

液环泵轴向叶顶间隙泄漏流动的等离子体控制数值研究

郭广强^{1,2} 王静宜¹ 张人会^{1,2} 陈学炳¹ 杨军虎^{1,2}

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 针对液环泵叶轮轴向叶顶间隙泄漏问题,提出采用介质阻挡放电等离子体激励对液环泵轴向间隙气相泄漏流动进行控制,耦合唯象学模型、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型及VOF气液两相流模型模拟不同激励电压下等离子体对泄漏流场的干扰作用,探究等离子体激励对间隙泄漏流场的调控机理。结果表明,等离子体激励诱导的壁面射流方向与间隙泄漏流动方向相反,诱导的反向壁面射流能够有效地抑制泄漏流强度,并在一定程度上改善间隙泄漏流引起的二次流动,降低间隙泄漏流动损失;同时在等离子体激励的非间隙区域,等离子体激励诱导产生旋涡结构,使得近壁区域产生额外的水力损失。激励电压及位置对泄漏流控制效果有重要的影响,15 kV 激励电压的等离子体流动控制效果明显优于10 kV 激励电压,当激励位置位于叶顶间隙出口附近时等离子体激励对泄漏流具有较好的抑制效果。研究结果能够为液环泵的性能优化提供理论参考。

关键词: 液环泵; 气液两相流; 间隙泄漏流动; 等离子体激励; 流动控制

中图分类号: TH36

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298 (2022)09-0160-08

OSID:



Numerical Study on Plasma Control of Axial Tip Clearance Leakage Flow in Liquid Ring Pump

GUO Guangqiang^{1,2} WANG Jingyi¹ ZHANG Renhui^{1,2} CHEN Xuebing¹ YANG Junhu^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the leakage problem of axial tip clearance of the liquid ring pump impeller, dielectric barrier discharge plasma excitation was proposed to control the gas phase leakage flow in the axial clearance of the liquid ring pump. The interference of plasma on leakage flow field under different excitation voltages was simulated by coupling phenomenological model, RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and VOF gas-liquid two-phase model. The control mechanism of plasma excitation on clearance leakage flow field was investigated. The results show that the direction of the wall jet induced by plasma excitation was opposite to that of the clearance leakage flow. The reverse wall jet can effectively suppress the leakage flow intensity, improve the secondary flow caused by the clearance leakage flow to a certain extent, and reduce the clearance leakage flow loss. Meanwhile, the vortex structure was induced by plasma excitation in the non-clearance near-wall region, which caused additional hydraulic loss. The excitation voltage and position had an important influence on the control effect of leakage flow. The plasma flows control effect of 15 kV excitation voltage was significantly better than that of 10 kV excitation voltage. When the excitation position was near the outlet of blade tip clearance, the plasma excitation had a good suppression effect on the leakage flow. The research results can provide a theoretical reference for the performance optimization of liquid ring pumps.

Key words: liquid ring pump; gas-liquid two phase flow; clearance leakage flow; plasma excitation; flow control

收稿日期: 2022-06-07 修回日期: 2022-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979135)、甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA220)和中国博士后科学基金项目(2022MD713759)

作者简介: 郭广强(1986—),男,讲师,博士,主要从事水力机械内部流动及性能优化研究,E-mail: z13519653813@163.com

通信作者: 张人会(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事水力机械内部流动及性能优化研究,E-mail: zhangrh1ut@163.com

0 引言

液环泵是以液体作为能量转化的中间介质,用来抽送气体的流体机械^[1],由于其在抽送气体过程中具有近似等温压缩及无转子金属表面接触等优点,在抽送易燃易爆、有毒害及可凝性气体时具有极大优势,广泛应用于石化、电力及煤矿等领域;但是液环泵内复杂的气液流动导致其效率低及振动噪声大,其中叶轮轴向间隙泄漏流动是造成泵内复杂流动的主要原因之一。在液环泵内叶片工作面与背面、排气区与吸气区之间的压差作用下,介质在叶轮轴向端面间隙处产生泄漏高速射流,其与流道内的主流剪切、卷吸及掺混形成剪切涡及泄漏涡等复杂流动结构^[2-3],导致泵内的水力损失增大、水力激励特性复杂,进而限制泵的高效稳定运行^[4-5]。

目前国内外学者在液环泵内复杂气液两相流动及轴向间隙泄漏流动控制方面做了较多的研究^[6-11]。虽然现有的研究对液环泵轴向间隙泄漏流动控制进行了报道,但主要集中在被动流动控制方面,尽管被动流动控制在设计工况下会取得较好的效果,但其对工况变化的自适应能力差,且在非设计工况下会产生额外的附加阻力^[12]。

等离子体气动激励是近年来兴起的一种新型主动流动控制技术,具有功耗低、无运动部件、激励频带宽及易于大面积铺设等优点^[13],受到了国内外研究者的广泛关注。目前在压气机失速及扩稳的等离子体流动控制等方面学者们开展了大量的研究^[14-18]。

本文将等离子体激励引入水力机械内流动控制,提出基于介质阻挡放电等离子体激励的液环泵叶轮轴向叶顶间隙泄漏流动控制方法,耦合唯象学模型、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型及流体体积法 (Volume of fluid, VOF) 气液两相流模型对等离子体激励下的液环泵轴向叶顶间隙泄漏流场进行数值模拟,分析等离子体激励调控液环泵轴向间隙泄漏流动的机理及不同激励电压对泄漏流动的控制效果。

1 研究模型与计算方法

1.1 研究模型及其网格划分

以 2BEA 型液环泵为研究模型,为了实现泵内气液流动结构的可视化,将原型双吸式泵的结构进行改造,其传动端被改造为吸、排气端,非传动端为透明材质制作的可视化视窗,如图 1 所示。模型泵的基本参数:壳体半径 R 为 212 mm,叶轮轴向宽度 b_w 为 130 mm,叶轮外圆半径 r_2 为 183 mm,叶轮轮毂

半径 r_1 为 91 mm,叶轮轴向间隙宽度 f_d 为 0.5 mm,偏心距 e_d 为 23.1 mm,叶片数 Z 为 18,转速 n 为 1 450 r/min。采用 Pro/E 软件对模型泵计算域进行几何建模,为了减少计算量,建模时忽略吸排气侧的轴向间隙,保留侧盖一侧的轴向间隙,其计算域包括叶轮、壳体、进口延伸段、出口延伸段及轴向间隙。采用 ANSYS-ICEM 软件对模型泵计算域进行六面体结构网格划分,如图 2a 所示,全流场计算网格总数约为 6.50×10^6 ;图 2b(图中 PS 表示叶片压力面,SS 表示叶片吸力面)为 $s/c = 0.20$ (s/c 为叶片弦长系数,为叶片某一位置处的弦长占整个叶片弦长的比值)处垂直于叶片骨线截面 P 上的网格结构,为了能够精确捕捉叶轮轴向间隙泄漏流动结构,在间隙区域沿轴向布置 18 层网格,并对与间隙相邻计算域的网格进行局部加密,保证轴向间隙网格与相邻计算域网格的均匀过渡。

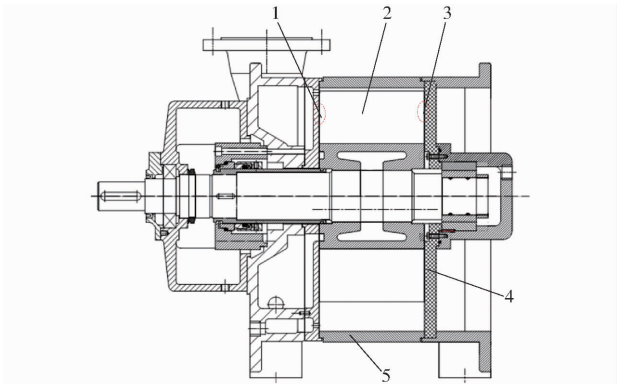


图 1 研究模型结构图

Fig. 1 Structure diagram of research model

1、3. 轴向间隙 2. 叶轮 4. 侧盖 5. 壳体

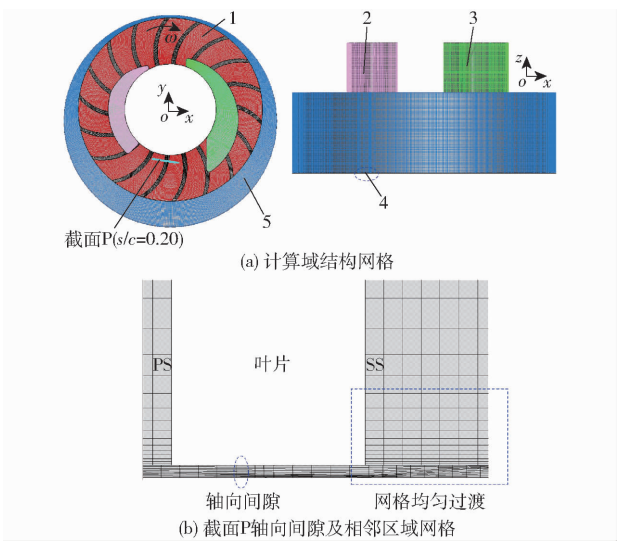


图 2 计算网格

Fig. 2 Computational grid

1. 叶轮 2. 排气段 3. 吸气段 4. 轴向间隙 5. 壳体

1.2 计算模型及边界条件

选择 VOF 模型模拟液环泵内部气液两相流动,

该模型中两种相互不相容的流体共用一套动量方程,并通过引入相体积分数来追踪计算域内的相界面^[8],模拟过程中将计算域内与泵壳同心的圆柱表面至壳体内表面区域设置为初始液相区域,液相设置为液态水,气相设置为可压缩性理想气体;考虑重力及相界面表面张力对流场的影响。湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型;采用滑移网格处理转子与静子之间的相互作用;进口边界条件设置为质量流量进口,出口设置为压力出口,参考压力为 101 325 Pa;非稳态计算时间步长设置为 9×10^{-6} s,数值模拟过程中,监测液环泵的进口真空度,当其周期性稳定脉动时,计算收敛。

本研究采用介质阻挡放电^[13]等离子体激励方式对液环泵轴向间隙泄漏流动进行控制。等离子体激励与间隙泄漏流场耦合的数值模拟采用文献[19]提出的唯象学模型,其根据大量的力学研究及实验,提出将等离子体作用区域简化为一个三角形(OAB)区域,如图 3 所示;求解该区域的电场力,将电场力作为体积力源项加入到 N-S 方程中,对流场进行模拟。

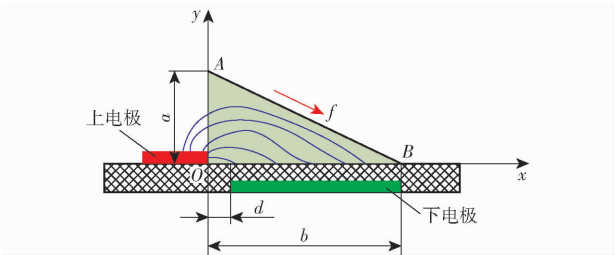


图 3 等离子体激励的等效区域
Fig.3 Equivalent region of plasma excitation

原点 O 处的电场强度 E 最大,电场强度在 OAB 区域内呈线性分布,可表示为

$$E(x,y)=E_0-k_1x-k_2y \tag{1}$$

其中
$$E_0=\frac{U}{d} \tag{2}$$

$$k_1=\frac{E_0-E_b}{b} \tag{3}$$

$$k_2=\frac{E_0-E_b}{a} \tag{4}$$

式中 E_0 ——原点处的电场强度,kV/cm
 U ——电极间施加的最大电压,kV
 d ——两电极在 x 方向的距离,mm
 E_b ——等离子体流动边界的击穿电场强度,kV/cm

x,y 方向的电场强度分量可表示为

$$E_x=\frac{E(x,y)k_2}{\sqrt{k_1^2+k_2^2}} \tag{5}$$

$$E_y=\frac{E(x,y)k_1}{\sqrt{k_1^2+k_2^2}} \tag{6}$$

等离子体激励产生的体积力可由电场力表示,该区域电场力的方向平行于 AB 边并指向斜下方,因此 x,y 方向的体积力可表示为

$$f_x=\rho_e e E_x \gamma_1 \Delta t \tag{7}$$

$$f_y=\rho_e e E_y \gamma_1 \Delta t \tag{8}$$

式中 ρ_e ——等离子体密度, cm^{-3}
 e ——元电荷,C
 γ_1 ——激励频率,kHz
 Δt ——一个激励周期等离子体作用时间, μs

根据等离子体激励的位置参数、激励电参数及电荷密度等求解体积力 f_i ,通过编写 UDF (User defined functions) 程序将其作为体积力源项加入到动量方程中,并添加到液环泵端盖内壁等离子体激励的流动控制区域,对等离子体激励下的泵内轴向间隙泄漏流场进行数值模拟。

由于液环泵排、吸气区之间压差的作用,导致吸气口末端至排气口始端气相区域泄漏较为严重;因此,在该区域的泵侧盖内壁均匀布置 9 组等离子体激励器,如图 4 所示。等离子体激励布局中,激励器沿径向布置,预期可产生一个与泄漏流流向相反的体积力分量来对间隙泄漏流动进行干扰(图 4),以实现 对 泄 漏 流 动 的 调 控。本 研 究 中 $a=0.5\text{ mm}$ 、 $b=5\text{ mm}$ 、 $d=0.25\text{ mm}$,激励频率 $\gamma_1=20\text{ kHz}$,等离子体作用时间 $\Delta t=67\text{ }\mu\text{s}$,等离子体密度 $\rho_e=10^{11}\text{ cm}^{-3}$,激励电压分别设置为 10、15 kV,击穿电场强度为 30 kV/cm 。

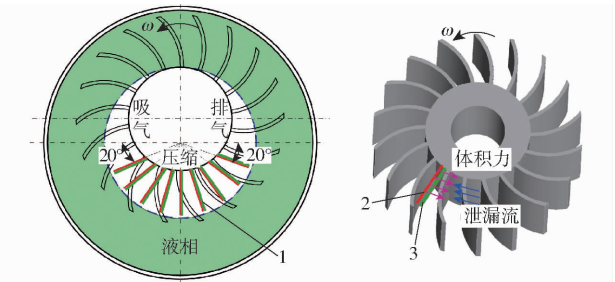


图 4 液环泵轴向端壁等离子体激励布局
Fig.4 Layout of plasma excitation on axial end wall of liquid ring pump
1. 等离子体激励器 2. 上电极 3. 下电极

2 结果与分析

2.1 计算方法验证

针对本文采用的液环泵研究模型,课题组前期已开展了泵内气液流动结构可视化及水力性能的实验研究,具体实验装置及测试方法详见文献[20],相关实验数据可用于本研究数值模拟的准确性验

证;液环泵的效率^[6]计算公式为

$$\eta = \frac{p_1 q_v \ln(p_2/p_1)}{M\omega} \times 100\%$$

(9)

- 式中
- p_1 ——泵进口绝对压力, Pa
 - p_2 ——泵出口绝对压力, Pa
 - q_v ——泵吸气体积流量, m^3/s
 - M ——作用于叶轮的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
 - ω ——叶轮角速度, rad/s

图 5 为无施加等离子体激励的液环泵水力性能 的数值与实验结果对比图,由图 5 可以看出,由于数 值计算的泵进口真空度大于实验结果,图中数值得 到的泵吸气压力小于实验结果,效率 η 高于实验结 果;数值计算的泵进口压力及效率随流量的变化趋 势与实验结果一致,其值随流量的增大呈逐渐增大 的趋势,但是数值与实验结果之间存在一定的误差, 其主要原因是在数值计算时忽略了泵传动端一侧的 轴向间隙泄漏流动损失及数值模拟网格难以捕捉液 环泵内的微小尺度气液湍流结构。

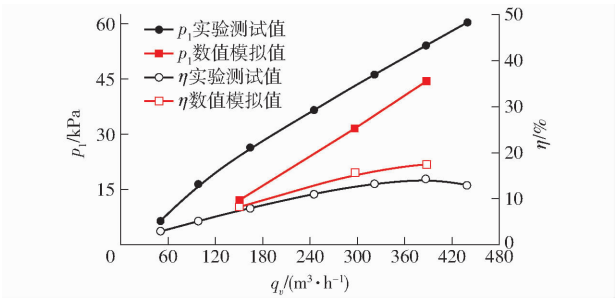


图 5 水力性能数值模拟与实验结果对比
Fig.5 Comparison between numerical simulation and experimental results of hydraulic performance

图 6 为不施加等离子体激励下液环泵叶轮轴向 中间截面相态场分布的数值及实验结果对比,由 图 6 可以看出,数值模拟得到的气液自由分界面形 状与可视化结果基本一致,均表现为与泵壳体同心 的近似圆形且液环内表面为锯齿不连续状。为了进 一步验证数值模拟结果的准确性,对如图 6 所示的 泵内 1/4 圆周液环内表面的大小进行分析;在数值

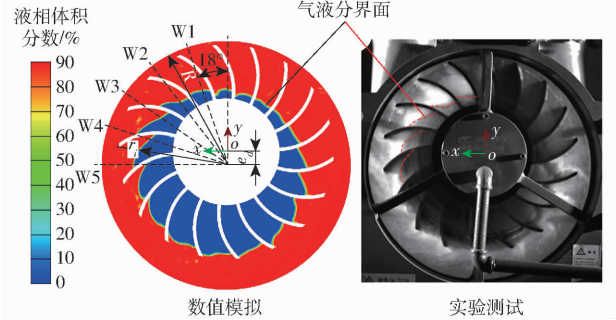


图 6 泵内气液两相分布数值模拟与实验结果对比
Fig.6 Comparison between numerical and experimental results of gas-liquid two-phase distribution in pump

及实验结果的 1/4 圆周内,以间隔 18°定义 5 个位置 W1、W2、…、W5(图 6),对各位置处液环内表面的 半径 r_i 进行无量纲化处理,得到无量纲化系数 $k = r_i/R$ 。表 1 为各参考位置处液环内表面 k 数值模拟 与实验结果对比,可以看出数值模拟结果 k_s 与实验 值 k_e 间的相对误差 ζ 均在 5% 以内。上述表明采用 的数值方法基本可以捕捉泵内的主要流动结构。笔 者前期对液环泵内部流动数值模拟方法的研究^[8] 也印证了本文数值方法的可行性。

表 1 泵内不同位置液环内表面 k 的数值与实验结果对比
Tab.1 Comparison between numerical and experimental results of inner surface of liquid-ring at different positions in pump

位置	实验值 k_e	模拟值 k_s	相对误差 $\zeta/\%$
W1	0.622	0.628	0.96
W2	0.635	0.627	1.26
W3	0.68	0.646	5.00
W4	0.681	0.648	4.80
W5	0.71	0.743	4.64

2.2 轴向间隙泄漏流场分析

基于液环泵在吸气质量流量 q_m 为 0.03 kg/s 工 况下的数值模拟结果,选取泵内气液两相流动非稳 态数值计算收敛后 0.184 42 s 时刻的计算结果,分 析轴向间隙泄漏流结构及其等离子体流动控制机 理。

为了分析液环泵轴向叶顶间隙泄漏流场结构及 其等离子体激励的流动控制效果,在间隙的轴向中 间位置截取截面 A;在压缩区同一叶片上以不同 s/c 截取截面 B、C,如图 7 所示。

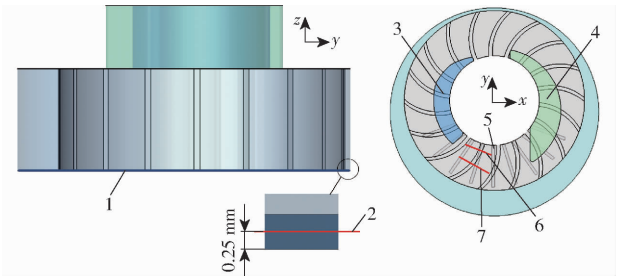


图 7 截面位置示意图

Fig.7 Schematic of section position

1. 轴向间隙 2. 截面 A 3. 排气口 4. 吸气口 5. 等 离子体激励区 6. 截面 B($s/c = 0.20$) 7. 截面 C($s/c = 0.50$)

图 8 为液环泵间隙轴向中间截面(截面 A)的速 度和截面 C 近壁区域的速度分布图。由截面 A 速 度分布可以看出,排、吸气口之间的压差作用,导致 排气区始端至吸气区末端区域出现明显的泄漏高速 射流分布;由截面 C 近壁区域速度分布可以看出, 泄漏高速射流沿旋转反方向流出间隙后,与叶轮主

流相互作用并逐渐耗散。

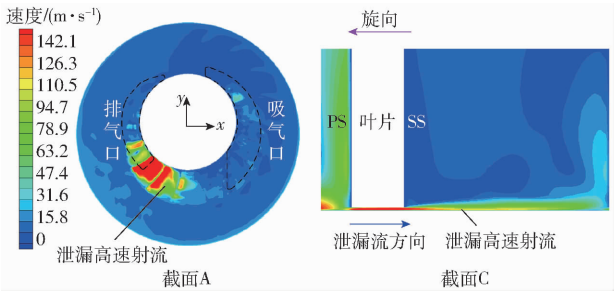


图 8 截面 A、C 的速度分布
Fig. 8 Velocity distribution on section A and C

2.3 等离子体激励调控间隙泄漏流场分析

在液环泵内气液两相流动的非稳态数值模拟收敛后,按照图 4 所示的等离子体激励布局,由激励位置及激励电参数编写 UDF 程序,并将其加载到等离子体激励区域,开展等离子体激励与泄漏流场耦合的数值模拟。图 9 为激励电压为 10 kV 和 15 kV 下等离子体激励诱导的体积力分布图,可以看出,体积力在近似三角形区域内呈均匀变化趋势,靠近原点位置,体积力逐渐增大。

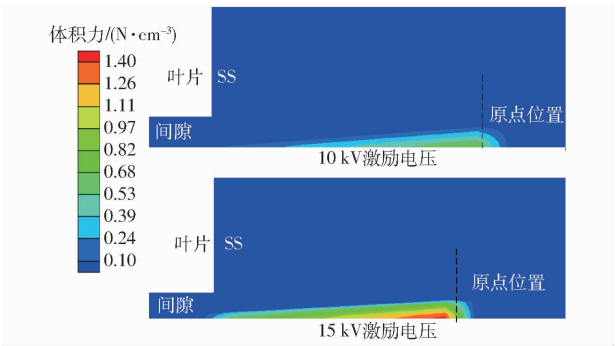


图 9 等离子体激励诱导的体积力分布
Fig. 9 Body force distribution induced by plasma excitation

图 10 为不同等离子体激励电压下液环泵水力性能相对值的变化。纵坐标中的 p 和 P 分别表示施加等离子体激励后泵的进口真空度和轴功率; p_0 、 P_0 、 η_0 分别表示不施加等离子体激励的泵进口真空度、轴功率、效率。由图 10 可以看出,施加等离子体激励后,泵的进口真空度变化较小,而轴功率随激励电压的增大显著减小,导致泵的效率增大;上述结果表明等离子体激励可在一定程度上抑制液环泵叶轮轴向叶顶间隙泄漏流动,提升泵的性能。

图 11 为叶轮流道截面 B、截面 C 的轴向近壁区域速度及其流线分布图。由图 11b 可以看出,等离子体激励能够在一定程度上改善液环泵轴向叶顶间隙泄漏流引起的二次流动。由图 11a、11b 可以看出,15 kV 激励电压下,等离子体激励位置

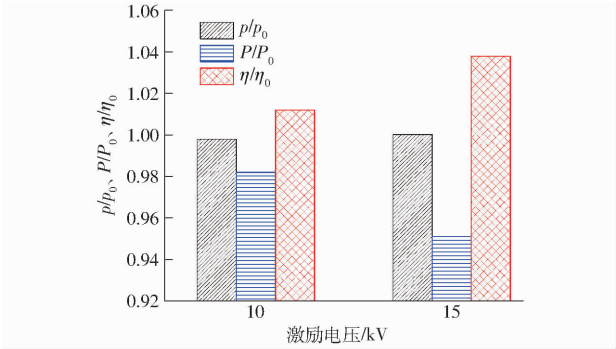


图 10 不同激励电压下泵的水力性能
Fig. 10 Hydraulic performance of pump under different excitation voltages

产生明显的壁面射流,其与间隙泄漏流的流向相反,反向壁面射流能够抑制泄漏流的强度;同时,在等离子体激励作用下,诱导激励位置产生旋涡结构。

由于等离子体激励器布置在泵侧盖内壁,随着叶轮的旋转,其与叶片之间的相对位置不断变化,因此不同激励位置对泄漏流动的抑制效果存在差异。由图 11a 可以看出,截面 B 中等离子体激励位置位于泄漏流下游,泄漏流速度较低,10 kV 和 15 kV 激励电压均能有效抑制泄漏流强度。由图 11b 可以看出,截面 C 中等离子体激励位置位于泄漏流上游,泄漏流的速度较大,10 kV 激励诱导的体积力较小,对间隙泄漏流的抑制效果不明显,但 15 kV 激励能够有效抑制间隙泄漏流强度。

为了分析等离子体激励沿叶片展向方向各截面上的泄漏流动抑制效果,选择叶轮内流道 I,并在流道 I 的 M 叶片上垂直于叶片骨线沿展向均匀截取 12 个平面 (S1 ~ S12),流道 I 及各截面位置如图 12 所示。图 13 为液环泵叶轮流道 I 内轴向近壁区域的湍动能分布。由图 13a 可以看出,液环泵轴向叶顶间隙泄漏导致流道近壁区产生较高的湍动能分布。由图 13b、13c 可以看出,15 kV 激励电压下,流道近壁区的湍动能明显较 10 kV 低,表明 15 kV 电压下等离子体激励能够更有效地抑制间隙泄漏流动,降低间隙泄漏流动损失,其与图 10 中的水力性能变化相对应。

图 14 为 15 kV 激励电压下流道 I 内截面 S11 的近壁区域湍动能及流线分布图;由图 14 可以看出,等离子体激励位置具有较高的湍动能分布。结合图 14 和图 11 可以发现,在等离子体激励的非间隙区域,等离子体激励作用一方面能够产生反向壁面射流对间隙泄漏流动进行控制,同时在等离子体激励位置产生诱导涡结构,并引起流道近壁区域产生额外的水力损失。

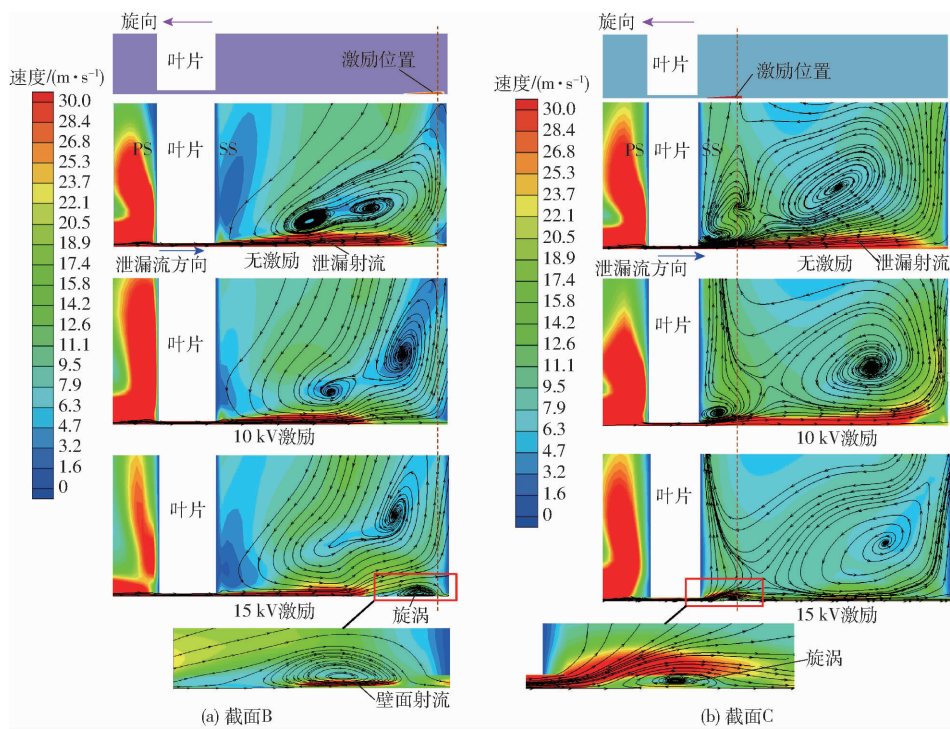


图 11 截面 B、C 的速度分布及流线图

Fig. 11 Velocity distribution and streamline diagram of section B and C

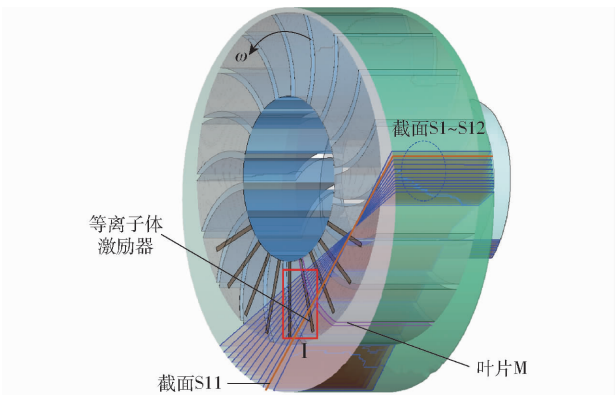


图 12 湍动能分析的流道位置

Fig. 12 Position of channel I for turbulent kinetic energy analysis

为了定量分析不同激励电压及位置对泄漏流动的抑制效果,将流道 I 内叶片展向截面 S1 ~ S12 的 II 区域(图 14)湍动能进行积分。图 15 为截面 S1 ~ S12 近壁区域 II 的湍动能相对值变化,纵坐标中的 ε 为施加等离子激励后的湍动能, ε_0 为不施加等离子激励后的湍动能。由图 15 可以看出,10 kV 电压下,当激励位置靠近叶轮轮毂时,等离子体激励对泄漏流的抑制效果变差;15 kV 激励电压的等离子体流动控制效果明显优于 10 kV 激励电压;15 kV 电压下,当激励位置位于叶顶间隙出口附近时等离子体激励对间隙泄漏流具有较好的抑制效果。

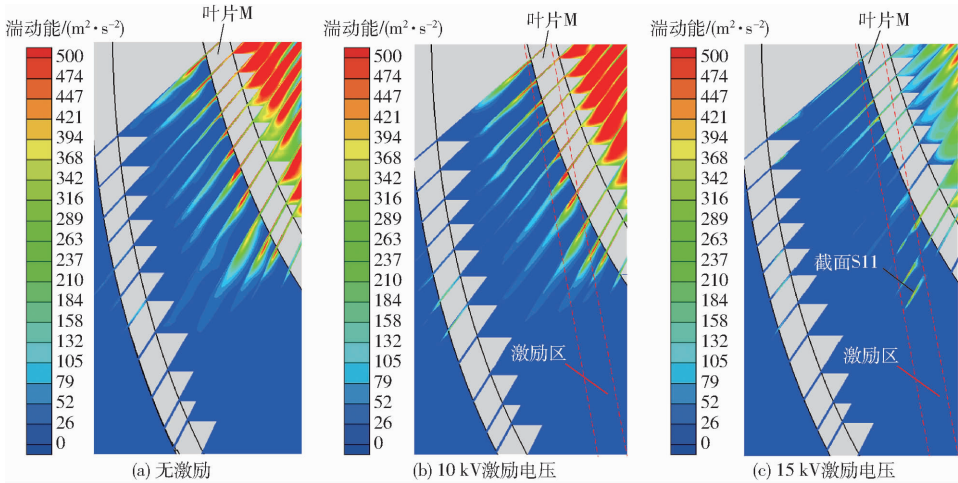


图 13 流道 I 内近壁区域的湍动能分布

Fig. 13 Turbulent kinetic energy distribution near wall in channel I

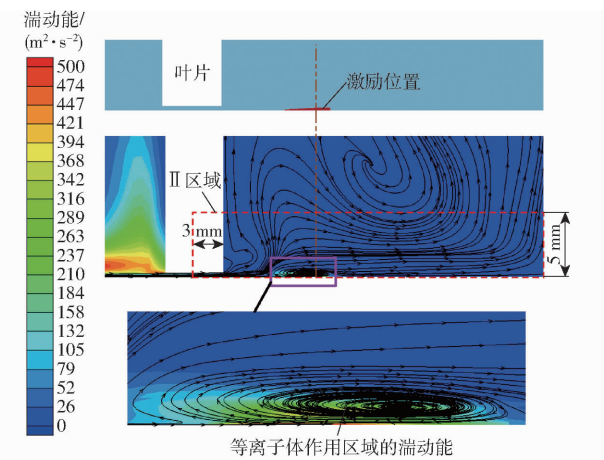


图 14 等离子体作用区域的湍动能分布及流线图
Fig. 14 Turbulent kinetic energy distribution and streamline diagram in plasma action region

3 结 论

(1)液环泵内排、吸区之间的压差作用导致排气区始端至吸气区末端区域出现明显的泄漏高速射流,其沿叶轮旋转的反方向流出间隙后,与叶轮主流相互作用并逐渐耗散。

(2)在等离子体激励作用下,等离子体激励诱

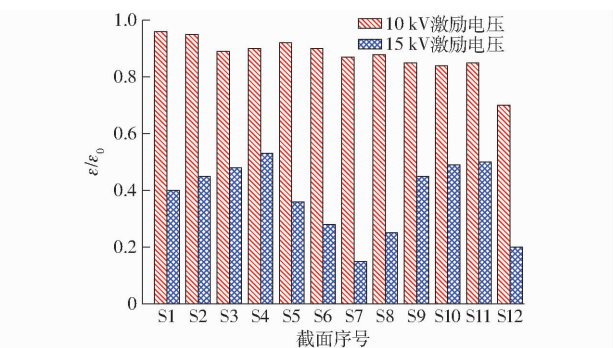


图 15 通道 I 内叶片展向截面近壁区域湍动能的相对值
Fig. 15 Relative values of turbulent kinetic energy in near-wall region of blade spanwise sections in channel I

导的壁面射流方向与间隙泄漏流方向相反,反向射流能够有效抑制间隙泄漏流强度,并在一定程度上改善由泄漏流引起的二次流动,同时在等离子体激励的非间隙区域,等离子体激励诱导近壁区产生旋涡结构,并引起一定的水力损失。

(3)等离子体激励对液环泵轴向叶顶间隙泄漏流动的抑制效果与激励电压及激励位置密切相关;15 kV 激励电压的等离子体流动控制效果明显优于 10 kV 激励电压,当激励位置位于叶顶间隙出口附近时等离子体激励对泄漏流具有较好的抑制效果。

参 考 文 献

[1] OSIPOV É V, TELYAKOV É S, LATYPOV R M, et al. Influence of heat and mass exchange in a liquid ring vacuum pump on its working characteristics[J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2019, 92(4):1055 – 1063.

[2] ZHANG Renhui, TIAN Lei, GUO Guangqiang, et al. Gas-liquid two-phase flow in the axial clearance of liquid-ring pumps[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(2):791 – 800.

[3] 张德胜, 邵佩佩, 施卫东, 等. 轴流泵叶顶泄漏涡流体力学特性数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3):72 – 82. ZHANG Desheng, SHAO Peipei, SHI Weidong, et al. Numerical simulation of tip leakage vortex hydrodynamics characteristics in axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3):72 – 82. (in Chinese)

[4] XU S, LONG X P, JI B, et al. Vortex dynamic characteristics of unsteady tip clearance cavitation in a waterjet pump determined with different vortex identification methods[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(12):5901 – 5912.

[5] SHEN X, ZHANG D S, XU B, et al. Experimental and numerical investigation on the effect of tip leakage vortex induced cavitating flow on pressure fluctuation in an axial flow pump[J]. Renewable Energy, 2021, 163:1195 – 1209.

[6] 张人会, 郭广强, 杨军虎, 等. 液环泵内部气液两相流动及性能分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12):99 – 103. ZHANG Renhui, GUO Guangqiang, YANG Junhu, et al. Investigation on inner gas-liquid flow and performance of liquid-ring pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):99 – 103. (in Chinese)

[7] 张人会, 李瑞卿, 张敬贤. 液环泵复合叶轮内流场及外特性分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4):122 – 129. ZHANG Renhui, LI Ruiqing, ZHANG Jingxian. Analysis of inner flow field and its hydraulic performance of liquid-ring pump with splitter blades[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4):122 – 129. (in Chinese)

[8] GUO G Q, ZHANG R H, YU H. Evaluation of different turbulence models on simulation of gas-liquid transient flow in a liquid-ring vacuum pump[J]. Vacuum, 2020, 180:109586.

[9] ZHANG R H, GUO G Q. Experimental study on gas-liquid transient flow in liquid-ring vacuum pump and its hydraulic excitation[J]. Vacuum, 2020, 171:109025.

[10] ZHANG Y F, LI J S, KANG J H, et al. Experimental study on the flow and heat transfer behavior of polymer solutions in the closed liquid ring pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 199(1):117525.

[11] 魏笑笑, 张人会, 刘桂洪, 等. 液环泵叶轮叶片轴向叶顶间隙微射流流动机理及性能分析[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6):1296 – 1303. WEI Xiaoxiao, ZHANG Renhui, LIU Guihong, et al. Flow mechanism and performance analysis of axial tip clearance micro jet in impeller blade of liquid ring pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6):1296 – 1303. (in Chinese)

[12] 李斌斌. 合成射流激励器及在主动流动控制中的应用[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008. LI Binbin. Synthetic jet and its application in active flow control[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)

[13] 李应红, 吴云, 梁华, 等. 等离子体激励气动力学探索与展望[J]. 力学进展, 2022, 52(1):1 – 32.

LI Yinghong, WU Yun, LIANG Hua, et al. Exploration and outlook of plasma-actuated gas dynamics[J]. Advances in Mechanics, 2022, 52(1):1 – 32. (in Chinese)

[14] 丁均梁, 聂永正, 周游天, 等. 等离子体激励频率对压气机稳定性影响的实验与数值模拟研究[J]. 推进技术, 2019, 40(4):786 – 795.
DING Junliang, NIE Yongzheng, ZHOU Youtian, et al. Experimental and numerical research on effects of plasma actuation frequency on compressor stability[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(4):786 – 795. (in Chinese)

[15] LI G, XU Y J, YANG L Y, et al. Low speed axial compressor stall margin improvement by unsteady plasma actuation[J]. Journal of Thermal Science, 2014, 23(2):114 – 119.

[16] WANG Z, YU J Y, CHEN F, et al. Effect of multiple DBD plasma actuators on the tip leakage flow structure and loss of a turbine cascade[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2019, 77:377 – 387.

[17] ZHANG H D, WU Y, LI Y H, et al. Control of compressor tip leakage flow using plasma actuation[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 86:244 – 255.

[18] 阳鹏宇, 张鑫, 赖庆仁, 等. 机翼尺度效应对等离子体分离流动控制特性的影响[J]. 力学学报, 2021, 53(12):3321 – 3329.
YANG Pengyu, ZHANG Xin, LAI Qingren, et al. Experimental investigation of the influence of scaling effects of wings on the flow separation control using plasma actuations[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(12):3321 – 3329. (in Chinese)

[19] SHYY W, JAYARAMAN B, ANDERSSON A. Modeling of glow discharge-induced fluid dynamics[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 92(11):6434 – 6443.

[20] 郭广强. 液环泵内气液两相流动特性及其性能优化研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2020.
GUO Guangqiang. The research on gas-liquid two-phase flow characteristics of liquid ring pump and its performance optimization[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020. (in Chinese)

(上接第 49 页)

[21] 张春艳, 康建明, 彭强吉, 等. 棉花气吸滚筒式穴播器二次投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6):106 – 116.
ZHANG Chunyan, KANG Jianming, PENG Qiangji, et al. Design and test of secondary seed feeding mechanism of air-suction roller dibbler for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6):106 – 116. (in Chinese)

[22] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7):40 – 50.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Effect of seed adsorption posture of corn air-suction metering device on seed feeding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7):40 – 50. (in Chinese)

[23] 廖宜涛, 廖庆喜, 王磊, 等. 气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24):10 – 17.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Investigation on vacuum singulating effect influencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24):10 – 17. (in Chinese)

[24] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米精量排种器双侧清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7):29 – 39.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of double-side cleaning mechanism for air-suction maize seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7):29 – 39. (in Chinese)

[25] 杨文彩, 阚成龙, 张效伟, 等. 气吸式三七育苗播种精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6):95 – 105.
YANG Wencai, KAN Chenglong, ZHANG Xiaowei, et al. Design and test of precision seed metering device for *Panax notoginseng* seedling and seeding by air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6):95 – 105. (in Chinese)

[26] 胡梦杰, 夏俊芳, 郑侃, 等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8):73 – 85.
HU Mengjie, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):73 – 85. (in Chinese)

[27] 高筱钧, 周金华, 赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2):20 – 28.
GAO Xiaojun, ZHOU Jinhua, LAI Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2):20 – 28. (in Chinese)

[28] 张顺, 夏俊芳, 周勇, 等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器排种性能分析与田间试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3):14 – 23.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Field experiment and seeding performance analysis of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3):14 – 23. (in Chinese)

[29] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 粳稻穴播排种器直线型搅种装置设计及排种精度试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17):1 – 9.
ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Line-churning tooth design and metering accuracy experiment of rice pneumatic precision hill-drop seed metering device on pregnant Japonica rice seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17):1 – 9. (in Chinese)

[30] 史嵩, 周纪磊, 刘虎, 等. 驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5):61 – 70.
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):61 – 70. (in Chinese)