

文章编号: 1009-3087(2013)05-0145-09

超(超)临界蒸汽疏水阀内部空化模拟

李树勋^{1,2}, 胡建华^{1,2}, 李连翠^{1,2}, 徐晓刚^{1,2}, 张兴^{1,2}

(1. 兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 机械工业泵及特殊阀门工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对超(超)临界高温高压蒸汽疏水阀, 将空化模型和混合两相流模型相结合, 应用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对疏水阀内部空化流动进行数值模拟。根据模拟结果, 预测了疏水阀内部空化的发生与发展情况, 并研究了不同开度、不同入口压力及不同密封面角度对内部空化流动的影响。同时进行了疏水阀防空化研究。结果表明, 该计算可有效模拟疏水阀内部空化流动情况; 随着开度的增加, 空化先出现在阀座处, 然后慢慢发展, 在阀底部流道中形成了大量空化流动; 随着进口压力的增大, 空化程度越大, 区域越大, 延续越长; 阀芯与阀座密封面角度为 45° 时, 阀座处空化强度最低, 区域最少; 加入三级套筒与均流罩, 有效抑制了阀内部空化的发生与发展。

关键词: 超(超)临界; 蒸汽疏水阀; 空化; 计算流体力学

中图分类号: TH134

文献标志码: A

Numerical Study of Cavitation Flows in Ultra-supercritical Steam Trap

LI Shu-xun^{1,2}, HU Jian-hua^{1,2}, LI Lian-cui^{1,2}, XU Xiao-gang^{1,2}, ZHANG Xing^{1,2}

(1. College of Petrochemical Technol., Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China;

2. Machinery Industry Pump and Special Valve Eng. Research Center, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Internal cavitation flow was numerically simulated in the ultra-supercritical steam trap by combining cavitation model and two-phase flow model and using the standard $k-\varepsilon$ model. The occurrence and development of internal cavitation in the valve were predicted and internal cavitation flow of the valve was studied under these conditions of different openings, different inlet pressures, different angles of sealing surface. Meanwhile, the anti-cavitation of the trap was studied. The results showed that the cavitation flow is well predicted. With the increase of opening the cavitation appears at the valve seat, developing gradually, finally a large number of cavitation form at valve bottom near wall. With the rise of inlet pressure, the cavitation intensify. When the angle of sealing surface becomes 45° , cavitation at the valve seat becomes lowest. Installing three-stage sleeve can restrain the occurrence and development of cavitation effectively.

Key words: ultra-supercritical; steam trap; cavitation; CFD

超(超)临界火电机组疏水阀, 主要用于主蒸汽管路、二级过热器以及冷再等蒸汽管路等处的疏水, 作用与一般蒸汽疏水阀相同: 排除机组启动时系统的凝结水及不凝气, 排除运行过程中凝结水, 以及特殊情况下泄压或排过热度达不到要求的蒸汽, 而在系统正常运行时关闭^[1]。对于超超临界火电机组, 疏水阀的工作原理与超临界类似, 只是工作压差更大、阀体承受温度更高。目前, 超(超)临界疏水阀遇到的最

主要问题在于: 开启过程中排一定过冷度的水, 工作过程中易发生空化造成气蚀破坏、强振动及高噪声。

空化流动的本质是气液两相流动, 气泡和液体之间有着非常复杂的动量和能量交换关系。随着计算流体力学的迅速发展, 数值计算已经成为预测空化流动的主要方法。国内外有关学者已经对泵等水力机械内部空化流动进行数值模拟研究, 但对超(超)临界蒸汽疏水阀此类空化严重的高压差阀门的研究涉及尚少。文献[2]对溢流堰表孔弧形闸门开启过程水力特性进行数值模拟, 得到易发生空化空蚀的时刻与区域; 文献[3]对混流式水轮机内部空化流动进行数值模拟; 文献[4]对混流式水轮机内部空化流动进行数值模拟; 文献[5-6]分别对轴流泵与心泵内部空化特性进行数值模拟与预测; 文献[7]对柴油机气缸套

收稿日期: 2013-02-26

基金项目: 科技部科技人员服务企业行动项目(2009GJG10005); 兰州理工大学“优秀青年教师培养计划”资助项目(Q201002);

作者简介: 李树勋(1973—), 男, 教授, 研究方向: 控制类阀门应用。

内部冷却水空化流进行数值模拟;文献[8]对绕水翼空化流场的数值模拟与试验研究。

针对超(超)临界蒸汽疏水阀的空化问题,鉴于超(超)临界阀门国产化的迫切需求,作者引入 CFD 方法,将空化模型和混合两相流模型相结合,对疏水阀进行空化及防空化模拟研究。

1 3 维疏水阀数值计算控制方程

1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m \mu_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

式中, ρ_m 为混合密度, μ_j 为质量平均速度, 具体为:

$$\rho_m = \sum_{n=1}^2 \alpha_n \rho_n, \mu_j = \sum_{n=1}^2 \frac{\alpha_n \rho_n}{\rho_m}$$

式中, ρ_m, μ_n, α_n 分别为第 n 相密度、速度及体积分。

2) 动量方程^[7]

$$\frac{\partial(\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_L + \mu_T) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (2)$$

式中, t 表示时间; u_i, u_j, u_k 表示速度分量, δ_{ij} 为克罗内克数, μ_L, μ_T 为混合介质动力黏度、湍流黏度。

3) 空泡体积分输运方程

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

式中, α_v 为汽相体积分, ρ_v 为汽相密度, R_e 为空泡生成率, R_c 为空泡凝结率。

4) 空化模型

当 $p \leq p_v$,

$$R_e = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p_v - p)}{\rho_l}} \quad (4)$$

当 $p > p_v$,

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

采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型使空化流方程组封闭, 采用了混合两相流模型处理疏水阀内部空化流动, 湍流模型中的 k 和 ε 方程在形式上与单相流相同, 其中的变量均为混合流的平均量^[9-11]。

2 疏水阀几何模型与计算方法

以超(超)临界蒸汽疏水阀为分析对象, 利用 Solidworks 3 维实体建模软件建立了 3 维几何模型, 采用非结构化网格划分技术, 将几何模型划分为节点数为

103 045, 单元数为 557 902 的计算网格如图 1 所示^[12-13]。

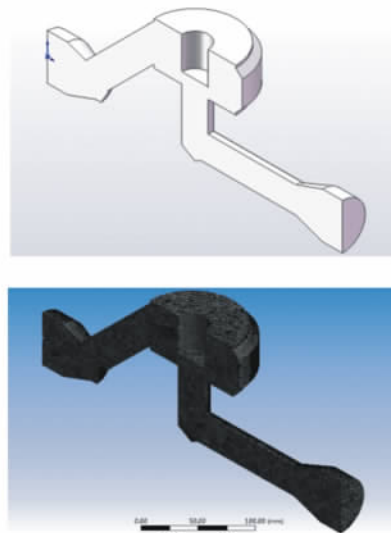


图 1 疏水阀 3 维模型与网格划分

Fig.1 3-D model and the grid of trap

采用有限体积法将上述控制方程组离散为代数方程组, 对流项采用 1 阶迎风格式, 扩散项采用 2 阶中心差分格式, 采用 SIMPLEC 算法实现速度和压力之间的耦合。为提高空化计算的收敛速度和计算稳定性, 用单相定常流动计算的收敛结果作为初场进行空化流动计算。

3 计算结果和分析

3.1 典型结构结果分析

对开高 $h = 13.5 \text{ mm}$, $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 的水, 入口压力 22 MPa、出口压力 6 MPa, 饱和蒸汽压为 1.5 MPa 时的疏水阀内部空化流场进行数值模拟, 结果如图 2~5 所示。

图 2 为对称面压力分布云图。从图可知, 在阀座处及阀底部转弯处出现低压区, 低压区域的压力低于饱和蒸汽压 p_v , 预测有空化发生。图 3 为对称面速度分布云图。从图可看出, 在阀座与阀底部区出现高流速区域, 对比图可得这些区域均是低压区, 这符合伯努力方程。

图 4、5 为对称面与阀座横截面上气体体积分分布云图。从图 4 可得, 空化发生在阀座与阀底部流道转弯处, 这些区域对应图 4 中低压区。由图 5 得, 阀座有一定程度的空化发生。说明该空化模型可有效预测阀内部空化流动发生区域及发展情况。

3.2 不同开度下阀内空化模拟分析

为了研究空化随开度变化而变化的规律, 模拟了开度 1.08、2.7、5.4、8.1、13.5 mm 时的空化流场, 结果如图 6 所示。

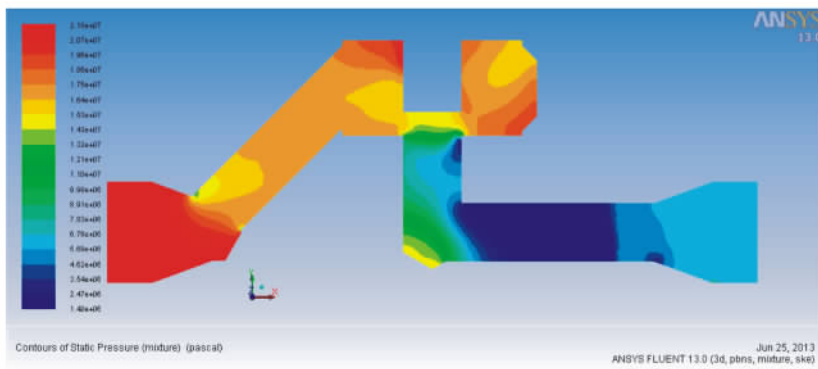


图 2 流场的压力分布
Fig. 2 Pressure contours of flow field

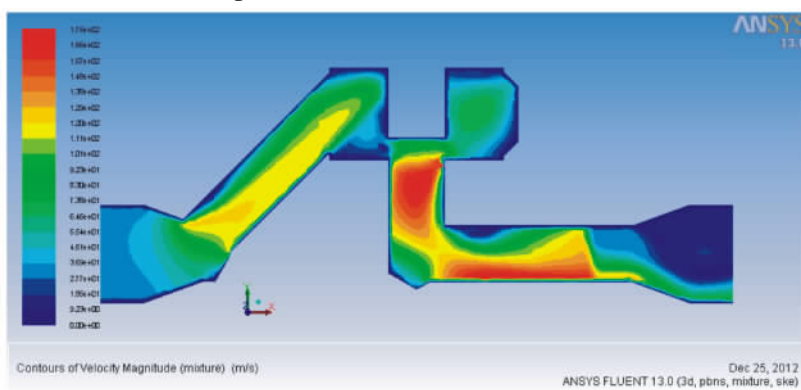


图 3 流场的速度分布
Fig. 3 Velocity contours of flow field

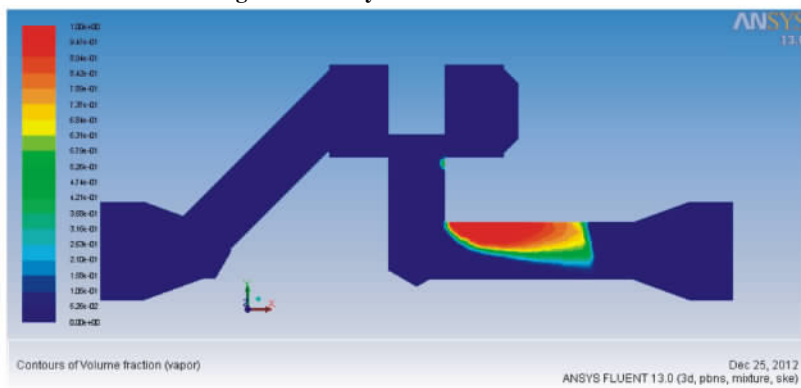


图 4 气体体积分数分布
Fig. 4 Vapor fraction of flow field

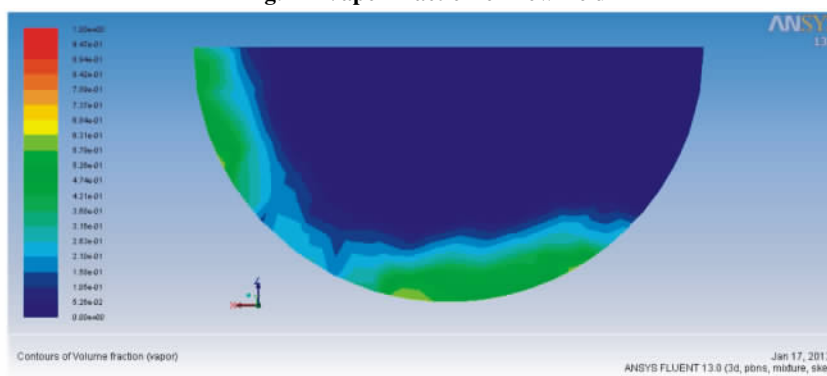


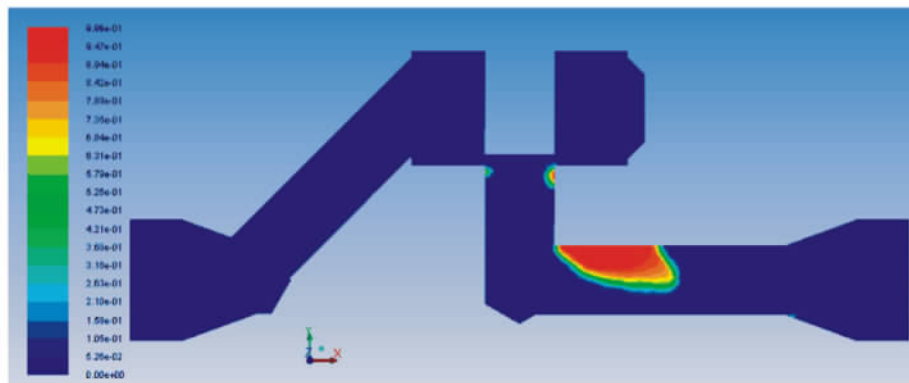
图 5 阀座横截面上气体体积分数分布
Fig. 5 Vapor fraction of valve seat cross section



(a) 1.08 mm



(b) 2.7 mm



(c) 5.4 mm



(d) 8.1 mm

图 6 不同开高对称面气体体积分数云图
 Fig. 6 Vapor fraction of different openings

从图 6 可以看出,在开高 1.08 mm 时阀内没有发生空化,开高 2.7 mm 时在阀座位置处出现空化现象,如图 6(a)、图 6(b);随着开度的增加,在开高 5.4 mm 时,阀底部流道中形成了大量空化流动,尤其是在上壁面处,气体体积分数达到 0.99,如图 6(c)。随着开度继续增大,空化流继续发展,如图 6(d) 与图 4 所示。

3.3 不同进口压力对空化的影响

为了研究进口压力 P_1 对空化流的影响,分别模拟了进口压力为 22、21、18、17、16 MPa 时的流场,开度为 13.5 mm,其他参数不变。

图 7 为气体体积分数与进口压力的关系图,从图可知随着进口压力的增大,气体体积分数增大。这是因为进口压力增大,阀的输送压差增大,使得阀内部更易发生空化。

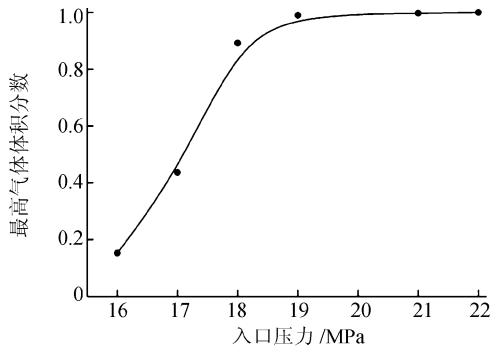


图 7 入口压力与最高气体体积分数的关系

Fig.7 Curve of inlet pressure and volume fraction

为了更加清晰地对比不同压力进口对空化流动主要区域的影响,从 FLUENT 软件内读取阀底部近壁面处气体体积分数数据,绘制随着 X 方向坐标变化气体体积分数变化曲线如图 8 所示。

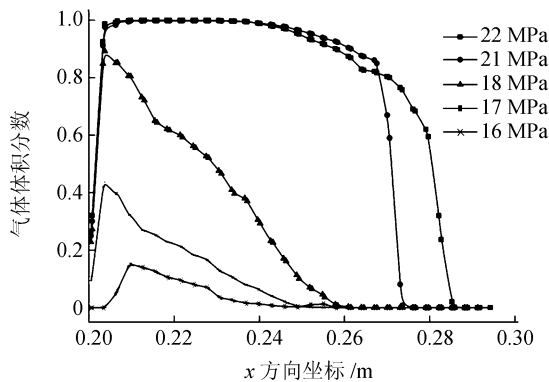


图 8 阀底部近壁面处体积分数的分布

Fig.8 Volume fraction of Valve bottom near wall

从图 8 可知,阀前后压差较大时,阀底部拐弯区域近壁面处空化严重,甚至已完全空化;随着入口压力的降低,压差降低,近壁面处气体体积分数降低,表明空化减弱;在进口压力 22 MPa 时,该空化区域在 X 坐标为 0.285 m 处才明显减弱,进口压力 21

MPa 时,在 $X = 0.277$ m 处明显减弱,进口压力 16 MPa 时,在 $X = 0.24$ m 处已明显减弱,表明了进口压力越大,近壁面处空化延续越长。

3.4 不同密封面角度对空化的影响

为了研究阀芯与阀座密封面角度(如图 9 中角度 a)对空化流的影响,模拟了密封面角度为 15°、30°、45°、60°时的流场,其他参数不变,结果如图 10 所示。

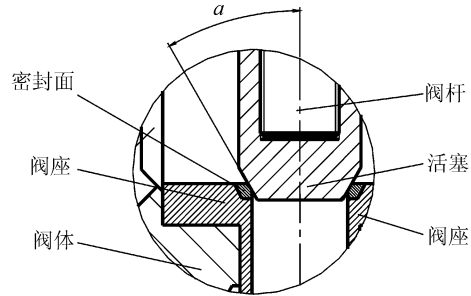


图 9 阀座密封面角度示意图

Fig.9 Angle of sealing face

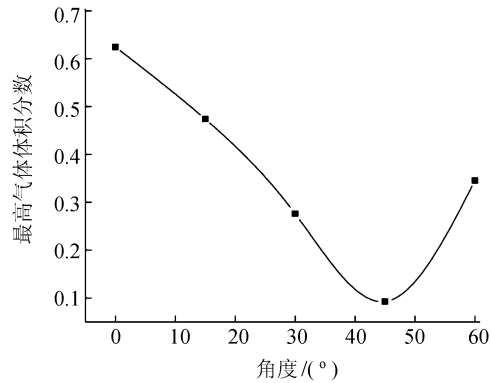


图 10 密封面角度与截面最大体积分数曲线

Fig.10 Curve of sealing face angle and seat cross section maximum volume fraction

从图 10 与 11 可知,改变阀芯与阀座密封面角度,阀座处空化发生程度产生了一定影响。从图 10 可知,角度 45° 时,最大体积分数值最低。从图 11 可知,角度 30° 比角度 15° 空化强度降低,且空化发生区域减少;角度 60° 时比 15°、30° 空化强度低但略高于 45°;在密封面角度为 45° 时,阀座处空化强度最低,区域最少。因此,从防空化的角度考虑,阀芯与阀座密封面角度应选择 45°。

4 防空化研究

空化作用对阀内部流动影响很大,引起阀及管路的高噪声与强振动,且破坏作用极强,仅从压差、材料方面解决问题是不够的,难以满足目前日益发展的要求,需进一步的研究。应从高压差阀门的结构上考虑抑制空化作用,此外,还应考虑易于更换的要求。因此,从结构上寻求空化问题解决方法,才是避免空化作用最根本的、最重要的出路。

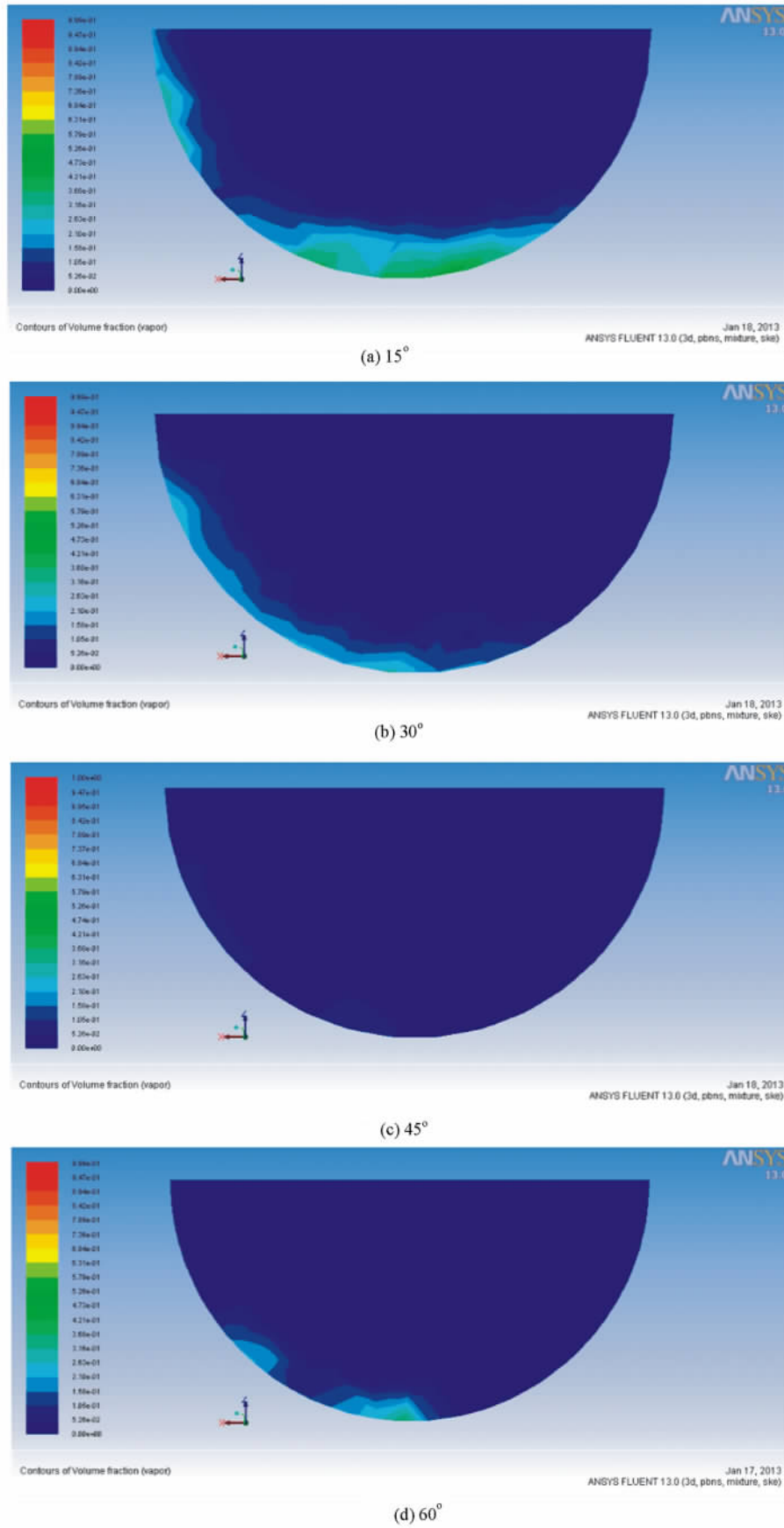


图 11 不同阀座密封面角度横截面上气体体积分数云图
Fig. 11 Vapor fraction of different sealing face angles

采用多级节流原理防止空化的发生,其特点是在多级套筒壁面上开许多小孔,介质从高压入口通过多个节流截面,压降被分摊到一连串的流通口上,也就是流体每过一个节流面遇到流动阻力分担一部分压差,逐级降压至出口压力,各级压差均不超过临界压差,降压后压力均高于饱和蒸汽压 P_v ,就可以实现阀内部不发生空化,从而可以保护套筒及密封面不被破坏,保证阀的密封性能。

由前面分析可知,阀在无多级节流内件的时候,空化主要发生在阀座与阀底部转弯处,利用多级降压原理及上述理论分析,设计一三级套筒加入疏水阀内部,并在阀底部转弯处加一均流罩,通过套筒与均流罩,将阀前一次高压降分散为 4 个小的压降。并使每一级的压力均大于饱和蒸汽压,进而起到抑

制空化发生的作用。建立 3 维几何模型如图 12 所示。取饱和蒸汽压 $P_v = 3.52 \text{ MPa}$,其余边界条件保持不变,对该几何模型进行数值分析。

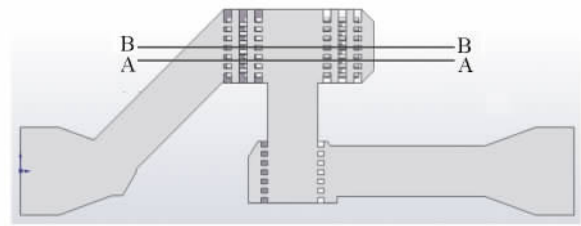


图 12 多级套筒与均流罩疏水阀 3 维模型
Fig. 12 3-D model of trap including multistage sleeve

由图 13 得出疏水阀内部的压力分布,从对称面与 A-A、B-B 截面的压力分布绘制了多级降压曲线,加入套筒与均流罩后,阀整体的压降分成 4 级压降,且每级的压降均大于饱和蒸汽压。

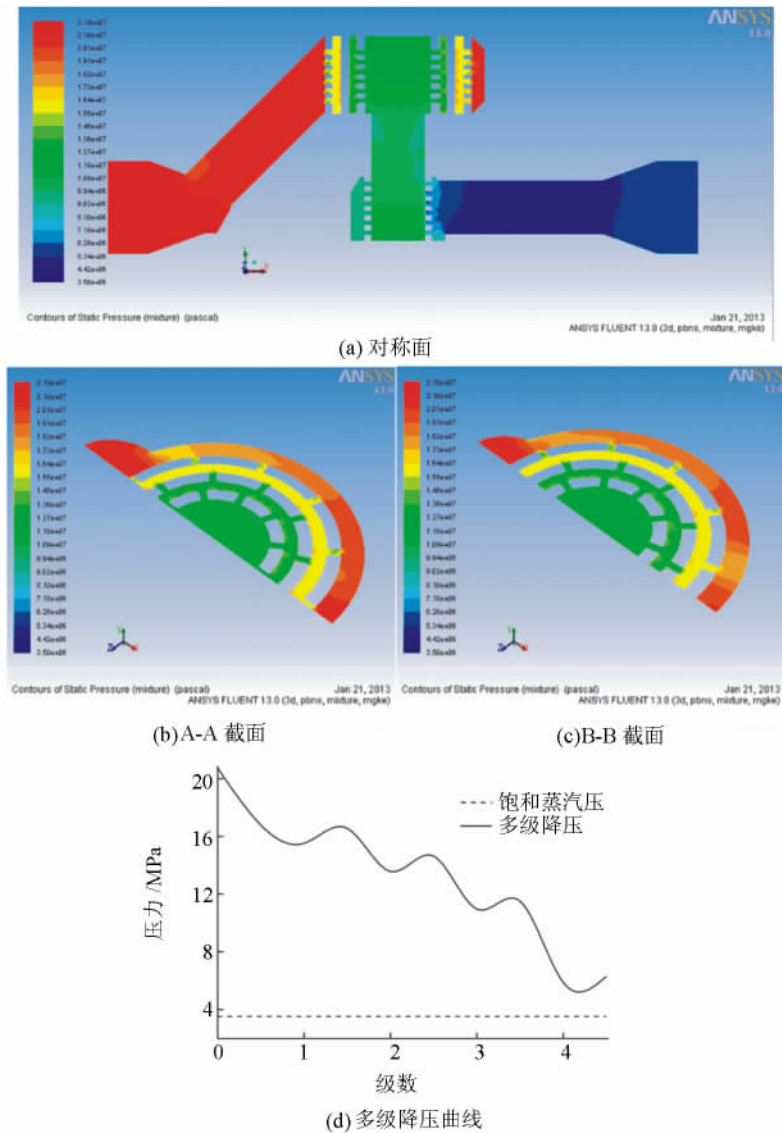


图 13 多级降压套筒疏水阀压力图
Fig. 13 Pressure diagrams of multistage sleeve trap

图 14 为疏水阀内部的速度分布图,对比图 4 可以得知,最大流速由 175 m/s 降低到了 129 m/s,因此加入套筒与均流罩,有利于阀内最大流速的降低;疏水阀内部整体流速有了明显的降低;阀座处流速

由 105 m/s 降低到 55 m/s,极大地降低了此处的流速,减少了阀座处介质的冲刷,降低了由于介质冲刷所引起的密封面破坏,有利于良好密封性能的保持。

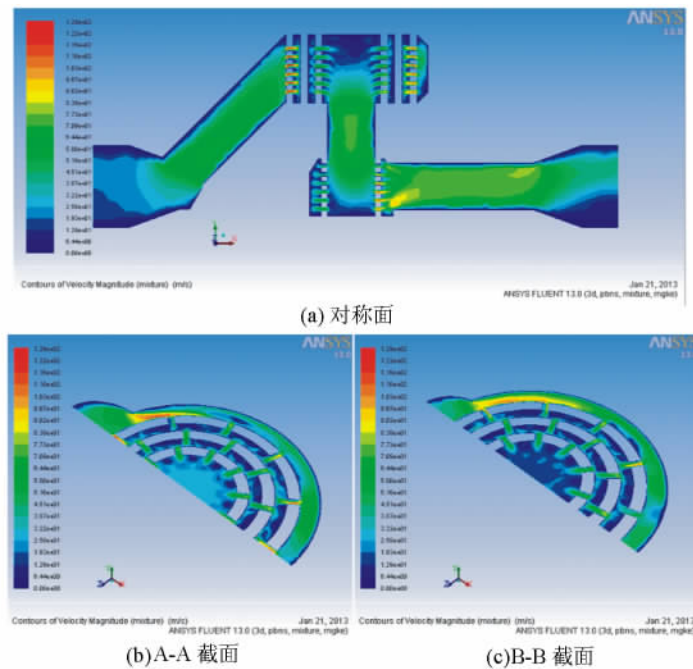


图 14 多级降压套筒疏水阀速度分布
Fig. 14 Velocity diagrams of multistage sleeve trap

图 15 为疏水阀内部的气体体积分数分布图,对比图 5、6 可知,加入套筒与均流罩后,明显起到了抑制空化的作用;由于加入套筒与均流罩后采用饱和蒸汽压为 3.52 MPa,从图 15 可知,阀内几乎没有发

生空化,只有小部分区域由于结构突变等原因出现空化,可以预测,在饱和蒸汽压为 1.5 MPa 时,其他边界条件不变,阀内无空化发生,所以该套筒与均流罩的设计与使用,基本满足了防空化的作用。

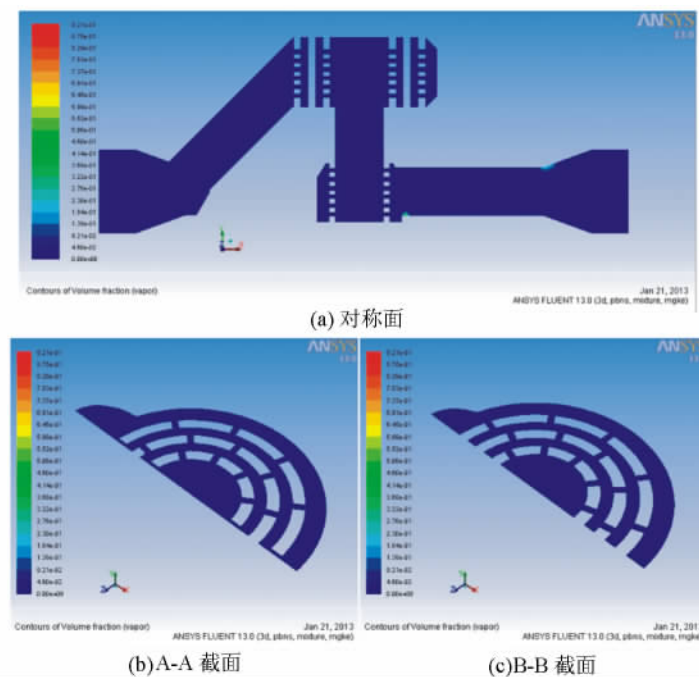


图 15 多级降压套筒疏水阀气体体积分数分布
Fig. 15 Vapor fraction diagrams of multistage sleeve trap

5 结 论

探讨了超(超)临界蒸汽疏水阀内部空化流动的发生区域和空化发展情况;并分析研究了不同开度、不同入口压力与不同密封面角度对阀内空化流动的影响。同时加入多级套筒及均流罩,进行了防空化研究。具体结论如下:

1) 空化发生的区域与压力分布中的低压区相对应,表明该空化模型可有效预测超(超)临界蒸汽疏水阀内部空化流动的发生区域和空化发展情况。

2) 随着开度的增加,空化先出现在阀座处,然后慢慢发展,在阀底部流道中形成了大量空化流动。

3) 随着进口压力的增大,最高气体体积分数增大;空化程度越大,区域越大,延续越长。

4) 阀芯与阀座密封面角度为 45° 时,最大体积分数值最低,空化强度最低,区域最少。因此,从防空化的角度考虑,阀芯与阀座密封面角度应选择 45° 。

5) 在超(超)临界蒸汽疏水阀内部加入三级套筒与均流罩,可有效抑制阀内部空化的发生与发展,为高压差类阀门的防空化及消声减振设计提供了一定的依据。

参考文献:

- [1] Li Shuxun, Hu Jianhua, Li Liancui, et al. Stress analysis of ultra-supercritical and electrical three-way valve body intensity in a high pressure heater using FEM[J]. *Advanced Materials Research* 2013 605: 784 - 787.
- [2] Qiu Chun, Diao Mingjun, Xu Lanlan. 3-D numerical simulation of hydraulic characteristics during the opening process of radial gate for overflow weir[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition* 2012 44(3): 19 - 25. [邱春,刁明军,徐兰兰.溢流堰表孔弧形闸门开启过程水力特性3维数值模拟[J].*四川大学学报:工程科学版* 2012 44(3): 19 - 25.]
- [3] Zhang Lefu, Zhang Liang, Zhang Liang, et al. 3D cavitation turbulent flow simulation of francis turbine[J]. *Journal Hydroelectric Engineering* 2008 27(1): 135 - 138. [张乐福,张亮,张梁,等.混流式水轮机的三维空化湍流计算[J].*水力发电学报* 2008 27(1): 135 - 138.]
- [4] Yang Zhengjun, Wang Fujun, Liu Zhuqing, et al. Prediction of cavitation performance of axial-flow pump based on CFD[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* 2011 29(1): 11 - 15. [杨正军,王福军,刘竹青,等.基于CFD的轴流泵空化特性预测[J].*排灌机械工程学报* 2011 29(1): 11 - 15.]
- [5] Wang yong, Liu Houli, Yuan Shouqi, et al. CFD simulation

on cavitation characteristics in centrifugal pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* 2011 29(2): 99 - 103. [王勇,刘厚林,袁寿其,等.基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.]

- [6] Zhuang Baotang, Luo Xianwu, Wang Xin, et al. Numerical simulations of cavitating flow in the inducer and primary impeller of a multi-stage vertical barrel pump[J]. *Journal Tsinghua University: Science and Technology* 2011 51(2): 267 - 271. [庄保堂,罗先武,王鑫,等.立式多级筒袋泵诱导轮及首级叶轮内的空化流动模拟[J].*清华大学学报:自然科学版* 2011 51(2): 267 - 271.]
- [7] Xia Dongsheng, Zhang Huichen, Yu Yan. 3D numerical simulation of cooling-water cavitation flow of cylinder liner for diesel engine[J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2011, 47(22): 167 - 173. [夏冬生,张会臣,于彦.柴油机气缸套冷却水空化流的三维数值模拟[J].*机械工程学报*, 2011 47(22): 167 - 173.]
- [8] Yin Bixing, Kang Can. Numerical and experimental study of cavitating flows around hydrofoils[J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2012 48(16): 146 - 151. [尹必行,康灿.绕水翼空化流场的数值模拟与试验研究[J].*机械工程学报* 2012 48(16): 146 - 151.]
- [9] Zwart P, Gerber A G, Belamri T. A two-phase model for predicting cavitation dynamics[C]//*Proceedings of ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow*. Yokohama, Japan 2004: 1 - 11.
- [10] Guillermo Palau-Salvador, Pablo González-Altozano, Jaime Arvizu-Valverde. Three-dimensional modeling and geometrical influence on the hydraulic performance of a control valve[J]. *Journal of Fluids Engineering* 2008 130(1): 1 - 8.
- [11] Sumio S, Masahiro, Hideo F. Computational cavitation flows at inception and light stages on an axial-flow pump blade and in a cage-guided control valve[J]. *Journal of Thermal Science* 2007 16(4): 337 - 345.
- [12] Li Shuxun, Zhao Ziqin, Zhang Yunlong. Noise elimination and vibration reduction for a superheat steam trap with high temperature and high pressure[J]. *Journal of Vibration and Shock* 2011 30(10): 116 - 121. [李树勋,赵子琴,张云龙.高温高压过热蒸汽疏水阀消声减振研究[J].*振动与冲击* 2011 30(10): 116 - 121.]
- [13] Li Shuxun, Xu Dengwei, Li Que, et al. Design and numerical simulation of inverted bucket pilot-operated steam traps[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* 2012 30(3): 347 - 350. [李树勋,徐登伟,李确,等.倒吊桶先导式蒸汽疏水阀的设计与数值模拟[J].*排灌机械工程学报*, 2012 30(3): 347 - 350.]

(编辑 黄小川)