

乳化液泵站回液断路阀失效分析与结构优化研究

苏贺旺

北京天玛智控科技股份有限公司，北京

收稿日期：2025年8月21日；录用日期：2025年9月18日；发布日期：2025年9月28日

摘 要

本文论述了回液断路阀在乳化液泵站系统中的作用，乳化液泵站回液系统中的回液断路阀是保障供液系统正常工作的关键元件，其阀芯卡滞、断裂及阀座气蚀等故障会严重影响整个泵站的可靠性与寿命。本文针对上述问题，首先深入分析了回液断路阀定向泄流、防倒灌和真空阻断三大核心作用及其失效后果。在此基础上，进行了关键参数的设计计算，包括基于背压需求和压力脉动的开启压力设定、阀口通径与流阻计算、以及针对冲击载荷的阀芯强度校核，提升阀的耐久性；采用二级节流结构，有效控制了节流压降，从根本上抑制了气蚀的产生，降低了泵站因该部件引发的故障停机时间，经济效益与安全效益显著，本研究为矿山高压液压系统设计和优化提供了参考。

关键词

回液断路阀，故障分析，强度校核，空化控制

Failure Analysis and Structural Optimization Research on the Return Liquid Circuit Breaker of the Emulsion Pump Station

Hewang Su

Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Aug. 21st, 2025; accepted: Sep. 18th, 2025; published: Sep. 28th, 2025

文章引用：苏贺旺. 乳化液泵站回液断路阀失效分析与结构优化研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 1126-1134.

DOI: 10.12677/me.2025.135126

Abstract

This paper discusses the role of the hydraulic check valve in the emulsion pump station system. As a critical component in the return circuit, the check valve ensures the normal operation of the fluid supply system. Failures such as spool sticking, fracture, and seat cavitation can severely affect the reliability and service life of the entire pump station. To address these issues, this study first provides an in-depth analysis of the three core functions of the check valve: directional drainage, backflow prevention, and vacuum blocking, along with the consequences of their failure. On this basis, key parameters are designed and calculated, including the cracking pressure setting based on backpressure requirements and pressure pulsation, the flow diameter and flow resistance calculation of the valve orifice, and the strength verification of the spool under impact loads to enhance durability. By adopting a two-stage throttling structure, the pressure drop across the throttle is effectively controlled, fundamentally suppressing cavitation and reducing pump station downtime caused by related failures. This improvement offers significant economic and safety benefits. The study provides a valuable reference for the design and optimization of high-pressure hydraulic systems in mining applications.

Keywords

Check Valve, Failure Analysis, Strength Verification, Cavitation Control

Copyright © 2025 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

矿用乳化液泵站是井下工作面液压动力的核心来源，其运行的稳定性至关重要。在泵站的卸载回路中，回液管路末端的断路阀(单向阀)虽是一个小型辅件，却承担着隔离液箱扰动、保障卸载阀平稳卸荷的关键功能[1]。然而，在长期的高压、大流量和压力脉动工况下，该阀的阀芯卡滞、断裂和阀座严重气蚀成为高发故障，引起泵站卸荷缓慢、能耗激增、柱塞密封等关键部件寿命骤降，维护成本高昂[2]。目前的研究与维护实践多集中于泵站主机或卸载阀本体，对回液断路阀这一“小部件”的系统性影响重视不足[3]-[5]，缺乏对其失效机理与根治方案的深入探讨。目前针对回液断路阀引起的故障分析，目前可分为两类，一种侧重于从系统中研究回液断路阀作用及失效原因，指出大流量持续液压冲击导致阀门故障的主要原因，但未给出仿真和实验过程[6]-[8]；另一种侧重于研究阀本身防气蚀机理和结构进行了大量的研究，阀芯开启瞬间，压力的瞬间变化将导致阀口处发生空化现象，进而造成巨大的压力冲击、高频噪声等问题[5]，可以采用节流槽、高压引流加节流、多级降压结构等方式降低空化现象[9][10]，但未对回液断路阀进行针对性验证。

本文旨在填补这一空白，通过理论分析、设计计算与抗失效优化，系统性地解决回液断路阀的顽疾，从而提升整个乳化液泵站系统的运行可靠性与经济性。基于 MT/T188.2 标准与流体动力学理论，建立开启压力设计公式，对阀芯的应力集中的薄弱部位增加圆角的设计，提升了阀芯的安全系数，回液断路阀采用二级节流结构，有效控制了节流压降，从根本上抑制了气蚀的产生，降低了泵站因该部件引发的故障停机时间，经济效益与安全效益显著，本研究为矿山高压液压系统设计和优化提供了参考。

2. 回液断路阀作用机理

回液断路阀在乳化液泵站系统中应用广泛，如在卸载回路中，卸载阀回液口与液箱之间设置有回液断路阀，如图 1 和图 2 分别为回液断路阀在泵站系统的液压图和回液断路阀在泵站的实物图，回液断路阀承担动态压力调节的关键角色，为通过双向流控实现三重核心功能：

- (1) 定向泄流与防倒灌：
卸载阀开启时，以低压损快速导出 0.5~2 MPa 回液，避免管路压力累积引发的卸载震荡液箱液面波动或外部扰动导致液箱压力瞬时高于回液管压力(如液箱泡沫堆积、液位突变)产生瞬时正压，阀芯快速响应切断倒灌路径，防止液箱流体倒灌入回液管；
- (2) 真空阻断：消除泵启动时回液管的负压抽吸，确保压力快速重建，同时，可以抑制脉动，吸收液箱液位突变引发的压力波动，防止卸载阀颤振；
- (3) 气蚀防御：阻断液箱气泡混入回液管，将卸载阀组气蚀概率降低 90%以上。

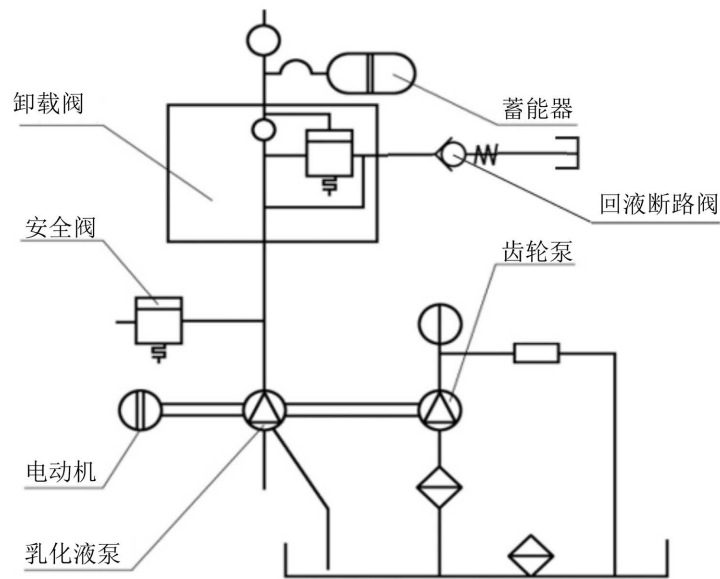


Figure 1. Hydraulic circuit diagram of the check valve in the pump station system
图 1. 回液断路阀在泵站系统的液压图



Figure 2. Photograph of the check valve in the pump station
图 2. 回液断路阀在泵站的实物图

3. 设计计算

回液断路阀的结构主要包括阀座、阀芯、弹簧、底座以及密封圈等，如图 3 为回液断路阀结构图，

阀芯与阀座之间一般采用锥密封结构，液体从阀座的入口到底座的出口单向流通。根据回液断路阀的作用，设计计算主要从开启压力、基本尺寸计算及流阻、阀芯强度等方面计算，具体如下：

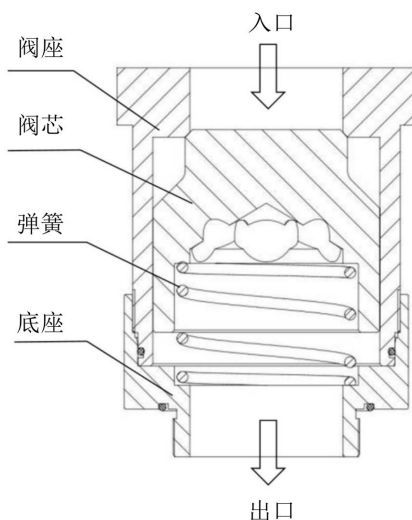


Figure 3. Structural diagram of the check valve
图 3. 回液断路阀结构图

3.1. 开启压力计算

目前回液断路阀的开启压力缺少相应的设计标准，根据回液断路阀的应用场景及要求设计。根据 MT/T188.2-2000 标准，回液管背压需 ≥ 0.05 MPa，避免压力低于乳化液饱和蒸汽压(0.002 MPa)引发空化， $P_{\text{被压}} = 0.05$ MPa；液箱压力波动补偿：液箱因泡沫堆积或补液冲击产生瞬时正压(实测 0.04~0.08 MPa)，开启压力需叠加此波动值，因此 $P_{\text{波动}} = 0.06$ MPa。脉动幅值补偿：卸载阀动作时压力脉动幅值实测为 0.03 MPa，需纳入开启压力设计， $P_{\text{脉动}} = 0.03$ MPa。

$$P_{\text{开启}} = P_{\text{被压}} + P_{\text{波动}} + P_{\text{脉动}} = 0.14 \text{ MPa}$$

3.2. 基本尺寸计算及流阻校核

计算影响回液断路阀通流能力的基本尺寸，如图 4 为回液断路阀尺寸示意图，锥阀密封直径 D_1 ，按圆形面积公式计算进液口过流面积为：

$$S_{\text{进}} = \frac{\pi D_1^2}{4} \quad S_{\text{进进}} = \frac{\pi D_1^2}{4} S = \frac{\pi D_1^2}{4} S_{\text{进进}} = \frac{\pi D_1^2}{4} S = \frac{\pi D_1^2}{4}$$

阀芯前端直径 D_2 ，阀座直径 D_3 ，则可以计算阀芯靠近进液口一侧的流道为环形腔通流面积，环形腔通流面积不低于进液口过流面积：

$$S_{\text{腔}} = \frac{\pi(D_3^2 - D_2^2)}{4} > A1$$

阀芯过液孔直径为 D_4 ，过液孔的数量为 n ，阀芯孔通流面积不低于进液口过流面积：

$$S_{\text{芯}} = n \frac{\pi D_4^2}{4} > A1. \quad S_{\text{芯}} = n \frac{\pi D_4^2}{4} > A1 S_{\text{芯}} = n \frac{\pi D_4^2}{4} > A1$$

流阻校核，首先建立回液断路阀的 Amesim 仿真模型，如图 5 为回液断路阀 Amesim 模型和仿真计

算，仿真在工程流量 1250 L/min 下，改变阀芯开度参数对流阻的影响，分析表明，阀芯开度是影响流阻的关键参数之一，在实际设计过程中，需要根据具体工况和要求选择合适的开度并校核验证。

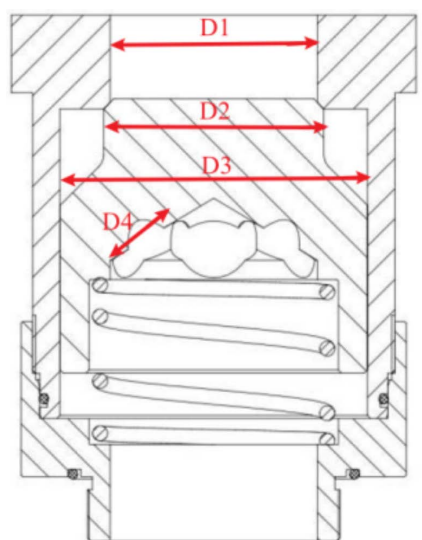


Figure 4. Dimensional schematic diagram of the check valve
图 4. 回液断路阀尺寸示意图

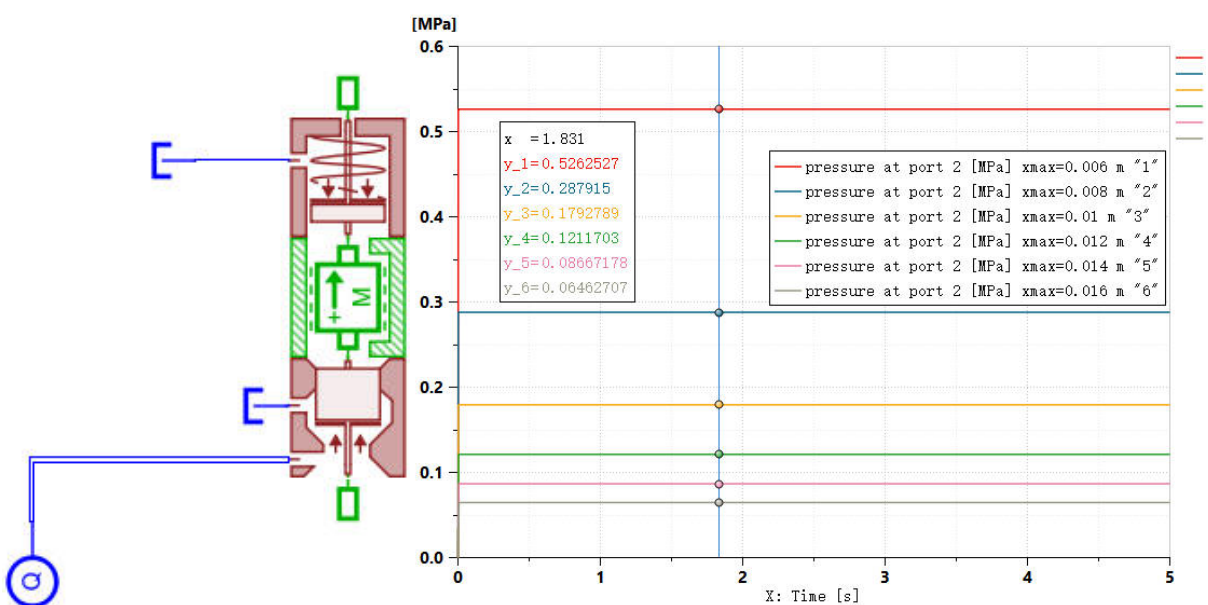


Figure 5. Amesim model and simulation of the check valve
图 5. 回液断路阀 Amesim 模型和仿真计算

3.3. 阀芯强度校核

结合回液断路阀的实际工况，建立阀芯的受力模型，如图 6 为回液断路阀网格划分和受力分析图，校核阀芯的强度，如图 7 和图 8 为优化前、后回液断路阀强度分析图，从图中可以看出，阀芯入口转角处和孔底尖角是应力集中的部位，并对薄弱部位针对性优化，通过在此处增加圆角，通过仿真可以明显看出，优化后回液断路阀的最大应力由 341 MPa 降低到 237 MPa，显著提升了阀芯的安全性。

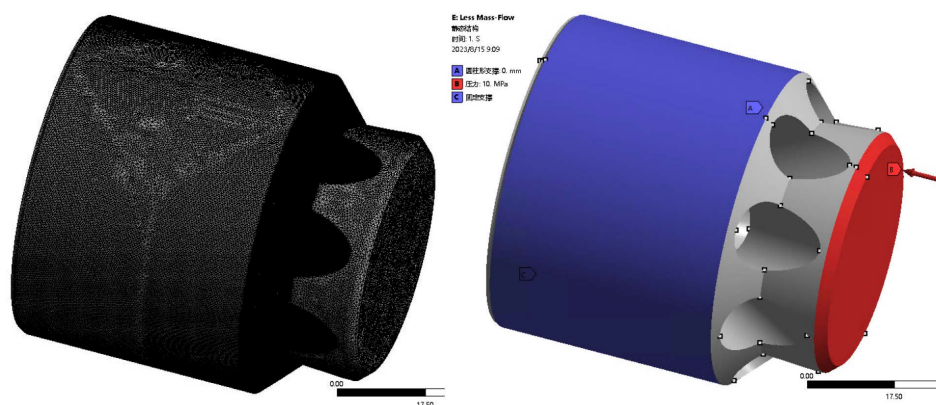


Figure 6. Meshing and force analysis of the check valve

图 6. 回液断路阀网格划分和受力分析

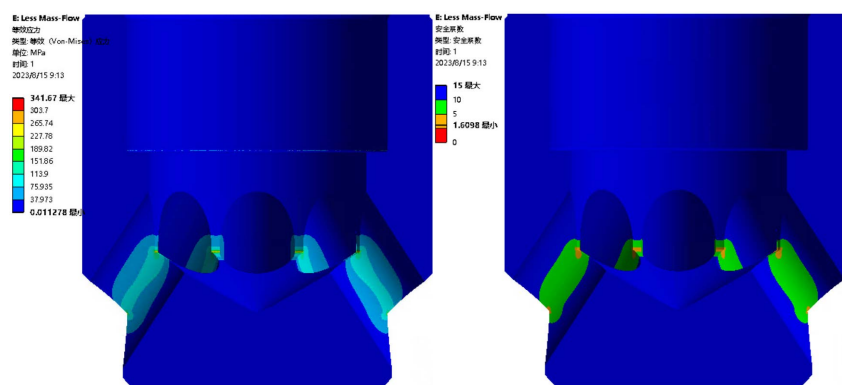


Figure 7. Strength analysis of the check valve before optimization

图 7. 优化前回液断路阀强度分析

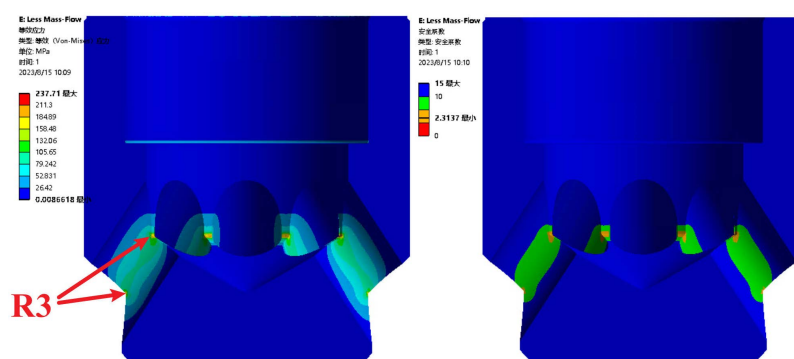


Figure 8. Strength analysis of the check valve after optimization

图 8. 优化后回液断路阀强度分析

4. 回液断路阀常见故障

4.1. 阀芯卡滞

在实际应用中, 阀芯与阀座之间可能出现卡滞甚至完全卡死的问题, 如图 9 为阀座导向面卡涩图, 将导致双向功能失效: 无法开启时, 导致泵站卸载阀的回液无法流至液箱、回液管压力逐渐累积, 卸载阀无法卸荷, 触发安全阀持续喷液、造成停泵影响生产; 阀芯无法关闭时, 液箱泡沫、气体倒灌形成气

液两相流，引发卸载阀气蚀。

故障排除：首先缓慢打开卸载阀上的球阀强制泄压，将故障的回液断路阀拆下更换；之后解体维修，检查导向部划痕，深度 $> 0.05 \text{ mm}$ 需更换阀座；为预防系统的金属碎屑等杂物导致阀芯卡滞，可在液管增设滤芯。



Figure 9. Diagram of sticking on the valve seat guide surface
图 9. 阀座导向面卡涩图

4.2. 阀芯断裂

阀芯强度设计达不到要求或者系统运行过程中的持续冲击引起的疲劳可能导致阀芯断裂，如图 10 为阀芯断裂图，阀芯断裂会导致两大连锁故障，第一种是卸载阀复位失效，回液背压 $> 0.5 \text{ MPa}$ ，卸载阀主阀芯无法回位，泵站持续高压运行触发安全阀频繁开启；其次是系统压力震荡，碎片在回液腔形成节流效应，引发压力脉动，间接对柱塞密封等造成影响。

故障排除：紧急切断电源并手动泄压，将断裂的阀芯和金属碎屑取出；增加阀芯强度并更换，如加大阀芯根部 R 角可提升可提升阀芯的安全系数。



Figure 10. Photograph of the fractured valve spool
图 10. 阀芯断裂图

4.3. 阀座气蚀

阀座气蚀是由于液体压力瞬间过低产生气泡，气泡破裂时冲击金属表面造成的。气蚀首先会把阀座光滑的密封面打成蜂窝状的麻点，导致阀门关不严，产生持续的泄漏，使回液断路阀的回液单向截止功

能失效，间接引起卸载阀等气蚀，如图 11 为阀座气蚀图。更严重的是，掉落的金属碎屑会混进液箱里，导致划伤阀和泵站磨损等系统故障。



Figure 11. Photograph of cavitation on the valve seat
图 11. 阀座气蚀图

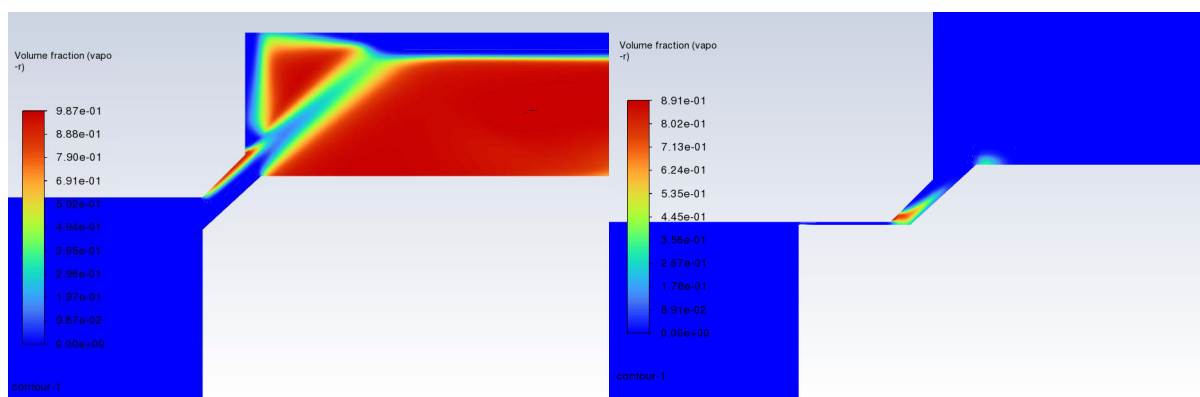


Figure 12. Simulation comparison: conventional check valve vs. two-stage throttling check valve
图 12. 普通回液断路阀与二级节流仿真对比



Figure 13. Prototype of two-stage throttling check valve
图 13. 二级节流回液断路阀样机

故障排除：对于气蚀初期，深度 $< 0.3\text{ mm}$ 的蚀坑，可用打磨平滑，恢复密封线连续性；如果发生严重气蚀，如深度 $> 0.8\text{ mm}$ 的蚀坑，必须更换阀座。如根本性解决，需对阀结构优化，如采用二级节流等

方式, 从根本减少气蚀发生, 在阀芯的入口处增加凸台, 与阀座配合形成二级节流结构, 通过二维仿真对比普通回液断路阀与二级节流结构的防气蚀效果(如图 12), 增加凸台的二级节流结构阀芯与阀座附近的气体最高体积分数由 98.7%降低到 87.1%, 尤其是气体分布区域大幅降低, 验证了二级节流结构对回液断路阀防气蚀的明显效果, 如图 13 为二级节流回液断路阀样机。

4.4. 弹簧断裂

弹簧断裂后, 卸载阀溢流时, 回液断路阀会产生较大冲击声, 缩短阀芯寿命; 阀芯无法复位, 存在液体倒灌风险; 断裂的弹簧导致管路系统污染等。

故障排除: 检查弹簧工作高度下的应力, 调整线径、节距等参数, 弹簧表面进行达克罗涂层处理, 有效抵抗腐蚀, 必要时更换高强度材料如 SUS631, 确保弹簧应力在合理范围内, 提高弹簧寿命。

5. 工业性实验

改进后的回液断路阀在陕西某煤矿进行工业性实验, 安装于 1250 L/min 乳化液泵卸载阀回液管路, 无故障使用时间已超过 6 个月, 目前仍在正常运行中, 相较改进前平均使用寿命 2~3 个月, 寿命提升一倍以上, 提高了回液断路阀的可靠性, 保证乳化液泵可靠运行, 提升了供液系统的可靠性, 减少设备停机时间。

6. 结论

本研究明确了回液断路阀“低压向导通、高压向闭锁”的双向工作机理是其核心功能。其失效(卡滞、断裂、气蚀)会直接导致卸载回路背压失稳, 不仅造成卸载阀动作异常, 更是引发泵站柱关键部件寿命缩短的间接原因。

通过设计计算体系完整, 建立了以防空化背压为基础, 兼顾系统压力脉动的开启压力计算模型, 为不同工况下的阀门选型与调试提供了理论依据。同时, 在阀芯入口转角处和孔底尖角的薄弱部位增加倒圆角, 降低阀芯的应力集中, 从设计源头预防了断裂风险。采用的二级降压阀芯结构有效控制了节流降压, 从根本上抑制了气蚀的产生。工业试验数据证明, 优化方案将断路阀的气蚀损伤显著降低, 阀芯断裂与卡滞等故障基本消除。

基金项目

北京天玛智控科技股份有限公司项目(500961)。

参考文献

- [1] 王晓凯. 乳化液泵卸载阀主阀失效机理分析[J]. 煤炭工程, 2022, 54(5): 120-124.
- [2] 刘磊. 高压大冲击流量条件下乳化液锥阀失效机理及关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
- [3] 段礼彬, 袁增卫. 回液断路阀流量冲击特性分析[J]. 煤矿机械, 2024, 45(1): 52-54.
- [4] 马壮, 王世强, 朱斌权, 等. 液压锥阀启闭过程及空化的研究[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(3): 36-41.
- [5] 刘磊, 赵继云, 张磊, 等. 高压大流量纯水液控单向阀冲击特性与气蚀损伤的关联性[J]. 液压与气动, 2023, 47(7): 55-63.
- [6] 康岩, 卢海承, 何勇华, 等. 影响电磁先导阀开启响应速率的关键参数分析[J]. 煤矿机械, 2025, 46(5): 79-83.
- [7] 陈远玲, 欧阳崇钦, 彭卓, 等. 节流槽结构参数对阀开启压力冲击及空化特性的影响研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(7): 50-56, 66.
- [8] 王涛, 李俊士, 孔祥凯. 基于 Fluent 的纯水溢流阀结构设计及优化[J]. 机床与液压, 2023, 51(23): 211-217.
- [9] 刘子晨, 马云飞, 刘乐璠, 等. 液压锥阀阀芯振荡空化现象数值模拟[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(7): 24-29.
- [10] 彭健, 何世权. 防空化调节阀特性分析与阀芯结构优化[J]. 液压与气动, 2020(1): 131-136.