

文章编号: 1000-8055(2008)02-0227-05

绕流圆柱的自由表面磁流体流动实验

韩 东¹, 黄护林², 张 炎¹, 李 辉¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 高新技术研究院, 南京 210016)

摘 要: 利用 PIV (Particle image velocimetry) 光学测量系统, 在雷诺数分别为 7 767 和 11 650 时, 实验研究了磁场对绕流圆柱的自由表面流动的影响。实验研究结果表明, 磁场使边界层内的无量纲平均速度分布偏离对数分布, 尾迹变窄变短, 分离点向后移; 当雷诺数增加到 11 650 时, 在相同磁场强度作用下, 磁场的影响减弱, 从而使边界层内的无量纲平均速度分布偏离对数分布的程度减小。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 磁流体流; 自由表面; 尾迹; 边界层; 无量纲平均速度分布

中图分类号: O361

文献标识码: A

Experimental investigation of free surface MHD flow around a cylinder

HAN Dong¹, HUANG H u ling², ZHANG Yan¹, LI Hui¹

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Academy of Frontier Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: The effects of magnetic field on the free surface flow around a cylinder were investigated experimentally using the PIV (particle image velocimetry) under Reynolds number 7 767 and 11 650. The experimental result revealed that the field enabled the distribution of nondimensional average velocity to deviate from logarithmic distribution of nondimensional average velocity in the boundary layer, and also made the wake become narrower and shorter, and the detachment point move backward. When the Reynolds' s number reached up to 11 650, the influence of magnetic field was weakened under same strength of external magnetic field. Consequently, the departure degree between the nondimensional average velocity distribution and logarithmic distribution in the boundary layer was reduced.

Key words: aerospace propulsion system; magnetohydrodynamic (MHD) flow; free surface; wake; boundary layer; distribution of nondimensional average velocity

20 世纪 60 年代, 就有人设想用电磁力控制电介质溶液的流动^[1]。目前, 磁流体的研究已经取得了实质性的进展, 其部分研究成果业已开始运用到生物检测、生物技术、铸造、半导体晶体生长

和磁约束受控核聚变液体墙技术领域^[2], 达到消除涡流、减少阻力、降低噪声、加速流体混合等目的^[3-5]。由于磁场对导电流体的控制是非接触性的, 特别适合某些机械调节很难实施的微流体系

收稿日期: 2007-01-19; 修订日期: 2007-09-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50306006)

作者简介: 韩 东(1968), 男, 河南南召县人, 副教授, 主要从事流动与传热研究

统的流动主动控制. 众所周知, 在实施约束受控核聚变液体墙技术、冶金铸造以及其他工业应用中, 经常会遇到磁流体绕钝体的自由表面流动的问题. 流体通过钝体时会出现分离流(尾迹)、死区(无流区)和涡流, 尾迹和涡流与自由表面产生的相互作用引起界面的不稳定. 这些问题在实际工程应用中将产生非常不利的影响. 利用磁场在导电液体中产生的洛伦兹力可主动抑制流动的不稳定性, 使分离点从滞止点沿着固体顺时针和逆时针向后移动以减少分离流的无流区, 降低流动对固体的拖拉力、混合和噪声, 还可不附加外力地抑制涡流和消灭周期涡脱落, 这些主动控制通过改变磁场的几何尺寸、相对位置和强度等外在参数得以实现^[6]. 文献[7]研究了在 $1 \leq Re \leq 48$ 范围内, 对粘性流体绕过圆柱时流场特性的变化规律. 结果表明 $1 \leq Re \leq 6$ 时, 流体沿圆柱表面运动, 流场基本定常, 其流线关于圆柱中心线对称. $Re \approx 10$ 时, 流体在圆柱表面的后驻点附近脱体, 形成对称的反向旋涡. 随 y 进一步增大, 脱体分离点前移, 旋涡变大. $Re \approx 48$ 时, 脱体旋涡不再对称, 以周期交替方式离开圆柱表面, 在尾部形成结构有序的卡门涡街. 文献[8]研究表明, 随 Re 进一步增大, 将逐渐形成湍流, 旋涡以周期交替方式脱体, 使得圆柱表面的阻力和升力增大并振荡, 从工程角度讲, 这不是人们所期望的. 因此, 圆柱绕流磁流体自由表面流动的研究具有重要的意义. 文献[9]对绕流圆柱的自由表面磁流体流动进行数值研究, 研究结果表明磁场不仅影响了流动的状态, 而且对湍流有抑制作用, 降低了自由表面的更新机制, 从而减少了传热能力; 在相同的 Hartmann 数下, 相比低雷诺数下的流动换热情况, 高雷诺数下的湍流不能被完全抑制.

本文利用 PIV (Particle image velocimetry) 光学测量系统, 在雷诺数为 7 767 和 11 650 时, 对绕流圆柱的自由表面磁流体流动进行了实验研究.

1 实验装置

本实验装置如图 1 所示. 耐腐蚀泵 1 将盐水从水池中泵出, 通过过渡段将流体流动转变为矩形截面的自由表面流后进入实验段. 为了获得均匀的流场, 在稳定段内加装了蜂窝隔栅. 分流的调节装置可以改变实验段中盐水流动的流量从而改变流动的雷诺数. 磁场由永久钕铁硼磁铁建立, 安装在实验段扰流圆柱处, 最强的磁场强度为 0.2

T, 流体为 10% 的盐水, 使用 PIV 系统测量绕流圆柱的流场. PIV 采用 New wave 公司的双脉冲 Nd: YAG 激光器, 最大输出功率为 50 mJ/pulse, 脉冲激光波长为 532 nm, 脉冲持续时间为 10 ns, 双脉冲激光重复频率为 15 Hz. 在激光器出口安装了片光光学组件, 将脉冲激光束变为有一定扩散角的片光, 并使在所测的流场区域片光厚度小于 1 mm. 粒子图像记录装置为 TSI 公司的 PIV-CAM 10-30 互相关 CCD 数字相机, 分辨率为 1 016 pixel $\times$ 1 008 pixel, 双帧频为 15 fps, 两帧间的时间间隔可以小于 1 μ s, 粒子采用的是 TiO₂ 粉末. PIV 的放置位置见实验段示意图 2. 实验段采用有机玻璃材料, 横截面尺寸为宽 210 mm, 高 150 mm, 绕流圆柱也采用有机玻璃, 直径为 20 mm, 高 150 mm, 安装在实验段横截面的中间.

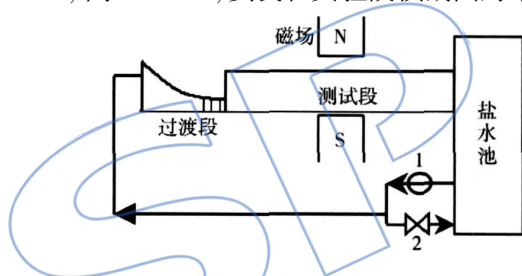


图1 实验系统图

Fig.1 Sketch of test system

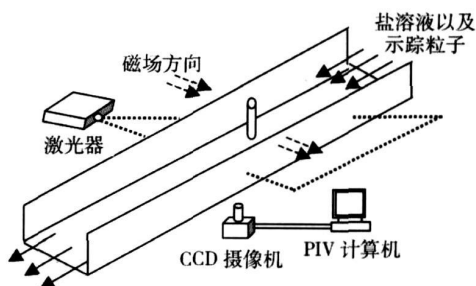


图2 实验段示意图

Fig.2 Sketch of experimental rig

2 实验结果及分析

为了验证系统测试的稳定性, 首先对无磁场时的绕流圆柱的尾迹和速度边界层进行了测试. 图 3 给出的是当雷诺数为 7 767 时, 无磁场下的边界层速度矢量分布和无量纲平均速度分布. 从图 3(a) 可以看出边界层速度矢量分布符合边界层内速度分布规律; 而图 3(b) 更加清楚地显示出实验的结果与无量纲平均速度分布的对数率完全一致, 表明实验系统测试精度和稳定性符合测试

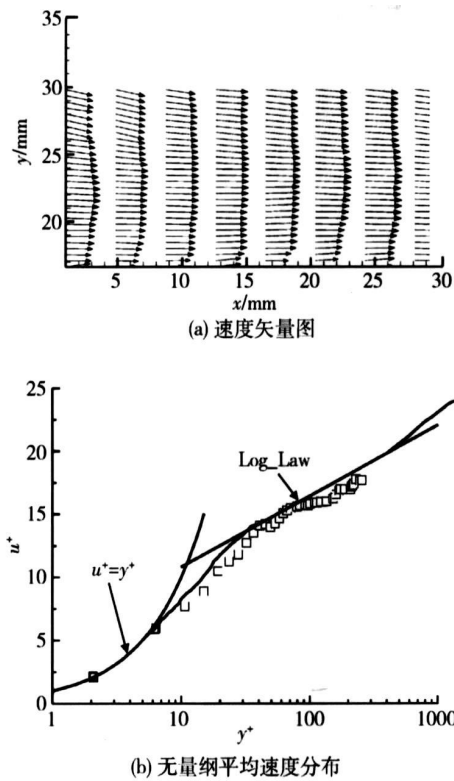


图 3 无磁场作用时的边界层区域速度矢量图和无量纲平均速度分布($Re=7\,767$)

Fig. 3 Velocity vector map in boundary layer and distribution of nondimensional average velocity without magnetic field ($Re=7\,767$)

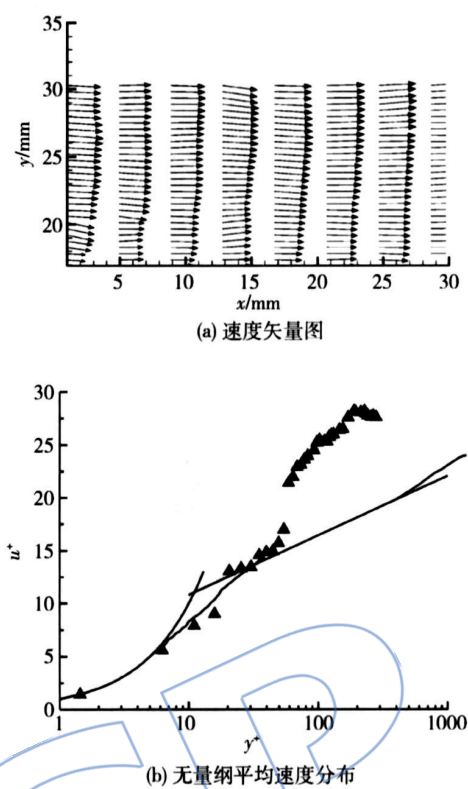


图 4 有磁场作用时的边界层区域速度矢量图和无量纲平均速度分布($Re=7\,767$)

Fig. 4 Velocity vector map in boundary layer and distribution of nondimensional average velocity with magnetic field ($Re=7\,767$)

的要求. 图 4 显示的是在相同雷诺数下, 外加磁场时边界层速度矢量分布和无量纲平均速度分布. 比较图 3 和图 4 的速度矢量图, 明显可以看出, 由于磁场的影响, 速度边界层的厚度变薄. 这是由于带电离子经过磁场时, 受到洛伦兹力的作用, 正负离子向方向相反的两端移动, 在垂直于流动方向的截面上产生感应电动势, 建立起感应电场. 带电离子在流动过程中将受到电场力和磁场力这两个方向相反的力的共同作用. 在主流区, 由于流速比较大, 带电离子受到的磁场力大于电场力, 而在边界层内由于流速较慢, 则带电离子受到的电场力大于磁场力. 从而在垂直到流动方向上的截面中形成两个方向相反的感应电流, 而在整个截面的电流积分为零. 根据左手定则, 可以判断出在主流区域, 该电流的受力方向是和流动方向相反的, 而在边界层内电流的受力方向是和流动方向相同的, 其结果是提高了边界层内的流速, 减低了主流速度. 该现象是以电流为载体, 实现了能量的转移, 使得边界层内速度型更加饱满, 边界层的厚度变薄. 同时, 从图 4 可以清楚地看出, 在低 y^+ 时 (第

一层网格单元质心到壁面的无量纲距离), 实验的结果与无量纲平均速度分布 u^+ 的对数率基本吻合; 但当 y^+ 大于 100 时, 无量纲平均速度分布偏离对数分布较大, 偏离幅度达 40% 左右. 这也是因为磁场增加了在边界层内速度, 减薄了边界层, 加大了边界内的速度梯度; 而在主流区内却是降低主流速度, 减少速度梯度, 速度分布更趋均匀. 结果是增大了边界层内的剪切应力. 这个结论和其他文献报道的计算结果相一致^[7]. 另外, 如果盐溶液浓度增加, 则所受的力也会相应有所增加, 有利于抑制分离的发生, 但盐溶液如果达到或接近饱和, 则抑制分离的效果将不明显.

图 5 给出的是雷诺数为 7 767 时, 有、无磁场作用下绕流圆柱后的尾迹流线图. 实验结果显示, 没有磁场作用时, 绕流圆柱表面流动分离点靠前, 分离点之后在圆柱表面附近形成回流区, 逐渐发展成为涡, 随着流动的发展这些涡开始脱离圆柱表面, 影响下游区域的流场; 在磁场作用下, 分离点向后移, 分离点之后的流动状况与不加磁场时基本相似, 但尾迹变窄变短. 其原因主要也是由

于边界层内速度型更加饱满, 边界层的厚度变薄. 提高了抗分离能力, 从而使分离点向后移动, 分离区减小. 这个现象和文献[9]的理论计算的趋势相一致.

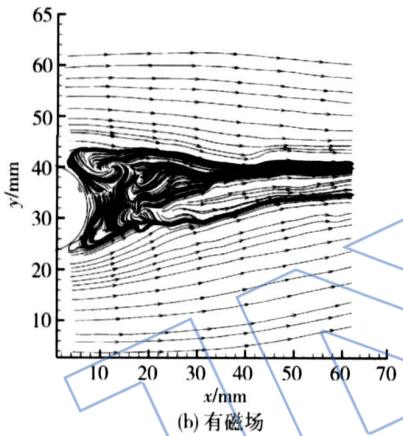
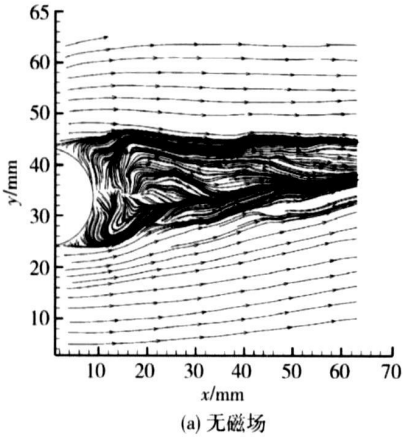


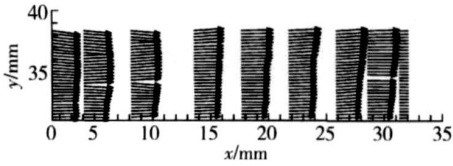
图 5 绕流圆柱尾迹流线图($Re=7\,767$)

Fig.5 Stream lines of flow of circular cylinder flow wake($Re=7\,767$)

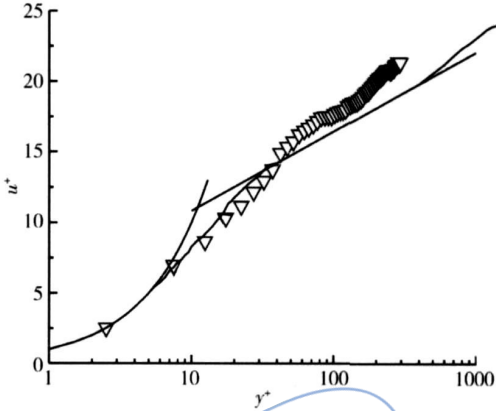
在相同雷诺数下, 从上面的有无磁场实验结果可以发现, 磁场使边界层的厚度变薄, 边界层内的无量纲平均速度分布偏离对数分布; 同时, 磁场还使绕流圆柱后的尾迹变窄变短, 并使尾迹的分离点后移. 为了进一步调查磁场对不同雷诺数下绕流圆柱后的影响, 我们实验测量了相同磁场强度下, 增加流速时, 即减小哈特曼数, 速度边界层内速度分布和尾迹.

图 6 显示的是雷诺数为 11 650 时, 有磁场作用时的边界层区域速度矢量图和无量纲平均速度分布图.

可以发现, 在低 y^+ 时, 实验的结果与无量纲平均速度分布的对数率吻合较好; 当 y^+ 大于 100 时, 无量纲平均速度分布要比对数分布稍大一些, 幅度为 10% 左右. 比较图 4 和图 6 可以看出, 虽



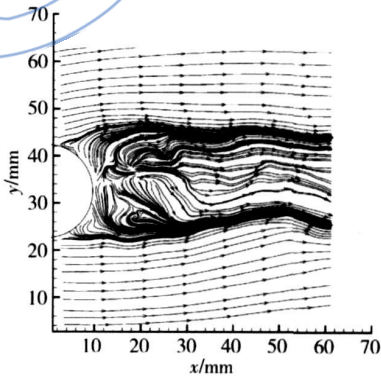
(a) 速度矢量图



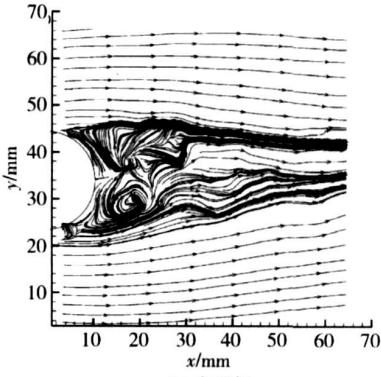
(b) 无量纲平均速度分布

图 6 有磁场作用时的边界层区域速度矢量图和无量纲平均速度分布($Re=11\,650$)

Fig.6 Velocity vector map in boundary layer and distribution of nondimensional average velocity with magnetic field ($Re=11\,650$)



(a) 无磁场



(b) 有磁场

图 7 绕流圆柱尾迹流线图($Re=11\,650$)

Fig.7 Stream lines of flow of circular cylinder flow wake($Re=11\,650$)

然磁场强度依然相同,但流速增加,哈特曼数减小,因此磁场对流动的影响减弱,使得无量纲平均速度分布偏离对数速度分布的程度减少;相比低雷诺数下的边界层厚度减少也较少。图7显示的是雷诺数为11 650时的尾迹。比较图7和图5可以很清楚地看出,随雷诺数的增加,绕流圆柱后的尾迹变长,宽度变大。这是由于随着 Re 数的增大惯性力作用越来越明显,磁场的洛伦兹力相比流体的惯性力的比率,即哈特曼数减少,磁场对流场的影响减少。湍流波动加剧,自由表面机制更新较快,边界层在圆柱下游提前脱离壁面并在尾部形成漩涡,边界层脱离点向流体上游侧移动。

3 结 论

利用PIV测量系统对自由表面绕圆柱流动现象,在有无磁场作用下和相同磁场强度作用下不同流动速度时的边界层内速度分布和尾迹进行了实验研究,实验结果表明:

(1) 在磁场作用下,圆柱后尾迹具有了一定的规律性,尾迹中的涡顺次脱落形成典型的卡门涡街,但是此时的涡脱落很快,所以涡影响的流场区域较短,尾迹也较窄。当主流速度改变时可以看到同样的现象。

(2) 在磁场作用下,绕流圆柱表面流动分离点向后移动;在相同磁场强度作用下,随 Re 的增大,磁场作用效果减弱,进一步增大 Re ,圆柱后尾迹内开始出现气泡。

(3) 磁场使边界层变薄,无量纲平均速度分布偏离对数分布规律;在相同磁场强度作用下,随 Re 的增大,无量纲平均速度分布偏离对数分布规律的程度减小。

参考文献:

[1] Gailitis A, Lielausis O. On a possibility to reduce the

hydrodynamical resistance of a plate in an electrolyte[J]. Applied Magnetohydrodynamics, 1961, 12: 143-146.

[2] 邹继斌, 陆永平. 磁性流体密封原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[3] Henoeh C, Stace J. Experimental investigation of a salt water turbulent boundary layer modified by an applied streamwise magnetohydrodynamic body force[J]. Phys Fluids, 1995, 7(6): 1371-1382.

[4] 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: 84-91.

[5] Kim S J, Lee C M. Investigation of the flow around a circular cylinder under the influence of an electromagnetic field[J]. Exp. Fluids, 2000, 28: 252-260.

[6] 翁兴园. 磁流体技术及应用的发展现状与未来[J]. 磁性材料及器件, 1998, 29(6): 35-39.

WENG Xingyuan. Present evolution status and future of the techniques and applications of magnetic fluid[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 1998, 29(6): 35-39.

[7] Dyke M V. An album of fluid motion[M]. Stanford, CA: Parabolic Press, 1982.

[8] 范宝春, 周本谋, 陈志华. 圆柱绕流的电磁控制[J]. 应用力学报, 2005, 22(4): 522-526.

FAN Baochun, ZHOU Benmou, CHEN Zhihua. Electromagnetic control to cylinder wake[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(4): 522-526.

[9] 方莹, 黄护林. 绕圆柱体自由表面磁流体流动和传热的研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 661-663.

FANG Ying, HUANG Hulin. Simulation of free surface MHD flow and heat transfer around a cylinder[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(4): 661-663.