

海水输送止回阀液固两相流动及磨损特性研究



王汉光^{1,*}, 夏崇茅¹, 王学丰¹, 张昊², 张光²

¹ 维都利阀门有限公司, 浙江温州 325024

² 浙江理工大学机械工程学院, 浙江杭州 310018

摘要: 止回阀作为安全阀在海水输送系统中起到关键调控作用, 当海水介质中含有砂石颗粒时, 液固介质的长期冲刷会造成止回阀磨损, 导致阀门密封不严、泄漏, 进而影响整个输送系统的安全运行。本文采用数值模拟的方法, 分析不同止回阀行程开度、固体颗粒直径对止回阀内部颗粒运动及磨损特征的影响, 获得阀门开度及颗粒粒径与颗粒运动和磨损特性之间的关联, 为海水输送止回阀的磨损防控结构设计提供理论支撑。结果表明: 相同颗粒直径工况下, 流体流经阀芯时会形成高速射流, 随着阀门开度的增加, 高速射流的强度逐渐减弱, 主要壁面的磨损程度减小, 当阀门开度大于 60% 时, 阀内高速射流强度及磨损程度变化不明显; 相同阀门开度下, 随着颗粒直径增加, 阀芯和管道内颗粒沉降现象越明显, 阀门关键面磨损程度逐渐增加, 并且磨损位置向阀芯和管道下端偏移。

关键词: 止回阀; 固液两相流; 流量系数; 颗粒磨损; 数值模拟

DOI: [10.57237/j.mse.2022.01.003](https://doi.org/10.57237/j.mse.2022.01.003)

Study on Liquid-Solid Flow and Erosion Characteristics in a Check Valve for Seawater Transportation

Wang Hanguang¹, Xia Chongmao¹, Wang Xuefeng¹, Zhang Hao², Zhang Guang²

¹Weidouli Valves Co., Ltd., Wenzhou 325024, China

²College of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

Abstract: As a safety valve, check valve plays a key regulatory role in the seawater transportation system. When the seawater medium contains solid particles, the long-term impact of liquid-solid flows leads to erosion in check valve as well as lax sealing and leakage, which affects the safe operation of the transportation system. In this article, numerical simulations were carried out to study effects of valve opening degree and particle diameter on particle motion and erosion characteristic in a model check valve. Particle motion and erosion distributions were analyzed at different valve opening degrees and particle diameters to provide theoretical support for structure optimization of erosion protection in check valves for seawater transportation. Results show that under the same particle diameter, high-speed jet flows are generated at the downstream of the valve core. The intensity of the high-speed jet flows gradually decrease and the erosion on the main wall decreases with the increase of valve opening degree. When valve opening degrees is larger than

*通信作者: 王汉光, info@weidouli.com

60%, the intensity of high-speed jet flows and erosion distributions are changed slightly. At the same valve opening degree, with the increase of particle diameter, the settlement of particles near valve core and pipe becomes more obvious and erosion increases with the erosion position moving toward the downside of valve core and pipe at the downstream.

Keywords: Check Valve; Solid-liquid Two-Phase Flow; Flow Coefficient; Particle Erosion; Numerical Simulation

1 引言

近年来随着船舶工业和海洋技术的发展,海水输送、海水淡化技术以及船舶工业技术日益成熟,对在海水输送管道和船舶工作的稳定性要求日益提高。其中管道阀门作为海水输送管道系统的重要调控部件,具有导流、节流、分流、溢流、截止或止回等功能,因此,阀门的性能对整个输送系统工作的稳定性和可靠性有很大的影响[1-4]。

止回阀作为安全阀在水利输送系统中起到关键作用,国内外学者针对不同类型的止回阀进行了深入研究,陈殿京等[5]采用 ANSYS FLUENT 对止回阀进行了数值模拟研究,分析了不同工况参数下止回阀流量系数的变化特征。冯章俊等[6]运用 CFD 软件对两种改进的止回阀进行了数值模拟,分析了阀门阻力系数及流量特性,并对止回阀进行了结构优化。刘梦遥等[7]通过在计算软件中耦合 UDF 对核电用止回阀进行数值模拟,分析了止回阀所受应力分布,并对止回阀结构进行优化。

止回阀作为海水输送的关键调控部件,当海水介质中含有砂石颗粒时,阀门流道内部的颗粒会与阀芯及管道壁面产生碰撞和摩擦,颗粒长期冲刷会导致阀门严重的冲蚀磨损。因此,分析阀门内部流动特性,颗粒运动以及磨损特征,能够为阀门的设计以及优化提供理论参考[8]。

本文以水平弹簧恢复式海水输送止回阀为研究对象,在不同的阀门行程开度和颗粒直径工况下,对止回阀内部液固两相流动及颗粒磨损特征进行数值模拟研究,分析了阀门行程开度和颗粒直径对止回阀内部流动、颗粒运动及磨损特征的影响规律,获得了上述工况参数与止回阀内部颗粒运动和磨损特征的对应关系,为海水输送止回阀的设计开发提供了技术支撑。

2 物理模型及数值计算方法

2.1 工作原理及结构特点

图 1 为止回阀的结构示意图。该止回阀由阀体、

密封圈、阀芯、弹簧及并帽等组成,左端为进口,右端为出口。当管道内流体对阀芯的压力大于弹簧压力时,阀芯向右运动实现阀门的开启;当压力逐渐增大时,阀芯逐渐向右运动,压缩弹簧的同时逐渐扩大行程开度;当阀芯运动到一定位置后阀芯右端轴端的轴肩与并帽左端贴合,此时阀门全开。当流体产生的压力逐渐减小时阀芯逐渐向左运动,阀门开度减小,当流体产生的压力降低到一定程度后阀芯左端壁面与阀体的密封圈侧壁面贴合,此时阀门全闭。

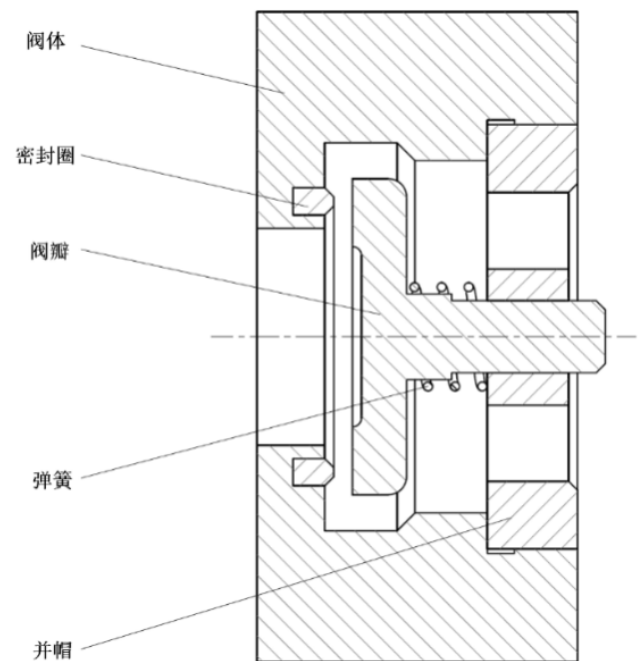


图 1 止回阀结构示意图

2.2 模型建立与网格划分

为保证止回阀进出口处流场充分发展,对其进出口端各增设 10 倍公称直径的管道。图 2 为该止回阀简化后的三维模型示意图,图 3 为止回阀计算域示意图。

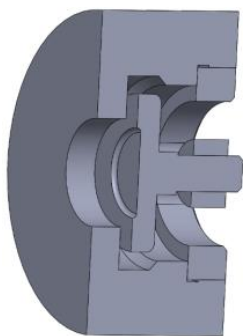


图2 止回阀三维示意图

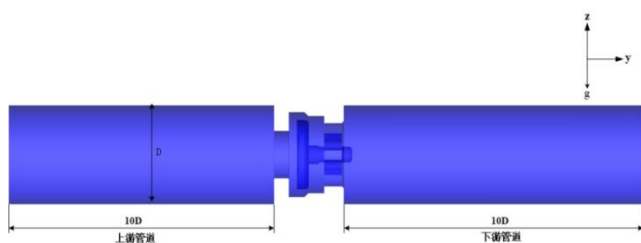


图3 止回阀计算域示意图

同时, 对不同阀门行程开度 (10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90、100%) 的内部流道进行抽取。其中, 30%、70%和 100%开度下流道抽取结果如图 4 所示。

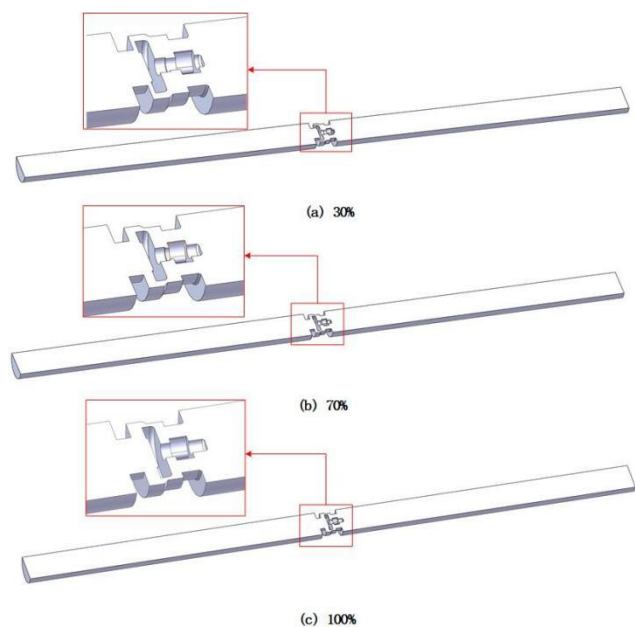


图4 不同行程开度下止回阀流道结构图

完成模型建立后, 采用 ICEM 软件对流道进行网格划分。在数值模拟中, 网格对计算的精度有非常重要的影响[9, 10], 由于止回阀流道结构复杂, 整个计算

流域均采用四面体网格进行划分。同时, 为了保证模拟计算结果的准确性和捕捉局部复杂流动, 将止回阀阀芯和管壁边界处的网格进行加密处理。图 5 显示了流体区域的网格划分情况。对于研究的所有行程开度, 需要在保证计算精度的同时提高计算效率, 从而进行了网格无关性验证, 结果如图 6 所示, 当网格数量大于 200 万时, 止回阀流量系数值基本不随网格数的变化而变化, 为了提高计算精度将网格数量控制在 400 万左右。

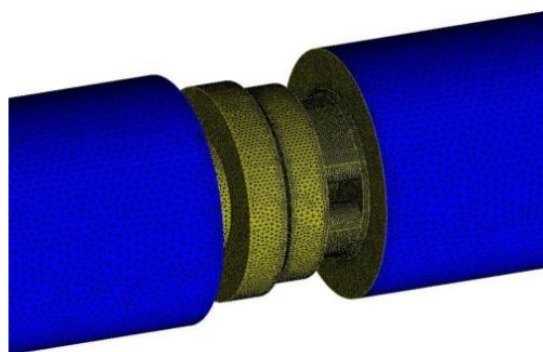


图5 流体区域的网格示意图

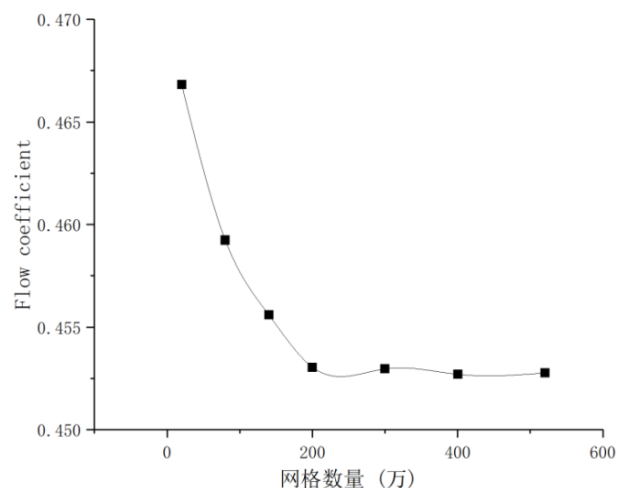


图6 网格无关性验证

2.3 求解设置

在求解计算时, 采用 Fluent 软件基于有限体积法对止回阀模型进行数值模拟, 工作介质选用海水, 忽略其可压缩性, 并且在整个流动过程中都不考虑海水的蒸发和相变过程。利用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对流经阀门的复杂湍流流动进行计算, 压力与速度的耦合选用 SIMPLE 算法进行求解, 体积单元中心变量的梯度由基于单元体的最小二乘法 (Least Squares Cell

Based) 得到, 压力项采用二阶格式进行空间离散, 动量、能量、湍流动能和湍流耗散率项则采用二阶迎风 (Second Order Upwind) 格式进行离散。在控制变量中, 压力项的亚松弛因子设置为 0.3, 动量的则为 0.7, 湍流动能和湍流耗散率的亚松弛因子设置为 0.8, 密度、能量、体积力和湍流粘度的亚松弛因子均为 1。

2.4 控制方程

止回阀内部流动是一种复杂湍流流动, 因此本项目采用在旋涡和旋转方面均具有更好效果的 *realizable k-ε* 模型, 其湍流方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中, $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$; $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$; G_k 为平均速度梯度产生的湍流动能; C_2 、 $C_{1\varepsilon}$ 为常量; σ_k 、 σ_ε 为 k 和 ε 的湍流普朗特数; S_k 、 S_ε 为源项。

对于不同的壁面材料和不同颗粒类型的冲蚀磨损, 研究人员提出了多种磨损计算模型。对于碳钢和铝合金, 目前常用的磨损计算模型有 Ahlert[11] 磨损计算模型, E/CRC[12] 磨损计算模型等。本文选用 E/CRC 磨损计算模型, 其计算公式如下:

$$ER = C(BH)^{-0.59} F_s u_p^{n_c} f(\theta) \quad (3)$$

$$f(\theta) = \sum_{i=1}^5 R_i \theta^i \quad (4)$$

对于碳钢材料公式中 $C=2.17 \times 10^{-7}$ 、 $n_c=2.41$ 、 $R_1=5.3983$ 、 $R_2=10.1068$ 、 $R_3=10.9327$ 、 $R_4=-6.3283$ 、 $R_5=1.4234$, BH 为布氏硬度, F_s 是颗粒形状系数, u_p 是颗粒速度。

3 结果与讨论

3.1 流量系数

流量系数表征流体的流通能力[13-14], 对于不可压缩流体, 其计算表达式为:

$$K_v = Q \sqrt{\frac{G}{\Delta P}} \quad (5)$$

式中, Q 为介质的体积流量 (m^3/h); G 为液体比重, 其中 ρ 为液体的实际密度为 $1025 \text{kg}/\text{m}^3$, ΔP 为阀门前后的压力差 (100kPa)。根据流量系数定义, 计算时边界条件采用压力入口, 设置为 1.1MPa , 采用压力出口, 设置为 1.0MPa , 保证阀门前后压差为 100kPa , 流体的工作温度为 293K , 湍流强度为 5% , 水力直径为 50mm 。

如图 7 所示为该止回阀的流量系数曲线, 从图中可以看出, 随着止回阀行程开度的不断增加, 流量系数均呈现近似指数形式的增长。在小开度下, 止回阀的流量系数存在一定的波动, 在 20% 的情况下波动较为剧烈; 随着开度的不断增大, 流量系数的增长率也不断减小, 但行程开度增大至 70% 是增长率减小幅度明显, 这是由于行程开度增长至 70% 之后流体流过阀芯左端面后不经过阀体水平方向和阀芯壁面的反弹, 大部分直接经过阀体的倒角轴肩进入并帽孔从而流通特性较为稳定。

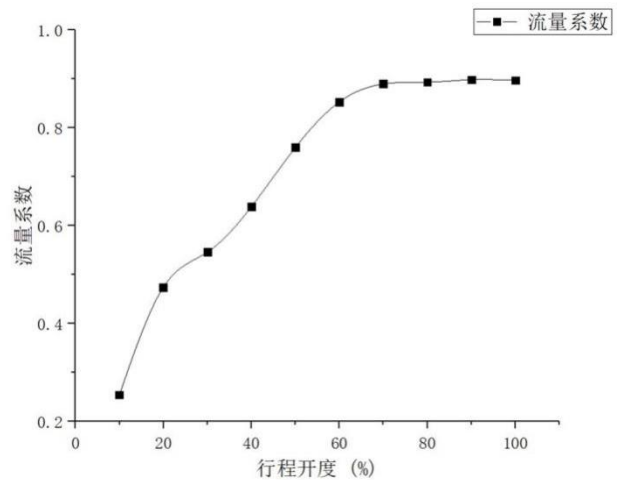


图 7 止回阀不同行程开度下的流量系数

3.2 液相流场分布

在计算止回阀内部液固两相流动时, 采用速度进口为 3m/s , 采用压力出口为大气压, 如图 8 所示, 获得止回阀在不同开度工况下的速度和压力云图。从图中可以看出, 在小行程开度时, 由于阀芯的阻挡会导致阀芯迎流面区域通流面积减小, 阀芯的迎流面附近存在高速带并形成高速射流, 高速带沿着阀体内壁面延伸至出口流道内, 阀芯的背流面会因

为高速射流诱发行程部分回流，速度明显较小。随着行程开度的增加，高速射流强度明显降低，并且高速区域随着行程开度的增大逐渐在并帽和阀体壁面上出现；当行程开度大于 60% 时随着行程开度的增加，流体流速减小不明显；全开时阀芯背流面低速区域几乎消失。

止回阀行程开度增大时，阀门的流通面积受限于阀门模型的影响从而先增大后减小，并且由阀芯迎流面区域压力图可以看出，迎流面区域随着阀门行程开度的增大高压区的压力值会先减小后增大；并在阀芯、阀体和并帽流道模型的交界面上会形成局部高压区。

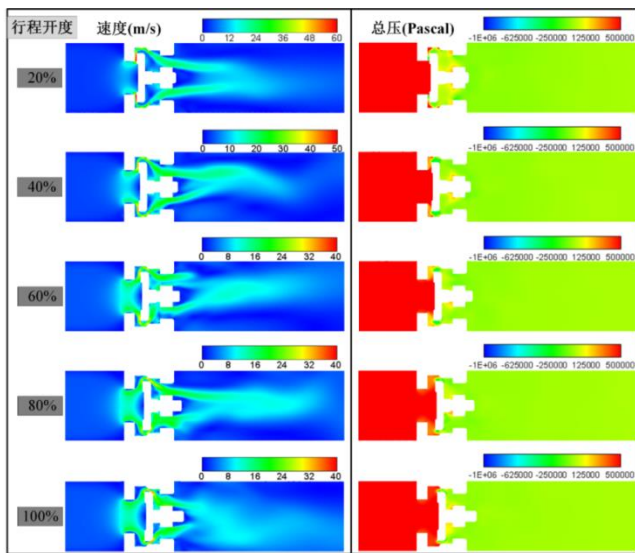


图 8 不同开度下止回阀内部单相流动速度分布和压力分布

3.3 固体颗粒分布特性

图 9 展示了固体颗粒直径为 $100\mu\text{m}$ 时不同行程开度下颗粒在流道内部的分布情况，图中重力方向向下，如图所示，阀芯进口管道处颗粒分布不均，是由于颗粒在重力的作用下发生了明显的沉降；在小开度时，阀芯和阀体之间小通流面积处的颗粒速度明显较大，固体颗粒在流经阀芯迎流面时会在高速射流的加速的作用下，撞击阀芯迎流面，进而造成阀芯壁面磨损；随着行程开度的增加，固体颗粒速度减小；阀芯出口管道内，如前文所述由于出口处的流体速度较大，进而会在靠近管道壁面处形成回流，行程开度越小，阀芯出口处流体速度越大，固体颗粒速度也越大，颗粒跟随回流会在阀芯出口处产生部分堆积，并且由于重力的影响下方的颗粒数量明显大于上方的颗粒数量，随着行程开度的增加，回流现象减弱，颗粒在出口处

的堆积现象减弱。

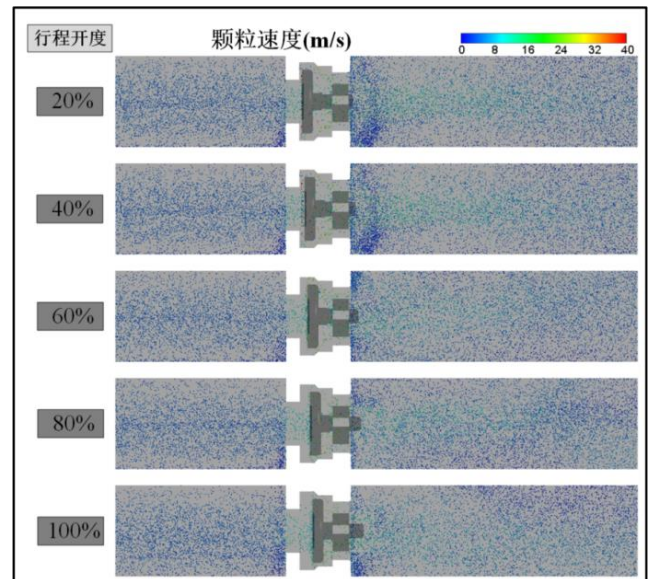


图 9 不同行程开度下的颗粒速度分布图

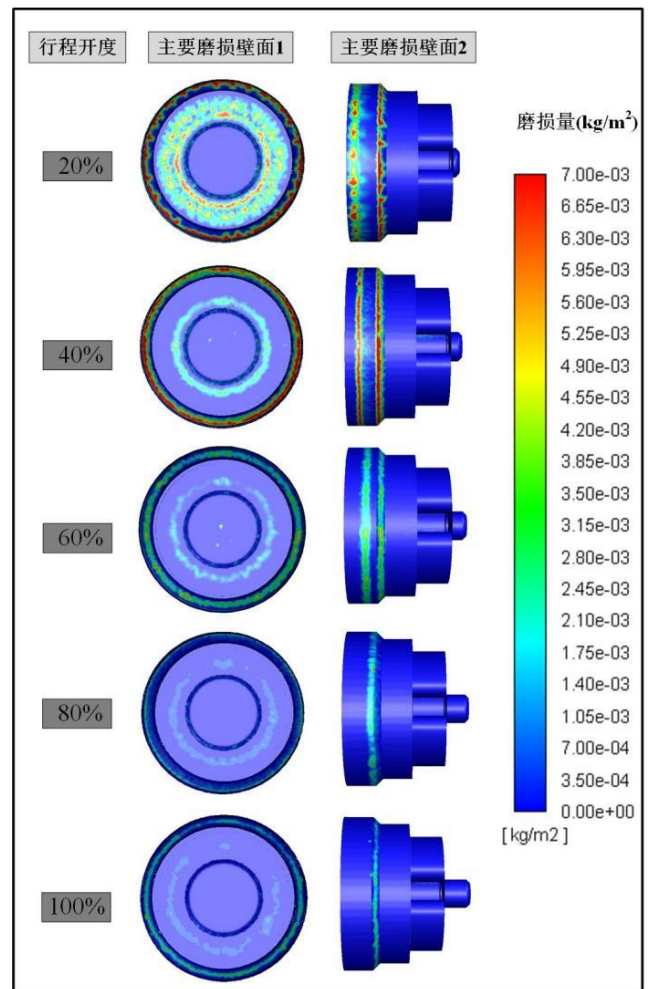


图 10 不同行程开度下阀芯主要壁面磨损云图

3.4 阀芯磨损特征

图 10 是固体颗粒直径为 $100\mu\text{m}$ 时不同行程开度下止回阀阀芯主要壁面的磨损分布。通过对比不同行程开度下的磨损特征,发现主要磨损壁面 1 是阀芯的迎流面,主要磨损壁面 2 是阀体在阀芯处的壁面。各个行程开度下主要壁面磨损位置较为对称且磨损量较为均匀。与大行程开度相比,在行程开度较小时主要壁面磨损更加严重。由于在其他条件相同的情况下,止回阀行程开度越小阀芯处高速射流的速度越高,固体颗粒的动能越高,固体颗粒撞击壁面的速度越大,产生的磨损也会更加严重。主要磨损壁面 2 上的磨损位置分为左右两条环状带,两条环状带上的磨损量较为平均,并且随着行程开度的增加左环状带会逐渐右移,两条环状带逐渐重合。如上文所述当行程开度大于 60% 时,磨损的减小量与小开度时相比变化不明显。因此,可以认为主要磨损是发生在阀芯区域,在设计时应该注意阀芯和此处阀体材料及结构的选择。

3.5 颗粒直径对主要壁面磨损的影响

前文描述了在固体颗粒直径为 $100\mu\text{m}$ 时止回阀阀芯主要壁面的磨损特性,而海水输送止回阀实际工作中会涉及到不同固体颗粒直径的情况,针对此类问题,选取止回阀全开工况时,分析不同固体颗粒直径 ($100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$) 对止回阀阀芯及管道磨损特征的影响规律。

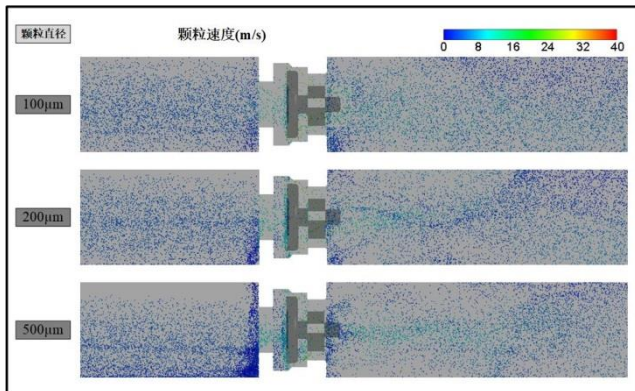


图 11 行程开度 100% 时不同颗粒直径下的颗粒分布图

图 11 为止回阀全开时不同颗粒直径下的颗粒分布云图,从图中可以看出随着颗粒直径的增加,固体颗粒的跟随性降低,发生了明显的沉降,此时固体颗粒所受的重力对颗粒自身运动的作用逐渐增大。沉降主要发生在阀芯入口管道和阀芯迎流面区域。图 12 为止

回阀阀芯附近颗粒的速度矢量图,沉积区域的颗粒速度明显小于其他区域的颗粒速度,并且由于阀芯出口处的高速射流引起的回流涡不断捕集流经的固体颗粒撞击并帽后端壁面和阀芯出口管道,造成磨损破坏。

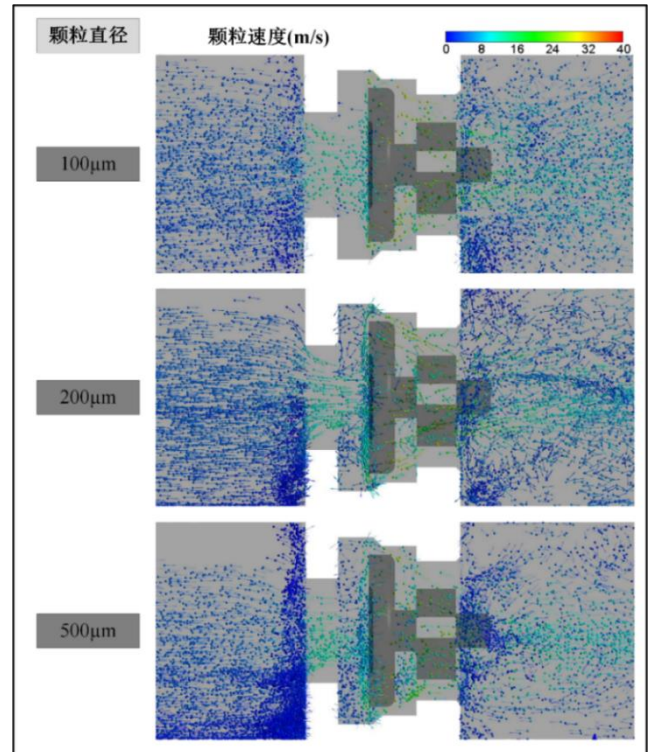


图 12 行程开度 100% 时不同颗粒直径下的局部颗粒速度矢量图

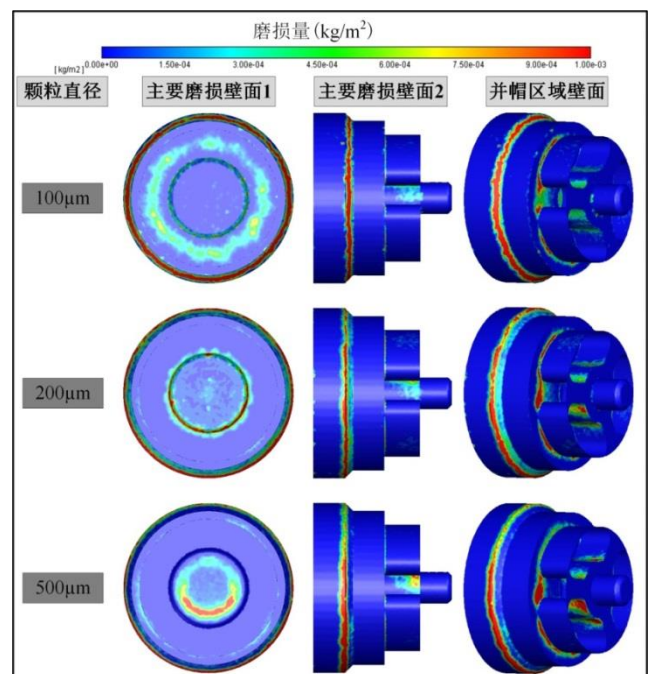


图 13 行程开度 100% 时不同颗粒直径下主要壁面磨损云图

针对不同颗粒直径对阀芯和管道的磨损特性进行分析, 可以得出不同的主要磨损壁面的磨损情况, 图 13 为主要磨损壁面 1、主要磨损壁面 2 以及并帽区域的磨损云图, 图中重力方向向下。随着颗粒直径的增加, 阀芯的磨损量增加。主要磨损壁面 1 的磨损位置逐渐向中心收缩。这是由于随着颗粒直径的增加, 固体颗粒的跟随性逐渐减弱, 在惯性的作用下撞击主要磨损壁面 1 的中心位置。随着颗粒直径的增加, 磨损位置逐渐向重力方向移动, 这是由于随着颗粒直径的增加, 重力对单个颗粒运动的作用逐渐增大, 下方区域的颗粒数量大于其他区域, 从而颗粒撞击壁面的几率大于其他区域, 导致磨损量增加。

4 结语

本文通过对海水输送止回阀内液固两相流进行数值模拟, 分析了止回阀的流阻特性、固液两相流动及磨损分布, 并讨论了不同行程开度和颗粒直径对止回阀内液相流动、固体颗粒分布和阀门主要壁面磨损特征的影响规律, 得到如下结论:

- (1) 在小行程开度时, 随着行程开度的增加, 止回阀的流量系数逐渐增加; 当行程开度大于 60% 时, 流量系数增加幅度逐渐减小, 当行程开度大于 70% 后, 止回阀的流量系数变化基本趋于稳定。
- (2) 当流体流经阀芯时, 阀后流场会形成高速射流, 并且在阀芯出口处高速射流会引起回流; 随着行程开度的增大, 高速射流的强度逐渐减小, 回流区域也逐渐减小; 当行程开度大于 60% 时, 高速射流强度的减弱较小开度时不明显。不同行程开度下的压力分布相似, 阀芯前后的压力存在明显的压力差; 随着行程开度的增大, 流场中的压力分布变化并不明显。
- (3) 随着行程开度的增加, 阀内固体颗粒的速度逐渐减小; 由于重力的作用, 阀芯进口管道处会存在少量颗粒沉降, 阀门出口管道处颗粒运动较为紊乱, 也存在回流和沉降现象。
- (4) 随着固体颗粒直径的增加, 重力对颗粒运动的影响逐渐增大, 颗粒的跟随性逐渐降低, 当颗粒速度较小时, 阀芯进口管道处的沉降现象愈加明显。
- (5) 相同颗粒直径工况下, 随着行程开度的增加主要磨损壁面的磨损程度逐渐减小, 由于高速射

流的作用, 主要壁面磨损位置较为集中。在相同行程开度下, 随着颗粒直径的增加, 主要壁面的磨损程度逐渐增大, 由于固体颗粒惯性力作用逐渐增大, 阀芯迎流面的磨损位置逐渐向中心靠拢, 并且主要壁面磨损的相对位置逐渐向重力方向移动。

本文研究了阀门行程开度及固相颗粒直径对海水止回阀内部液固两相流动及磨损特征的影响规律, 在实际工作中, 海水中固体颗粒浓度对止回阀内颗粒运动及磨损特征也有影响, 后期将会讨论颗粒浓度的影响。本文获得不同阀门形成开度及颗粒直径下止回阀内主要壁面的磨损分布, 基于改变固相颗粒运动轨迹的思想, 后期也将对阀芯及阀体进行结构优化设计, 获得抑制阀门内部磨损的最优止回阀结构。

参考文献

- [1] 机械工业部合肥通用机械研究所. 阀门 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [2] 张为人. 阀门 [M]. 上海翻译出版公司, 1987.
- [3] 房汝洲. 实用阀门设计手册 [M]. 北京: 中国知识出版社, 2006.
- [4] 林哲. 闸阀内部气固两相流动及磨损研究 [D]. 浙江大学, 2013.
- [5] 陈殿京, 刘殿坤, 董海波, 王学彬. 安全阀流场数值模拟研究 [J]. 流体机械, 2008 (10): 24-27.
- [6] 冯章俊. 对冲式止回阀动态特性分析 [D]. 哈尔滨工程大学, 2009.
- [7] 刘梦瑶. 核电止回阀启闭过程中的复杂流及结构特性研究 [D]. 江苏大学, 2020.
- [8] 余天赐. 不同开度下球阀内部固液两相流及磨损研究 [D]. 浙江理工大学, 2019.
- [9] Yikun Wei et al. A novel two-dimensional coupled lattice Boltzmann model for thermal incompressible flows [J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 339: 556-567.
- [10] Qi Liu et al. Metrological performance investigation of swirl flowmeter affected by vortex inflow [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33 (6): 2671-2680.
- [11] K.R. Ahlert, Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 steel [D]. Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, 1994.

- [12] Y. Zhang, E. P. Reuterfors, et al. Rybicki, Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows [J]. *Wear*, 2007, 263: 330–338.
- [13] 陶俊宇. 基于 DES 的蝶阀内部非定常流动模拟及力矩特性分析 [D]. 浙江理工大学, 2020.
- [14] Baoling Cui et al. Influence of opening and closing process of ball valve on external performance and internal flow characteristics [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 80: 193-202.

作者简介

王汉光

1969 年生, 工程师, 1992 年毕业于陕西机械学院材料工程系铸造专业, 现在从事阀门设计及开发工作.

E-mail: info@weidouli.com