

# 高压差阀门抗气蚀结构优化与流体动力学分析

王晓峰

石特阀门股份有限公司，河北 石家庄 050000

[摘要]在工业管路系统中高压差阀门主要承担着压力的控制流量调节相关职能，然而在具体的工况中，一旦出现气蚀现象，会引发一系列严重的问题，例如震动幅度加剧，导致阀门内部逐渐磨损，提高噪声水平，均会对系统的稳定性运行造成严重的影响，同时也会缩短阀门的使用寿命。因此，为了进一步提高高压差阀门抗气蚀性能，基于流体动力学的基本原理探讨阀芯、阀座及流道等关键结构的优化与设计思路，从而避免气蚀对阀门运行产生的严重干扰，旨在为高压差阀门抗气蚀结构设计提供基础理论参考。

[关键词]高压差阀门；气蚀；结构优化；流体动力学

DOI: 10.33142/ec.v8i11.18579

中图分类号：TE357

文献标识码：A

## Optimization of Anti-cavitation Structure and Fluid Dynamics Analysis for High Pressure Differential Valve

WANG Xiaofeng

Shite Valve Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** In industrial pipeline systems, high-pressure differential valves mainly undertake the functions of pressure control and flow regulation. However, in specific working conditions, once gas turbidity occurs, it can cause a series of serious problems, such as increased vibration amplitude, gradual wear and tear inside the valve, and increased noise level, all of which will have a serious impact on the stable operation of the system and shorten the service life of the valve. Therefore, in order to further improve the anti gas turbidity performance of high-pressure differential valves, based on the basic principles of fluid dynamics, this paper explores the optimization and design ideas of key structures such as valve cores, valve seats, and flow channels, in order to avoid serious interference from gas turbidity on valve operation, which provides a basic theoretical reference for the design of anti gas corrosion structures for high-pressure differential valves.

**Keywords:** high pressure differential valve; cavitation; structural optimization; fluid dynamics

### 1 概述

#### 1.1 研究背景

高压差阀门广泛应用于石油石化、电力能源、水利水电等行业，在这些行业的生产过程中，阀门经常承受较大的压力波动及高流速的冲击<sup>[1]</sup>。在阀门前后存在较大压力差的情况下，流体在阀门内部某些部位产生的压力将低于对应温度下液体的饱和蒸汽压，从而使流体中所含水分汽化产生大量气穴，它们随着介质流向高压区，在压力增高后被击碎，并产生很高的局部压强作用在阀门的内表面以及阀芯和阀座上，这种现象称为气蚀<sup>[2]</sup>。气蚀对阀门的破坏是逐渐发生的，它会使阀体内表面和阀芯、阀座受到冲刷腐蚀并脱落下来，造成阀门关闭不严和节流特性变坏<sup>[3]</sup>。还会导致管路系统的震动和噪音产生，甚至会导致系统故障的发生，影响到工业生产安全稳定的进行。因此对高压差阀门开展抗气蚀结构优化的研究是具有一定工程现实意义的。

#### 1.2 研究目的与意义

本文研究首先深入剖析了高压差阀门气蚀现象产生的流体动力学机制，在此基础上，结合具体的工况，提出

相应的阀门结构优化策略，通过本文的研究，能够充实与完善相关理论基础，进而为工程实践过程中优化设计阀门结构策略，提供有价值的理论参考，进一步提升高压差阀门的抗气蚀性能，确保系统的长期稳定高效进行，同时可降低工业生产过程中的设备维护成本。

### 2 高压差阀门气蚀产生的流体动力学机制

#### 2.1 气蚀现象的基本原理

气蚀是一个复杂的过程，其实质是在流体流动中随着压力的变化发生汽化和冷凝的现象。对于高压差阀来说，在流体流经阀节流口处时，由于通道截面积骤然减小，由流体力学连续性方程式及伯努利方程式可知，该处流体流速急剧增加，压力显著下降<sup>[4]</sup>。在流体中，当液体的压力降到该温度下的饱和蒸汽压值时，液体中的溶剂开始析出，并且有水蒸气蒸发产生大量的充满蒸汽的空隙即气泡，这是气蚀产生的初始阶段。

#### 2.2 高压差阀门内气蚀的发展过程

高压差阀门气蚀分四阶段：初生气蚀阶段，压力降至饱和蒸气压，仅有少量的微小气泡产生，影响不明显且难

检测。在发展气蚀阶段，压差逐渐增大，更多气泡聚集长大并破裂，阀门有轻微振动噪声，材料现微小侵蚀。在稳定气蚀阶段，压力场稳定，气泡产破动态平衡，冲击波强，振动噪声加剧，气蚀坑扩大，密封性能下降。在严重气蚀阶段，气泡的产生与破裂规模扩大，流场紊乱，振动噪声达峰值，材料剥落，调节准确度降低，出现严重故障影响运行<sup>[5]</sup>。

### 2.3 影响高压差阀门气蚀的流体动力学因素

造成和影响高压差阀门中气蚀产生的原因有很多，主要的因素有流体速度、压力及流道形状。流体的速度对气蚀产生有很大的影响，在流体流速越大，则节流处的压力下降越多，就越容易达到饱和蒸汽压，而产生气泡；此外，由于流体速度较快也会加快气泡的运动及破裂，增强气蚀破坏的程度；而压力场则决定着气蚀发生的部位及程度，阀内压力梯度越大，则节流处低压区范围越广、压力越小，气蚀越严重。

## 3 高压差阀门抗气蚀结构优化思路

高压差阀门气蚀源于阀内流体压力骤降和流动紊乱，结构优化核心是改进内部关键结构形态尺寸，优化流场，降低局部压力降，减少气泡产聚及破裂对材料的冲击。阀芯、阀座和流道是关键结构与气蚀主要受损部位，不同结构传统设计与抗气蚀优化设计差异明显，详见下表：

表1 传统设计与抗气蚀优化设计差异对比

关键结构	传统设计	抗气蚀优化设计	优化核心目标
阀芯	圆柱形结构，流道截面突变	流线型结构、带导流槽、多级节流台阶	引导流体平稳流动，分解压力降
阀座	平面/锥形密封面，无缓冲流道	圆弧过渡密封面、带缓冲流道、镶嵌耐磨材料	减少涡流，降低局部压力降，提升表面抗蚀性
流道	直角转弯，截面突变	全流线型设计、优化进出口角度、设导流叶片	优化流场分布，避免流动紊乱

以下将针对这三个核心结构的优化方向展开详细探讨。

### 3.1 阀芯结构优化

阀芯是高压差阀门的主要调节部件，阀芯的结构形状决定着流体的节流过程及压力变化情况，故而阀芯结构设计也是提高阀门抗气蚀能力的重要途径之一。传统圆柱形阀芯，在节流过程中流体经过阀芯与阀座间的环状间隙时，由于流道截面积突然变化，很容易产生流体速度增加、压力降低的情况，进而引起气蚀。对此可通过应用流线型阀芯结构加以改善，其在阀芯上以平滑的曲线构成，可以促使流体稳定地运行，防止流道断面积骤然变更的情况出现，并以此来降低流体速度增加程度，减小压差，降低气泡生成量。此外还可于阀芯表面设置导流槽，导流槽可以对流场进行进一步整理，使其有秩序地流动，防止涡旋及回流的产生，减少出现局部低压的概率。

### 3.2 阀座结构优化

阀座是与阀芯配合以达到密封与节流作用的重要零

件，同时也是发生气蚀破坏的主要部位之一，所以对阀座结构进行改进对其提高阀门抗气蚀能力也具有重要意义。传统的阀座的密封面形式均为平面或是锥型，在流体经过密封面时易形成涡旋及局部高压力降而加剧气蚀破坏的发生。针对此问题可以改进阀座的密封面形式，将原来的密封面改为圆弧过渡型密封面，圆弧过渡可以使流体平稳地流过密封面，减少涡流的形成，并减小局部压力降，减弱气蚀作用。此外，还可在阀座内部设置缓冲流道，缓冲流道能够延长流体在阀座内的流动路径，降低流体流速，使流体压力逐渐变化，避免压力骤降，从而减少气泡的产生。同时，还可适当增大阀座的流通面积，在保证阀门调节精度的前提下，增大流通面积能够降低流体流速，减小压力降，从根本上抑制气蚀现象的发生。

### 3.3 流道结构优化

阀门流道结构形式及尺寸直接影响着阀门内的流动情况和压力状况，流道不合理会引起流体在阀内产生严重的乱流，加重气蚀现象的发生，所以流道结构优化是提高高压差阀门抗气蚀能力的重要保证。流道结构优化主要是为了实现流道的圆滑过渡，防止流道截面积突然增大或减小，让其能够顺利地进行流动。传统的阀门流道中大多有直角转弯以及截面积出现突然变化的情况，在流体流动的过程中会出现涡旋和低压力区域，促使汽蚀现象发生。对此可以考虑使用全流线型流道的方式，把阀门中的进水口流道、节流流道以及出水口流道用圆弧形光滑地连接起来，使流道截面渐变，不突变，以诱导流体平缓流动，减少涡流发生，降低局部压损，并可对流道进出口角进行优化设计，使流体顺畅地进入和离开阀内，减少流体在进出口处的冲击和混乱程度，进一步改善了流场状况。此外，还可适当增大流道的最小流通截面，在保证阀门调节性能的前提下，增大流通截面能够降低流体流速，减小压力降，抑制气泡的产生。同时，还可在流道内部设置导流叶片，导流叶片能够进一步梳理流场，引导流体有序流动，避免回流与涡流现象的发生，优化压力场分布，减轻气蚀作用。

## 4 高压差阀门抗气蚀设计的流体动力学分析方法

流体动力学分析是研究高压差阀门流场、预测气蚀的有效方法，能为抗气蚀结构优化提供理论依据。通过分析可了解阀门内流速、压力分布及流动状态，识别气蚀危险区，评估不同方案抗气蚀性能，以指导结构优化。下文将从分析流程、核心指标、应用价值三方面阐述其在高压差阀门抗气蚀设计中的应用。

### 4.1 流体动力学分析流程

针对高压差阀门抗气蚀设计的流场模拟过程主要包括以下四部分内容：（1）模型构建，首先依据阀门的结构特点，采用三维造型软件创建阀门的结构模型，具体包括在建模时对阀芯、阀座、流道等部件的形状及大小进行描述，然后为方便后续计算，阀门的非关键结构可以适当简

化，去掉一些不必要的细节特征；（2）网格划分，将所建几何模型导入到流体动力学分析软件中，并对其进行网格划分，网格划分质量的好坏直接决定着分析结果是否准确可靠，在阀芯、阀座等易出现气蚀的关键部位，需使用加密网格，一是划分模型网格大小，在流道的关键部位应尽量使用较小的网格来提高分析精度，而在流道的非关键部位则可以使用较大的网格尺寸，以提高分析效率；（3）边界条件设置，根据阀门实际的工作工况，设置流体的进口压力、出口压力、流体介质属性等边界条件，并设置阀门的开度的参数，模拟不同的工作状态下流场分布；（4）仿真计算及结果分析，开始进行仿真计算，利用分析软件对流体动力学控制方程进行求解，并获得阀门内部分布的流速分布云图以及压力分布云图等一系列结果，结合气蚀发生的条件，识别易发生气蚀的危险区域，评估阀门结构的抗气蚀性能。

#### 4.2 核心关注指标

在高压差阀门抗气蚀的流体动力学分析中，核心关注指标主要包括压力分布、流速分布与气蚀系数。压力分布是判断是否会发生产生气蚀的重要依据，根据压力分布云图可以得出阀门内出现的低压区，当低压区的压力小于流体的饱和蒸汽压力时，则可能发生产生气蚀现象，所以应关注节流处的压力分布状况；流速分布能反映出流体在阀门内所处的状态，流速大的地方压降大，易产生气蚀，故应限制关键部位介质流速在一定范围之内<sup>[6]</sup>；气蚀系数是用来表示阀门的抗气蚀能力的一个综合性参数，它的大小与阀门的形式及使用条件有关，气蚀系数愈大，表明阀门的抗气蚀能力愈强，通过计算不同结构设计下的气蚀系数，可以直观地比较各个结构设计之间的抗气蚀性能情况，并以此指导结构优化设计。在具体分析过程中，应当综合考虑以上三个方面的参数，对阀门结构的抗气蚀性能进行综合判断，从而找出结构设计中存在的一些问题，以便于进一步开展优化设计工作。

#### 4.3 分析方法的应用价值

基于流体力学的方法对高压差阀门抗气蚀进行设计有较大的使用价值，可实现对气蚀危险区的准确定位，利用仿真计算能直观显示阀门内流场情况，并能准确找出易产生气蚀的低压区，从而为后续改进目标指明方向。传统阀门的设计主要依靠经验和试凑法完成，不仅设计周期长，而且试验成本高，而利用流体动力学仿真分析可在设计过程中快速评价不同结构方案的抗气蚀性能，选出最优的设计方案，大大缩短设计周期，降低试验成本；流体动力学分析是建立在严格的流体力学基础上的，其根据求解控制方程所得分析结果准确度较高，可为阀门结构优化提供科学合理的理论指导，克服经验设计的不足之处，提高阀门设计的可靠性和合理性；同时利用流体动力学分析可以对不同工作工况下阀门的流场进行模拟，并判断阀门在极限

工况下的抗气蚀能力，为阀门选型及使用提供借鉴。

### 5 结论与展望

#### 5.1 研究结论

本文围绕高压差阀门抗气蚀结构优化与流体动力学分析展开研究，得出以下主要结论：一是高压差阀门内气蚀现象的产生是流体在节流区域压力降至饱和蒸气压后发生汽化与冷凝交替的结果，其发展过程可分为初生、发展、稳定与严重四个阶段，流体流速、压力场分布与流道形态是影响气蚀的核心流体动力学因素；二是阀芯、阀座与流道是提升阀门抗气蚀性能的关键优化结构，采用流线型阀芯、多级节流阀芯、圆弧过渡型阀座、全流线型流道等优化设计，能够有效优化阀内流场分布，降低局部压力降，减少气泡的产生与聚集，减轻气蚀破坏；三是流体动力学分析方法是阀门抗气蚀设计的有效工具，通过模型建立、网格划分、边界条件设置与仿真计算，能够精准识别气蚀危险区域，评估不同结构方案的抗气蚀性能，为结构优化提供科学的理论依据，同时还能降低设计成本与周期，提升设计的可靠性。

#### 5.2 未来展望

虽然本文提出的高压差阀门抗气蚀结构优化思路与流体动力学分析方法为阀门设计提供了基础参考，未来的研究可从以下几个方向进一步深入：一是结合新型材料技术，开展抗气蚀结构与新型耐磨抗气蚀材料的协同优化研究，通过材料与结构的双重改进，进一步提升阀门的抗气蚀性能；二是考虑多因素耦合作用，开展不同介质、不同温度、不同压力差等复杂工况下的阀门气蚀特性研究，完善气蚀预测模型。

### 【参考文献】

- [1] 张勇巍.发电厂高压差阀门气蚀问题的解决办法[J].中国设备工程,2006,13(11):108-109.
  - [2] 缪克在,吴超俊,孙志民,等.高压阀门压力自密封结构设计与分析[J].石油化工设备,2024,53(6):48-51.
  - [3] 周亚群,徐天池,尤童平,等.高温高压环境下阀门材料的可靠性分析[J].阀门,2024,11(11):1392-1396.
  - [4] 任明强.控制阀气蚀产生的原因及避免方法[J].控制工程,2014,21(S1):118-120.
  - [5] 罗伟.控制阀的系统参数及其流量特性探析[J].科技视界,2012(30):269-271.
  - [6] 兰向军.神华宁煤 MTP 项目急冷水系统阀门振动原因分析及解决方案[J].仪器仪表用户,2017,24(6):60-63.
- 作者简介：王晓峰（1985.3—），毕业院校：河北科技大学，所学专业：机械设计制造及其自动化，当前就职单位：石特阀门股份有限公司，职务：技术部长，职称级别：工程师。