

船用低温蒸馏海水淡化装置二级引射器的数值模拟

冯东东¹ 张凤鸣¹ 吴沛衡¹ 岳鹏飞¹ 陈顺权¹ 旷万军²

¹(广州中国科学院先进技术研究所 广东省膜材料和膜分离重点实验室 广州 511458)

²(深圳市沃尔奔达新能源股份有限公司 深圳 518103)

摘 要 目前船用蒸馏海水淡化系统中,为减小装置体积并实现系统节能目标,引射器通常需要同时具有抽气和抽水功能,而传统的单级引射器只能形成单一真空度,从而影响淡水产率。文章提出了一种二级双吸口引射器设计方案,通过对引射器的流场特性进行数值模拟,分析结果表明入口流速和压力升高有利于提高真空度,而出口压力升高则会降低真空度。实验结果显示,在流速大于 3.5 m/s 时,模拟结果与实验数据基本一致,引射器吸口真空度可达到 92% 和 90%,满足了船用引射器性能要求。

关键词 引射器;数值模拟;真空度;低温蒸馏

中图分类号 TB 75 **文献标志码** A

Numerical Simulation of a Two-stage Ejector for Marine Low Temperature Distillation Seawater Desalination Plant

FENG Dongdong¹ ZHANG Fengming¹ WU Peiheng¹ YUE Pengfei¹

CHEN Shunquan¹ KUANG Wanjun²

¹(Guangdong Key Laboratory of Membrane Materials and Membrane Separation, Guangzhou Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China)

²(Shenzhen Verypower New Energy Company Limited, Shenzhen 518103, China)

Abstract In current marine low-temperature distillation seawater desalination plant, an ejector is designed to pump gas and water synchronously so as to reduce device size and energy consuming. In this paper, an ejector design scheme with two stages was investigated. Flow field characteristic of the proposed ejector was simulated to demonstrate that this design could increase inlet flow velocity and pressure which in turn could improve inlet vacuum and decrease vacuum. Real experiments were also carried out to validate the simulated results. The experimental results show that, when the flow velocity is larger than 3.5 m/s, vacuum at ejector

收稿日期: 2015-08-27 修回日期: 2015-11-30

基金项目: 深圳市技术开发项目(CXZZ20150528141008015); 广东省重大科技专项粤港招标项目(2012A090200001); 南沙区高新技术产业化项目(2013P013); 广东省中国科学院全面战略合作项目(2013B091100003)

作者简介: 冯东东, 硕士, 研究方向为低温多效蒸馏水质净化技术; 张凤鸣(通讯作者), 博士, 研究方向为低温多效蒸馏水质净化技术, E-mail: fm.zhang@giat.ac.cn; 吴佩衡, 硕士研究生, 研究方向为低温多效蒸馏水质净化技术; 岳鹏飞, 硕士研究生, 研究方向为低温多效蒸馏水质净化技术; 陈顺权, 博士, 研究方向为低温多效蒸馏水质净化技术及膜材料及膜分离技术; 旷万军, 学士, 研究方向为柴油机余热回收系统及控制。

suction can reach 92% and 90% respectively and meet the performance requirements of marine ejector.

Keywords ejector; numerical simulation; vacuum degree; low temperature distillation

1 引言

蒸馏海水淡化系统中的引射器又称射流器或喷射器^[1], 利用压力液体通过喷嘴时在喷管内造成局部真空环境的卷吸效应, 实现抽气或排液功能。相比真空泵, 引射器结构简单, 无动力元件, 使得蒸馏系统装置集成度更高, 便于使用和维护。早期对引射器的研究主要是分析影响其工作特性的主要几何参数和流体特性, 以无量纲数的形式求解经验公式^[2]。近年来引入计算机模拟分析软件, 采用数值模拟和实验方法, 取得了更多的研究成果^[3,4]。王东波等^[5]采用气体动力函数法, 建立喷射器压缩器的计算模型, 分析热力参数对最佳喷射系数的影响及出口压力随工作压力的变化情况。Xiao 等^[6]和王晓娟等^[7]对单吸口的气-液混合引射器进行数值模拟和实验研究。前述文献中大多采用引射系数作为性能指标, 对引射器吸入口所能达到的真空度没有详细描述, 或没有直接实验数据。海水淡化系统中, 需要引射器吸口达到 90% 以上的真空度。研究引射器吸口真空度的影响因素对提高引射器效率具有重要意义。

目前淡化蒸馏系统多采用单吸口引射器, 即利用一个喷嘴产生的真空同时抽出浓海水和不凝性气体。由于浓缩海水在蒸馏器内存在液位高度, 形成重力势能, 更容易被引射器卷吸, 造成蒸发器的真空度大于冷凝器的真空度, 抑制蒸汽的向上流动, 影响淡水产率。多级多吸口引射器可调节吸口之间真空度差异, 但相关研究未见报道。本文针对船用海水淡化装置引射器的改进需求, 参考引射器设计理论, 设计一种二级双吸口引射器, 对不同工况下的工作性能进行模拟分析。

2 引射器设计

查阅引射器设计手册^[8], 对二级双吸口引射器(以下称二级引射器)的结构进行设计, 结构和尺寸如图 1 和表 1 所示。其中, P_1 、 P_2 分别为一级和次级抽吸口的压力。

$$P_1 < P_2 \leq P_1 + \rho g H \quad (1)$$

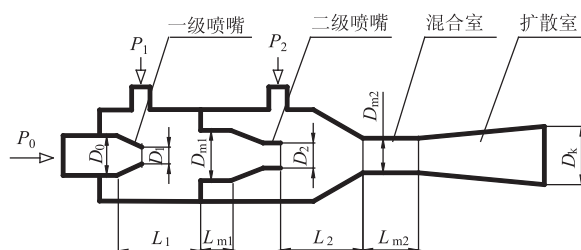


图 1 二级双吸口引射器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a two-stage ejector

表 1 引射器初始设计尺寸

Table 1 Injector design parameters

引射器主要参数(mm)	符号	数值
一级喷嘴直径	D_1	15
一级喷嘴到混合管 1 距离	L_1	4
混合管 1 直径	D_{m1}	30
混合管 1 长度	L_{m1}	4
二级喷嘴直径	D_2	18
二级喷嘴到混合管 2 距离	L_2	50
混合管 2 直径	D_{m2}	35
混合管 2 长度	L_{m2}	100
扩散口直径	D_k	58

3 数值模拟

3.1 引射器计算模型

考虑到引射器的结构特点, 将其视为旋转轴对称结构, 简化为二维计算区域。采用 ANSYS

软件对二级引射器的流动过程进行数值模拟, 计算模型采用标准 κ 和 ε 模型, 根据物理模型和假设, 其通用控制方程为:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho V\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\theta) + S \quad (2)$$

式中, Φ 为通用变量, 可以代表 u 、 v 、 ω 、 T 、 κ 和 ε 等求解变量; Γ 为扩散系数; S 为广义源项。对不同的通用变量 Φ , 扩散系数 Γ 和广义源项 S 不同的表达式见文献^[8]。

3.2 网格与边界条件

采用结构化四边形网格对计算区域进行划分。考虑喷嘴出口参数的变化, 在一级喷嘴和二级喷嘴区域进行网格加密, 如图 2 所示。喷射流体、一级吸口、二级吸口为均匀流动, 边界条件设置为速度入口; 射流器出口直接与大气相连,

考虑到收敛性等问题, 将出口边界设置为压力出口; 引射器中心轴为轴对称边界, 固体壁面采用默认壁面函数方法处理。求解方程采用非耦合隐式求解, 在离散化格式中, 压力插值格式采用 PRESTO 算法, 压力速度耦合插值采用 SIMPLE 算法, 动量方程、湍动能方程及耗散率都采用二阶迎风格式。

4 模拟结果分析

4.1 入口速度

图 3 和图 4 为不同喷嘴入口速度时引射器的速度分布和压力分布图。随着入口速度的增加, 一、二级喷嘴出口速度都逐渐增加, 射流卷吸能力增强, 喷嘴出口附近压力逐渐下降, 表明入口

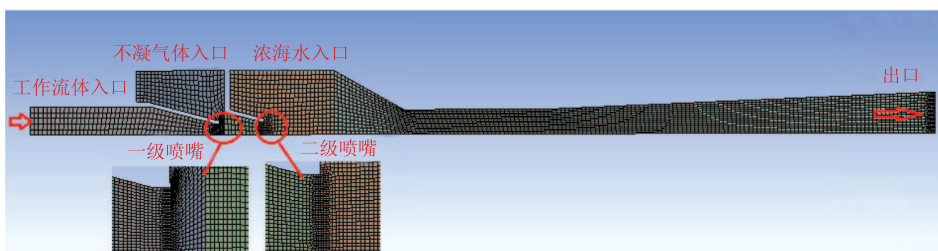


图 2 网格结构图

Fig. 2 Structural diagram of the grid



图 3 不同工作流体入口速度时引射器内速度场分布图

Fig. 3 Velocity contours of the ejector at different flow inlet velocities

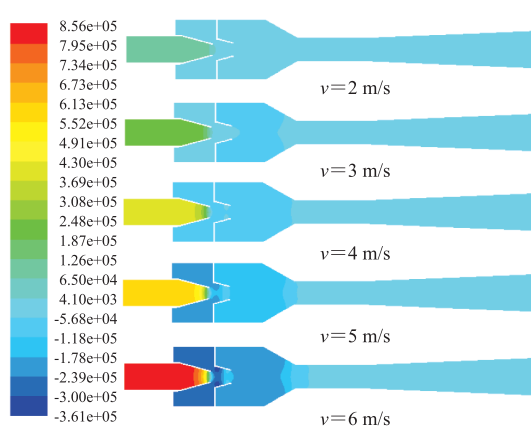


图 4 不同工作流体入口速度时引射器压力分布图

Fig. 4 Pressure contours of the ejector at different flow inlet velocities

流速增大有利于增大吸口真空度。在不同工作流体入口速度下,对工作流体入口压力 P_0 、一级吸入口压力 P_1 、二级吸入口压力 P_2 及射流系数的变化趋势进行对比,如图 5 所示。入口速度越大, P_1 、 P_2 真空度升高,引射器抽真空能力增强, P_0 入口压力也越大,这意味着需要更大的扬程水泵输入。引射系数随入口速度增大而降低。入口流速越大,使喷射速度增大,喷嘴喷射出的高速流体所形成的真空度增大。

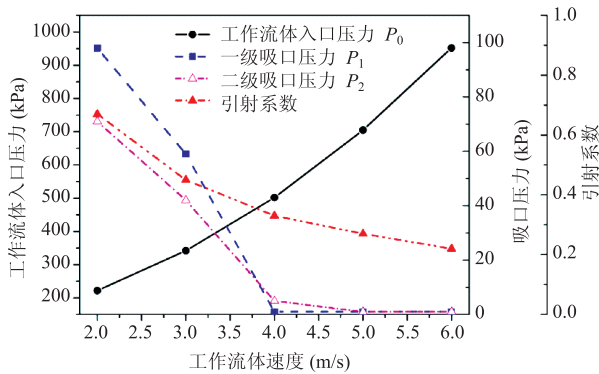


图 5 工作流体速度对引射器抽气能力的影响

Fig. 5 Effect of flow inlet velocity on the performance of ejector

4.2 入口压力

以工作流体入口压力为变量,模拟计算得到对应条件下的一级吸入口压力 P_1 、二级吸入口压力 P_2 及射流系数的变化趋势,如图 6 所示。

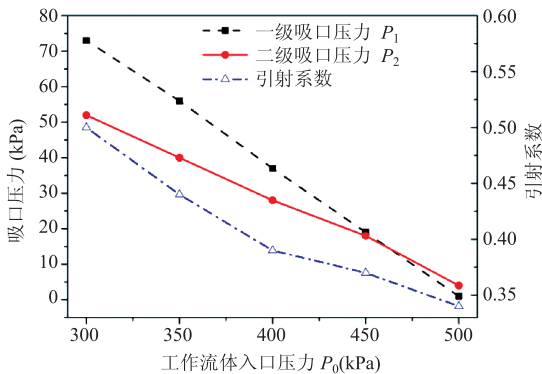


图 6 工作流体入口压力对引射器抽真空能力的影响

Fig. 6 Effect of flow inlet pressure on the performance of ejector

入口压力越大, P_1 、 P_2 真空度越高(变化趋势接近),引射器抽真空能力增强;而引射系数则随入口压力增大而减少。从能量角度分析,由于入口压力变大,喷射流体具有更大的能量,工作流体通过喷嘴将更多压力能转化为动能,喷射出的高速流体产生更大的真空度,因此抽真空能力增强。

4.3 出口压力

以工作流体出口压力为变量,模拟计算得到对应条件下的一级吸入口压力 P_1 、二级吸入口压力 P_2 及射流系数的变化趋势,如图 7 所示。随着出口压力增大, P_1 、 P_2 真空度逐渐降低甚至会变成正压(变化趋势接近),引射器抽真空能力减弱;而引射系数则随出口压力增大而增大。从能量角度分析,由于出口压力变大,工作流体阻力增大,流体流速降低,抽真空能力降低。

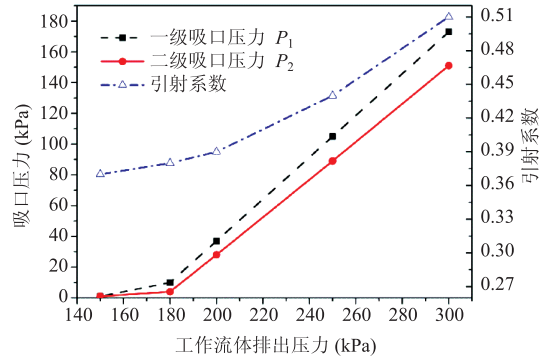


图 7 工作流体出口压力对引射器抽真空能力的影响

Fig. 7 Effect of flow outlet pressure on the performance of ejector

5 试验验证

根据设计尺寸制作一台二级吸口引射器及蒸馏实验装置,对数值模拟结果进行初步验证。实验装置原理如图 8 所示,实验装置实物如图 9 所示。蒸馏器的冷却回水作为引射器的工作流体,在引射器入口安装流量计和压力表,两个吸口分别安装真空表,记录运行过程中引射器的流量和

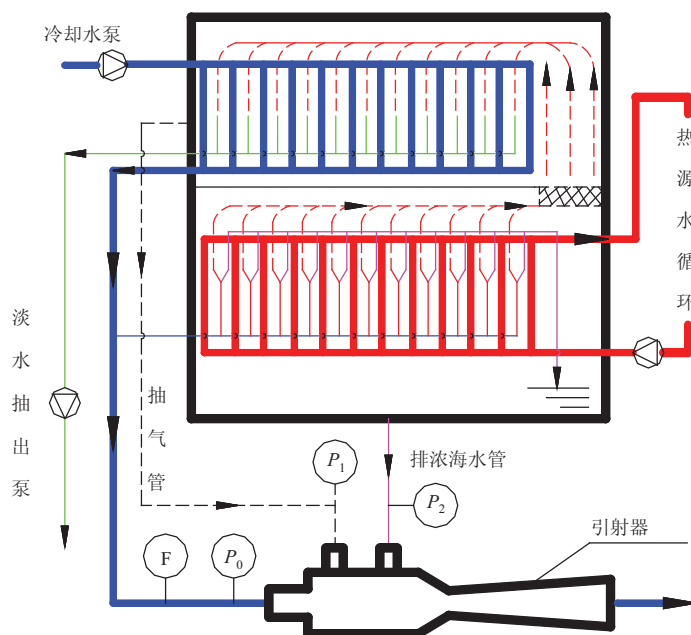


图 8 单吸口引射蒸馏海水淡化装置结构和流程图

Fig. 8 Diagram of the distilled seawater desalination system with a single stage ejector



图 9 蒸馏海水淡化装置与引射器测试装置

Fig. 9 Experimental apparatus for distillation desalination and ejector

压力参数。以工作流体的入口流速为实验变量, 得到引射器吸口的真空度实验数据与模拟分析结果对比如图 10 所示。

从图 10 中可以看出, 稳态工况下, 以工作流体的速度为变量得到的两个吸口压力变化趋势与模拟分析一致, 试验得到的一级吸口压力值与模拟结果在流速较低时相差较大, 流速 3.5 m/s

以上时, 实验结果和模拟数据相差不大。二级吸口压力值与模拟结果比较基本吻合。工作流体速度在 3.5 m/s 以上时, 二级吸口的真空度分别达到 92% 和 90%, 满足公式 (1) 要求。对应饱和蒸发温度约为 50 °C, 满足低温蒸馏海水淡化装置的蒸发温度要求。

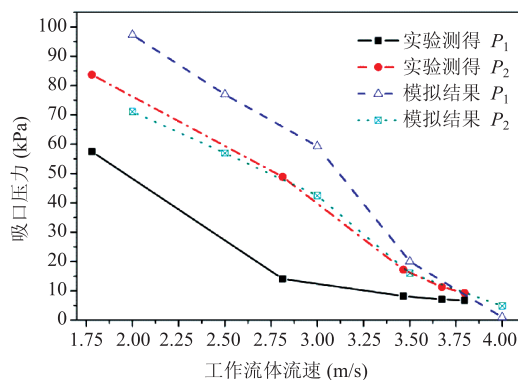


图 10 试验数据与模拟结果的对比

Fig. 10 Comparisons of simulation results and experimental data of the ejector

蒸馏海水淡化设备的主要能耗来自大功率冷却水泵。引射器的性能决定冷却水泵的选型。引

射器入口管径确定, 工作流体的流速与流量成正比。实验工况下, 冷却水流速为 3.5 m/s 时, 对应的冷却水流量为 14.0 m³/h、压力为 0.35 MPa。可参考此流量和扬程, 选择能耗适中的冷却水泵, 实现系统优化配置。

在低流速时, 引射器工作特性与实验结果差别较大, 原因在于低流速时, 工作流体 Re 数较小, 受壁面边界层粘性力影响较大, 压力损失较多, 导致吸口真空度与理论值出现偏差。

6 结 论

采用数值模拟和实验验证的方法, 对影响低温蒸馏海水淡化系统引射器工作特性的重要参数进行研究, 结果表明:

(1) 入口速度越大, 引射器抽真空能力越强; 而引射系数则随入口速度增大而减少, 入口压力对引射器抽真空能力的影响趋势与入口速度一致;

(2) 引射器抽真空能力随着工作流体出口压力的增大而逐渐降低, 甚至会变成正压; 引射系数则随出口压力增大而增大。

(3) 在工作流体保持较高流速时, 引射器的两个吸口都可以取得较高真空度, 且与模拟结果吻合, 可以为后续的装置测试及结构优化提供指导。

引射器在蒸馏系统中非稳态运行和低 Re 数工况下的引射特性和数值模型有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Cunningham RG. Liquid jet pumps for two-phase flows [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1995, 117(2): 309-316.
- [2] Senthil Kumar R, Kumaraswamy S, Mani A. Experimental investigations on a two-phase jet pump used in desalination systems [J]. *Desalination*, 2007, 204(1-3): 437-447.
- [3] Lu X, Wang D, Shen W, et al. Experimental investigation on the performance of improving jet pumpcavitation with air suction [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 88: 379-387.
- [4] Yuan G, Zhang L, Zhang H, et al. Numerical and experimental investigation of performance of the liquid-gas and liquid jet pumps in desalination systems [J]. *Desalination*, 2011, 276(1-3): 89-95.
- [5] 王东波, 陈金增. MSF 海水淡化装置喷射器性能分析 [J]. *舰船科学技术*, 2013, 35(10): 122-125.
- [6] Xiao L, Long X. Cavitating flow in annular jet pumps [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 71: 116-132.
- [7] 王晓娟, 张博, 高春林, 等. 船用真空海水淡化装置液-汽引射器的数值模拟及试验研究 [J]. *热能与动力工程*, 2011, 26(6): 700-704.
- [8] 陆宏圻. 喷射技术理论及应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.