

文章编号:0253-4339(2026)03-0125-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250329001

基于数值分析的复叠式主动磁回热器制热性能研究

余浩贤 苑晓亮 巫江虹

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510641)

摘 要 为打破室温磁制冷与磁热泵系统在室温附近的应用瓶颈,建立了复叠式主动磁回热器一维数值模型,从制热性能的角度研究其关键影响参数。仿真结果表明:换热流体流量越大,热端温度越快达到稳态,且无负荷温跨随流量先增大后减小,制热量随流量的增大而增大。此外,缩短加退磁和流动时间可显著提升制热量及无负荷温跨,在 1-1-1 s 运行时序下,制热量及无负荷温跨最高分别可达 55.2 W 和 29.9 K。当 LaFeSiH 居里温度间隔增大时,无负荷温跨先增大后减小,最大值在居里温度间隔为 6 K 时取得,为 40.2 K。在 4 种填充长度比中,制热性能最优比为 2:2:2:7,其最大无负荷温跨为 31.2 K,最大制热量可达 64 W。

关键词 磁热泵;复叠式主动磁回热器;数值模型;制热性能

中图分类号: TB61⁺1;TB657.5

文献标识码: A

Study on the Heating Performance of a Cascade Active Magnetic Regenerator Based on Numerical Simulations

Yu Haoxian Yuan Xiaoliang Wu Jianghong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510641, China)

Abstract To address the limitations of magnetic refrigeration and magnetic heat pump systems near room temperature, this study establishes a one-dimensional numerical model of a cascade active magnetic regenerator and examines the key parameters influencing heating performance. The simulation results indicate that a higher flow rate of the heat transfer fluid accelerates the attainment of a steady-state temperature at the hot end. Furthermore, as the flow rate increases, the no-load temperature span initially increases and then decreases, while the heating capacity increases. Reducing the (de)magnetization time and flow time can significantly enhance both the heating capacity and no-load temperature span, achieving values of up to 55.2 W and 29.9 K, respectively, under a 1-1-1 s operating sequence. When the Curie temperature interval of LaFeSiH increases, the no-load temperature span first increases and then decreases, reaching a maximum of 40.2 K at a Curie temperature interval of 6 K. Among the four filling length ratios, the optimal heating performance is achieved at a ratio of 2:2:2:7, resulting in a maximum no-load temperature span of 31.2 K and a maximum heating capacity of 64 W.

Keywords magnetic heat pump; cascade active magnetic regenerator; numerical model; heating performance

热泵技术作为节能技术的代表,发展潜力巨大^[1-2]。但随着 HFCs(氢氟碳化合物,hydrofluorocarbons)类制冷剂的削减与淘汰,气候友好的制冷/热泵技术越来越受重视^[3]。作为一种新型绿色制冷/热泵技术,室温磁制冷/磁热泵技术被认为是应对 HFCs 类制冷剂淘汰的重要方向和技术路线选择之一^[4-6]。其通常基于 MCM(磁热材料, magnetocaloric materials)所表现出的 MCE(磁热效应, magnetocaloric effect)运行。目前,在室温范围内表现出良好性能且制备工艺较成熟的 MCM 主要包括 Gd 及其二元合金、LaFeSi

合金和 MnFePSi 合金;其中,LaFeSi 合金和 MnFePSi 合金可以通过添加特定的元素、调整元素含量来调整居里温度,目前已知居里温度最高可达 402 K,这为磁热泵的应用奠定了重要基础^[7-10]。然而,绝大部分 MCM 的绝热温变(ΔT_{ad})通常较小,难以直接应用,因此常采用 AMR(主动磁回热器, active magnetic regenerator)技术来扩大温跨。目前已经建造了超过 70 台室温磁制冷样机,但大部分均采用并联运行,系统的温跨较为有限^[11-13];复叠式与串联式的磁制冷机虽有研究^[14-15],但由于磁场较小、系统匹配不当等因

基金项目:国家自然科学基金(52276008)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52276008).)

收稿日期:2025-03-29;修回日期:2025-04-27;录用日期:2025-05-13

素,其温跨均在10 K以下,AMR复叠的理论及实现形式仍需深入研究。在制热应用的室温磁热泵方面,目前仅有以丹麦技术大学为代表的磁热泵样机^[16-17],但样机的设计工作温度仍为室温(20℃)以下,目前对室温以上样机制热性能的研究仍处于空白阶段。

为打破室温磁制冷与磁热泵系统在室温附近的应用瓶颈,本文建立了复叠式AMR的数值模型,从制热性能的角度研究复叠式AMR在室温以上温区的应用潜力,以及影响其制热性能的关键参数,对拓宽磁制冷及磁热泵的应用范围具有重要意义。

1 复叠式主动磁回热器数值模型

1.1 模型简化

双级复叠式室温磁热泵系统如图1所示。主要包括高温级及低温级子系统,每个子系统部件完全一致,级间采用中间换热器完成热的连接。图2所示为系统磁体及流体流动的运行时序匹配,其遵循Brayton循环的4个过程:加磁(对应磁场增加过程1-2)、冷流动(对应恒磁场过程2-3)、退磁(对应磁场减小过程3-4)、热流动(对应恒磁场过程4-1)。

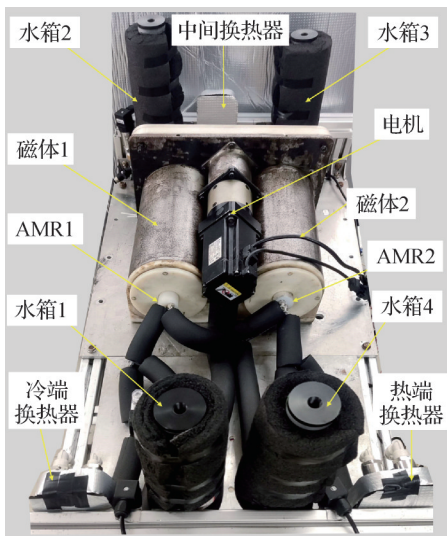


图1 双级复叠式磁热泵系统结构

Fig.1 Structure of two-stage cascade magnetic heat pump system

根据图1,双级复叠式系统的简化物理模型如图3所示,AMR1、AMR2内部被磁热材料与换热流体充满,简化为一维模型时,颗粒状的磁热材料视为固体域,而换热流体则视为流体域,流体域两端增加了蓄热器模型以更贴近实际情况,且对数值模型进行了如下假设:

1)不可压缩流体的质量流率在床层内空间上是均匀的;

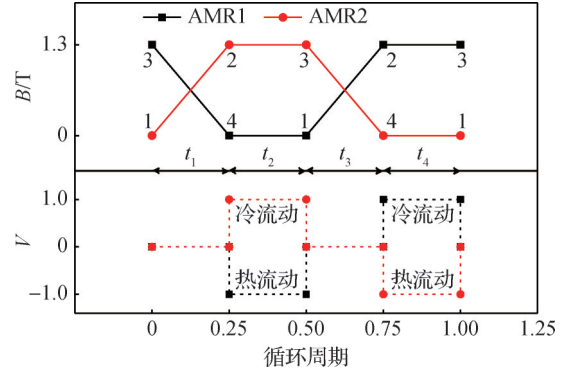


图2 磁场与流体流速的时序匹配
V表示流体(流速)的通断,1表示正方流动,0表示不流动,-1表示反方流动。

图2 磁场与流体流速的时序匹配
Fig.2 The operating sequence of the magnetic field and fluid velocity

- 2)温度场和速度场在每个单元长度上是均匀的;
- 3)忽略流体物性随时间及温度的变化;
- 4)忽略辐射换热、材料的磁滞和热滞;
- 5)假设流体与固体之间的换热是理想的。

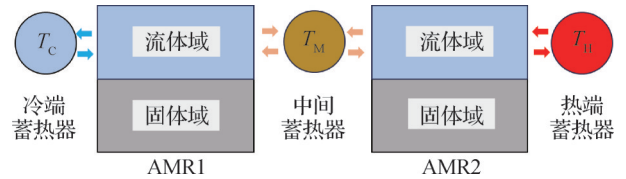


图3 双级复叠式AMR的简化物理模型

Fig.3 Simplified physical model of a two-stage cascade AMR

1.2 控制方程

基于能量守恒方程的复叠式AMR数值模型控制方程如式(1)和式(2)所示,分别对应AMR中流体域与固体域的能量守恒方程^[18-19]。

$$\varepsilon \rho_f A_c c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = A_c \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{disp}} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \left| \frac{\partial p}{\partial x} V_f \right| - \rho_f V_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - \frac{Nuk_f}{D_h} a_s A_c (T_f - T_s) + \quad (1)$$

$$Q_{\text{leak}} (1 - \varepsilon) \rho_s A_c c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{Nuk_f}{D_h} a_s A_c (T_f - T_s) + A_c \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + (1 - \varepsilon) \rho_s A_c c_s \frac{\partial \Delta T_{\text{ad}}}{\partial t} \quad (2)$$

1.3 边界条件与初始条件

求解边界条件为:1)当AMR1热流动时,AMR2冷流动,AMR1热端入口边界条件为 $T_{f,1} = T_m$,冷端出口边界条件为 $dT_{f,1}/dx = 0$;AMR2冷端入口边界条件为 $T_{f,2} = T_m$,热端出口边界条件为 $dT_{f,2}/dx = 0$;2)AMR1冷流动时,AMR2热流动,AMR1冷端入口边界条件为 $T_{f,1} = T_c$,热端出口边界条件为 $dT_{f,1}/dx = 0$;

AMR2 热端入口边界条件为 $T_{f,2} = T_H$, 冷端出口边界条件为 $dT_{f,2}/dx = 0$ 。其中, T_C 、 T_M 、 T_H 分别为冷端、中间、热端蓄热器温度, K; 下标 1、2 分别表示 AMR1 和 AMR2。

此外, 所有的初始温度均设置为 293 K。

1.4 性能指标及参数定义

AMR 的温跨 (ΔT) 定义为冷热端蓄热器之间的温差:

$$\Delta T = T_H - T_C \quad (3)$$

AMR 的平均制热量可计算为:

$$Q_H = \frac{1}{t_{\text{tot}}} \int_0^{t_{\text{tot}}} \rho_f V_f [T_{f,2}(\text{hotend}) - T_H] dt \quad (4)$$

式中: $T_{f,2}(\text{hotend})$ 为 AMR2 最热端的流体温度, K。

AMR1 与 AMR2 的尺寸一致, 内径为 28 mm、长度为 150 mm; 但二者填充的磁热材料不同, AMR1 中为 Gd, 而 AMR2 中则填充 5 层 LaFeSiH 合金, Gd^[2] 与 LaFeSiH^[20] (图中只给出第 1 层 LaFeSiH 的参数, 其他 4 层材料参数通过平移温变及热容曲线获得) 拟合所得的绝热温变及比热容如图 4 所示。

仿真中磁热材料及换热流体可视为定值的物性参数, 如表 1 所示。

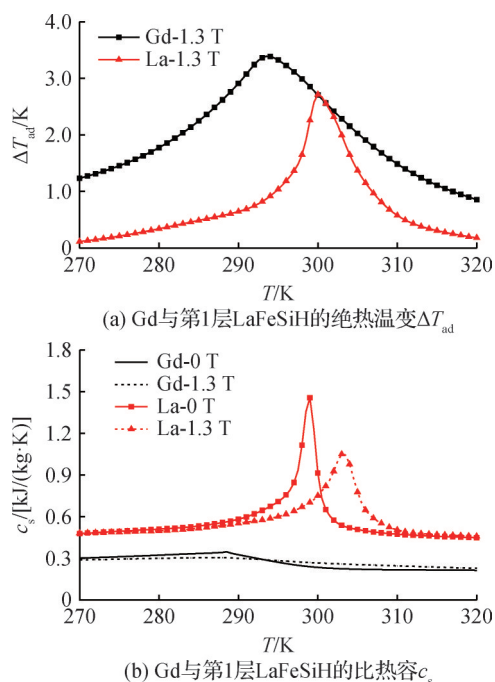


图 4 拟合的 Gd^[2] 和 LaFeSiH^[20] 的绝热温变 ΔT_{ad} 及比热容 c_s
Fig.4 The adiabatic temperature change ΔT_{ad} and specific heat capacity c_s of the fitted Gd^[2] and LaFeSiH^[20]

2 仿真结果与讨论

2.1 仿真结果验证

图 5 所示为在保持仿真模型参数与实验参数大

表 1 仿真中磁热材料及换热流体的物性参数

Tab.1 Physical property parameters of MCM and fluid in the model

项目	AMR1	AMR2
磁热材料种类	Gd 小球	LaFeSiH 小球
粒径/mm	0.4	0.4
填充量/g	450	350
k_f [W/(m·K)]	10.6	6
ρ_f (kg/m ³)	7 900	7 200
ε	0.392	0.473
k_f [W/(m·K)]	0.6	0.6
ρ_f (kg/m ³)	1 000	1 000
c_f [J/(kg·K)]	4 200	4 200

体一致的条件下, 当 $t_1-t_2-t_3-t_4$ 为 1-2-1-2 s、 $V_{f,1}=14.80$ mL/s、 $V_{f,2}=21.98$ mL/s 时, 热端、中间及冷端蓄热器温度 (T_H 、 T_M 、 T_C) 的实验值与仿真值随时间的变化。由图 5 可知, 仿真结果与实验结果整体趋势相一致, 尤其稳态结果较为接近。在冷、中、热端蓄热器 3 个温度 (简称: 冷、中、热端温度) 中, 热端温度 T_H 的实验值与仿真值的稳态结果最接近, 分别为 308.9 K 与 310.2 K, 仅相差 1.3 K, 表明仿真准确性较高。

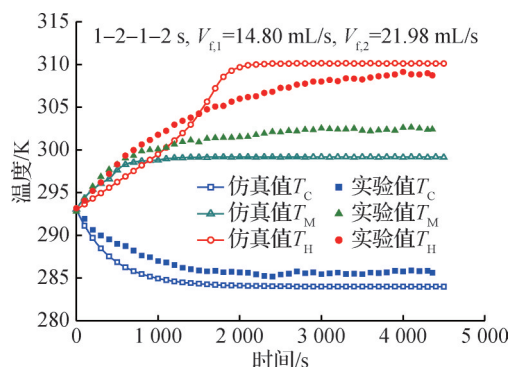


图 5 热端、中间及冷端温度的实验值与仿真值对比
Fig.5 Comparison of experimental and simulation temperatures of cold, middle, and hot receivers

2.2 温跨建立过程分析

图 6 所示为以 LaFeSiH 居里温度间隔为 3 K、等长度填充为例, 在 1-2-1-2 s 运行时序、 $V_{f,1}=14.80$ mL/s、 $V_{f,2}=21.98$ mL/s 的条件下, MCM 轴向温度分布随循环次数的变化情况 (状态 1~4 分别对应图 2 的 1~4)。当运行至 20 个循环后, AMR2 尚未建立轴向温跨, AMR1 的热量输入至 AMR2 中以提高 AMR2 的整体温度, 从而推动 LaFeSiH 材料进入其正常的工作温度范围; 当运行至 50 个循环后, AMR2 的温度已接近第 1 层 LaFeSiH 材料的居里温度, 但后续 4 层材

料仍远离各自的居里温度,因此只有 AMR2 的第 1 层材料开始响应;随着 AMR 继续运行至 100、150、200、300 个循环后,AMR2 中第 2 层、第 3 层、第 4 层、第 5 层

MCM 逐步“激活”,逐步运行至稳定状态,即 AMR2 逐步进入稳态工作,此时温跨逐渐达到最大。

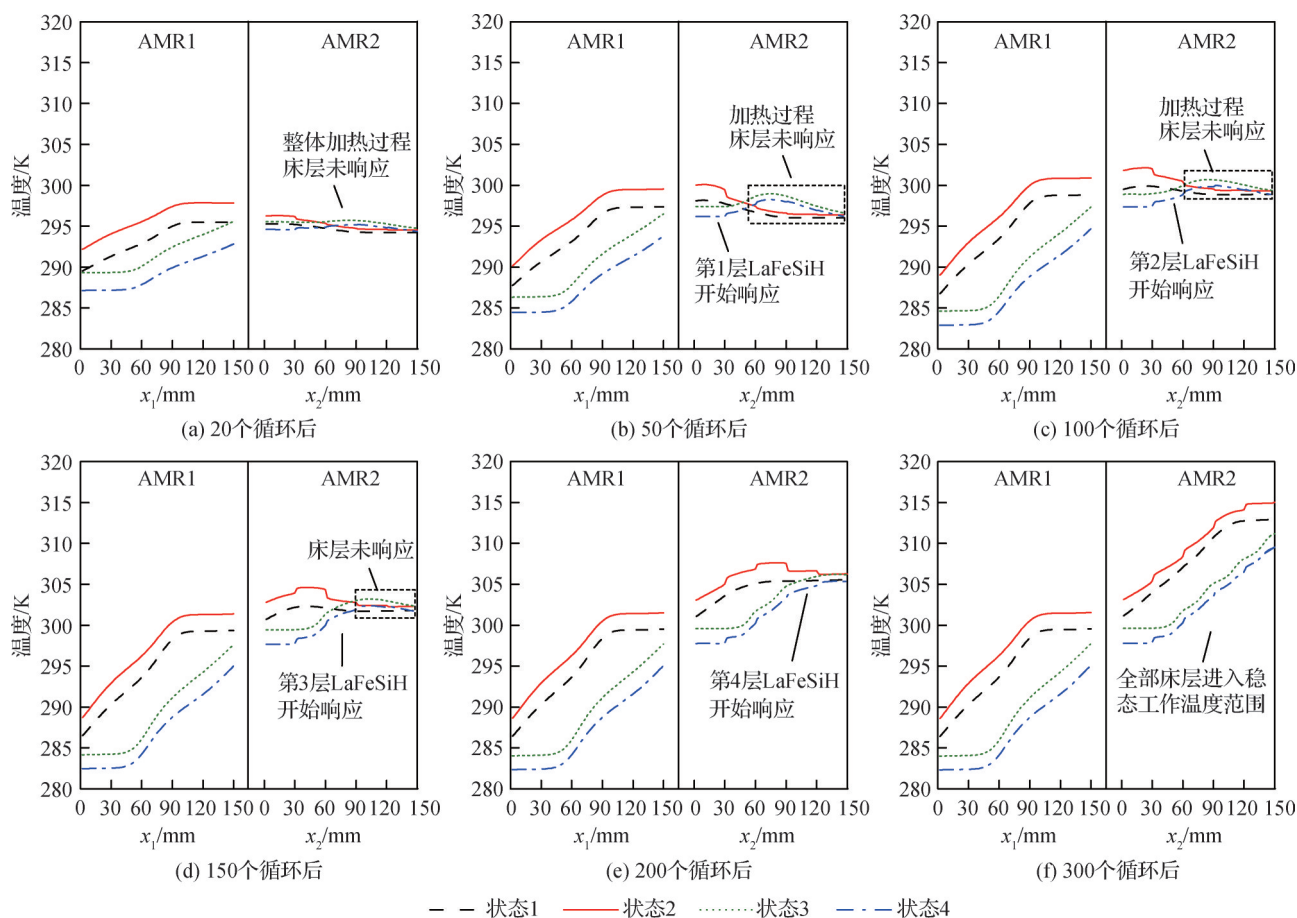


图 6 MCM 轴向温度分布随循环次数的变化

Fig.6 Variation of the axial temperature distribution of the MCM with the number of cycles

2.3 运行参数对制热性能的影响

同样以 LaFeSiH 居里温度间隔为 3 K、等长度填充为例,图 7 所示为在 1-2-1-2 s 运行时序、 $V_{f,1}=14.80$ mL/s 运行条件下, $V_{f,2}$ 对双级复叠式 AMR 冷端、中间及热端温度变化的影响。由图 7 可知,随着 $V_{f,2}$ 的增大,热端温度 T_H 越快达到稳态,且无负荷温跨随 $V_{f,2}$ 先增大后减小;最大无负荷温跨为 29.9 K ($V_{f,2}=10.15$ mL/s)。

图 8 所示为在 1-2-1-2 s 运行时序、 $V_{f,1}=14.80$ mL/s 运行条件下, $V_{f,2}$ 对温跨及制热量关系曲线(称制热量特性曲线,除 0 制热量点,每根曲线其余各点之间热端温度 T_H 相差 1 K)的影响。由图 8 可知,随着温跨的减小,制热量先增大后开始减小,后又再次增大,最后逐渐减小,最大制热量在热端温度 T_H 为 310 K 处取得,为 29 W,此时温跨为 26 K。此外,当热端温度 T_H 相同时,制热量随着 $V_{f,2}$ 的增大而增大,这得益于大流量可以获得更大的传热系数,及时带走床层的

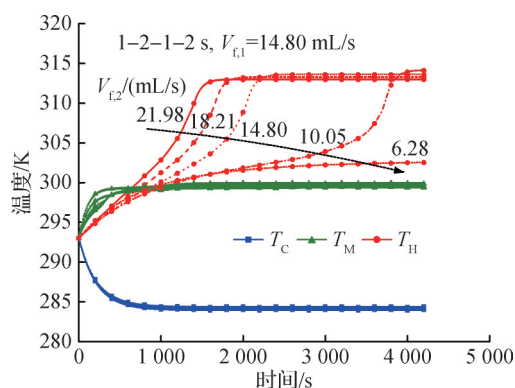


图 7 流量 $V_{f,2}$ 对冷端、中间及热端温度的影响

Fig.7 Influence of the flow rate $V_{f,2}$ on the temperatures of cold, middle, and hot receivers

热量。

图 9 所示为加退磁时间和流动时间对无负荷温跨及最大制热量的影响。当流动时间为 2 s 时,加退磁时间越短,热流密度越大,无负荷温跨和最大制热量也越大;3 组工况对应的无负荷温跨分别为 29、

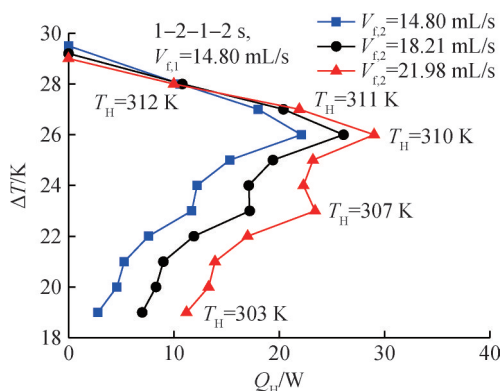


图 8 高温级流量 $V_{r,2}$ 对制热量特性曲线的影响

Fig.8 Influence of the flow rate $V_{r,2}$ on the heating capacity characteristic curves

27.7、26.6 K,最大制热量分别为 29、18.8、12.7 W,由此说明了缩短加退磁时间可以促进 MCM 内部热量的输出,以获得更大的温跨及制热量。当加退磁时间为 1 s、流动时间为 1、2、3 s 时,无负荷温跨分别为 29.9、29、28 K,最大制热量分别为 55.2、29、18.8 W。主要原因是频率越高,加退磁产生的热量越多。

综上所述,适当增大换热流体流量、缩短加退磁及流动时间,是双级复叠 AMR 获得大温跨与大制热量的关键。

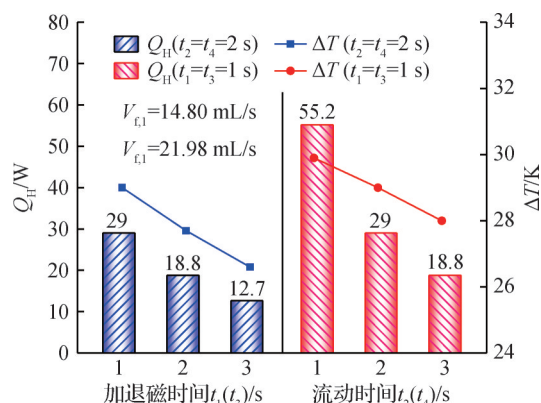


图 9 加退磁时间及流动时间对无负荷温跨及最大制热量的影响

Fig.9 Influence of the (de)magnetization time and folw time on the no-load temperature span and maximun heating capacity

2.4 材料居里温度间隔对制热性能的影响

AMR2 的 5 层 LaFeSiH 分别设置了 6 种不同的居里温度间隔:2、3、4、5、6、7 K,而第 1 层居里温度保持不变,为 300 K。图 10 所示为在 1-1-1-1 s 运行时序、 $V_{r,1}=14.80$ mL/s、 $V_{r,2}=21.98$ mL/s 条件下,冷端、中间及热端温度达到稳态时在 MCM 温变曲线上的分布。综合对比图 10(a)~(f)可知,随着居里温度间隔从 2 K

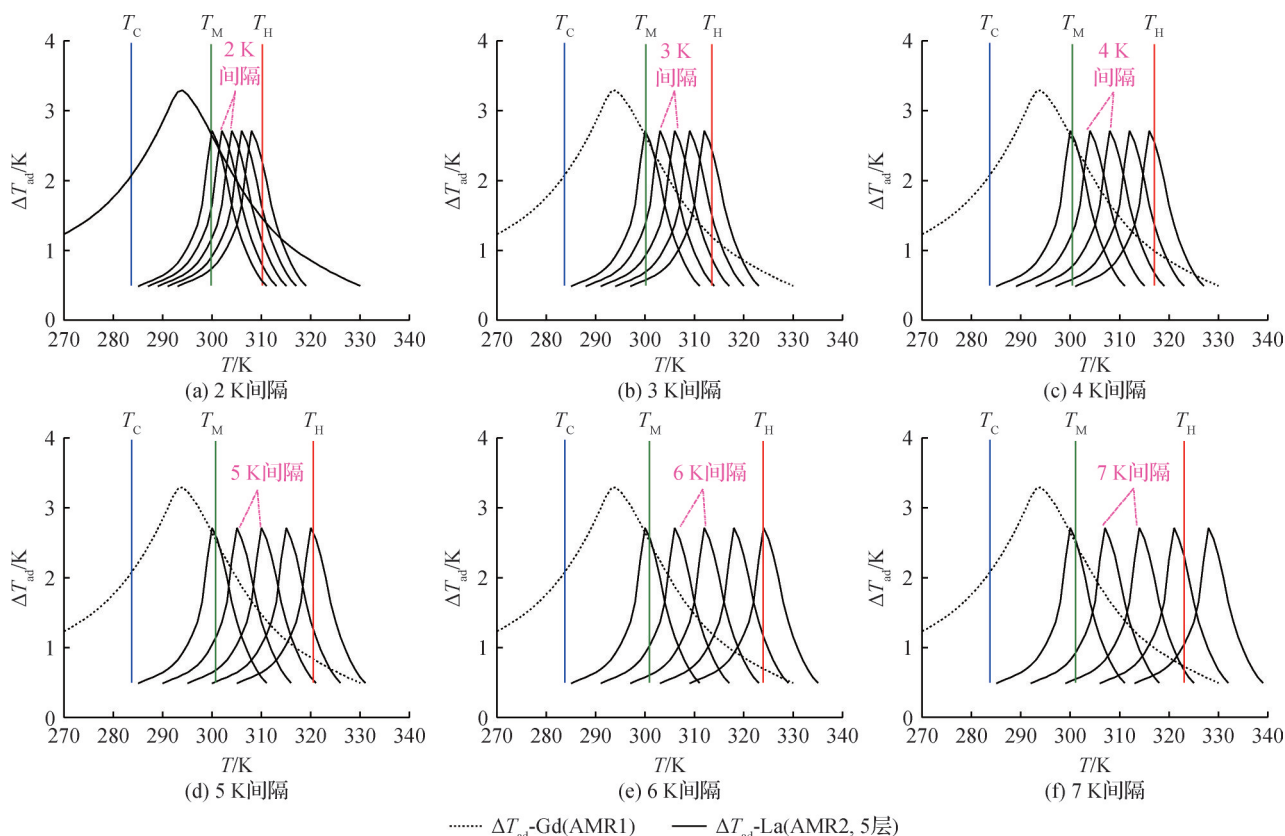


图 10 冷端、中间及热端温度在 MCM 温变曲线上的分布

Fig.10 Distribution of cold, middle, and hot receivers temperatures on the MCM ΔT_{ad} curves

增至 7 K,无负荷温跨先增大后减小,在居里温度间隔为 6 K 时最大,为 40.2 K。并且,居里温度间隔为 2~6 K 时,热端温度 T_{H} 均能达到第 5 层(最高居里温度层)LaFeSiH 材料的居里温度右侧,表明所有材料均处于高效的工作状态;而当居里温度间隔为 7 K 时,热端温度 T_{H} 并不能达到第 5 层 MCM 的居里温度点,说明此时 MCM 的居里温度间隔过大,热流密度不足以“激活”所有床层。

图 11 所示为同等运行条件下,6 种不同居里温度间隔对应的制热量曲线(除 0 制热量点,每根曲线其余各点之间热端温度 T_{H} 相差 1 K)。总体而言,每条曲线均有对应的最大制热量,随着居里温度间隔的增大,最大制热量减小,但对应的热端温度 T_{H} 越高。因此,可以通过增大 LaFeSiH 的居里温度间隔来达到更大的无负荷温跨,但当制热量需求较大时,则需要减小居里温度间隔来使 MCM 尽可能工作在居里温度附近,以满足制热量所需。

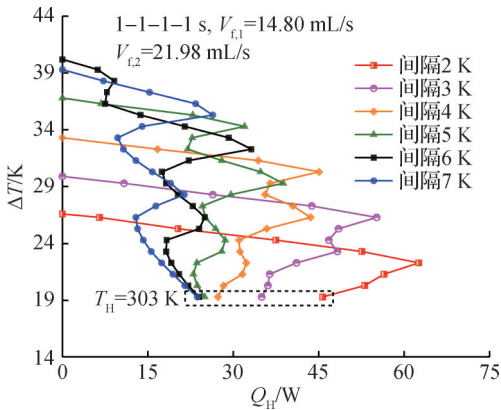


图 11 不同居里温度间隔对制热量特性曲线的影响
Fig.11 Influence of different curie temperature intervals on the heating capacity characteristic curves

2.5 材料填充比对制热性能的影响

在选取 AMR2 居里温度间隔为 3 K 的前提下,设置了 4 种不同的 MCM 填充长度,如表 2 所示。

在 1-1-1-1 s 运行时序、 $V_{f,1}=14.80\text{ mL/s}$ 、 $V_{f,1}=21.98\text{ mL/s}$ 运行条件下,不同填充长度比对制热性能

表 2 4 种填充长度比设置

Tab.2 Four different filling length ratios configurations

组别	填充长度比
1	30:30:30:30:30
2	20:20:20:20:70
3	70:20:20:20:20
4	20:20:70:20:20

注:填充长度的单位为 mm。

的影响结果如图 12 所示。4 种填充长度比在无负荷温跨上的表现不一,组别 2 的无负荷温跨最大,为 31.2 K,在较高热端温度输出的制热量也最大,为 64 W;而组别 1 的无负荷温跨及制热量表现次之;当中、低居里温度填充占比增加时,无负荷温跨逐渐下降,但在热端温度较低时其制热量的输出有所增大,且在较大的热端输出温度范围下能保持平稳的制热量输出。因此,不同的填充长度可能适应不同的设计需求。

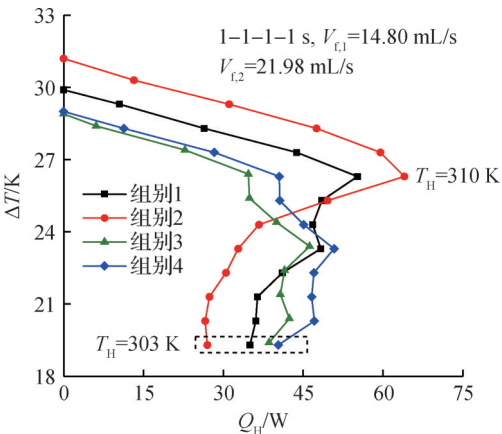


图 12 填充长度比对制热特性曲线的影响
Fig.12 Influence of filling length ratios on the heating performance curves

3 结论

本文基于一维数值模型,围绕温跨建立过程、运行参数以及 MCM 配置等关键因素,对双级复叠式(Gd-LaFeSiH)AMR 的制热性能进行了深入的仿真分析,得到如下结论:

- 1) 双级复叠式 AMR 的温跨建立较为复杂:AMR1 需要对 AMR2 进行加热,以逐步提升 AMR2 的整体温度,进而逐步“激活”不同居里温度的 LaFeSiH 合金床层。
- 2) AMR2 的流量 $V_{f,2}$ 越大,热端温度 T_{H} 越快达到稳态,且无负荷温跨随 $V_{f,2}$ 先增大后减小;在 1-2-1-2 s 运行时序、 $V_{f,1}=14.80\text{ mL/s}$ 运行条件下,系统可实现最大无负荷温跨 29.9 K;而在热端温度 $T_{\text{H}}=310\text{ K}$ 时,最大制热量可达 29 W。此外,缩短加退磁时间和流动时间(如均为 1 s)可显著提升制热量及无负荷温跨,最高分别可达 55.2 W 和 29.9 K。
- 3) 在 1-1-1-1 s、 $V_{f,1}=14.80\text{ mL/s}$ 、 $V_{f,2}=21.98\text{ mL/s}$ 条件下,无负荷温跨随着 LaFeSiH 的居里温度间隔的增大而增大,但最大居里温度间隔不宜超过 7 K;当居里温度间隔为 6 K 时,无负荷温跨达到最大值

40.2 K;而在居里温度间隔为 3 K 且填充长度比为 2:2:2:2:7 时,无负荷温跨为 31.2 K,且在较高热端温度下制热量最大可达 64 W。

符号说明

A_c ——AMR 的横截面积, m^2
 a ——比表面积, m^{-2}
 c ——比热容, $J/(kg \cdot K)$
 D_h ——水力直径, m
 k ——导热系数, $W/(m \cdot K)$
 k_{disp} ——流体的热扩散的等效系数, $W/(m \cdot K)$
 k_{eff} ——多孔介质固体的等效导热系数, $W/(m \cdot K)$
 m ——填充量, g
 Nu ——努塞尔数
 p ——压力, Pa
 Q_H ——平均制热量, W
 Q_{leak} ——漏热损失, W
 T ——温度, K
 ΔT_{ad} ——绝热温变, K
 ΔT ——温跨, K
 t ——时间, s
 t_{tot} ——完成一个循环的总时间, s
 V ——体积流量, m^3/s
 x ——AMR 的轴向方向长度, m
 ρ ——密度, kg/m^3
 ε ——孔隙率

下标

C——冷端或冷端蓄热器
f——流体
H——热端或热端蓄热器
M——中间或中间蓄热器
s——固体

1, 2, 3, 4——序号

本文受山东省重点研发计划项目(2023CXGC010301)资助。(The project was supported by the Key R&D Program of Shandong Province (No. 2023CXGC010301).)

参考文献

- [1] 曾星凯, 邢嘉琦, 韩凤武, 等. “双碳”背景下热泵技术发展现状与前景分析[J]. 科技与创新, 2025(3): 127–130. (ZENG Xingkai, XING Jiaqi, HAN Fengwu, et al. Development status and prospect analysis of heat pump technology under the background of “double carbon” [J]. Science and Technology & Innovation, 2025(3): 127–130.)
- [2] PINEDA QUIJANO D, FONSECA LIMA B, INFANTE FERREIRA C, et al. Seasonal COP of a residential magnetocaloric heat pump based on MnFePSi [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 164: 38–48.
- [3] ARPAGAUS C, BLESS F, UHLMANN M, et al. High temperature heat pumps: market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials[J]. Energy, 2018, 152: 985–1010.
- [4] ZHANG Yaokang, WU Jianghong, HE Jing, et al. Solutions to obstacles in the commercialization of room-temperature magnetic refrigeration [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 143: 110933.
- [5] GRECO A, APREA C, MAIORINO A, et al. A review of the state of the art of solid-state caloric cooling processes at room-temperature before 2019[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 106: 66–88.
- [6] 高磊, 黄焦宏, 张英德, 等. 稀土基室温磁工质的开发与磁制冷机的研究进展[J]. 稀土, 2023, 44(4): 91–107. (GAO Lei, HUANG Jiaohong, ZHANG Yingde, et al. Development of rare earth based room temperature magnetic refrigerants and progress in magnetic refrigerators [J]. Chinese Rare Earths, 2023, 44(4): 91–107.)
- [7] GAO Lei, WANG Pengyu, CHENG Juan, et al. Magnetocaloric effect and applied refrigeration performance of $La(Fe, Si)_{13}$ -based compounds[J]. Intermetallics, 2024, 169: 108299.
- [8] THANG N V, MIAO X F, VAN DIJK N H, et al. Structural and magnetocaloric properties of $(Mn, Fe)_2(P, Si)$ materials with added nitrogen [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 670: 123–127.
- [9] AUGUSTO ROSA M, BOECK P, MARCIEL DÖRING A, et al. Magnetocaloric $La(Fe, Mn, Si)_{13}H_z$ particles and their chemical stability in heat transfer fluids employed in magnetic refrigeration [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 563: 169875.
- [10] 高磊, 黄焦宏, 张英德, 等. 室温磁工质与磁制冷机的研究和开发[J]. 制冷学报, 2022, 43(4): 77–87. (GAO Lei, HUANG Jiaohong, ZHANG Yingde, et al. Research and development of room-temperature magnetic refrigerant and magnetic refrigerator [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(4): 77–87.)
- [11] 于世霖, 赵金良, 李振兴, 等. 旋转式室温磁制冷系统的研制及实验研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(12): 3204–3210. (YU Shilin, ZHAO Jinliang, LI Zhenxing, et al. Design and development of rotary room temperature magnetic refrigeration system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(12): 3204–3210.)
- [12] LIONTE S, RISSER M, MULLER C. A 15 kW magnetocaloric proof-of-concept unit: initial development and first experimental results[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 122: 256–265.
- [13] PEIXER G F, SILVA M C R, LORENZONI A, et al. A magnetocaloric air-conditioning system prototype [J].

- International Journal of Refrigeration, 2023, 151: 1–13.
- [14] HE Jing, WU Jianghong, LU Biwang, et al. Comparative study on the series, parallel and cascade cycles of a multi-mode room temperature magnetic refrigeration system [J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 117: 94–103.
- [15] ZHANG Yaokang, WU Jianghong, ZHANG Hangye. Performance analysis of a cascade room temperature magnetic refrigerator for improving temperature span [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 143: 68–77.
- [16] JOHRA H, FILONENKO K, HEISELBERG P, et al. Integration of a magnetocaloric heat pump in an energy flexible residential building [J]. Renewable Energy, 2019, 136: 115–126.
- [17] DALL’OLIO S, MASCHE M, LIANG J, et al. Novel design of a high efficiency multi-bed active magnetic regenerator heat pump [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 132: 243–254.
- [18] LIANG J, NIELSEN K K, ENGELBRECHT K, et al. Heat transfer figures of merit for mapping passive regenerator performance to active regenerator cooling power [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 181: 115993.
- [19] CHOI J, LEE S, KIM M S. Effect of gadolinium particle size on the performance of a magnetic refrigeration system [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 256: 124016.
- [20] VIEIRA B P, BEZ H N, KUEPFERLING M, et al. Magnetocaloric properties of spheroidal $\text{La}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Si})_{13}\text{Hy}$ granules and their performance in epoxy-bonded active magnetic regenerators [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 116185.

通信作者简介

巫江虹, 女, 教授, 华南理工大学机械与汽车工程学院, 13580467927, E-mail: pmjhwu@scut.edu.cn。研究方向: 室温磁制冷, 新能源汽车空调及热管理, 热泵节能, 人工智能在制冷系统的应用。

About the corresponding author

Wu Jianghong, female, professor, School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, 86–13580467927, E-mail: pmjhwu@scut.edu.cn. Research fields: room temperature magnetic refrigeration, air-conditioning and thermal management of new energy vehicles, energy saving of heat pump, and application of artificial intelligence in refrigeration system.