

室温磁制冷活性蓄冷器多孔介质模型 及其数值模拟

刘敏, 俞炳丰

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 鉴于活性蓄冷器作为室温磁制冷核心部件,建立了活性蓄冷器二维复杂多孔介质模型,采用分子场理论计算励(退)磁过程磁性工质温度及磁熵变化,考虑了非 Darcy 效应、驻留流体、两相热扩散效应、热流边界效应及流体物性非定常的影响. 采用有限差分法对两相能量方程进行离散求解. 通过计算结果与实验结果的比较对模型进行了验证,认为所建模型能有效反映蓄冷器运行规律并模拟其内部温度分布. 数值模拟结果显示:磁场强度变化为 2.18 T 条件下蓄冷器内金属 Gd 在其居里点处的温度改变为 1.85 K;蓄冷器内部温度梯度明显,微元循环存在显著复叠现象;热流边界效应会导致蓄冷器制冷性能下降,流量较大时物性参数对制冷性能影响较大;在壁面热流通量为 5 W/m^2 的条件下,蓄冷器获得的最大制冷量为 201.8 W,对应性能系数为 4.79.

关键词: 室温磁制冷;活性蓄冷器;制冷性能;数值模拟

中图分类号: TB61;TB66 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0031-05

Porous Media Model for Active Magnetic Regenerator of Room Temperature Magnetic Refrigeration and Its Numerical Simulation

LIU Min, YU Bingfeng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A two-dimensional complicated porous media model for an active magnetic regenerator of room temperature magnetic refrigeration was established. In the model, the molecular-field theory was adopted to calculate the temperature and magnetic entropy of magnetic material in magnetization (demagnetization) process and the influence of non-Darcy effect, water stored, thermal dispersion effect, heat flux boundary effect and variable fluid physical properties on numerical results was considered. The finite difference method was used to discretize and solve the two-phase energy equations. The present model was verified by experimental results. The numerical results show that the temperature change of Gd at its Curie temperature was 1.85 K under a magnetic field of 2.18 T; distinct temperature grades and overlapping phenomenon of infinitesimal element cycles existed in the regenerator; heat flux boundary effect reduced the refrigeration performance of the regenerator, and fluid physical properties influenced the refrigeration performance of the regenerator greatly at large fluid flux; the regenerator obtained a maximum refrigeration capacity of 201.8 W with a corresponding coefficient of performance of 4.79.

Keywords: room temperature magnetic refrigeration; active magnetic regenerator; refrigeration performance; numerical simulation

室温磁制冷是一种绿色环保的新型制冷技术,具备多项优良性能,如结构紧凑、安全性高、噪声小及效率高。由于其未来广阔的应用前景,室温磁制冷已成为世界各国的研究热点,并已成为国际制冷学会9个前沿研究方向之一,同时还建立了室温磁制冷研究工作组。

磁制冷是以磁性工质的磁热效应(MCE)为基础的^[1]。室温条件下磁性材料的晶格熵非常大,制冷能力的一部分消耗于冷却晶格热负荷,系统的制冷能力下降,因此在室温磁制冷中必须采用蓄冷器,以提高制冷量(Q_c)。活性蓄冷器(AMR)技术由于可以减少外部蓄冷器形式中二次换热产生的不可逆损失,以及内部蓄冷器形式中由于不同温度的蓄冷液体混合所产生的不可逆损失,而成为室温磁制冷系统中的核心部件,其热力性能是室温磁制冷机效率高低的关键所在^[1-2]。

基于简化的多孔介质模型,国内外一些学者对不同流动工况下 AMR 内部温度分布、制冷量、耗功及性能系数(δ_{COP})的变化规律进行了研究^[3-4]。这些模型将流动简化为一维稳态流动并假设流体物性参数为常数,导致模拟结果与实验结果存在较大偏差。本文在文献[5]研究的基础上,结合分子场理论考虑 AMR 内驻留流体的影响、固体和流体相热扩散影响、热流边界影响及流体物性非定常,建立了室温磁制冷活性蓄冷器二维复杂多孔介质模型,考察了模型新增各项对 AMR 制冷性能的影响,并对模型进行了验证。采用所建模型获得了励(退)磁过程金属 Gd 的温度变化,并对 AMR 内均布 5 点温度梯度及复叠情况进行了数值模拟。

1 复杂多孔介质模型

1.1 能量方程

本文将 AMR 多孔介质填料床简化为二维平面,如图 1 所示。AMR 的长、宽、高分别为 0.13 m、0.072 m、0.033 m,磁性工质粒径为 0.3 mm。

考虑非 Darcy 流动(边界效应、惯性效应)、热扩散效应、均匀介质、热流边界效应及流体物性非定常,建立如下二维复杂多孔介质数学模型

$$\begin{aligned} \epsilon \langle \rho_f \rangle^f c_f \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial t} = & - \frac{\dot{V}}{A_c} \frac{\partial}{\partial x} (\langle \rho_f \rangle^f c_f \langle T_f \rangle^f) + \\ & h_{sf} a_{sf} [\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f] + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{eff},x} \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{eff},y} \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial y} \right) \quad (1) \end{aligned}$$

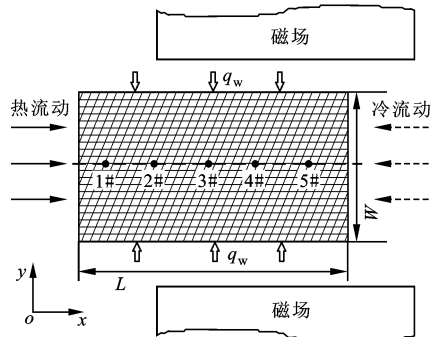


图1 活性蓄冷器多孔流动区域简图

$$\begin{aligned} (1-\epsilon) \langle \rho_s \rangle^s c_s \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial t} = & - h_{sf} a_{sf} [\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f] + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial y} \right) + (1-\epsilon) \langle \rho_s \rangle^s c_s \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial H} \Big|_s \cdot \frac{dH}{dt} \quad (2) \end{aligned}$$

式中: ϵ 为孔隙率; ρ_f 为流体密度; ρ_s 为固体密度; c_f 为流体比热容; c_s 为固体比热容; T_f 为流体温度; T_s 为固体温度; t 为时间; $\dot{V}$ 为流体容积流率; A_c 为流通区域横截面面积; a_{sf} 为比表面积; h_{sf} 为固体与流体间表面传热系数; $\lambda_{\text{eff},f}$ 和 $\lambda_{\text{eff},s}$ 分别为流体和固体的有效导热系数; H 为磁场强度。

本文采用 Gd 作为磁性工质,水作为换热流体。文献[6]根据实验数据采用最小二乘曲线拟合技术获得了水的物性参数随温度的变化规律。由于 Gd 的导热系数较小,本文中假设其导热系数恒定。多孔介质内流、固相有效导热系数参见文献[7],比表面积见文献[8]。此外,本文采用 Achenbach 关联式^[9]来计算流、固两相介质之间的表面传热系数。

对于 AMR 能量方程的求解,需要结合室温磁制冷 4 个子过程(热流动过程、励磁过程、冷流动过程及退磁过程)循环迭代。冷、热流动子过程中无磁场变化,即 $(1-\epsilon) \langle \rho_s \rangle^s c_s \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial H} \Big|_s \cdot \frac{dH}{dt} = 0$ 。该两流动子过程中能量方程相同,只是流动方向相反。励、退磁过程中流体流速为 0,流体相能量方程中不再包含对流项,即 $\frac{\dot{V}}{A_c} \frac{\partial}{\partial x} (\langle \rho_f \rangle^f c_f \langle T_f \rangle^f) = 0$ 。励、退磁过程中的磁场变化会导致磁性工质能量的变化,采用分子场理论将磁性工质的温度 T_s 、磁熵 S_m 及比热容 c_s 耦合计算,从而得出 Gd 的温度及磁熵变化。

1.2 边界及初始条件

4 个子过程中均假设壁面流、固相各自接受壁

面热流量 q_w , 即

$$q_w = -\lambda_{\text{eff}} \left. \frac{\partial T_f}{\partial y} \right|_{\text{wall}} = -\lambda_{\text{scff}} \left. \frac{\partial T_s}{\partial y} \right|_{\text{wall}} \quad (3)$$

固体其他边界为绝热边界, 流体出口为出口边界. 热流动过程的流体入口边界条件为 $\langle T_f \rangle(0, y, t) = T_H$, 冷流动过程的流体入口边界条件为 $\langle T_f \rangle(L, y, t) = T_L$.

由于整个外部循环分为 4 个流动子过程, 则每一流动子过程初始温度分布为上一流动子过程结束后的温度分布. 流、固相首次迭代计算初始温度分布假设均为冷源温度 T_L .

2 数值方法

本文采用有限差分法求解上述复杂多孔介质换热模型. 在能量方程离散方面, 时间导数项采用向前差分, 对流项采用一阶迎风差分格式, 其他空间导数(扩散项)采用二阶中心差分. 在边界条件处理方面, 流动过程出口边界采用局部单向化条件处理(下游点的系数为 0), 热流边界通过补充虚拟外点的方法获得二阶精度的离散格式. 循环最终收敛判据为循环相邻两退磁过程终了流体相温度差绝对值平均值和固体相温度差绝对值平均值, 收敛精度均为 5×10^{-5} K.

3 计算结果及讨论

本文以 Gd 为磁性工质、用水作换热流体, 对活性蓄冷器内部温度分布及制冷性能进行了计算. 图 2 所示为磁场强度变化(H_{CHG})为 2.18 T 条件下 Gd 的温度变化. 从图 2 可以看出, Gd 在其居里点($T_C = 293$ K)处的温度变化为 1.85 K, 该值低于相关文献同条件下的温度变化. 这是因为励(退)磁过程中工质的磁化与流体的传热过程是耦合发生的, 该数学模型假定磁化的发生先于两相间的传热过程, 驻留流体的存在造成流、固相间的热交换, 从而导致 AMR 内磁性工质的温升低于理想情况下磁性工质的绝热温度变化.

图 3 为在 $H_{\text{CHG}} = 2.18$ T、热源温度 $T_H = 293$ K、 $T_L = 290$ K、 $\epsilon = 0.58$ 、流动时间 $t_{\text{flow}} = 3.0$ s、磁化时间 $t_{\text{mag}} = 2.5$ s、流率 $q_f = 0.03$ L/s、 $q_w = 5$ W/m² 的计算及运行条件下, AMR 内部磁性工质温度计算值与实验值的比较. 从图 3 可以看出, 本文的计算结果与实验结果存在一定的误差. 这一方面是因为计算模型忽略了交替方向流动造成的流体混合和滞后损失, 模型假定 AMR 内部流动均匀稳定而产生

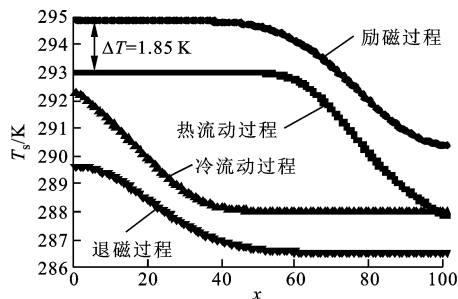


图 2 $H_{\text{CHG}} = 2.18$ T 条件下 Gd 的温度变化计算值

误差, 且采用 Achenbach 公式计算的表面传热系数与低 Re 实验工况下的实际表面传热系数也存在一定误差, 还有采用分子场理论计算得到的 Gd 的磁热参数与实际 Gd 的磁热效应存在差距. 另一方面, 实验由于存在大量的不可逆损失, 导致实验数据本身与理想室温磁制冷 AMR 循环存在一定误差. 从图 3 还可看出, AMR 内部温度梯度比实验条件下更为明显, 4 个子过程中固体温度的改变比实验条件下的更为清晰且不存在实验条件下的跳动点.

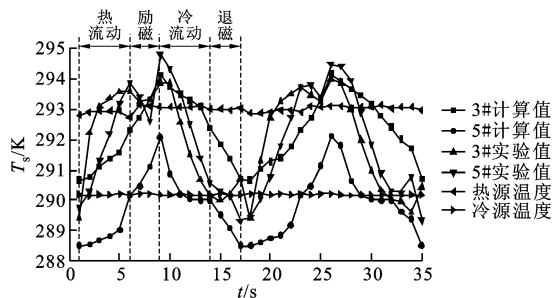


图 3 蓄冷器内温度分布计算值与实验值的比较

图 4 为在图 3 对应的流动工况下, 计算所得 AMR 内部中心均布 5 点温熵图(T - S 图). 从图 4 可以看出, AMR 内存在明显的温度梯度, 1#~4# 处工质经励磁后温度高于热源温度(293 K), 4# 及 5# 处工质经退磁后温度低于冷源温度(290 K), 换热流体流经填料床与固相换热后可实现制冷. 离高(低)温流体入口越远, 则磁性工质温度上升(降低)至热源(冷源)温度的速度越慢, 这是由于流动过程中流、固相间的传热使得两者之间的温差减小, 对流换热被削弱所致. 从图 4 还可以看出, 在该流动工况下 AMR 内部微元循环存在明显的复叠情况, 表明 AMR 循环并不是各点独立循环简单累加起来的, 这同前人的实验结果是相吻合的.

图 5 为在 $H_{\text{CHG}} = 2$ T、 $T_H = 293$ K、 $T_L = 280$ K、

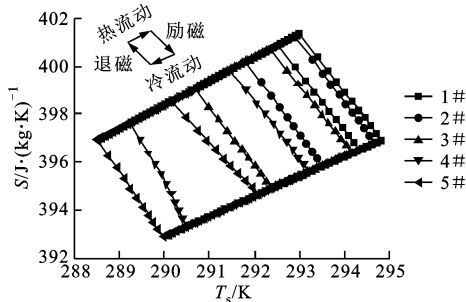


图4 $q_f=0.03$ L/s 条件下 AMR 中心 5 点温度分布图

$\epsilon=0.5$ 、 $t_{\text{flow}}=2.0$ s、 $t_{\text{mag}}=2.5$ s、无边界热流密度的计算条件下,热流动过程蓄冷器效率 Ψ 计算值与半解析解方法^[5]所得蓄冷器效率的比较。从图 5 可以看出,半解析解方法由于采用一维模型,并忽略蓄冷器内轴向导热及对流传热系数与物性的非定常,导致流量对蓄冷器出口温度影响较大,蓄冷器效率随流量增加而迅速下降。本文所采用的复杂多孔介质模型由于考虑二维流动、非 Darcy 效应、热扩散效应及物性非定常等多种因素的影响,使得蓄冷器内部换热不简单只受对流传热影响,蓄冷器效率在不同流量条件下较为稳定。当流体流率较大时,对流传热的影响占主导地位,此时两模型所得蓄冷器效率吻合很好。因此,本文所建复杂多孔介质模型较采用半解析解方法的一维 Schumann 模型能更加全面地反映蓄冷器内部流动换热情况。

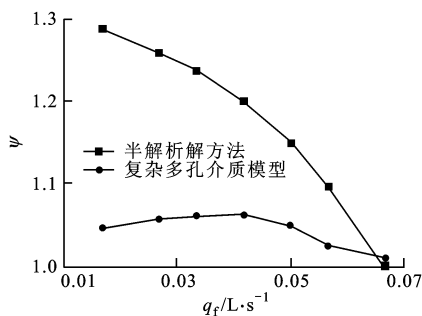


图5 不同模型蓄冷器效率的比较

鉴于上述分析,可以认为本文所建立的复杂多孔介质模型能反映室温条件下 AMR 的运行规律,该模型能用于 AMR 最佳流动工况的确定、AMR 几何结构与室温磁制冷系统的优化设计,以及 AMR 内微元复叠循环的数值研究。

文献^[5]考察了驻留流体效应及热扩散效应对 AMR 制冷性能的影响。本文将着重研究热流边界效应及物性非定常所带来的影响。图 6、图 7 分别为在 $H_{\text{CHG}}=2.18$ T、 $T_{\text{H}}=293$ K、 $T_{\text{L}}=288$ K、 $\epsilon=$

0.58、 $t_{\text{flow}}=3.0$ s、 $t_{\text{mag}}=2.5$ s 的计算条件下,AMR 的 Q_c 与 δ_{COP} 随流量变化的趋势。从图 6 可以看出,存在最佳流量使得 Q_c 取得极大值,当流量较小时 Q_c 随流量的增加而增加,之后 Q_c 随流量的增加而迅速降低。这是因为刚开始流体流量的增加会加强流、固相间的对流换热,从而使 Q_c 增加,而流量的继续增加会使得流体的热容增大很多,导致 Q_c 的迅速下降。当 $q_w=5$ W/m² 并综合考虑模型各种影响因素时,AMR 在 $q_f=0.083$ 3 L/s 处获得最大制冷量 201.8 W,对应 δ_{COP} 为 4.79。热流边界的存在会使得 AMR 的 Q_c 降低。当流量较小时,物性非定常对 Q_c 的影响不大,随着流量的增加,该因素的影响越来越明显。这是由于流量的持续增加会使得驻留流体对制冷性能的影响加重,考虑流体物性非定常能更为精确地反映填料床内的温度分布。

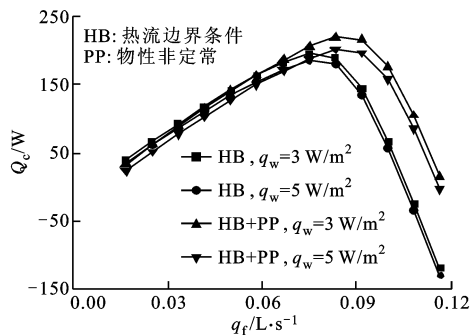


图6 $T_{\text{H}}=293$ K、温跨为 3 K 条件下制冷量随流量的变化

从图 7 可以看出,存在最佳流量使得 δ_{COP} 取得极大值。只考虑热流边界效应时, q_f 在 0.06~0.08 L/s 的范围内变化时均使得 AMR 获得 δ_{COP} 的极大值。同时考虑热流边界条件及流体物性参数随温度变化时, δ_{COP} 在 $q_f=0.091$ 7 L/s 处获得极大值。热流边界的存在会使得 AMR 的 δ_{COP} 下降,在考虑非恒定物性参数的情况下,这种下降趋势更加明显。相同热流边界条件下,存在某一流量值 q_0 ,当 $q_f < q_0$ 时,考虑物性参数随温度的变化将导致 δ_{COP} 降低,但当流量增大到大于 q_0 时,考虑物性非定常导致 δ_{COP} 升高。这是因为流量较小时制冷量较小,热流边界效应对 AMR 内温度分布影响较大,考虑物性非定常导致计算结果偏高,冷流动过程放热量增加,从而导致 δ_{COP} 偏低。

4 结 论

(1) 本文结合分子场理论考虑非 Darcy 流动、驻留流体影响、热扩散效应、热流边界效应及流体物性

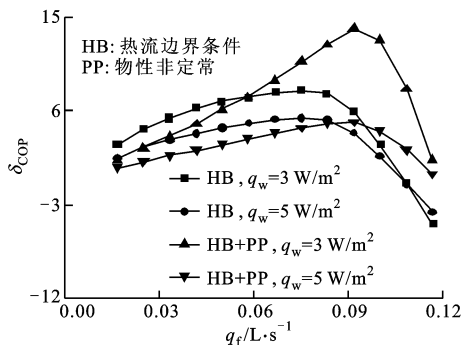


图7 $T_H=293\text{ K}$ 、温跨为3 K条件下 δ_{COP} 随流量的变化

非定常,建立了室温磁制冷活性蓄冷器二维复杂多孔介质模型,通过数值解与实验解的比较对该模型进行了验证,结果显示该模型能有效地模拟室温磁制冷循环并用于活性蓄冷器内部微元复叠循环的数值研究。

(2)数值模拟结果显示,活性蓄冷器内部均布5点存在较大的温度梯度,各点微元循环存在明显的复叠。热流边界效应会导致蓄冷器的 Q_c 及 δ_{COP} 降低。流体流量较小时,流体物性对蓄冷器制冷量影响较小,流量较大时,应考虑流体物性随温度的变化对制冷性能的影响。

(3)存在最佳流量使得 Q_c 及 δ_{COP} 分别取得极大值。在综合考虑模型各项影响因素的影响及 $q_w=5\text{ W/m}^2$ 的条件下,蓄冷器在流量为0.083 3 L/s时获得最大制冷量201.8 W,对应 δ_{COP} 为4.79。

参考文献:

- [1] YU B F, GAO Q, ZHANG B, et al. Review on research of room temperature magnetic refrigeration [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(6): 622-636.
- [2] 刘敏, 俞炳丰, 胡张保. 室温磁制冷最新研究进展 [J]. 制冷学报, 2007, 28(4): 1-11.

LIU Min, YU Bingfeng, HU Zhangbao. New development of research on room temperature magnetic refrigeration [J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(4): 1-11.

- [3] 高强, 俞炳丰, 张斌, 等. 室温磁制冷活性蓄冷器性能预测研究 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(3): 262-265.
- GAO Qiang, YU Bingfeng, ZHANG Bin, et al. Performance prediction of active magnetic regenerator of room temperature magnetic refrigeration [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(3): 262-265.
- [4] LI P, GONG M Q, YAO G H, et al. A practical model for analysis of active magnetic regenerative refrigerators for room temperature applications [J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(8): 1259-1266.
- [5] 高强. 室温磁制冷往复式活性蓄冷器制冷性能实验研究及计算模拟 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2005.
- [6] WADE B A, SCHULTZ D H. Numerical simulation of the active magnetic regenerator [J]. Computers and Mathematic with Applications, 2005, 49: 1525-1538.
- [7] AMIRI A, VAFAI K. Transient analysis of incompressible flow through a packed bed [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(24): 4259-4279.
- [8] AMIRI A, VAFAI K. Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37(6): 939-954.
- [9] Achenbach E. Heat and flow characteristics of packed beds [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1995, 10(1): 17-27.

(编辑 荆树蓉)

本刊实行开放免费阅读, 阅读全文请登录

<http://www.jdxb.cn>