

# 等离子体压强和粘度效应的线性化数值分析

杨舒棉 代玉杰\* 王学慧  
(辽宁石油化工大学 理学院 抚顺 113001)

## Linearized Numerical Analysis of Plasma Pressure and Viscosity

Yang Shumian ,Dai Yujie\* ,Wang Xuehui  
( College of Sciences Liaoning Shihua University Fushun 113001 ,China)

**Abstract** The influence of the cylindrical plasma pressure and viscosity on the axial eigen-function was analytically described in the linearized ideal magneto-hydrodynamic equations and numerically solved in semi-classical method. The calculated results included: i) The axial eigenfunction decreases with an increase of the plasma pressure and is little affected by the plasma viscosity, suggesting a positive impact of a uniform plasma pressure on the macroscopic plasma stability; ii) The axial eigenfunctions are negative ( positive) when the plasma radii are smaller ( greater) than 0.3; and iii) At a low plasma pressure and in the vicinity of the cylindrical axis and/or near the plasma wall, the viscosity significantly affects the axial eigenfunction.

**Keywords** Plasma pressure ,Viscosity ,Axial eigenfunction

**摘要** 从线性化理想磁流体方程组出发,应用半解析方法,数值求解了圆柱位型等离子体压强和粘度对轴向本征函数的影响。主要结论包括:无论等离子体粘度如何变化,轴向本征函数均随着等离子体压强的增大而减小。等离子体半径较小(约小于0.3)时的轴向本征函数均为负值,等离子体半径较大(约大于0.3)时的轴向本征函数均为正值。压强较低时,靠近圆柱中心和等离子体壁处的轴向本征函数受粘度影响较大。

**关键词** 等离子体压强 粘度 轴向本征函数

中图分类号: O534+.2 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2019.06.06

随着等离子体科学技术的发展,等离子体放电技术已经应用到了生产和生活的诸多方面,并且取得了良好的效果。在诸多等离子体放电中,常压条件放电是极具代表性的。用常压等离子体处理过的毛织物,亲水性能和芯吸高度更强,润湿性能得到明显提升<sup>[1]</sup>。常气压等离子体可以增强化学气相沉积薄膜的均匀性<sup>[2]</sup>。室温常气压等离子体可以对菌株进行诱变,从而提升菌株的蔗糖异构酶<sup>[3]</sup>。气压氩气等离子体能对碳纤维表面进行改性处理,并去除其表面浆料和杂质,使纤维获得较好的浸润性能<sup>[4]</sup>。大气压介质阻挡等离子体放电可以对聚四氟乙烯薄膜进行表面处理<sup>[5]</sup>。氩气在大气压环境下,通过介质阻挡放电产生的等离子体,能与燃料中的烃类分子发生碰撞,使燃料裂解为小分子烃类<sup>[6]</sup>。

除了常压等离子体放电外,李岳妹的研究表明,

利用高压等离子体放电技术对玉米秸秆进行分解,可以保证秸秆在无燃烧、不被氧化的情况下,直接裂解得到二糖和单糖等产物。裂解的产物能制成低聚糖纤维,此纤维中的增殖双歧杆菌因子生理活性很强,可用于糖尿病的治疗<sup>[7]</sup>。用减压等离子体处理的壳聚糖,在 pH6.5 溶液中的溶解性增强,如果处理时间较长,壳聚糖的溶解度增大,但在弱碱性溶液中的溶解性降低<sup>[8]</sup>。周广旭等在研究低压氢等离子体发光光谱的性质时发现,当压强由 1 增加至 4 kPa 时,谱线强度减小,随着压强的增大,电子激发温度减小或先减小后增大<sup>[9]</sup>。研究表明,在用高密度等离子体 ICP 刻蚀机刻蚀 SiC 的过程中,刻蚀速率随着气压的升高而增大,当气压达到一定程度时,刻蚀速率达到最大值<sup>[10]</sup>。

磁约束放电则是等离子体放电的又一个重要领

域。对于磁约束低气压冷等离子体来说, 等离子体压强对系统性质的影响明显。电子温度会随着压强的增大而降低, 但是, 中性气体的温度随着压强的增大而升高, 这一性质影响着等离子体的传热与流动<sup>[11]</sup>。磁流体的粘滞效应是影响磁流体内扭曲模性质的重要因素, 石秉仁等的研究表明, 磁流体的粘滞效应对电阻性磁流体的内扭曲模有稳定作用, 当粘滞大于某一临界值时, 内扭曲模是完全稳定的<sup>[12]</sup>。

综上所述, 等离子体压强和粘度是决定其自身性质的重要因素, 本文拟将二者综合起来考虑, 数值模拟二者同时作用时, 对圆柱位型磁流体轴向本征函数性质的影响。

### 1 线性化理想磁流体方程组

用位移表述的线性化理想磁流体方程组可用如下方程表示<sup>[13-14]</sup>

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \nabla p_1 + [B_1 \times (\nabla \times B_0) + B_0 \times (\nabla \times B_1)] = 0 \quad (1)$$

$$p_1 + \xi \cdot \nabla p_0 + \Gamma p_0 \nabla \cdot \xi = 0 \quad (2)$$

$$B_1 + \nabla \times (B_0 \times \xi) = 0 \quad (3)$$

式中  $\rho_0$  表示初始磁流体密度;  $\xi$  为矢量, 表示磁流体的扰动位移;  $p_1$  表示等离子体的扰动压强;  $B_0$  和  $B_1$  分

别是初始磁场和扰动磁场;  $\Gamma$  是比热比。对上述方程组中角标为 1 的扰动量进行傅里叶变换, 将磁流体方程组转化为关于径向本征函数  $\xi_r$  的微分方程

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{D}{C_2} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \xi_r) \right] + \left[ \frac{1}{D} \left( C_3 - \frac{C_2^2}{C_1} \right) - r \frac{d}{dr} \left( \frac{C_1}{r C_2} \right) \right] \xi_r = 0 \quad (4)$$

上述推导过程只是针对理想磁流体方程组展开的, 本文涉及的磁流体的粘滞项, 是用有限差分的方法予以解决的。式(1)~(4)中的各个量的物理意义和系数表达式  $D$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_3$  详见文献[15-16]。

### 2 数值模拟结果及分析

本文拟数值模拟在圆柱位型等离子体系统中, 均匀等离子体压强和粘度对轴向本征函数的影响。令初始均匀等离子体压强为  $p_0$ , 初始轴向磁场  $B_{0z}$  和初始角向磁场  $B_{0\theta}$  分别为<sup>[17]</sup>:  $p_0 = \text{const}$ ,  $B_{0z} = 1/(1+r^2)$ ,  $B_{0\theta} = r/(1+r^2)$ 。  $r$  为等离子体半径, 本文令等离子体半径的无量纲值为 1。通过求解方程(4), 即可求出波数  $k$  和增长率  $\gamma$ 。为了使计算结果具有一般性, 本文取波数  $k = -0.81$ , 增长率  $\gamma = 0.01$ , 在此基础上, 数值模拟等离子体压强和粘度对磁流体轴向本征函数的影响。

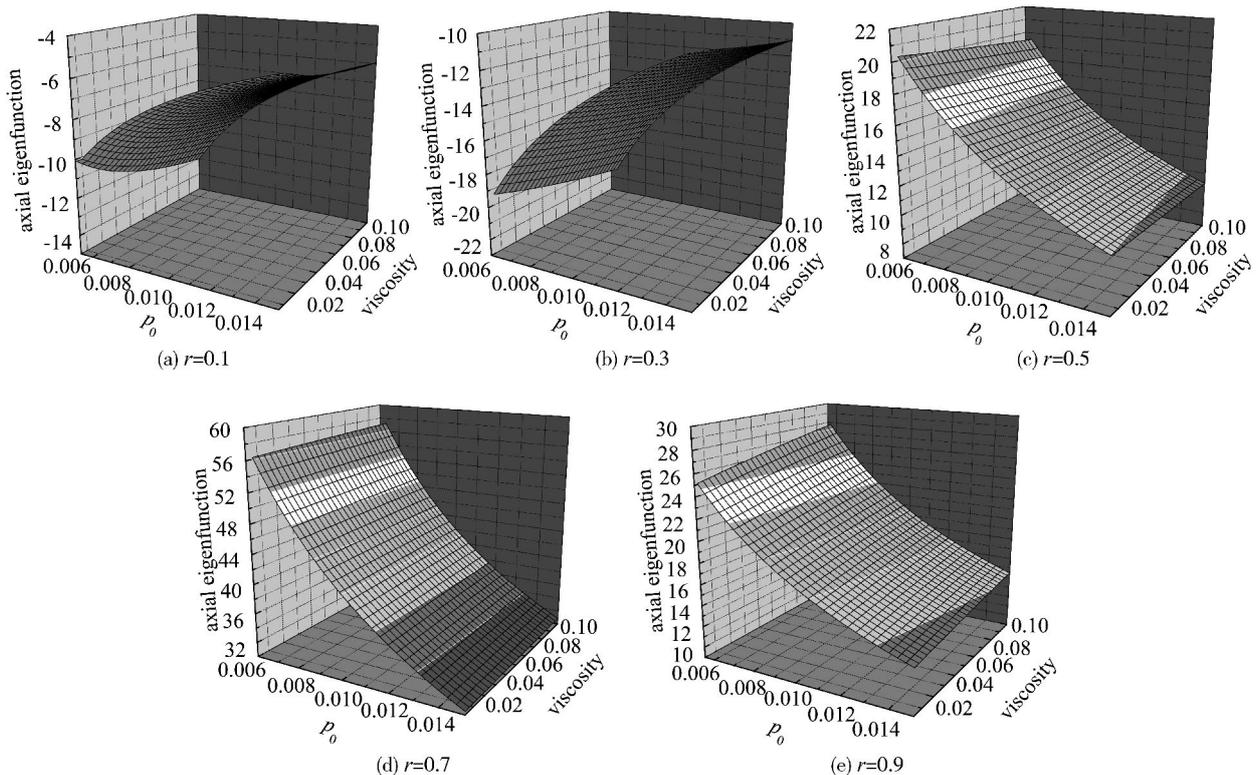


图1 轴向本征函数在等离子体半径的不同位置时,随等离子体压强和粘度的变化

Fig.1 Axial eigenfunction with  $r=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$

图1给出了波数  $k = -0.81$ , 增长率  $\gamma = 0.01$  时, 轴向本征函数在等离子体半径的不同位置 ( $r = 0.1, r = 0.3, r = 0.5, r = 0.7$  和  $r = 0.9$ ) 时, 随等离子体压强  $p$  和粘度  $\nu$  的演化规律。

图1(a)和(b)中的轴向本征函数有相似的变化规律。在本文给出的等离子体压强  $p$  和粘度  $\nu$  的范围内, 在等离子体半径  $r = 0.1$  和  $r = 0.3$  处, 轴向本征函数都为负值, 由此可推断, 靠近圆柱等离子体中心位置的轴向本征函数均为负值。压强较低 ( $p = 0.006$ ) 时, 半径为  $r = 0.1$  和  $r = 0.3$  处的轴向本征函数均受到磁流体粘度的影响, 但磁流体粘度对  $r = 0.1$  处的轴向本征函数的影响更加明显。压强较高 ( $p = 0.015$ ) 时, 轴向本征函数基本不受磁流体粘度的影响。

图1(c)-(e)中的轴向本征函数都为正值, 在  $r = 0.5$  (即等离子体半径的中点) 处, 轴向本征函数在低压强时随着磁流体粘度的增大而减小, 但效果不明显。在  $r = 0.7$  处, 轴向本征函数基本不受磁流体粘度的影响。

综合以上五种情形可知, 轴向本征函数均随着压强的增大而减小, 压强较高 ( $p = 0.015$ ) 时, 轴向本征函数基本不受磁流体粘度的影响。

### 3 结论

本文数值模拟并分析了圆柱位型下, 具有均匀等离子体压强和粘度的等离子体系统受到外界扰动后, 处于不同位置的轴向本征函数随压强和粘度的演化规律。主要结论如下:

(1) 任意位置的轴向本征函数均随着等离子体压强的增大而减小, 这一规律不受到等离子体粘度变化的影响。这一规律体现了均匀等离子体压强对磁流体宏观不稳定性的抑制效应。

(2) 等离子体压强较低时, 靠近圆柱中心和等离子体壁处的轴向本征函数受粘度影响较大。

(3) 轴向本征函数在离子体半径较小时为负值, 在离子体半径较大时为正值, 即流体速度在半径较小和较大时的流向是相反的。

#### 参 考 文 献

[1] 朱卫华. 常压等离子体处理对毛织物湿润性能的影响[J]. 毛纺科技, 2018, 46(10): 39-42  
[2] 李灵均, 戴林君, 徐雨, 等. 常压射频等离子体沉积

TiO<sub>2</sub>纳米颗粒膜的空间均匀性[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018, 44(3): 467-472

- [3] 张洪达, 杨帆, 薛婷婷. 常压室温等离子体诱变及高效筛选异麦芽酮糖高产菌株[J]. 大连工业大学学报, 2018, 37(4): 235-238  
[4] 高明, 黄浩, 黄逸凡, 等. 常压氩气等离子体对碳纤维表面亲水改性研究[J]. 集成技术, 2018, 7(4): 16-23  
[5] 杨惕, 张燕, 徐庆南, 等. 利用大气压气液介质阻挡放电等离子体对PTFE进行表面改性[J]. 材料科学与工程学报, 2018, 36(4): 671-675  
[6] 宋飞龙, 金迪, 贾敏, 等. 大气压氩气环境下体积介质阻挡放电光谱特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(6): 1675-1679  
[7] 李岳妹. 玉米秸秆粉料在放电等离子体中的裂解反应研究[J]. 山东工业技术, 2018: 212-213  
[8] 李有栋, 王世清, 黄国清, 等. 减压等离子体处理对壳聚糖性质的影响[J]. 中国食品学报, 2018, 18(4): 45-50  
[9] 周广旭, 张楚楚, 徐雯峤, 等. 低压氢等离子体发光光谱[J]. 原子与分子物理学报, 2019, 36(1): 73-81  
[10] 台畅, 高志廷. 工艺参数对SiC刻蚀性能及微结构型貌的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(5): 1795-1798  
[11] 李程, 毛保全, 白向华, 等. 磁约束下等离子体的传热与流动特性仿真[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(4): 69-73  
[12] 石秉仁, 隋国芳. 电阻性磁流体内部扭曲模的离子粘滞性效应[J]. 核聚变与等离子体物理, 1997, 17(4): 7-11  
[13] 代玉杰, 陈明明, 王学慧, 等. 不同压强时等离子体宏观不稳定性的数值模拟[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(6): 605-609  
[14] 代玉杰, 王学慧. 磁流体径向本征函数的演化规律[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(12): 1190-1193  
[15] 代玉杰. 柱对称磁约束等离子体Line-Tied不稳定性的数值模拟[D]. 2008  
[16] 胡希伟. 等离子体理论基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006  
[17] Dai Yujie, Liu Jinyuan, Wang Xuehui. Effect of the Plasma Pressure on Magnetohydrodynamic Kink Instability in a Cylindrical Geometry[J]. Plasma Science and Technology, 2009, 11(3): 269-273