

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.02.020

基于动网格模拟的PVC球阀水流瞬态流动特性分析

弋鹏飞^{1,2}, 马爽文¹, 张建鹏^{1,2}, 李永发³, 任磊⁴

(1. 伊犁师范大学 物理科学与技术学院, 新疆 伊宁 835000; 2. 伊犁师范大学 伊犁学研究中心, 新疆 伊宁 835000;
3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 黄河水利委员会 信息中心, 河南 郑州 450003.)

摘要: 为了探讨PVC球阀瞬态流动特性,对DN50球阀进行试验和数值模拟,动网格模拟得到试验有效验证。结果表明,PVC球阀局部阻力系数与相对开度呈幂函数单调递减,流量系数与相对开度呈幂函数单调递增的关系,开度50%~60%是关系曲线变化拐点。当关闭到80%开度以下,阀芯内部和阀后流场产生漩涡和回流现象,阀芯入口和出口处形成高速区域,流动方向变化引起阀后流体质点分离和掺混,涡量和湍动能随开度减小而增大,50%开度以下产生较大局部阻力损失和阀后局部负压。拟合了阀前压力与关闭时间的表达式,两者呈e指数函数关系,为防止关闭引起水锤,建议关闭时间 $t \geq 4$ s。

关键词: 动网格;PVC球阀;相对开度;局部阻力系数;漩涡

中图分类号: TV93;S277.9

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)02—0130—06

Transient Flow Characteristics Analysis of PVC Ball Valve Based on Dynamic Mesh

YI Pengfei^{1,2}, MA Shiwen¹, ZHANG Jianpeng^{1,2}, LI Yongfa³, REN Lei⁴

(1. College of Physics Science and Technology, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China;

2. Yili Research Center, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

4. Information Center of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: In order to analyze transient flow characteristics of PVC ball in the irrigation, the test and numerical simulation of PVC DN50 ball were carried out, the dynamic mesh simulation was also validated by experiments. The result show that the power function model was adopted to related the flow coefficient and local resistance coefficient with the opening of the ball valve, the first curve was monotonically increasing, and the second curve was monotonically decreasing, the opening of 50% ~ 60% is the inflection point of the curves, the relationship could be used to predict the flow characteristics in closing of PVC ball valve. When closed 80% opening of ball value, the phenomenon of whirlpool forms and back flow were happened in valve flow field, a highspeed region was formed at the inlet and outlet of the valve core, and the change of flow direction leads to the separation and mixing of fluid particles behind the valve. The vorticity and turbulent kinetic energy turned more with decreasing of the opening, the greater resistance loss and negative pressure formation behind the valve below 50% opening. The e exponential function was fitted between the valve pressure and closing time, in order to prevent water hammer caused by closing valve, it is suggested that closing PVC ball valve time at least more than four seconds.

Keywords: dynamic mesh; PVC ball valve; opening of valve; local resistance coefficient; whirlpool forms

收稿日期:2021-11-11

修稿日期:2021-12-09

基金项目:伊犁师范大学博士科研启动项目(2019YSBS008);伊犁学研究中心开放课题(2021YLXZD03);新疆自然科学基金(2016D01C379)

作者简介:弋鹏飞(1984—),男,讲师,博士,主要从事节水灌溉技术及工程水力学研究工作。E-mail:yipengfei123@126.com

通讯作者:马爽文(1985—),男,讲师,主要从事功率超声研究工作。E-mail:295006121@qq.com

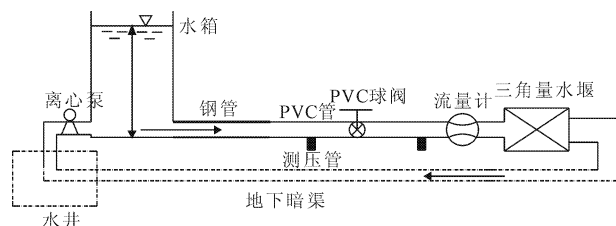
PVC材料制成的灌溉球阀在农业节水灌溉工程中是一种常见的流量控制装置,在输水过程中,球阀全开时阀体通道过流良好,水流阻力损失小。针对不同结构阀门的流动规律研究很多。刘晔等^[1]采用FLUENT软件对球阀进行流场模拟,当球阀开度为 20° 时,球阀内部有回流和漩涡现象,流道垂直截面上形成大小相等、方向相反的一对漩涡。石喜等^[2]采用试验和数值模拟方法,明确了聚氯乙烯球阀稳态流动时的局部阻力系数和相对开度的关系,并建立了两者之间的数学表达式。曹彪等^[3]利用试验和数值模拟技术对田间电磁阀的水流阻力特性和流动规律进行了研究,分析了该类型阀体产生阻力损失的原因,拟合得出电磁阀阀腔局部阻力系数与管径的关系式。Moujaes等^[4]模拟雷诺数 $10^5 \sim 10^6$ 之间流动条件下,球阀在不同开启程度下压降差的变化,计算了局部阻力系数与流量系数这两个表征阀门特性的参数,并和有关规范数据进行对比,模拟结果与试验一致。Chern等^[5]采用数值模拟方法和试验对不同锥角的V型球阀进行研究,分析在不同角度下流动特性和空化特性,测量了流量系数等参数。以上学者所作的均是阀门稳态流动的研究^[6],均未讨论阀门瞬间关闭对管道压强变化的影响。刘华坪等^[7]采用动网格模拟和UDF技术,对球阀等常见阀门进行了瞬态数值模拟,模拟可以展示出阀门启闭流动状态和受力情况。石柯^[8]对球阀的开启瞬态流动阻力特性进行了试验和数值模拟,表明随着开启速度的增加,流量系数和阻力系数都有一定范围的变化,通过数值模拟和试验进行对比,证明利用CFD技术对球阀开启过程的稳态及瞬态特性进行数值模拟,预测流动过程是可行的。综上所述,采用数值模拟方法对阀门等连接管件进行研究具有较好的研究基础和可行性^[9-10]。

在实际应用过程中,为了调节不同的流量,球阀会瞬时关闭局部或全部,压力和流速急剧变化导致了流动的能量损失,而且产生剧烈的水锤现象,引起阀门和管道的振动,严重时甚至导致管道和阀门的损坏,对球阀瞬态水流流动进行分析研究显得尤为必要。目前对灌溉PVC材质球阀关闭过程的瞬态流动特性研究较少,PVC球阀的结构与固定式球阀不同,据观察它不含阀体间隙,无间隙对内部流场就没有影响,对其研究可以进行合理的简化^[11]。本文通过PVC球阀水流流动试验,运用FLUENT软件动网格技术对球阀关闭过程进行瞬态流动数值模拟,分析关闭过程球阀的流速、流线、压强、涡量、湍动能

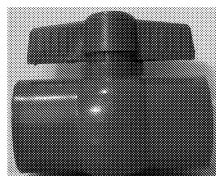
特征,为灌溉系统的PVC球阀结构优化及流动特性预测提供参考。

1 PVC球阀内部水流流动特性试验

试验地点:河海大学水利水电学院一楼水力发电实验室。试验装置:含有地下水井、卧式离心泵、恒压水箱、测压管、钢管、PVC管材、PVC材质DN50球阀、三角量水堰、智能流量计。试验系统布置见图1。



(a) 试验布置图



(b) PVC球阀实物

图1 DN50球阀流动特性试验布置

试验目的:测定DN50球阀不同开度时的局部阻力系数和流量系数。

测试物理量:管道流量、测压管水位。

试验方法:启动水泵,调节高位水箱达到预设水位,试验水位可调范围 $2\text{ m} \sim 6\text{ m}$,流速 $0.5\text{ m/s} \sim 4.0\text{ m/s}$ 。流动稳定后,调节球阀从全开到关闭。球阀的相对开度是指阀芯随阀杆逐渐开启或关闭时,阀杆的行程或转角与全开阀杆行程或转角之比,全开时 $\tau = 100\%$,全关时 $\tau = 0\%$ 。分别调节球阀到开度 93% 、 85% 、 70% 、 62% 、 54% 、 45% 、 37% ,等水流稳定后,测量球阀前端 $12d$ 与后端 $18d$ (d 为管道直径)设置点的测压管水位值,选取这两个距离位置作为测点,是为了减少球阀水流对上下游边界的影响以及减小球阀出水口回流的影响。量取三角堰的水位,换算成流量,并验证流量计读数。计算局部阻力损失系数及流量系数,每个开度测量3次数据,取平均值,再次进行球阀关闭到全开,复测局部阻力系数及流量系数,以验证所测数据的准确性。

2 数值模拟计算方法

2.1 数学模型

球阀内部流动属于不可压缩的三维黏性流动,

在小开度工况时,内部流态为湍流流动,流动规律用 Navier – Stokes 方程、质量守恒、能量守恒方程描述。流场流速和压强等物理量采用流体动力学 FLUENT 软件进行求解,求解控制方程利用 Relizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,该模型在射流和混合流的自由流动、管道内流动、边界层流动以及带有分离的流动方面具有优势,计算可与真实湍流情形吻合较好^[12]。因此本文采用 Relizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对球阀关闭过程的内部瞬态流动进行模拟,控制方程见文献[13]。

2.2 动网格模拟方法

PVC 球阀 DN50 模型在 Gambit 中建立,该球阀属于缩径球阀,模型参数设置:阀芯球体通道直径 40 mm,两端管道直径 50 mm,对模型划分网格及阀芯设置交界面、运动区域和静止区域,速度入口和自由出流。模型取阀前 12*d* 和阀后 18*d* (*d* 为管道直径),与试验测点位置相同,由于球阀内部流场较为复杂,阀门局部区域采用非结构性网格加密,两端管道采用结构性网格划分。

如图 2 所示,球阀在 0.305 rad/s 的角速度下,运动时间在 2 s 时刻的模型为例,阀芯球面 *A*₁ 和 *A*₂ 及 *B*₁ 和 *B*₂ 作为两对滑移网格交界面,将中间的阀芯作为运动区域,网格类型设为动网格,设置为刚体模型。阀芯两边管道设为静区域,网格类型设为静态。球阀关闭即为当阀芯转到一定角度时,阀芯球面 *A*₁ 和 *A*₂ 完全脱离,*B*₁ 和 *B*₂ 完全脱离,出现这种情形时即为模拟球阀完全关闭时的情况,开启即是阀芯完全与两端管道相连通。

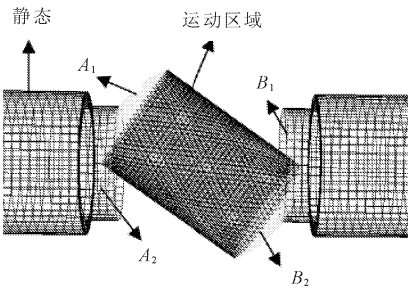


图 2 DN50 球阀动网格模型(相对开度 50%)

在计算过程中,采用 Profile 文件写入代码,阀芯为匀速运动,转动速度为 0.305 rad/s、0.610 rad/s、1.220 rad/s,模拟关闭时间 4 s、2 s、1 s。

球阀在运动过程中,压力、速度和水流现象都随着时间而进行变化,因此选择非定常求解方法,迭代计算设置时间步长 0.01 s,时间步数 = 关阀时间/时间步长,每次最大迭代步数为 20 步。

边界条件:为了提高计算的速度和稳定性,先进进行球阀全开时的稳定流动计算,待流动稳定后将其收敛解作为瞬态计算的初始值。设置速度入口 3 m/s,雷诺数 1.5×10^5 ,出口为自由出流,其他边界条件见表 1。模拟前进行网格无关性验证, DN50 球阀网格数在 35.5×10^4 个时,再增加网格数对其模拟值影响很小,即认为该模型网格数可保证计算结果的精度。

表 1 边界条件设置

湍流强度 /%	湍流黏度比	近壁区	壁面粗糙度/mm	水力直径/m	球体通孔/m
5	10	标准壁面函数	0.03	0.05	0.04

3 结果与分析

3.1 PVC 球阀局部阻力系数及流量系数计算

局部阻力系数和流量系数是表征球阀流动特性的两个重要参数指标。球阀流量系数计算公式^[14]:

$$K_v = 10 \times Q \times \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p_v \times \rho_0}} \tag{1}$$

式中:*Q* 为测得水的流量, m³/h; Δp_v 为阀门的净差压, kPa; ρ 为水的密度, kg/m³; ρ_0 为 15℃ 时水的密度, kg/m³; 在常温的时候, $\rho/\rho_0 = 1$ 。

球阀局部阻力系数公式^[15]:

$$\zeta = \frac{2\Delta p_v}{\rho u^2} \tag{2}$$

式中:*u* 为管道平均流速, m/s。

根据文献[2]所述, $Re \geq 1.1 \times 10^5$ 后, DN50 球阀局部阻力系数已经进入类似沿程阻力系数的阻力平方区,数值趋于稳定,试验调节管道流速 3 m/s,雷诺数为 1.5×10^5 ,根据计算公式得到球阀不同开度下的流量系数、局部阻力系数,并与 FLUENT 模拟结果相对比,采用幂函数进行拟合,表达式如下:

流量系数与相对开度:

$$K_v = 67.42\tau^{2.318} + 2.014, \quad R^2 = 0.9985 \tag{3}$$

局部阻力系数与相对开度:

$$\zeta = 5.145\tau^{-3.119} - 4.442, \quad R^2 = 0.9999 \tag{4}$$

从表达式的可决系数看,表明建立的公式是可信的,说明采用湍流模型是正确的。根据图 3 分析, DN50 型球阀的流量系数与相对开度呈单调递增,局部阻力系数与相对开度呈单调递减的关系, 50% ~ 60% 开度是流量系数曲线与局部阻力系数曲线变化的拐点,实测值与模拟值较为接近,变化规律一致,符合球阀具有等百分比流量调节特性理论^[16],

流量系数和局部阻力系数公式可预测 PVC 球阀的流量变化及流动阻力特性。

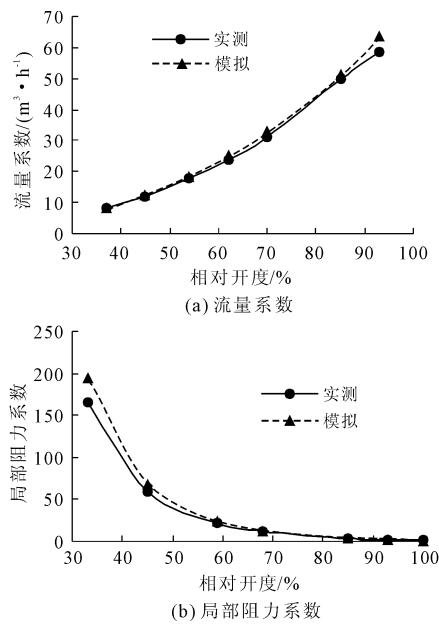


图 3 DN50 球阀流量系数、局部阻力系数模拟与试验结果

3.2 PVC 球阀瞬态关闭流速及流线变化

在实际农田灌溉工程中,一般采用泵装置对管道稳压供水,流量为恒定流量,PVC 球阀在灌溉管网中起到了调节流量大小的作用。对管道流速 3 m/s ,DN50 球阀以转速 0.305 rad/s 、 0.610 rad/s 、 1.220 rad/s 匀速顺时针关闭,对应关闭时间 4 s 、 2 s 、 1 s 的工况进行模拟。其中 4 s 关阀工况中不同时刻流场如图 4 所示。

在初始 100% 全开时候,球阀及前后管道流线平顺,流速分布均匀,高速区充满整个阀芯断面。由于阀芯直径小于管道直径,在阀芯后面管道出现流速梯度,中部速度大,两边管壁速度小^[17]。阀门随着关闭时间增大开度逐渐减小,在 0.8 s 、 1.6 s 、 2.8 s 时刻,球阀开度 80% 、 60% 、 30% 时,阀后管道都形成了漩涡和回流现象,从阀芯进口流入的水流在阀门关闭过程发生偏转,部分水流折回阀内,正截面处形成了两个对称的漩涡(见图 5),漩涡随开度减小逐渐不对称,一个漩涡面积增大,另外一个被挤压到边壁。阀门关闭到 30% 时,漩涡和回流现象非常明显,范围向阀后管壁扩大,近乎布满整个管道,高速区断面减小,在阀芯出口处由中部向管道边壁转移,流动方向发生改变,阀门在关闭过程中入口及出口产生射流现象,其中入口冲蚀最为激烈,在关闭 $2.8 \text{ s}/30\%$ 时刻,最大流速为 57.247 m/s ,是入口速度的 19.08 倍。

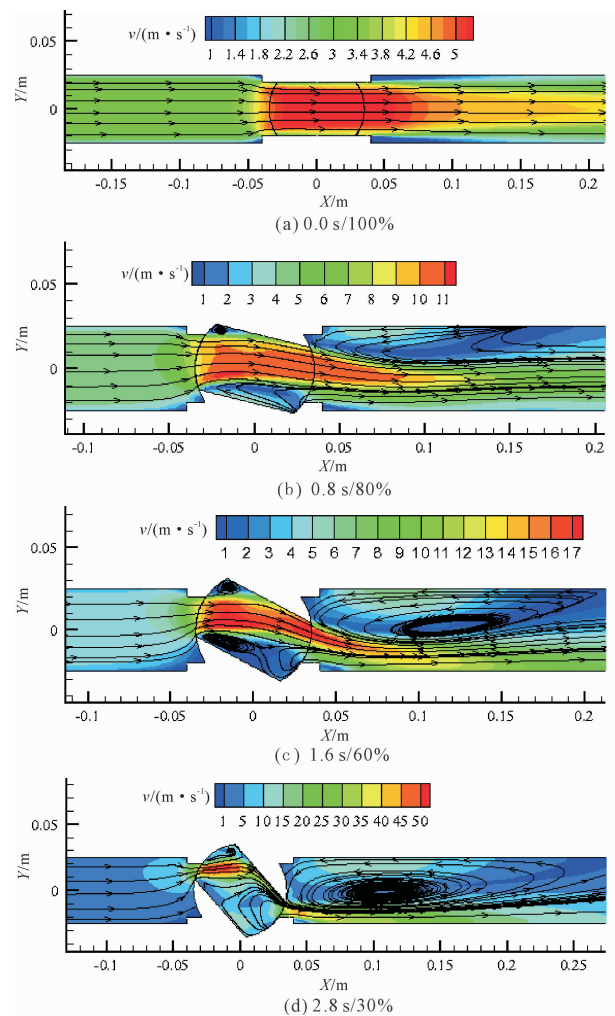


图 4 球阀关闭过程流速分布及流线

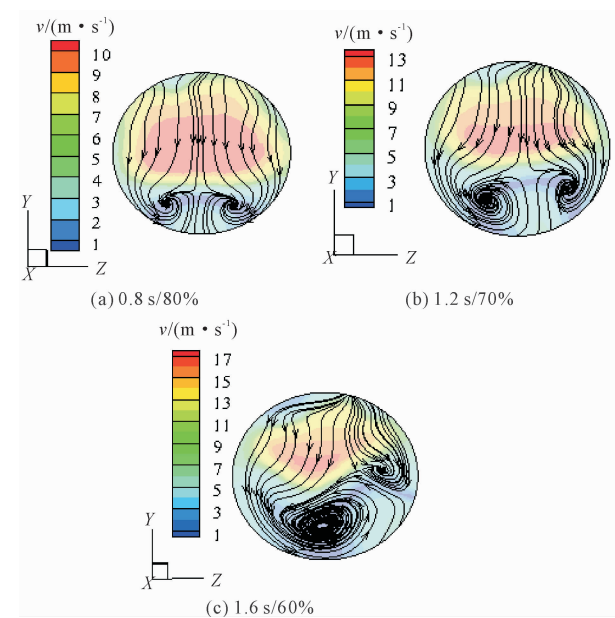


图 5 不同时刻阀芯 ZOY 截面速度流线图

涡量是反映剪切及旋转的综合参数,统计了球

阀在关闭的不同时刻的 $X-Y$ 截面涡量平均值,随着关阀时间进程,阀门开度逐渐减小,在阀芯入口和出口流速也相对加大,涡量呈增大的趋势,在 80%、60%、30% 相对开度下,涡量平均值分别为 107.005 s^{-1} 、 141.113 s^{-1} 、 268.298 s^{-1} ,如图 6 所示涡量的最大值发生在阀芯内及进口和出口附近。关阀至小开度时,球阀内部和阀后管道水流产生漩涡和回流,流体质点进行了掺混和分离,而且湍流强度加剧,在回流区消耗了大量的机械能^[18],也是球阀产生较大局部水头损失、局部阻力系数增大的主要原因。

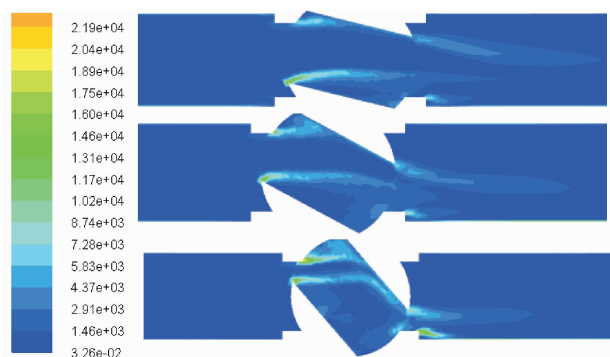


图 6 不同开度阀芯涡量云图
(从上到下依次 80%、60%、30%)

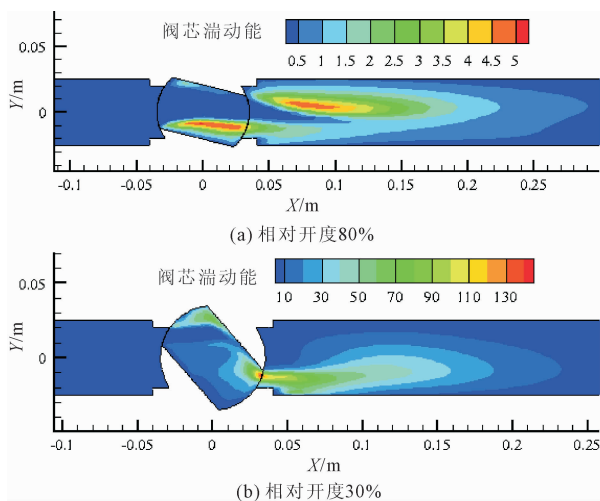


图 7 不同开度阀芯湍动能云图

3.3 PVC 球阀瞬态关闭压力变化

从图 8 中可以看出在压力云图中,阀门全局压力随着关阀发生变化,全开时候,压力在阀芯入口处存在压力梯度,但压力梯度较小,由于阀芯孔径小于管道口径,阀芯流速较大于两边管道的速度,呈现文丘里效应,根据伯努利原理,缩径处动能增大,压能将减小,则阀芯的压强小于阀前后管道压强。水流流出阀芯后,阀后管道压强逐渐恢复,但总体小于阀

前管道压强。在小开度工况时,流动方向发生偏转,阀后流体质点的掺混和分离运动引起涡量、湍动能加剧,形成负压。由于阀后流量逐渐减小,管道压强梯度随开度减小而逐渐增大,阀后管道负压程度增强(见图 8)。

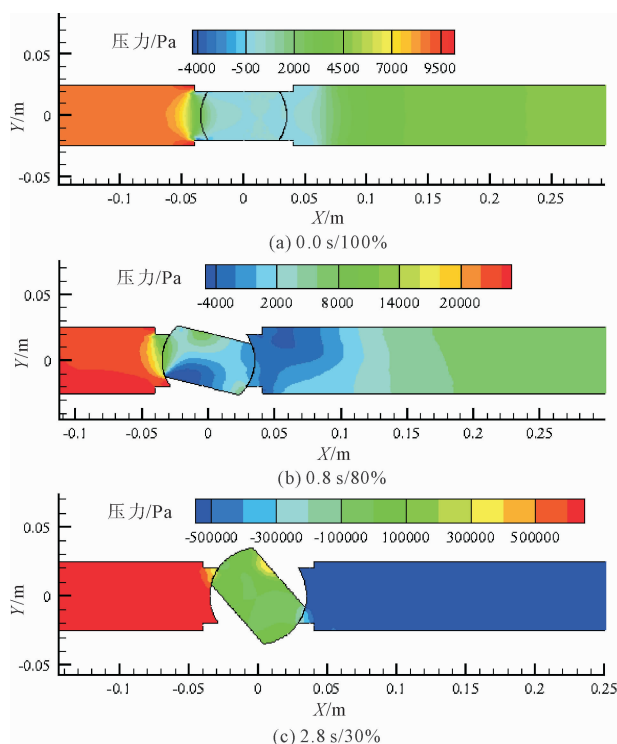


图 8 不同时刻管道压力分布云图

随着关阀的进行,阀前压强逐渐增大,阀芯进口和出口压强梯度增大,阀后出口仍然是负压状态,负压的趋势增强。如图 9 所示,在关阀 2.8 s,开度 30% 时候,阀门关闭时,流体集中在阀前,发生压力集聚现象,在阀前形成明显的高压区,平均压强值 500 kPa 是全开时相同位置处压强的 50 倍,可见瞬时关阀引起管道压力剧增。阀后由于水流形成的漩涡和回流,引起的质点分离程度加大,负压区域扩展到阀后管道 250 mm 处。总之随着阀门关闭,开度逐渐减小,引起的压强梯度逐渐增大,产生的局部阻力损失也随之增加,这也是球阀在小开度工况时局部阻力系数猛增的原因。

图 10 为关阀过程中,统计了从全开关闭到 30% 开度过程,距离阀芯中心上游管道 50 mm 截面处平均压力随关阀时间而产生的变化,可以看出阀前压力随着阀门的关闭逐渐升高,关阀时间越短,增幅越快,1 s、2 s、4 s 关阀压力增幅分别为 785.82 kPa/s、463.95 kPa/s、234.87 kPa/s,拟合了阀前压力与关阀时间的函数关系式,可以发现压力升高与

关闭时间呈 e 指数的函数关系,关系式可预测一定关闭时间内引起的阀前压力变化。1 s 和 2 s 关闭引起压力增速过快,将引起爆管危险,建议延长关闭时间,以减小阀前压力急剧升高而产生水锤现象,本文建议在匀速关闭方式下,关闭时间 $t \geq 4$ s。

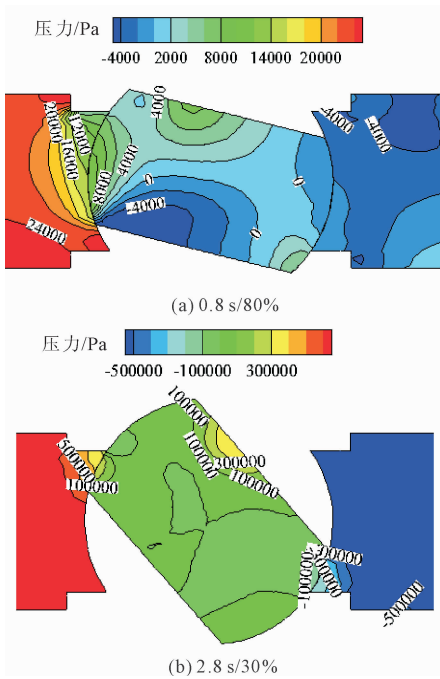


图 9 不同时刻阀芯压力分布

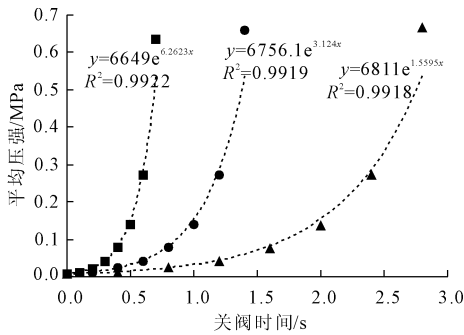


图 10 阀前压力随时间变化曲线

4 结 论

为了探讨 PVC 球阀瞬时关闭的流动特性,本文对不含阀体间隙的 PVC 球阀进行流动特性试验和数值模拟,得出以下结论:

(1) 球阀的流量系数与相对开度呈幂函数单调递增,局部阻力系数与相对开度呈幂函数单调递减的关系,50% ~ 60% 开度是局部阻力系数与流量系数曲线变化的拐点,建立的公式可预测球阀流动阻力变化及流量变化。

(2) 球阀在关闭过程中,相对开度 80% 以下在

阀门中及阀后形成漩涡和回流现象,阀芯入口及出口处速度梯度较大,形成流动高速区,阀芯入口流速为全域最大值,涡量与湍动能随着开度减小而增大。

(3) 关闭引起阀芯进口和出口压强梯度增大,阀后出口处由于质点分离产生局部负压。阀前压力随着阀门的关闭逐渐增大,关闭时间越短,增幅越快,阀前压力升高变化与关闭时间呈 e 指数函数关系,建议适当延长关闭时间 $t \geq 4$ s,避免水锤现象。

上述结论可为节水灌溉系统的 PVC 球阀结构优化及流动特性预测提供参考。

参考文献:

- [1] 刘 晔,朱晓林,王友镗. 球阀流场的数值模拟与分析[J]. 吉林建筑工程学院学报,2009,26(6):29-32.
- [2] 石 喜,吕宏兴,张宽地,等. 聚氯乙烯球阀水流阻力特性及流动规律分析[J]. 农业工程学报,2013(4):95-101.
- [3] 曹 彪,白云岗,张江辉,等. 田间电磁阀阀腔水流阻力特性和流动规律分析[J]. 节水灌溉,2020(10):80-84.
- [4] Moujaes S F, Jagan R. 3D CFD predictions and experimental comparisons of pressure drop in a ball valve at different partial openings in turbulent flow[J]. Journal of Energy Engineering, 2008,134(1):24-28.
- [5] Chern M J, Wang C C. Control of volumetric flow-rate of ball valve using V-port[J]. Journal of Fluids Engineering, 2004,126(3):667-677.
- [6] 弋鹏飞,张 健,马爽文,等. 农业节水灌溉球阀水流流动特性分析[J]. 中国农村水利水电,2019(10):111-116.
- [7] 刘华坪,陈 浮,马 波. 基于动网格与 UDF 技术的阀门流场数值模拟[J]. 汽轮机技术,2008,50(2):106-108.
- [8] 石 柯. 球阀开启过程的瞬态数值模拟与实验研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2013.
- [9] 朱金铤,柏 杨,朱德兰,等. 注肥三通管水力特征数值模拟和试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2021,19(5):134-138.
- [10] 祁永斐,杜利霞. 基于动网格模型的弹簧式灌水器流场数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(2):109-112.
- [11] 马光飞,季健康,姚 丹,等. 阀体间隙对球阀性能和内部流场分布的影响[J]. 排灌机械工程学,2019,37(11):960-966.
- [12] 李进良. 精通 FLUENT 6.3 流场分析[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

下结论:

(1) 圆形扩展风机基础混凝土浇筑期间产生大量水化热,内表散热不均匀,内部易热量聚集,故基础最高温度出现在中心部位,温度由内至外递减,之后基础各部位温度降至准稳定,随气温变化而周期性变化。

(2) 圆形扩展风机基础表面最大应力发生在早期,虽然数值不大,但此时混凝土未发育完全,可能会出现温度裂缝,之后拉应力会逐渐减小,甚至变为压应力,限制表面裂缝的发展或使表面裂缝弥合,危害较小。风机基础中心部位最大应力发生在后期,数值较大,不易观察且危害严重,应当警惕内部温度裂缝的产生。

(3) 圆形扩展风机基础表面附近的内外温差和温度梯度与表面应力、中心部位的温降值与应力均有很好的对应关系。表面附近的内外温差与表面应力同增同减。温度梯度由内部温度大于表面温度引起时,表面应力与温度梯度同增同减;温度梯度由表面温度大于内部温度引起时,表面应力与温度梯度变化趋势相反。中心部位的应力与温降值变化趋势相同。因此可以通过控制中心部位的温降值、表面附近的内外温差和温度梯度来控制风机基础温度应力。

参考文献:

- [1] 朱 彤.“十四五”时期可再生能源发展的关键是体制改革与机制重构[J].中国发展观察,2020(22):50-54.
- [2] 王春雷.基于深度学习算法的风机传动系统故障诊断研究[D].兰州:兰州交通大学,2020:1-2.

- [3] 周新刚.风力发电机组钢筋混凝土基础设计问题的探讨[J].水利水电技术,2014,45(2):114-118.
- [4] 赵卯忠,刘晓晓.浅析风电场风机基础混凝土温度裂缝的原因分析及防治措施[C]//2017年11月建筑科技与管理学术交流会议论文集.北京,2017:49-50.
- [5] 鲁志强,杨晓泉,陈 贺,等.基于温度场仿真的某悬索桥重力锚温控监测设计与实践[J].水利与建筑工程学报,2021,19(1):114-121.
- [6] 李 婷.浅析风力发电机组基础混凝土早期温度裂缝的成因及控制措施[C]//中国水电工程顾问集团公司2011年青年技术论坛论文集.昆明,2011:710-717.
- [7] 陈 亮,柯敏勇.风机基础温度裂缝控制及实施效果[J].山西建筑,2016,42(27):96-97.
- [8] 张永存,李青宁.混凝土裂缝分析及其防治措施研究[J].混凝土,2010(12):137-140.
- [9] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].第二版.北京:中国电力出版社,2012:191-234.
- [10] 陈 好,杜志达,王成山.外掺MgO对水工隧洞混凝土温度徐变应力的影响[J].水利与建筑工程学报,2018,16(4):148-153.
- [11] 唐静娟.坝体材料分区对混凝土重力坝温度应力的影响研究[D].大连:大连理工大学,2021:38-39.
- [12] 朱伯芳.水工钢筋混凝土结构的温度应力及其控制[J].水利水电技术,2008(9):31-35.
- [13] 朱伯芳,许 平.加强混凝土坝面保护尽快结束“无坝不裂”的历史[J].水力发电,2004(3):25-28.
- [14] 许文忠.大体积混凝土基础温度裂缝控制施工技术研究[D].上海:同济大学,2007:21-22.
- [15] 朱伯芳.混凝土极限拉伸变形与龄期及抗拉、抗压强度的关系[J].土木工程学报,1996(5):72-76.

(上接第135页)

- [13] 王福军.计算流体力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [14] 阀门流量系数和流阻系数试验方法:GB/T 30832—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [15] 毛 伟,郑雨松,王东瑞,等.不同锥角V形球阀流动特性分析[J].液压与气动,2021,45(3):165-171.
- [16] 朱晓林.温控球阀流场特性及流量系数的数值模拟

- 研究[D].长春:吉林建筑工程学院,2010.
- [17] 石 喜,贡 力,陶 虎,等.球阀固-液两相流流动特性与压力损失数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(5):1682-1691.
- [18] 冯卫民,肖光宇,宋 立.特大口径水轮机进水球阀最优动水关闭规律及数值模拟[J].武汉大学学报(工学版),2009,42(3):287-291.