

球阀仿真领域研究进展

丁朱波, 王 斌, 陈 青, 顾金彤, 陈 豪, 季如鹏

盐城工学院机械工程学院, 江苏 盐城

收稿日期: 2023年12月21日; 录用日期: 2024年3月6日; 发布日期: 2024年3月13日

摘 要

球阀是管路系统中关键的组成部件, 在石油天然气、医药、食品等领域都有着十分重要的用途。球阀使用过程中的安全和稳定, 一直是研究人员关注的焦点。为预测球阀在指定工况下的力学特性和内部流场, 仿真技术提供了良好的平台。针对球阀的建模仿真研究, 对近年来的球阀的数值模拟研究现状和发展趋势进行总结和分析。总结的主要内容包括球阀结构强度、密封性能、谐响应、流通能力、空化特性和冲刷磨损等各方面。预期能够为球阀设计和分析提供一定的参考和借鉴。

关键词

球阀, 数值仿真, 研究进展, 发展趋势

Research Progress in the Field of Ball Valve Simulation

Zhubo Ding, Bin Wang, Qing Chen, Jintong Gu, Hao Chen, Rupeng Ji

School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

Received: Dec. 21st, 2023; accepted: Mar. 6th, 2024; published: Mar. 13th, 2024

Abstract

Ball valves are crucial components in pipeline systems and have significant applications in fields such as oil and gas, pharmaceuticals, and food. The safety and stability during the use of ball valves have always been a focus of attention for researchers. Simulation technology provides a good platform for predicting the mechanical characteristics and internal flow field of ball valves under specified operating conditions. Summarize and analyze the current status and development trends of numerical simulation research on ball valves in recent years, focusing on modeling and simulation research. The main contents summarized include the structural strength, sealing performance, harmonic response, flow capacity, cavitation characteristics, and erosion wear of ball

valves. It is expected to provide certain reference and inspiration for the design and analysis of ball valves.

Keywords

Ball Valve, Numerical Simulation, Research Progress, Development Trends

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

球阀是一种可以截断管道内流体或控制流体流量、压力的机械装置。它具有流体阻力小、密封性好、启闭快，使用寿命长等优点，被广泛应用于油气运输、水利、航空、化工、冶金等领域。球阀控制的流体通常是液体、气体、固液混合体、气液混合体和气固液混合体。工业生产中球阀的工作环境一般都比较恶劣，在实际的运用中对球阀的工作能力和安全性能都有着严格的要求。设计时，不仅要考虑球阀的结构强度、密封性能等；还需要考虑外部载荷和内部流体本身对球阀的影响，如地震下、介质的冲蚀、空化、水锤等。

球阀的现场试验和模型试验能直观准确地得到所需参数，但缺乏对于自变量和外生变量的控制且样品成本和时间成本相对较高。随着计算机技术和力学理论的研究，数值仿真技术也日益的发展和成熟。数值仿真可以利用计算机技术模拟出球阀的实际工作环境。通过数值仿真可以预测球阀的应力、应变、密封性能、内部流场、冲蚀和空化等变化过程。在研发新产品时，合理利用仿真技术能减少样品试制次数，缩短开发周期。对已有产品出现的问题，通过复现工作环境，找出问题原因，对减少球阀的安全隐患和提高球阀质量具有指导意义与实用价值。

2. 结构强度研究

在工程领域中，结构强度是设计时重要的考虑因素。结构强度是指物体或构件抵抗外部力和载荷作用下不发生破坏、变形或失效的能力。球阀结构形式繁多，球阀也可采用不同材料制成，包括铸铁、碳钢、不锈钢、合金钢、铜、铝等。不同材料和结构适用于不同的介质和工作环境。在球阀的设计与选用时中需要考虑到其所受的永久载荷和可变载荷等因素，以确保结构的安全性和稳定性。通过仿真分析可以预测在不同工况下阀门各个关键部件的应力和变形，工程师可以根据场景选择合适的材料、尺寸和形状，以满足结构强度的需求。

目前学者大多采用有限单元法进行球阀的结构强度方面的研究如 Han C J [1]、Karan [2]、Ferreira [3]、曾和友[4]和聂君锋[5]等，有限单元法将分析模型看作由许多个小微元各项同性组合而成，相比其它方法能适用各种复杂形状模型，能够较准确的计算出球阀各部件的受力情况。数值仿真还未发展前主要是通过材料力学理论及经验公式计算，现阶段随着分析方法的不断更新，计算方法现已容纳微分方程离散化求解、贴体坐标建立、边界条件离散等。数值仿真与传统经验公式相比数值仿真更加精准和方便。此外，仿真计算时需要对球阀的外部加载条件设置，其直接影响着模拟结果的准确性。

但是仅仅是停留在准确计算上是肯定不够的，更多研究者也在寻找阀门结构变化、内部压力变化等因素与应力、应变之间的影响规律，进而用于指导更先进的球阀设计。易先中等[6]把阀体单边开孔、双

边对称开孔和阀体外径增大作为变量, 结构如图 1 所示, 探究了局部结构变化对球阀最大应力和总变形的影响, 发现外径增大和开口对称能减少球阀的应力集中及总变形。Zhang 等[7]对球阀球体进行有限元分析和优化, 减小球体的变形量。邵力平等[8]研究了球阀的不同截面的压力波动变化, 得到了球阀结构中整体结构不连续性的位置压力波动较大, 壁面承受应力随着内部介质压力的升高而不断增大。

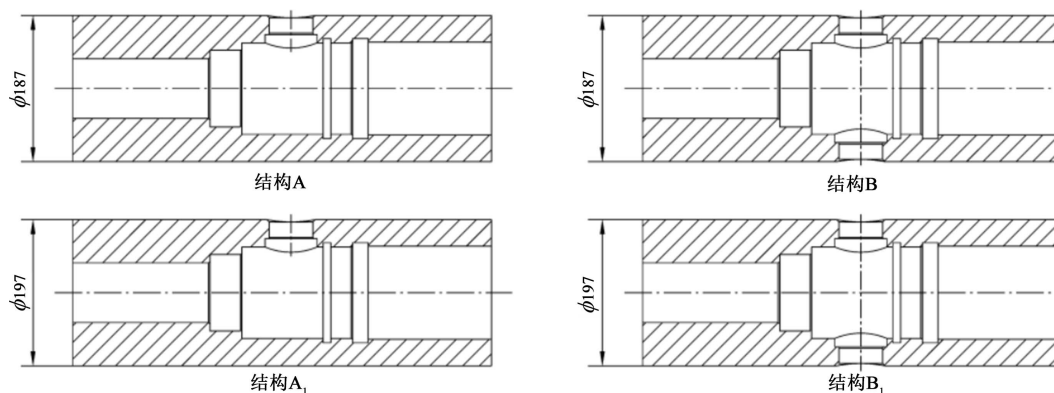


Figure 1. Valve body structure diagram

图 1. 阀体结构图

球阀进行结构强度数值模拟大多数的目的是为了保证在各种工况下阀门的结构和材料是否满足设计要求。若不满足要求可对其进行结构的优化或材料的改进, 若已满足设计要求是否可以在满足设计要求的基础上进行调整减少生产的成本, 提高产品的附加值。古帅坤等[9]为了提高海上球阀的耐腐蚀性提出将钛作为材料并进行了各种工况下的验证; Sotoodeh 等[10]在满足强度前提下降低了阀体的壁厚, 节约了成本。Kim 等[11]在屈服强度内, 把长度和厚度作为设计变量来优化球阀阀体形状, 使球阀性能得到提高。

球阀结构强度仿真它们能够帮助工程师预测和评估球阀的结构强度, 指导设计改进和优化, 并提供决策依据。目前, 对于球阀运动过程中受到的应力变化方面的研究不多, 如球阀在开启和关闭过程中, 阀座与球体之间会产生接触应力且球体的运动会产生惯性载荷等。此外, 流体对固体的冲击力考虑在内对阀座与球体的接触进行分析, 也是一个未来可以研究方向。

3. 密封性能研究

阀门密封的原理是借助流体压力、弹性元件作用力和预压缩产生的密封力使密封副相互接触、嵌入, 减小密封面之间的间隙。球阀在石油、天然气等领域应用广泛, 球阀的密封性能好能有效地防止流体泄露从而可以减少能源的消耗和环境污染。若球阀发生较大泄漏还会降低系统内的压力和流量, 影响系统的正常运行。球阀密封材料、接触表面粗糙度、接触表面镀层厚度和密封副结构等都能对密封性能产生影响[12][13][14]。因此密封性能的研究也逐渐成为阀门研究领域的重要研究方向。

数值仿真技术不断发展, 许多学者通过数值仿真对球阀的密封性能进行研究。常用的有限差分法、有限元法、分形方法等。研究阀门密封问题一般结合数值模拟从密封比压计算和密封热固耦合这两个方面进行探究。

3.1. 密封比压计算

密封比压是衡量密封面密封性能的重要指标, 其大小为端面承受压力和端面密封面积的比值。针对密封接触模型的研究, 大多利用数值模拟的方法分析影响密封性能的局部参数或计算处不同密封结构的密封比压大小。例如, 陆怡等[15]通过软件模拟不同的密封面宽度和不同的密封压力角对接触应力的影响,

分析并重新设计出双斜面与球体接触结构密封结构,提高了其密封性能。李清等[16]为了应对深海工况,设计出具有双向密封结构的阀杆和螺栓固定式阀座的深海球阀其结构如图2、图3,同时采用有限元仿真方法得出阀座变形与密封比压的关系。Yu Ruiming 等[17]设计出一种弹性环阀座结构的新式球阀,可以有效防止介质影响密封失效的问题,通过数值仿真验证其结构合理性。

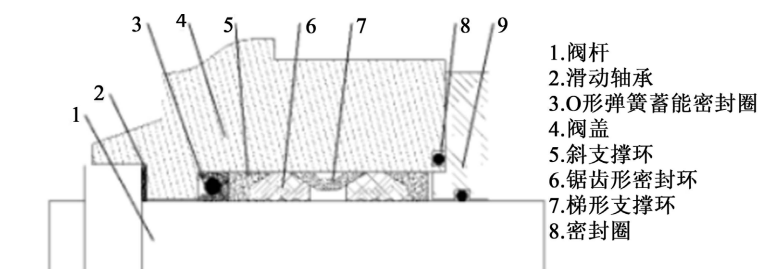


Figure 2. Bidirectional sealing structure of valve rod
图2. 阀杆双向密封结构

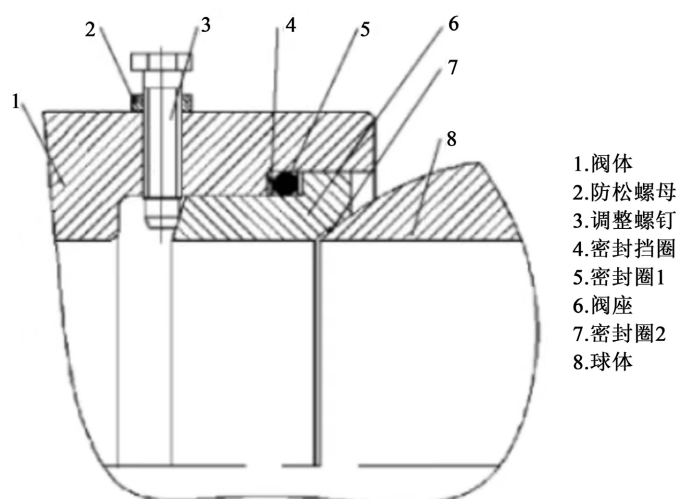


Figure 3. Sealing structure of bolted fixed ball valve seat
图3. 螺栓式固定球阀阀座密封结构

国内外研究者已经验证了的影响密封比压的因素有密封力、阀座内外径、密封宽度及压力角等。对于比压的计算已经能达到较高水平,但研究的手段单一,主要是通过有限元法对密封接触结构进行数值计算,其研究内容也比较单一,可以尝试利用数值模拟探究介质特性对密封比压的影响。

3.2. 密封热固耦合

温度的变化会在不同程度上使材料从而影响密封件之间的配合,降低阀门的密封性能。当阀门处于在高、低温时,密封部件会产生热变形。热变形受到位移和压力等某些约束时,就会产生热应力。热应力能显著的影响密封比压的大小,使密封性能发生变化。因此,通过数值模拟对球阀进行温度场研究,可以探究出最大应力和变形出现的位置及应力应变的分布情况,为密封性能评估提供依据,减少球阀在不同温度下可能出现变形、开裂、失效、密封松动、不同部件之间的相对位移、卡涩等情况的发生。对此,许多研究者采用热固耦合的方法对球阀的密封性能进行研究,研究高温、超低温、温差大小及升温速度对球阀密封性能的影响或者研究不同温度下密封比压的分布规律,如表1。

Table 1. A case study on thermal solid coupling of ball valve sealing
表 1. 球阀密封热固耦合研究案例

研究者	应用环境	研究内容
朗晨旭[18]	LNG 低温	低温下的对球阀密封性能的影响
杨刚[19]	超低温	超低温获得阀座密封面上的密封比压分布规律
M. Egure-Hidalgo 等[20]	高温	高温下密封处的总变形及应力变化
陈嘉哲[21]	低温	升温速度对球阀密封的影响
Zhao 等[22]	超低温	流通介质与密封面的相互作用应力应变情况

此外,密封热固耦合的研究必然离不开利用数值仿真选择合适的密封材料。戴明[23]对 316 不锈钢的阀体在对应温度下进行数值模拟,通过分析得到了 316 不锈钢在的力学性能使最适合 LNG 超低温使用,满足外密封要求。热固耦合仿真方法是依旧是研究球阀高、低温密封问题的主流方法。市面上的仿真软件逐渐增多,各有优劣,Ansys、Abaqus、Hyperworks 和 Comsol 软件对于研究热固耦合有着较好的效果。

尽管数值模拟成本低、效率高且方便快捷,但是仿真的结果是离不开试验的验证的。研究者基本都采用了仿真和实验相结合的方式去研究,使结果更具有可靠性。数值仿真和实验是相辅相成的,二者缺一不可。如张文博[24]针对低温环境实验要求,建立起了实验台用于阀门材料低温密封实验,但如何降低低温环境的实验成本,简化实验过程,是后续研究的重要内容。

4. 谐响应研究

谐响应是指在一个系统受到某个外部激励的作用下,系统的响应与激励具有相同频率的现象。当外部激励的频率与系统的固有频率(或共振频率)接近或相等时,系统会呈现出明显的谐响应。外界振动可能引起球阀的异常运动,产生共振或失稳现象,导致泄漏、损坏或操作失灵,从而影响其正常运行,也会给其结构和部件带来额外的载荷,加速疲劳破坏和损耗。通过仿真研究球阀在不同振动条件下的响应特性,预测共振频率范围,可以评估球阀的稳定性,耐久性及工作寿命。

目前,球阀谐响应研究主要针对处于极端工况下的球阀,如地震、海洋等。

4.1. 地震下球阀谐响应研究

地震是由于地壳破裂或断裂而引起的。地壳的破坏引起应变能的突然释放,它以地震波的形式传播,产生地面振动,地面运动被传送到建筑物、管路系统设备的所有部分。因此,球阀必须确保其在地震情况下的稳定性。

目前球阀抗震仿真分析的主要方法为模态分析法,通过计算机计算球阀的固有频率和振型,在保证系统不发生共振的前提下,在 ASME 相关数值仿真试验的指导下,将地震载荷加速度使用 SRSS 方法施加在系统的 X, Y, Z 三个方向,而后动态分析球阀的应力应变情况。N. B. Dantulwa 等[25]利用响应谱法对球阀进行了抗震分析,得到了地震下球阀的等效静力和变形趋势,发现其最大应力和位移都在材料的是否接受范围内。何庆中等[26]采用时程分析法,对地震载荷下的球阀阀体进行瞬态研究,研究出其瞬时的最大等效应力和最大变形,更为精准的得到球阀在地震载荷下的响应。

有研究工作者对球阀的设计参数进行优化,提高球阀的抗震能力,Jhas 等[27]为提高球阀抗震性能,对其阀体厚度和球体大小,进行优化。增加阻尼系统也可以减少地震对阀门的影响,Yang 等[28]为了降低阀门的地震响应,在阀中增加了一个阻尼约束系统。

地震的三要素为时间、震中和震级,它们的值的不同,球阀所受的影响也会不一样。赵飞等[29]研究

了对不同时间、震中和震级的球阀的动态响应分析,结果表明中三要素中时间对球阀的应力和形变的影响程度最大。此外, Ferreira 等[30]对地震时球阀稳态和非稳态条件下进行仿真,数据分析表明,球阀在稳态条件下的响应不仅取决于阀的几何形状和关闭百分比,还与流量状态有关。

目前对于球阀的谐响应的分析主要集中在分析在地震中的球阀是否稳定,常用等效静力法和反应谱法,这两种方法都是将地震载荷等效为静载荷加载到阀门上,最终求出阀门的地震响应,但这两种方法都忽略了地震动三要素之一的持时对阀门的影响。故现在学者大多都采用一种瞬态动力学分析方法—时程分析法,可以更准确的计算出球阀在地震中瞬时的应力变化和变形,对应力危险区域和应变过大区域进行定量分析且该方法能够分析出球阀的弹塑性特性,是一种较为全面谐响应仿真计算方法。

4.2. 海底球阀谐响应研究

相对陆上球阀,海底球阀会受到海流力、海浪力,地震等多种外载荷的影响。因此研究海底球阀的谐响应也是有必要的。在研究谐响应分析时一般都会进行模态分析,模态分析是谐响应分析的基础,常规的模态分析都是在空气中进行的,而针对海底球阀可以运用 ANSYS Workbench 中扩展模块 Acoustic Extension 对其进行湿模态分析,该分析相对更为精准,考虑了液固耦合作用对模态的影响[31][32][33]。对此,不少学者研究了海底球阀地震动力响应。张希恒等[34]利用 ANSYS 的谐响应分析模块探究了 600 m 水深处海流力作用下(350 m 水深以上不考虑海浪力)球阀管线系统动力响应分析。黄婉茹[35]对深海球阀进行湿模态分析,利用有限元软件对其在外部压力和地震载荷下进行静力学分析,评估深海球阀的抗震性能。

除了考虑深海球阀本身的结构对地震的响应,海底球阀组成管线系统的放置方法和位置对地震的响应分析也有所影响。Datta 等[36]建立了海底埋地管路和海床表面管路在地震下进行响应对比分析。李宏刚[37]探究了深海球阀管线系统不同的悬跨长度和支撑方式对地震响应的影响。李杨[38]探究了管道外压、悬跨长度、管道椭圆度及管道径厚比,各个因素对管道抗震的影响程度。

此外,海流力和海浪力都是简谐载荷。随着水深的增加,海流力会逐渐增加,而海浪力会随着水深的增加迅速的衰减。因此球阀在深海底时,海浪力可以忽略不记,而球阀浅海时则需要考虑海流力的存在[39]。目前对浅海球阀的研究还不够深入,浅海需要考虑海流力对球阀的影响。未来研究波浪、海流和波流共同作用力对浅海球阀产生影响,探究波浪对浅海球阀的动力响应分析也十分有价值,可以为浅海球阀的设计提供具有参考的指导意见。

5. 流通能力研究

球阀的流通能力是指在正常的工作条件下,球阀流过的流体的最大流量。在球阀的日常工作中流量的过大或过小会对系统安全性产生影响。过高的流量可能导致管道破裂、设备过载或其他危险情况,而过低的流量可能导致系统无法正常运行或增加系统故障的风险。因此在阀门的设计、选型和使用过程中,阀门流通能力的计算是非常重要的。阀门的压力损失、流量系数和流阻系数是衡量流体管路流通能力的重要参数,它们的值的大小直接影响到整个管路系统使用效果和安全性能[40]。

球阀管路中的流量系数是反映管道流通能力的重要指标,流量系数 C_v 由众多参数决定,计算公式为:

$$C_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}}$$

其中 $Q = SV$

式中: Q 为体积流量, ρ 为介质相对水的密度, ΔP 为阀前和阀后压力的差值, S 为截面面积, V 为水流速度。

为此,针对流道面积的变化,吴奈勋等[41]在 CFDsgin 中进行数值模拟,研究了在不同球阀阀芯开度下流量系数的变化规律,流量系数随球阀的开度而逐渐增大,随球体的通孔直径先变大后变小。对于流速、压差及启闭速度对流通性能的影响规律,潘强等[42]探究了不同流速下流量系数的变化情况,速度越大流量系数越大,但随着速度的变化流量系数会趋于一个稳定值,因为流量系数是管路的固有特性。戈鹏飞等[43]探究在球阀开度大小与压差大小与流量系数变化的相互关系。Guangfei Ma 等[44]进行瞬态数值模拟探究了不同启闭速度下流量系数和阻力特性的变化情况。

优化球阀内部参数也是改善流通特性的重要方式,特别是对于阀芯的优化。例如,孙丰位[45]对 V 型球阀的球冠半径、V 形开口的大小和开口的位置等,进行参数优化,使不同开度下的流量系数符合百分百流量特性的要求。Zhe Liu 等[46]通过数值模拟研究了 V 型球阀不同 V 口锥角下的瞬态调节性能和内部流量特性,发现锥角显著影响流速、压力和流量系数。王虎斌[47]基于遗传算法对三通调节球阀节流盘线型进行优化,得到新的开口型线,提高了流通能力。

广大学者对于球阀的流通能力的研究主要集中在球阀参数变化对流量系数和流阻系数的影响和不同工况下阀门流动能力的变化规律的研究。目前,阀门的材料和涂层对流通能力影响这方面的研究较少,这也是未来值得研究和关注的方向。

6. 水锤现象研究

流体突然停止或改变流动方向而产生的瞬时压力波动,这种现象称为水锤现象[48]。球阀在工作时具有调节流体流量和阻断流体流动的作用。随着球体的转动,流体的流通面积也在发生变化。当阀门突然关闭时或当管道中的流速突然改变,水锤现象通常会出现。水锤现象频繁发生会对球阀产生影响破坏,严重时会导致管道破裂造成流体泄露,产生经济损失[49]。此外,在供水系统中水锤现象的发生会使水质下降。因此,球阀水锤现象的分析研究一直都是一个热点。

随着计算机技术的发展,水锤的计算分析方法也不断的发展。从一开始的解析法,图解法发展到现在的最为成熟的数值算法[50]。数值算法中隐式特征线法,有限体积法等和特征线法都能得到接近实际实验的结果。在日常利用仿真软件研究和计算时有限体积法是首选,有限体积法能极大的保证质量方程和动量方程的完整性[51]。

有限体积法中水击过程的控制方程如下所示:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + J = 0$$

式中: H 为测压管水头; t 为时间; V 为流体的速度; X 为管道的长度坐标; a 为压力波速; g 为重力加速度; J 为单位质量管道的摩擦力。

水锤现象的产生是瞬时的,所以研究球阀管路系统在开、关阀期间的流场的瞬态变化的研究尤为重要。张红艳[52]采用 Fluent 滑移网格和 udf 技术对球阀开、关阀过程中的不同时间的瞬时流场变化和水锤压力进行计算,分析其相互之间的变化规律,流速最大时,水锤压力达到最大。陈亚飞等[53]针对球阀关闭过程的前 3 s 进行深入数值计算分析,得到了水锤压力的峰值和谷值及阀前阀后的压力衰减情况,并利用经典水锤方程和特征线法进行了验证。

有研究者通过改进球阀的操作方式和控制策略达到抑制水锤的产生的目的。Han Y [54]提出通过延长启闭时间和匀速关闭阀门可以减少最大水锤压力并通过仿真证明了该措施能减弱水锤效应的影响。彭利坤等[55]采用理论计算、仿真和实验相结合的方式研究出先快后慢的两阶段线性关阀方式相比单线性关

具有更好的防护水锤现象的效果。同时,外国研究者 Ferrante [56]通过实验验证间隙性供水可以减少水锤在球阀管路的发生。

管路直径、管路长度、初始流速、两端压差、阀门的开度等参数对水锤的影响也较大。刘渊铭[43]通过数值模拟探究了管路长度、管路直径及管路流速对水锤的影响规律,通过减少管路长度和初始流速,增大管路直径可以减轻水锤对管道的影响。Xu 等[57]总结了球阀开度水锤的影响,模拟了球阀不同开度下的水锤现象,在 45°时最大流速出现,水锤压力也最大。Andrade MA [58]利用人工神经网络算法寻球阀在输水管道中的最佳尺寸和位置,减少水锤对管路的影响。

结合近几年来看对于抑制水锤方法的研究大部分都集中在启闭球阀的控制策略和启闭速度。这些研究虽然能有效的减轻水锤对管路的影响,但是它的实现相对不易,需要准确的控制手段,成本较高。未来可以从管道材料或阀芯结构入手,开展相关研究,从根源上抑制水锤效应。

7. 空化特性研究

球阀管道系统在运行的过程中会出现流量过大、压力降快速变化和温度突然升高等情况,在这些情况下空化现象极易产生,尤其是在输水管路中[59]。空化是指在液体管路流动的过程中,流体速度突然增大或压力突然急剧变化,使得液体局部的压力低于液体饱和压力,液体快速汽化形成气泡,这些气泡在流动到高压区域时突然发生爆裂,对管道表面造成巨大冲击[60]。空化发生球阀的性能就会下降,工作效率降低,内部元件容易冲击,发生损坏,并且会产生振动,振动将影响相邻管件的连接、密封面的配合,导致球阀发生泄露。因此,空化现象是一种安全隐患,应予防止或减轻。

进行空化模拟需要选择空化模型,目前普遍常用的模型下表 2 所示。

Table 2. Common simulation cavitation models

表 2. 常用仿真空化模型

空化模型	应用场景	优点
Singhal 全空化模型	只适用于单一的空化过程	考虑了气泡相变过程的阻力和表面张力
Schnerr-Sauer 空化模型	不考虑不可凝气体的影响	能准确模拟空化的每一个阶段
Z-wart 空化模型	重现空化流动小尺度现象	稳定性更强,收敛快

对空化气蚀的影响研究主要关注点在阀芯部分,通过数值仿真探究空化气泡的分布情况及外部条件(流速、压差和开度等)对气泡分布的影响规律。毛伟[61]利用仿真中的 Mixture 混合模型和 Schnerr-Sauer 空化模型探究了 V 型球阀阀芯气泡的分布情况及压差对空泡数量的影响。张立强等[62]利用 Z-wart 空化模型研究了球阀开度在 40%、60%、80%的阀内气体体积分数分布,总结了不同开度下对空化程度的影响规律。刘景斌等[63]分析了不同流速下阀芯气体体积分数分布情况。

优化球阀阀芯内部结构、在阀芯表面增加节流孔套和阀后增加节流孔板都是减轻或避免空化对阀门的重要手段。毛伟[64]为了减轻空化程度,将阀芯设计成弧度过渡的形式,并通过仿真进行了验证。曹留帅等[65]对球阀阀座进行改进,对阀座锥角处进行倒圆,减少了空化现象的发生。在 Yaghoubi 等[66]提出在阀芯表面增加节流孔套其结构如图 4 所示,通过数值分析发现一层或两层的挡板能阀芯降低了空化的强度,并延迟了空化的发生。Qing [67]在球阀管路中增加节流孔板进行仿真并设计实验,验证了增加节流孔板对空化的抑制作用。

研究人员对球阀中空化现象的形成和发展机理进行了深入研究。通过数值模拟、实验测试,揭示了液体流动速度、压力变化、液体性质以及球阀设计参数等因素对空化的影响。同时提出了一系列的空化

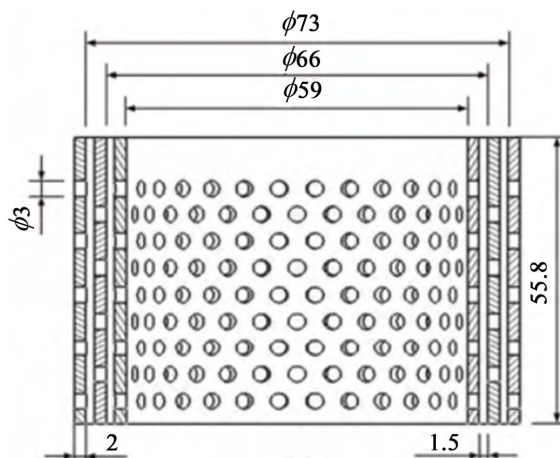


Figure 4. Orifice sleeve

图 4. 节流孔套

抑制技术，球阀空化研究正处于不断深入的阶段。然而，现阶段对球阀空化的研究重点还是集中在球体部件，对其他部位的气蚀研究较少，未来可以拓展研究的方向。此外，未来减少空化影响的措施主要关注点应该是球阀本身结构优化分析，此方法是最直接且从根源上抑制了空化现象的发生。

8. 冲蚀磨损研究

阀门被称为管路运输的“咽喉”，对系统的安全运行起着至关重要的作用。球阀在频繁的启闭和长期的使用过程中，不仅传输介质本身在高速流动时会对球阀内部产生冲击和摩擦，而且介质中携带的杂质也会对球阀内部造成冲蚀磨损。这种磨损通常发生在介质流经狭窄通道或流道变窄处，如阀座、阀芯、密封表面等位置如图 5 所示。因此为确保其稳定运行，对球阀进行冲蚀磨损研究已成为重要的研究方向。



Figure 5. Physical image of erosion and wear

图 5. 冲蚀磨损实物图

目前对于冲蚀磨损的数值模拟研究，主要采用流体仿真软件 Fluent 研究气固、固液两相流或气固液三相流[68]。采用的数学模型为 DPM 模型和 DEM 模型。DPM 是一种比较原始的离散相模型，不考虑颗粒之间碰撞及体积，适用于流体中的颗粒物比较少的计算。而 DEM 能真实的跟踪每一个颗粒的运动，包括颗粒间的碰撞和颗粒的旋转。DEM 的计算精度相比于 DPM 较高。

学者们通过仿真手段模拟出阀内两相流流场特性及球阀冲蚀磨损的分布。王佳琪等[69]利用 DPM 模型模拟了 V 型球阀内固液两相流的流动特性，得到了颗粒的运动轨迹图和冲蚀磨损的分布情况。张道军等[70]采用 DEM 模型对球阀内气固两相流场中的固相颗粒的冲蚀行为进行数值仿真，等发现了球阀受冲

蚀最严重的部位是阀芯和阀座。

有些研究工作者对不同因素(不同开度、流速、颗粒粒径、颗粒浓度和冲蚀角度等)对冲蚀磨损影响进行了研究,李春等[71]对球阀气固两相流的冲蚀磨损进行模拟,分析了不同气体速度、球阀开度、质量流率和不同粒径下的球阀冲蚀磨损情况和冲蚀率变化规律。Sarker [72]等对两种不同悬浮颗粒浓度、四种不同角度球位、三种粒径和两种不同颗粒浓度下球阀的冲蚀率的影响进行了探究。有些学者在这方面进行了更深入的研究,探究了各因素之间的相关关系,其主要用到的统计学分析方法有响应面法、遗传算法、相关分析和正交实验法等。彭东华等[73]开展了不同因素下冲蚀磨损变化响应曲面分析,其分析流程如图6所示,分析了冲蚀角度、粒径和流速等及各因素相互作用对球阀冲蚀的影响。

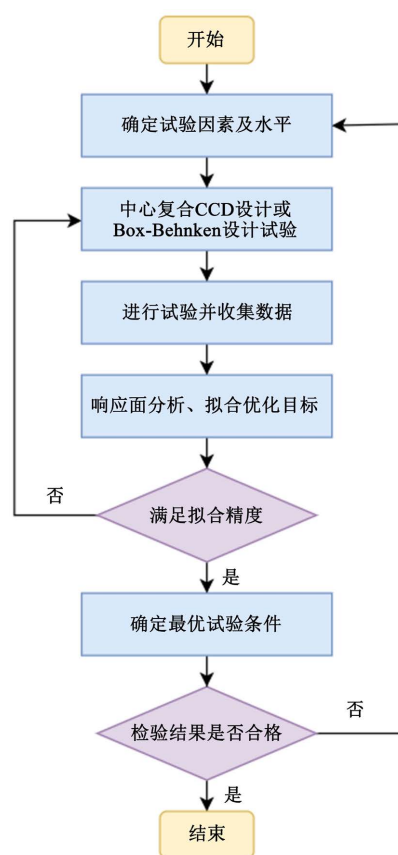


Figure 6. Response surface methodology process

图6. 冲蚀磨损实物图

此外,探究如何提高球阀的抗冲蚀能力也是研究球阀冲蚀磨损的一大热点。Xu等[74]研究球阀的放置方法不同对球阀冲蚀的影响,找出了放置方法从垂直变为水平放置时会降低颗粒的冲蚀效果。Karan等[75]提出了应用冲洗端口和模块化阀门的措施来提高球阀抗冲蚀能力。刘先冬[76]对阀座结构进行了结构优化,减少了冲蚀磨损对密封性能的影响。施宇恒[77]提出添加缓蚀剂和涂上防冲蚀的涂层来缓解冲蚀磨损。

目前,但对冲蚀磨损的研究主要集中在球阀内部部件,对于冲蚀对密封效果的影响方面的研究不多。在围绕颗粒不同形状、冲蚀过程中电化学产生的腐蚀也是可供参考的研究方向,同时可以研究球阀的冲蚀、电化学腐蚀、冲刷等各类损伤现象交互作用。

9. 总结与展望

总结了当前国内外球阀数值仿真的相关研究, 主要内容包括球阀结构的合理设计、密封性能的计算、动力响应的预测、流通能力的评估、水锤效应的分析、长期运行下球阀的汽蚀空化损伤和冲蚀磨损各方面的研究, 得出以下结论与展望:

1) 关于球阀结构强度仿真: 球阀的结构强度仿真研究的重心是球阀在不同工况下受到的压力分析、应力情况分析以及材料强度分析。另外, 还需完善球阀启闭过程中瞬态研究理论和仿真方法: 在球体启闭的过程中除了阀杆与球体会产生接触应力, 阀座与球体之间也会产生接触应力且球体在运动时产生惯性载荷, 同时流体对固体的冲击力, 这些都是进行后续研究需要考虑的。

2) 关于球阀密封性能仿真: 研究密封问题本文结合数值模拟从密封比压计算和密封热固耦合这两个方面出发。介绍了比压的计算方法及影响其大小的局部参数且一些新研究的球阀密封结构。对于密封热固耦合方面总结了热固耦合研究的一般仿真研究内容, 强调了实验对于仿真研究的重要性, 并提出如何用较低的成本, 建立超高低温的实验环境是未来研究的方向。

3) 关于球阀谱响应仿真: 本文主要对于陆地球阀和海底球阀地震时的动力响应进行分析。针对陆地球阀本文介绍了等效静力法、反应谱法和时程法在地震时在谱响应分析的运用, 并分析了它们的优劣势。而后, 提出球阀在浅海会受到海浪的影响, 探究波浪对浅海球阀的动力响应分析也十分有意义, 也是一个不错的研究方向。

4) 关于球阀流通性能仿真: 球阀流通特性主要通过流量系数来衡量, 流量系数与体积流量、阀前后压差、流速等有关。研究人员探究了各参数的变化对流量系数的影响规律, 并介绍了改进流通特性的一些手段, 特别是对阀芯的优化。未来可以加强球阀材料和涂层对流通性能的影响的研究。

5) 关于球阀水锤现象仿真: 对水锤的计算方法发展进行了简要的说明, 分析了水锤产生的原因及危害, 总结了抑制水锤的一些方法。主要是通过控制球阀的启闭过程, 但主动控制存在技术难度高、成本较高的问题, 因此, 更深入的开展水锤效应研究, 探究新的抑制方式, 如材料的选择或管道内部结构进行改进, 在降低成本的同时从根源上抑制水锤现象的产生。

6) 关于球阀空化和冲蚀特性仿真: 本文着重介绍了球阀的空化侵蚀和冲蚀磨损, 明确了发生空化和冲蚀损伤较严重的部位。通过优化结构参数、介质参数等减少球阀损伤的影响, 为后续球阀的抗侵蚀设计提供理论基础。球阀损伤形式有很多, 它们之间相互影响, 相互促进。因此, 后续可以研究球阀的冲蚀、腐蚀、冲刷等各类损伤现象的交互作用。

参考文献

- [1] Han, C.J., Li, D.B. and Liu, Y. (2011) The Strength and Sealing Analysis of High Pressure Ball Valve for Natural Gas. *Advanced Materials Research*, **233-235**, 2816-2819. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.2816>
- [2] Karan, S. (2018) Pipeline Valves Technology, Material Selection, Welding, and Stress Analysis. The Pressure Vessel and Piping Division of ASME, Bellevue, 297-293.
- [3] Ferreira, J.P.B.C.C., Martins, *et al.* (2018) Ball Valve Behavior under Steady and Unsteady Conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, **144**, 202-204. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001434](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001434)
- [4] 曾和友, 李铁钉, 雷波, 等. 油气管道球阀结构设计改进及性能试验研究[J]. 流体机械, 2023, 51(10): 18-23, 48.
- [5] 聂君锋, 张海泉, 王鑫, 等. 核级氦气隔离球阀泄漏模式分析及结构优化[J]. 阀门, 2023(3): 328-331.
- [6] 易先中, 姚治明, 周元华, 等. CD-GF 型钻井球阀阀体的力学特性分析[J]. 石油机械, 2019, 47(9): 23-29, 36.
- [7] Tsai, C.C., Chang, C.Y. and Tseng, C.H. (2004) Optimal Design of Metal Seated Ball Valve Mechanism. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **26**, 249-255. <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0342-3>
- [8] 邵力平, 胡建田, 李永国, 等. 基于长输管线用全焊接球阀的有限元强度分析[J]. 阀门, 2022(6): 442-446.
- [9] 谷帅坤, 张宇航, 付延河, 等. 钛材球阀静力有限元分析[J]. 山西建筑, 2023, 49(3): 78-82.

- [10] Sotoodeh, K. (2023) Case Study of Finite-Element-Analysis-Based Machining of Forging Defect in Subsea Ball Valve. *Safety in Extreme Environments*, **5**, 69-78. <https://doi.org/10.1007/s42797-023-00070-y>
- [11] Kim, N.-H., Byeon, J.-H. and Lee, K.-H. (2017) Shape Optimization of Ball Valve for High Temperature. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **18**, 15-20. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.1.15>
- [12] Zolfagharnasab, M.H., Salimi, M., Zolfagharnasab, H., Alimoradi, H., Shams, M. and Aghanajafi, C. (2021) A Novel Numerical Investigation of Erosion Wear over Various 90-Degree Elbow Duct Sections. *Powder Technology*, **380**, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.11.059>
- [13] Lin, Z., Sun, X., Yu, T. and Zhang (2020) Gas-Solid Two-Phase Flow and Erosion Calculation of Gate Valve Based on the CFD-DEM Model. *Powder Technology*, **366**, 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.050>
- [14] Huang, S., Tang, Z., Huang, J., Ou, C. and Hui, Z. (2022) Investigation of Influencing Factors of Wear in a Sandblasting Machine by CFD-DEM Coupling. *Particulate Science and Technology*, **40**, 838-847. <https://doi.org/10.1080/02726351.2021.2018531>
- [15] 陆怡, 查涵清, 姚润盐. 特大口径全焊接球阀的密封性分析及结构改进[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 441-445, 455.
- [16] 李清, 张猛, 吴松勇, 等. 深海球阀阀座密封性能分析与优化[J]. 润滑与密封, 2019, 44(5): 98-103.
- [17] Yu, R., *et al.* (2023) Study on the Design of Ball Valve Based on Elastic Ring Valve Seat Structure and Fluid Characteristics and Fatigue Strength. *Flow Measurement and Instrumentation*, **89**, Article ID: 102302. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102302>
- [18] 郎晨旭, 何世权, 刘帅帅, 等. 基于热固耦合的 LNG 低温球阀阀座密封特性分析[J]. 化工机械, 2023, 50(4): 523-527.
- [19] 杨刚. 超低温球阀主密封副性能研究及热力耦合分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [20] Öchsner, A. and Altenbach, H. (2020) Structural Analysis by Finite Element Method in Ball Valves to Improve Their Mechanical Properties. Springer International Publishing AG, Berlin, 175-185. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20801-1_13
- [21] 陈嘉哲, 余晓明, 陆颖. 基于 Workbench 的球阀数值模拟分析与改进[J]. 能源工程, 2019(5): 40-44.
- [22] Lin, Z.H., Li, J.-Y., Jin, Z.-J. and Qian, J.-Y. (2021) Fluid Dynamic Analysis of Liquefied Natural Gas Flow through a Cryogenic Ball Valve in Liquefied Natural Gas Receiving Stations. *Energy*, **226**, Article ID: 120376.
- [23] 戴明. LNG 超低温浮动球阀密封性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2022.
- [24] 张文博. 阀门密封材料低温特性实验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- [25] Dantulwar, N.B., Maske, R.G. and Patel, J.T. (2017) Finite Element Analysis of Ball Valve Assembly for Earthquakes. *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*, **5**, 1460-1467.
- [26] 吴胜, 何庆中, 杨繁隆, 等. 基于时程分析法的全焊接球阀抗震特性分析[J]. 流体机械, 2020, 48(4): 18-23.
- [27] Jha, S., Roshan, A.D., Pisharady, A.S., *et al.* (2017) Seismic Margin Assessment for Earthquake beyond Design Basis on Simplified Practical Approach. *Nuclear Engineering and Design*, **323**, 329-337. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.026>
- [28] Yang, Z., Xie, Q., Zhou, Y., *et al.* (2018) Seismic Performance and Restraint System of Suspended 800 KV Thyristor Valve. *Engineering Structures*, **169**, 179-187. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.022>
- [29] 赵飞, 黄波, 何庆中, 等. 全焊接管线球阀抵抗地质灾害能力研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(17): 182-188.
- [30] Ferreira, J.P.B.C. (2018) Ball Valve Behavior under Steady and Unsteady Conditions. *Journal of Hydraulic Engineering*, **144**, Article ID: 04018005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001434](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001434)
- [31] Kalliontzis, C. (1998) Numerical Simulation of Submarine Pipelines in Dynamic Contact with a Moving Seabed. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**, 465-486. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199805\)27:5<465::AID-EQE737>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199805)27:5<465::AID-EQE737>3.0.CO;2-X)
- [32] Kershenbaum, N.Y., Mebarkia, S.A. and Chol, H.S. (2000) Behavior of Marine Pipelines under Seismic Faults. *Ocean Engineering*, **27**, 473-483. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(98\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00079-1)
- [33] Figarov, N.G. and Kamyshev, A.M. (1996) Seismic Stability Offshore Pipelines. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, Los Angeles, 26-31 May 1996, 477-481.
- [34] 张希恒, 王雁, 李宏刚. 深海阀门管线悬跨长度及湿模态涡激振动分析[J]. 甘肃科学学报, 2019, 31(2): 102-106.
- [35] 黄婉茹. 深海阀门载荷研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [36] Datta, T.K. and Mashaly, E.A. (1998) Seismic Response of Buried Submarine Pipelines. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, **100**, 208-218. <https://doi.org/10.1115/1.3231384>

- [37] 李宏刚. 地震载荷作用下动水压力对深海阀门管线系统的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [38] 李杨. 地震作用下海底管道动态响应及屈曲失效研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [39] 王雁. 波浪力和海流力及共同作用下阀门管线系统动力响应分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [40] 陈振兴, 李海聪, 孙丰位, 等. 全通径及缩颈球阀流通特性分析[J]. 通用机械, 2019(5): 41-43.
- [41] 吴奈勋, 潘强, 陈晓明. 核级球阀流通性能的仿真分析和研究[J]. 液压气动与密封, 2023, 43(3): 17-21.
- [42] 吴奈勋, 潘强, 戴彬. 影响球阀流通性能指标的计算参数研究[J]. 设备管理与维修, 2023(5): 30-33.
- [43] 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.
- [44] Ma, G., et al. (2021) Effect of Variable Speed Motion Curve of Electric Actuator on Ball Valve Performance and Internal Flow Field. *Advances in Mechanical Engineering*, **13**, 168-170. <https://doi.org/10.1177/16878140211028003>
- [45] 孙丰位. V形调节球阀阀芯结构与等百分比流量特性分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [46] Awad, H. and Parrondo, J. (2020) Hydrodynamic Self-Excited Vibrations in Leaking Spherical Valves with Annular Seal. *Alexandria Engineering Journal*, **59**, 1515-1524. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.033>
- [47] 王虎斌. 基于遗传算法的三通调节球阀节流盘型线优化研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [48] 胡荣霞, 李金海. 泵系统中水锤与阀控制的研究综述[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(12): 816-818, 824.
- [49] 宋生奎, 才建. 管道瞬变流动主动控制策略研究综述[J]. 管道技术与设备, 2006(4): 1-4.
- [50] 曾强, 马贵阳, 江东方, 等. 液体管道水击计算方法综述[J]. 当代化工, 2013(8): 1189-1193, 1197.
- [51] Saemi, S., Raisee, M., Cervantes, M.J., et al. (2019) Computation of Two- and Three-Dimensional Water Hammer Flows. *Journal of Hydraulic Research*, **57**, 386-404. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1459892>
- [52] 张红艳, 梁潇. 球阀关闭过程对水锤效应的影响分析[J]. 力学研究, 2021, 10(4): 230-236.
- [53] 陈亚飞, 顾卫国, 王德忠, 等. 球型调节阀关闭水锤效应的试验研究与数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(10): 1027-1032.
- [54] Han, Y., Shi, W., Xu, H., Wang, J. and Zhou, L. (2022) Effects of Closing Times and Laws on Water Hammer in a Ball Valve Pipeline. *Water*, **14**, 14-16. <https://doi.org/10.3390/w14091497>
- [55] 彭利坤, 屈铎, 许文奇, 等. 基于水击防护的球阀关闭规律研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(21): 41-45, 86.
- [56] 刘渊铭. 基于液压管路阀门关闭规律的水锤抑制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [57] Ferrante, M., Rogers, D., Casinini, F. and Mugabi, J. (2022) A Laboratory Set-Up for the Analysis of Intermittent Water Supply: First Results. *Water*, **14**, Article No. 936. <https://doi.org/10.3390/w14060936>
- [58] Xu, W.Q., Peng, L.K. and Qu, D. (2017) Research on Water Hammer Phenomenon during Ball Valve Closing Process Based on CFD. *Machine Tool and Hydraulic*, **45**, 170-174.
- [59] Andrade, M.A., Choi, C.Y., Lansley, K. and Jung, D. (2016) Enhanced Artificial Neural Networks Estimating Water Quality Constraints for the Optimal Water Distribution Systems Design. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **142**, Article ID: 04016024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000663](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000663)
- [60] 毛伟. V型球阀流阻特性及空化特性分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [61] Zhang, G., et al. (2023) Effect of the Opening Degree on Evolution of Cryogenic Cavitation through a Butterfly Valve. *Energy*, **283**, 128-129. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128543>
- [62] 张立强, 焦喜娟, 严浩, 等. V型调节球阀内部流场分析及空化预测[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(5): 39-43.
- [63] 刘景斌, 刘振明, 吴杰长, 等. 喷油器动边界条件下球阀空化效应数值分析[J]. 内燃机学报, 2022, 40(1): 62-70.
- [64] 曹留帅, 刘振明, 万德成. 船用柴油机电控喷油器球阀及球阀座空化效应数值模拟研究[C]//《水动力学研究与进展》编委会, 中国力学学会, 中国造船工程学会, 集美大学. 第三十一届全国水动力学研讨会论文集(上册). 北京: 法律出版社, 2020: 9.
- [65] Yaghoubi, H., Madani, S.A.H. and Alizadeh, M. (2018) Numerical Study on Cavitation in a Globe Control Valve with Different Numbers of Anti-Cavitation Trims. *Journal of Central South University*, **25**, 2677-2687. <https://doi.org/10.1007/s11771-018-3945-y>
- [66] Yang, Q.J., Aung, N.Z. and Li, S.J. (2015) Confirmation on the Effectiveness of Rectangle-Shaped Flapper in Reducing Cavitation in Flapper-Nozzle Pilot Valve. *Energy Conversion and Management*, **98**, 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.096>
- [67] 赵梓彤. 高可调比异型球阀及其抗气蚀-冲蚀特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.

-
- [68] 李端晨. 天然气集输管道球阀气液固冲蚀特性研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [69] 王佳琪, 何世权, 李力, 等. 基于 DPM 模型 V 型球阀固液两相流冲蚀研究[J]. 流体机械, 2021, 49(11): 81-85.
- [70] 张道军, 蒋红飞, 李威, 等. 耐磨球阀冲蚀机理[J]. 阀门, 2022(3): 201-205.
- [71] 施宇恒, 李春, 王春生, 等. 考虑气固两相流的球阀冲蚀磨损失效研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 116-124.
- [72] Sarker, N.R., Breakey, D.E.S., Islam, M.A., *et al.* (2020) Performance and Hydrodynamics Analysis of a Toroid Wear Tester to Predict Erosion in Slurry Pipelines. *Wear*, **450-451**, Article ID: 203068. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203068>
- [73] 彭东华, 董绍华, 王志强, 等. 基于 DOE 分析的球阀密封面气固两相流冲蚀研究[J]. 石油机械, 2021, 49(5): 131-137.
- [74] Xu, B., *et al.* (2022) Experimental and Simulation Study of the Effect of Gravity on the Solid-Liquid Two-Phase Flow and Erosion of Ball Valve. *Advanced Powder Technology*, **33**, Article ID: 103416. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.103416>
- [75] Sotoodeh, K. (2022) Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) of Pipeline Ball Valves in the Offshore Industry. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **20**, 1175-1183. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00924-8>
- [76] 刘先冬. 液固二相流对球阀密封性影响的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [77] 施宇恒. 基于有限元法的天然气长输管道球阀冲蚀磨损研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2020.