

引用格式: Wang Shipeng, Chen Xiugao, Zhang Xiheng, Simulation of Combined Type Regulating Valve Under Backpressure[J]. Journal of Gansu Sciences, 2018, 30(4): 132-137. [王世鹏, 陈修高, 张希恒. 基于背压下的复合式调节阀空化现象数值模拟研究[J]. 甘肃科学学报, 2018, 30(4): 132-137.]
doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2018.04.023.

基于背压下的复合式调节阀空化现象数值模拟研究

王世鹏, 陈修高, 张希恒

(兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要 针对工程实际中复合式调节阀内由压降造成的空化问题, 利用 CFD 计算流体力学的方法和动网格技术, 研究了不同出口背压与不同开度对空化强度的影响, 并计算得到不同条件下的阀内气液两相分布、气含率和空化数曲线、初生空化数。分析结果表明: 复合式调节阀窗口处的空化随开度减小而增大; 当出口背压由 0.4 MPa 增加到 1.2 MPa 时, 最大气含率由 0.71 降低到 0.146; 增加出口背压可有效的抑制和减弱空化, 同时获得最佳背压为 1.24 MPa。

关键词 复合式调节阀; 空化; 数值模拟; 动网格; 空化数

中图分类号: TH134 文献标志码: A 文章编号: 1004-0366(2018)04-0132-06

复合式调节阀是由 2 种及 2 种以上流量特性组合而成的调节阀^[1]。调节阀不断地通过调节开度来实现对于流量、压力的控制, 在某些特定工况下由于压力的急剧减小, 很容易造成阀内某些位置的压力小于液体的饱和蒸气压, 当出现这种情况时, 将会伴随产生空化现象。空化通常会造成阀体材料的剥蚀、振动、噪声, 甚至使阀门失效, 缩短阀门使用寿命。

近几年在对空化的研究中, 李树勋等^[2]基于汽液传递理论和多级降压理论, 对超(超)临界火电机组中套筒式多级降压调节阀的空化现象进行了研究; 薛梅新等^[3]利用 $k-\omega$ SST 两方程湍流模型和 $k-kl-\omega$ 湍流/转换模型对喷嘴内无空化和空化流动进行了数值模拟; Qu 等^[4]利用 RNG $k-\omega$ 湍流模型和 Rayleigh-Plesset 方程对不同开度下的压力调节阀进行了实验研究和数值模拟; Qian 等^[5]通过 CFD 对先导控制截止阀阀芯处于不同位置的流动和空化特性进行了数值模拟; Couzinet 等^[6]对安全阀中不可压缩流体的空化流动进行了模拟; Liu 等^[7]使用 Schnerr-Sauer 空化模型模拟了离心泵内的空化现象, 指出该空化模型能够提高预测精度, 更适用于空化研究。

近年来对于调节阀中的空化现象多采用静态研究, 而实际应用中需要不断地调节阀门的开度来调节流量等参数, 同时导致空化现象也不断地变化, 所以其是一个非稳态过程, 使用静态方法研究不能满足工程实际的需要。以下基于动网格技术与流场相结合的方法, 对调节阀的一些实际工况进行空化现象的研究, 分析其基本规律, 为防止调节阀内产生空化现象提供导向, 为进一步的结构优化奠定基础。

1 数学模型

1.1 Navier-Stokes 方程

在对空化流场的数值模拟中, 以求解 N-S 方程为基础, 方程如下:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p - \frac{2}{3} \nabla(\mu \nabla \cdot \vec{u}) + \nabla \cdot (2\mu \vec{S}) + \rho \vec{f}, \quad (1)$$

其中: \vec{S} 是应变速率张量; $s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ 。

1.2 空化模型

(1) Rayleigh-Plesset 方程 空化现象本身是空泡动力学的问题, 因此引入描述空泡动力学特性

收稿日期: 2017-08-08; 修回日期: 2017-09-27

作者简介: 王世鹏(1992-), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 研究方向为阀门设计与密封技术。E-mail: 15214018990@163.com

通信作者: 张希恒, E-mail: famen109@163.com

的 Rayleigh-Plesset 方程^[8-9],以此来模拟发生空化时气液两相的变化。其表达式为

$$\mathfrak{R}_B \frac{D^2 \mathfrak{R}_B}{Dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{D \mathfrak{R}_B}{Dt} \right)^2 = \left(\frac{P_v - P}{\rho_l} \right) - \frac{2S}{\rho_l \mathfrak{R}_B}, \quad (2)$$

其中: \mathfrak{R}_B 为气泡半径; ρ_l 为液体相密度; P_v 为局部温度下的饱和蒸汽压; P 为液体静压; S 为液体表面张力系数。

(2) Schnerr-Sauer 模型 通过对多个空化模型进行对比分析,研究空化采用 Schnerr-Sauer 模型^[10],其中:

当 $P_v \geq P$ 时,有

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_v - P)}{\rho_l}}, \quad (3)$$

当 $P_v \leq P$ 时,有

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_v - P)}{\rho_l}}, \quad (4)$$

其中: P_v 为饱和蒸汽压; α_v 为蒸汽相体积分数; \mathfrak{R}_B 为空泡半径; R_e 为蒸发相生成率; R_c 为凝结相生成率。

1.3 气含率和空化数

在汽蚀过程中,通常用气含率(液体中的蒸汽含率即气相体积分数)作为衡量空化程度和空化区域的标准^[11],气含率越高,空化程度越强。此外,另一个描述空化程度的无量纲参数为空化数,是由阻止液流空化的力与促进液空化的力之比构成,空化数越小,空化程度越强。空化数定义为

$$\sigma = \frac{2(p_0 - p_v)}{\rho u_0^2}, \quad (5)$$

其中: p_0 为基准点压力; u_0 为基准点速度; p_v 为液体饱和蒸汽压。

由于要定量的研究调节阀中的空化强度,所以计算气含率和空化数是非常必要的。

1.4 动网格模型

动态网格技术可以被用来模拟边界随时间的变化而运动或变形的问题。在研究中调节阀内流体的流动状态是随着缓压轴的运动而变化的,属于非稳态问题。考虑到上述问题,研究利用动网格技术来计算模拟调节阀内的流场问题。在数值模拟过程中,缓压轴的运动由 UDF(用户自定义函数)确定,通过 DEFINE_CG_MOTION 宏定义阀门动态域随时间的改变规律^[12-14],以实现阀门关闭过程中缓压轴的移动速度和方向。

在 Fluent 中,会在每个时间步根据边界的运动,对各处网格进行实时更新,其守恒方程为

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_{\partial V} \rho \varphi (\vec{u} - \vec{u}_g) d\vec{A} = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \varphi d\vec{A} + \int_V S_\varphi dV, \quad (6)$$

其中: ρ 为流体密度; φ 为通量; ∂V 为控制体 V 的边界; \vec{u} 为流体的速度向量; \vec{u}_g 为动网格的速度向量; Γ 为扩散系数; S_φ 为通量 φ 的源项。

2 几何计算模型

2.1 阀内计算区域和网格模型

主要研究复合式调节阀内部流道在流体流动时所出现的空化现象,所以取调节阀流道为研究对象,如图 1 所示。通过对图 1 的实际模型进行适当简化,利用 Solid works 建立调节阀的三维流道几何模型,如图 2 所示。

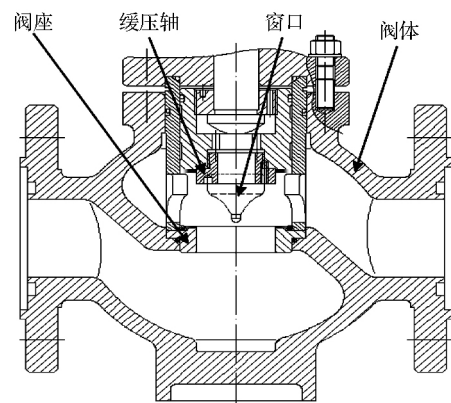


图 1 复合式调节阀结构示意图

Fig.1 Structure diagram of combined type regulating valve

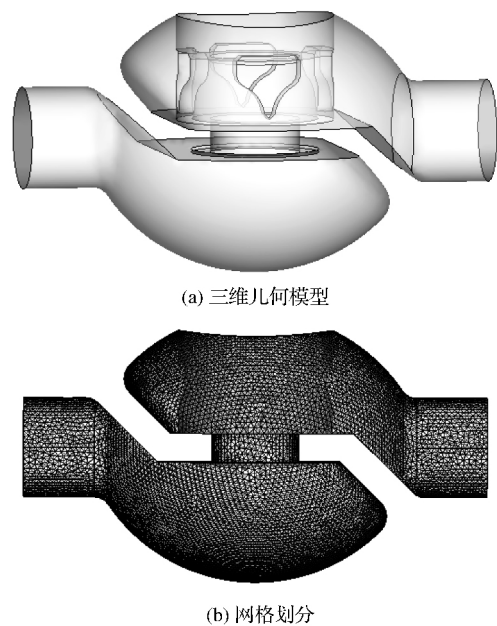


图 2 阀内流道几何模型与网格划分

Fig.2 Geometric model and mesh generation of valve flow passage

使用 ICEM CFD 软件对其进行网格划分,由于研究的复合式调节阀的流道形状不规则,并且对于动网格问题来说,非结构化网格的适应性更好,所以研究采用的网格为图 2(b)。

2.2 数值模拟求解器及算法设置

使用 Fluent 进行数值模拟时,选择三维单精度求解器计算模拟。采用压力基求解器求解,选择 Transient 非稳态类型,使用 Mixture 混合模型以及 $k-\epsilon$ Realizable 湍流模型,近壁面处理采用 Standard Wall Functions 标准壁面函数^[15]。

压力速度耦合方程采用 PISO 算法求解,压力项采用标准格式离散,密度、动量、湍动能的离散采用一阶迎风格式^[16]。对于非稳态流动的数值模拟,时间离散采用一阶隐式,收敛精度设为 10^{-5} 。

2.3 网格无关性验证

在数值模拟当中网格的数量会直接决定计算结果的准确性,计算之前需对网格密度进行无关性检验,分别对计算模型划分 8 万、13.7 万、18.7 万、26 万、39 万 5 种不同数量的网格,以 8 万网格数量的计算结果为基准值,比较阀门出口的平均质量流量。结果如表 1 所列。网格数量达到 18.7 万以上时,出口的平均质量流量达到稳定,同时考虑到计算机的性能,选择计算网格数量为 26 万左右。

表 1 网格无关性验证结果比较

Table 1 Independence verification results comparison of grid

网格数量	8 万	13.7 万	18.7 万	26 万	39 万
质量流量	1	1.004	1.010	1.011	1.012

2.4 边界条件与动网格设置

根据复合式调节阀在实际使用中的一般工况,设置具体参数,见表 2。

表 2 参数设置

Table 2 Parameter setting

流体介质	水(water-liquid)
密度	$\rho=998.2 \text{ kg/m}^3$
黏度	$\mu=0.001003 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$
阀门入口压力	4.2 MPa
阀门出口压力	根据工况指定静压
阀门壁面	绝热无滑移边界

由于调节阀在关闭过程中缓压轴的位移较大,且研究中模型网格采用的是非结构化网格,故同时选用弹簧光滑模型和局部网格重构模型来计算更新网格,以提高变形更新后的网格质量^[15]。在 Fluent 动网格区域设置中,将缓压轴设置为刚体(Rigid

Body)。

在动网格运动过程中,如果时间步长过大则网格容易出现负体积,如果时间步长过小,则会浪费计算资源,综合考虑,时间步长设为 0.001 s。根据经验研究的调节阀关闭总时长需要 10 s,并且将其等分为 10 个开度,每秒运动 10%开度。

3 结果与分析

3.1 流阻系数和出口压力

调节阀的流阻系数仅与阀门的结构相关,在一定开度下是一个定值。给定入口压力为 4.2 MPa,计算得到不同开度下的流阻系数和出口压力值,计算结果如表 3 所列。

表 3 不同开度下调阀的流阻系数和出口压力

Table 3 Flow resistance coefficient and exit pressure of valve under different opening

开度/%	流阻系数 ϵ	P_{out}/Pa
30	121.215	796 875
40	42.113	849 652
50	17.551	917 426
60	8.324	983 820
70	5.571	1 528 842
80	4.732	1 530 009

调节阀在不同开度下的气含率如图 3 所示。在开度为 30%时,气含率达到了 55%。为了减小气含率,降低窗口处的空化现象,研究通过在阀门出口端增加背压的方法以降低气含率。

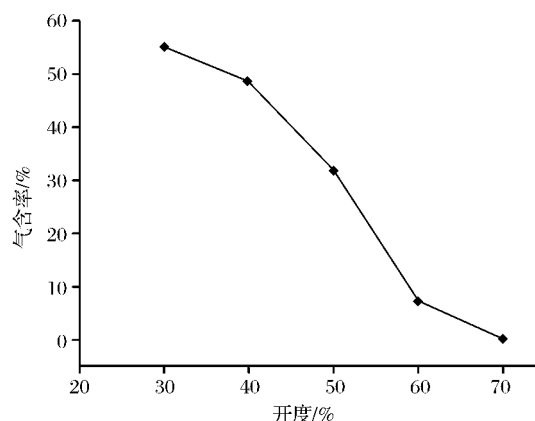


图 3 调节阀窗口处气含率曲线

Fig.3 Gas volume fraction curve in regulating valve window

考虑到工程中的不同工况,在阀门出口设置背压,分别设置压力为 0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa、1.2 MPa。研究分析调节阀在关闭过程中的空化现象规律,以探求增加背压减弱空化现象的

方法。

3.2 空化流场分析

在开度 < 60% 时,空化主要发生在调节阀阀芯窗口处,这是由于随着开度的减小,缓压轴向下移动造成流通面积减小,导致此处流速增大,压力减小并降低至饱和蒸气压以下。背压为 0.8 MPa 时不同开度下窗口空化区域,如图 4 所示。

在开度 > 60% 时,高速流区由阀芯的中间逐步向出口段流道的拐角处迁移。这是由于在出口端流道拐角处流体流动的方向发生改变而产生了边界层分离,在这个部位出现负压区从而产生空化。调节阀

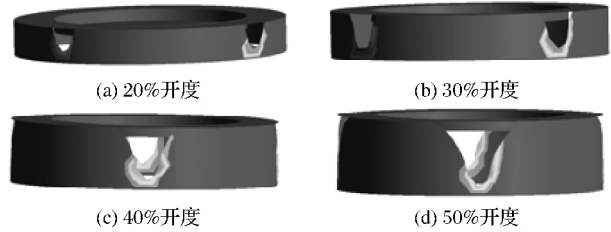


图 4 出口背压 0.8 MPa 窗口空化区域

Fig.4 Cavitation area chart in window, exit backpressure is 0.8 MPa

不同开度、出口背压为 0.8 MPa 时的部分流线,如图 5 所示。

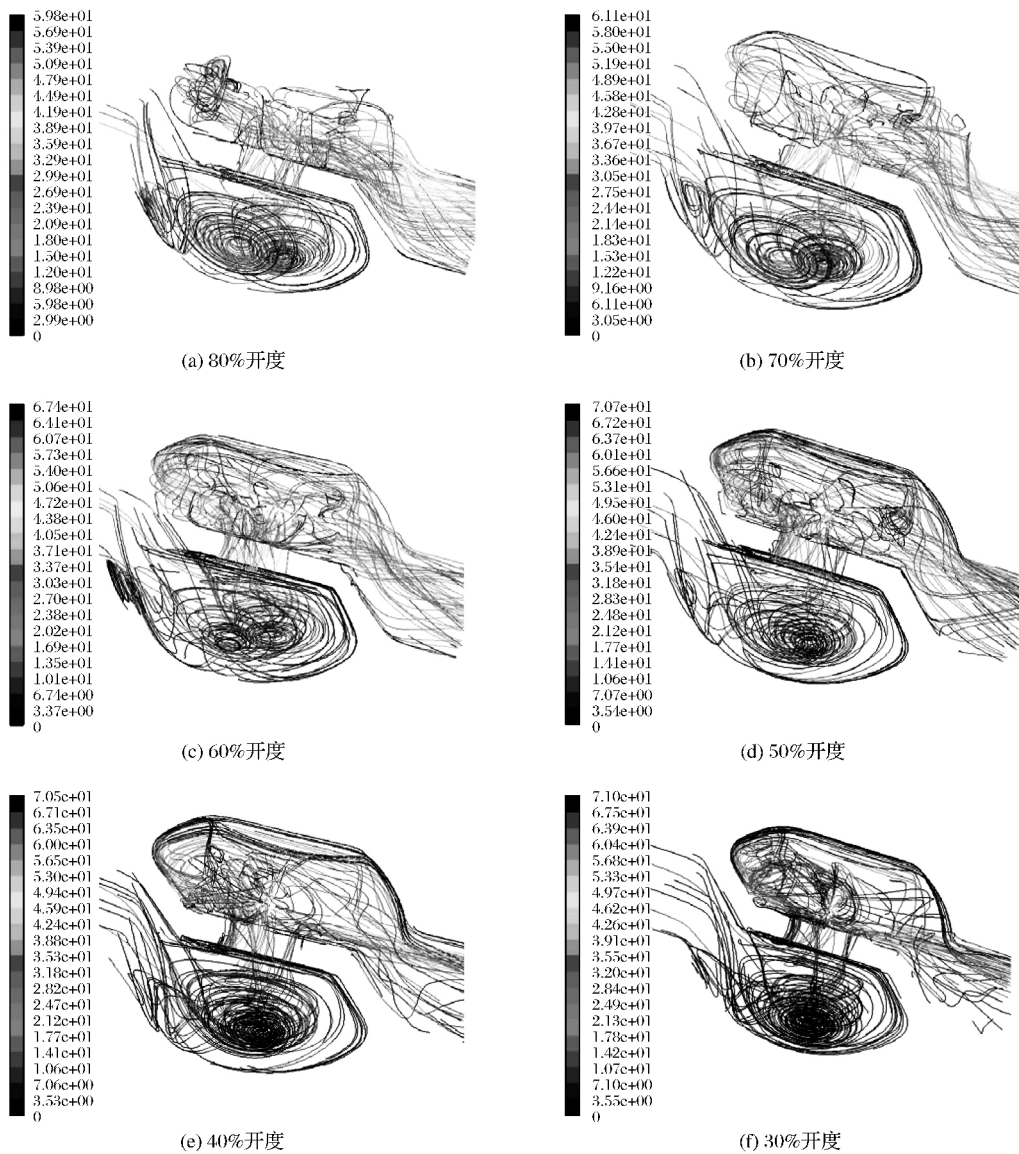


图 5 出口背压为 0.8 MPa 时的部分流线

Fig.5 Streamline graph, exit backpressure is 0.8 MPa

调节阀进口压力均为 4.2 MPa,出口背压分别为 0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa、1.0 MPa、1.2 MPa 时出口段

部分空化区域分布云图如图 6 所示。由图 6 看出,开度不变,背压越大,调节阀内的空化强度越小。增加调

节阀出口端的背压,可以明显降低阀门的空化现象。

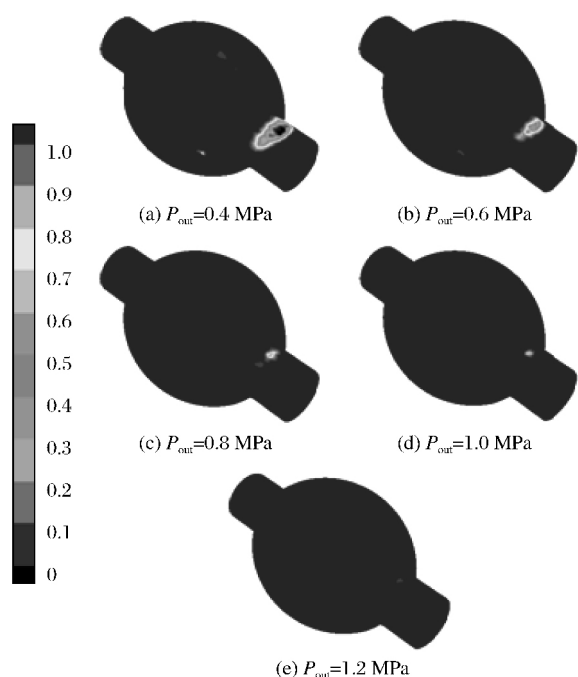


图6 调节阀(60%开度)各出口背压力(20 °C)下的气相云图
Fig.6 Gaseous phasenephogram under every exit backpressure (20 °C), regulating valve opening is 60%

3.3 气含率和空化数

不同开度各背压下窗口处的气相体积分数曲线如图7所示。从图7中可以看到,在20%~70%开度之间,随着背压的增加,气相体积分数在逐渐减小,空化强度减弱。在开度>70%时,窗口气相体积分数为0,窗口处不会产生空化。

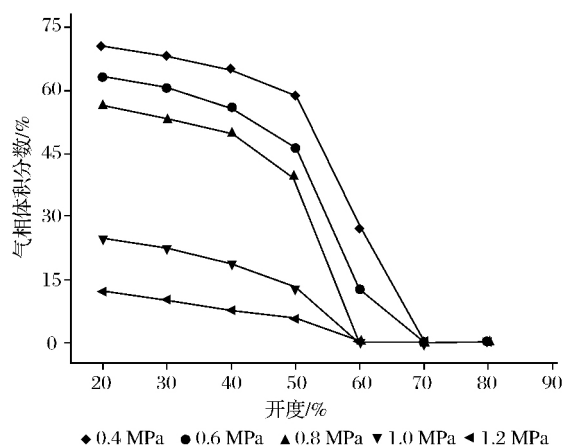


图7 窗口处气相体积分数
Fig.7 Gaseous phase volume fraction in window

不同开度各背压下窗口处的空化数曲线如图8所示。从图8中空化数也可以得到,在相同开度下,随着背压的增加,空化数逐渐增大。

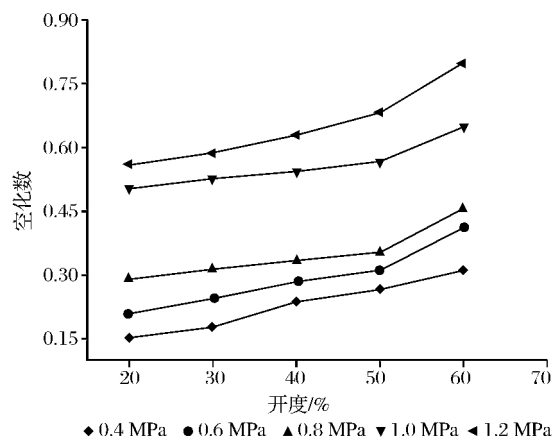


图8 窗口处空化数
Fig.8 Cavitation number in window

流场内开始产生可见的微小空穴时,为初生空化状态,其空化数为初生空化数。空化数 σ 大于初生空化数 σ_i 时,不会产生空化现象^[17]。

通过计算得到不同开度下空化初生空化数以及背压为1.2 MPa和1.24 MPa的空化数,如图9所示。出口背压为1.24 MPa时空化数等于初生空化,即背压 ≥ 1.24 MPa时此复合式调节阀不会产生气蚀。

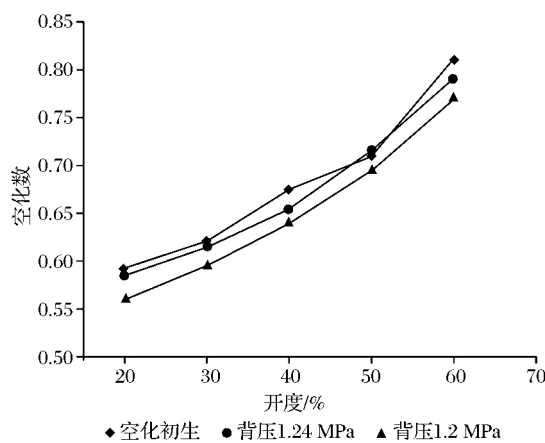


图9 不同开度下的空化数
Fig.9 Cavitation number under different openings

4 结论

基于复合式调节阀的结构特点和工作原理,在不同开度和各出口背压下,研究复合式调节阀的空化现象,并进行优化。根据研究结果得到如下结论:

- (1)复合式调节阀由于自身结构所造成的压差过大产生空化现象,并且随着开度的减小窗口处气含率明显增加,空化程度增强,在30%开度时达到了55%。

(2)在开度 $<60\%$ 时,空化主要发生在调节阀阀芯窗口处;开度 $>60\%$ 时,高速流区由阀芯的中间逐步向出口段流道的拐角处迁移,并在此处产生空化。

(3)通过对复合式调节阀施加背压,阀内空化随背压的增加而减弱,施加合适的背压可有效减弱空化现象,当背压 ≥ 1.24 MPa 时此复合式调节阀不会产生气蚀。

参考文献:

- [1] 何衍庆,邱宣振,杨洁,等.控制阀工程设计与应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 李树勋,丁强伟,徐晓刚,等.超(超)临界多级套筒调节阀空化抑制模拟研究[J].华中科技大学学报:自然科学版,2015,25(3):37-41.
- [3] 薛梅新,吴迪,朴英.高压喷嘴内部空化流动的数值模拟研究[J].工程力学,2012,29(10):46-51.
- [4] Qu W S, Tan L, Cao S L, *et al.* Experiment and Numerical Simulation of Cavitation Performance on a Pressure-regulating Valve With Different Openings[C]//2015:042035.
- [5] Qian J Y, Liu B Z, Jin Z J, *et al.* Numerical Analysis of Flow and Cavitation Characteristics in a Pilot-Control Globe Valve with Different Valve Core Displacements[J]. Journal of Zhejiang University, 2016, 17(1):54-64.
- [6] Couzinet A, Gros L, Pinho J, *et al.* Numerical Modeling of Turbulent Cavitation Flows in Safety Relief Valves[C]// ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference. 2014: V007T07A017-V007T07A017.
- [7] Liu H L, Liu D X, Wang Y, *et al.* Application of Modified $k-\omega$ Model to Predicting Cavitating Flow in Centrifugal Pump[J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(3):331-339.
- [8] 杨敏官,倪丹,李忠,等.791翼型非正常空化流动数值计算研究[J].流体机械,2015,43(2):17-23.
- [9] 李贝贝,刘秀梅,龙正,等.基于 Fluent 的节流阀油液空化流场数值分析[J].振动与冲击,2015,34(21):54-58.
- [10] 黄思,管俊.基于空化模型的多级离心泵汽蚀性能分析[J].流体机械,2011,39(1):29-31,28.
- [11] 王常斌,王敏,于远洋,等.文丘里管水力空化现象的 CFD 模拟[J].管道技术与设备,2013,(1):10-12.
- [12] 姜浩,巴鹏,薛佳,等.迷宫压缩机活塞速度对泄漏量影响的研究[J].流体机械,2016,44(7):22-26,37.
- [13] 杨科,金晓宏,肖鹏飞,等.非全周矩形开口滑阀小开口度时流量及液动力特性研究[J].流体机械,2016,44(7):14-17,63.
- [14] 江帆,陈维平,王一军,等.基于动网格的离心泵内部流场数值模拟[J].流体机械,2007,35(7):20-24.
- [15] Liang J, Luo X, Liu Y, *et al.* A Numerical Investigation in Effects of Inlet Pressure Fluctuations on the Flow and Cavitation Characteristics Inside Water Hydraulic Poppet Valves[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 103:684-700.
- [16] 唐家鹏.FLUENT 14.0 超级学习手册[M].北京:人民邮电出版社,2013.
- [17] 吴玉林,唐学林,刘树红,徐宇.水力机械空化和固液两相流体力学[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

Simulation of Combined Type Regulating Valve Under Backpressure

Wang Shipeng, Chen Xiugao, Zhang Xiheng

(College of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract For drop of pressure in combined type regulating valve in engineering practice causes cavitation, we studied the influence on cavitation under different exit backpressure and different opening, with CFD to calculate fluid mechanics and with dynamic mesh technique; as a result, we got gas-liquid two-phase distribution in valve, gas volume fraction, cavitation curve and primary cavitation under different condition. The result showed that the cavitation in combined type regulating valve window increases with opening decreasing; when exit backpressure is increased from 0.4 MPa to 1.2 MPa, the maximum gas volume fraction is increased from 0.71 to 0.146. Increasing exit backpressure can effectively hold and weaken cavitation, as well as get the optimal backpressure, 1.24 MPa.

Key words Cobined type regulating valve; Cavitation; Numerical simulation; Dynamic mesh; Cavitation number