

CHANG Qitai, HUANG Yulong, MENG Xiangpeng, WANG Dingyuan, BAI Yisong, CHEN Xue. Research Progress of Electrocaloric Cooling Technology and Prospect for Space Applications (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(2): 437–448. CSTR:32142.14.cjss.2025-0005. DOI:10.11728/cjss.2025.02.2025-0005

电卡制冷技术研究现状与空间应用展望*

常启泰¹ 黄玉龙¹ 孟相朋¹
王定远^{2,3} 白宜松^{2,3} 陈雪¹

1(桂林电子科技大学机电工程学院 桂林 541004)

2(青岛海尔智能技术研发有限公司 青岛 266103)

3(数字化家电国家重点实验室 青岛 266103)

摘要 电卡制冷技术是一种新型的固态制冷技术,利用电卡材料在加电和去电过程的熵变实现制冷循环,具有高能效、轻量化、无制冷剂泄漏特点,在航天冷藏箱、空间可穿戴设备等领域具有巨大的应用前景。目前,空间热电制冷技术存在电耗大、制冷系数低等问题,限制了该技术未来在航天工程中的应用。本文从电卡材料性能、电卡冷热分离方法及电卡制冷器件三方面进行回顾和分析,介绍了电卡组分、形态、制备工艺、可靠性和稳定性方面的研究进展,总结了电卡制冷原理以及主动式和被动式的冷热分离方法,归纳了往复单级和往复多级电卡器件的工作原理。最后,展望了电卡制冷技术未来在空间科学领域的发展方向。

关键词 固态制冷技术, 电卡制冷, 电卡材料, 换热方法, 制冷器件

中图分类号 TB61+1

Research Progress of Electrocaloric Cooling Technology and Prospect for Space Applications

CHANG Qitai¹ HUANG Yulong¹ MENG Xiangpeng¹
WANG Dingyuan^{2,3} BAI Yisong^{2,3} CHEN Xue¹

1(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004)

2(Qingdao Haier Smart Technology R&D Co., Ltd., Qingdao 266103)

3(State Key Laboratory of Digital Household Appliances, Qingdao 266103)

Abstract Electric card refrigeration technology is a new type of solid-state refrigeration technology that utilizes the entropy change of electrocaloric materials during the process of charging and discharging to achieve a refrigeration cycle. It has the characteristics of high energy efficiency, light weight, and

* 国家自然科学基金项目 (12162011), 第七届中国科协青年人才托举工程项目 (2021QNRC001) 和山东省重点研发计划项目 (2022CXGC020203) 共同资助

2025-01-06 收到原稿, 2025-02-26 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

no refrigerant leakage, so that it has great application prospects in fields such as aerospace refrigerators and space wearable devices. Until now, space thermoelectric cooling technology has many problems such as high-power consumption and low Coefficient of Performance (COP), which limit its application in future aerospace engineering. This article reviews and analyzes the material properties, cold and hot separation methods, and electrocaloric refrigeration devices. It introduces the research progress in the electrocaloric composition, morphology, preparation process, feasibility, and stability, summarizes the electrocaloric refrigeration principle, as well as cold and hot separation methods of active and passive ways, and summarizes the working principles of reciprocating single-stage and reciprocating cascade electrocaloric refrigeration devices. Finally, the future development direction of electrocaloric cooling technology in the field of space science was discussed.

Key words Solid-state cooling technology, Electrocaloric cooling, Electrocaloric materials, Heat exchange methods, Refrigeration devices

0 引言

随着中国载人航天技术的快速发展,特别是载人登月和深空探测等领域的持续推进,对空间制冷技术提出了新的要求.在微重力环境下,传统压缩机制冷技术由于排放大、体积大、能效低、噪声大等问题,难以满足载人航天系统工程的需求.因此,具有低噪声、高效能、轻量化、无制冷剂泄漏特点的固态制冷技术成为学术界的研究热点.

近年来,采用固态材料相变热效应代替压缩机蒸汽压缩循环制冷的新型制冷技术,解决了传统压缩机体积大和质量大的问题,是一种最具潜力的无压缩机制冷技术.目前研究较为广泛的新型制冷技术有热电制冷 (Thermoelectric)^[1]、磁热制冷 (Magnetocaloric)^[2]、电卡制冷 (Electrocaloric)^[3] 以及弹热制冷 (Elastocaloric)^[4].其中,热电制冷技术采用外加电场驱动的热电效应原理进行制冷.根据 2022 年报道,海尔研发的基于薄膜热电制冷技术^[5]的航天冷藏箱已 7 次搭载神舟飞船,在空间食品冷藏、试剂存放等方面取得了巨大突破,实现制冷量为几十瓦级、制冷系数 (Coefficient of Performance, COP) 小于 1,为空间制冷技术的发展开启新的征程.但该技术为高电流、低电压工作模式,存在电耗大、制冷系数低等局限,制约了该技术在未来航天工程中的应用.

为了解决热电制冷技术在空间应用的痛点,进一步减轻航天冷藏箱的重量和用电负荷,研究人员提出了基于高电压、低电流模式的电卡制冷技术.该技术是一种通过固态电介质材料的交替极化-退极化、产生可逆的电偶极子熵变实现热力学制冷循环的技术,

具有高制冷效率、低电耗、体积小等优点^[6].其工作原理采用电场驱动,不涉及二次能量转化,理论 COP 可达到卡诺循环的 80%,为解决压缩机制冷技术重量大和热电制冷技术 COP 低的问题提供了有效方案.近年来,随着电介质材料中铁电-顺电相变温度附近巨电卡效应的发现,电卡制冷技术得到飞速发展,已在桌面级主动回热式器件、柔性电子皮肤中得到初步应用^[7],同时电卡材料实现 20 K 以上的温跨,为电卡制冷技术在小温跨的航天服可穿戴系统的热管理、卫星电子芯片散热等空间领域应用提供了有利条件.

本文将从电卡材料性能、电卡冷热分离方法、电卡制冷器件三个方面介绍电卡制冷技术的研究现状,并展望其未来在空间科学领域的应用前景.

1 电卡材料性能

电卡材料在空间领域应用的关键是具有优异的制冷性能,体现在能够获得显著的温度变化,主要取决于材料的组分、形态及制备工艺.其次,电卡材料拥有较好的可靠性和稳定性对空间应用场景也尤为重要,可满足长期空间任务的需求.

1.1 材料组分

电卡材料主要分为无机、有机以及有机-无机复合材料三大类,不同组分电卡材料的组成、形态、测试环境、性能参数等,如表 1 所示.无机电卡材料以锆钛酸铅 (PZT)、铌镁酸铅 (PMN)、锆酸铅 (PZO) 等含铅的体系为主^[8],通过 A 位镧系稀土元素掺杂以及 B 位 Sn, Nb, Mg, Zn 掺杂调控晶体结构^[9],提升铅

基材料的电卡性能, 得到较宽的相变温区. 除了铅基体系外, 还有钛酸钡 (BTO)、铌酸钾钠 (KNN)、钛锆酸钡 (BZT) 等无铅体系也适用于电卡制冷系统. Rožič等^[10]采用固相合成法制备了 PMN-30 PT 铁电块体材料, 在测试温度 418 K 和 $90 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 电场强度下, 通过热敏电阻测量得到 2.6 K 的绝热温变. Peng 等^[11]采用溶胶凝胶法制备了 $\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{ZrO}_3$ 铁电薄膜材料, 采用纳米级铁电/反铁电两相共存策略使得材料更容易发生相转变, 在 $598 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 290 K 测试电场和温度下, 电滞回线间接计算得到室温下温变高达 45 K, 熵变为 $46.9 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. 有机电卡材料以聚偏氟乙烯 (PVDF) 为主体, 通过引入三氟氯乙烯 (TrFE) 和氟乙烯 (CFE) 单体, 形成 P(VDF-TrFE) 和 P(VDF-TrFE-CFE) 等共聚物, 显著提高了电卡效应. Lu 等^[12]制备了 P(VDF-TrFE) 68%/32% 铁电聚合物厚膜, 在 $160 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 电场强度和 306 K 的测试温度下, 采用红外测得 20 K 的绝热温

变. 有机-无机复合材料采用表面修饰后的无机材料的纳米粉体与 P(VDF-TrFE-CFE) 聚合物基体复合而成, 通过协同作用增加铁电粉体的极化电场来提高电卡性能^[13]. Qian 等^[14]采用 P(VDF-TrFE-CFE)/PBZ 97%/3% 聚合物基体复合材料获得更高的极化电场, 在 243 K 温度和 $150 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 场强下间接计算得到了 13.99 K 的绝热温变, 熵变为 $52.7 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

1.2 材料形态及制备工艺

根据厚度可将电卡材料分为块体材料 (厚度 $>100 \text{ }\mu\text{m}$)、厚膜 (厚度为 $1\sim 10 \text{ }\mu\text{m}$)、薄膜 (厚度 $\leq 1 \text{ }\mu\text{m}$) 和类 MLC (Multi-layer Ceramic, 多层陶瓷) 4 种宏观形态 (见图 1). 块体材料通常采用固相反应方法制备, 电极采用旋涂或磁控溅射等方法沉积在样品的顶部和底部, 如图 1 (a) 所示, 其主要优势是电场分布均匀, 具有 100% 的电热转化效率, 但所需电场强度较高. Zhuo 等^[15]采用固相反应法制备了厚度为 $400 \text{ }\mu\text{m}$ 的 $(\text{Pb}_{0.97}\text{La}_{0.02})(\text{Zr}_{0.8}\text{Sn}_{0.14}\text{Ti}_{0.06})\text{O}_3$ 铁

表 1 不同组分电卡材料的组成、形态、测试条件及其性能参数
Table 1 Composition, configuration, testing conditions, and property parameters of different types of electrocaloric materials

	材料	形态	测试温度 T/K	温变 $\Delta T/\text{K}$	电场强度 $E/(\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1})$	电热强度 $(\Delta T/\Delta E)/(\text{K}\cdot\text{cm}\cdot\text{kV}^{-1})$	熵变 $\Delta S/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
无机材料	PMN-30 PT ^[10]	块体	418	2.6	90	0.289	—
	$(\text{Pb}_{0.97}\text{La}_{0.02})(\text{Zr}_{0.80}\text{Sn}_{0.14}\text{Ti}_{0.06})\text{O}_3$ ^[15]	块体	323	-14.1	110	0.128	-13.5
	$\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{ZrO}_3$ ^[11]	薄膜	290	45	598	0.075	46.9
	$\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ ^[17]	薄膜	495	12	480	0.025	8
	$\text{Ba}(\text{Zr}_{0.20}\text{Ti}_{0.80})\text{O}_3\text{-Ba}(\text{Sn}_{0.11}\text{Ti}_{0.89})\text{O}_3$ ^[16]	厚膜	298	5.2	330	0.016	6.9
	$\text{BaZr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_3$ ^[25]	厚膜	—	-7	195	0.036	-17.16
有机材料	$\text{PbSc}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$ ^[18]	MLC	330	-6.1	290	0.021	-53
	P(VDF-TrFE) 68%/32% ^[12]	厚膜	306	20	160	0.125	95
	P(VDF-TrFE-CFE) 59.2%/33.6%/7.2% ^[26]	厚膜	303	14.8	150	0.987	95
复合材料	P(VDF-TrFE-CFE)/PBZ 97%/3% ^[14]	薄膜	243	13.99	150	0.093	52.7
	P(VDF-TrFE-CFE)/PMN-PT ^[27]	薄膜	303	31	180	0.171	—

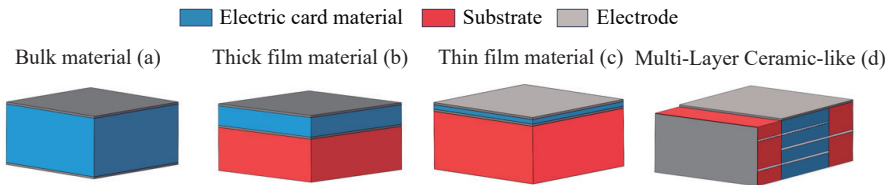


图 1 电卡材料形态

Fig. 1 Form of electric card material

电块体材料, 在温度 323 K 和电压 4.4 kV 时获得巨大的负电卡效应, 用间接法得到温变高达 -14.1 K, 以及较高的电热强度 $0.128 \text{ K} \cdot \text{cm} \cdot \text{kV}^{-1}$. 厚膜材料通常采用流延法制备, 如图 1 (b) 所示, 可以通过调节流延过程中的浆料浓度、流延速度和基底移动速度控制膜的厚度, 调节浆料的组分控制膜的晶粒结构、介电性能和铁电性能. Li 等^[16] 采用流延法制备了厚度为 $26 \mu\text{m}$ 的 $\text{Ba}(\text{Zr}_{0.20}\text{Ti}_{0.80})\text{O}_3\text{-Ba}(\text{Sn}_{0.11}\text{Ti}_{0.89})\text{O}_3$ 铁电厚膜, 在室温加载 0.86 kV 电压, 通过热流传感器测得绝热温变为 5.2 K , 熵变为 $6.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. 薄膜材料通过旋涂、磁控溅射、脉冲激光沉积等方法在基底上逐层生长致密度高、耐击穿场强高、绝缘性好的铁电材料, 如图 1 (c) 所示. 与块体和厚膜相比, 对薄膜材料施加相对较低的电压可产生较强的电卡效应. Mischenko 等^[17] 采用溶胶凝胶法制备了 350 nm 厚的反铁电 $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ 薄膜材料, 在 0.017 kV 电压和 $308 \sim 553 \text{ K}$ 温度范围内, 间接法测得的最大绝热温变为 12 K , 熵变为 $8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. 类 MLC 形态是交替叠加若干厚度小于 $50 \mu\text{m}$ 的铁电薄膜和电极材料, 构建出多层陶瓷膜结构形态, 如图 1 (d) 所示. 铁电材料通常采用 BTO 等高介电常数的材料, 电极材料多为铟锡氧化物 (Indium-Tin Oxide, ITO), 通过高温烧结过程中的熔融与扩散来实现电极和铁电薄膜层间的结合, 确保结合牢固, 具有耐高电场、工艺成熟、大规模生产等优点. Nair 等^[18] 制备了类 MLC 形态的 $\text{PbSc}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$ 电卡材料, 在 1.1 kV 的电压和 330 K 的测试温度下, 间接法计算得到了 -6.1 K 的制

冷温变.

1.3 材料可靠性和稳定性

电卡材料的机械可靠性、温度快速响应能力、热机稳定性等, 对于航天极端环境长期空间任务需求尤为重要.

在材料机械可靠性方面, Zheng 等^[19] 基于有机晶体二甲基己炔二醇 (DMHD) 模板, 在 $\text{P}(\text{VDF-TrFE-CFE})$ 异质界面上组装极性构象, 制备了界面增强的聚合物 (TP), 材料的等效最大温变为 38 K , 熵变达到 $100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} @ 100 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$. 在循环测试实验中, 前 100 万次循环, 因电场诱导损伤导致结晶度降低电卡性能有所下降; 经过薄膜自修复后, 200 万次循环后电卡性能趋于稳定, 如图 2 (a) 所示, 最长循环寿命超过 70 天. 300 万次循环后, 材料在 $100 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 的电场下仍能实现 $77 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的熵变, 具有良好的机械可靠性. Huang 等^[20] 通过巯基-烯点击反应与交联剂交联制备了 $\text{P}(\text{VDF-TrFE-CTFE})$ 65.4/26.2/8.8 mol% 聚合物柔性薄膜, 交联后的柔性薄膜具有优异的机械性能, 断裂伸长率为 260%, 在 50% 应变疲劳测试中, 经历 3000 次循环后应变回弹率仍有 80%. 在温度快速响应方面, 电卡材料在电场切换时温变响应时间短, 适用于空间设备瞬态热负荷散热. Sadl 等^[21] 在柔性基底上制备了 PMN-35 PT 厚膜材料, 在 63.5°C 和 $300 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 工况, 1.5 ms 内可瞬间实现降温 0.87 K . Li 等^[22] 制备了 $\text{P}(\text{VDF-TrFE-CFE})$ 63.2/29.7/9.1 mol%/PE/CNT 复合有机薄膜, 在 $90 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 电场下, 0.1 s 内产生 3.7°C 的温变. 在

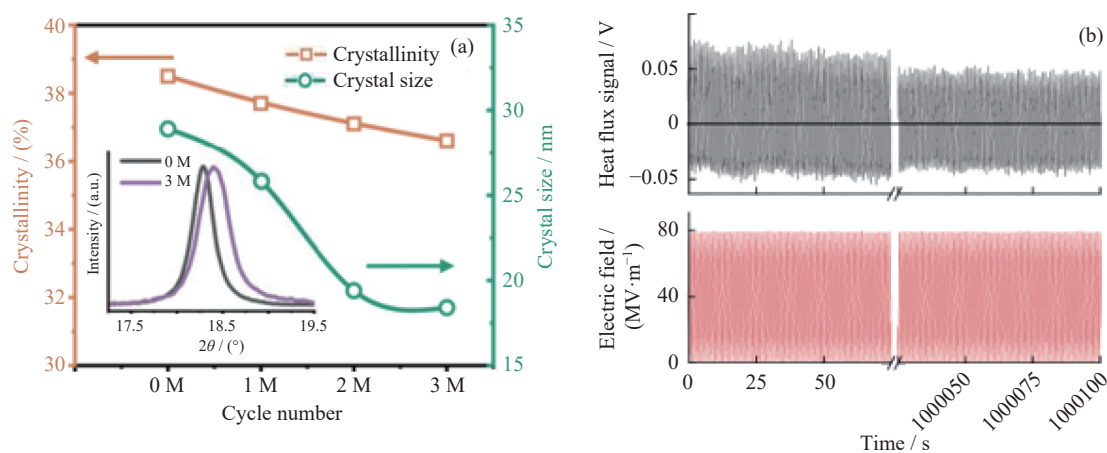


图 2 电卡材料可靠性和稳定性. (a) 300 万次循环后机械性能, (b) 100 万次循环后制冷特性

Fig. 2 Reliability and stability of electrocaloric materials. (a) Mechanical properties after 3 million cycles, (b) cooling characteristics after 1 million cycles

热机稳定性方面, Lu 等^[23]制备了 0.5 BZT-0.5 BCT 体系的无铅铁电块体, 在 100 次不同环境温度和电场强度循环测试后, 其电卡温变峰值几乎保持不变. 在 80~140℃ 温区、4~6 kV·mm⁻¹ 电场强度下, 温变均大于 0.2 K, 能在较宽温度区域保持热学性能稳定. Qian 等^[24]制备了 P(VDF-TrFE-CFE) 65/35/7 mol% 高熵聚合物, 在室温附近 50 MV·m⁻¹ 电场强度下, 由红外测得绝热温变 7.5 K, 熵变 12 J·kg⁻¹·K⁻¹, 低电场下的电卡效应增强了 275%. 在 80 MV·m⁻¹ 电场下循环工作 62000 次后制冷性能维持不变, 循环超过 1000000 次后制冷/制热能量可逆性显著提高, 制冷效应仅衰减不足 10%, 如图 2 (b) 所示. 相同工况下, 循环寿命提高超过 20000 倍, 表明材料体系可稳定循环超百万次, 突破了电卡制冷系统工程化应用的瓶颈.

上述研究表明, 通过材料组分、结构/形态和制备工艺的调控, 可提升电卡材料的制冷特性^[25-27]. 在实验中电卡材料实测得到 20 K 以上的温变, 间接法理论温变极限可达 40~50 K, 这一突破性进展对空间设备的小型化热管理具有重要战略意义. 然而, 针对电卡材料在空间环境的工程应用, 除了较大制冷温变以外, 相对低的工作电压和室温附近工作温度也尤为重要. 工作电压大小可通过材料的厚度调控, 对于块体无机材料和有机聚合物厚膜材料, 通常需要高达数

千伏的工作电压才能获得较大的温差, 在空间微重力环境中不仅会引发电磁兼容问题, 还会增加系统维护的复杂程度. 同时, 考虑到有机材料在极端温度或辐射环境下容易发生降解或失效, 因此厚度 1~10 μm 的无机电卡薄膜材料成为近年来航空航天应用领域的关注重点. 面向航天极端环境长期空间任务需求, 长寿命、快速温度响应、高可靠性、高稳定性的电卡材料是未来研究的重点方向^[28].

2 电卡冷热分离方法

2.1 电卡制冷原理

如图 3 所示, 电卡材料在电场加载和卸载过程中经历了一个完整的热力学循环过程, 具体如下: 电场施加到电卡材料上, 促使材料中的电偶极子从无序态排列为有序态, 材料的熵减小, 温度上升; 电场维持不变, 电卡材料将热量散失到周围环境中, 材料的温度降低并与周围环境温度达到平衡; 撤去电场, 铁电材料由铁电相恢复到顺电相, 电偶极子从有序状态回到无序状态, 材料的熵增大, 在绝热条件下, 材料的温度降低; 电场保持不变, 电卡材料从周围环境吸收热量, 材料恢复到室温. 通过反复进行电场加载和卸载的循环^[29], 完成了一个热力学循环, 实现交替制热和制冷的效果.

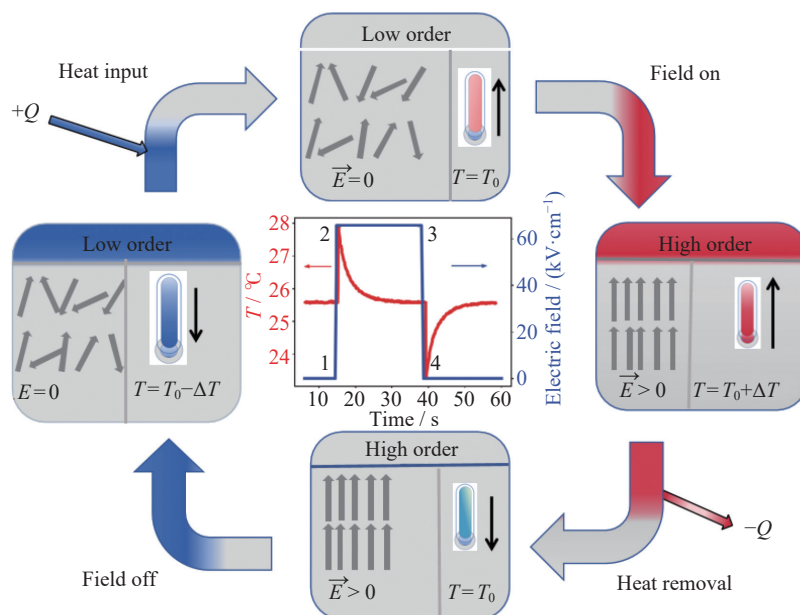


图 3 电卡制冷原理

Fig. 3 Schematic diagram of electrocaloric refrigeration

2.2 冷热分离方法

在电卡制冷热力循环过程中,既有升温过程也有降温过程且交替出现,不会自发形成热端和冷端,因此需要进行冷量和热量的分离形成热端和冷端,才能更好地利用电卡材料产生的制冷量.而热电制冷技术基于帕尔贴效应工作原理,只要有电流持续通过就可以自发形成冷热端.冷热分离方法根据是否依靠外部动力源驱动,可以分为主动分离和被动分离.

2.2.1 主动式冷热分离

主动式冷热分离是通过外部流体力质的周期性循环流动,经过复杂系统控制策略,强制实现热量和冷量的分离和传输,形成冷端和热端,如图4(a)所示. Sinyavsky等^[30]选用钛酸锶铅 $\text{PbSc}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3$ 作为电卡制冷材料,制冷模组由2个 $20\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的钽酸铅 (PST) 板组成,在板缝间通入氦气作为传热介质,将 PST 产生的冷量带走实现制冷,成功研发了首个电卡制冷原型机.在 $15\text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 电场强度和 $3 \sim 5\text{ Hz}$ 的循环频率下,制冷功率约为 10 mW ,实现了 2 K 的温变,高于材料本身的温变 ($1.3\text{ K} @ 25\text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$). Plaznik等^[31]采用块状的 $0.9\text{ Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - 0.1\text{ PbTiO}_3$ (PMN-10 PT) 电卡材料研制了10行3列的矩阵电卡制冷模组,矩阵

板块之间的间隙宽度为 0.1 mm ,选用绝缘硅油作为传热介质将电卡材料的冷量带走进行制冷,如图4(b)所示.在 $50\text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 电场强度和 0.75 Hz 的电压加载频率下,电卡制冷系统的最大温变可达 3.3 K ,是材料本身绝热温变的3倍.

2.2.2 被动式冷热分离

被动式冷热分离是指利用材料本身的电卡效应,通过热传导和热对流等方式,将产生的热量和冷量在不同区域之间自然传递和分离,形成冷端和热端,如图5(a)所示. Jia等^[32]构建了由 BTO 多层陶瓷制成的悬臂梁结构,采用高精密位移台来控制电卡材料在热源和热沉间的上下运动,在制热过程与热源接触,制冷过程与热沉接触,实现交替高效传热.在电压加载频率为 0.3 Hz 且电场强度为 $300\text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 下,外部热源的平均温度与只有机械运动相比降低了 1 K . Li等^[33]采用磁场控制铁电薄膜的上下运动,实现在顶部热沉和底部热源之间进行周期性切换,如图5(b)所示.在往复运动频率为 0.1 Hz 时, $300\text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的电场强度下最大加热和冷却热通量分别可达 $288\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $-272\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;而当往复运动频率为 1 Hz 时,平均冷却热流为 $-213\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

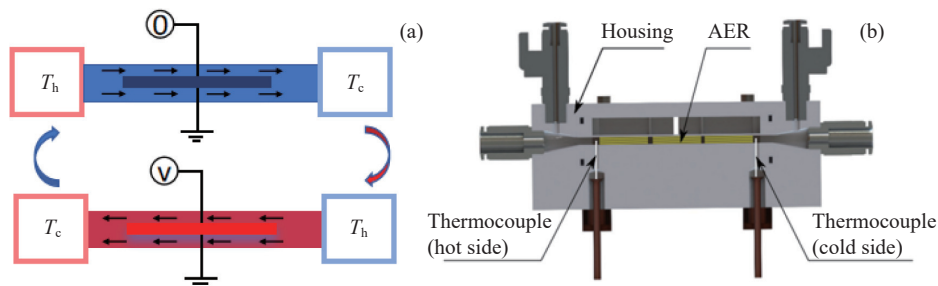


图4 主动式冷热分离方法. (a) 分离原理, (b) 分离器件

Fig. 4 Active cold and hot separation method. (a) Schematic diagram of separation, (b) separation device

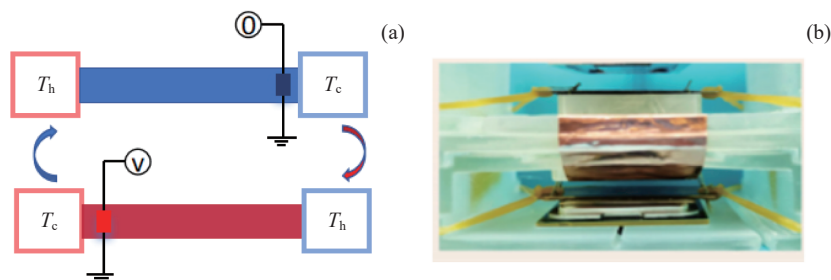


图5 被动式冷热分离方法. (a) 分离原理, (b) 分离器件

Fig. 5 Passive cold and hot separation method. (a) Schematic diagram separation, (b) separation device

3 电卡制冷器件

高性能电卡材料结合冷热分离技术和制冷循环模式, 可构成高性能电卡制冷器件. 按器件的结构和运行方式分类, 电卡器件可分为往复单级循环和往复多级循环; 按循环方式分类, 电卡器件可分为无回热和有回热循环系统.

3.1 往复单级循环

往复单级模式是指电卡材料在自驱动或外部驱动往复运动的过程中, 通过单次电场的加载和卸载以及相应的热力循环过程, 实现与热沉和热源的热传导. 在自驱动模式方面, Han 等^[34]在 P(VDF-TrFE-CFE) 65/35/7 mol% 高分子链内进行分子修饰, 形成双键调控高分子修饰聚合物, 以提高弛豫铁电高分子材料在低电场下的熵变性能. 研究表明, 材料在 $66.7 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 电场、0.5 Hz 频率, 测得 9 K 的绝热温变和 1.9% 的面内应变. 该材料组成的自驱动柔性制冷系统, 通过 DMP 薄膜升温 and 降温的电致伸缩效应实现与热沉和热源的热传导, 如图 6 (a) 所示. 在零温跨下, 单位冷却功率为 $6.5 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$, 瞬时制冷量与耗电量比值高达 58. 在 4 K 温跨下, 器件的单位冷却功率为 $2.7 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$, 对应的 COP 为 24, 实现了约 32% 的热力学完善度. 同时, 器件在经历 70800 次循环后仍能保持 99.8% 的初始冷却功率密度, 其卓越的抗疲劳性

能突破了传统材料的循环稳定性极限. 在外部驱动模式方面, Ma 等^[35]提出了基于柔性 P(VDF-TrFE-CFE) 63.2/29.7/7.1 mol% 材料的单级电卡制冷器件, 在静电力的驱动下实现与热沉和热源的热量传递. 在零温跨、电场强度为 $66.7 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, 0.8 Hz 下, 热流密度为 $29.7 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 制冷功率为 $2.8 \text{ W} \cdot \text{g}^{-1}$, COP 为 13, 这种往复单级循环模式的电卡器件在芯片散热方面应用广泛. Bai 等^[36]基于改性 P (VDF-TrFE-CFE) 85%/15% 掺杂 BST 纳米颗粒材料, 研制了用于主动精准温控的点阵式电卡制冷器件, 如图 6 (b) 所示. 该器件在 $60 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 的电场强度和 1.5 Hz 频率下, 所有阵列点的温跨稳定在 4.6 K, COP 为 10.4, 平均热流密度高达 $620 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 是同类单层器件的 2 倍以上. 通过静电力驱动柔性电卡材料运动, 与模拟 CPU 热源接触时制冷并吸收 CPU 表面的热量, 与散热器端接触时释放热量, 实现对多核芯片差异化温度的高效精准热管理. 针对可穿戴设备的应用场景, Wang 等^[37]将柔性有机光伏模块 (OPV) 与柔性电卡器件 (EC) 集成, 研制了柔性可穿戴的主动电卡制冷器件, 在太阳照射下 OPV 组件高效地将太阳能转化为电能, 驱动 EC 装置进行制冷. 在无太阳光照条件下, 制冷系统可以利用能量收集系统储存的能量在环境寒冷时维持体温, 从而实现全天制冷和制热模式的切换. 将其应用在航天服上, 最大冷却能力达

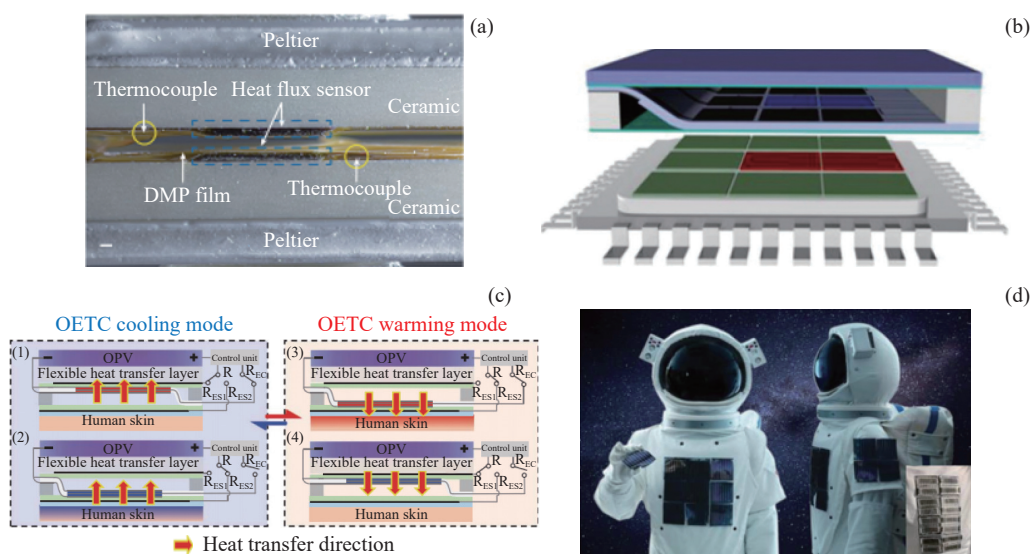


图 6 往复单级制冷器件. (a) 自驱动柔性制冷器件, (b) 点阵式制冷器件, (c) 柔性可穿戴制冷器件
Fig. 6 Reciprocating unipolar refrigeration device. (a) Self-actuating flexible refrigeration device, (b) array refrigeration electronic card device, (c) flexible wearable refrigeration device

10.1 K, 升温性能比覆盖有棉服的皮肤和裸露的皮肤高出 3.2 K, 极大地拓展了人体可适应的环境温度范围, 如图 6 (c) 所示.

3.2 往复多级循环

往复多级循环是指采用多个电卡单元以串联或并联的形式运行, 在自驱动或外部驱动往复运动的过程中, 前一单元产生的冷量可作为下一单元的低温热源, 使下一单元能在更低温度下制冷, 从而实现更低的制冷温度和更高的制冷效率.

3.2.1 无回热制冷器件

无回热循环是指电卡材料在加电和去电过程中, 将产生的热量和冷量与外部热源进行热量交换, 无须驱动实现制冷, 在往复循环过程蓄冷, 不进行热量/冷量的回收和再利用. 在自驱动模式方面, Wu 等^[38]利用 P(VDF-TrFE-CFE) 65/35/7 mol% 薄膜材料的电致伸缩效应, 形成与材料的电卡循环的协同热传输, 研制了自驱动热泵式电卡制冷器件 (SRHP), 如图 7 (a) 所示. SRHP 由六个制冷单元堆叠组成, 总厚度小于 6 mm, 有效制冷面积约为 4.52 cm², 六级联制冷器件在室温下 80 MV·m⁻¹, 1 Hz, 30 s 内可将温度降低 8.8 K, 器件顶层与底层温差可达 14.2 K, 最大制冷功率为 0.78 W. 在 73% 的能量回收电路调控下, 器件在 7.4 K 制冷温差下卡诺效率可达 26%, COP 为 10.1, 总功耗仅 73 mW. 在静电力驱动方面, Meng 等^[39]研发了 P(VDF-TrFE-CFE) (60/32/8 mol%) 多级联电卡制冷器件, 如图 7 (b) 所示. 在静电力驱动下, 四级联结构的器件温度提升 2.7 K 时, 冷却功率可达到 785 W·m⁻², 最大温差为 8.7 K, 是材料绝热温变的 2.9 倍, COP 为 9.0. 当温跨接近 0 K 时, 冷却功率可达到 906 W·m⁻², COP 为 10.4. 而两级联器件的冷却功率只有 200 W·m⁻², COP 降低至 3 左右. 在微泵驱动流体力学换热方面, Cui 等^[40]通过共轴湿纺技术制备了 BSTO 纳米颗粒填充的 P(VDF-TrFE-CFE) 80%/20% 电卡制冷管, 将其分成 30 个加载区, 通过配合电场的加载时间和流体流动速率, 使流体流经的区域电卡材料制冷, 吸收能量传递给冷源, 形成多级联主动循环工作模式, 如图 7 (c) 所示. 采用绝缘硅油为流体力学, 在流速为 5 mm·s⁻¹、电场强度为 100 MV·m⁻¹ 的条件下, 器件的最大温跨为 3.2 K, 单位冷却功率密度高达 702.1 mW·cm⁻³. 为了实现更高的制冷积累效应,

Bai 等^[41]将 10% 的氮化硼纳米片 BN 和 P(VDF-TrFE) 复合到 P(VDF-TrFE-CFE) 基体中, 制备了分段式柔性电卡制冷管, 通过施加锯齿波电压实现冷量积累并获得持续低温的流体介质和冷却负荷, 如图 7 (d) 所示. 通过电路设计将流动的介质进行分段式冷却, 有效地增加流体介质沿流向的温差, 实现高效冷却累积. 当流体介质流速为 10 mm·s⁻¹ 时, 级联器件在 164 MV·m⁻¹ 的电场强度下温跨可达 4.2 K, 其出口的流体温度是单级温跨的 1.4 倍, 在微电子系统的智能热管理方面提供了巨大的应用潜力.

3.2.2 回热制冷器件

电卡器件通常采用主动回热循环方式, 主要包括两种形式: 一是电卡材料周期性移动吸收热量, 与回热层同时沿冷热两端形成温度梯度, 通过与回热层间的换热累计实现系统冷热端的蓄冷和蓄热; 二是电卡材料保持不动, 由流体回热工质的周期循环进行热交换, 沿电卡材料构建温度梯度, 实现比材料本身更大的温跨. 第一种类型大多以固体材料作回热器, Gu 等^[42]将 24 层薄膜材料堆叠构建开发了第一台基于高分子制冷材料的主动回热电卡制冷器件, 在不锈钢回热器中来回移动, 与电场的加载和卸载同步, 实现蓄冷和蓄热, 如图 8 (a) 所示. 在 1 Hz 和 1000 kV·cm⁻¹ 的电场下, 电卡模组获得了 2 K 的温变, 制冷器件冷热端的最大温跨为 6.6 K, 回热系数大于 3. Wang 等^[43]采用 PST 多层电容材料制备电卡器件, 通过电机驱动多个 MLC 横向移动实现热量的传递, 回热循环产生比 MLC 材料绝热温变更大的温升, 如图 8 (b) 所示. 在 108 kV·cm⁻¹ 的外加电场下, PST 材料的温变为 2.5 K, 热冷端的最大温跨为 5.2 K, 最大制冷功率为 85 mW. 采用流体作为回热工质方面, Plaznik 等^[44]将 45 个 (1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-xPb-TiO₃(PMN-100xPT) 电卡材料单元排列成 9 行 5 列间隔为 0.125 mm 的多级回热电卡器件, 利用硅油单向循环流动在总长度 110 mm 微通道中实现换热, 如图 8 (c) 所示. 在 57 kV·cm⁻¹ 电场强度和 0.65 Hz 的电压加载循环频率下, 冷热端的最大温跨为 3.3 K. 当打开冷端热负载时, 最大制冷功率可达 16 W·kg⁻¹, 对应冷热端温跨为 1 K. Torelló 等^[45]设计制备了基于 PST 的多层电容平板式电卡器件, 制热过程流体正向流动, 制冷过程流体反向流动, 形成主动回热循环, 如图 8 (d) 所示. 该器件在 15.8 V·μm⁻¹ 电场强度下, 运

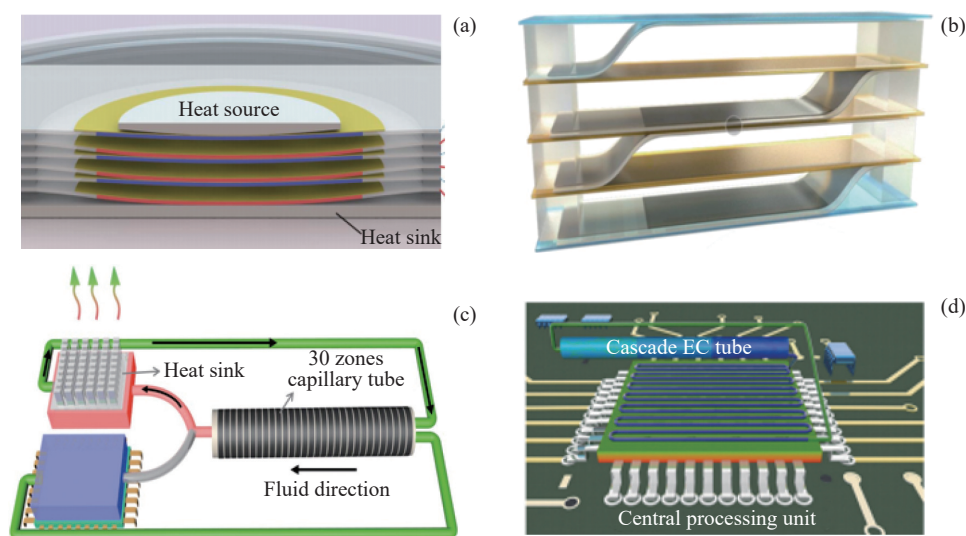


图 7 往复多级无回热制冷器件. (a) 自驱动热泵式器件, (b) 静电驱动多级联器件, (c) 基于流体换热的电卡制冷管, (d) 分段式柔性电卡制冷管

Fig. 7 Reciprocating cascade non-regenerative refrigeration device. (a) Self-actuating heat pump device, (b) electrostatic-driven cascade devices, (c) microfluidic-based heat exchange tube, (d) multi-stage flexible tube

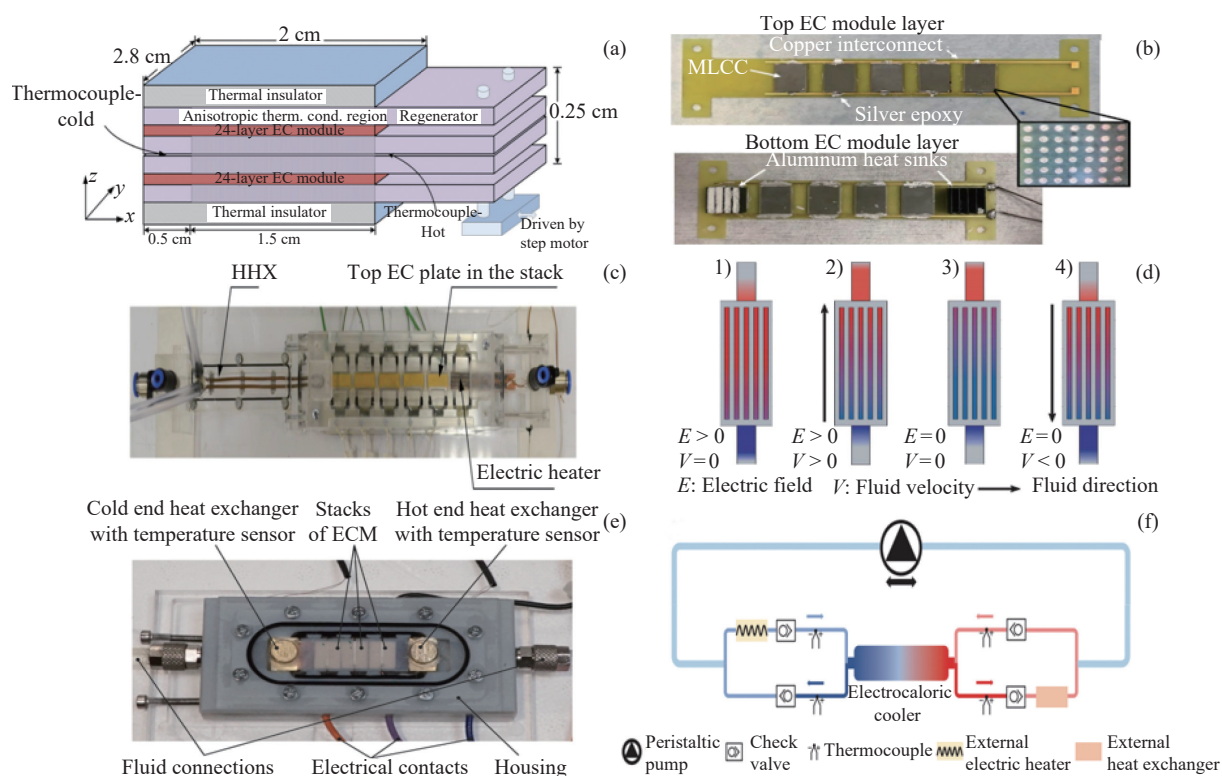


图 8 往复多级回热制冷器件. (a) 高分子材料主动回热制冷器件, (b) PST 多层电容制冷器件, (c) PMN-100xPT 制冷器件, (d) PST 多层平板式制冷器件, (e) PMN-8 PT 制冷器件, (f) 双回路主动回热制冷器件

Fig. 8 Reciprocating cascade regenerative refrigeration device. (a) Polymer material active regenerative refrigeration device, (b) PST-based multi-layer device, (c) PMN-100xPT device, (d) PST-based cascade flat device, (e) PMN-8 PT-based device, (f) double-circuit active regenerative device

行 2000 s 后可产生 13 K 的温跨, 与单向循环相比, 温跨增加了 5 倍. Blumenthal 等^[46]采用 0.92 Pb ($\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}$) O_3 -0.08 PbTiO₃(PMN-8 PT) 材料制备了回热制冷器件, 如图 8 (e) 所示. 在电场强度为 32 kV·cm⁻¹、循环频率为 0.3 Hz、流体流量为总体积 80% 时, 器件的最大温跨为 1.12 K, 是材料本身温跨的 3 倍, 且运行 2000 h 性能仍稳定可靠. 为了提升电卡制冷器件的功率, Li 等^[47]设计了双回路主动回热循环电卡器件, 如图 8(f) 所示. 回热室结构由 0.5 mm 厚的 PST-MLC 堆叠而成, 通过流体的往复流动和冷端侧回热预热, 逐步提升器件的蓄冷能力. 在 10000 V·mm⁻¹、0.25 Hz 的外加电场下, 绝缘流体以 80 mL·min⁻¹ 的流速运行 4000 s 后, 最大温跨高达 20.9 K, 最大制冷功率为 4.2 W.

4 结论与展望

电卡制冷是一种新型的固态制冷技术, 其工作过程直接使用电能驱动, 可认为是良绝缘体, 漏电流非常小, 具有高效、轻量化、无制冷剂泄漏等优势. 本文从电卡材料性能、电卡冷热分离方法、电卡制冷循环模式三个方面综述了电卡制冷技术的研究现状. 针对未来载人登月、火星探测等载人航天工程热管理关键参数, 例如温跨、制冷量和 COP 等, 文献中报道了应用于器件中的 P(VDF-TrFE-CFE) 高分子材料实测得到的最大温变为 20 K (电场 160 kV·cm⁻¹, 测试温度 306 K), PBZ 材料的理论温变极限可达 45 K (电场 598 kV·cm⁻¹, 测试温度 290 K). 目前, 电卡器件的制冷量在毫瓦到瓦量级, 最大值为 4.2 W (电场 10000 V·mm⁻¹、0.25 Hz, 流体 80 mL·min⁻¹, 时长 4000 s), 最大制冷功率密度为 6.5 W·g⁻¹ (电场 66.7 MV·m⁻¹、0.5 Hz, 0 K 温跨), 最大 COP 为 24, 热力学完成度约 32% (电场 66.7 MV·m⁻¹、0.5 Hz, 4 K 温跨), 虽然制冷功率方面有所欠缺, 但是可以满足小于 10 L 的航天/空间站冷储箱对冷热端温差和 COP 的需求.

目前, 在空间应用中面临最关键的问题是冷热端温跨小、器件制冷量小, 仅适用于制冷量需求不高且对振动、噪声、排放要求较高的应用场景. 例如, 10 W 以下小功率卫星芯片级器件、20 K 以下小温跨航天服可穿戴设备、轻量化深空探测设备等领域. 未

来, 随着电卡制冷技术的进一步发展, 对于航天冷储箱存储食品、医学、生物试验标本等的大制冷量要求也将逐步完善, 将其拓展应用到空间科学领域.

为了解决温跨小、制冷量小的问题, 仍需在以下方面突破技术瓶颈. 在材料研究方面, 应从微观到宏观层面探究组分-结构-性能的协同调控机制, 解决电卡材料的电绝缘性差、电压耐受性差等问题, 提升材料在低驱动电压和常温区附近的电致熵变, 获得更大温差. 在冷热分离技术方面, 需构建多尺度分层结构界面效应理论, 完善微尺度空间强化传热机制, 探究固固界面热阻影响规律, 提高主动回热循环的传热效率. 在器件集成方面, 亟待突破电卡器件的小型化、智能化封装与设计, 优化器件的循环寿命、机械强度等综合性能的技术瓶颈, 为电卡器件的工程化应用提供技术支撑.

空间电卡制冷的研究是一个极为复杂的基础与应用研究问题, 涉及新材料的开发、制冷模组设计、制冷器件封装、高效冷热分离、热力循环设计、空间强化传热等方面, 具有明显的前瞻性和学科交叉性. 未来, 跨学科交叉研究将为空间电卡制冷技术的发展带来新的思路, 实现制冷技术的传统替代和颠覆性变革, 延伸出更多的空间应用场景.

参考文献

- [1] HU H H, JU Y W, YU J C, *et al.* Highly stabilized and efficient thermoelectric copper selenide[J]. *Nature Materials*, 2024, **23**(4): 527-534
- [2] LI P, QIU P F, XU Q, *et al.* Colossal Nernst power factor in topological semimetal NbSb₂[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 7612
- [3] ZHANG S, DELIYORE-RAMÍREZ J, DENG S, *et al.* Highly reversible extrinsic electrocaloric effects over a wide temperature range in epitaxially strained SrTiO₃ films[J]. *Nature Materials*, 2024, **23**(5): 639-647
- [4] QIAN S X, CATALINI D, MUEHLBAUER J, *et al.* High-performance multimode elastocaloric cooling system[J]. *Science*, 2023, **380**(6646): 722-727
- [5] 新黄河. 七次上太空的航天冰箱, 为何只有海尔能造[EB/OL]. [2022-04-16]. <https://www.toutiao.com/article/7087208257655210530/?wid=1747802224560>
- [6] LI C Y, CAI Y C, XIE Y F, *et al.* Enhanced dielectric/ferroelectric properties of P(VDF-TrFE) composite films with organic perovskite ferroelectrics[J]. *Applied Physics Express*, 2023, **16**(3): 031008
- [7] WANG D, CHEN X, YUAN G L, *et al.* Toward artificial intelligent self-cooling electronic skins: large electrocaloric

- effect in all-inorganic flexible thin films at room temperature[J]. *Journal of Materiomics*, 2019, **5**(1): 66-72
- [8] BAI Yang, LI Jianting, QIN Shiqiang, *et al.* Ferroelectric ceramics for high-efficient solid-state refrigeration[J]. *Advanced Ceramics*, 2018, **39**(6): 369-389 (白洋, 李建厅, 秦士强, 等. 面向高效固态制冷应用的铁电陶瓷材料 [J]. 现代技术陶瓷, 2018, **39**(6): 369-389)
- [9] SUN H C, MENG Y Z, HAN F F, *et al.* Simultaneously achieved large electrocaloric effect and broad working temperature range in transparent Sm-doped $0.88\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - 0.12PbTiO_3 ceramics at low electric field[J]. *Ceramics International*, 2024, **50**(11): 19237-19244
- [10] ROŽIČ B, KOSEC M, URSIČ H, *et al.* Influence of the critical point on the electrocaloric response of relaxor ferroelectrics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110**(6): 064118
- [11] PENG B L, FAN H Q, ZHANG Q. A giant electrocaloric effect in nanoscale antiferroelectric and ferroelectric phases coexisting in a relaxor $\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{ZrO}_3$ thin film at room temperature[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, **23**(23): 2987-2992
- [12] LU S G, ROŽIČ B, ZHANG Q M, *et al.* Organic and inorganic relaxor ferroelectrics with giant electrocaloric effect[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(16): 162904
- [13] LI Zichao, SHI Junye, CHEN Jiangping, *et al.* Electrocaloric cooling materials and systems: a review and perspective[J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, **42**(1): 1-13 (李子超, 施骏业, 陈江平, 等. 电卡制冷材料与系统发展现状与展望 [J]. 制冷学报, 2021, **42**(1): 1-13)
- [14] QIAN G M, ZHU K J, LI X, *et al.* The electrocaloric effect of PBZ/PVDF flexible composite film near room temperature[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021, **32**(12): 12001-12016
- [15] ZHUO F P, LI Q, GAO J H, *et al.* Giant negative electrocaloric effect in $(\text{Pb}, \text{La})(\text{Zr}, \text{Sn}, \text{Ti})\text{O}_3$ antiferroelectrics near room temperature[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10**(14): 11747-11755
- [16] LI J L, CHANG Y F, YANG S, *et al.* Lead-free bilayer thick films with giant electrocaloric effect near room temperature[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, **11**(26): 23346-23352
- [17] MISCHENKO A S, ZHANG Q, SCOTT J F, *et al.* Giant electrocaloric effect in thin-film $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ [J]. *Science*, 2006, **311**(5765): 1270-1271
- [18] NAIR B, USUI T, CROSSLEY S, *et al.* Large electrocaloric effects in oxide multilayer capacitors over a wide temperature range[J]. *Nature*, 2019, **575**(7783): 468-472
- [19] ZHENG S Y, DU F H, ZHENG L R, *et al.* Colossal electrocaloric effect in an interface-augmented ferroelectric polymer[J]. *Science*, 2023, **382**(6674): 1020-1026
- [20] HUANG Y F, GU T, RUI G C, *et al.* A relaxor ferroelectric polymer with an ultrahigh dielectric constant largely promotes the dissociation of lithium salts to achieve high ionic conductivity[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, **14**(11): 6021-6029
- [21] SADL M, PRAH U, KOVACOVA V, *et al.* Multifunctional flexible ferroelectric thick-film structures with energy storage, piezoelectric and electrocaloric performance[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, **11**(29): 10058-10068
- [22] LI X Y, YANG J L, PAN X H, *et al.* New soft actuating way by rapidly temperature change of electrocaloric effect[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, **15**(24): 29449-29456
- [23] LU S J, CHEN G R, ZHANG Y C, *et al.* Electrocaloric effect in lead-free $0.5\text{Ba}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ - $0.5(\text{Ba}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{TiO}_3$ ceramic measured by direct and indirect methods[J]. *Ceramics International*, 2018, **44**(17): 21950-21955
- [24] QIAN X S, HAN D L, ZHENG L R, *et al.* High-entropy polymer produces a giant electrocaloric effect at low fields[J]. *Nature*, 2021, **600**(7890): 664-669
- [25] YE H J, QIAN X S, JEONG D Y, *et al.* Giant electrocaloric effect in $\text{BaZr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_3$ thick film[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(15): 152908
- [26] LI X Y, QIAN X S, LU S G, *et al.* Tunable temperature dependence of electrocaloric effect in ferroelectric relaxor poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorofluoroethylene terpolymer)[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(5): 052907
- [27] LI Q, ZHANG G Z, ZHANG X S, *et al.* Relaxor ferroelectric-based electrocaloric polymer nanocomposites with a broad operating temperature range and high cooling energy[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(13): 2236-2241
- [28] ZHAO Jianfu, WANG Shuangfeng, LIU Qiang, *et al.* Retrospect and perspective on microgravity science in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 34-45 (赵建福, 王双峰, 刘强, 等. 中国微重力科学研究回顾与展望 [J]. 空间科学学报, 2021, **41**(1): 34-45)
- [29] MENG Y, PU J H, PEI Q B. Electrocaloric cooling over high device temperature span[J]. *Joule*, 2021, **5**(4): 780-793
- [30] SINYAVSKY Y V, PASHKOV N D, GOROVY Y M, *et al.* The optical ferroelectric ceramic as working body for electrocaloric refrigeration[J]. *Ferroelectrics*, 1989, **90**(1): 213-217
- [31] PLAZNIK U, KITANOVSKI A, ROŽIČ B, *et al.* Bulk relaxor ferroelectric ceramics as a working body for an electrocaloric cooling device[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(4): 043903
- [32] JIA Y B, JU Y S. A solid-state refrigerator based on the electrocaloric effect[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(24): 242901
- [33] LI M D, SHEN X Q, CHEN X, *et al.* Thermal management of chips by a device prototype using synergistic effects of 3-D heat-conductive network and electrocaloric refrigeration[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 5849
- [34] HAN D L, ZHANG Y J, HUANG C L, *et al.* Self-oscillat-

- ing polymeric refrigerator with high energy efficiency[J]. *Nature*, 2024, **629**(8014): 1041-1046
- [35] MA R J, ZHANG Z Y, TONG K, *et al.* Highly efficient electrocaloric cooling with electrostatic actuation[J]. *Science*, 2017, **357**(6356): 1130-1134
- [36] BAI P J, ZHANG Q, CUI H, *et al.* An active pixel-matrix electrocaloric device for targeted and differential thermal management[J]. *Advanced Materials*, 2023, **35**(15): 2209181
- [37] WANG Z Y, BO Y W, BAI P J, *et al.* Self-sustaining personal all-day thermoregulatory clothing using only sunlight[J]. *Science*, 2023, **382**(6676): 1291-1296
- [38] WU H X, ZHU Y, YAN W Z, *et al.* A self-regenerative heat pump based on a dual-functional relaxor ferroelectric polymer[J]. *Science*, 2024, **386**(6721): 546-551
- [39] MENG Y, ZHANG Z Y, WU H X, *et al.* A cascade electrocaloric cooling device for large temperature lift[J]. *Nature Energy*, 2020, **5**(12): 996-1002
- [40] CUI H, ZHANG Q, BO Y W, *et al.* Flexible microfluidic electrocaloric cooling capillary tube with giant specific device cooling power density[J]. *Joule*, 2022, **6**(1): 258-268
- [41] BAI P J, CUI H, ZHANG D, *et al.* A highly efficient cascade electrocaloric cooling tube with enhanced temperature change by sawtooth voltage[J]. *Next Materials*, 2023, **1**(1): 100001
- [42] GU H M, QIAN X S, LI X Y, *et al.* A chip scale electrocaloric effect based cooling device[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(12): 122904
- [43] WANG Y D, ZHANG Z Y, USUI T, *et al.* A high-performance solid-state electrocaloric cooling system[J]. *Science*, 2020, **370**(6512): 129-133
- [44] PLAZNIK U, VRABELJ M, KUTNJAK Z, *et al.* Numerical modelling and experimental validation of a regenerative electrocaloric cooler[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, **98**: 139-149
- [45] TORELLÓ A, LHERITIER P, USUI T, *et al.* Giant temperature span in electrocaloric regenerator[J]. *Science*, 2020, **370**(6512): 125-129
- [46] BLUMENTHAL P, RAATZ A. Design methodology for electrocaloric cooling systems[J]. *Energy Technology*, 2018, **6**(8): 1560-1566
- [47] LI J N, TORELLÓ A, KOVACOVA V, *et al.* High cooling performance in a double-loop electrocaloric heat pump[J]. *Science*, 2023, **382**(6672): 801-805

作者简介



常启泰 男, 1999年3月出生于吉林省榆树市, 现为桂林电子科技大学机械工程专业在读研究生, 主要研究方向为电卡制冷实验研究。

E-mail: 2992884521@qq.com



陈雪(通信作者) 女, 1988年10月出生于广西壮族自治区桂林市, 现为桂林电子科技大学机电工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为微重力流体物理、多相流界面效应与传热传质研究等。

E-mail: chenxue@guet.edu.cn