磁流体强制对流传热数值计算

史晓玉[1*]，王丽丽[1]，李晓南[1]
中国科学院电工研究所，北京 100190
*E-mail:shixiaoyu@mail.iee.ac.cn

摘要：纳米磁流体具有高靶向性和可控性，在药物靶向释放，磁分离以及微流控领域中引起广泛关注。磁流体是在基础流体如水、乙二醇等溶液中分散直径小于 20 nm 的磁性粒子，其作为一种新型的高传热性能的能量输送媒介，在其应用过程中传热性能是不可忽略的。国内外许多学者对磁性流体流动与强化换热机理进行了许多研究，取得了大量的研究成果。磁流体由于具有磁性和流动性，在外加磁场作用下，利用磁场调控能够有效增强换热效果。基于此本文在稳态条件下，利用磁场、流体和传热多物理场耦合方式，针对二维通道内磁性流体进行数值仿真计算研究磁流体的传热性能。

关键词：磁流体，对流传热，

1. 引言

磁流体是一类兼具磁体的磁性和液体流动性的功能流体，在外加磁场作用下，磁流体呈现出磁粘效应、磁热效应、磁光效应等特性，已在机械密封、航空航天、生物工程等领域得到了成功应用[1]。近来，国内外研究人员相继开展了磁流体传热性能的研究，比如磁流体热磁对流、沸腾和能量转换等[2-5]，研究表明磁流体具有独特的流动与能量传递性能，应用外加磁场可以控制磁流体的流动与能量传递过程，显示了磁流体在热科学领域有着广阔的应用前景。

2. 理论分析

磁性流体具有可忽略的导电性[6]，麦克斯韦方程组的静态形式

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = 0$$

式中 $\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度，$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度，二者关系如下：

$$\boldsymbol{B} = \mu_0(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M})$$

其中 μ_0 为真空中磁导率，大小为$4\pi \times 10^{-7} H/m$, $\boldsymbol{M}$ 为磁性材料的磁化强度等于 $\boldsymbol{B}_r / \mu_0$，此处 $\boldsymbol{B}_r$ 为永磁体的剩余磁通密度，在磁场 $\boldsymbol{H}$ 作用下，腔内根据朗之万初始磁化率可表示为

$$\chi = \chi_L(1 + \chi_L / 3)$$

流体中磁场可表示为

$$\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu_0(1+\chi)}$$

鉴于磁流体为不可压缩流体 ，则流体连续性方程可简化为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0$$

常粘度条件下不可压缩流体的动量守恒方程表示为

$$\rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \boldsymbol{u} + \boldsymbol{f}$$

热方程表示为

$$(\boldsymbol{u} \cdot \nabla)T = \kappa \nabla^2 T$$

其中 ρ 为密度，**u** 为速度，p 为压力，η 为粘度系数，κ 为热扩散系数，$\boldsymbol{f}$ 为作用于流体的任何附加力对于存在重力的热磁流，力项 $\boldsymbol{f}$ 包括浮力

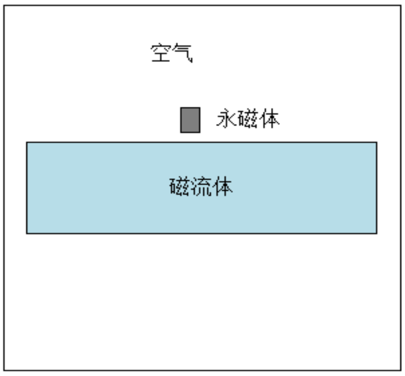
$$\boldsymbol{f}_b = \rho\ \beta\ \delta T\boldsymbol{g}$$

其中 $\boldsymbol{g}$ 是重力加速度，δT 是温度差，密度 ρ 和体积膨胀系数β。$\boldsymbol{f}$ 还包括开尔文体力

$$\boldsymbol{f}_k = \mu_0(\boldsymbol{M}\cdot\nabla)\boldsymbol{H} + \frac{\mu_0}{2}\nabla\times(\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H})$$

3. 数值模型

模块包括磁场无电流、流体的层流和传热物理场。



图一 模型结构

表一 参数列表

名称	表达式	值
体积分数	ϕ	0.1
磁矩	m0	2.93e-25J*m/A
玻尔兹曼常数	kb	1.38e-23J/K
初始温度	T0	295K
磁流体饱和磁化强度	Md	423kA/m
粒子数密度	n	μ_0 ϕMd/m0
初始朗之万磁化率	χ	n*m0^2/(3* μ_0 *kb*T0)
磁流体磁化率	χ'	$\chi(1+\chi/3)$
边界温度	T	295K
入口流速	v	0.1m/s

3.1 磁场无电流模块

物理场的稳态方程

$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$$

$$\boldsymbol{H} = -\nabla V_m$$

边界条件，空气域边界设置为磁绝缘$\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{B}=0$。

磁体区域稳态方程为

$$\boldsymbol{H} = -\nabla V_m$$
$$\boldsymbol{B} = \mu_0\mu_r\boldsymbol{H} + \boldsymbol{B}_r$$

剩余磁通密度为 0.3T。

3.2 流体模块

物理场方程

$$\rho(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u} = \nabla\cdot[-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + \rho\mathbf{g}$$
$$\nabla\cdot(\rho\mathbf{u}) = 0$$
$$\mathbf{K} = \mu\left(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^{\mathrm{T}}\right) - \frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\mathbf{u})\mathbf{I}$$

流体区域左边界为入口，右边界为出口，上下边界为无滑移壁。

流体在磁场下的体积力为 Fx 和 Fy，为 $\boldsymbol{f}_k = \mu_0(\boldsymbol{M}\cdot\nabla)\boldsymbol{H} + \frac{\mu_0}{2}\nabla\times(\boldsymbol{M}\times\boldsymbol{H})$ 的分量。

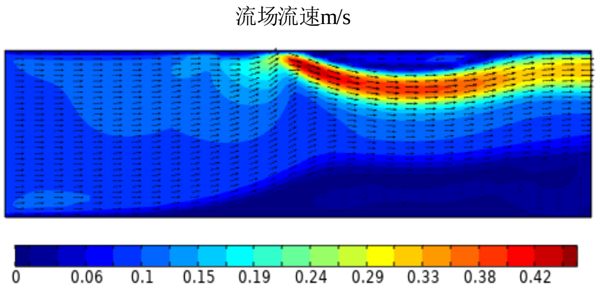
3.3 传热模块

物理场方程

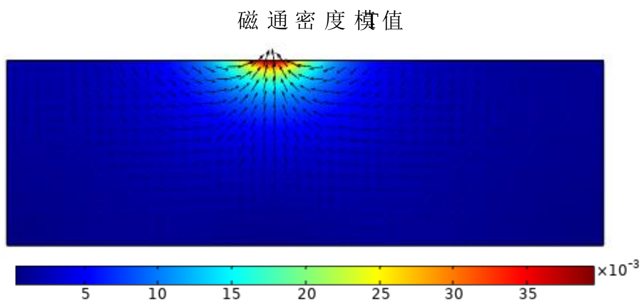
$$d_z\rho C_p\boldsymbol{u}\cdot\nabla T + \nabla\cdot\boldsymbol{q} = d_z Q + Q_0$$
$$\boldsymbol{q} = -d_z k\nabla T$$

初始温度设置为 293.15K,流体区域左边界设置为温度边界，右边界设置为流出，上下边界设置为热通量边界。

4.　仿真结果

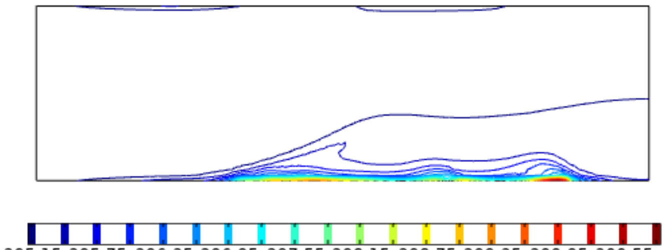


图二 流体区域流速分布



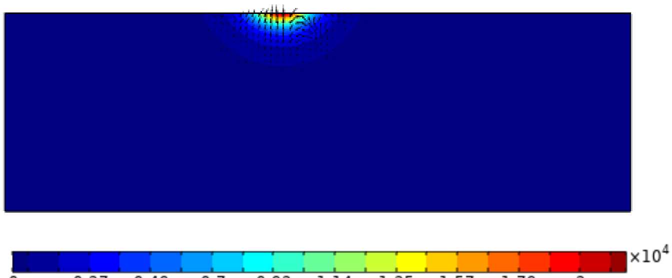
图三 流体区域磁场分布

温度K



图四 流体区域温度分布

体积力N/m^3



图五 流体区域体积力分布

5. 结论

建立外加磁场作用下的磁流体对流传热特性，与重力同向的磁场力可以有效强化传热,并且传热的效果随磁场力的增大而增强相反的磁场力则削弱原先存在的自然对流而磁场力方向的变化又会对自然对流的流态产生不同的影响。对于不同粒子浓度的磁流体,在一定的范围内,适当增加粒子浓度可以增大磁流体的饱和磁化强度,达到更好的传热效果,而过大的浓度导致粘度过大,从而阻碍流动和传热。

参考文献

[1]J Odenbach S. Ferrofluids. Springer, Berlin, 2002

[2]J Bashtovoi V G, Challant G, Volkova O Yu. Boiling Heat Transfer in Magnetic Fluids. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1993, 122: 305-308

[3] Blums E. Heat and Mass Transfer Phenomena. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252: 189-193

[4]Ganguly R, Sen S, Puri I K. Thermomagnetic Convection in a Square Enclosure Using a Line}Dipole. Physics of Fluids, 2004, 16: 2228-2236

[5] Ganguly R, Sen S, Puri I K. Heat Transfer Augmentation Using a Magnetic Fluid Under the Influence of a Line Dipole. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2004, 271: 63-73

[6]Peter S.B. Szabo, Wolf-Gerrit Früh， The transition from natural convection to thermomagnetic convection of a magnetic fluid in a non-uniform magnetic field,Journal of Magnetism and Magnetic Materials 447 (2018) 116–123