

流向电磁力作用下圆柱绕流对流换热的特性研究

李 辉^{1,2}, 刘宗凯^{1,2}, 周本谋², 江 勇²

(1. 南京理工大学 先进发射协同创新中心, 南京 210094; 2. 南京理工大学 瞬态物理重点实验室, 南京 210094)

摘要: 以往对对流换热的研究主要从传热学和来流速度角度进行, 鲜有对电磁力作用下圆柱绕流对流换热效率进行的研究, 而这些研究恰恰关系到对流传热效率的提高. 基于对流换热的能量方程和电磁流体控制的基本控制方程, 利用有限元法对电磁力控制绕流圆柱对流换热特性进行了数值分析. 研究表明: 在圆柱周围施加流向电磁力后, 流向电磁力的作用参数 $0 < N \leq 0.8$ 时, 传热功率随电磁力增大而增大; 当 $0.8 < N \leq 1.8$ 时, 传热功率随着电磁力增大而变小; $N > 1.8$ 时, 传热功率随电磁力增大不断变大. 通过分析流体的流动情况, 发现产生这种结果是由于随着电磁力增大, 圆柱周围流体流速增大的同时, 涡街逐渐被抑制, 分离点不断后移, 致使对流换热功率出现这样的变化规律.

关键词: 圆柱绕流; 流向电磁力; 对流换热

中图分类号: O 361; TK 124

文献标志码: A

Convective Heat Transfer Characteristics of the Flow Around a Circular Cylinder Under the Action of Electromagnetic Force

LI Hui^{1,2}, LIU Zongkai^{1,2}, ZHOU Benmou¹, JIANG Yong¹

(1. Advanced Launch Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Previous studies have been carried out mainly from the viewpoint of heat transfer and flow velocity, and few studies focused on the convective heat transfer efficiency. The convective heat transfer characteristics of a circular cylinder under the action of electromagnetic force was numerically studied with the finite element method based on the energy equation of convection heat transfer and basic governing equations of electromagnetic fluid control. The results show that the heat transfer power increases with the increasing of the electromagnetic force when $0 < N \leq 0.8$, where N is an action parameter. When $0.8 < N \leq 1.8$, the heat transfer power decreases with the increasing of the electromagnetic force. When $N > 1.8$, the heat transfer power increases with the increasing of the electromagnetic force. By analyzing the flow of the fluid, it's found that the variation of the convective heat transfer power is due to the continuous sinking of the separation

收稿日期: 2016-06-03

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK20140792); 中国博士后基金资助项目(2015M571756); 江苏省博士后基金资助项目(1401123C)

第一作者: 李 辉(1990-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 电磁流体控制. E-mail: 1103583644@qq.com

通信作者: 刘宗凯(1983-), 男, 讲师. 研究方向: 高精度激光随动控制. E-mail: kfliukai@126.com

point. As the electromagnetic force gradually increases and the fluid velocity around the cylinder increases, the vortex street will gradually be inhibited and the separation point will continue to sink.

Keywords: *flow around a circular cylinder; electromagnetic force; convective heat transfer*

为了应对未来新型武器的威胁,激光武器的研发不断更新.激光武器通过高能激光直接对目标特定部位进行照射,使大量的光子聚焦在目标点上,致使其表面热量迅速飙升达到破坏阈值进而将目标摧毁.而浅水中或近水面航行的航行器在受激光武器打击时,流动状态、来流的物理性质以及扰流物体的表面几何因素都是影响实际激光毁伤效能的因素.本文主要将模型简化为二维圆柱绕流来研究对流换热的能量损失情况.对流换热依靠流体质点的移动进行热量传递,与流体的流动情况密切相关^[1].在工程应用中,为了降低运行成本,强化对流换热的方法不断被提出,如李强等^[2]提出的外磁场流体作用磁流体、Jin等^[3]和俞接成等^[4]提出的改变热源的震动频率、刘幼幼等^[5]提出的纳米流体强化传热,以及文献^[1]和赖海清等^[6]提出的增大流场来流速度.

电磁力作用下的圆柱绕流就是指在圆柱周围导电液体中通过电磁激活板激励出电磁力,作用于圆柱周围的液体达到调控圆柱体绕流流场的分布^[7-9].本文研究在电解质溶液中通电后,形成作用于流体的电磁力场,当电磁力的方向与来流方向平行时,增加近壁面流体的动量,从而实现控制圆柱绕流流场,达到改变流场速度分布、减少阻力^[10-12]等目的.

本文根据圆柱绕流对流换热的功率随着雷诺数的增大而增大这一规律,结合流向电磁力能够增加近壁面流体动量的特性,展开了在圆柱周围施加流向电磁力对圆柱绕流对流换热功率影响的研究.

1 几何模型和控制方程

1.1 几何模型

几何模型的流场区域长为 0.22 m, 宽为 0.15 m, 圆柱半径为 0.005 m, 如图 1 所示, 图中, D 为圆柱直径.

1.2 控制方程

能量方程

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数; c_p 为比定压热容; ρ 为流体密

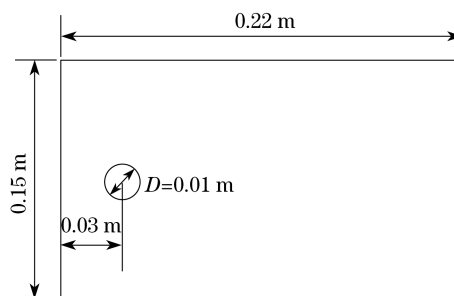


图1 圆柱绕流场几何模型图

Fig.1 Geometrical model of the flow field around a circular cylinder

度; T 为流体温度; u 和 v 分别为沿 x 和 y 轴方向的速度.

$$Nu = c Re^m Pr^{1/3} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{Q_0}{\lambda \pi (T_w - T_\infty)} \quad (3)$$

式中: Q_0 为热对流传热功率的理论值; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; Nu 为努塞尔数; T_w 为圆柱壁面温度; T_∞ 为来流温度; c 和 m 为参数, 取决于 Re , 当 $40 < Re < 4\,000$ 时, $c = 0.683$, $m = 0.466$ ^[1].

可得到

$$Q_0 = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3} \lambda \pi (T_w - T_\infty) \quad (4)$$

由式(4)可得, 圆柱绕流的对流换热功率随着 Re 的增大而增大.

$$Re = \frac{D \rho u}{\mu} \quad (5)$$

式中: D 为圆柱直径; μ 为粘度系数, 得到 Re 是随着来流速度的增大而增大, 由此可知热对流功率随着来流速度的增大而增大.

施加电磁力后流体的流动控制方程为

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V = -\nabla p + \frac{2}{Re} \nabla^2 V + NF \quad (6)$$

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (7)$$

$$N = \frac{\sigma E_0 B_0 R}{\rho u_\infty^2} \quad (8)$$

式中: V 为流体速度; ∇ 为哈密顿算子; N 为电磁力作用参数^[9]; R 为圆柱半径; σ 为电解质的电导率; E_0 为电场强度; B_0 为磁场强度; u_∞ 为来流速度; F 为电磁力.

从式(8)可以看出,电磁力作用参数 N 随着电场强度的变化而变化.电磁力 F 的值在覆盖范围内 ($0.005 \text{ m} < r < 0.01 \text{ m}$, r 为到圆心的距离,其中圆柱半径 $R = 0.005$) 随 r 的增大而衰减.

$$F = e^{-\pi(r-0.005)} \quad (9)$$

2 数值计算

本文借助数值仿真研究 $Re = 100$ 时,改变电磁力的大小对对流换热效率的影响.

图 2 为流场的网格划分图,整体流场网格划分

如图 2(a)所示,对圆柱周围进行局部加密和对尾流场进行加密处理,圆柱周围加密网格如图 2(b)所示.

图 3 为 $Re = 100$ 时,不同电磁力作用下的温度分布图.由图 3 可以看出,随着电磁力作用参数逐渐增大,温度在圆柱尾迹中的分布振幅越小,被加热后的液体远离圆柱越快.因为振幅减小,加热的流体质点所需要走的路程变小,对流换热的功率也将随之变化.将各个 N 值对应的对流换热功率 Q 导出,得到图 4(a)电磁力作用参数与对流换热功率曲线图.

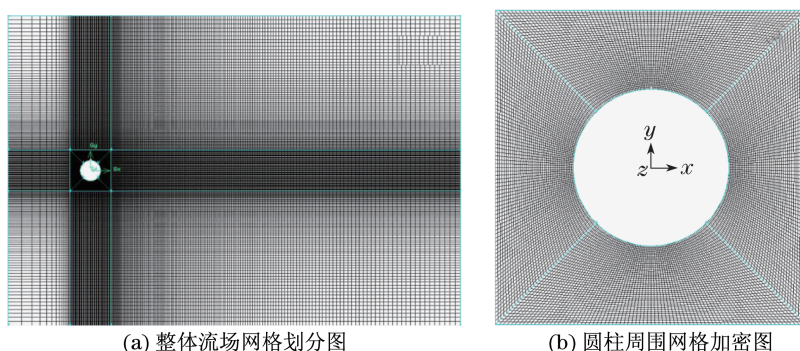


图 2 流场的网格划分图

Fig.2 Mesh of the flow field

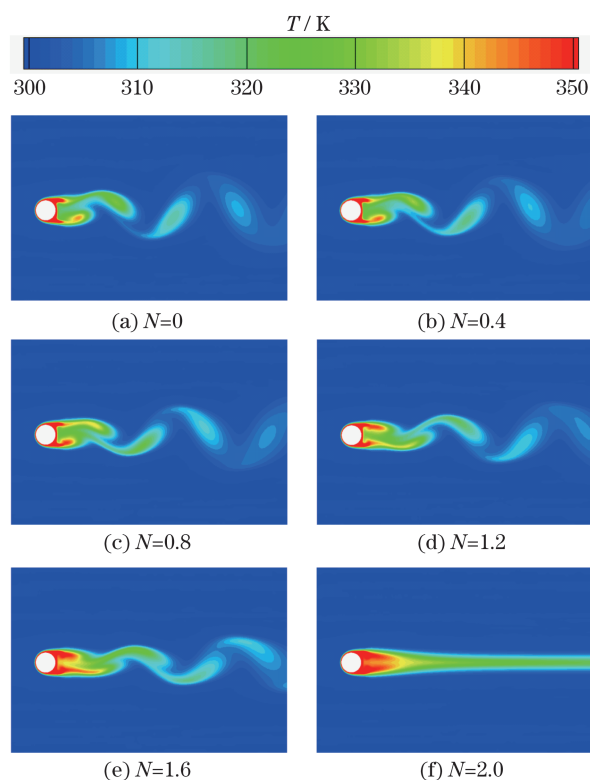
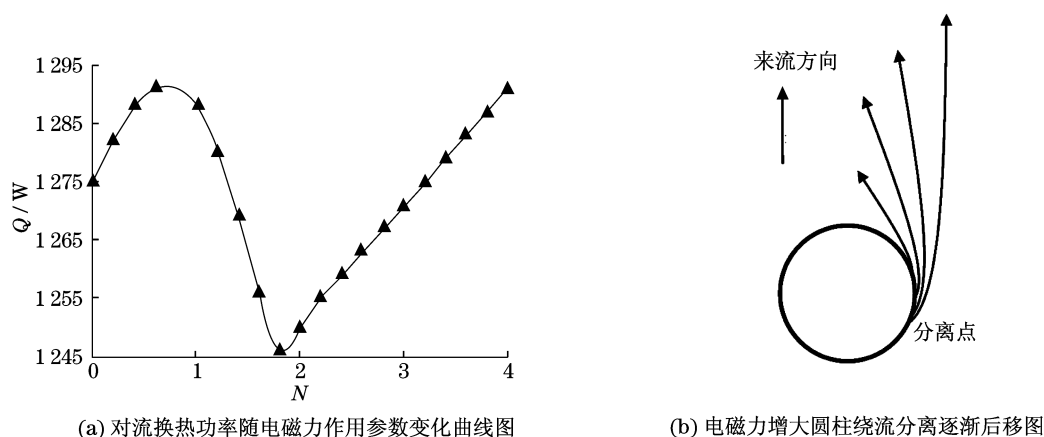


图 3 不同电磁力作用下的温度分布图

Fig.3 Temperature distribution under different electromagnetic forces



(a) 对流换热功率随电磁力作用参数变化曲线图

(b) 电磁力增大圆柱绕流分离逐渐后移图

图4 对流换热功率随电磁力作用参数变化曲线图和圆柱绕流分离逐渐后移图

Fig.4 Curves of the convective heat transfer power versus electromagnetic force and the gradual displacement diagram of the separation point of the cylinder flow separation

图4为 $Re = 100$ 时,对流换热功率随电磁力作用参数变化的曲线图和电磁力增大圆柱绕流分离逐渐后移图.由图4可以看出,流向电磁力的作用参数 $0 < N \leq 0.8$ 时,对流换热功率随着流向电磁力作用参数增大而增大;当 $0.8 < N \leq 1.8$ 时,对流换热功率随着作用参数增大而减小;当 $N > 1.8$ 时,对流换热功率又随着流向电磁力作用参数的增大而增大.对流换热功率随电磁力作用参数变化出现拐点,由于当 $0.8 < N \leq 1.8$ 时,涡街逐渐被抑制,如图4(b),圆柱绕流分离点不断后移,此时虽然速度在增大,但是分离点后移的影响也逐渐增大,因此出现了拐点.电磁力继续增大,速度增大的影响大于分离点后移的影响,这时对流换热功率继续增大.

图5为 $Re = 100$ 时,不同电磁力作用下的涡量图.图5(a)为未施加电磁力时,明显的卡门涡街特征.从图5(b)到图5(f)电磁力逐渐加大,电磁力覆盖范围内的流体随着电磁力的增大将获得更多的动能,致使圆柱周围及其下游流体速度更快,当到图5(f)时,涡街已经全部消失.

图6(见下页)为 $Re = 100$ 时,不同电磁力作用下的流向速度分布.由这6幅图的比较可以发现,随着电磁力增大,圆柱周围的流速加快,尾流场的振幅减小,流场越来越稳定.观察图3,与图6比较,这两组图有着很大的关联性,流场的低温区域对应着远离圆柱区域和高流速区域,而高温区域对应着流场的近壁面区域和低流速区域.正如式(4)和式(5),随着来流速度增大,圆柱周围的速度也增大,进而对流换热功率也增大.出现这种情况的原因是流速较高的区域在获得热量后迅速离开,使上游低温液体留下来,从而导致这一区域温度较低;而流速较低的

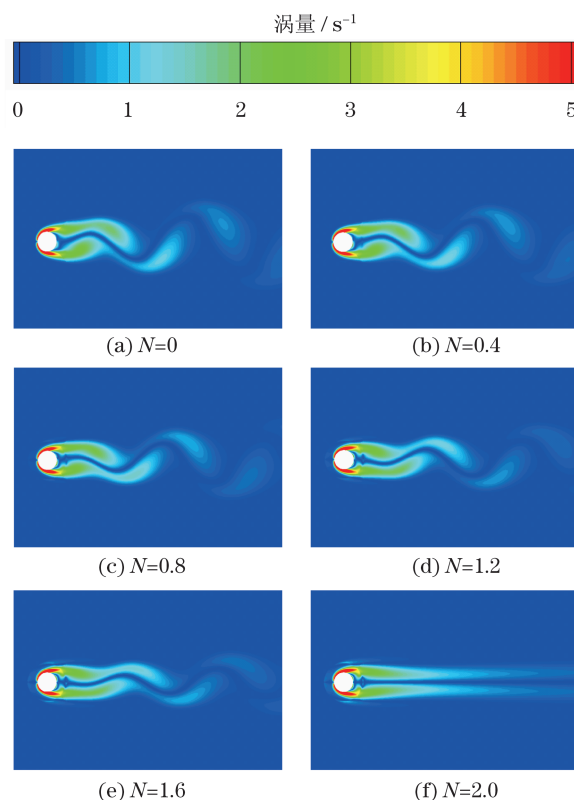


图5 不同电磁力作用下的涡量图

Fig.5 Vortical contour under different electromagnetic forces

区域,该区域的液体与高温液体接触的时间比较长,会得到更多的热量,致使该区域的温度较高.而在圆柱周围施加流向电磁力,同样也增大了圆柱周围液体的流速.而随着电磁力增大,使得圆柱周围电磁力覆盖区域液体流速更大,导致该区域的液体温度比较低,液体与圆柱的温差较大,圆柱向液体的传热功率较大.所以可以得出结论,流向电磁力的作用参数

$0 < N \leq 0.8$, $N > 1.8$ 时, 随着电磁力的加大, 流向电磁力覆盖区域获得更多的动能, 速度越快, 热对流换热的功率越大. 而在作用参数 $0.8 < N \leq 1.8$ 时, 由于涡街逐渐被完全抑制, 分离点逐渐后移, 对流换热功率随着作用参数增大而减小.

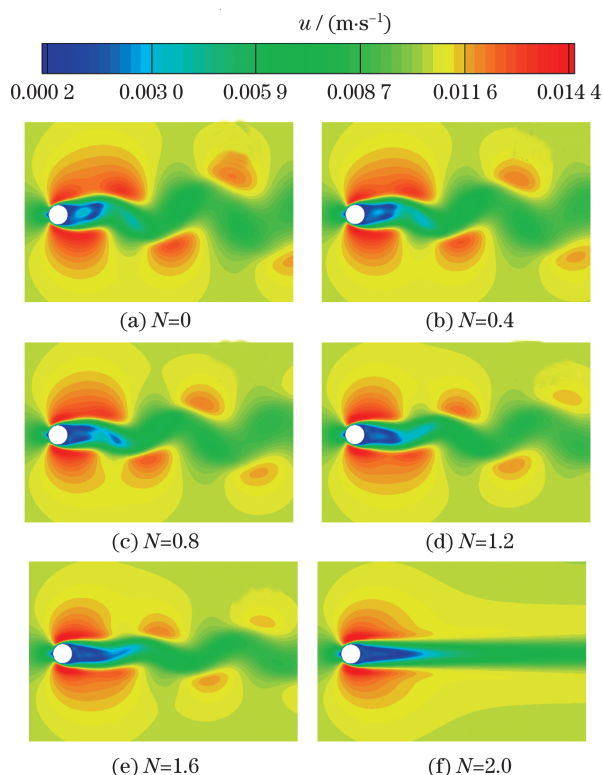


图6 不同电磁力作用下的流向速度分布图

Fig.6 Distribution of streamwise velocities under different electromagnetic forces

3 结 论

在弱电解质溶液(海水等)中, 通过在圆柱上排布电极和磁极相互交错分布的电磁场激活板, 施流向电磁力改变流体的流动特性, 进而改变对流换热功率. 而对流换热功率也并不完全随着电磁力增大而增大, 具体如下:

a. 当流向电磁力的作用参数由 0 逐渐增加到 0.8 时, 对流换热功率随之增大;

b. 当作用参数由 0.8 逐渐增加到 1.8 时, 涡街逐渐被完全抑制, 对流换热功率逐渐减小;

c. 当电磁力作用参数由 1.8 继续增大时, 对流换热功率随之增大.

本文对流向电磁力作用下圆柱绕流对流换热的特性进行研究, 结果表明电磁流体控制可作为一种

主动控制对流换热的有效手段, 为接下来航行器对流换热的实验提供了理论依据.

参考文献:

- [1] 英克鲁佩勒, 德维特, 伯格曼, 等. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 261-269.
- [2] 李强, 宣益民. 外磁场作用下磁流体的对流换热特性[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(7): 1177-1180.
- [3] JIN D X, LEE Y P, LEE D Y. Effects of the pulsating flow agitation on the heat transfer in a triangular grooved channel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(15/16): 3062-3071.
- [4] 俞接成, 李志信, 邢程. 流体低速绕流振动圆柱对流换热数值研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 670-672.
- [5] 刘幼幼, 郁鸿凌, 董伟, 等. 纳米流体应用于电场强化传热的试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(5): 439-442.
- [6] 赖海清, 张东辉, 陈宁, 等. 基于 ISIGHT 圆柱绕流的换热强化与减阻优化设计[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(1): 93-97.
- [7] WEIER T, GERBETH G, MUTSCHKE G, et al. Experiments on cylinder wake stabilization in an electrolyte solution by means of electromagnetic forces localized on the cylinder surface [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1998, 16(1/2): 84-91.
- [8] ZHANG H, FAN B C, CHEN Z H, et al. Suppression of flow separation around a circular cylinder by utilizing Lorentz force[J]. China Ocean Engineering, 2008, 22(1): 87-95.
- [9] LECORDIER J C, BROWNE L W B, LE MASSON S, et al. Control of vortex shedding by thermal effect at low Reynolds Numbers [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 21(4): 227-237.
- [10] 丁汉新, 范宝春, 周本谋, 等. 圆柱绕流的边界层及其电磁控制[J]. 南京理工大学学报, 2005, 29(3): 308-311.
- [11] KIM S J, LEE C M. Control of flows around a circular cylinder; suppression of oscillatory lift force[J]. Fluid Dynamics Research, 2001, 29(1): 47-63.
- [12] 周本谋, 范宝春, 陈志华, 等. 电磁力连续控制圆柱绕流态变化的研究[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(1): 10-14.

(编辑: 丁红艺)