

综述

全固态磁制冷系统物理模型的研究进展*

刘国强¹⁾ 柯亚娇²⁾ 张孔斌¹⁾ 何雄¹⁾ 罗丰¹⁾ 何斌¹⁾ 孙志刚^{1)†}

1) (武汉理工大学, 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

2) (武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

(2019年7月25日收到; 2019年8月26日收到修改稿)

磁制冷是一种节能环保的制冷技术, 具有广阔的应用前景. 目前, 基于主动磁回热循环的磁制冷系统被广泛研究并诞生了多个原型制冷机. 然而, 这些系统主要采用流体换热, 导致系统存在工作频率低、回热损失大、子部件设计复杂等问题, 使得制冷机成本升高和效率降低. 针对上述问题和难点, 引入固态传热增强机制和全固态磁制冷系统模型设计及优化已成为近年来研究的热点. 本文综述了全固态磁制冷系统的两类物理模型的研究进展, 即基于热二极管 (电控热二极管和磁控热二极管) 的全固态磁制冷模型和基于高热导率材料元件的全固态磁制冷模型. 与传统主动磁回热制冷模型进行比较分析, 表明全固态磁制冷具有更大的应用潜力. 最后, 对未来全固态磁制冷技术的研究进行了分析和展望.

关键词: 全固态磁制冷, 物理模型, 热二极管, 高热导率材料元件**PACS:** 75.30.Sg, 72.20.Pa, 07.20.Mc, 85.80.Fi**DOI:** 10.7498/aps.68.20191139

1 引言

磁制冷 (magnetic refrigeration, MR) 是一种基于磁卡效应 (或称为磁热效应) 的高效节能的绿色环保技术, 可以消除含氟有害气体的使用^[1,2]. MR 可以追溯到 1881 年铁金属中磁卡效应的发现, 最初用于 mK 级别的极低温制冷^[3,4]. 1976 年, 美国国家航空局路易斯研究中心 Brown^[5] 证明了在室温附近 MR 的可行性, 这项开创性的工作激起了科研工作者们对室温 MR 技术的广泛关注^[1,6–15]. 1978 年, 美国加州大学 Steyert^[6] 提出了主动磁回热器 (active magnetic regenerator, AMR) 的概念, 使用回热器促进传热. 1982 年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 Barclay^[7] 以及 Barclay 和 Steyert^[8] 对 AMR 做了进一步的研究和开发, 其中磁卡材料 (magneto-caloric material, MCM) 同时用作于制冷剂 and 回热器, 获得了更大的温跨, 标志着室温

MR 进入新的发展阶段. 1992 年, 美国橡树岭国家实验室 Chen 等^[9] 证明了 AMR 循环是除卡诺循环外室温下最有效的循环. 1997 年, 美国 Ames 实验室/航天公司报道了室温 MR 技术的新进展. 他们设计了一种往复式主动磁回热制冷机 (active magnetic regenerative refrigerator, AMRR), 该制冷机能够产生 600 W 的制冷功率、10 K 温跨和接近 60% 的卡诺循环效率, 在 18 月内运行 5000 h 而没有出现重大问题^[10,11]. 这揭示了 MR 技术的可行性和实际竞争力. 为了加快 MR 的商业化进程, 人们逐步建立和测试了多个 AMRR 原型^[1,12–15]. 近期, 美国航天技术中心 Jacobs 等^[16] 报道了一种旋转式 AMR 制冷机, 该制冷机采用 La(Fe, Si)₁₃H 合金作为回热器填料, 在超过 11 K 温跨下获得了 2502 W 的制冷功率; 中国科学院理化研究所李振兴等^[17] 设计了一种采用轴 Halbach 永磁组的小型室温磁制机, 在最佳利用系数为 0.35 时获得了 12.1 K 的制冷温跨; 美国劳伦斯伯克利国家实验

* 国家自然科学基金 (批准号: 11834012, 11574243, 11174231) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sun_zg@whut.edu.cn

室 Teyber 等^[18]设计了一种基于超导强磁体系统的 AMR 制冷机, 使用 2.1 kg Gd 作为磁质, 获得了 100 K 的高温跨. 然而, 基于 AMR 的磁制冷技术利用流体进行对流换热, 使得 AMRR 在实施过程中存在两个主要技术难点^[14,19–24], 即工作频率 (每单位时间执行的热力学循环次数) 低和回热损失大. 目前, 多数样机最高工作频率为 5 Hz 左右. 样机的低工作频率主要是由于对流传热限制导致的. 对流传热的限制使得流体在较短时间内不能够转移或吸收磁卡效应产生的热量, 因此, 提升工作频率将会增大热损失, 导致系统效率降低. 这使得工作频率必须限定在较低的值, 最终导致系统功率密度较低. 我们知道, 功率密度, 即比功率 (或称为比制冷功率, specific cooling power, SCP), 是单位质量或单位体积 (或面积) MCM 的制冷功率, 与系统工作频率成正比, 是 MR 技术至关重要的指标之一. 同时, 由于传热流体和 MCM 床之间温差较大, 使得 MR 系统在回热期间产生不可逆热损失, 这进一步导致制冷功率和效率降低. 并且, 流体流经回热器时, 流动过程是振荡的, 这在一定程度上也限制了主动回热过程的效率. 此外, AMR 机械子系统部件结构复杂且存在额外的机械摩擦损耗, 多孔介质的高压降也使得系统黏性耗散增大和泵送功率升高. 上述问题使得现有的样机效率低、成本高. 因此, 目前 AMR 在市场中还无法有效与传统制冷技术竞争, 难以实现广泛应用.

为了克服上述 AMR 存在的技术问题和难点, 引入特殊固态传热机制、创新系统模型设计和参数

与结构优化成为近年来研究的热点. 2010 年, Kitanovski 和 Egolf^[19]首次提出了基于热二极管的全固态 MR 模型的概念, MCM 和热源及散热器之间的传热由位于 MCM 两侧的热二极管控制, 该方案可得到较高传热速率和工作频率. 随后, 人们对该概念做了进一步拓展, 建立了一系列新的模型, 即: 基于热二极管 (thermal diode, 包括电控热二极管和磁控热二极管) 的全固态 MR 模型^[21–23,25–35]和基于高热导率材料 (high thermal conductivity material, HTCM) 元件的全固态 MR 模型^[24,31,36,37]. 本文第 2 部分综述了全固态 MR 系统的两类物理模型及其研究现状; 第 3 部分总结和比较了全固态 MR 模型与传统 AMR 模型的性能, 并简要概述和分析了几类 MCM 及几种固态换热介质; 第 4 部分对未来全固态 MR 技术的研究进行了分析和展望.

2 全固态磁制冷系统物理模型的研究进展

从目前研究来看, 在全固态 MR 系统的模型中, 人们采用两类固态换热器件替代流体. 第一类实现固态换热的方法是采用热二极管. 热二极管又称热开关、热阀或热半导体等, 可以用来控制传热方向、开关动作及传热速率^[21,25], 其开关动作可以通过施加外部能量源加以控制. 热二极管主要包括帕尔贴 (Peltier) 热电元件 (电场控制其开关动作和传热速率, 如图 1(a) 所示) 和热导率随磁场强度大小变化的 k_H (k , 热导率; H , 磁场强度) 元件 (磁

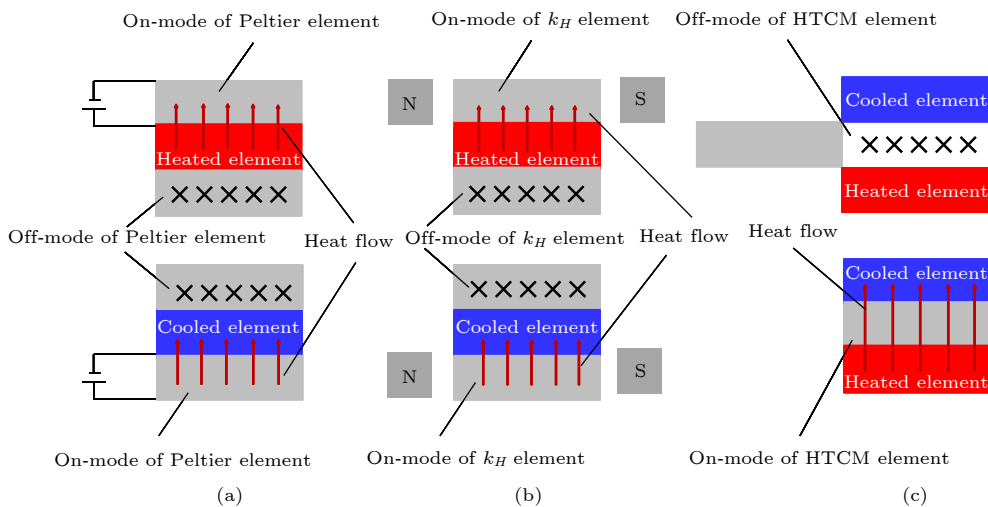


图 1 (a) Peltier 元件作为热二极管的工作机制; (b) k_H 元件作为热二极管的工作机制; (c) HTCM 元件工作机制

Fig. 1. (a) Operation mechanism of Peltier element as thermal diode; (b) the operation mechanism of k_H element as thermal diode; (c) the operation mechanism of HTCM element.

场控制其开关动作和传热速率, 如图 1(b) 所示). 第二类实现固态换热的方法是采用基于 HTCM 元件, 比如铜、银、铝、铁和石墨烯元件等, 它们主要通过接触或非接触的方式实现热传递的开关动作 (如图 1(c) 所示).

2.1 基于热二极管的全固态 MR 模型

基于热二极管的全固态 MR 模型以热二极管/MCM 层/热二极管组成的三明治结构为基本架构. 热二极管两端与换热器或热源及散热器热接触, 磁卡效应产生的热量变化可以通过热二极管在 MCM 与换热器或散热器间进行快速传输. 这种热传递与热流切换由热二极管控制的全固态 MR 模型也可称为热二极管/磁卡器件复合制冷模型. 与 AMR 类似, 可以通过多层 MCM 的级联设计增大系统温跨. 此类全固态 MR 模型的设计有两种,

即: Peltier 元件 (电控热二极管) 作为固态传热介质和基于 k_H 元件 (磁控热二极管) 作为固态传热介质.

2.1.1 基于 Peltier 元件的全固态 MR 模型

Kitanovski 和 Egolf^[19] 于 2010 年描述了一种热电模块作为热二极管的简单热电/磁卡器件复合制冷装置, 该装置通过施加电流控制热电模块的开关和热传输. 2013 年, Tomc 等^[21] 建立了基于 Peltier 元件的一级全固态 MR 的首个详细模型, 如图 2(a) 所示. 当施加磁场时, MCM 由于磁卡效应而升温. 此时 Peltier 1 开启, 快速地将热量从 MCM 传输到热端换热器 (hot heat exchanger, HHEX); 同时 Peltier 2 关闭, 作为理想绝热体, 隔绝 MCM 与冷端换热器 (cold heat exchanger, CHEX) 之间的热传递. 移除磁场时, MCM 温度降低, 此时 Peltier 2 开启, 将热量快速从 CHEX 传

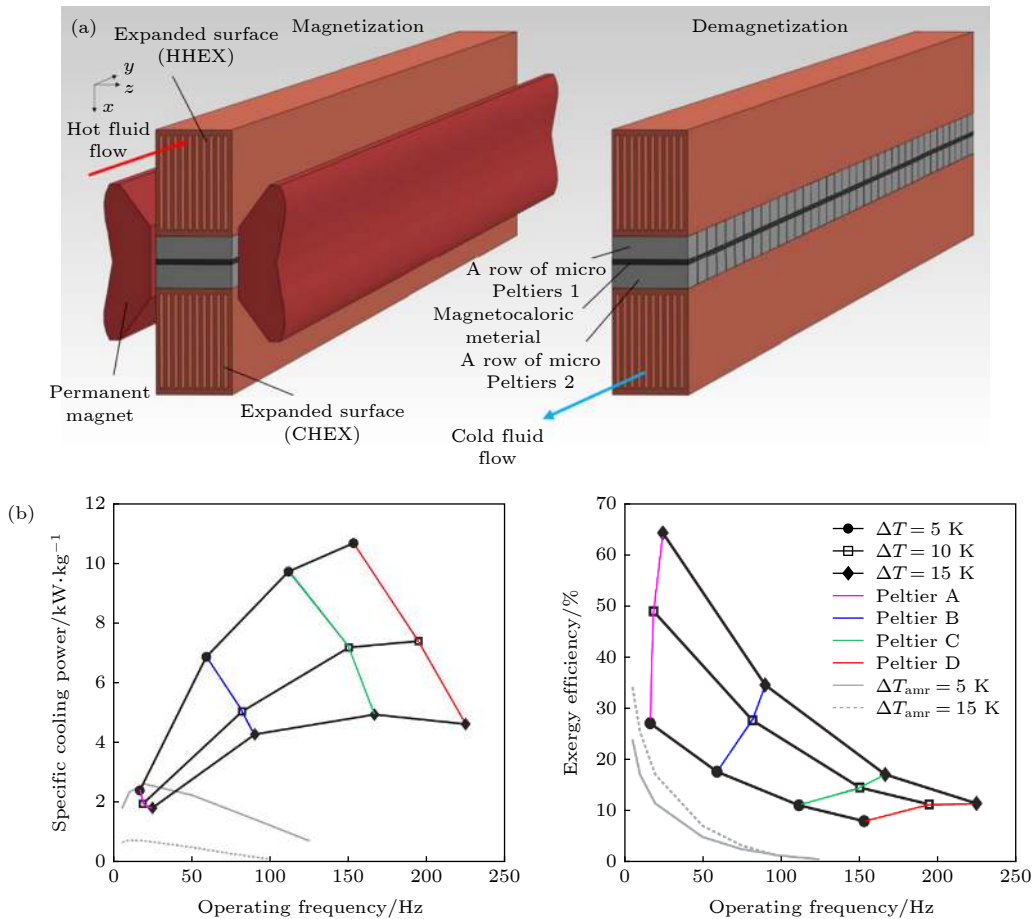


图 2 (a) 基于热二极管的全固态 MR 模型结构示意图^[21]; (b) 带有热二极管的 MR 系统与平行板 AMR 在不同温跨和不同频率下最大 SCP 和焓效率的比较^[26]

Fig. 2. (a) Schematic diagram of the full solid state MR model based on a thermal diode^[21]; (b) comparison of maximum SCP and exergy efficiency between MR system with thermal diode and parallel-plate AMR at different temperature spans and different frequencies^[26].

输到 MCM; 同时 Peltier 1 关闭, 作为理想绝热体, 隔绝 MCM 与 HHEX 之间的热传递. Tomc 等^[21,26]建立了准二维数值模型进行仿真评估, 并与传统平行板 AMR 进行了比较分析. 结果表明, 基于 Peltier 元件的全固态 MR 系统可以在超过 200 Hz 的高频下工作 (如图 2(b) 所示). 这是因为, 相较于对流传热, Peltier 元件可以更快地从 MCM 中提取热量. 从图 2 也可以看出, 新系统在高频工作条件下最大 SCP 大幅提升, 焓效率也有较高的提升. 当 Peltier 元件热流速率较大时 (热流速率从小至大依次为 Peltier A, Peltier B, Peltier C, Peltier D, 见图 2(b) 右图), 可以在很短时间内传递更多热量, 器件可以在更高频率下工作, 此时传热损失小, SCP 提升, 但由于电流输入大, 电功耗高, 会导致焓效率降低. 当 Peltier 元件热流速率较小时, Peltier 元件传热能力低, 器件只能在较低的频率下工作, 会导致 SCP 降低, 不过由于输入电流小, 电功耗低, 焓效率较高. 同时, 由于热传导过程还受到 Peltier 元件和 MCM 自身热扩散特征时间 (τ , 与密度 ρ 、热导率 k 和比热容 c 有关, $\tau = \rho c/k$ ^[32]) 的影响, SCP 并不会随工作频率的提升而一直增加.

2014 年, Egolf 等^[27]讨论了 Ni 纳米线薄膜 Peltier 元件对一级全固态 MR 系统性能的影响. 他们基于 Peltier 元件的实验测定值 (塞贝克系数、电阻), 从理论上估算了系统性能, 并与传统 AMR 进行了比较. 结果表明, 在 10 Hz 和 5 K 温跨下, 全固态系统的制冷系数 (coefficient of

performance, COP) 值为 2.8, SCP 值为 15 kW/kg, 同样条件下, AMR 系统的 SCP 只有 2.5 kW/kg, 这表明了全固态 MR 系统具有较大的性能提升. 同时, 作者认为未来应考虑优化 Peltier 元件热阻和电阻以提升系统整体性能, 并开展热电效应和热负载等因素对系统性能影响的研究. 2015 年, Kitanovski 等^[22]综述了固态物理领域压卡、电卡、弹卡和磁卡制冷的研究进展, 并分析了上述制冷技术的实际可行性, 指出在众多固态热制冷中基于热二极管的全固态 MR 具有良好应用前景. 2017 年, de Vries 和 van der Meer^[28]考虑热电效应的影响和 Peltier 元件实际热阻, 通过添加热电效应模型对热电/磁卡器件全固态模型进行了二维数值模拟分析. 物理模型结构如图 3(a) 所示, 与 Tomc 等^[21]所设计模型类似, 基本架构仍为热二极管/MCM 层/热二极管的三明治结构, 并使用同一型号的热二极管. 不同的是, 作者对 Peltier 元件内部结构和实际工况进行了描述, 无电流施加时 Peltier 元件的热输运主要是传统的晶格热传导, 施加电流时, 热输运以电热输运为主. 同时, 构建了更为全面的热-电-磁耦合数学模型, 并考虑 MCM 层的纵向热传导和温度分布 (如图 3(b) 所示), 对磁热-热电能转换进行了更为详细的分析. 结果表明, 全固态系统可以在超过 20 Hz 的频率下工作, SCP 获得了预期改善. 然而, 作者指出 Tomc 等^[21]高估了 Peltier 元件的实际热阻, 无电流施加时的 Peltier 元件的晶格热传导会使得 MCM 与换热器间进行热流切换时产生热泄漏, 导致温跨和 COP 降低.

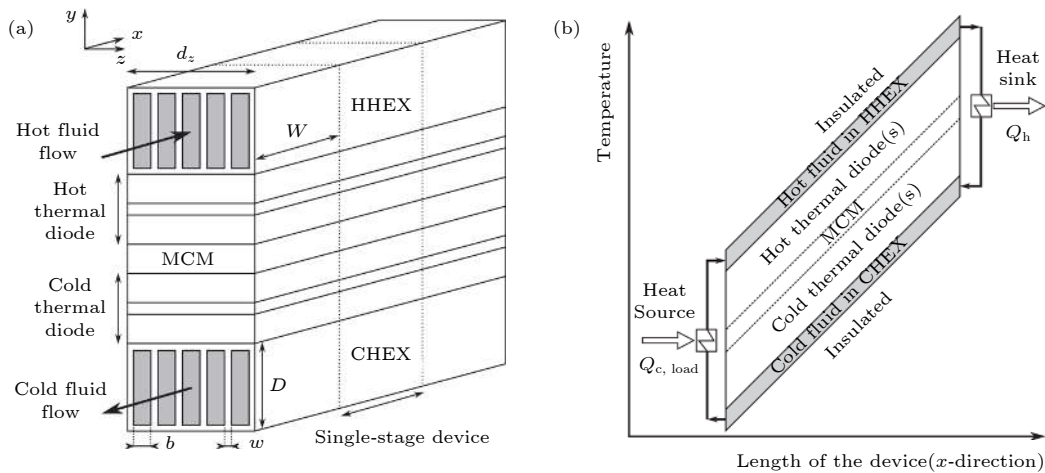


图 3 (a) 全固态 MR 系统模型结构示意图^[28]; (b) 器件长度方上的温度分布^[28]

Fig. 3. (a) Schematic diagram of the full solid state MR system model^[28]; (b) temperature distribution over the length of the device^[28].

除一级全固态 MR 模型外, 基于 Peltier 元件的级联全固态 MR 模型也取得了一定的进展. 2012 年, Tasaki 等^[29]首次提出了基于热二极管的级联全固态 MR 的设计概念, 并由 Olsen 等^[30]做了进一步拓展. 在该级联系统中, MCM 元件与热二极管交叠设计 (如图 4(a) 所示). Olsen 等^[30]没有考虑实现热二极管的具体机制, 而是假设热二极管热导率在“开”下无穷大, “关”下为无穷小, MCM 热容为常数, 在此基础上探索了物理参数对系统性能的影响规律. 研究表明, 在 60 K 高温跨下, 系统 SCP 与热导率、循环频率和元件长度等有关. 随着 MCM 热导率增加, SCP 随频率也线性增加. 同时, 较薄 MCM 可以更快地传输热量. 2017 年, Monfared^[23]对该模型进行了更为深入的研究, 同样使用 Peltier 元件作为热二极管, 改变外加电流大小控制 Peltier 元件的传热速率. 模型工作原理如图 4(b) 所示: 通过磁化不同 MCM 层和控制不同层 Peltier 元件的打开、关闭实现热量定向运输和循环制冷. 单个制冷循环主要分为四个步骤: 1) 奇数 MCM 层被磁化而升温, Peltier 元件关闭; 2) 偶数 Peltier 元件打开, 并将奇数 MCM 层的热量泵送到偶数的 MCM 层; 3) Peltier 元件关闭, 偶数 MCM 层被磁化而升温, 奇数 MCM 层由于退磁变冷; 4) 奇数 Peltier 元件打开, 热量从热 MCM

层泵送到较冷 MCM 层. 研究表明, 增加 MCM 元件数, 温跨随之增加. 另外, 电流大小对系统效率有着决定性的影响. 电流过大, Peltier 元件传热速率加快, 但也伴随着焦耳热的增大, 从而导致 COP 减小 (如图 4(c) 所示). 降低电流可以提高系统 COP, 但 Peltier 元件热输运速率会减小, 导致 SCP 降低. 同时, 在高频条件下, 若电流值过小, Peltier 元件则不能够将 MCM 产生的热量提取出来, 会进一步导致系统 SCP 和 COP 减小. 此外, Peltier 元件长度的增加会使系统 SCP 增加, 但也会导致焦耳热增大, 使 COP 减小; 若长度过小, 则会使 Peltier 元件轴向导热阻减小, 导致 SCP 和 COP 均减小 (如图 4(d) 所示). 因此, 同热泄漏一样, 应用 Peltier 元件时必须考虑焦耳热问题. 未来应进一步优化电流、几何形状等其他参数并研制高性能热电元件以最小化焦耳热的影响.

最近, Wu 等^[24]和 Lu 等^[31]通过采用 Cu/Gd 复合磁工质以增强 MCM 有效热导率, 建立了以新型微元回热 (micro-unit regeneration, MUR) 循环为制冷循环的级联全固态 MR 系统模型. 物理模型由两个多级 Cu/Gd 复合层组成的 MUR 板、两个永磁体和一个中间传热板构成 (如图 5(a) 所示). MUR 板被分成若干网格以避免热泄漏, 热端位置和冷端位置

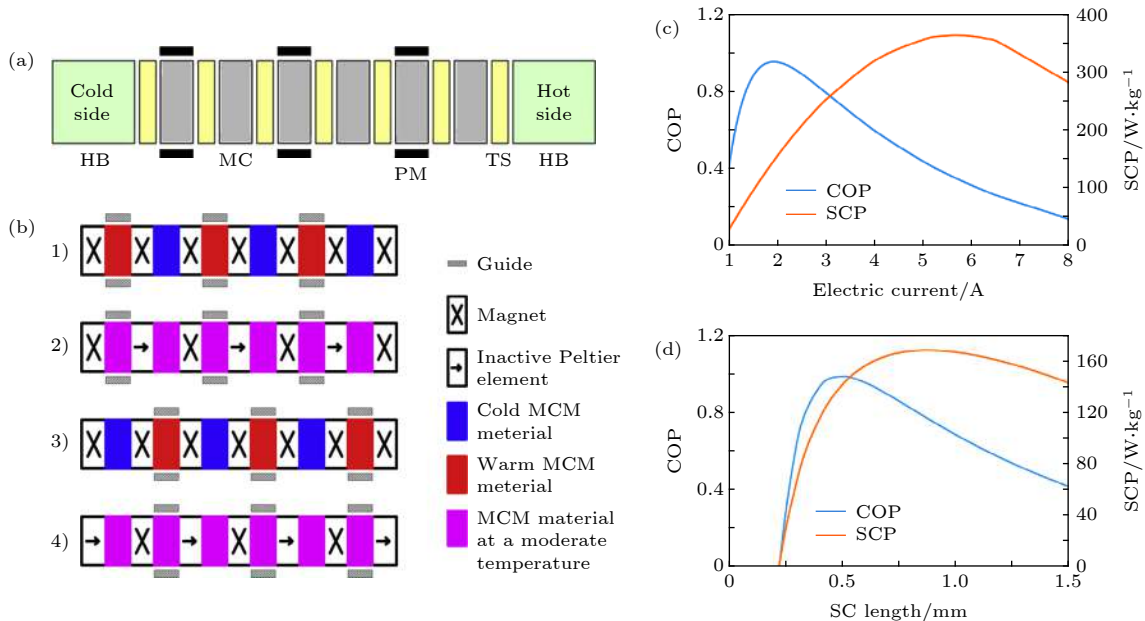


图 4 (a) 基于热二极管的全固态 MR 模型示意图^[30]; (b) 工作原理^[23]; (c) 不同电流下 COP 和 SCP 的变化^[23]; (d) Peltier 元件不同长度下 COP 和 SCP 的变化^[23]

Fig. 4. (a) Schematic diagram of a full solid state MR model based on thermal switch^[30]; (b) operating principle^[23]; (c) variation of COP and SCP with different current^[23]; (d) variation of COP and SCP with the length of Peltier element^[23].

与外部换热器连接. 中间传热板由支撑框架和 Peltier 元件组成. MUR 板 A 和 B 的成对网格通过 Peltier 元件彼此交换热量. 模型工作原理如图 5(b) 所示: MCM 在位置 1 磁化并向 HHEX 释放热量;

然后, 从位置 2 旋转到位置 n 时, 通过回热冷却; 在位置 $n+1$ 退磁并从 CHEX 吸收热量; 最后, 从位置 $n+2$ 旋转到位置 $2n$ 时, 通过回热加热, 完成一个循环过程. 整个系统通过旋转方式实现连续制

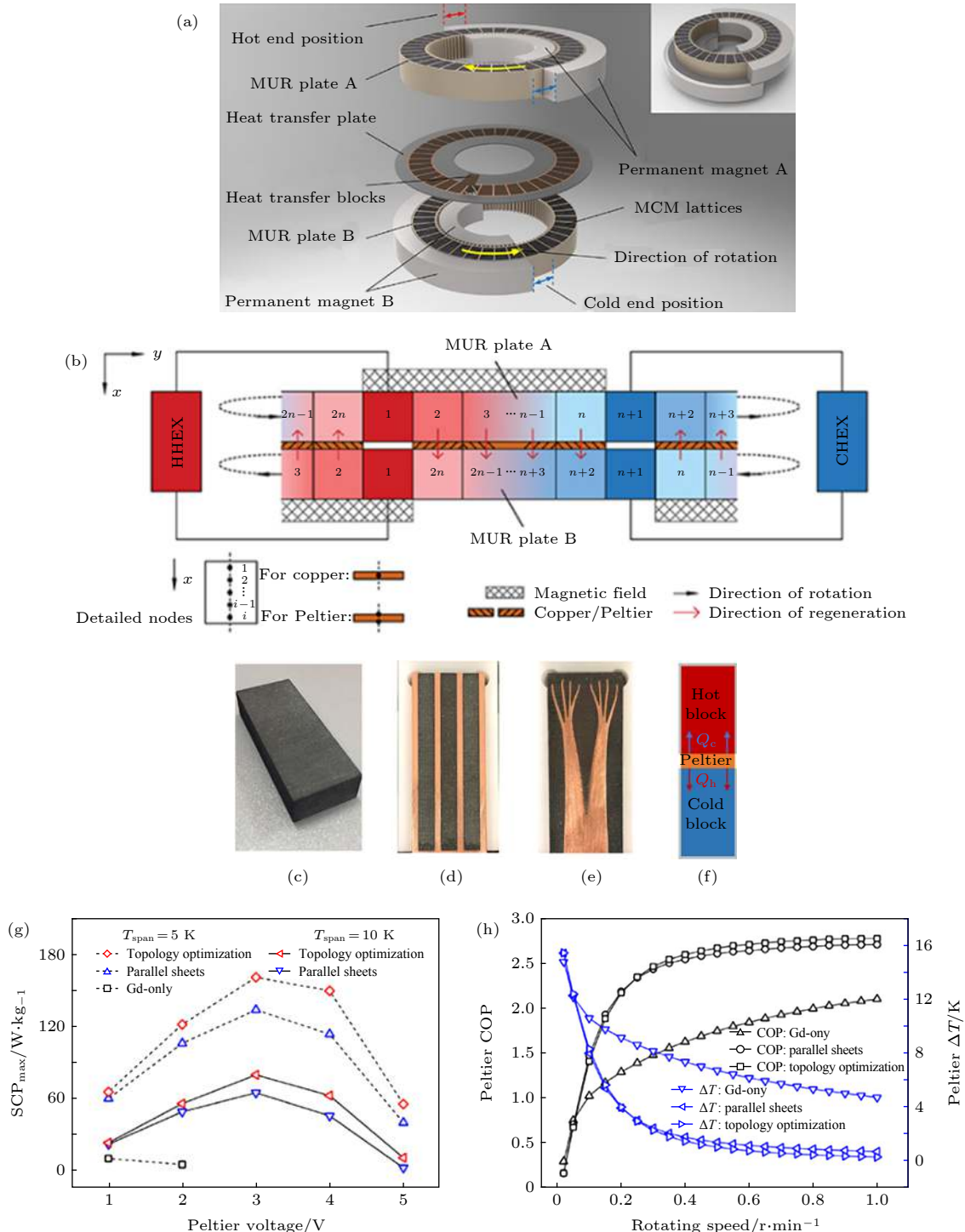


图 5 (a) 全固态 MR 系统示意图 [24]; (b) MUR 循环原理 [31]; (c) 仅 Gd [31]; (d) 平行板 [31]; (e) 拓扑优化结构 [31]; (f) 实验设置 [31]; (g) 最大 SCP 随 Peltier 电源电压的变化 [31]; (h) Peltier COP 和温差随转速的变化 [31]

Fig. 5. (a) Schematic diagram of the full solid state magnetic refrigeration system [24]; (b) MUR cycle principle [31]; (c) Gd-only [31]; (d) parallel sheets [31]; (e) topology optimization structure [31]; (f) experiment setup [31]; (g) variation of maximum SCP with different Peltier supply voltages [31]; (h) variation of Peltier COP and temperature difference with different rotating speeds [31].

冷输出. Lu 等^[31]研究了仅 Gd(仅 Gd 作为 MCM, 如图 5(c) 所示)、平行板 (Cu/Gd 平行板式复合, 如图 5(d) 所示) 和拓扑优化结构 (Cu 层为拓扑结构, 如图 5(e) 所示) 三种配置下的全固态模型的行为和性能, 同时, 为了验证模型的有效性, 通过实验研究了两成对网络回热期间的温变过程. 实验设置如图 5(f) 所示, 使用热电偶监测 Peltier 元件温度变化并通过电加热获得冷热块初始温差. 研究表明, 模拟结果和实验验证结果是一致的, 在平行板和拓扑结构配置下, 系统可以在更短的时间内达到温度平衡. 并且, 拓扑优化结构下和 Peltier 元件电压为 3 V 时系统获得最佳制冷性能. 在 5 K 温跨下最大 SCP 为 160.9 W/kg, 10 K 温跨下最大 SCP 为 79.8 W/kg (如图 5(g) 所示). 同样, 过低电压下 Peltier 元件传热能力不足和过高电压下焦耳热增大均会使制冷功率降低. 此外, 优化后的传热结构表现出更佳传热能力, 较大转速下 Peltier 元件冷热端仍可以快速的吸收和排出热量, 获得更大 Peltier COP 值和更小温差 (如图 5(h) 所示).

对于基于 Peltier 元件的全固态 MR 系统, 具有工作频率提升和 SCP 增大的优势, 但存在热泄漏和焦耳热等负面问题. 针对技术中存在的问题,

人们可以通过采用创新的设计和深入的优化等方式来改善或解决.

2.1.2 基于 k_H 元件的全固态 MR 模型

除基于 Peltier 元件的全固态制冷模型外, 基于 k_H 元件的全固态 MR 模型的研究也取得了一定突破. k_H 材料是指热导率随磁场变化的材料. 带电粒子可以在磁场中传输热量, 施加外磁场能够影响磁电阻进而影响热导率^[38]. 2012—2019 年, Silva 等^[32–35]对基于 k_H 元件的全固态 MR 模型进行了一系列的研究, 建立了一级 MCM 全固态 MR 模型和多层 MCM 级联全固态 MR 模型.

一级全固态 MR 系统模型及机制如图 6(a) 所示^[32]. 模型仍然基于热二极管/MCM 层/热二极管的三明治结构, 当无磁场时, $k_{1(0)} < k_{2(0)}$, 施加磁场时, $k'_{1(0)} = k_{1(0)} + \Delta k_1 > k'_{2(0)} = k_{2(0)} - \Delta k_2$. 制冷循环基于磁 Brayton 循环, 主要分为如下 4 个过程: 在绝热加磁过程 1 中, MCM 温度升高, 上端 k_H 元件热导率增大, 下端 k_H 元件热导率减小; 随后, 进入等场过程 2, MCM 中热量更容易流向高温热源; 在绝热退磁过程 3 中, MCM 温度降低, 两 k_H 元件热导率恢复初始状态; 随后, 进入等场过程 4, 热量

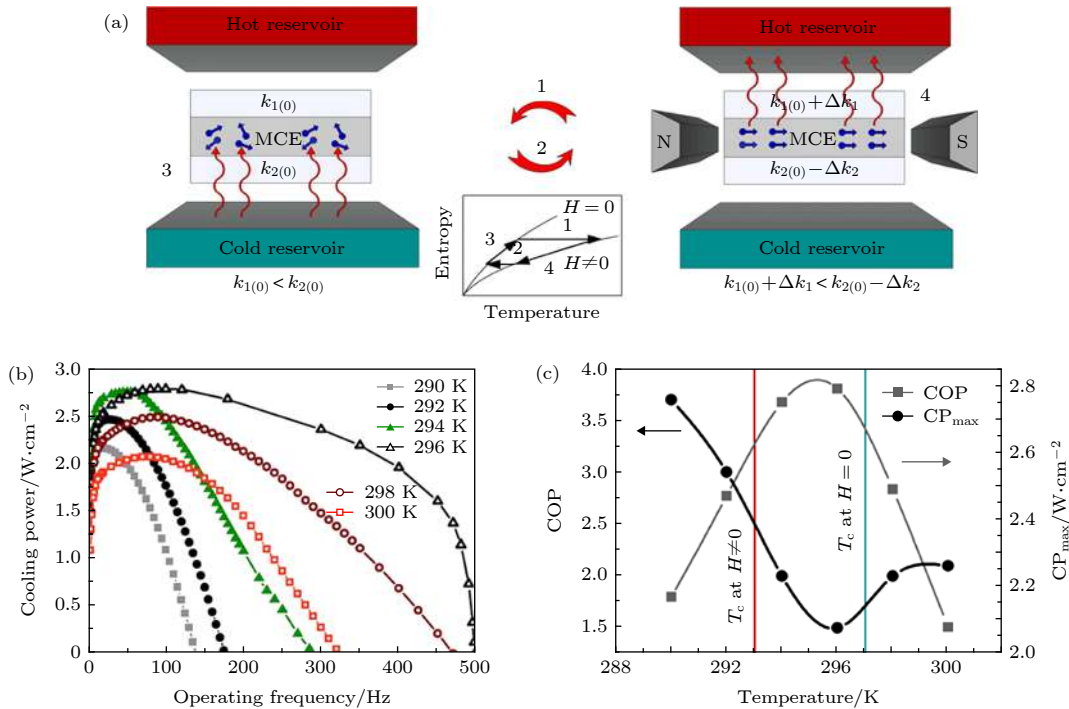


图 6 (a) 基于 k_H 元件和磁 Brayton 循环的全固态 MR 模型^[32]; (b) 不同工作温度下 SCP 随工作频率的变化^[32]; (c) 最大 SCP 和 COP 随温度的变化^[32]

Fig. 6. (a) A full solid state magnetic refrigeration model based on k_H element and magnetic Brayton cycle^[32]; (b) variation of SCP with operating frequency at different operating temperatures^[32]; (c) maximum SCP and COP as a function of temperature^[32].

更容易从低温热源流向 MCM. 作者在进行数值模拟时进一步假设: 无磁场时, $k_{1(0)} = 0$, $k_{2(0)} = 10.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 当施加 1 T 磁场时, $k_{1(0)} = 10.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $k_{2(0)} = 0$. 研究表明, 系统在约 95 Hz 的工作频率、296 K 的工作温度和 1 mm MCM 厚度下, 获得 $2.75 \text{ W}/\text{cm}^2$ 的最大 SCP 和 1.5 的 COP 值 (如图 6(b) 和图 6(c) 所示). 制冷功率密度随着工作频率先增加后减小, 存在着最佳工作频率和截止频率, 截止频率取决于施加磁场后与 MCM 居里温度有关的热扩散特征时间. 当工作温度接近 296 K 时, 对应着最小 COP 值和最大制冷功率密度, 两个参数不能同时获得最优值. 同时, 一级全固态系统获得了 2.5 K 温跨, 这不能满足实际需求.

为了实现上述一级系统的温跨最大化, 2014 年, Silva 等^[33] 进一步设计了级联系统模型, 中间为 n 个 MCM 元件级联堆叠. 系统温跨扩大机制如图 7(a) 所示: 首先, 在所有 MCM 元件中施加磁场, 此时热端 k_H 元件 k 值与 MCM 相同, 冷端 k_C 元件 k 为零, 热量从第一元件流向高温热源, 该元件温度降低, 与第二元件形成温度梯度使得热量从第二元件传递到第一元件; 然后, 从高温热源到最接近低温热源的元件逐渐去除磁场, 当第一元件去除磁场时, 冷热两端 k_H 元件 k 值为零, MCM 与热源热隔离. 在磁场去除过程中, 元件间形成温差, 建立从低温热源区域到高温热源区域的热流. 整个磁场移除时, 系统实现了最大的温跨. 级联系统的温跨在 MCM 元件为 24 时达到 11.5 K (如

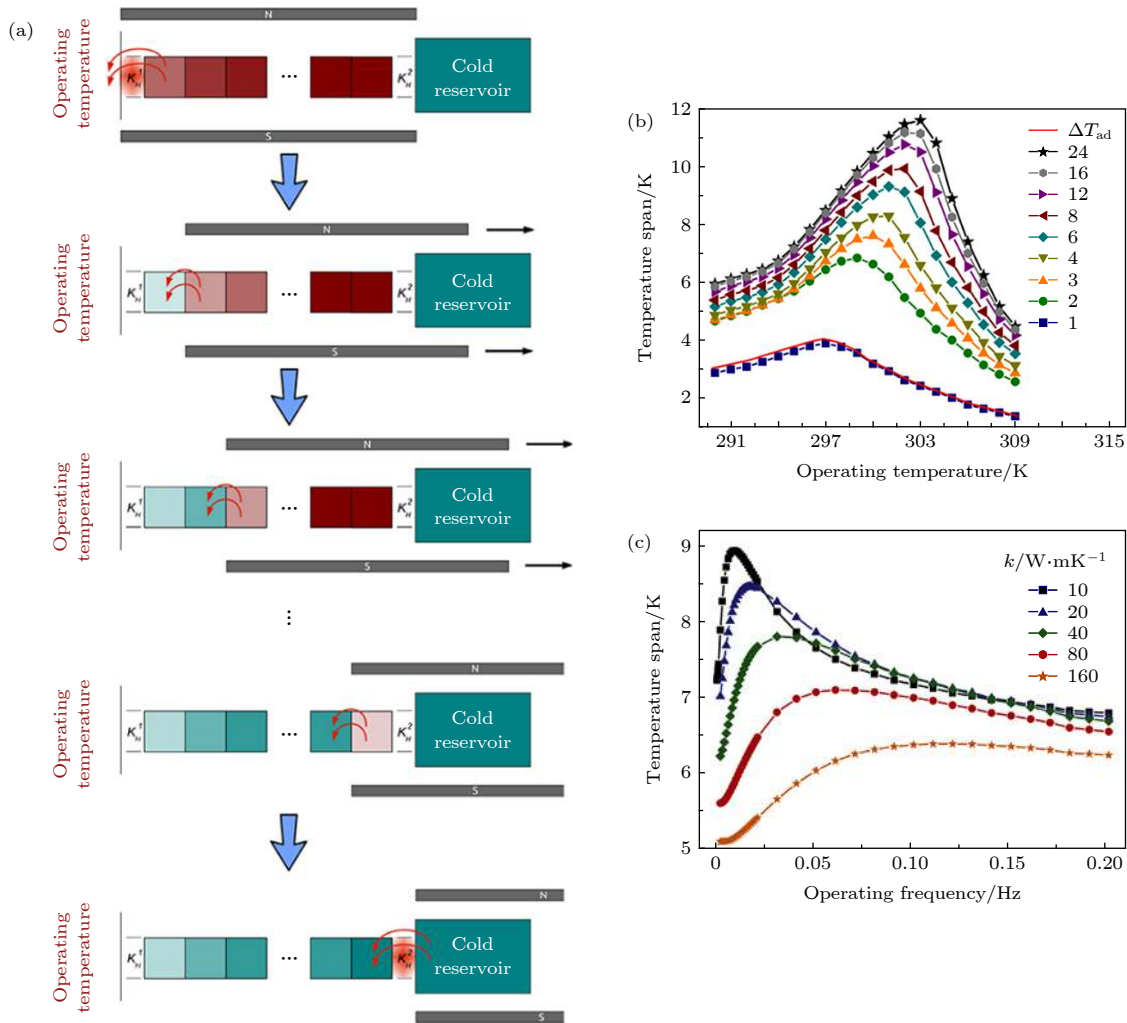


图 7 (a) 级联全固态 MR 系统的工作机制^[33]; (b) 不同 MCM 元件数量下温跨随工作温度的变化^[33]; (c) 不同热导率的 MCM 下温跨与工作频率的关系^[34]

Fig. 7. (a) Working mechanism of the cascaded full solid state magnetic refrigeration system^[33]; (b) variation of temperature span with operating temperature for different MCM components^[33]; (c) dependence of the temperature span on the operating frequency for different thermal conductivities of the MCM^[34].

图 7(b) 所示), 与一级全固态系统相比, 性能提升超过 450%. 2016 年, Silva 等 [34] 对级联模型进行了 MCM 物理性能 (热导率、密度、比热容等) 的优化. 结果表明, 热导率增加, 最佳工作频率增大, 同时, 温跨的提升将导致工作频率降低 (如图 7(c) 所示). 最佳工作频率会随 MCM 密度的增加而减小, 而最大温跨则会增大. 比热容的影响与密度相似. 此外, 他们指出 MCM 热扩散特征时间将是未来研究趋势中的主要参数之一. 2019 年, Silva 等 [35] 研究了磁场扫描方式及磁场在匀速、加速和减速条件下对温跨的影响, 以进一步寻求提高全固态 MR 机性能的最佳工作模式. 研究表明, 当磁场以单步方式施加, 或者从低温热源到高温热源以匀速或减速模式施加, 并由高温热源到低温热源加速模式移除时, 温跨相较之前可以提升达 20%.

在应用 k_H 元件的全固态 MR 系统的仿真结果中, SCP, COP 和温跨都有一定的提升, 显示出巨大的应用潜力. 然而, 关于 k_H 材料的研究较少, 如锰酸盐化合物 [39]、巨磁热导率的 Co/Cu 磁性薄膜 [40,41] 等, 满足模型工作机制的实际 k_H 材料可能会难以获得. 未来应深入研究和开发高性能 k_H 材料并设计适用性更广的实际可行的 k_H 元件, 进一步评估此类全固态 MR 系统的性能和可行性.

2.2 基于 HTCM 元件的全固态 MR 模型

HTCM 元件是基于高热导率材料所设计的一类固态换热介质, 通过与 MCM 接触和非接触实现热量传递的开关动作, 在全固态 MR 模型中多使用 Cu 作为 HTCM. 除替代传热流体外, HTCM 也可与 MCM 进行宏观复合设计成有效 MCM 以增强 MCM 传热能力, 这在前文所介绍的 Lu 等 [31] 的工作中已有体现. 目前, 基于 HTCM 元件的全固态模型的相关研究较少. 2016 年, Zhang 等 [36] 提出了使用 HTCM 移动杆/片代替传热流体以增强制冷能力的全固态 MR 概念模型. 数值敏感分析研究了该全固态 MR 模型效率的影响因素. 结果表明, HTCM 移动杆/片的引入提高了传热速率, 模型在高频下具有较好的性能表现. 2018 年, Wu 等 [24] 对该概念进行了拓展, 设计了更为详细的基于 HTCM 元件的全固态 MR 模型 (如图 5(a) 所示). 其中 Cu 块作为中间传热板, 工作原理与基于 Peltier 元件的模型相似 (如图 5(b) 所示), 回热主要基于 Cu 块的热传导. 研究表明, 系统在

36 或 72 网格数和 Gd/Cu 体积分数比为 0.7 时表现出较佳性能. 当系统网格数为 72 时获得了 50.9 K 的最大空载温跨 (如图 8(a) 所示) 和 105.8 W/kg 的最大 SCP (如图 8(b) 所示). 同时, 在 36 网格下获得 3.2 的最大 COP (如图 8(c) 所示), 而当网格数增加到 72 时, 最大 COP 可达 4.2. 级联网格数的增加可以增强有效回热效率, 从而提升系统性能. Gd/Cu 体积分数比则需要达到最适的比例参数, 过大 Gd 体积分数可以增加 Gd 质量, 但会降

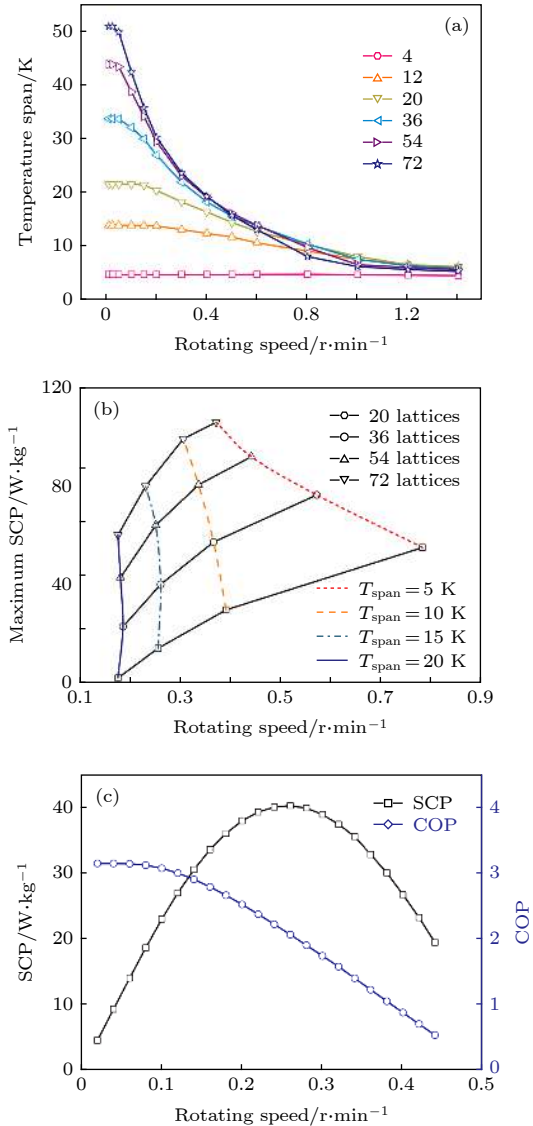


图 8 (a) 不同网格数下温跨与转速的关系 [24]; (b) 不同温跨网格数下最大 SCP 与转速的关系 [24]; (c) 32 网格下最大 SCP 和 COP 与转速的关系 [24]

Fig. 8. (a) Variation of temperature span with rotating speed at different lattice numbers [24]; (b) variation of maximum SCP with rotating speed at different temperature spans and lattice numbers [24]; (c) variation of maximum SCP and COP with different rotating speeds at 32 lattices [24].

低热传导效应. 另外, 温跨、SCP 和 COP 也对应着不同的最佳转速, 大转速下热传导时间不足而导致温跨减小. 这同基于热二极管的全固态 MR 模型的 [33] 研究工作一致, 各性能参数很难达到一致, 人们需要进一步寻找参数的优化组合.

Lu 等 [31] 研究了不同传热结构优化方式对基于 Cu 块的全固态 MR 系统行为和性能的影响, 并比较了 Cu 块回热模式下和 Peltier 元件回热模式下的制冷性能 (如表 1 所列). 在仅使用铜块回热时, 拓扑优化结构下获得的最大 SCP 相较平行板和仅 Gd 配置下分别平均增加 32% 和 391%. 与仅使用铜块回热相比, 添加 Peltier 元件快速回热时, 最大 SCP 增加 82%—149%. 最近, Utaka 等 [37] 设计了一种使用高导热涂层作为固态换热介质的级联全固态 MR. 他们发现, 磁卡单元的尺寸对系统最适工作频率有重要影响, 并且, 适当增加单元的数量可以有效地提高系统整体性能. 可以看出, HTCM 元件和 Peltier 热电元件在全固态 MR 中均具有良好的应用潜力, 其中, Peltier 元件显示更大优势. 同时, 传热结构的优化在全固态 MR 系统的未来研究中也扮演着重要角色.

表 1 3 V 电压下, 带有铜块的 MR 和带有 Peltier 元件的 MR 的最大 SCP 比较 [31]

Table 1. Maximum SCP comparison between MR with copper blocks and MR with Peltier elements under a 3 V supply voltage [31].

配置	温跨/K	最大 SCP/W·kg ⁻¹		增加百分比/%
		铜块	Peltier 元件	
平行板	5	67.6	133.8	98
	10	26.1	64.9	149
拓扑优化结构	5	88.5	160.9	82
	10	35.7	79.8	124

3 全固态 MR 模型与传统 AMR 模型的总结

全固态 MR 系统工作频率更高, SCP 更大, 设计更为紧凑, 并可以排除使用流体传热时带来的缺陷, 在微型制冷机上也有着潜在应用. 我们总结和对比分析了全固态 MR 模型与传统 AMR 模型的主要性能和材料配置, 结果见表 2 [21,23,24,27,28,30—33,42—52]. 虽然系统模拟或实验设定的具体条件存在差异, 很

难给出统一的评价标准, 但仍可以看出, 与传统 AMR 相比较, 全固态 MR 表现出更佳的综合性能.

由表 2 可以发现, 全固态 MR 系统工作频率可达 100 Hz 以上 [21,30,32], 而传统 AMR 工作频率最高在 10 Hz 左右 [45,49]. 我们知道, 由于传统 AMR 的对流传热限制, 提高工作频率将会降低系统效率. 采用热二极管或 HTCM 元件代替流体时, 频率将主要取决于热二极管或 HTCM 元件的固态传热机制. 相较于流体对流传热, 固态热传输速率更快. 理论上, 随着工作频率增加, 全固态 MR 系统的 SCP 可以提升到 10000 W/kg 以上 [21,27], 而传统 AMR 的 SCP 最高则在 100 W/kg 左右 [49], 这揭示了 MR 器件中运用固态传热机制可以将功率密度提升一个或多个数量级. 同时, SCP 对应着一个最佳工作频率, 工作频率不是越大越好, 而是受热传导控制, 取决于热二极管或 HTCM 元件从 MCM 提取热量的能力及 MCM 本身传热能力. 此外, 温跨和 COP 是评价制冷机性能的两大重要指标. 全固态 MR 模型的温跨可以超过 50 K [24,30], COP 最高可达 9 以上 [23], 传统 AMR 温跨可以超过 30 K [51], COP 则可以达到 12 以上 [44]. 温跨主要取决于 MCM 绝热温变, AMR 和全固态 MR 系统的温跨均可以通过提高磁场强度和优化设计等方面来提升. 单一考虑 COP 值时, 全固态 MR 系统并没有表现出理想的结果. 由于固态传热机制的局限性, 在过高频率下仍然会遇到与流体传热相似的问题, 全固态 MR 机仍然无法同时达到高工作频率、高 SCP、高温跨和高 COP. 综合考虑各性能参数时, 需要折中方案. 然而, 基于固态传热机制的全固态 MR 技术的研究还处于初步阶段, 报道的模型数量有限, 系统性能仍具有较大提升潜力, 因此应大力发展全固态 MR 技术以实现高效磁热能转换的新突破.

如表 2 所列, MR 机采用的磁工质主要是 Gd, 其具有良好的绝热温变和可制备性. 进一步研究发现, 具有巨磁卡效应的材料如 Gd₅(Si_xGe_{1-x})₄ 基化合物 [53,54]、La(Fe_{1-x}Si_x)₁₃ 基化合物 [55—57]、MnFeP_{1-x}As_x 基化合物 [51,58] 等也十分重要, 有望大幅度提升制冷机性能. 我们知道, MR 材料在直接进入实际应用之前必须在较宽温度范围内具有足够大的磁卡效应, 巨磁卡材料的出现为 MR 机的设计拓宽了方向. 同时, La(Fe_{1-x}Si_x)₁₃ 基化合物表现出较小的滞后效应、较佳的综合性能和合理的成本 [57,59], 具有较大的应用前景.

表 2 全固态 MR 模型与传统 AMR 模型的主要性能比较
Table 2. Comparison of main performances between full solid state MR model and traditional AMR model.

类型	磁工质	传热介质	工作频率/Hz	温跨/K	SCP/W·kg ⁻¹	COP	参考文献	
全固态MR	准2D全固态MR	Gd	Peltier元件	0—225	5—15	1 × 10 ⁴	—	[21]
	全固态MR	Gd	Peltier元件	10	50	1.5 × 10 ⁴	2.8	[27]
	2D全固态MR	Gd	Peltier元件	20	—	—	5.3—6.5	[28]
	全固态MR	Gd	Peltier元件	20—200	60	—	4.0	[30]
	1D全固态MR	Gd	Peltier元件	—	5	—	0.96—9.21	[23]
	准2D全固态MR	Gd	Peltier元件	—	10	79.8	—	[31]
	1D全固态MR	Gd	k_H 元件	0—500	2.5	—	1.5	[32]
	1D全固态MR	Gd	k_H 元件	—	11.5	—	4.0	[33]
	准2D全固态MR	Gd	Cu块	—	5—50.9	2.6—105.8	1.5—4.2	[24]
	传统AMR	1D AMR	Gd	水	—	15	—	1.49—5.27
2D AMR		Gd	水	—	3	—	5.4	[43]
1D AMR		Gd	水	0.125	6	—	12.16	[44]
AMR/旋转床		Gd	水+乙二醇	0-10	<18.9	—	—	[45]
2D AMR		Gd	水+乙二醇	0.75	10.2	60.59	3.1	[46]
2D AMR		Gd	水	1.5	14.5	—	~2	[47]
AMR/旋转床		Gd	水+乙二醇	0.8	7.1	—	0.54	[48]
1D AMR		Gd	水+乙二醇	0.3—10	20	100	7.6—11.2	[49]
2D AMR		Gd ₅ (Si _x Ge _{1-x}) ₄	水	1.25	~10—16	—	~5	[50]
AMR/平行板床		MnFeP _{1-x} As _x	水+乙二醇	0.8	32	—	—	[51]
1D AMR	LaFeSiMnHy	水+乙二醇	0.15	19.8	12.4	—	[52]	

表 2 也列出了两类固态传热器件: 热二极管和 HTCM 元件. 其中, Peltier 热电元件研究较为广泛, 具有更大的应用潜力. 然而, 若使 Peltier 元件高效运用在系统中, 需要优化的电阻、热阻、电流和几何设计等. 因此, 在热电/磁卡器件复合全固态 MR 模型开发过程中, 先进热电材料的开发、高效 Peltier 元件的设计和 Peltier 元件在制冷系统内的参数匹配至关重要. 最近, 武汉理工大学热电磁研究团队 [60] 通过单畴软磁金属纳米粒子 (Fe, Co, Ni) 与热电材料 (Ba_{0.3}In_{0.3}Co₄Sb₁₂) 纳米复合, 发现了电子多重散射效应与热电磁多功能新材料. 利用单畴软磁金属纳米粒子超顺磁性产生的热-电-磁新效应, 可以协同调控电子/声子输运, 大幅度提高塞贝克系数等热电性能. 这为 Peltier 元件的设计和热电磁全固态制冷模型架构设计提供了新思路. 可以利用高性能热电磁材料设计新型高效 Peltier 元件, 以进一步提升系统综合性能. 同时, 基于热-电-磁新效应的发现, 可以考虑将 MCM 以复合的方式引入的热电材料中, 从材料复合方面出发设计新的模型, 以期实现热电-磁卡协同制冷, 而不仅仅限于器件复合. 相对于 Peltier 元件, k_H 元

件的实用性有待进一步开发, 目前诸如 Co/Cu 薄膜的一些实际 k_H 元件只能应用在一些小型制冷器件中. 此外, 热二极管也可以应用于电卡、压卡、弹卡和多卡制冷系统中, 其中电卡制冷中电场易于获取和调控, 其系统结构更为简单, k_H 元件可以更易应用在电卡制冷技术中, 不过与 MR 相比, 后者的效率则更高 [61—63]. 李海波等 [61] 设计了一种简单可行的全固态电卡制冷系统, 研究发现固态热二极管的引入可以有效提高系统工作频率和制冷功率. 然而, 制备出满足实际需求 k_H 材料和 k_H 元件具有一定的挑战性. 若想获得相关突破, 需要深入研究和理解 k_H 材料的结构和机制. 除热二极管外, HTCM 元件也是替代传热流体的一种不错的选择. HTCM 与 MCM 的叠层组合设计可以增强 MCM 的有效热导率, 从而提高系统整体传热能力, 使得 MCM 的运用不再仅限于薄层结构. 不过, HTCM 元件在传热增强和快速热传输集成方面不如 Peltier 元件 [24,31]. 最近, Qiao 等 [64] 进一步研究发现, 利用电卡材料基片的应变记忆效应和 HTCM 元件的高效换热可以大幅提升薄膜 MR 器件的制冷性能. 可以看出, 固态换热元件是解决 MR 技术

难点的有效方案之一,同时,未来 MR 将不会局限于单一制冷,热电-磁卡、电卡-磁卡等全固态复合制冷技术也将会是研究的主要方向之一。

4 展 望

全固态 MR 能够克服传统 AMR 利用流体对流换热导致的工作频率低、回热损失大和子系统设计复杂等问题,结构更为紧凑和简单,并在高频下具有较好的性能表现,显示出巨大的应用潜力。目前,新型固态传热机制的引入与匹配组合,全固态 MR 模型设计、数值模拟及实验验证和优化等是全固态 MR 技术研究的重点。其中,基于热二极管的全固态 MR 技术是研究的热点。对处于探索初期的全固态 MR 技术,存在如下问题: Peltier 元件热泄漏与焦耳热, k_H 材料及其元件研究的有限性,全固态 MR 系统高效设计及参数的最优匹配,目前模型设计数量的有限性等。直至目前,还没有出现完整性的全固态 MR 样机及突破性的实验验证。因此,全固态 MR 技术仍需要深入的研究以获得更大的进展。考虑现有技术存在的问题与发展趋势,本文认为可在以下方面进行进一步研究。

1) 高效 Peltier 元件的优化设计。研究 Peltier 元件绝缘导热、通电导热、热界面和热疲劳等问题,建立电-热多效应 (Peltier 效应、塞贝克效应、傅里叶效应、焦耳热效应等) 耦合数值模型,对 Peltier 元件多个结构和工艺参数同时进行分析和优化,寻求最优设计参数以匹配全固态系统的高效运行。同时,研究磁性材料对热电材料性能的影响,基于新材料设计新型 Peltier 元件,并测定其服役性能。

2) 高性能 k_H 材料研究及其元件设计。深入研究和理解 k_H 材料的结构和热导率-磁场依变性的物理机制,建立基于 k_H 材料的热磁输运机制数学模型。开发性能稳定、适用性广的 k_H 材料并设计高效 k_H 元件,测定元件实际性能参数并运用到全固态 MR 系统中,建立仿真模型和实验以进一步评估其可行性。

3) 高性能 HTCM 的选择及其元件设计。运用不同的 HTCM 进行数值比较分析,寻求不同工况下的最适 HTCM。同时,设计 HTCM 与热二极管及 MCM 的高效组合结构,进一步优化传热效率,提升系统综合性能。

4) 全新的模型架构设计。不同于器件复合,从

材料复合方面出发,研制性能稳定的新型多功能热电/磁卡复合材料,基于新材料和新功能设计全新的热电磁全固态复合制冷模型架构,热电材料同时充当换热材料和制冷材料,实现热电-磁卡协同制冷。

5) 高效全固态 MR 系统及样机的设计和优化。开发创新的全固态 MR 系统模型,辅以经典制冷循环或设计潜在制冷循环,实现全固态制冷系统的高效运行和热能转换。建立不同维度的数值仿真模型对全固态 MR 系统进行更为全面的评估和更为深入的参数优化,并设计器件进行实验验证。同时,研制全固态 MR 样机,进行更为全面的实验验证,测试其可靠性和稳定性,推动全固态 MR 技术的进一步发展。

参考文献

- [1] Franco V, Blázquez J S, Ipus J J, Law J Y, Moreno-Ramirez L M, Conde A 2018 *Prog. Mater. Sci.* **93** 112
- [2] Osmann S, Mohamed B 2014 *Int. J. Refrig.* **37** 8
- [3] Warburg E 1881 *Ann. Phys.* **13** 141
- [4] Giauque W F, MacDougall D P 1935 *J. Am. Chem. Soc.* **57** 1175
- [5] Brown G V 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 3673
- [6] Steyert W A 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 1216
- [7] Barclay J A 1982 *J. Appl. Phys.* **53** 2887
- [8] Barclay J A, Steyert W A 1982 *U. S. Patent* 4 332 135 [1982-06-01]
- [9] Chen F C, Murphy R W, Mei V C 1992 *J. Eng. Gas. Turb. Powe.* **114** 715
- [10] Zimm C, Jastrab A, Sternberg A, Pecharsky V, Gschneidner Jr K, Osborne M, Anderson I 1998 *Adv. Cryog. Eng.* **43** 1759
- [11] Lawton Jr M L, Zimm C B, Jastrab A G 1999 *U. S. Patent* 5 934 078 [1999-08-10]
- [12] Yu B F, Gao Q, Zhang B, Meng X Z, Chen Z 2003 *Int. J. Refrig.* **26** 622
- [13] Gschneidner K A J, Pecharsky V K 2008 *Int. J. Refrig.* **31** 945
- [14] Yu B F, Liu W, Egolf P W, Kitanovski A 2010 *Int. J. Refrig.* **33** 1029
- [15] Gomez J R, Garcia R F, Carril J C, Gomez M R 2013 *Renew. Sust. Energy. Rev.* **17** 74
- [16] Jacobs S, Auringer J, Boeder A, Chell J, Komorowski L, Leonard J, Russek S, Zimm C 2014 *Int. J. Refrig.* **37** 84
- [17] Li Z X, Li K, Shen J, Dai W, Jia J C, Guo X H, Gao X Q, Gong M Q 2017 *Cryogenics* **1** 13 (in Chinese) [李振兴, 李珂, 沈俊, 戴巍, 贾际琛, 郭小惠, 高新强, 公茂琼 2017 *低温工程* **1** 13]
- [18] Teyber R, Holladay J, Meinhardt K, Polikarpov E, Thomsen E, Cuid J, Rowee A, Barclay J 2019 *Appl. Energy.* **236** 426
- [19] Kitanovski A, Egolf P W 2010 *Int. J. Refrig.* **33** 449
- [20] Aliev A M, Batdalov A B, Khanov L N, Koledov V V, Shavrov V G, Tereshina I S, Taskaev S V 2016 *J. Alloy. Compd.* **676** 601
- [21] Tomc U, Tušek J, Kitanovski A, Poredoš A 2013 *Appl.*

- Therm. Eng.* **58** 1
- [22] Kitanovski A, Plaznik U, Tomc U, Poredoš A 2015 *Int. J. Refrig.* **57** 288
- [23] Monfared B 2017 *Int. J. Refrig.* **74** 324
- [24] Wu J H, Lu B W, Liu C P, He J 2018 *Appl. Therm. Eng.* **137** 836
- [25] Kitanovski A, Tušek J, Tomc U, Plaznik U, Ožbolt M, Poredoš A 2015 *Magnetocaloric Energy Conversion* (vol. preface) (Switzerland: Springer International Publishing Switzerland) p viii
- [26] Tomc U, Tušek J, Kitanovski A, Poredoš A 2014 *Int. J. Refrig.* **37** 185
- [27] Egolf P W, Gravier L, Francfort T, Pawlowski A G, Courret G, Croci M 2014 *Int. J. Refrig.* **37** 176
- [28] de Vries W, van der Meer T H 2017 *Appl. Therm. Eng.* **111** 377
- [29] Tasaki Y, Takahashi H, Yasuda Y, Okamura T, Ito K 2012 *Fifth IIF-IR International Conference on Magnetic Refrigeration at Room Temperature*, Thermag V Grenoble, France, September 17–20, 2012 p445
- [30] Olsen U L, Bahl C R H, Engelbrecht K, Nielsen K K, Tasaki Y, Takahashi H 2014 *Int. J. Refrig.* **37** 194
- [31] Lu B W, Wu J H, He J, Huang J H 2019 *Int. J. Refrig.* **98** 42
- [32] Silva D J, Bordalo B D, Pereira A M, Ventura J, Araújo J P 2012 *Appl. Ener.* **93** 570
- [33] Silva D J, Ventura J, Araújo J P, Pereira A M 2014 *Appl. Ener.* **113** 1149
- [34] Silva D J, Bordalo B D, Pereira A M, Ventura J, Oliveira J C R E, Araújo J P 2016 *Appl. Therm. Eng.* **99** 514
- [35] Silva D J, Ventura J, Amaral J S, Amaral V S 2019 *Int. J. Energy. Res.* **43** 742
- [36] Zhang M, Momen A M, Abdelaziz O 2016 *16th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue West Lafayette, US, July 11-14 2016* p1758
- [37] Utaka Y, Hua K, Chen Z H, Zhao Y J 2019 *Appl. Therm. Eng.* **155** 196
- [38] Wehmeyer G, Yabuki T, Monachon C, Wu J Q, Dames C 2017 *Appl. Phys. Rev.* **4** 041304
- [39] Salamon M B, Jaime M 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 583
- [40] Jeong T, Moneck M T, Zhu J G 2012 *IEEE Trans. Magn.* **48** 3031
- [41] Kimling J, Nielsch K, Rott K, Reiss G 2013 *Phys. Rev. B* **87** 134406
- [42] Aprea C, Maiorino A 2010 *Appl. Ener.* **87** 2690
- [43] Liu M, Yu B F 2011 *Int. J. Refrig.* **34** 617
- [44] Vuarnoz A, Kawanami T 2012 *Appl. Therm. Eng.* **37** 388
- [45] Lozano J A, Engelbrecht K, Bahl C R H, Nielsen K K, Barbosa J R, Prata A T, Pryds N 2014 *Int. J. Refrig.* **37** 92
- [46] Eriksen D, Engelbrecht K, Bahl C R H 2015 *Int. J. Refrig.* **58** 14
- [47] Lionte S, Vasile C, Siroux M 2015 *Appl. Therm. Eng.* **75** 871
- [48] Lozano J A, Capovilla M S, Trevizoli P V, Engelbrecht K, Bahl C R H, Barbosa J R 2016 *Int. J. Refrig.* **68** 187
- [49] Lei T, Engelbrecht K, Nielsen K K, Christian T, Veje C T 2017 *Appl. Therm. Eng.* **111** 1232
- [50] Aprea C, Greco A, Maiorino A, Masselli C 2015 *Appl. Therm. Eng.* **91** 767
- [51] Govindappa P, Trevizoli P V, Campbel O, Niknia, I, Christiaanse T V, Teyber R, Misra S, Schwind M A, van Asten D, Zhang L 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 315001
- [52] Navickaite K, Bez H N, Lei T, Barcza A, Vieyra H, Bahl C, Engelbrecht K 2018 *Int. J. Refrig.* **86** 322
- [53] Pecharsky V K, Gschneidner J K A 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 4494
- [54] de Oliveira N A, von Ranke P J 2010 *Phys. Rep.* **489** 89
- [55] Shen B G, Sun J R, Hu F X, Zhang H W, Cheng Z H 2009 *Adv. Mater.* **21** 4545
- [56] Tusek J, Kitanovski A, Tomc U, Favero C, Poredoš A 2014 *Int. J. Refrig.* **37** 117
- [57] Wang Y X, Zhang H, Liu E K, Zhong X C, Tao K, Wu M L, Xing C F, Xiao Y N, Liu J, Long Y 2018 *Adv. Electron. Mater.* **4** 1700636
- [58] Balli M, Jandl S, Fournier P, Kedous-Lebouc A 2017 *Appl. Phys. Rev.* **4** 021305
- [59] Smith A, Bahl C R H, Bjørk R, Engelbrecht K, Nielsen K K, Pryds N 2012 *Adv. Energy. Mater.* **2** 1288
- [60] Zhao W Y, Liu Z Y, Sun Z G, Zhang Q J, Wei P, Mu X, Zhou H Y, Li C C, Ma S F, He D Q, Ji P X, Zhu W T, Nie X L, Su X L, Tang X F, Shen B G, Dong X L, Yang J H, Liu Y, Shi J 2017 *Nature* **549** 247
- [61] Li H B, Jiang Q, Xu X D, Lu D W 2016 *Cryogenics* **5** 51 (in Chinese) [李海波, 姜倩, 徐小农, 卢定伟 2016 *低温工程* **5** 51]
- [62] Blumenthal P, Raatz A 2016 *Europhys. Lett.* **115** 17004
- [63] Hess T, Maier L M, Corhan P, Schäfer-Welsen O, Wöllenstein J, Bartholomé K 2019 *Int. J. Refrig.* **103** 215
- [64] Qiao K M, Hu F X, Liu Y, Li J, Kuang H, Zhang H R, Liang W H, Wang J, Sun J R, Shen B G 2019 *Nano Energy* **59** 285

REVIEW

Research progress of physical model of full-solid-state magnetic refrigeration system*

Liu Guo-Qiang¹⁾ Ke Ya-Jiao²⁾ Zhang Kong-Bin¹⁾ He Xiong¹⁾
Luo Feng¹⁾ He Bin¹⁾ Sun Zhi-Gang^{1)†}

1) (*State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

2) (*College of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China*)

(Received 25 July 2019; revised manuscript received 26 August 2019)

Abstract

Magnetic refrigeration is a kind of energy-saving, environment-friendly and intrinsically-high-efficient refrigeration technology, which has a wide application prospect. At present, the magnetic refrigeration systems based on active magnetic regenerator cycle have been widely studied and many prototypes of refrigerators have been developed. However, fluids and gases are mainly applied to heat exchange in these systems, which brings some problems such as low operating frequency, large regenerative loss, and complicated sub-component design. These problems increase the cost and reduce the efficiency of magnetic refrigerators. In view of the above problems and challenges, researchers try to introduce the solid-state heat transfer enhancement mechanism, and to design and optimize the full-solid-state magnetic refrigeration system model. In this paper, the development process of magnetic refrigeration technology at room temperature is briefly introduced at first. And the reasons for the low operating frequency and efficiency of the magnetic refrigerator, caused by using fluids for heat exchange, are analyzed. Then, two types of solid-state heat exchange media are briefly described, which are thermal diodes (i.e., electric-field-controlled thermal diode and magnetic-field-controlled thermal diode) and high thermal-conductivity material elements. In this paper we review the research progress of the full-solid-state magnetic refrigeration model based on thermal diodes and high thermal-conductivity material elements. Some key items for these models are described in detail, such as the architectural design concept, physical mechanism and working principle, the main performance simulation results of these systems and their physical change rules. Then, the main performances (i.e. operating frequency, specific cooling power, temperature span, and coefficient of performance) of the full-solid-state magnetic refrigeration model and the AMR model are summarized and comparatively analyzed. It shows that the full-solid-state magnetic refrigeration system can work at high frequency and has greater specific-cooling-power. Meanwhile the design of full-solid-state magnetic refrigeration system is more compact and simpler. The characteristics and problems of the two types of solid heat exchange media are also analyzed. Due to the strong thermal transport capability, easy access and integration of thermoelectric elements, the full-solid-state magnetic refrigeration technology based on thermoelectric thermal diodes has greater application potential. Finally, the main research directions and key scientific problems for further studying the full-solid-state magnetic refrigeration field are discussed and analyzed.

Keywords: full solid state magnetic refrigeration, physical model, thermal diode, high thermal conductivity material element

PACS: 75.30.Sg, 72.20.Pa, 07.20.Mc, 85.80.Fi

DOI: 10.7498/aps.68.20191139

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11834012, 11574243, 11174231).

† Corresponding author. E-mail: sun_zg@whut.edu.cn