

文章编号: 1674-8085(2016)04-0046-06

# 双流体共引喷射器数值优化研究

\*江 帆<sup>1,2</sup>, 凌呈祥<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北, 武汉 430074; 2 广州大学机械与电气工程学院, 广东, 广州 510006)

**摘 要:** 双流体共引喷射器是船用海水淡化设备的关键部件, 其结构参数和工作参数将对性能产生较大影响, 利用数值模拟方法优化双流体共引喷射器的结构参数和工作参数, 分析结果显示: 随着出口直径的增大, 引射效果增强; 喷嘴处的最低压力随着喷嘴距的减小而降低, 将增强一、二级喷嘴处的引射效果。两级喷嘴面积比要大于一定值才能获得较好的引射效果, 同时不同面积比, 导致两级喷嘴处的压力差也不同。喷嘴直径和喷嘴倾斜角不变的情况下, 工作入口直径越大, 引射效果越差; 喷嘴倾斜角需要在一定范围内才能满足设计要求, 改变喷嘴倾斜角对一级喷嘴处的影响会比二级喷嘴处的影响大。

**关键词:** 双流体共引喷射器; 数值模拟; 优化; 结构参数; 工作参数

中图分类号: TQ051.71

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2016.04.010

## STUDY ON NUMERICAL OPTIMIZATION OF EJECTOR WITH TWO FLUIDS

\*JIANG Fan<sup>1,2</sup>, LING Cheng-xiang<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. School of Mechanical and Electric Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** The ejector with two fluids is a key component of the seawater desalination equipment. Its structure and working parameters will influence its performance. The numerical simulation method is used to optimize the structure and operation parameters of the ejector with two fluids. The analysis results show that the eject effect is enhanced with increasing outlet diameter, the minimum pressure at the nozzle decreased with the nozzle distance decreases and the eject effect of primary and secondary nozzle ejector effect will enhance. Two nozzle area ratio to be greater than a certain value will improve the eject effect. At the same time the different area ratio leads to the pressure difference at the two stage nozzle is also different. Under condition of the nozzle diameter and nozzle inclination angle no changing, inlet diameter is larger and the eject effect is worse. The nozzle angle is also kept in a certain range and it can meet the design requirements. With the change of the nozzle angle, it can influence the first nozzle effect than that to the second nozzle.

**Key words:** the ejector with two fluids; numerical simulation; optimization; structure parameter; operation parameter

收稿日期: 2016-02-01; 修改日期: 2016-03-10

基金项目: 广东省科技计划项目(2015A070710029, 2015A030402009, 2014A070711023); 广州市教育科学规划课题(1201430307); 广州市科技计划项目(2013KP042)

作者简介: \*江 帆(1974-), 男, 湖南慈利人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事机械创新设计、机械 CAE/CFD 方面的研究(E-mail: jiangfan2008@126.com);

凌程祥(1989-), 男, 江西南昌人, 硕士生, 主要从事有机化学与配合物合成研究(E-mail: ldxsk001@163.com).

## 0 引言

喷射器利用工作流体的射流作用传递质量与能量,是一种重要的流体机械,在动力、环保、冶金、制冷、热工等领域应用广泛。

喷射器的数值模拟分析始于上个世纪 40 年代, Coff 等<sup>[1]</sup>提出了用二元方法计算气体喷射器流场。1965 年, Zuber 等<sup>[2]</sup>考虑了相对速度的影响及流动分布和相分布不均匀的影响,提出漂移流模型来进行流场分析。Crowe<sup>[3]</sup>提出了一种气液两相泡状流的计算模型。Ishii 和 Mavriplis<sup>[4]</sup>利用多网格技术对喷射器内三维流动进行数值模拟。近十年来, CFD 软件(Computational Fluid Dynamics)成为喷射器优化设计的主要手段。徐海涛<sup>[5]</sup>等采用 Fluent 软件建立了蒸汽喷射器数值模型,得到了混合流体、引射流体和工作流体压力对喷射性能的影响。江帆等<sup>[6]</sup>对射流曝气器两相流进行了模拟,得到了射流曝气器结构的最佳长径比和喷嘴截面积比。余志宏<sup>[7]</sup>进行了喷射器流动数值模拟及结构优化。夏在超等<sup>[8]</sup>分析了几何结构对喷射器性能的影响。

海水淡化主机内会用到一种液气两相共引喷射器,这种喷射器能同时将海水淡化主机内的空气和多余的海水抽出,是船用海水淡化装置的关键部件。其内部结构和工作条件对引射效果有着重要影响,利用数值模拟方法有助于获得更好的内部结构参数与工作参数。本文利用 Fluent 平台对喷射器的结构参数和工作参数进行优化分析,为双流体共引喷射器设计提供参考数据。

## 1 流体力学控制方程

对双流体共引喷射器的数值优化分析基于质量、动量守恒定律,控制方程如下所示。

### 1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

式中  $\nabla$  表示散度,  $\rho$  表示流体密度,  $\vec{v}$  表示流体速度,  $t$  表示时间。

### 2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

式中  $p$  是静态压力,  $\vec{\tau}$  是指应力张量,  $\rho \vec{g}$  表示重力体积力,  $\vec{F}$  为外部体积力。应力张量的公式由下式给出:

$$\vec{\tau} = \mu \left[ \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I} \right] \quad (3)$$

## 2 计算模型

对实际的双流体共引喷射器模型进行部分简化,构建 2D 的数值模拟分析区域,如图 1 所示。

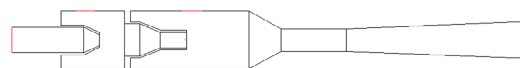


图 1 喷射器计算区域

Fig.1 Calculation model of injector

利用 ICEM 对二维几何模型进行网格划分,采用非结构化网格。为了保证精度同时又不使计算文件过大,将全局网格尺寸 Max element 设置为 0.2,大小相当于 1×1mm,网格格式采用 Quad Dominant,自动生成非结构化网格,网格模型如图 2 所示。

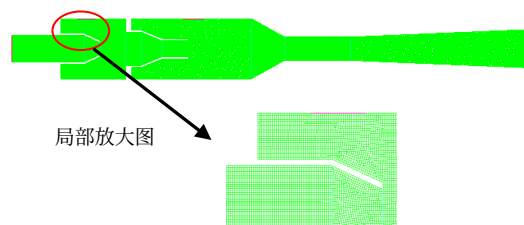


图 2 喷射器的网格模型

Fig.2 Grid model of ejector

采用压力入口和压力出口边界条件,为了与喷射器可行性实验条件相符合,对引射入口封闭,使用 wall 边界条件,采用  $k-\varepsilon$  湍流模型。湍流强度的水力半径根据  $I = 0.16(\text{Re}_{\text{DH}})^{-\frac{1}{8}}$  计算,添加液态水作为流体介质材料。工作入口采用压力入口边界条件,入口压力设置为 303975 Pa,出口设置为压力出口,压力为 101325 Pa,操作压力为 0,以使后续结果为绝对压力。采用 FLUENT14 平台作为求解器,求解方法采用 SIMPLE 算法,求解设置全部采用二阶迎风格式,双精度求解。

### 3 数值模拟结果分析

通过数值模拟,可以获得计算区域各物理量的云图结果,如图3所示。为了对喷射器的内部压力、速度变化情况进行定量分析,选择喷射器中心线上的物理量值作为对比依据,如图4所示,给出了中心线上的压力、速度随轴线位置变化曲线。

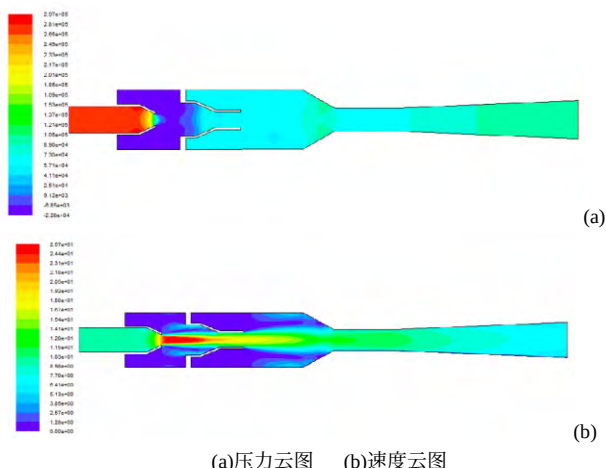


图3 喷射器计算区域的云图结果  
Fig.3 Contour results of ejector

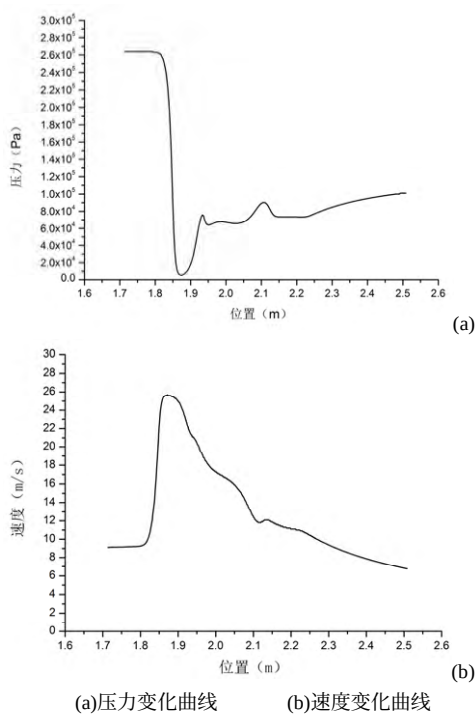


图4 喷射器中心沿轴向的压力与速度曲线

Fig.4 Injector center line pressure speed curve along the axis direction

在图4中,一级喷嘴出口的位置坐标为1.87 m,二级喷嘴出口的坐标为2.07 m,在一级喷嘴处压力急剧下降,速度上升,流体势能转换成动能。高速

流体带走喷嘴附近的空气,在喷嘴处产生较高的真空度,其绝对压力达到接近5 Kpa,能够较好抽吸引射流体,在第二级喷嘴处产生的真空度接近70 Kpa。而后混合流体在扩散室压力逐渐增大,速度减小,最后从出口排出来。后续分析中均以喷射器中心线处的压力值作为喷射器引射性能好坏的评价标准。

### 4 优化分析

#### 4.1 二级引射能力的优化

图4中的压力曲线表明了一级喷嘴处的绝对压力能够接近设计值7 Kpa。然而二级喷嘴附近的压力值将近70 Kpa,不满足设计要求。为了解决这个问题,在不改变一级喷嘴直径的前提下,改变二级喷嘴的直径。通过在二级喷嘴处加一个截面变小的喷嘴,且二级喷嘴的直径大于一级喷嘴的直径。经测量,一级喷嘴的实际直径为17 mm,原二级喷嘴(一级引射结构的混合区)的实际直径为24 mm,综合考虑,二级喷嘴长度与一级喷嘴一致,口径采用18, 19, 20, 21, 22 mm五种模拟方案。改进后的喷射器结构如图5所示

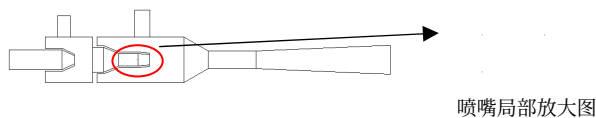


图5 二级喷嘴修改示意图

Fig. 5 Secondary nozzle modify schematic diagram

对改进后的喷射器结构进行数值模拟,在相同的边界条件下得到的压力-位移图如图6所示。

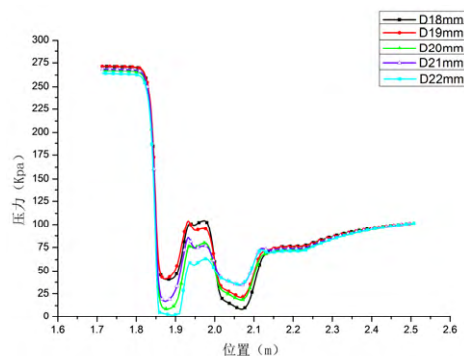


图6 不同喷嘴直径的压力曲线

Fig.6 Different nozzle diameter of pressure curve

由图6结果看到,当二级喷嘴直径在修改后,由于二级喷嘴截面积变小导致喷嘴流速增大,使得二级喷嘴处的最小压力得到改善。当增加的喷嘴直径小于20 mm时,喷射器一级喷嘴处的最小压力要

比二级喷嘴处最小压力低。当二级喷嘴直径大于 20 mm 时, 二级喷嘴处压力开始比一级喷嘴处压力大, 且随着喷嘴直径的增大, 两者压力差逐渐变大。当喷嘴直径为 20 mm 时, 两者压差为 9 KPa, 接近理论设计值 4 KPa, 所以二级喷嘴直径为 20 mm 时有助于改善二级喷嘴的引射性能。

#### 4.2 混合流体出口直径的优化

为了考察出口直径变化对喷射器引射性能的影响, 改变出口的直径大小 (混合室直径大小不变, 相当于改变扩散室倾角), 分析不同出口直径 (分别为 48, 53, 58, 63, 68 mm) 下的喷嘴压力情况, 如图 7 所示。

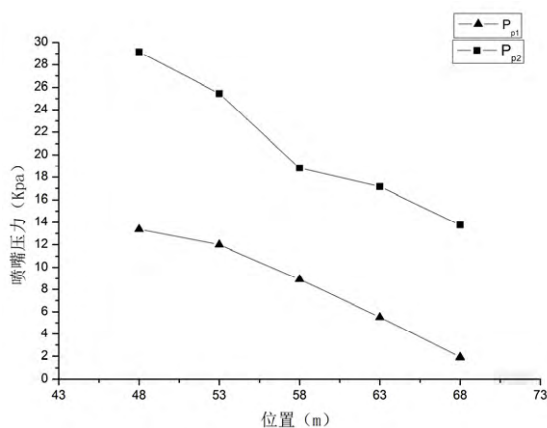


图 7 出口直径对喷嘴处压力的影响

Fig.7 The influence of the export diameter to the nozzle pressure

图 7 给出了一级喷嘴处的压力与出口直径的关系, 其中  $P_{p1}$  为一级喷嘴处最低压力值,  $P_{p2}$  为二级喷嘴处最低压力值。从图中看到, 两级喷嘴处的压力均呈下降趋势, 且对二级喷嘴的影响更大一些。

扩散室长度不变的情况下, 出口直径增大, 使扩散室的倾斜角变大, 使得混合流体在扩散室里压力升高的更快。混合流体通过扩压后在出口的压力保持不变, 所以, 实际上流体在混合室达到稳态后的压力会变小。截面比不改变的情况下, 混合流体压力  $P_c$  变小, 则会使喷嘴压力  $P_p$  变小。所以, 实际上增大出口直径能提高喷射器引射性能。但是增大喷嘴出口直径, 将使喷射器成本增大, 同时也使结构庞大。

#### 4.3 二级喷嘴距的优化

如图 8 所示, 喷嘴距是指喷嘴截面到收缩室锥形截面的距离, 对引射性能有较大的影响。这里改

变一级混合室尺寸, 即改变原喷嘴长度, 新加的 20mm 喷嘴保持不变, 分析其在改变后对喷射效果的影响。原二级喷嘴距为 72 mm, 前后每 5 mm 各取两个数值来进行分析, 结果如图 9 所示。

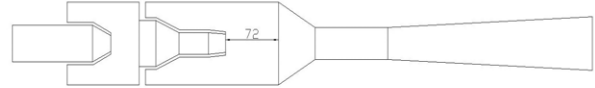


图 8 二级喷嘴距示意图

Fig.8 Secondary nozzle distance schematic diagram

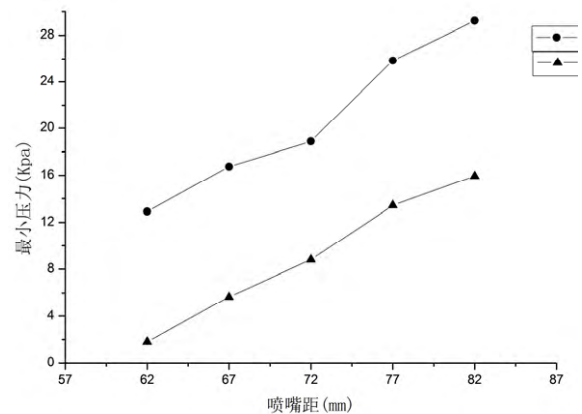


图 9 喷嘴距对两级喷嘴处压力的影响

Fig.9 The influence of nozzle distance to two levels of the nozzle pressure

由图 9 可知, 随着喷嘴距的变大, 不管是一级喷嘴处还是二级喷嘴处, 喷嘴最低压力都随着喷嘴间距的增大而增大。喷嘴距过大, 会在接收室产生涡流现象, 从而影响流体的流动。同时也看到, 当缩短二级喷嘴的喷嘴距, 一级喷嘴处的压力也受到了影响, 表明这一尺寸对整个性能产生较大的影响。

#### 4.4 两级喷嘴直径面积比的优化

对不同喷嘴面积比下的引射性能进行分析, 研究两级喷嘴面积比对喷射器引射效果的影响。这里的两级喷嘴面积比  $S2/S1$  为 1.25~1.56, 模拟结果如表 1 所示。

表 1 模拟方案结果

Table 1 Simulation results

|                | 1#   | 2#   | 3#   | 4#   |
|----------------|------|------|------|------|
| 面积比 $S2/S1$    | 1.25 | 1.38 | 1.53 | 1.27 |
| $P_{p1}$ (KPa) | 41   | 8.9  | 17.2 | 36.9 |
| $P_{p2}$ (KPa) | 21.5 | 18.9 | 34.2 | 20.2 |
| 5#             | 6#   | 7#   | 8#   | 9#   |
| 1.41           | 1.56 | 1.23 | 1.36 | 1.49 |
| 21.3           | 7.6  | 18.7 | 5.5  | 0.2  |
| 24.9           | 31.4 | 10.5 | 19.1 | 26.1 |

从表 1 中看到,当面积比为 1.23~1.27 时,一级喷嘴压力要大于二级喷嘴压力。当面积比大于 1.36 时,一级喷嘴压力要小于二级喷嘴压力。其中 5#方案的压力差更接近于设计要求,即压力差接近 4 KPa,不过喷嘴处压力值较大,需要通过提高工作流体压力来降低喷嘴处压力值。

#### 4.5 工作入口直径的优化

通过改变工作入口直径,一级喷嘴直径和一级喷嘴的倾斜角不改变,考察喷射器内部流体的压力与速度的变化等情况。

工作入口直径选用常用管径,分五组,计算结果如表 2 所示。

表 2 不同工作入口直径模拟结果

Table 2 Different working entrance diameter of simulation results

|                  | 1#   | 2#   | 3#   | 4#   | 5#   |
|------------------|------|------|------|------|------|
| $D_m(\text{mm})$ | 25   | 32   | 40   | 50   | 60   |
| Pp1 (KPa)        | 11.1 | 9.9  | 8.9  | 19.2 | 26.8 |
| Pp2 (KPa)        | 20.2 | 21.1 | 18.8 | 24.5 | 26.3 |
| Vp1 (m/s)        | 24.2 | 24.2 | 24.3 | 23.8 | 23.4 |
| Vp2 (m/s)        | 18.7 | 18.6 | 18.5 | 18.1 | 17.8 |

从分析结果来看,1#、2#和 3#方案的喷嘴处压力变化较小,4#和 5#方案的一级喷嘴处压力明显变大,二级喷嘴处压力也有较大的变化。观察喷嘴处速度,发现各方案喷嘴处的流体速度相差不大,而工作入口处的流体速度跟直径成反比。这说明在相同的工作压力条件下,流体的流量基本上保持一致的。

#### 4.6 喷嘴倾斜角

为了研究喷嘴倾斜角是否对喷射器的引射性能产生影响,保持工作入口直径和喷嘴直径不变,改变喷嘴倾斜角,分析倾斜角变化对喷嘴处压力的影响。模拟方案及结果如表 3 所示。

表 3 倾斜角对喷嘴压力的影响

Table 3 Tilt Angle of nozzle to pressure

|           | 1#   | 2#   | 3#   | 4#   | 5#   | 6#   |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| 倾斜角°      | 21   | 23   | 25   | 27   | 29   | 40   |
| Pp1 (KPa) | 9.4  | 9.4  | 11.4 | 10.9 | 12.3 | 3.1  |
| Pp2 (KPa) | 17.3 | 18.4 | 21.6 | 23.7 | 25.5 | 33.5 |

喷嘴倾角在  $20^\circ \sim 30^\circ$  之间变化时,喷嘴压力大体上随着角度的增大而增大,二级喷嘴压力受到倾

斜角度影响比一级喷嘴压力要大,两级喷嘴压力差也呈增大趋势。当喷嘴倾斜角增大到  $40^\circ$  时,一级喷嘴压力突然变得很小,二级喷嘴压力变大,两级喷嘴压力差也变得很大了。由此可知,喷嘴倾斜角需要控制在一定的范围内。

#### 4.7 引射入口位置的优化

引射入口的压力越小,越有助于引射流体进入喷射器,故将引射入口布置在压力最小的地方,能显著提升引射效果。计算中,可以通过喷嘴附近的压力场数据确定引射入口位置。当计算结束后,设置压力值的显示范围,可以得到显示喷嘴处负压的效果图,如图 10 所示。

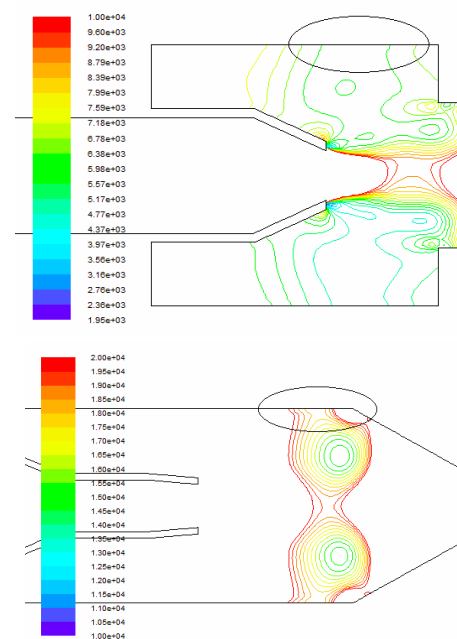


图 10 喷射器压力简图

Fig.10 Injector pressure contour

从压力云图显然可以看出,一级喷嘴处引射入口的位置应布置在图中圆圈内,在喷嘴之后,比较靠近收缩室截面。同样,二级喷嘴的引射入口也是如此,只是由于二级喷嘴距过大,引射入口位置离喷嘴较远。所以引射入口位置的布置应该靠近收缩室截面较好。

#### 4.8 工作流体压力的优化

其他条件不变的情况下,通过改变入口压力的边界条件来分析工作流体入口压力对引射性能的影响。计算的工作入口压力为 2, 2.5, 3 atm, 二级喷嘴直径为 20 mm。分析结果如图 11 所示。



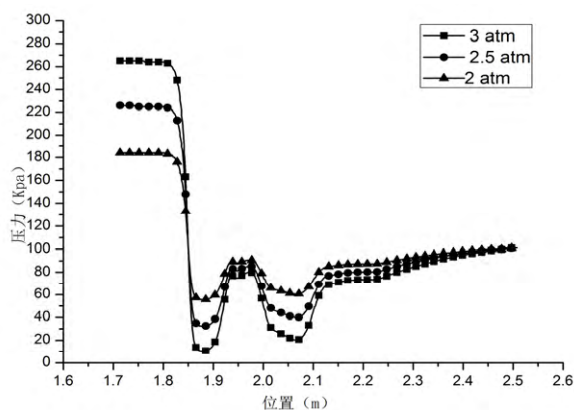


图 11 工作流体压力对喷射器引射性能的影响

Fig.11 The effect of working fluid pressure to the properties of jet ejector

结果显示,随着入口压力的增大,喷射器的喷嘴附近产生的绝对压力会逐渐降低,因此可以达到的真空度就会更高。这说明工作流体的压力对喷射器的引射效果作用非常重要。工作流体的压力是由供水泵的扬程来决定的,实际扬程与流量有关,因此可以通过调节流量的方式控制工作流体压力,从而获得想要的真空度。

## 5 结论

利用数值模拟方法,对喷射器引射效果的一些影响因素进行优化分析,得到如下结论:

- 1) 喷射器出口直径对喷射器的引射性能有较大的影响,在一定的范围内,随着出口直径的增大,引射效果增强。喷嘴处的最低压力随着喷嘴距的减小降低,能够同时提高一、二级喷嘴处的引射效果。
- 2) 两级喷嘴面积比要大于一定值才能改善引

射效果,同时不同面积比,导致两级喷嘴处的压力差也不同。喷嘴直径和喷嘴倾斜角不变化的情况下,工作入口直径越大,喷嘴处压力越差,引射效果也就越差。喷嘴倾斜角需要在一定范围内才能满足设计要求,改变喷嘴倾斜角对一级喷嘴处的影响会比二级喷嘴的影响大。

## 参考文献:

- [1] Coff J A, Coogan C H. Some two-dimensional aspects of the ejector problem[J]. Journal of Applied Mechanics, Trans ASME, 1942, 9(4): A151-A154.
- [2] Zuber N, Findley J A. Average volumetric concentration in two-phase flow system[J]. Journal of Heat Transfer, 1965, 87(6): 453-498.
- [3] Crowe C T. Review-numerical methods for dilute gas particle flows[J]. Journal of Fluid Engineering, Trans ASME, 1982, 104(4): 297-303.
- [4] Mavriplis D J. Three-dimensional unstructured multigrid for the Euler equations [J]. AIAA journal, 1992, 30(7): 1753-1761.
- [5] 徐海涛. 蒸汽喷射器的理论及数值研究[D]. 南京:南京工业大学,2003.
- [6] 江帆,陈维平,李元元,等. 基于射流与两相流的射流曝气器研究[J]. 流体机械,2005,33(6):18-21.
- [7] 余志宏. 基于 Fluent 的喷射器数值模拟与结构优化研究[D]. 无锡:江南大学,2011.
- [8] 夏在超,李建新,高德,等. 几何结构对喷射器性能影响的 CFD 分析及实验研究[J]. 制冷学报,2014,33(3): 45-49.
- [9] 江帆,黄鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008.