

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08
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1-1-1-1 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种填充长度比例中,制热性能最好的比例为2:2:2:2:7,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 Simulation

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 1-1-1-1 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 2:2:2:2:7, 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

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

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 °C)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的研究意义。

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 1-2 过程)、冷流动(对应中 2-3 过程)、退磁(对应中 3-4 过程)、热流动(对应中 4-1 过程)。

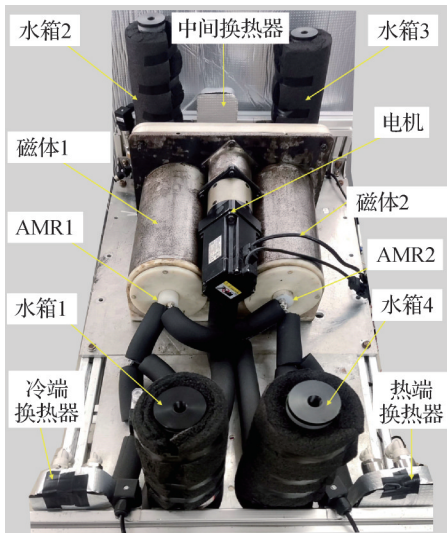


图 1 双级复叠式磁热泵系统结构

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,颗粒状的磁热材料被看成固体域,而换热流体则被看成流体域,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

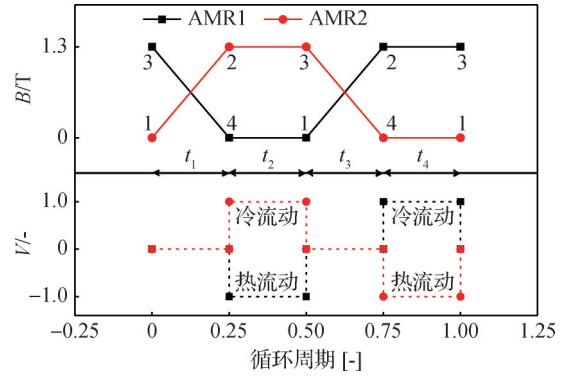


图 2 磁场与流体流速的时序匹配

Fig.2 The operating sequence of the magnetic field and fluid velocity

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;
- 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;
- 5)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。

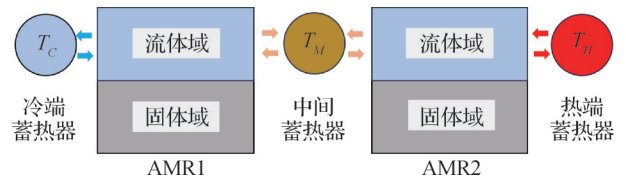


图 3 双级复叠式 AMR 的简化物理模型

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]。

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

$$-\rho_f V_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} - \frac{Nuk_f}{D_h} a_s A_c (T_f - T_s) + Q_{\text{leak}}$$

$$(1 - \varepsilon) \rho_s A_c c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{Nuk_f}{D_h} a_s A_c (T_f - T_s) \quad (2)$$

$$+ A_c \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + (1 - \varepsilon) \rho_s A_c c_s \frac{\partial \Delta T_{\text{ad}}}{\partial t}$$

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 $\frac{dT_{f,1}}{dx} = 0$;AMR2 冷端入口边界条件为

$T_{f,2} = T_M$,热端出口边界条件为 $\frac{dT_{f,2}}{dx} = 0$;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 $\frac{dT_{f,1}}{dx} = 0$;AMR2热端入口边界条件为 $T_{f,2} = T_H$,冷端出口边界条件为 $\frac{dT_{f,2}}{dx} = 0$ 。其中, T_C 、 T_M 、 T_H 分别表示冷端、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:

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

其中, $T_{f,2}(\text{hotend})$ 表示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。

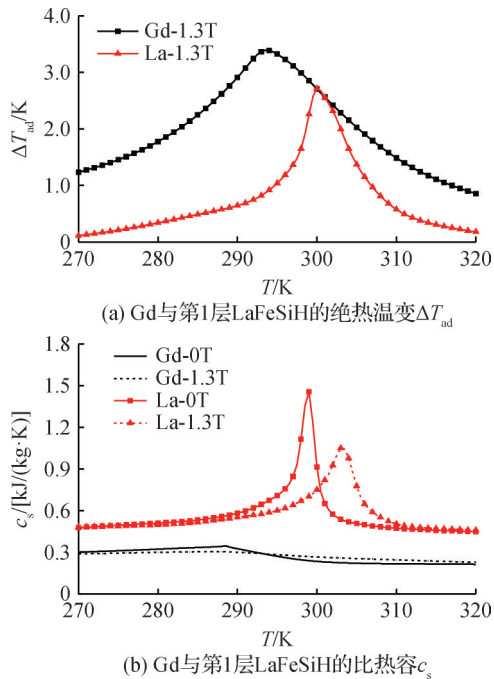


图4 拟合的Gd^[2]和LaFeSiH^[20]的绝热温变 ΔT_{ad} 及比热容 c_s
Fig.4 The adiabatic temperature change ΔT_{ad} and specific heat capacity c_s of the fitted Gd^[2] and LaFeSiH^[20]

表1 仿真中磁热材料及换热流体的物性参数

Tab.1 The 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
孔隙率 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

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体一致的情况下,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(分别用 T_H 、 T_M 、 T_C 表示)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。

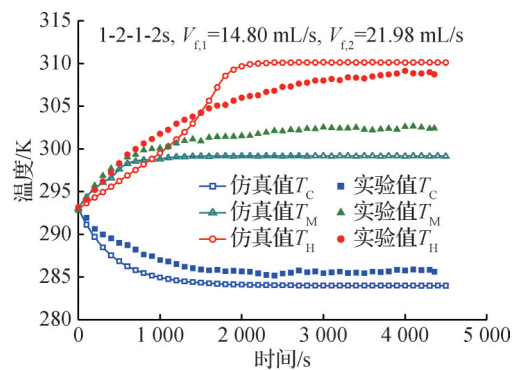


图5 热端、中间及冷端温度的实验值与仿真值对比
Fig.5 Comparison of experimental and simulation temperatures of cold, middle, and hot receivers

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及300个循环后,AMR2中第2层、第3层、第4层及第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。

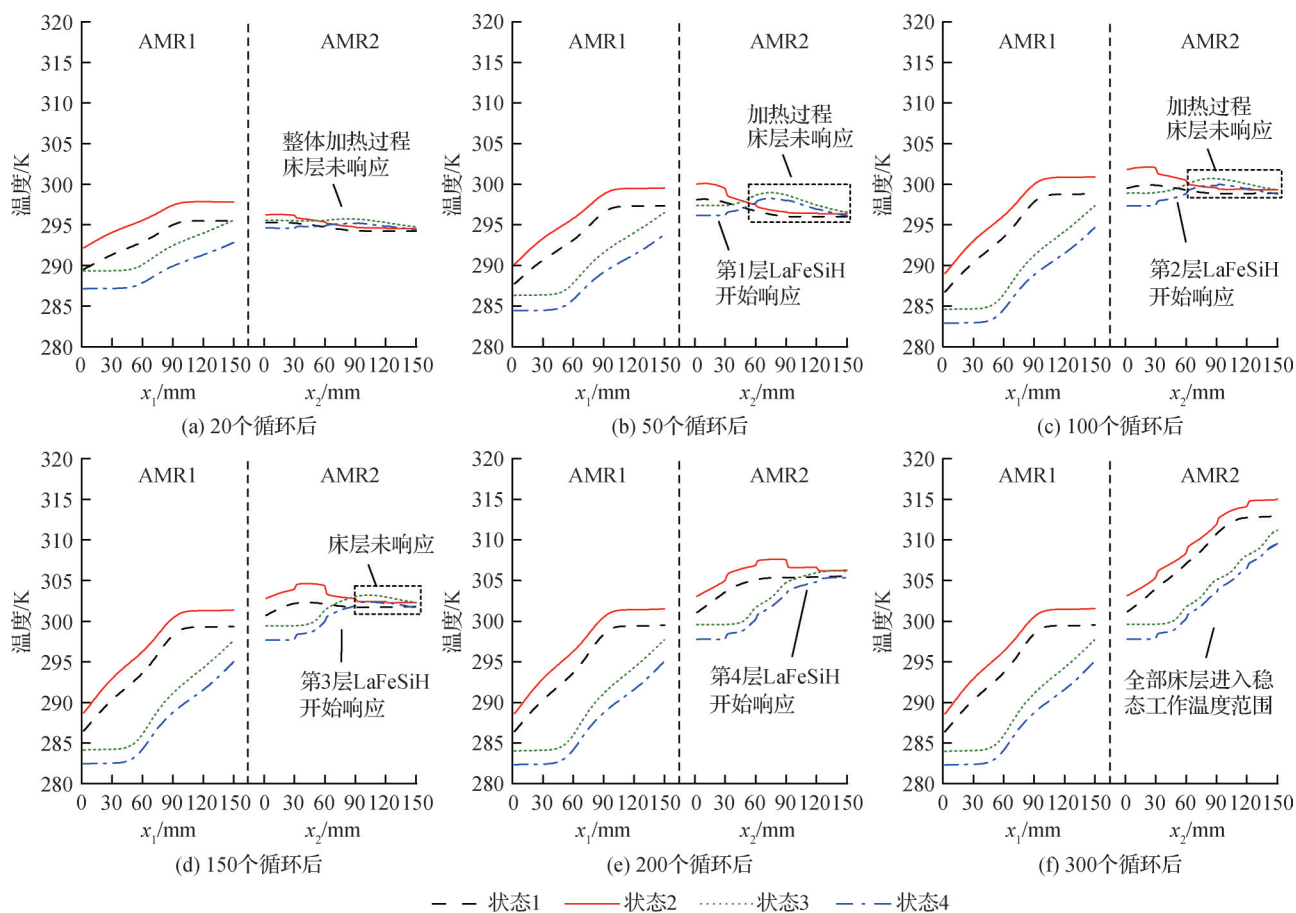


图6 MCM轴向温度分布随循环次数的变化

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

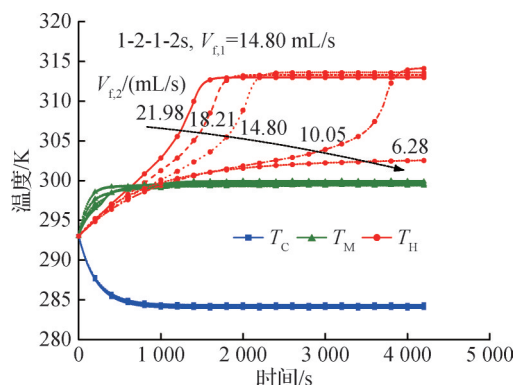


图7 流量 $V_{f,2}$ 对冷端、中间及热端温度的影响

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

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,及时带走床层的热量。

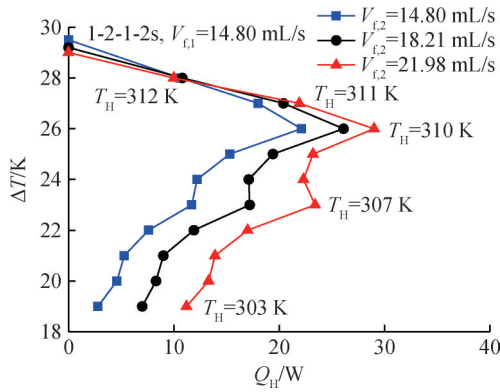
图8 高温级流量 $V_{r,2}$ 对制热量特性曲线的影响Fig.8 The influence of the flow rate $V_{r,2}$ on the heating capacity characteristic curves

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、27.7和26.6 K,最大制热量分别为29、18.8及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和28 K,最大制热量分别为55.2、29和18.8 W。主要原因是频率越高,加退磁产生的热量越多。

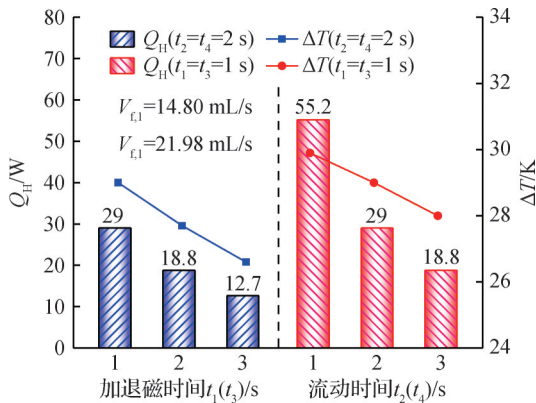


图9 加退磁时间及流动时间对无负荷温跨及最大制热量的影响

Fig.9 The influence of the (de)magnetization time and flow time on the no-load temperature span and maximum heating capacity

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。

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和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 K至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,每条曲线都有对应的最大制热量值,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。

2.5 材料填充比例对制热性能的影响

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、 $V_{r,1}=14.80$ mL/s、 $V_{r,2}=21.98$ mL/s运行条件下,不同填充长度比例对制热性能的影响结果如图12所示。4种填充比例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内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。

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 $V_{r,2}$ 越大,热端温度 T_H 越快达到

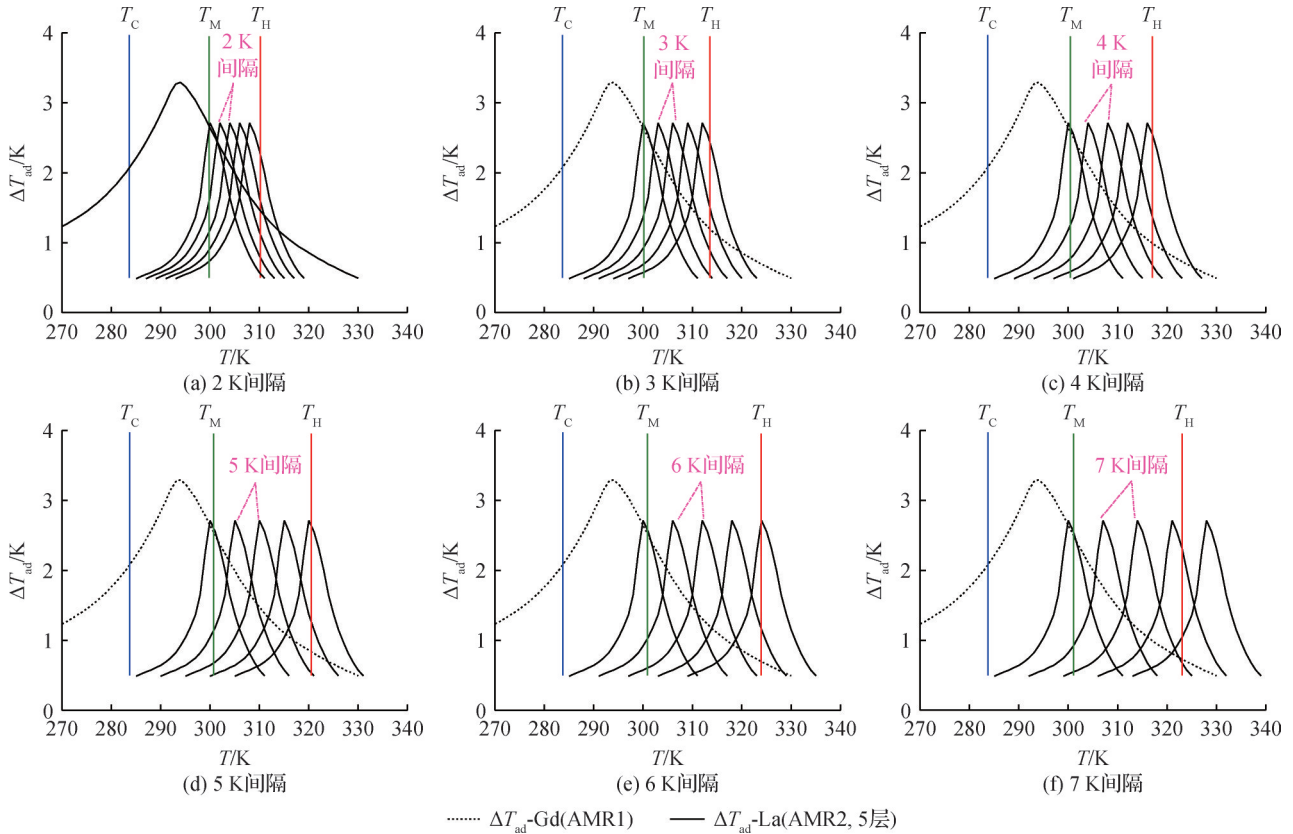


图 10 冷端、中间及热端温度在 MCM 温变曲线上的分布

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

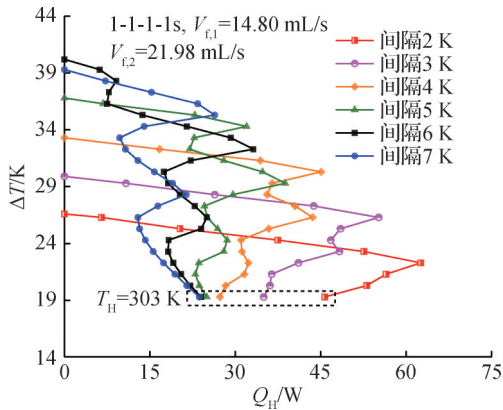


图 11 不同居里温度间隔对制热量特性曲线的影响

Fig.11 The influence of different curie temperature intervals on the heating capacity characteristic curves

表 2 4 种填充长度比例设置

Tab.2 Four different filling length ratios configurations

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

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

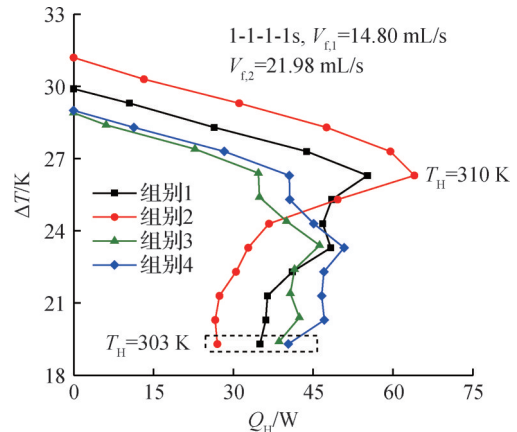


图 12 填充长度比例对制热特性曲线的影响

Fig.12 The influence of filling length ratios on the heating performance curves

最大无负荷温跨 29.9 K;而在热端温度 $T_H=310 \text{ K}$ 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且填充长度比例为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的横截面面积, m^2
 a —— 比表面积, m^{-1}
 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) 13Hz 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, MASCHÉ 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 La (Fe, Mn, Si) 13Hy 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.