

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20210927011

文章编号:1672-9331(2023)01-0095-09

引用格式:姜昌伟,郑佩佳,谢云峰,等.磁场强化竖直平板自然对流传热特性研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(1):95-103.

Citation: JIANG Changwei, ZHENG Peijia, XIE Yunfeng, et al. Research on heat transfer characteristics of natural convection of vertical plate strengthened by magnetic field[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(1): 95-103.

磁场强化竖直平板自然对流传热特性研究

姜昌伟, 郑佩佳, 谢云峰, 曹志超, 罗铭宏

(长沙理工大学 能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】研究梯度磁场对竖直平板自然对流散热的影响,以提供一种强化竖直平板对流散热的新方法。【方法】构建磁致自然对流数学模型并编制相应的有限元程序;分析不同磁体剩余磁通密度、不同磁体位置情况下磁场强化竖直平板自然对流的传热规律;比较有无梯度磁场情况下竖直平板自然对流的传热特征。【结果】当磁体剩余磁通密度 $B_r > 1\text{ T}$ 时,竖直平板的对流传热能力随着磁体剩余磁通密度的增大而增强;当磁体位于竖直平板下端时,磁体对自然对流散热影响最大;两组磁体情况下比单组磁体情况下竖直平板的对流散热能力强。【结论】施加磁场可以强化或控制竖直平板自然对流散热。

关键词: 热磁对流; 竖直平板; 传热特性; 梯度磁场; 磁体位置

中图分类号: TK124

文献标志码: A

0 引言

自然对流散热具有噪声小、成本低、功耗低、占用空间小等优点。许多电子设备、热交换器、核反应堆、太阳能利用与空间工程等都是通过自然对流散热进行冷却的,因此,对自然对流散热机理进行研究显得非常重要。许多学者通过理论分析方法、数值模拟方法与试验法开展发热壁面的自然对流散热机理研究^[1-3]。

王迪等^[4]利用数值模拟方法研究了涡流发生器的布置方式与攻角对散热器散热性能的影响,发现当涡流发生器的间距为40 mm、攻角为 15° 时散热效果最好。李开继等^[5]研究了在侧壁面正弦加热条件下流体自然对流的动力学特性,结果表明,水平与垂直最大流速、Nusselt数均随着格拉晓夫数的增加而增加。SHIM等^[6]用数值模拟方法研究了倾斜热表面上倾斜针肋片的混合对流传热性

能,发现正倾斜翅片的传热性能优于负倾斜翅片的。

自然对流的散热能力相对较弱。当自然对流散热不能满足设备散热需求时,通过施加磁场形成热磁对流可以有效强化自然对流散热^[7]。热磁对流的机理主要是:顺磁性流体如氧气、空气等在磁场作用下形成Kelvin力,Kelvin力与重力方向一致可以强化自然对流散热,两者方向相反则会抑制自然对流散热^[8]。

随着能够提供高梯度磁场磁性材料的快速发展,热磁对流现象越来越引起人们的兴趣^[9]。SONG等^[10]用数值模拟的方法研究了磁场对方形封闭空间内氧气热磁对流的影响。当磁体靠近热壁面时,方腔整体的传热性能随着磁体磁场强度的增大而增大;而当磁体靠近冷壁面时,方腔整体的传热性能随着磁体磁场强度的增大而先增大后减小。王成安等^[11]发现当顺磁性流体为吸收发射性半透明灰介质时,磁场与热辐射均对流动换热存在明显的强化作用。KANEDA等^[12]用数值模拟

收稿日期:2021-09-27;修回日期:2021-10-28;接受日期:2021-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572056、51674042)

通信作者:姜昌伟(1973-)(ORCID:0000-0001-9728-6209),男,教授,主要从事传热传质理论方面的研究。

E-mail:jiangcw@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

的方法研究了永磁体对顺磁性流体自然对流的影响。将永磁体放置于受热垂直壁的后面,靠近磁体上边缘的顺磁性流体的传热能力得到了增强,而靠近磁体下边缘的顺磁性流体的传热能力有所减弱。与此同时,若增大磁感应强度,则壁面热流密度会随之增大。

上述研究主要关注的是磁场对封闭腔体内顺磁性流体对流传热的影响,但实际上几乎所有的自然对流散热都存在于开放空间中。因此,对水平平板、竖直平板等自然对流散热进行研究就显得尤为重要。周仲凯等^[13]、PRADHAN等^[14]研究了磁场作用下水平或竖直平板附近导电液体边界层传热性能的变化规律,发现 Nusselt 数和表面摩擦系数均随着磁场强度的增大而减小。

本文主要研究磁体对竖直平板附近空气热磁对流传热特性的影响,通过探究不同磁体剩余磁通密度、不同磁体位置情况下自然对流散热的变化规律,为开放空间中发热竖直平板相关工程的应用场景提供一个新思路。

1 物理模型

计算模型与边界条件的设置如图1所示。在模型中,将磁体置于均匀发热竖直平板的背部。竖直平板的长度 L 为 480 mm,厚度 d 为 3 mm。空气域的宽度 D 为 300 mm。磁体长度 L_1 为 30 mm,厚度 d_1 为 10 mm,磁体下边缘距平板下沿的距离为 z_1 (z_1 的变化区间为 0~400 mm)。 g 为重力加速度,其方向为 z 轴负方向。

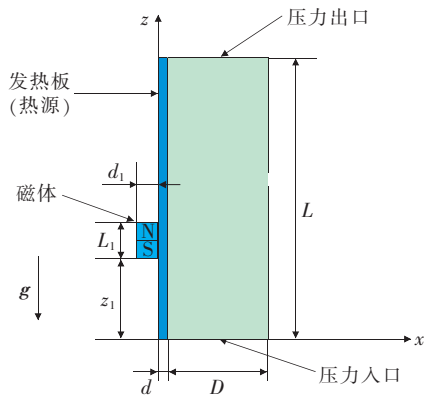


图1 计算模型示意图

Fig. 1 Computation model and boundary conditions

2 数学模型

2.1 控制方程

根据文献[10],磁场作用下顺磁性流体(空气)热磁对流的 Kelvin 力可表示为:

$$f_m = \frac{\rho\chi\nabla B^2}{2\mu_m} \quad (1)$$

式中: f_m 为 Kelvin 力, N/m^3 ; χ 为质量磁化率, m^3/kg ; B 为磁感应强度, T; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; μ_m 为磁导率, H/m。

顺磁性流体热磁对流满足下列控制方程:

1) 连续性方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

2) 动量方程:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\rho\chi}{2\mu_m} \nabla B^2 + \rho \mathbf{g} \quad (3)$$

3) 能量方程:

$$\rho c_p (\mathbf{u} \cdot \nabla) T = \lambda \nabla^2 T \quad (4)$$

式中: \mathbf{u} 为速度矢量, m/s; μ 为空气运动黏度, $kg/(m \cdot s)$; c_p 为定压比热容, $kJ/(kg \cdot K)$; λ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$; T 为温度, K; p 为压强, Pa。

永磁体产生的磁场可以通过 Maxwell 方程组来描述:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (6)$$

式中: B 为磁感应强度, T; H 为磁场强度, A/m。

磁感应强度 B 和磁场强度 H 通过下述磁性材料的本构关系相关联:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (7)$$

式中: B_r 为磁体剩余磁通密度, T; μ_0 为真空磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; μ_r 为相对磁导率。

空气作为一种线性材料,其相对磁导率 μ_r 为 1。其本构关系可表达如下:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (8)$$

磁场强度 H 可由磁标势 V_m 表示,即:

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m \quad (9)$$

式中: V_m 为磁标势, A。

将式(7)和式(9)代入式(5)中,得到:

$$\nabla \cdot (-\mu_0 \mu_r \nabla V_m + \mathbf{B}_r) = 0 \quad (10)$$

通过求解磁通量守恒方程来计算磁标势 V_m ,

从而计算出磁场强度 H ,并最终得到竖直平板周围的磁场分布。

2.2 边界条件

竖直平板热流密度 q 为 $2\,000\text{ W/m}^2$ 。空气域上下表面分别为压力入口和压力出口,所受压力为环境大气压力。

2.3 结果描述

本研究采取竖直平板的平均温度与 Nusselt 数作为衡量竖直平板散热性能的指标。局部 Nusselt 数可由下式计算:

$$Nu = \frac{L}{T - T_{\text{ref}}} \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (11)$$

平均 Nusselt 数可由下式计算:

$$Nu_{\text{ave}} = \frac{1}{L} \int_L Nu dz \quad (12)$$

式中: Nu 、 Nu_{ave} 分别为局部和平均 Nusselt 数; T_{ref} 为参考温度,其值为 300 K 。

2.4 网格独立性与数值方法验证

2.4.1 网格独立性验证

采用有限元方法对模型进行求解,并编制相应的有限元计算程序。首先,进行网格的独立性验证。将单组磁体置于竖直平板下端($z_1=0\text{ mm}$),磁体剩余磁通密度 $B_r=4\text{ T}$ 。网格独立性验证结果见表1。从表1可以看出,在4组不同的网格数量下,数值模拟得到的发热面平均温度的相对误差均小于4%。为了保证计算的准确性,同时节省计算资源,数值模拟网格数目选用4 293个。

表1 网格独立性验证结果

Table 1 Verification results of grid independence

网格数量	发热面平均温度/℃	相对误差/%
2 150	318.33	3.297
3 706	307.42	-0.243
4 293	308.17	-
5 745	307.77	-0.130

2.4.2 模型准确性验证

采用两组基准模型对本研究所建的模型进行准确性验证:

① 竖直平板自然对流散热模型^[1]。采用竖直平板对流传热系数经验关系式作为验证标准,即:

$$Nu = 0.59(Ra)^{0.25}, 10^4 < Ra < 10^9 \quad (13)$$

式中: Ra 为 Rayleigh 数。

② 非均匀磁场下方腔内氧气热磁对流模

型^[10]。本研究热磁对流的 Kelvin 力基于该模型,具体见公式(1)。

图2所示为本研究得到的竖直平板自然对流散热数值模拟结果与文献[1]模拟结果的对比情况。分析图2可知,两者的相对误差小于4%。图3所示为本研究及文献[10]模拟得到的非均匀磁场下方腔内氧气热磁对流流线与温度场的分布情况。从图3可以看出,两者基本一致。

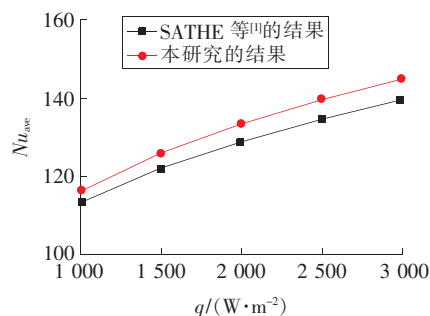


图2 竖直平板自然对流散热结果对比

Fig. 2 Result comparison of natural convection heat dissipation of the vertical plate

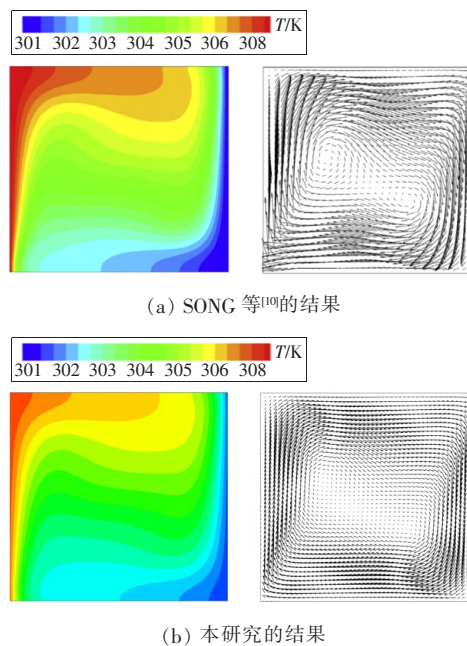


图3 非均匀磁场下方腔内氧气热磁对流结果对比

Fig. 3 Result comparison of thermal magnetic convection of oxygen in square cavity under non-uniform magnetic field

3 结果分析

3.1 单组磁体位置对竖直平板传热特性的影响

图4所示为当磁体剩余磁通密度为4 T时,单

组磁体位置对竖直平板附近磁场分布的影响。从图4可以看出,在磁体附近出现了强梯度磁场,在磁体上下两角边缘处磁场梯度最大,而在离磁体较远的区域,磁场梯度急剧减小。

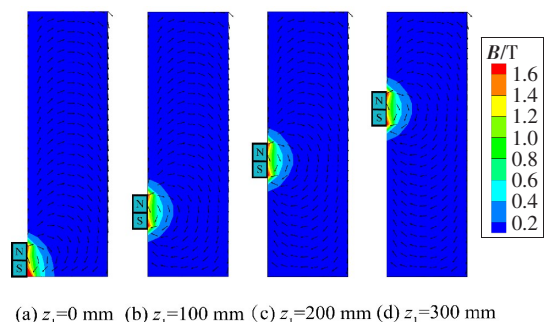


图4 单组磁体位置对竖直平板附近
磁场分布的影响($B_r=4$ T)

Fig. 4 Influence of single group of magnet position on magnetic field distribution near the vertical plate ($B_r=4$ T)

图5所示为当磁体剩余磁通密度为4 T时,单组磁体位置对竖直平板附近空气速度场的影响。从图5(a)可以看出,当仅存在重力场时,从竖直平板下端开始,层流薄层的厚度随着高度的增加而增加。在竖直平板附近,空气速度的分布呈现出两头小、中间大的特点;在靠近壁面处,由于竖直平板的黏滞作用,空气速度为0;在边界层外缘,温度不均匀的作用消失,空气速度也为0;在接近平板的中间处,空气速度出现峰值。从图5(b)可以看出,在磁场的作用下,由于Kelvin力和重力的协同作用,空气速度场发生了变化。与纯重力场相比,在竖直平板入口处,空气速度的边界层更薄一些,同时空气速度在竖直平板底部和顶部均出现了峰值,且高速区域也较无磁场时更大一些。从图5(d)可以看出,将磁体位置由 $z_1=0$ mm移到 $z_1=400$ mm时,由于热磁对流减弱,空气速度的峰值区域也相应缩小。

图6所示为当磁体剩余磁通密度为4 T时,单组磁体位置对竖直平板附近空气温度场的影响。从图6(a)可以看出,当仅存在重力时,在竖直平板附近出现了温度剧烈变化的薄层。在施加磁场后,空气在Kelvin力与重力的共同作用下发生了流动。从图6(b)可以看出,当磁体位于 $z_1=0$ mm时,与无磁场的情况相比,在靠近竖直平板的入口区域,温度边界层变得更薄,同时竖直平板附

近的空气温度从下到上逐渐升高,平板表面更多的热量被冷空气带走,高温区也非常薄。分析图6(b)~6(d)可以看出,在磁体从底部向上移动的过程中,平板下部的温度梯度逐渐减小。因此,磁浮升力和重力浮升力也相应变小,从而导致冷空气带走的热量变少,竖直平板的平均温度有所升高。图6(d)中的温度与图6(a)中的相比,变化较小,说明当 $z_1=400$ mm时,磁场引起的热磁对流的影响比较微弱。

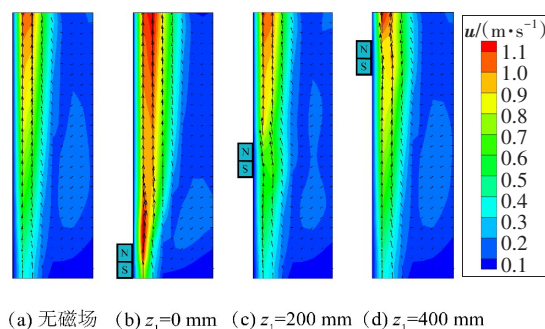


图5 单组磁体位置对竖直平板附近
空气速度场分布的影响($B_r=4$ T)

Fig. 5 Influence of single group of magnet position on air velocity field distribution near the vertical plate ($B_r=4$ T)

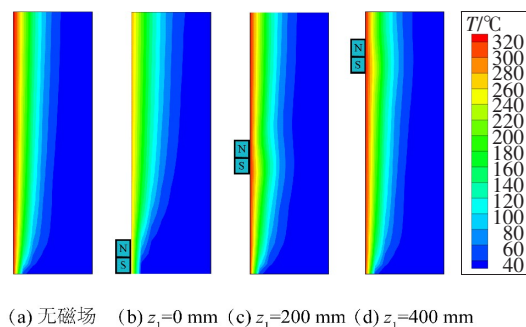


图6 单组磁体位置对竖直平板附近
空气温度场分布的影响($B_r=4$ T)

Fig. 6 Influence of single group of magnet position on air temperature field distribution near the vertical plate ($B_r=4$ T)

图7所示为不同磁体剩余磁通密度下单组磁体位置对竖直平板平均温度的影响。从图7可以看出,磁体剩余磁通密度的增大促进了竖直平板附近空气的热磁对流,发热面平均温度降低得较明显。在磁体由平板底部向上部移动的过程中,磁浮升力的作用逐渐变小。在 $B_r=1$ T、 $z_1=400$ mm

时,发热面平均温度比无磁场时的稍高,此时磁浮升力对竖直平板的散热起到了轻微的抑制作用。这是因为当磁体剩余磁通密度较小时,温差产生的磁浮升力与重力浮升力相互抵消,此时重力起主要作用。当磁体剩余磁通密度 $B_r > 1$ T 时,重力作用相对减小,磁力开始发挥主要作用,热磁对流效果因此得到改善。在 $B_r = 4$ T、 $z_1 = 0$ mm 时,热磁对流效果最明显,发热面平均温度相较于无磁场时的下降了 8.58°C 。

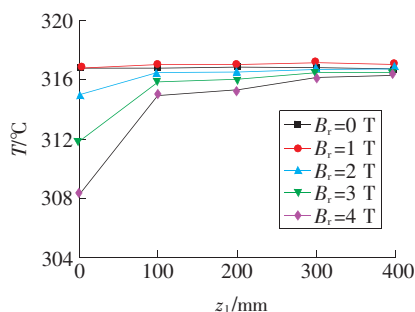


图7 单组磁体位置对竖直平板平均温度的影响

Fig. 7 Influence of single group of magnet position on average temperature of the vertical plate

图8所示为当磁体剩余磁通密度为4 T时,单组磁体位置对竖直平板局部表面传热系数的影响。从图8可以看出,局部表面传热系数 h_z 随着磁体高度的增加而减小。当磁体位置由 $z_1 = 0$ mm 变化到 $z_1 = 400$ mm 时,磁体对其周围局部区域的空气流动产生了扰动,磁体下部附近区域的局部表面传热系数被抑制,磁体上部附近区域的局部表面传热系数得到增强。这是因为来自磁体上缘的磁浮升力增强了空气的对流,而来自磁体下缘的磁浮升力抑制了传热。当磁体位于竖直平板下端时,磁体上边缘附近区域的磁浮升力由于温差大而变得较大;磁体下边缘附近区域的磁浮升力由于温差小而变得很小。将磁体移到较高位置时,靠近磁体顶部边缘的磁浮升力由于温差变大而增强;靠近磁体底部边缘的磁浮升力由于温差变大,抑制作用也相应增强,但磁浮升力的增强效果大于抑制作用起到的效果。

图9所示为单组磁体位置对竖直平板平均 Nusselt 数的影响。从图9可以看出,当 $B_r < 1$ T 时,平均 Nusselt 数随着剩余磁通密度的增大而减小;当 $B_r > 1$ T 时,平均 Nusselt 数随着剩余磁通密度的增大而增大;同时,随着磁体位置高度的增加,平

均 Nusselt 数逐渐减小,且减小趋势逐渐变缓。在 $B_r = 4$ T、 $z_1 = 0$ mm 时,相较于无磁场的情况,平均 Nusselt 数提高了 3.03%。

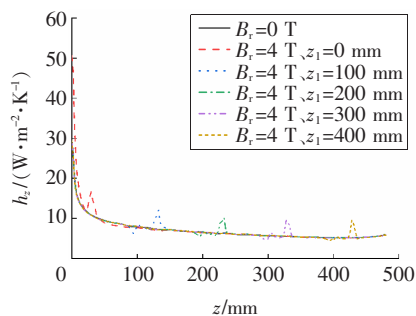


图8 单组磁体位置对竖直平板局部表面传热系数的影响

Fig. 8 Influence of single group of magnet position on the local surface heat transfer coefficient of the vertical plate

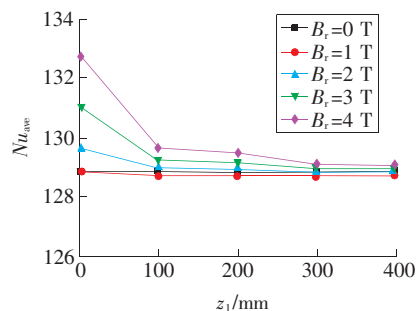


图9 单组磁体位置对竖直平板平均 Nusselt 数的影响

Fig. 9 Influence of single group of magnet position on average Nusselt number of the vertical plate

3.2 两组磁体位置对竖直平板传热特性的影响

上面讨论了单组磁体的强化换热效果,下面讨论两组磁体对竖直平板对流传热的影响。在分析过程中,固定其中一个磁体的位置为 $z_2 = 0$ mm,而另一个磁体的位置 z_3 在 100~400 mm 范围内变化。

图10所示为当磁体剩余磁通密度为4 T时,两组磁体位置对竖直平板附近空气速度场分布的影响。当两组磁体的位置 z_2 、 z_3 分别为0和100 mm 时,相比于单组磁体的情形,竖直平板入口处的空气速度边界层变得更薄,空气速度场的速度整体上更大。而当另一个磁体逐渐向上移动时,空气速度场的速度缓慢减小。这是因为单个磁体对自然对流影响较大的位置为入口处,整体速度增加多少取决于第二个磁体所在的位置。因此,两个

磁体影响流体流动换热的最佳位置为 $z_2=0$ mm、 $z_3=100$ mm。

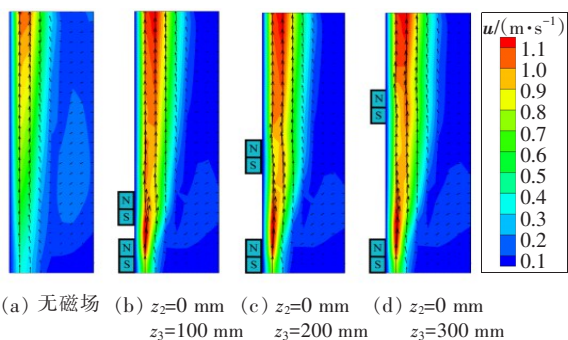


图10 两组磁体位置对竖直平板附近空气速度场分布的影响($B_r=4$ T)

Fig. 10 Influence of two groups of magnets position on air velocity field distribution near the vertical plate ($B_r=4$ T)

图11所示为磁体剩余磁通密度为4 T时,两组磁体位置对竖直平板附近空气温度场分布的影响。当两组磁体的位置 z_2 、 z_3 分别为0和100 mm时,在两组磁体附近磁浮升力和重力浮升力的共同作用下,竖直平板周围的温度场发生了明显变化。与图11(a)无磁场的情况相比,在图11(b)中靠近竖直平板入口处,竖直平板被冷空气冲刷后,高温区域变得非常薄,甚至比单组磁体作用下的高温区更薄一些。从图11(c)~11(d)可以看出,增加磁体数目可以明显改善竖直平板的散热效果。

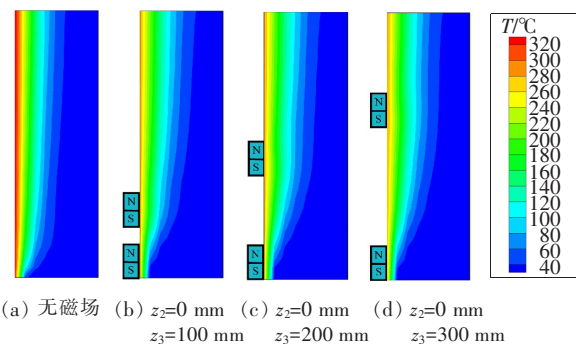


图11 两组磁体位置对竖直平板附近空气温度场分布的影响($B_r=4$ T)

Fig. 11 Influence of two groups of magnets position on air temperature field distribution near the vertical plate ($B_r=4$ T)

图12所示为不同剩余磁通密度下两组磁体位置对竖直平板平均温度的影响(图中,A表示 $z_2=0$ mm、 $z_3=100$ mm;B表示 $z_2=0$ mm、 $z_3=200$ mm;C表示 $z_2=0$ mm、 $z_3=300$ mm;D表示 $z_2=0$ mm、 $z_3=400$ mm)。

从图12可以看出,一方面,磁浮升力随着剩余磁通密度的增大而增大,竖直平板对流传热能力也随之增强,导致竖直平板平均温度有所降低。另一方面,在相同的剩余磁通密度下,当一组磁体固定于竖直平板下端,而另一组磁体沿着竖直平板向上移动时,竖直平板的平均温度基本上无明显变化。这主要是因为当磁体位于竖直平板底部时,磁体对竖直平板对流传热的影响较大,随着磁体的向上移动,热磁对流能力缓慢减弱。当 $z_2=0$ mm、 $z_3=100$ mm、 $B_r=4$ T时,与无磁场情况相比,竖直平板的平均温度下降了9.91 °C。

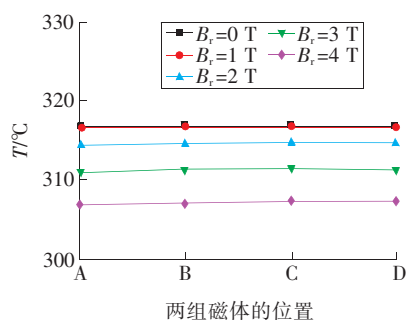


图12 两组磁体位置对竖直平板平均温度的影响

Fig. 12 Influence of two groups of magnets position on average temperature of the vertical plate

图13所示为磁体剩余磁通密度为4 T时,两组磁体位置对竖直平板局部表面传热系数的影响。与单组磁体情况不同的是,两组磁体在不同的位置同时产生磁场力,这样就改变了竖直平板这两个位置处的局部表面传热系数。从图13可以看出,两组磁体情况下的竖直平板局部表面传热系数比单组磁体情况下的稍大。

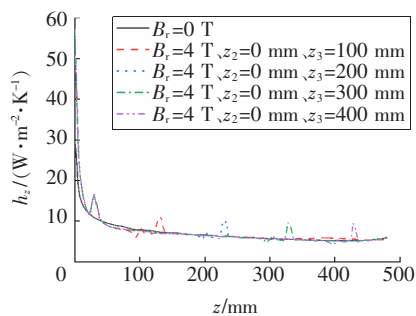


图13 两组磁体位置对竖直平板局部表面传热系数的影响

Fig. 13 Influence of two groups of magnets position on local surface heat transfer coefficient of the vertical plate

图14所示为不同剩余磁通密度下两组磁体位置对竖直平板平均Nusselt数的影响(图中A、B、C、D的含义与图12中的相同)。从图14可以看出,在相同的剩余磁通密度下,改变磁体位置对竖直平板平均Nusselt影响很小。这是因为对竖直平板对流传热影响最大的是平板底部的磁体,在另一块磁体向上移动的过程中,靠近该磁体顶部边缘的磁浮升力增强,靠近磁体底部边缘的磁浮升力缓慢减弱,这就从整体上减弱了对对流传热能力的增强作用。但随着剩余磁通密度的增大,这种上缘浮力增强的效果慢慢超过下缘浮力抑制的效果,这使得平板平均Nusselt数随之升高,并在 $B_r=4\text{ T}$ 、 $z_2=0\text{ mm}$ 、 $z_3=100\text{ mm}$ 时达到最大。与无磁场情况相比,平板的平均Nusselt数升高了3.54%。

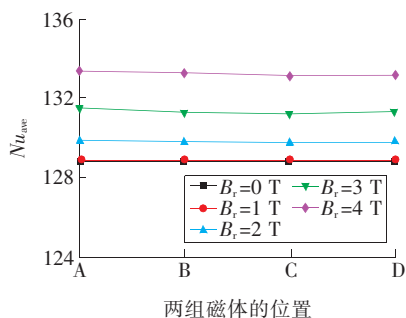


图14 两组磁体位置对竖直平板平均Nusselt数的影响

Fig. 14 Influence of position of two groups of magnets on average Nusselt number of the vertical plate

4 讨论

以往的研究主要侧重于封闭空间内的热磁对流,而对开放空间内热磁对流的研究较少。因此,本研究的创新之处在于通过将磁体放置于竖直平板背面,探究改变单组磁体位置、两组磁体位置和剩余磁通密度对竖直平板附近空气自然对流的影响,并找到最优的布置方法,为竖直平板下的自然对流传热提供一种新的解决方案。研究结果发现,在单组磁体作用下热磁对流的效果不是随着剩余磁通密度的增加而单调地增加,它存在这样一个临界点:在弱磁时自然对流受到轻微抑制,在强磁时自然对流得到增强。同时,本研究还对平均温度的模拟结果进行了分析,这是平板散热研究中所需关注的问题。

本研究仅对竖直平板的简单模型进行了研究,研究成果可应用于电子设备中发热面板的冷却、电池散热及核热安全等方面。实际上,由于不同工程研究的侧重点不同,实际的研究模型也存在差异,所以磁场影响自然对流模型也会随着应用领域不同而发生改变,如多孔介质通道内换热、微通道芯片技术、生物医疗等,这些都需要研究者对模型进行创新和优化。因此,本研究所建模型还可以作如下优化和拓展:

- 1) 在本研究数学模型与程序框架的基础上进行数学模型的扩展与程序的修改,使其更为通用。
- 2) 增加对三维情况的研究,并将三维研究结果与二维研究结果进行对比分析,以便拓展应用领域。
- 3) 本研究仅针对竖直平板模型进行了研究,今后还可以探究更多不同开放空间下的模型,研究如三角形、梯形、异形等几何体中的流动与传热问题,以满足不同工程应用的需求。

5 结论

本研究建立了顺磁性流体——空气的热磁对流数学模型,开发了相应的有限元计算程序,并主要研究了磁体对竖直平板附近顺磁性流体热磁对流传热特性的影响;分析了不同磁体剩余磁通密度、不同磁体位置情况下磁场强化竖直平板附近空气自然对流的传热规律,比较了有无磁场时竖直平板附近空气的磁场、速度场、温度场以及不同工况下平均温度和平均Nusselt数的变化规律。得到的主要结论如下:

- 1) 与无磁场情况相比,竖直平板平均温度在磁场的作用下降低明显。当 $B_r > 1\text{ T}$ 时,随着剩余磁通密度的增强,平均Nusselt数逐渐升高。当磁体位于竖直平板底部时,磁场引起的热磁对流的影响最大。
- 2) 磁体下部附近区域的传热受到抑制,而磁体上部附近区域的传热得到增强。增加磁体数目可以明显改善竖直平板的散热效果,两组磁体时比单组磁体时的局部表面传热系数更大。
- 3) 当剩余磁通密度为 4 T 时,与纯重力场相比,单组磁体的最佳位置为 0 mm ,此时,竖直平板

的平均温度降低了 8.58°C ,平均Nusselt数升高了3.03%;两组磁体的最佳位置分别为0 mm和100 mm,此时,竖直平板的平均温度降低了 9.91°C ,平均Nusselt数升高了3.54%。

〔参考文献〕

- [1] SATHE A, SANAP S, DINGARE S, et al. Investigation of thermal performance of modified vertical rectangular fin array in free convection using experimental and numerical method[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38: 2281–2290. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.389.
- [2] 李志鹏, 邱昊, 张森, 等. 口环密封激振力对多级离心泵动力特性的影响[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(2): 76–82. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.02.010.
- LI Zhipeng, QIU Hao, ZHANG Sen, et al. Influence of annular seal exciting force on dynamic characteristics of multistage centrifugal pump[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(2): 76–82. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.02.010.
- [3] 宋权斌, 陈泽, 彭雪丽, 等. 注蒸汽燃气轮机热声振荡的测试与分析[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(2): 83–89. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.02.011.
- SONG Quanbin, CHEN Ze, PENG Xueli, et al. Measurement and analysis of thermoacoustic oscillation of steam injected gas turbine[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(2): 83–89. DOI: 10.19951/j.cnki.cslgdxzbk.2021.02.011.
- [4] 王迪, 闵春华, 杨旭光, 等. 电子元件散热器翅片自然对流散热性能研究[J]. *热科学与技术*, 2021, 20(4): 313–317. DOI: 10.13738/j.issn.1671-8097.019212.
- WANG Di, MIN Chunhua, YANG Xuguang, et al. Research on natural convection heat dissipation performance of electronic component radiator fins[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2021, 20(4): 313–317. DOI: 10.13738/j.issn.1671-8097.019212.
- [5] 李开继, 宁利中, 宁碧波, 等. 侧壁面正弦加热条件下自然对流研究[J]. *应用力学学报*, 2017, 34(4): 641–646. DOI: 10.11776/cjam.34.04.A018.
- LI Kaiji, NING Lizhong, NING Bibo, et al. Study on natural convection sinusoidal heating from side[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017, 34(4): 641–646. DOI: 10.11776/cjam.34.04.A018.
- [6] SHIM M, HA M Y, MIN J K. A numerical study of the mixed convection around slanted-pin fins on a hot plate in vertical and inclined channels[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, 118: 104878. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104878.
- [7] 郝乐, 陈龙, 倪明玖. 流向磁场作用下圆柱绕流的直接数值模拟[J]. *力学学报*, 2020, 52(6): 1645–1654. DOI: 10.6052/0459-1879-20-217.
- HAO Le, CHEN Long, NI Mingjiu. Direct numerical simulations of the turbulent flow past a confined circular cylinder with the influence of the stream wise magnetic fields[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(6): 1645–1654. DOI: 10.6052/0459-1879-20-217.
- [8] HE W Q, QIN G L, WANG Y Z, et al. A segregated spectral element method for thermomagnetic convection of paramagnetic fluid in rectangular enclosures with sinusoidal temperature distribution on one side wall[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2019, 76(2): 51–72. DOI: 10.1080/10407782.2019.1615787.
- [9] KENJEREŠ S, FORNALIK-WAJS E, WROBEL W, et al. Inversion of flow and heat transfer of the paramagnetic fluid in a differentially heated cube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 151: 119407. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119407.
- [10] SONG K W, TAGAWA T. Thermomagnetic convection of oxygen in a square enclosure under non-uniform magnetic field[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 125: 52–65. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.11.012.
- [11] 王成安, 马兰新. 重力场下顺磁性介质内辐射与热磁对流的耦合[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(9): 68–72. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.013.
- WANG Chengan, MA Lanxin. Coupled radiation and thermo-magnetic convection in participating paramagnetic medium under gravitational field[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(9): 68–72. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.013.
- [12] KANEDA M, SUGA K. Natural convection of air between parallel plates under strong magnetic field[J]. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 2018, 10(2): 125–131. DOI: 10.1007/s12572-018-0215-z.
- [13] 周仲凯, 王增辉, 陈然. 强磁场下液态金属在竖直平板外的自由对流换热[J]. *中国科学院大学学报*, 2020, 37(1): 13–19. DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2020.01.003.
- ZHOU Zhongkai, WANG Zenghui, CHEN Ran. Experimental study of free convection of liquid metal on vertical plate under the magnetic field[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 37(1): 13–19. DOI: 10.7523/j.issn.2095-6134.2020.01.003.
- [14] PRADHAN K, GUHA A. CFD solutions for magneto hydro dynamic natural convection over horizontal and vertical surfaces[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 236: 465–476. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.03.110.

Research on heat transfer characteristics of natural convection of vertical plate strengthened by magnetic field

JIANG Changwei, ZHENG Peijia, XIE Yunfeng, CAO Zhichao, LUO Minghong

(School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to study the influence of gradient magnetic field on natural convection heat dissipation of the vertical plate, which provides a new method to strengthen convection heat dissipation of the vertical plate. [Methods] The mathematical model of magnetically induced natural convection was constructed and the corresponding finite element program was written. The heat transfer law of magnetic field strengthening natural convection of the vertical plate under different magnet remanent flux density, different magnet position were analyzed. The heat transfer characteristics of the vertical plate with or without gradient magnetic field were compared. [Findings] When the magnet remanent flux density $B_r > 1$ T, the convective heat transfer capacity of the vertical plate increases with the increasing of the magnet remanent flux density of the magnet. When the magnet is located at the bottom of the vertical plate, it has the greatest influence on natural convection heat dissipation. The convective heat dissipation capacity of the vertical plate with two groups of magnets is stronger than that with single group of magnets. [Conclusions] The natural convection heat dissipation of the vertical plate can be strengthened or controlled by applying magnetic field.

Key words: thermomagnetic convection; vertical plate; heat transfer characteristic; gradient magnetic field; magnet position

Manuscript received:2021-09-27; **revised:**2021-10-28; **accepted:**2021-11-05

Foundation item:Project (11572056,51674042) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author:JIANG Changwei(1973—)(ORCID:0000-0001-9728-6209), male, professor, research interest: heat and mass transfer theory. E-mail: jiangcw@csust.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:李脉;英文编辑:彭卓寅)