

耦合高压斯特林制冷效应的复合磁制冷循环的数值模拟

高新强 沈俊 和晓楠 唐成春 戴巍 李珂 公茂琼 吴剑峰

Numerical simulation of a hybrid magnetic refrigeration combined with high pressure Stirling regenerative refrigeration effect

Gao Xin-Qiang Shen Jun He Xiao-Nan Tang Cheng-Chun Dai Wei Li Ke Gong Mao-Qiong Wu Jian-Feng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 210201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.210201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水平温差对环形浅液池内 Marangoni-热毛细对流的影响

Effect of horizontal temperature difference on Marangoni-thermocapillary convection in a shallow annular pool

物理学报.2015, 64(14): 140202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140202>

轴对称构件受力分析的插值粒子法

Interpolating particle method for mechanical analysis of space axisymmetric components

物理学报.2015, 64(10): 100204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100204>

大气风场和温度对无线电声波探测系统探测高度影响的数值研究

A numerical study of effects on detection height of a radio acoustic sounding system influenced by atmospheric wind and temperature

物理学报.2015, 64(10): 100205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100205>

镁基合金自由枝晶生长的相场模拟研究

Phase-field modeling of free dendritic growth of magnesium based alloy

物理学报.2015, 64(6): 060201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060201>

黏弹性问题的改进的复变量无单元 Galerkin 方法

Improved complex variable element-free Galerkin method for viscoelasticity problems

物理学报.2014, 63(18): 180203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.180203>

耦合高压斯特林制冷效应的复合磁制冷循环的数值模拟*

高新强¹⁾²⁾ 沈俊^{2)†} 和晓楠²⁾ 唐成春^{1)‡} 戴巍²⁾ 李珂²⁾
公茂琼²⁾ 吴剑峰²⁾

1) (河北工业大学材料科学与工程学院, 天津 300401)

2) (中国科学院理化技术研究所低温工程学重点实验室, 北京 100190)

(2015年4月17日收到; 2015年6月23日收到修改稿)

本文借助计算流体力学软件, 对复合磁制冷机进行整机数值模拟分析. 以复合磁制冷机为建模原形, 分别计算了主动式磁制冷循环以及复合磁制冷循环. 利用模型计算分析了利用系数, 工作频率对主动式磁制冷的制冷效果影响, 同时模拟计算了不同相位角、不同频率下的复合磁制冷机的制冷效果, 计算得到适合复合磁制冷循环的最佳匹配相位角. 模拟计算结果对后续实验台的设计搭建有很好的指导作用.

关键词: 数值模拟, 磁制冷, 混合系统

PACS: 02.60.Cb, 75.30.Sg, 42.82.Fv

DOI: 10.7498/aps.64.210201

1 引言

面对当前紧张的环保和能源压力, 研发新型的环保替代制冷技术是制冷领域实现节能的一个重要发展方向. 磁制冷技术被认为是完全环保, 高效, 运行可靠并符合可持续发展的新一代制冷技术. 室温磁制冷技术由于其巨大的经济效益和社会效益引起越来越多的研究兴趣, 同时性能优良的磁制冷材料是实现磁制冷技术的重要组成部分. 近十几年来, 我国在室温磁制冷材料方面的研究取得了重要进展. 1996年, 邵元智等研究了Gd的二元合金系列制备成纳米粉末后的特性, 其居里温度降低, 比热增大, 具有重要研究意义^[1]. 2012年, 王永田等报道的Gd基非晶与Gd纳米晶复合材料具有一定研究价值^[2]. 在众多研究基础上^[1-3]我们最终选定了Gd做为磁热材料填充到回热器中进行模拟和实验研究. 国际上关于复合磁制冷机的研究报道了

很多, 1996年, Nelis等报道了GM机耦合磁制冷样机^[4]; 2000年, Yayama等报道了GM制冷循环耦合布雷顿磁制冷^[5]; 2011年, Kim等提出了室温脉管制冷耦合主动回热式磁制冷机^[6]. 我们实验室小组也做了相关研究, 2013年, 张弘等搭建了一台旋转永磁体耦合式室温磁制冷样机^[7]; 和晓楠等在此之前基础上通过数值模拟和实验研究对样机做了进一步改进^[8-10]. 由于压力的限制旋转永磁体耦合式室温磁制冷样机不能满足进一步实验的要求, 所以我们需要研究设计一台高压斯特林耦合磁制冷样机. 通过模拟计算的方式得到一些设计参数将对新样机的设计和制造起到非常重要的指导作用.

近些年来, 计算机硬件技术发展飞快, 同时也带动计算机软件相关领域迅速蓬勃发展起来. 而基于计算机技术的计算流体力学越来越广泛的应用于各个领域. 通过计算机对复杂流动问题进行研究能够较精确地流场的流动情况. 很多研究团队在磁制冷机的数值模拟方面都做出了不错的成

* 国家自然科学基金 (批准号: 51322605, 51271192) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jshen@mail.ipc.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: tangcc@hebut.edu.cn

果, 2010年, Nielsen 等用一个2维数值模型研究了主动磁制冷机的性能和参数^[11], 通过改变磁性材料片厚、片与片之间的距离、运行的频率和流体运行来模拟系统的制冷情况, 并通过模拟得到了最优的利用系数. 2011年, Nielsen 等对2011年之前的室温主动式磁回热器AMR模型进行了总结分析^[12], 详细讨论了控制方程、磁热效应、流体流动和磁场分布对AMR周期的影响. 2014年, Silva 等针对批量应用建立了一个固态主动式磁回热制冷机模型^[13], 优化了系统的频率、工作温度和冷端与磁热材料的接触时间. 2014年, Chiba 等建立了一维数值模型^[14], 模拟得到了温跨, 性能系数和冷却能力, 并通过实验进行了对比验证. 2015年, Lionte 等发表了一种往复运动的主动磁制冷机的数值分析^[15], 分别对回热器的传热和传热流体的流动进行建模, 得到了主动磁制冷机循环的系统性能系数(coefficient of performance, COP)、温跨和压降等的重要参数, 并提出了一些优化的解决方案. 在传统的斯特林制冷机和室温磁制冷机的研究方面, 采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)软件对制冷机进行数值模拟已经有过先例, 将数值模拟作为一种研究手段来系统研究其性能及特性已经成为一个重要方向, 并且取得了一定成果^[16,17]. 对于复合磁制冷系统而言, 将CFD技术应用到复合磁制冷机的研究还比较欠缺. 本文通过CFD对复合磁制冷进行数值模拟分析, 寻找两种制冷效果正面叠加的最佳匹配角度, 揭示复合磁制冷循环的运行机理, 从而对今后的实验工作起到指导的作用.

2 数学模型

2.1 控制方程

数值传热学是指对描写流动与传热问题的控制方程采用数值方法通过计算机予以求解的一门

传热学与数值方法相结合的交叉学科^[18]. “数值传热学的基本思想就是把原来在空间与时间坐标中连续的物理量的场, 用有限个离散点上的值的集合来代替, 通过一定的原则建立起这些离散点上变量值之间关系的方程, 也就是离散方程, 求解所建立起来的方程以获得所求解变量的近似值^[18].”

在数值传热学的应用中都要遵循基本的控制方程, 它们是质量守恒方程(连续性方程), 动量守恒方程和能量守恒方程:

1) 质量守恒方程(连续性方程)

$$\text{div}(U) = 0. \quad (1)$$

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(uU) = \text{div}(\nu \text{grad}u) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(vU) = \text{div}(\nu \text{grad}v) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (2b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wU) = \text{div}(\nu \text{grad}w) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (2c)$$

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(UT) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \text{grad}T\right) + \frac{S_T}{\rho}. \quad (3)$$

2.2 复合磁制冷样机模型

复合磁制冷样机主要由以下部件组成: 压缩腔和压缩活塞, 膨胀腔和膨胀活塞, 热端水冷器, 冷端换热器, 回热器, 缓冲管以及连接管路. 当样机运行时膨胀活塞与压缩活塞之间必须要有固定相位差, 这才使得气体产生膨胀和压缩效应, 活塞的运动频率是可以调节的, 随着活塞的运动压力也是以波动的形式进行交变流动. 换热流体在热端水冷器, 冷端换热器和回热器填料间进行热交换, 使得冷头吸热从而达到制冷效果. 样机整机2维模型尺寸示意图见图1.

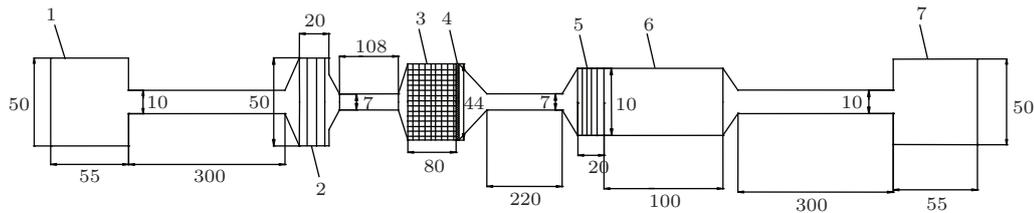


图1 整机示意图 1. 压缩腔, 2. 热端水冷器, 3. 回热器, 4. 导流片, 5. 冷端换热器, 6. 缓冲管, 7. 膨胀腔
Fig. 1. Schematic diagram of model: 1. Compression chamber, 2. water cooler, 3. regenerator, 4. flow deflector, 5. cold-end heat exchanger, 6. separator tube, 7. expansion chamber.

2.3 模型建立

根据样机的物理模型, 利用 Gambit 软件进行物理建模, 构建系统二维模型. 由于在样机中, 气缸、磁回热器以及高低温换热器均为轴对称结构, 因此就可以只构建二维结构化网格的一半网格, 然后利用对称性映射生成整个网格. 在划分网格时, 需要考虑划分网格数量多少是很重要的. 从原则

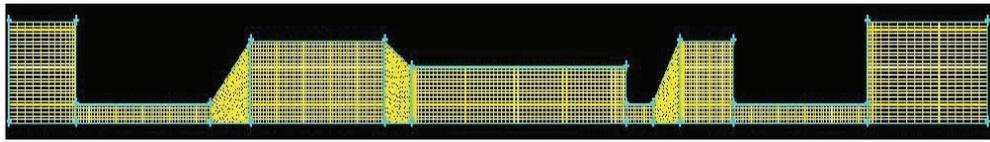


图2 系统二维模型网格图

Fig. 2. Schematic diagram of two-dimension system.

表1 设定参数表

Table 1. Experimental parameters.

参数	数值
换热器翅片间隙/mm	0.5
换热器厚度/mm	20
换热器孔隙率	0.45
磁回热器内径/mm	45
压缩膨胀活塞相位差/(°)	60/180
磁回热器长度/mm	80
磁热材料	钕片 (Gd)
磁热材料孔隙率	0.49
换热流体	氦气 (He)
换热流体压力/MPa	0—5.5
系统运行频率/Hz	1—5
气缸活塞行程/mm	50
气缸活塞直径/mm	50
磁场强度/T	0—1.5

3 结果分析与讨论

3.1 主动式磁制冷循环模拟结果与讨论

通过 CFD 软件对主动式磁制冷循环的模拟计算, 可以知道系统制冷量会随着利用系数的增大而增大, 我们可以通过增大质量流率的方式 (在已有活塞机构尺寸的基础上增大系统压力) 来获得较高的利用系数从而获得更大的制冷量. 主动式磁制冷循环的制冷量会随工作频率的增大而增大, 工作频率的增大可以提高单位时间内对系统的输入功以及传热流体的质量流率, 与此同时也会增加系统损失和功耗, 计算结果显示 COP 会随着频率增大而快速下降.

上讲, 网格越密计算得到的结果就会越合理, 局部特征会越清晰. 但是, 过密的网格需要更长的计算时间和更大计算内存, 并可能带来收敛的问题. 通过综合考虑并结合初步研究对比, 计算采用网格如图 2 所示.

通过一系列的边界条件设定, 并结合实际情况最终确定了换热器和回热器各项尺寸参数设置, 详见表 1.

3.1.1 利用系数

利用系数是影响主动式磁制冷循环工作性能的一个重要参数, 一般的将传热流体的热容和磁工质热容的比值称为利用系数 (Utilization) U .

$$U = \frac{\dot{m}_f T C_f}{2 m_s C_s}, \quad (4)$$

式中 \dot{m}_f 是流体质量流率, C_f 是传热流体比热容, m_s 是回热器磁热工质总质量, C_s 是磁工质的比热容, T 是一个周期循环时间.

由于回热器填料的热容是有限的, 各截面的填料温度会发生波动, U 值越小填料的温度波动损失就越小. 但是, 由于磁回热器中传热流体是用来传递热量的介质, 其热容必须维持在一定值来传递冷量, 而磁回热器的制冷必须依赖于填料的温度波动, 这就要求 U 值不能太小. 通常采用改变传热流体的质量流率来改变磁制冷机系统的利用系数. 在较小的利用系数下, 尽管传热流体可以被换热到更低的温度, 但是小质量的传热流体只能产生较小的制冷量. 反之, 当传热流体的质量流率升高并越来越接近磁工质的热容时, 主动磁回热器内的磁工质的温度就会产生较大的波动, 冷端流体的出口温度随之升高, 使制冷量减小. 有研究表明^[16], 在特定的条件下存在一个与之相应使磁制冷机达到最大制冷量的利用系数, 这个利用系数在 0.5—0.9 之间. 如图 3 所示, 对于换热流体为 He 的磁制冷循环制冷量随利用系数的增大而增大, 因为换热气体密度低质量流率小因此换热系数的利用系数远远没有达到最大制冷量所需要的值. 经计算, 若使系统获得最大制冷量气体质量流率约为 80 g/s, 远远大于

最大利用系数0.066(此时制冷流率为6 g/s, 压力已经达到10 MPa). 因此应考虑采用直径更大的活塞以及更大的活塞行程用以增大质量流率.

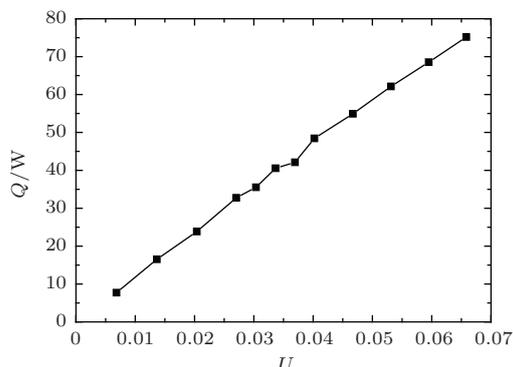


图3 制冷量随利用系数的变化

Fig. 3. Cooling capacity comparison of different utilization factor.

3.1.2 工作频率

提高磁制冷机的工作频率可以提高单位时间内对系统的输入功以及传热流体的质量流率, 从而提高系统的制冷量. 但是, 这一效应带来的好处会随着高频率下摩擦损失的增加而减弱. 值得指出的是, 提高系统的工作频率并不改变相应的利用系数, 因为在磁制冷机内传热流体的质量一定的情况下, 一个周期内的传热流体的质量流量仍然保持不变. 图4给出来系统工作频率对磁制冷机的制冷量的影响. 最大制冷量随着频率的增大而线性增加. 图5显示了工作频率对磁制冷机的性能系数COP的影响. 磁制冷系统COP随工作频率的升高而快速降低, 因为系统流动功耗 W_f 与质量流率的平方成正比. 在磁制冷机中, 高工作频率可以降低系统所需要的磁工质质量, 使系统更紧凑.

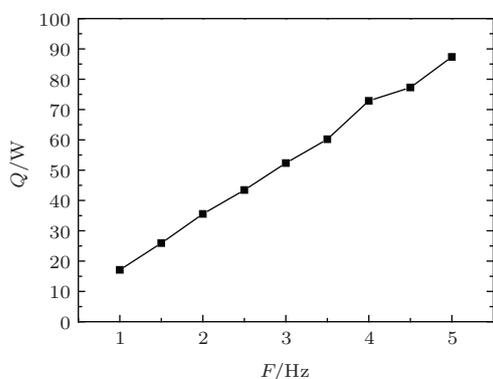


图4 制冷量随频率变化图

Fig. 4. Cooling capacity comparison of different operating frequency.

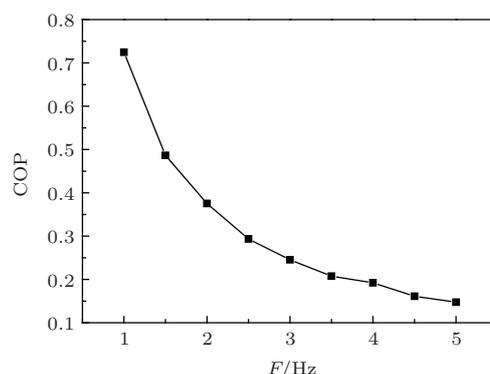


图5 系统 COP 随频率变化图

Fig. 5. COP comparison of different operating frequency.

3.2 复合磁制冷循环模拟结果与讨论

对复合磁制冷循环的模拟计算结果表明, 不同的相位角对复合磁制冷的制冷效果有重大影响. 合理的相位角能够耦合复合磁制冷循环中的斯特林制冷效应和主动式磁制冷效应, 使二者正面叠加, 获得比纯斯特林制冷更大的制冷量. 相位角 $\phi = 60^\circ$ 就是两种效果正面叠加的最佳相位. 在取最佳相位角同时, 复合磁制冷系统随着工作频率的增大制冷量增大.

3.2.1 相位角

相位角是复合磁制冷循环中的关键参数, 相位角是压缩腔最大体积与最大磁场的相位差, 体现了活塞运动与磁场变化的关系. 通过改变相位角会相应改变回热器内气体流向与磁场的关系, 合理的相位角能够使磁制冷的退磁过程与斯特林的放热过程有机结合, 使磁制冷的励磁过程与斯特林制冷的吸热过程有机结合, 既增强了斯特林制冷的回热效果又完成了磁制冷循环的冷吹期和热吹期.

图6和图7显示了4.5 MPa和5.5 MPa下复合磁制冷循环不同相位角下制冷量的变化, 虚线表示该工作频率下纯斯特林循环的制冷量. 根据图中结果显示, 在不同的系统压力和系统工作频率下相位角 $\phi = 60^\circ$ 能够获得最大的制冷量, $\phi = 0^\circ, 90^\circ$ 的时候相比纯斯特林制冷的制冷量也有一定程度的提升, 而其他相位角下的复合磁制冷循环制冷量要低于纯斯特林制冷循环的制冷量. 这说明, 在 $\phi = 60^\circ$ 的相位角下运行复合磁制冷循环能够最大程度的将主动式磁制冷和斯特林制冷两种制冷效应耦合叠加; 其他的相位角度不但不能是两种制冷

效果正面叠加,反而会使两种制冷效果相互削弱,互相抵消.

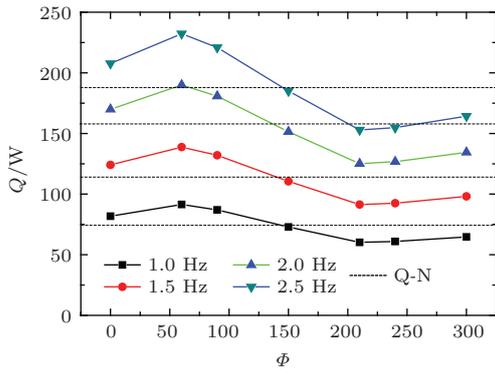


图6 4.5 MPa 不同相位角制冷量变化

Fig. 6. Q at 4.5 MPa of varied phase angle.

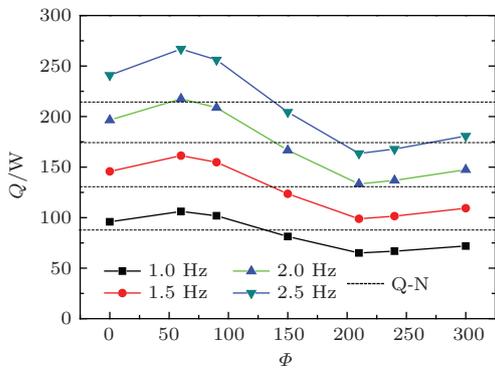


图7 5.5 MPa 不同相位角制冷量变化

Fig. 7. Q at 5.5 MPa of varied phase angle.

3.2.2 工作频率

图8反映了相位角 $\phi = 60^\circ$ 时复合磁制冷循环制冷量随系统频率变化趋势. 如图所示复合磁制冷循环制冷量随工作频率的升高而增大. 由于复合循环中的斯特林制冷的制冷量随频率增大而增大,

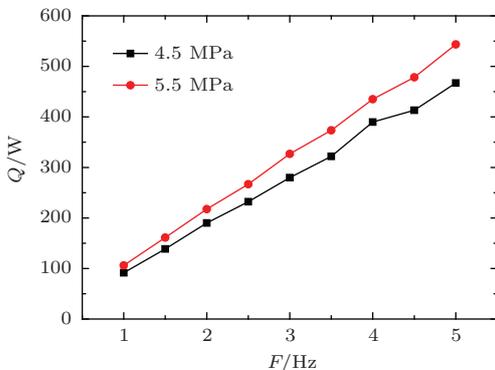


图8 制冷量随工作频率变化图

Fig. 8. Cooling capacity comparison of different operating frequency.

主动式磁制冷的制冷量也随频率增大而增加,所以在合理的相位角匹配之后会产生正面复合的效果使总制冷量也增大. 复合磁制冷循环的制冷量在 5.5 MPa 时, 1—5 Hz 的制冷量从 106 W 逐渐增大至 543 W.

4 结 论

本文在复合磁制冷机物理模型和回热器数值模拟以及磁热材料磁热效应理论可以耦合的基础上, 构建了复合磁制冷系统的整机 CFD 模型, 并对复合磁制冷机制冷性能模拟计算进行了研究. 通过模拟计算分析了利用系数和工作频率对主动式磁制冷循环制冷性能的影响. 结果分析表明, 主动式磁制冷循环制冷量随利用系数的增大而增大, 系统可以通过增大质量流率来增大利用系数, 因此在固定活塞和腔体尺寸的情况下增大系统压力可以增大利用系数从而获得更大的制冷量. 同时, 主动式磁制冷的制冷量会随工作频率的增大而增大, 然而随着频率的增大系统的轴向热扩散和摩擦损失也将增大功耗, 系统 COP 降低.

通过对复合磁制冷循环的模拟计算, 更加了解到斯特林制冷效应和磁制冷效应在磁回热器内部复合换热机理, 同时分析了不同参数对磁制冷机性能的影响, 并最终计算出两种制冷效果正面匹配的最佳相位角 $\phi = 60^\circ$ 情况下复合磁制冷机的两种制冷效应能够获得最大程度的正面叠加. 同时频率的增加也会使复合制冷系统的制冷量提升.

通过有效的模拟计算可以对复合磁制冷样机的搭建提供很好的参考和指导. 计算结果显示在高压下主动式磁制冷的制冷效果才能充分体现, 从而更充分的使磁制冷效应在纯斯特林制冷效应的基础上耦合叠加. 另一方面, 计算所得的最佳相位角度能够使斯特林制冷效果和主动式磁制冷效果获得正面的复合, 从而提高制冷量.

参考文献

- [1] Shao Y Z, Xiong Z Y, Zhang J L, Zhang J X 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 1749 (in Chinese) [邵元智, 熊正焯, 张介立, 张进修 1996 物理学报 **45** 1749]
- [2] Wang Y T, Liu Z D, Yi J, Xue Z Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 056102 (in Chinese) [王永田, 刘宗德, 易军, 薛志勇 2012 物理学报 **61** 056102]
- [3] Bjork R, Bahl C R H, Katter M 2010 *J. Magn. Magn. Mater.* **322** 3882

- [4] Nellis G F, Smith J L Jr 1996 *Advances in Cryogenic Engineering* **41** 1665
- [5] Yayama H, Hatta Y, Makimoto Y, Tomokiyo A 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** 4220
- [6] Kim Y, Jeong S 2011 *Int. J. Refrig.* **34** 204
- [7] Zhang H, He X N, Shen J, Gong M Q, Wu J F 2013 *Journal of Engineering Thermophysics* **34** 5 (in Chinese) [张弘, 和晓楠, 沈俊, 公茂琼, 吴剑峰 2013 工程热物理学报 **34** 5]
- [8] He X N, Gong M Q, Zhang H, Shen J, Dai W, Wu J F 2013 *Journal of Engineering Thermophysics* **34** 1997 (in Chinese) [和晓楠, 公茂琼, 张弘, 沈俊, 戴巍, 吴剑峰 2013 工程热物理学报 **34** 1997]
- [9] He X N, Gong M Q, Zhang H, Shen J, Wu J F 2013 *Cryo. & Supercond.* **41** 13 (in Chinese) [和晓楠, 公茂琼, 张弘, 沈俊, 吴剑峰 2013 低温与超导 **41** 13]
- [10] He X N, Gong M Q, Zhang H, Dai W, Shen J, Wu J F 2013 *Int. J. Refrig.* **36** 1465
- [11] Nielsen K K, Bahl C R H, Smith A, Pryds N, Hattel J 2010 *Int. J. Refrig.* **33** 753
- [12] Nielsen K K, Tusek J, Engelbrecht K, Schopfer S, Kitano A, Bahl C R H, Smith A, Pryds N, Poredos A 2010 *Int. J. Refrig.* **34** 603
- [13] Silva D J, Ventura J, Araujo J P, Pereira A M 2014 *Applied Energy* **113** 1149
- [14] Chiba Y, Smaili A, Mahmed C, Balli M, Sari O 2014 *Int. J. Refrig.* **37** 36
- [15] Lionte S, Vasile C, Siroux M 2015 *Appl. Therm. Eng.* **75** 871
- [16] Li P, Gong M Q, Yao G H, Wu J F 2006 *Int. J. Refrig.* **29** 1259
- [17] Yu B F, Zhang Y, Gao Q, Yang D X 2006 *Int. J. Refrig.* **29** 1348
- [18] Tao W Q 2001 *Numerical Heat Transfer*(Second Edition) (Xian: Xi'an Jiaotong University Press) p15 (in Chinese) [陶文铨 2001 数值传热学(第二版)(西安: 西安交通大学出版社) 第15页]

Numerical simulation of a hybrid magnetic refrigeration combined with high pressure Stirling regenerative refrigeration effect*

Gao Xin-Qiang¹⁾²⁾ Shen Jun^{2)†} He Xiao-Nan²⁾ Tang Cheng-Chun^{1)‡} Dai Wei²⁾ Li Ke²⁾
Gong Mao-Qiong²⁾ Wu Jian-Feng²⁾

1) (School of Material Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

2) (Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 17 April 2015; revised manuscript received 23 June 2015)

Abstract

Magnetic refrigeration is a cooling method based on the magnetocaloric effect, which uses solid magnetocaloric materials as refrigerant, and helium, water or other fluid as heat transfer fluids. Stirling refrigeration is a kind of mature gas regenerative cooling method, using helium gas as the refrigerant. These refrigerations have similar cycling characteristics, and are both safe, environmental-friendly and high efficient cooling methods. Therefore, a hybrid magnetic refrigerator combined with Stirling gas refrigeration effect is proposed and designed. In our previous works for hybrid magnetic refrigeration, numerical simulation and experimental performance of the low-pressure hybrid magnetic refrigerator was carried out, and the cycling mechanism of hybrid magnetic refrigeration was also figured out. In this study, a numerical model for the high-pressure hybrid magnetic refrigeration cycle is established. The magnetic refrigeration materials are utilized as the regenerator matrix for both gas Stirling and active magnetic regenerative refrigeration in this model. Effects of gas Stirling and active magnetic regenerative refrigeration are combined to build a kind of high efficient refrigeration cycle. Ansys Fluent software is applied in this paper. Based on the physical model of hybrid refrigerator and the theories of magnetocaloric effect and numerical calculation of regenerator, computational fluid dynamics (CFD) model of high-pressure hybrid magnetic refrigerator is established. This paper describes the internal heat transfer mechanism of Stirling and magnetic refrigeration effect in an active regenerator. Some parameters of the model such as working frequency and utilization are analyzed and the best phase angle is figured out in order to couple these two cooling effects positively. Simulation results show that Stirling and magnetic cooling effects can be coupled positively at phase angle of 60° . Results also show that with increasing system pressure, which means to increase the utilization of the system, the system frequency can enhance the cooling performance of the system as well as improve the coefficient of performance (COP) of it. The results and analysis of the numerical model will be helpful for the construction of experimental prototype in our future work.

Keywords: numerical simulation, magnetic refrigeration, hybrid systems

PACS: 02.60.Cb, 75.30.Sg, 42.82.Fv

DOI: [10.7498/aps.64.210201](https://doi.org/10.7498/aps.64.210201)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51322605, 51271192).

† Corresponding author. E-mail: jshen@mail.ipc.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: tangcc@hebut.edu.cn