为127对,最大制冷量为84W。从中了解到,P-N结对数增加,能够有效提高半导体热电片制冷性能,其原理在于P-N结对数越多,参与能量转换的载流子越多,在电流作用下每个P-N结释放或吸收热量,多个P-N结累积下吸收更多的热量,最终实现提高制冷量的作用^[8]。最大温差方面,四种样品最大温差均66℃,但要时刻关注实验过程的温度动态变化情况。未来随着P-N结对数增加,达到最大温差过程消耗的时间大幅度缩短,由于大量的P-N结对可提高热传递速度,从而实现热量大量、高效转移,使得冷端温度快速达到极限温度。具体如图1和图2所示。

低电流状态下,冷热端温差接近,差异较小,因此冷却效果是极其有限的。低电压下尽管制冷能力有所下降,但低电压温度变化也会降低反向传热量,热电转化效率大幅度提升。这种方式不仅能取得理想的制冷效果,还能减少不必要的电力损耗,提高制冷设备的经济性^[9]。如果制冷设备的单级热晶体管热端采用冷却水及降温处理,制冷率达到最高时电流值为 I_{opt} ,制冷率最高电流值 I_{max} ,并且 $I_{max} < I_{opt}$,通常要求制冷片最大程度上接近最有COP工作点,从而实现最佳的经济效益,但实际情况下往往很难实现。究其根本,制冷片保持最佳COP状态运行时,冷热端的温差较小情况表,热电转化效率最高、能耗最小,但制冷片产生的制冷量小于最大制冷量,那么该装置原有的制冷性能则会大幅度下降。为了获取最佳的制冷率,尽可能增加P-N结对数来实现,反之为了保证半导体热电片处于最佳的制冷状态运行,则需要增加电流值,提高制冷性能。随着电流增加,冷热端温差、反向传热能耗随之增加,热损耗变大,降低装置整体冷却效果。故此,最优的制冷容量并非制冷装置最佳工作状态。由此看来,为了提升半导体热电片冷却效果,要求其兼具较高的冷却效率、制冷量,并且保证两项数值均处于限制值以内。在具体运作中,结合制冷需要动态调节工作电流,从而保证制冷系统处于最为理想的运作状态。

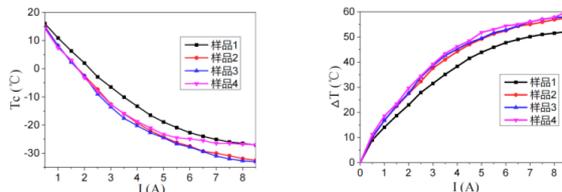


图1 不同样品冷端温度随电流变化曲线 图2 不同样品冷端端的制冷温差随电流变化曲线

2.影响热板制冷特性的因素

(1) 热电材料性能。热电材料性能对热板制冷特性影响较大,其中热电材料品质因数很大程度上决定了热电材料制冷性能。品质因数越高,热电材料电能转化率越高。采用碲化铋及其合金材料,对比传统材料能够取得更加理想的制冷量、温差,高电导率能够大幅度降低电能传输损耗,将更多电能应用到制冷环节。热导率越低,从热端到冷端的反向热传导越少,减少不必要电能损耗,始终处于最佳的冷端低温状态。

(2) 工作电流。工作电流大小对于热效应在载流子数量影响较大,在特定范围内增加工作电流值,热板制冷量也将大幅度增加。但电流值超出标准范围内,热板内阻的焦耳热量随之在增加,电能损耗加剧下使得热端温度异常升高,制冷效率反向下降^[10]。

(3) 环境温度。环境温度越高,热板热端散热性能越低,因此需要消耗大量的电能。尤其是一些气温较高的夏季,热板制

冷设备制冷效果并不如春秋季节。鉴于此,为了确保不同环境下热板始终处于高性能运转状态,应注重散热系统优化改良,从而增加散热风扇转速以及热端散热效果。另外,实验过程中采用同样规格的热电板,配合散热性能不一的散热片,散热性能优异的半导体热板冷端温度更低,由此产生更多的制冷量。

三、结论

综上所述,基于半导体热电效应的制冷设备,相较于传统压缩机制冷技术而言,结构更为简单、体积小,取得快速制冷效果同时,有效减少不必要的电能损耗。而且半导体热电制冷设备不需要制冷剂,避免制冷剂泄漏诱发的环境污染问题,提升制冷设备运行经济性,对于推动制冷设备转型升级具有重要意义。

参考文献

- [1] 张圣钊. 半导体热电效应在制冷设备的应用研究 [J]. 国际机械工程, 2023, 2(3).
- [2] 张常宏. 高温半导体热电制冷器优化设计及特性研究 [D]. 江苏: 南京理工大学, 2022.
- [3] 杨庭松, 海杨, 范美辰, 等. 基于半导体热电效应的扁平电子温控能力研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29(7): 206-213.
- [4] 刘奥成, 郑欣鹏, 王巧, 等. 半导体制冷片温控系统应用研究 [J]. 现代信息科技, 2023, 7(19): 55-58.
- [5] 刘丽君, 盛健, 张华, 等. 新型机柜半导体空调制冷性能试验研究 [J]. 流体机械, 2025, 53(1): 17-24.
- [6] 赵兴兴, 霍兆瑞, 洪小波, 等. 结合半导体制冷的复合电池热管理模块仿真研究 [J]. 电源技术, 2025, 49(1): 123-131.
- [7] 吴启超, 黄瑞, 陈芬放, 等. 基于半导体制冷-相变材料的电池热管理 [J]. 电池, 2022, 52(2): 148-152.
- [8] 徐宇, 李夜军, 贾敏涛, 等. 冷循环便携式半导体降温服设计及制冷性能分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(4): 40-46.
- [9] 姚成军, 黎伟嘉, 侯少波, 等. 利用半导体制冷的新型冷藏车设计 [J]. 保鲜与加工, 2022, 22(3): 78-82.
- [10] 邱兰兰, 王瑜, 朱洁茹, 等. 应用半导体制冷的冷藏链用储藏箱性能实验研究 [J]. 制冷学报, 2020, 41(1): 131-140.