

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.09.001

旋转式换向阀非定常空化流动特性研究*

吴万荣,丁元根

(中南大学机电工程学院,湖南长沙 410083)

摘要:针对旋转式换向阀空化现象会导致噪声及其性能恶化,进而影响液压激振系统的问题,对旋转式换向阀非定常空化流动特性进行了研究。利用 SolidWorks 软件建立了阀口的三维模型,利用前处理软件 ICEM 对几何模型进行了网格划分及边界条件的设置;借助 Fluent 软件中的 Mixture 气穴模型和 RNG 湍流模型,建立了流场数学模型,采用滑移网格技术对阀口空化流动进行了数值模拟;探究了不同开度下旋转式换向阀压力场、速度场以及气穴分布的变化趋势。研究表明:开度的大小会影响阀口的压力场和速度场的分布,阀芯沟槽极易出现漩涡,并且开度的变化会影响漩涡的大小;空化区域的分布也会随阀口开度的变化而变化;最大气体体积分数随入口压力和阀芯转速的增大而增大,随背压的增大而减小。

关键词:旋转式换向阀;空化流动;滑移网格;数值模拟

中图分类号:TH137.52

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)09-0993-06

Unsteady cavitation flow characteristics of rotary reversing valve

WU Wan-rong, DING Yuan-gen

(College of Mechatronics and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Aiming at the problems that the cavitation of rotary reversing valve will cause noise, performance deterioration and even lead to affect the performance of the hydraulic vibration system, the unsteady cavitation flow characteristics of rotary reversing valve were studied. A three-dimensional model of the valve port was built by SolidWorks software. Its grids was divided and boundary conditions were set by ICEM software prior to implementing the simulation. The mathematical models of the flow field were built, which combined RNG turbulence model and Mixture cavitation model in the Fluent software, the valve cavitation flow was numerically simulated by the sliding mesh technique. The trend of pressure field, velocity field and cavitation distribution of rotary reversing valve under different opening degrees were explored. The results indicate that the degree of opening will affect the distribution of pressure field and velocity field at the valve port, and the valve spool is prone to vortex, and the change of opening will affect the size of the vortex. The distribution of the cavitation area will also change with the opening of the valve. The maximum gas volume fraction increases with the inlet pressure and the spool rotational speeds increases, and decreases as the back pressure increases.

Key words: rotary reversing valve; cavitation flow; sliding mesh; numerical simulation

0 引言

旋转式换向阀通过阀芯与阀套之间的回转运动实现阀口的切换,因此又称转阀,它是液压激振系统中的重要控制元件,其作用在于能够实现液压回路中油液的高频换向。

由于旋转式换向阀内流道较复杂,导致换向时,其油液极易在阀内形成漩涡、空化等现象;同时由于空化的周期性脱落、溃灭,会导致阀芯侵蚀、压力脉动以及噪声等现象出现,从而影响到液压激振系统的工作性能。因此,研究旋转式换向阀内部的流动特性,对于液压激振系统技术的提高具有现实意义。

收稿日期:2020-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774340);高性能复杂制造国家重点实验室自主研究课题资助项目(zzyjkt2015-03)

作者简介:吴万荣(1965-),男,湖南长沙人,博士,教授,主要从事液压振动与冲击技术方面的研究。E-mail:wwr@csu.edu.cn

目前,随着计算流体力学技术的不断发展,数值模拟方法已经成为研究空化现象的重要手段,并且国内外学者对于空化现象也开展了大量的研究,并取得了不少成果^[1-3]。

张健^[4]针对锥型节流阀的空化问题,利用 ASINA 软件对节流阀阀口进行了仿真和试验验证,得出了不同阀芯结构下节流阀的压力特性,为液压阀的设计和噪声控制提供了理论依据;王松林等^[5]对离心泵内部的非定常空化流动进行了仿真分析,探究了空化对于叶轮、叶片以及蜗壳压力脉动的影响,通过对比分析离心泵在空化和非空化条件下的压力脉动特性,得出了空化流动时压力脉动的最大幅值大于非空化的结论;李树勋^[6]针对超临界高温高压蒸汽疏水阀进行了数值模拟,预测了疏水阀内部空化流动的发生和发展情况,并研究了不同开度、不同压力以及不同密封角度对内部空化流动的影响;刘秀梅^[7]对节流阀内部非定常空化流动进行了数值计算,分析了节流阀内部形态的周期性变化过程及其对应的内部流场的压力脉动特性;LIANG J^[8]对滚珠止回阀进行了数值分析和实验验证,对空化和非空化下的流量系数以及液动力进行了对比分析,验证了空化现象的准确性;HAN M^[9]采用多相流模型对大流量比例插装阀空化作用下的液动力进行了分析,并将仿真结果与实验对比,得出了二级节流阀可以有效地抑制空化现象发生的结论;AUNG N Z^[10]采用大涡模拟和多相流模型对不同入口压力下的喷嘴挡板伺服阀前置级瞬态流场进行了研究,对其空化区域分布和形态变化规律进行了分析,并提出了一种有效的挡板形状,有效减小了空化现象的发生;朱钰^[11]采用 CFD 方法对新型换向阀进行了仿真,得到了不同阀口形式下的流量系数和液动力。

上述文献大多都是对泵或者其他类型阀所进行的研究,并且大多都是稳态下的研究,而对于转阀的研究并不多见;但其方法和结果却也可作为转阀的研究提供参考。

以转阀为研究对象,笔者采用数值模拟的方法对不同工况下转阀非定常流动特性进行分析,研究转阀内部空化区域的分布规律,为转阀结构的优化设计提供依据。

1 工作原理

转阀的结构如图 1 所示。

由图 1 可知,转阀主要由阀芯、阀套、阀体、伺服电机等组成。阀芯上分布有 I、II、III、IV 4 个台肩,阀

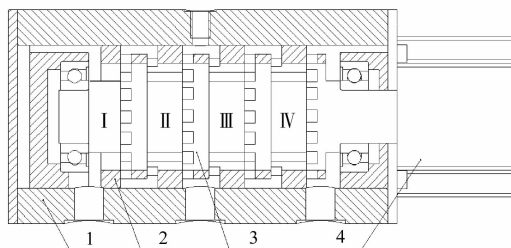


图 1 转阀结构

1 - 阀体;2 - 阀套;3 - 阀芯;4 - 伺服电机

芯台肩 I 和台肩 III 上的沟槽布置相同,阀芯台肩 II 和台肩 IV 上的沟槽布置也相同。

阀芯和阀套的配合关系如图 2 所示。

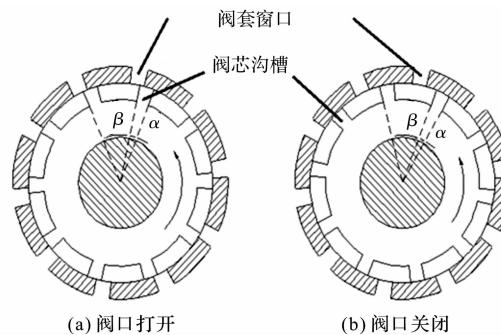


图 2 阀芯和阀套配合关系

图 2 中,阀芯台肩上分布有 10 个沟槽,在阀套上也有相同数量的窗口,阀芯台肩上相邻沟槽之间的中心角 β 为 36° ,台肩上沟槽所对应的圆心角 α 为 $\beta/4$,相邻台肩 I 和 II 上的沟槽相互错位分布,错位角度为 $\beta/2$,阀套上对应的窗口不错位。随着伺服电机驱动阀芯做旋转运动,阀芯台肩上的矩形沟槽与阀套上的窗口重叠形成节流阀口,且节流阀口的面积随阀芯的旋转成周期性变化,呈现出由小变大,再由大变小的趋势。

其中,阀口打开过程如图 2(a) 所示。当阀芯的旋转角度为 0 到 $\beta/2$ 之间时,阀芯做逆时针旋转运动时,阀口开度先由小变大,再由大变小,该过程中阀芯台肩 I 和 III 的沟槽与阀套上的窗口打开;

阀口关闭过程如图 2(b) 所示。旋转角度为 $\beta/2$ 到 β 之间时,台肩 I 和 III 上的沟槽与阀套上的窗口关闭,而对应的台肩 II 和 IV 上沟槽与阀套上的窗口打开,随着阀芯的继续转动,阀口的开闭会呈现出周期性的变化,以实现液流高频切换。

2 计算模型和控制方程

2.1 计算模型及边界条件

转阀的仿真模型如图 3 所示。

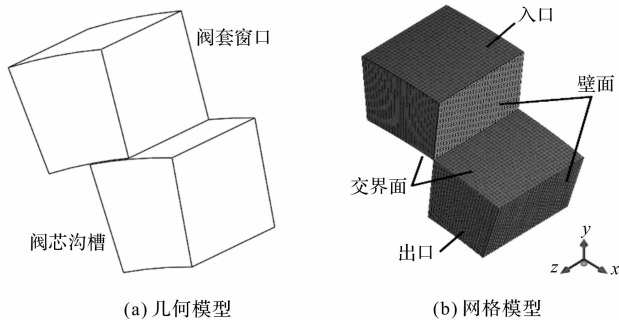


图3 阀口仿真模型

转阀的几何模型如图3(a)所示,由于转阀阀芯沟槽在周向对称,均匀分布,只需选取一对阀套窗口和阀芯沟槽进行分析。

转阀的网格模型如图3(b)所示,采用结构网格对模型进行网格划分,其模型的节点数为41 250,网格单元数为36 888。

笔者采用Mixture模型对转阀内部进行仿真。假定液相不可压缩,液体为液压油,其密度为 850 kg/m^3 ,粘度为 $0.035 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$;气相为油液蒸汽,其密度为 1.2 kg/m^3 ,粘度为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$;饱和蒸汽压为 400 Pa 。

笔者采用压力入口边界条件,大小为 5 MPa ,出口设置压力出口,大小为 0.5 MPa ,设置阀芯转速为 $1\ 500 \text{ r/min}$ 。采用基于压力的求解器;数值计算方法采用SIMPLEC算法;压力、力矩、体积百分数以及湍动能均采用一阶迎风格式。

为了减小网格对计算结果的影响,笔者针对网格进行独立性检验。当网格的数目分别为13 718、17 808、36 888、47 928、118 638时,最大气体体积分数分别为0.863 4、0.907 04、0.922 4、0.936 2、0.924 6。可知,当网格到达一定数目时,计算结果误差波动较小。同时,为了保证计算效率,笔者最终选取网格数目为36 888。

2.2 控制方程和模型

(1)混合模型的连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

式中: ρ_m —混合平均密度; \mathbf{v}_m —质量平均速度; \dot{m} —描述了由于气穴或定义的质量源的质量传递。

(2)混合模型的动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = \\ - \nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: μ_m —混合粘性。

(3)气泡体积运输方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{u}) = R_e - R_c \alpha_v \quad (3)$$

式中: α_v —气相体积分数; ρ_v —气相密度; R_e —空泡生成率; R_c —空泡凝结率。

(4)空化模型。

由于气穴空泡在低温下形成液体,在此过程中认为是等温的,即可以忽略蒸发散热。

Rayleigh-Plesset方程与压力和气泡容积相关,可表达为:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{p_B - p}{\rho_l} - \frac{2\sigma}{\rho_l R} - 4 \frac{\mu_l}{\rho_l R} \frac{dR}{dt} \quad (4)$$

式中: R —气泡半径; p_B —气泡内的压力; σ —表面张力系数; μ_l —液相介质粘性。

为简便计算,气泡成长和破裂的过程可表达如下:

(1)当 $p_v > p$ 时:

$$R_c = F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R} \sqrt{\frac{2(p_B - p)}{3\rho_l}} \quad (5)$$

(2)当 $p_v \leq p$ 时:

$$R_c = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1 - \alpha_v)\rho_v}{R} \sqrt{\frac{2(p_B - p)}{3\rho_l}} \quad (6)$$

湍流模型选用RNG $\kappa - \varepsilon$ 模型。该模型在湍流耗散率中增加了一个 R 项,考虑了湍流的各向异性,因而在空化数值计算中有着较好的表现^[12-14]。

空化模型选用的是Schnerr-Sauer模型,该模型没有引入任何的经验系数,因而被广泛地应用于各种空化流的数值预测中^[15-16]。

3 仿真分析

3.1 速度场分析

笔者通过采用滑移网格模型来模拟阀芯的运动,从而得到阀芯运动过程中不同开度下阀口的空化流动特性。

在不同开度下,转阀的速度分布云图如图4所示。

图4中, θ 为阀芯旋转的角度,当 θ 为 $0^\circ \sim 9^\circ$ 时,为阀口打开的过程;当 θ 为 $9^\circ \sim 18^\circ$ 时,为阀口关闭的过程。

从图4中可以看出:由于过流面积的剧变,阀芯沟槽靠近节流口处存在高速射流区域,流速较大的区域主要分布在节流口附近,流速较小的区域主要分布在阀套窗口。

阀口打开时,随着开口度的增大,流速较大的区域逐渐增大;阀口关闭时,随开口度的减小,流速较大的区域逐渐减小。观察流线可以看出,阀芯沟槽极易产

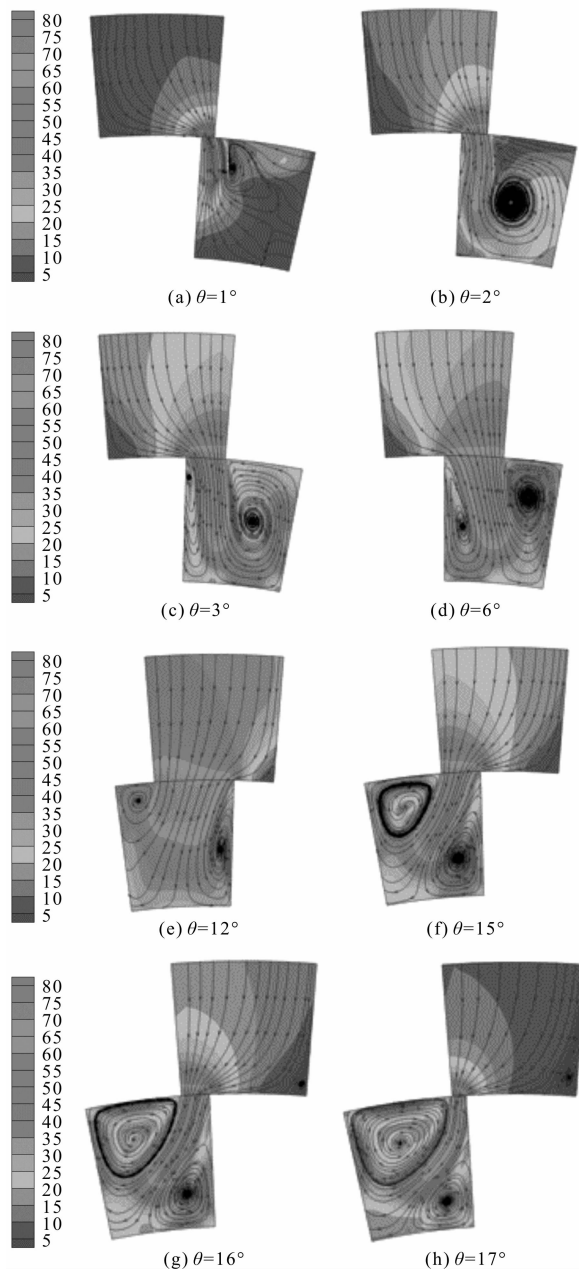


图 4 不同开度下的流速分布云图

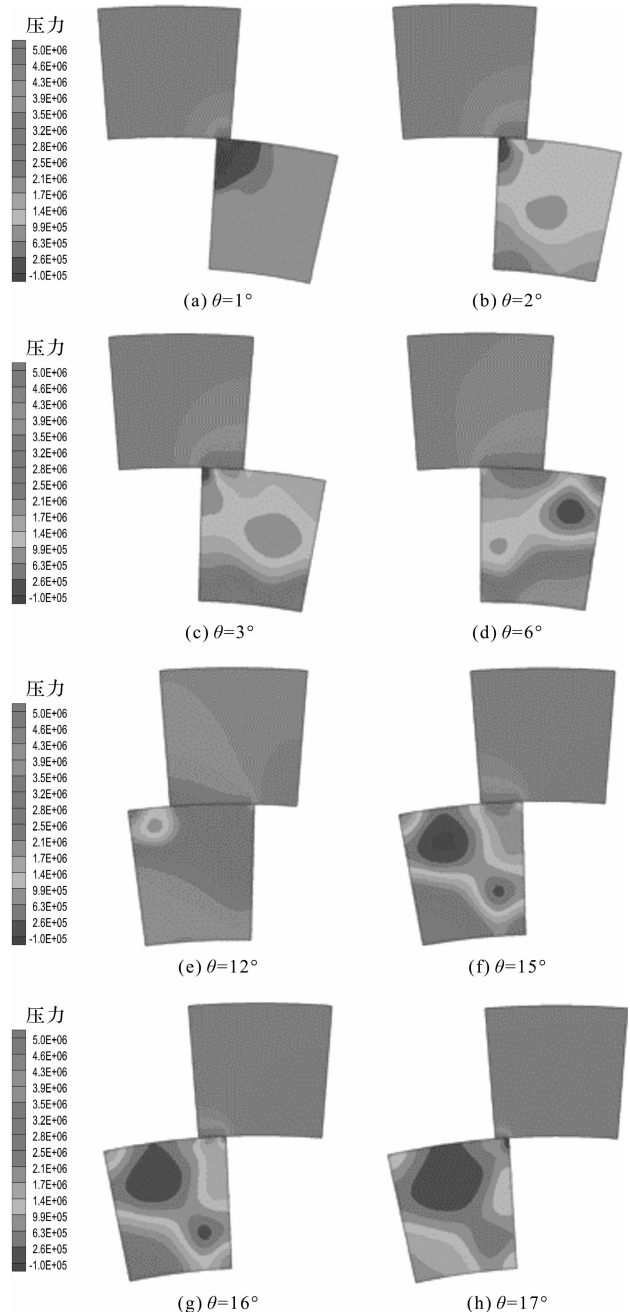


图 5 不同开度下的压力云图

生漩涡,并且开度的变化会影响漩涡的大小。阀口打开时,阀芯沟槽只有一个漩涡,在阀芯沟槽的右侧,后随着开度的增大而减小,而阀芯沟槽左侧的漩涡随开度的增大而增大;

阀口关闭过程中,阀芯沟槽左右两侧仍然有两个漩涡,并随开度的减小而增大。同时,随着阀口开度的减小,阀套窗口的右下角也形成一个漩涡,并随着开度的减小而不断增大。

3.2 压力场分析

阀口在不同开度下的压力分布如图 5 所示。

从图 5 可以看出:压力较大的区域主要集中在阀套窗口,压力较小的区域主要集中在阀芯沟槽,压降主要集中在节流口处。

当阀口打开时,随着阀口开度的增大,压降区由节流口逐渐向阀套窗口迁移,压力较大的区域面积也逐渐减小,靠近节流口处的低压区的面积也逐渐减小;当阀口关闭时,随着阀口开度的减小,压降区逐渐向节流口处迁移,压力较大区域的面积也不断扩大。同时,阀芯沟槽的低压区面积不断扩大,并随着阀口开度的减小向节流口处移动。

3.3 空化区域分布

阀口在不同开度下的气相分布云图如图6所示。

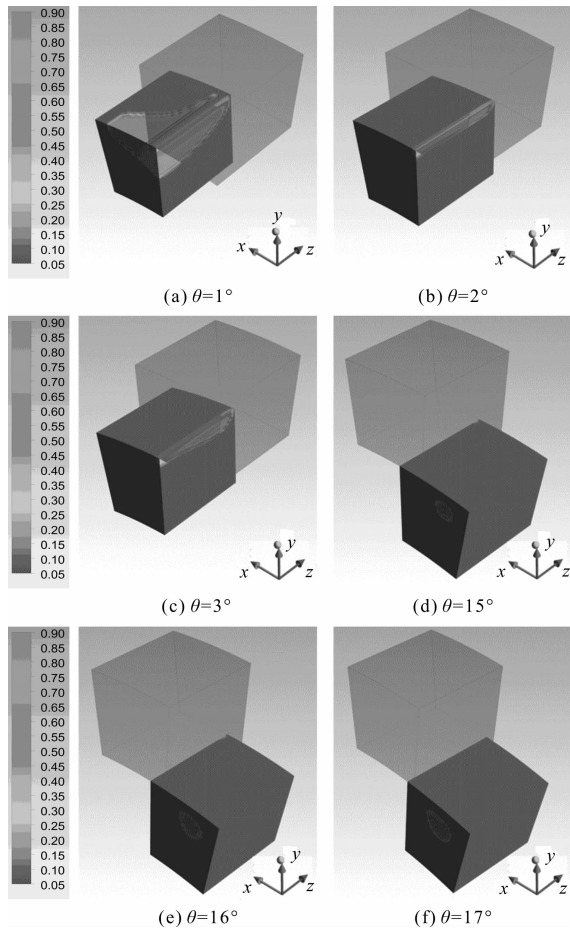


图6 不同开度下的气相分布云图

从图6可以看出:阀口刚打开时,阀芯沟槽发生了空化现象,其主要分布于阀套窗口和阀芯沟槽相连的节流口附近;阀口打开时,当阀口开度为1°时,空化区域较大,随着阀口开度的继续增大,空化区域逐渐减小直至空化消失;阀口关闭过程中,随着阀芯转动,阀口开度逐渐减小,空化继续出现,但空化区域分布位置有所改变,主要集中在阀芯沟槽逆出口方向的壁面上。并且随着开度的减小,空化区域不断增大。

3.4 不同工况下的空化区域分布

为了研究不同工况下空化现象的变化规律,分别在不同入口压力(3 MPa、5 MPa、7 MPa、9 MPa),不同背压(0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa、0.9 MPa),不同阀芯转速(750 r/min、1 500 r/min、3 000 r/min、4 500 r/min)的情况下,笔者对阀口进行仿真分析。

由于气体体积分数比可作为空化程度以及空化区域的衡量标准,可通过对不同工况下最大气体体积分数进行研究,来进一步揭示不同参数下,最大气体体积分数的变化规律。

3.4.1 入口压力对空化区域的影响

以背压为0.5 MPa,阀芯转速为1 500 r/min,开度为1°时的阀口为研究对象,其最大气体体积分数随入口压力的变化曲线如图7所示。

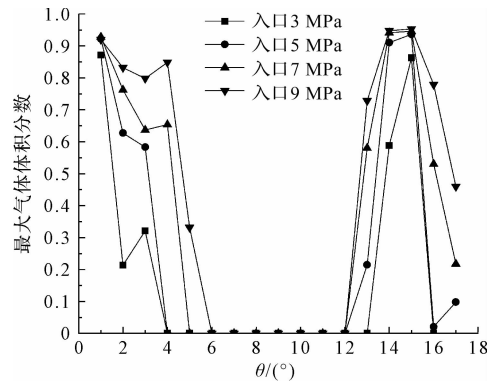


图7 不同入口压力下的最大气体体积分数

从图7可以看出:入口压力对最大气体体积分数有影响,同一开度下,随着入口压力的增大,最大气体体积分数越大;并且,最大气体体积分数随着阀芯的转动,都呈现出先减小再增大的趋势。

3.4.2 背压对空化区域的影响

以入口压力为5 MPa,阀芯转速为1 500 r/min,开度为1°时的阀口为研究对象,其最大气体体积分数与背压的变化曲线如图8所示。

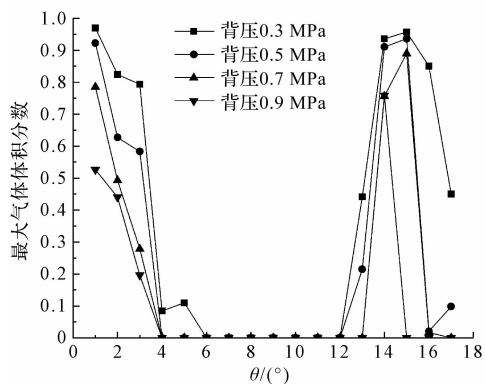


图8 不同背压下的最大气体体积分数

从图8可以看出:随着背压的增大,空化区域明显减小,空化强度明显减小,这是因为随着背压的增大,阀口的压差减小,阀口的流速减小,导致阀口压降减小;背压对最大气体体积分数也有影响,同一开度下,背压越大,最大气体体积分数就越小。

3.4.3 阀芯转速对空化区域的影响

以入口压力为5 MPa,背压为0.5 MPa,开度为1°时的阀口为研究对象,其最大气体体积分数与阀芯转速的变化曲线如图9所示。

从图9可以看出:阀芯转速对空化的分布有影响,随着阀芯转速的增大,空化区域越大,空化强度明显增大;阀芯转速对最大气体体积分数也有影响,同一开度

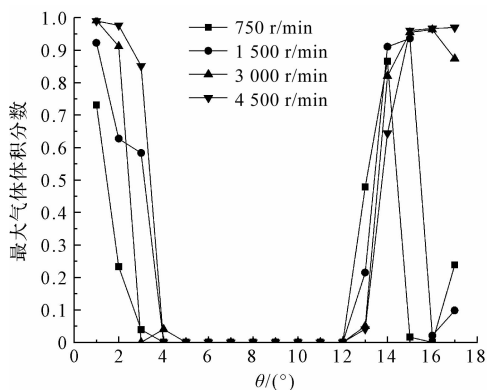


图9 不同阀芯转速下的最大气体体积分数

下, 阀芯转速越高, 最大气体体积分数越大。

4 结束语

借助 Fluent 软件, 笔者将 Mixture 气穴模型和 RNG 模型相结合, 利用滑移网格技术数值模拟了转阀的非定常空化流动, 分析了空化随阀口开度变化的分布规律, 并研究了入口压力、背压以及阀芯转速对空化区域分布及最大气体体积分数的影响。

研究结论如下:

(1) 流体通过转阀阀口时, 阀芯沟槽极易产生漩涡。阀口打开过程中, 沟槽左侧的漩涡逐渐增大, 沟槽右侧的漩涡逐渐减小; 阀口关闭时, 沟槽两侧的漩涡逐渐增大;

(2) 阀口开度的变化会影响空化区域的大小, 阀口打开时, 空化区域的大小随开度的增大而减小, 阀口关闭时, 空化区域逐渐向沟槽逆出口方向的壁面迁移, 并随开度的减小, 空化区域的大小逐渐增大;

(3) 空化区域随入口压力、阀芯转速的增大而增大, 随背压的增大而减小; 最大气体体积分数随入口压力、阀芯转速的增大而增大, 随背压的增大而减小。

该研究结果对阀芯结构的优化设计具有一定的参考意义。

参考文献 (References):

- [1] AUNG Z N, YANG Q, CHEN M, et al. CFD analysis of flow forces and energy loss characteristics in a flapper-nozzle pilot valve with different null clearances[J]. **Energy Conversion and Management**, 2014(83):284-295.
- [2] LISOWSKI E, FILO G. CFD analysis of the characteristics of a proportional flow control valve with an innovative opening

shape[J]. **Energy Conversion and Management**, 2016(123):15-28.

- [3] LISOWSKI E, FILO G. Analysis of a proportional control valve flow coefficient with the usage of a CFD method[J]. **Flow Measurement and Instrumentation**, 2017(53):269-278.
- [4] 张健, 姜继海, 白云峰, 等. 锥型节流阀压力特性仿真与试验[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(4):64-68.
- [5] 王松林, 谭磊, 王玉川. 离心泵瞬态空化流动及压力脉动特性[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22):168-173.
- [6] 李树勋, 胡建华, 李连翠, 等. 超(超)临界蒸汽疏水阀内部空化模拟[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(5):145-153.
- [7] 刘秀梅, 徐化文, 李贝贝, 等. 液压节流阀内非定常空化特性的数值分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(3):89-95.
- [8] LIANG J, LUO X H, LIU Y S, et al. A numerical investigation in effects of cavitation in water hydraulic poppet valves[J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2016(103):684-700.
- [9] HAN M X, LIU Y S, WU D F, et al. A numerical investigation in characteristics of flow force under cavitation state inside the water hydraulic poppet valves[J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2017(111):11-16.
- [10] AUNG N Z, LI S. A numerical study of cavitation phenomenon in a flapper-nozzle pilot stage of an electrohydraulic servo-valve with an innovative flapper shape. [J]. **Energy Conver Manage**, 2014(77):31-39.
- [11] 朱钰. 液控换向阀内流场及动态特性的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(5):133-139.
- [12] ZHOU L J, WANG Z W. Numerical simulation of cavitation around a hydrofoil and evaluation of a RNG κ - ϵ model[J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2008, 130(1):011302-011308.
- [13] 胡敬宁, 江伟, 刘三华, 等. 不同湍流模型对海水淡化用提升泵模拟精度的影响[J]. 热能动力工程, 2011, 26(4):483-486, 500.
- [14] 舒朝晖, 段亚雄, 童泽昊, 等. 采用不同湍流模型计算贯流风机内流场的比较分析[J]. 流体机械, 2018, 46(2):19-23.
- [15] 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 离心泵内部空化特性的 CFD 模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2):99-103.
- [16] 刘春哲, 王国光, 尹光志, 等. 离心泵非定常空化流动特性的数值研究[J]. 流体机械, 2019, 47(7):39-43, 26.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

吴万荣, 丁元根. 旋转式换向阀非定常空化流动特性研究[J]. 机电工程, 2020, 37(9):993-998.

WU Wan-rong, DING Yuan-gen. Unsteady cavitation flow characteristics of rotary reversing valve[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(9):993-998.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>