DOI: 10.3901/JME.2020.22.271

双介质双排量轴向柱塞泵配流窗处液体的 泄漏和掺混特性*

孙亚楠 高殿荣

(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 为进一步提高反渗透海水淡化系统的集成度及其动力元件的工作效率,同时降低该系统的能耗,从理论上推导一种新型反渗透海水淡化变量电机泵中,双介质双排量轴向柱塞泵配流窗处两种不同浓度海水的泄漏和掺混特性。同时,通过有限元模拟的方法,研究分析该柱塞泵在不同结构参数和运行参数下两对配流窗处两种不同浓度海水的泄漏和掺混特性。通过与理论分析结果对比,验证分析模型和所得结果的正确性。分析结果表明:该柱塞泵两侧配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性随缸体转速的升高而小幅减弱,随液膜厚度增加而明显增强;该柱塞泵外侧配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性几乎不受浓盐水侧压力变化的影响,而其内侧配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性则随着浓盐水侧压力的增加而明显减弱。研究结果为海水淡化双介质双排量轴向柱塞泵设计及其配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性研究提供参考。

关键词: 双介质双排量轴向柱塞泵; 泄漏特性; 掺混特性; 结构参数; 运行参数

中图分类号: TH137; P747

Liquid Leakage and Mixing Characteristics at Distribution Windows of Dual-medium and Dual-displacement Axial Piston Pumps

SUN Yanan GAO Dianrong

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: In order to further improve the integration of the reverse osmosis desalination system and the working efficiency of its power components, while reducing the energy consumption of the system, the leakage and mixing characteristics of two different concentrations of seawater at the distribution windows of double-medium and double-displacement axial piston pump in variable reverse osmosis seawater desalination motor pump are deduced theoretically. At the same time, through the method of finite element simulation, the leakage and mixing characteristics of two different concentrations of seawater at two pairs of distribution windows under different structural parameters and operating parameters are studied and analyzed. The correctness of the analysis model and the results obtained is verified by comparing with the theoretical analysis result. The analysis results show that the leakage and mixing characteristics of seawater with different concentrations at the distribution windows on both sides of piston pump are slightly weakened with the increase of the cylinder rotation speed and obviously increase with the increase of the liquid film thickness. At the same time, it is shown that the leakage and mixing characteristics of seawater with different concentrations at the outer distribution windows of the piston pump are hardly affected by the pressure change on the thick brine side. However, the leakage and mixing characteristics of the seawater with different concentrations at the inner distribution windows weakened significantly as the pressure on the thick brine side increases. The research results can provide a reference for the design of seawater desalination double-medium and double-displacement axial piston pump and the study of leakage and mixing characteristics of seawater with different concentrations at the distribution windows.

Key words: double-medium and double-displacement axial piston pump; leakage characteristics; mixing characteristics; structural parameters; operating parameters

* 河北省高等学校科学技术研究资助项目(ZD2020120)。20191128 收到初稿, 20200415 收到修改稿

0 前言

反渗透海水淡化技术具有结构可靠、操作简单、净化效率高以及装置投资成本较低等特点,在海水淡化领域得到快速的发展和应用^[1-3]。但是较高的运行能耗成为制约反渗透海水淡化技术发展的关键因素,因此利用海水淡化过程产生的高压浓盐水对低压海水进行加压从而实现余压能二次利用的能量回收装置应运而生^[4]。如果能量回收装置中两种不同浓度的海水发生泄漏和掺混,将大大影响反渗透海水淡化系统的工作效率。为了适应越来越多复杂的工作环境,反渗透海水淡化系统正向集成化和高效化的方向发展^[5]。因此,提出一种新型的高效节能的高集成反渗透海水淡化元件并对其内部两种不同浓度海水的泄漏和掺混特性进行分析具有重要的研究意义。

反渗透海水淡化系统由电机、高压泵、增压泵及能量回收装置组成,其中能量回收装置是将系统工作过程中产生的高压浓盐水的压力能转化为海水压力能的核心装置。对如何提高反渗透海水淡化系统的集成度并降低其内部不同浓度海水的泄漏和掺混特性的研究受到了广泛的关注。JOHN^[6]对旋转式能量回收装置进行了结构改进,将压力提升泵和旋转式能量回收装置的动力进行融合,并通过同一电机实现旋转式压力能交换器和压力提升泵的工作。宋涛^[7]提出了一种集高压泵和能量回收装置于一体的新型元件,并利用 Fluent 对其内部液体的流动特性进行了研究。肖述晗^[8]以由柱塞式增压泵和压力交换器融合而成的反渗透海水淡化一体式能量回收装置为研究对象,分析了该装置的掺混和配流特性。JEREMY 等^[9]对旋转式能量回收装置的转子孔道结构进行了优化设计,并通过试验证明改进后的结构有利于减缓孔道内浓盐水和原料海水之间的相互渗透。SHUMWAY^[10]在其专利中提出通过在端面与孔道之间建立一个流体回路并通过加压流体来提供密封力从而减少液体的泄漏。同时作为柱塞泵的关机键结构,配流盘结构的创新和改进优化也是专家学者的研究重点。KASSEM 等^[11]通过流量数学模型分析了配流盘卸荷槽的不同结构对泵动态特性的影响。MA 等^[12]分析了卸荷槽结构参数对压力冲击和流量脉动的影响。张晓刚等^[13]针对单环柱塞数减少,腔内压力冲击增大,脉动变大等问题,设计了双排油内外环并联配流结构轴向柱塞泵。杨阳等^[14-15]深入分析了轴向柱塞泵配流过程中的压力和流量脉动。张德胜等^[16-18]通过增加预压缩

容积和在配流过渡区设置单向阀等方法,对柱塞泵的流量、压力脉动进行了研究。

本文对由双介质双排量轴向柱塞泵和电机组成的新型反渗透海水淡化变量电机泵中双介质双排量轴向柱塞泵配流窗处两种不同浓度海水的泄漏和掺混特性进行了研究,为海水淡化双介质双排量轴向柱塞泵设计及其配流窗处不同浓度海水的泄漏特性和掺混特性研究提供了一定的参考。

1 新型反渗透海水淡化变量电机泵

传统的海水淡化系统如图 1 所示。经过预处理的低压海水通过高压柱塞泵后变成高压海水进入反渗透膜组件,一部分通过反渗透膜组件变成淡水,另一部则被阻留形成高压浓盐水进入能量回收装置,并通过该装置对低压海水进行增压,随后从该装置排出,由此实现能量回收的过程。在这一过程中,高压柱塞泵只起到对低压海水加压的作用,同时与电机、增压泵以及能量回收装置均为独立的元件,因此各元件之间存在较大的能量损失。

图 1 传统海水淡化系统图

当前海水淡化系统的应用场景和实际工况变得日益复杂,节能化和高效化成为其重要的发展趋势^[19-20]。因此本文通过将斜盘式柱塞泵中的柱塞改进为活塞,以构建活塞腔内密闭的两个容腔,并在配流盘上构建两对配流窗以实现两密闭容腔的配流过程,从而形成双介质双排量轴向柱塞泵,同时将该泵整个缸体嵌套于电机转子内从而形成集电机、高压柱塞泵、增压泵及能量回收装置于一体的反渗透海水淡化变量电机泵,其结构如图 2 所示。

该双介质双排量轴向柱塞泵结构如图 3 所示。在工作过程中,当活塞杆收回时,高压浓盐水通过配流盘进入有杆腔,与电机共同驱动活塞杆为无杆腔中的低压海水加压形成高压海水并从配流盘流出进入反渗透膜组件进行淡化处理;当活塞杆伸出时,在电机的驱动下,低压海水在通过配流盘进入无杆腔的同时,低压浓盐水通过配流盘被排出,

图2 反渗透海水淡化变量电机泵结构

图3 双介质双排量轴向柱塞泵结构

由此完成整个电机泵的吸排过程。这一过程既实现了高压浓盐水的能量回收，也由于将多个元件进行高度集成而进一步提高了系统的工作效率。

2 液体泄漏特性和掺混特性理论分析

配流副处的泄漏是轴向柱塞泵泄漏的主要组成部分，其大小直接影响到泵的容积效率。此外，由于本文构建的双介质双排量轴向柱塞泵配流副处同时存在两种不同浓度的海水，因此在其配流副处发生泄漏的同时一定会伴随着不同浓度海水的相互渗透掺混，这对海水淡化系统的效率和能耗等具有一定的影响。因此，有必要在理论上对该柱塞泵配流副处不同浓度海水的泄漏和掺混特性进行分析。

双介质双排量轴向柱塞泵的配流副模型如图4所示。该配流副含有两对配流窗且各自夹角不同。两对配流窗分别用于浓盐水和海水的配流，二者之间由一层液膜连接，通过内、外密封进行间隙密封。同时由图4可知，该配流副中高压海水侧和高压浓盐水侧分布在配流盘一侧，而低压海水侧和低压浓盐水侧分布在配流盘另一侧。

根据流体力学理论，对于图4所示的配流副，假设配流窗液膜处液体的径向速度为0，则外密封带外侧的泄漏主要来自高压海水区，泄漏量为

图4 双介质双排量轴向柱塞泵配流副模型

$$Q_o = \frac{\alpha_{se} \delta^3 \Delta p_{se}}{12 \mu_{se} \rho_{se} \ln(R_3/R_4)} \quad (1)$$

内密封带内侧的泄漏主要来自高压浓盐水区，泄漏量为

$$Q_i = \frac{\alpha_{sa} \delta^3 \Delta p_{sa}}{12 \mu_{sa} \rho_{sa} \ln(R_2/R_1)} \quad (2)$$

式中 Q ——泄漏量；
 α ——配流窗夹角；
 δ ——液膜厚度；
 Δp ——密封带两侧压差；
 μ ——液体运动黏度；
 ρ ——液体密度；
 R ——内外密封带内外侧半径。

由式(1)和式(2)可知，配流副处液体泄漏量与压差 Δp 、液膜厚度 δ 的三次方及配流窗夹角 α 成正比，与液体运动黏度 μ 、液体密度 ρ 成反比，同时与密封带内外径的比值有关。其中液膜厚度 δ 对配流副处液体泄漏的影响最为敏感。

由于两对配流窗中海水的压力和浓度及各配流窗的夹角不同，因此在运行过程中，除了上述泄漏发生之外，浓盐水腔和海水腔之间也会发生相互渗透掺混，两种不同浓度海水渗透混合之后的浓度为

$$C = \frac{V_{se} C_{se} + V_{sa} C_{sa}}{V_{se} + V_{sa}} \quad (3)$$

式中 C ——溶液浓度(体积分数)；
 V ——溶液体积；

由式(3)可知，两种不同浓度海水渗透混合后的浓度由混合之前各浓度海水的体积和浓度决定。

3 液体泄漏和掺混特性数值分析

双介质双排量轴向柱塞泵的流体域模型如图5

图 5 双介质双排量轴向柱塞泵的流体域模型

所示。根据第 2 节理论分析可得,在配流盘结构及电机泵工作介质确定的情况下,影响配流窗处泄漏和掺混特性的主要因素有内、外密封带两侧的压差和液膜的厚度。

结合反渗透海水淡化变量电机泵的自身结构和实际运行工况,本节利用有限元模拟仿真软件 **Pumplinx** 在不同结构参数和运行参数下,对其中双介质双排量轴向柱塞泵配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性进行研究。给定双介质双排量轴向柱塞泵的初始结构参数和运行参数如表 1 所示,以缸体转速、液膜厚度和浓盐水侧压力三个因素为单一变量,分别研究它们对配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性的影响。

在利用 **Pumplinx** 对双介质双排量轴向柱塞泵配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性分析时,首先通过 **SolidWorks** 建立图 5 所示的液膜以下海水和浓盐水进出口流体域模型,并在同一模型中建立液膜以上单个柱塞腔的流体域模型,然后将模型导入 **Pumplinx** 中进行下一步参数设定;在设定该柱塞泵流体域模型边界条件时,利用 **Pumplinx** 给定的柱塞泵边界条件选项,选中上述建立的单个柱塞腔的流体域模型生成与真实柱塞泵相同的旋转壁面边界条件和液膜,其中斜盘倾角是通过设定其法向向量确定的;将海水和浓盐水的入口边界条件设定为压力入口;将海水和浓盐水的出口以及液膜内外两侧边界条件设定为压力出口;将柱塞腔的流体域下表面与液膜上表面、液膜下表面与配流窗上表面设为两对交界面;其余表面边界条件设定为壁面。选择流体模型中的湍流模型、空化模型及浓度模型并采用默认参数,在完成海水浓度、缸体转速和转动方向等参数的设定之后,开始对该泵配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性进行模拟仿真。

通过监测缸体旋转一周的过程中液膜内、外侧的流量变化来表述配流窗处不同浓度海水的泄漏特性,而其掺混特性则是通过在 2 对配流窗底部建立图 6 所示的 32 个监测点,并监测各点的平均浓度变化来表述的。

表 1 双介质双排量轴向柱塞泵初始结构参数和运行参数

参数	参数	数值
结构参数	斜盘倾角/(°)	15
	柱塞个数/个	9
	液膜厚度/ μm	6
运行参数	缸体转速/(r/min)	1 500
	海水浓度	0.2
	海水腔出口压力/MPa	7.0
	浓盐水浓度	0.6
	浓盐水腔入口压力/MPa	6.7

图 6 配流窗处浓度监测点示意图

3.1 缸体转速对泄漏和掺混特性的影响

反渗透海水淡化变量电机泵是将电机的转子和双介质双排量轴向柱塞泵的缸体融合为一体从而驱动柱塞泵工作的。电机泵的流量变化是通过改变电机转速(即缸体转速)实现的,而缸体转速变化会直接导致柱塞腔在低高压切换时压力峰值大小和压力维持时间的变化,同时缸体转速的变化也会间接影响到两对配流窗液膜处液体的径向速度变化,而这些因素的变化均会对配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性产生影响。因此,有必要探究缸体转速对配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性的影响规律。这里以表 1 所示的双介质双排量轴向柱塞泵初始参数为基础,对缸体转速分别为 1 200 r/min、1 500 r/min、1 800 r/min 以及 2 100 r/min 时配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性进行分析,得到泄漏特性曲线和掺混特性曲线。

由于该电机泵含有 9 个活塞,因此在缸体旋转一周的过程中,密封带内、外侧液体的瞬时泄漏量会出现 9 个周期性的变化,这与图 7 所示泄漏特性曲线图相一致。同时由图 7 可知,随着缸体转速的增加,该柱塞泵配流窗处不同浓度海水的泄漏量呈现出逐渐减小的趋势,但总体变化范围较小,这是因为虽然缸体转速的增加虽然会加强柱塞腔在低高压切换时的压力冲击,但同时也大大减小了冲击压力的持续时间。

由图 7a 可知,在缸体转速一定时,密封带外侧泄漏量在每个周期(如图 7a 虚线框中的周期)

图 7 不同转速下密封带内外侧泄漏量

内呈现出首先迅速上升、迅速下降, 接着小幅上升、下降, 最后再次小幅上升、下降的趋势。

出现以上泄漏量变化趋势与电机泵自身的结构具有直接的关系。如图 8 所示为海水腔和浓盐水腔在发生低高压切换时的几个特殊的位置, 如图 8a 所示, 当 1 号位置的海水腔与配流窗接通时, 由于二者之间的过流面积较小, 而柱塞一直在向下运动, 因此该海水腔内压力会高于配流窗内海水的压力, 出现泄漏量迅速上升的现象; 随着缸体的转动, 1 号位置的海水腔与配流窗完全接通, 同时 5 号位置的海水腔脱离配流窗, 此时出现泄漏量出现迅速下降的现象; 当 9 号位置的海水腔和浓盐水腔旋转至如图 8b 所示的位置时, 柱塞开始上升, 浓盐水腔的压力逐渐增大, 从而使得该位置的海水腔与配流窗之间液膜内部的压力逐渐变大, 出现泄漏量小幅增加的现象; 随着缸体继续转动, 9 号位置的浓盐水腔逐渐转近配流窗, 其腔内浓盐水发生向配流窗流动的情况, 造成浓盐水腔内压力小幅度下降, 从而使得该位置的海水腔与配流窗之间液膜内部的压力小幅下降, 出现泄漏量小幅下降的现象; 当 9 号位置的海水腔和浓盐水腔旋转至如图 8c 所示

的位置时, 浓盐水腔与配流窗相接, 该腔内部压力达到峰值, 从而使得该位置的海水腔与配流窗之间液膜内部的压力变大, 出现泄漏量明显增加的现象; 当 9 号位置的海水腔逐渐转近配流窗至如图 8d 所示的位置时, 其腔内海水发生向配流窗流动的情况, 这造成海水腔内压力小幅度下降, 从而使得该位置的海水腔与配流窗之间液膜内部的压力小幅下降, 出现泄漏量小幅下降的现象; 最后当 9 号位置的海水腔和浓盐水腔旋转至如图 8a 所示的位置时, 进入下一周期的循环。

图 8 低高压切换过程中柱塞腔的位置

由图 7b 可知, 在缸体转速一定时, 密封带内侧泄漏量在每个周期(如图 7b 虚线框中的周期)内呈现出首先迅速上升后下降, 然后迅速上升后急速下降, 最后小幅度上升后下降的趋势。出现这样的变化趋势同样与海水腔和浓盐水腔在发生低高压切换时几个特殊的位置有关, 具体位置如图 9 所示。

图 9 低高压切换过程中柱塞腔的位置

如图 9a 所示, 当 1 号位置的浓盐水腔与配流窗相接, 腔内压力达到峰值且大于配流窗内浓盐水的压力, 从而导致泄漏量迅速上升; 随着当 1 号位置的浓盐水腔逐渐旋转进入配流窗, 腔内压力迅速

下降为配流窗内浓盐水压力,从而导致泄漏量迅速下降;随着缸体继续旋转,5号位置的浓盐水腔开始脱离配流窗,在旋转至如图9b所示位置的过程中,与配流窗接通的浓盐水腔由5个变为4个,对应高压浓盐水的分布角度会在达到最大之后恢复至最小,从而出现泄漏量先达到最大值之后迅速减小的现象;当9号位置的浓盐水腔旋转至如图9c所示的位置时,浓盐水腔的压力开始增加,从而使得泄漏量小幅度增加;随着9号位置的浓盐水腔和配流窗距离的减小,该腔内浓盐水发生向配流窗流动的情况,使得腔内压力小幅度下降,从而导致泄漏量小幅减小,之后当9号位置的海水腔和浓盐水腔旋转至如图9a所示位置的过程中,浓盐水腔内压力逐渐增加,进入下一个循环周期。

反渗透海水淡化变量电机泵在开始运行时首先通入海水,因此在对掺混特性进行分析时,假定液膜处只有海水而没有浓盐水存在。得到的不同转速下内外侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性如图10所示,其中Z轴正方向为低压配流窗一侧,Z轴负方向为高压配流窗一侧,缸体旋转方向如图所示。由图10可知,随着缸体转速的增加,内外

两侧配流窗处的海水浓度变化量呈现出逐渐减小的趋势,这是因为随着缸体转速的增加,电机泵对液体的吸排频率增加,配流窗内不同浓度海水的掺混时间减小,同时由上述分析可知,随着缸体转速的增加,液膜内外侧的泄漏量逐渐减小,液膜内液体流动逐渐放缓,导致浓度变化逐渐减小,即掺混特性逐渐减弱。

外侧配流窗掺混特性如图10a所示。由于低压侧为海水的入口侧,海水经配流窗流过液膜,因此该侧海水浓度基本没有变化,而由图4可知,该柱塞泵高压浓盐水侧配流窗夹角大于高压海水侧配流窗夹角,因此会有部分浓盐水泄漏到低压海水侧接近低高压切换一端并进入海水腔由高压海水侧排出,从而使得图10a所示的高压海水侧浓度升高。

内侧配流窗掺混特性如图10b所示。由于内侧配流窗高压浓盐水侧为入口侧,浓盐水经配流窗流过液膜,因此这一侧浓盐水浓度基本没有变化,而低压浓盐水侧为出口侧,在浓盐水流过时,会和液膜处的海水发生掺混,导致其浓度降低。

3.2 液膜厚度对泄漏和掺混特性的影响

通过第2节理论分析可知配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性对液膜厚度的变化十分敏感,同时由于反渗透海水淡化电机泵自身的特殊结构对于配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性影响十分复杂,因此有必要探究液膜厚度对配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性的影响规律。这里以表1所示的双介质双排量轴向柱塞泵初始参数为基础,对液膜厚度分别为 $4\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $6\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 时配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性进行分析,得到如图11和图12所示的泄漏特性曲线和掺混特性曲线。

由图11可知,在不同液膜厚度下,密封带内外侧的瞬时泄漏量具有相同的变化趋势;随着液膜厚度的增加,泄漏量的波动幅度明显增加,这是由于随着液膜厚度的增加,其内部流体的流动受边界

图10 不同转速下内外侧配流窗处的掺混特性

(a) 密封带外侧泄漏量

图 11 不同液膜厚度下密封带内外侧泄漏量

层的影响减小, 流动阻力减小, 从而导致泄漏量的波动幅度增加, 但通过计算发现, 不同液膜厚度下密封带内外侧的瞬时泄漏量的波动幅度占其平均泄漏量的百分比基本相同。同时分析图 11 发现, 随着液膜厚度的增加, 密封带内外侧的泄漏量呈现出明显增加的趋势。为了与第 2 节对配流窗处液体泄漏量的理论分析进行对比, 这里对图 11 所示的泄漏特性曲线进行量化处理, 得到表 2 所示的液膜两侧平均泄漏量与液膜厚度的关系。

表 2 平均泄漏量与液膜厚度的关系

液膜厚度 $h/\mu\text{m}$	内侧泄漏 $Q_i/(\text{L}/\text{min})$	比值 Q_i/h^3	外侧泄漏 $Q_o/(\text{L}/\text{min})$	比值 Q_o/h^3
4	0.052 6	0.000 8	0.144 6	0.002
5	0.100 9	0.000 8	0.276 4	0.002
6	0.170 7	0.000 8	0.463 6	0.002
7	0.262 0	0.000 8	0.707 7	0.002

由表 2 可知, 液膜两侧平均泄漏量与对应液膜厚度三次方的比值可近似认为是一个定值, 这与第 2 节理论分析结果相同, 证明了以上分析模型和所得结果的正确性。

不同液膜厚度下内外两侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性如图 12 所示。由图 12 可知, 在同一

(a) 外侧配流窗掺混特性

图 12 不同液膜厚度下内外侧配流窗处掺混特性

液膜厚度下, 内外两侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性与图 10 所示的相同缸体转速下内外两侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性具有相同的变化趋势; 随着液膜厚度的增加, 其掺混特性明显增强, 这是由于随着液膜厚度的增加, 液膜内部流体流动明显加强, 从而加剧了不同浓度海水的混合, 增强了两侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性。

3.3 浓盐水侧压力对泄漏和掺混特性的影响

反渗透海水淡化变量电机泵在工作过程中将高压低浓度的海水输送至反渗透膜组件进行淡化处理, 其中一部分通过膜组件成为淡水, 而另一部分则被阻留形成高浓度海水, 即浓盐水。由于反渗透膜在工作过程中膜组件的海水渗透率会逐渐下降, 因此会导致浓盐水侧的压力升高, 因此本节以表 1 所示的双介质双排量轴向柱塞泵初始参数为基础, 对浓盐水侧压力分别为 6.7 MPa、6.8 MPa、6.9 MPa、7.0 MPa 时配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性进行研究。

通过分析得到的配流窗处不同浓度海水的泄漏特性曲线如图 13 所示。由图 13 可知, 双介质双排量轴向柱塞泵浓盐水侧压力的变化对密封带外侧的泄漏量几乎没有影响, 而密封带内侧的泄漏量却随着浓盐水侧压力的增长发生了明显的升高, 这与第 2 节对配流窗处液体泄漏量的理论分析结果大致相符, 为了进一步与上述分析结果进行定量对比, 这里对图 13b 所示的泄漏特性曲线进行量化处理, 得到表 3 所示的液膜内侧平均泄漏量与浓盐水侧压力的关系。

分析表 3 可以发现, 液膜内侧平均泄漏量与对应的浓盐水侧压力的比值相差极小, 可近似认为是一个定值, 这与第 2 节的理论分析结果相同, 再次证明了以上分析模型和所得结果的正确性。

图13 不同浓盐水压力下密封带内外侧泄漏量

表3 平均泄漏量与浓盐水侧压力的关系

浓盐水侧压力 p /MPa	内侧泄漏 Q_i /(L/min)	比值 Q_i/p
6.7	0.168 2	0.025 5
6.8	0.170 7	0.025 5
6.9	0.175 6	0.025 5
7.0	0.178 1	0.025 4

通过分析得到的配流窗处不同浓度海水的掺混特性曲线如图14所示。由图14a可知,随着双介质双排量轴向柱塞泵浓盐水侧压力的增加,外侧配流窗的掺混特性呈现出小幅度增强的趋势,这是因为浓盐水侧压力提高增加了浓盐水向外侧配流窗的泄漏量,使得该侧海水浓度上升;由图14b可知,在同一浓盐水侧压力下,内侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性与图10所示的相同缸体转速下内侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性具有相同的变化趋势;同时发现随着浓盐水侧压力的增加,其掺混特性明显减弱,这是由于随着浓盐水侧压力的增加,内外两侧配流窗压差逐渐减小,从而抑制了外侧配流窗液体向内侧配流窗的流动,降低了内侧配流窗处不同浓度海水的混合,即减弱了内侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性。

通过对以上在不同缸体转速、液膜厚度以及浓盐水侧压力下双介质双排量轴向柱塞泵配流窗处不

图14 不同浓盐水侧压力下内外侧配流窗处掺混特性

同浓度海水的泄漏特性和掺混特性的研究发现,在选定的不同结构参数和运行参数下,该双介质双排量轴向柱塞泵配流窗处不同浓度海水的泄漏特性和掺混特性随着缸体的转动具有相同的变化规律;同时通过对各参数下配流窗处不同浓度海水的泄漏特性和掺混特性进行总体分析,发现以上选定的三个参数对配流窗处不同浓度海水的泄漏特性和掺混特性的影响权重由大到小依次为液膜厚度、浓盐水侧压力和缸体转速。

4 结论

本文对提出的反渗透海水淡化变量电机泵中双介质双排量轴向柱塞泵配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性在不同缸体转速、液膜厚度以及浓盐水侧压力条件下的变化规律进行研究分析,得出以下结论。

- (1) 在不同结构参数和运行参数下,该双介质双排量轴向柱塞泵配流窗处不同浓度海水的泄漏特性和掺混特性具有相同的变化规律。
- (2) 随着缸体转速的增加,该双介质双排量轴

向柱塞泵配流窗处不同浓度海水的泄漏量总体变化范围较小, 但呈现出逐渐减小的趋势, 同时内外两侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性逐渐减弱。

(3) 随着液膜厚度的增加, 液膜内外两侧不同浓度海水的泄漏量及其波动幅度明显增加, 但波动幅度占其平均泄漏量的百分比基本不变, 同时随着液膜厚度的增加, 内外两侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性明显增强。

(4) 双介质双排量轴向柱塞泵浓盐水侧压力的变化对液膜外侧液体的泄漏量几乎没有影响, 而液膜内侧液体的泄漏量却随着浓盐水侧压力的增长发生了明显的升高; 随着双介质双排量轴向柱塞泵浓盐水侧压力的增加, 外侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性呈现出小幅度增强的趋势, 而随着浓盐水侧压力的增加, 内侧配流窗处不同浓度海水的掺混特性明显减弱。

(5) 通过总体对比发现, 以上三个因素对配流窗处不同浓度海水的泄漏和掺混特性的影响权重由大到小依次为液膜厚度、浓盐水侧压力及缸体转速。

参 考 文 献

- [1] LEE K P, ARNOT T C, MATTIA D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination development to date and future potential[J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 370(1-2): 1-22.
- [2] 刘秀龙, 曹洸, 徐进良, 等. ORC 驱动 RO 海水淡化不同能量回收方式性能分析[J]. *动力工程学报*, 2018, 38(4): 329-336.
LIU Xiulong, CAO Shuang, XU Jinliang, et al. Performance analysis of an ORC-RO desalination system with different energy recovery methods[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2018, 38(4): 329-336.
- [3] SONG D W, WANG Y, XU S C, et al. Analysis, experiment and application of a power-saving actuator applied in the piston type energy recovery device[J]. *Desalination*, 2015, 361(1): 65-71.
- [4] Al-HAWAJ O M. The design aspects of rotary work exchanger for SWRO[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2009, 8(1-3): 131-138.
- [5] 苗超, 谢春刚, 冯厚军, 等. 船用海水淡化技术发展现状与研究建议[J]. *船舶工程*, 2011, 33(6): 6-9, 40.
MIAO Chao, XIE Chungang, FENG Houjun, et al. Development status and research proposals on seawater desalination technology for ship[J]. *Ship Engineering*, 2011, 33(6): 6-9, 40.
- [6] JOHN P M. Combined axial piston liquid pump and energy recovery pressure exchanger[P]. US Patent 00006006, 2011.
- [7] 宋涛. 能量回收型轴向活塞泵的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
SONG Tao. Research on energy recycle of axial piston pump[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [8] 肖述晗. 反渗透海水淡化一体式能量回收装置(PPX)的机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
XIAO Shuhan. Mechanism research of reverse osmosis seawater desalination integrated energy recovery device[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [9] JEREMY M, RICHARD L S. Rotary pressure transfer devices: US 2009/0180903[P]. 2009-07-16.
- [10] SHUMWAY S. Pressure exchange apparatus: US 6537035B2[P]. 2003-03-25.
- [11] KASSEM S A, BAHM M K. Effect of port plate silencing grooves on performance of swash plate axial piston pumps[C]// *Proceedings of the Seventh Cairo University International MDP Conference Cairo-Egypt*, 2000: 139-148.
- [12] MA J, FANG Y, XU B, et al. Optimization of cross angle based on the pumping dynamics model[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2010, 11(3): 181-190.
- [13] 张晓刚, 闫政, 权龙, 等. 双排油轴向柱塞泵配流特性理论分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 373-380, 412.
ZHANG Xiaogang, YAN Zheng, QUAN Long, et al. Theoretical analysis and experiment on flow allocation characteristics of dual discharging axial piston pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 373-380, 412.
- [14] 杨阳, 权龙, 黄家海. 变转速变排量双控轴向柱塞泵脉动特性及噪声研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(16): 176-184.
YANG Yang, QUAN Long, HUANG Jiahai. Characteristics of pulsation and noise in the axial piston pump with displacement and speed compound control[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(16): 176-184.
- [15] 杨阳, 权龙, 杨敬. 轴向柱塞泵非止点配流窗口过渡区压力脉动特性分析[J]. *机械工程学报*, 2011,

- 47(24): 128-134.
- YANG Yang, QUAN Long, YANG Jing. Pressure pulsation characteristic analysis of the non-dead spots transition zone between flow distribution windows of axial piston pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(24): 128-134.
- [16] 张德胜, 耿琳琳, 施卫东, 等. 轴流泵水力模型压力脉动和振动特性试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 66-72.
- ZHANG Desheng, GENG Linlin, SHI Weidong, et al. Experimental investigation on pressure fluctuation and vibration in axial-flow pump model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 66-72.
- [17] PAOLO C, ANDREA V, GERMANO F, et al. Modeling of fluid properties in hydraulic positive displacement machine[J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2006, 14(8): 1059-1072.
- [18] 马吉恩, 徐兵, 杨华勇. 轴向柱塞泵流动特性理论建模与试验分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 188-194.
- MA Jien, XU Bing, YANG Huayong. Modelling and experiment study on fluid character of axial piston pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 188-194.
- [19] 张建中, 杜鹏飞, 张希建, 等. 反渗透海水淡化能量回收装置的研制[J]. 水处理技术, 2010, 36(6): 42-46.
- ZHANG Jianzhong, DU Pengfei, ZHANG Xijian, et al. Study of energy recovery for reverse osmosis seawater desalination system[J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(6): 42-46.
- [20] 陈金增. 船舶海水淡化及节能技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- CHEN Jinzeng. A study of marine seawater desalination & energy reserve technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
-
- 作者简介: 孙亚楠, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为流体传动与控制。
E-mail: sunya-nan@qq.com
- 高殿荣(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为 CFD、PIV 与新型流体元件。
E-mail: gaodr@ysu.edu.cn