

## 阀门内流场压力损失分析及结构优化设计

王晓峰

石特阀门股份有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**阀门是流体输送系统过程中一个重要的控制部件，其工作的性能对整个系统的运行效率与稳定性有着直接性的影响。在衡量其核心性能中，压力损失是一项重要的指标，压力损失不仅会造成能量的损耗，而且会增加运行成本，甚至会导致一系列问题的产生，例如噪音、流程紊乱等。鉴于此，文章研究基于流体力学基本原理深入剖析了阀门内流场压力损失的产生机制以及主要的主要影响因素，基于实际情况提出了一系列优化方面结构的方法，进一步降低阀门压力损失，提高系统的运行效率。

**[关键词]**阀门；内流场；压力损失；结构优化

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18609 中图分类号: TK263.72

文献标识码: A

## Analysis of Pressure Loss in Valve Flow Field and Structural Optimization Design

WANG Xiaofeng

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

**Abstract:** Valve is an important control component in the process of fluid transportation system, and its working performance has a direct impact on the operating efficiency and stability of the entire system. In measuring its core performance, pressure loss is an important indicator. Pressure loss not only causes energy loss, but also increases operating costs, and may even lead to a series of problems such as noise and process disruptions. In view of this, the article deeply analyzes the mechanism of pressure loss in the flow field inside the valve based on the basic principles of fluid mechanics, as well as the main influencing factors. Based on the actual situation, a series of structural optimization methods are proposed to further reduce valve pressure loss and improve the operating efficiency of the system.

**Keywords:** valve; internal flow field; pressure loss; structural optimization

### 引言

在石油化工、水利水电、城市供热等多种工业及民用行业中的流体运输系统均是必不可少的重要组成环节，在此系统之中阀门起着调节流量、截断流体、控制压力的作用，而阀门的质量好坏对于整个系统的运行品质有着决定性的意义<sup>[1]</sup>。在阀门的工作过程当中，由于流体经过阀门内壁时，流道形状变化、流体自身黏性及流动态发生变化等原因不可避免地存在压力损失，压力损失将造成流体运输过程中不必要的能量损耗，增加系统工作成本<sup>[2]</sup>，并且过大的压力损失会诱发流场分离、旋涡等不规则流动，带来振动噪音，导致阀门内件磨损加快，缩短阀门寿命<sup>[3]</sup>。

近几年，在节能减排理念的影响下，如何降低流体运输中的能耗是发展的主要趋势之一，其中减小阀门的压力损失是关键所在。现有的研究工作主要是对特定条件下阀门压力损失进行仿真计算或者试验测量，较少开展有关压力损失的基本机理以及具有普适性的阀门结构改进方法等方面的研究。因此，本文从基础理论层面出发，分析阀门内流场压力损失的产生原因与影响因素，提出具有通用性的结构优化设计方向，旨在为阀门的设计与改进提供简洁、实用的理论指导，降低阀门压力损失，提升其工作性能。

### 1 阀门内流场压力损失的基本理论

#### 1.1 压力损失的定义与分类

阀体内流动的压力损失是流体在阀门内部从进口到出口处，因受到的各种阻力而造成的静压头减少量。依据引起阻力原因的不同，可分为沿程阻力损失和局部阻力损失两部分，这是流体力学上将管路系统的压力损失所作的基本划分方法，同样适合于阀内流场计算。

沿程阻力损失是流体在阀门内部均匀通道内流动时，因流体分子之间产生的内摩擦力及流体与通道壁面间产生的外摩擦力而产生的阻力损失。该阻力损失主要取决于流道长度、壁面粗糙程度、流体黏性等因素，它主要发生在阀门的直管段部位。局部压力损失是指介质流过阀内流道形状发生突然变化的地方(例如阀座、阀芯、流道转弯处等等)的时候，因为流场分离、产生漩涡、流速重新分布等原因产生的压力损失。在阀门内部，由于其结构的复杂性，局部压力损失往往远大于沿程压力损失，是阀门总压力损失的主要组成部分。

#### 1.2 压力损失的产生机制

根据流体力学理论可知，在阀门中由于流场压力产生的压力损失实质上就是流体的机械能消耗的过程，它主要

由流体黏性和流态的变化引起。在流体不运动的情况下，流体内部分子间只有作用力而没有能量耗损现象出现，一旦流体发生运动，由于流体黏性的存在就会导致流体内部产生切向应力，引起相邻流层间的相对运动，剪切应力作用将部分机械能转变为热能而形成沿程压头损失。

而局部压降产生的机理则更为复杂，在经过阀门的阀芯、阀座等部位时，流道截面突变收缩或者扩张增大，流体的流动速度会发生骤增或骤减的变化；在流速较高的区域中，由于流体具有较大的惯性力占优势，会克服黏性力作用从流道壁面上脱离出来，从而形成回流旋涡区域。在旋涡区域内，流体会产生强烈的乱流现象，一方面由于流体质点之间的碰撞、摩擦而造成很大的能量耗散；另一方面因速度重分布而导致流体内压力梯度的变化也增大了压损。此外，流体的流动状态（层流或湍流）也会影响压头损失的大小，湍流状态下流体的紊乱程度更高，压头损失通常远大于层流状态。

## 2 阀门内流场压力损失的主要影响因素

### 2.1 阀门结构因素

阀门结构是影响内流场压力损失的最核心因素，其流道设计、阀芯结构、阀座形式等均会直接改变流场的分布状态，进而影响压力损失的大小。

流道结构上，流道的截面形状、尺寸变化情况及粗糙度是否直角转弯、突变等会对压力损失产生很大的影响。采用圆形、椭圆形等流线型截面形状的流道，可减小流体流动过程中产生的摩擦阻力和局部扰动造成的影响；而方形、三角形等非流线型截面形状的流道，易发生流动死区及漩涡，增加压损。另外，流道截面尺寸的变化应该尽可能平滑，不应存在突然扩张或者收缩的结构，这样会导致流场的分离加剧，使得局部的压力损失急剧上升。

流道壁面的光滑程度也会影响沿程压力损失，壁面越粗糙，流体与壁面之间的摩擦力越大，压头损失也就越大。阀芯结构是影响阀门流量特性和压头损失的重要因素之一，不同的阀芯形状（球型阀芯、锥型阀芯、平板型阀芯等）形成不同的阀芯流道。球型阀芯流道比较平滑，介质流过阀芯时受到干扰较少，产生的压损也小；平板型阀芯开启时其阀芯流道面积变化较大，会产生比较大的局部压损。另外，阀芯的开度大小也会对压损造成影响，在开度较小时，由于流通面积较小，速度较大，压损明显增大；在开度增大过程中，流通面积变大，速度减小，压损随之减小。阀座的形式及与阀芯的配合精度也会对压头损失产生影响。阀座与阀芯间的密封间隙、接触方式等都会改变流体的泄漏量与流动路径，当密封间隙较大时会产生泄漏流从而造成能量损耗，而配合精度不够则可能出现局部流道狭窄、涡流等情况，增大了压头损失。

### 2.2 流体性质因素

流体黏性是流体产生内摩擦阻力的原因所在，也是沿程

压降产生的主要原因。流体黏性愈大，则流体内摩阻力及流体同通道间壁的外摩阻力也愈大，流体在流动过程中消耗的能量也就愈多，其压头损失也就愈大。如重油等黏度大的流体流过阀门时，它的压损比水、空气等黏度小的流体大得多。

密度主要影响的是流体的惯性力，从而对局部压降产生影响；密度较大的流体在流动过程中由于通道形状发生变化所受到的惯性力较大，流场出现分离的情况更加显著，产生的漩涡更大，因此局部压降更大。另外对于可压缩流体（比如气体），其密度会随着压力以及温度的不同而发生改变，此外，在流动过程中还可能伴随有膨胀、压缩等情况的发生，使得压头损失更为复杂；对于不可压缩流体（例如液体），其密度变化较小，压头损失较易计算及分析。

### 2.3 流动工况因素

速度是决定压头损失的一个重要指标。依据流体力学原理可知：沿程压头损失与速度的平方成正比（湍流状态），局部压头损失也与速度的平方成正比，所以速度越大，压头损失就越大；流量又与速度紧密相关，在通道截面一定的条件下，流量越大，速度越高，压头损失就越大。

流态（层流或者湍流）是由雷诺数决定的，当  $Re$  小于临界值的时候是层流状态，而大于临界值则为湍流状态。处于层流状态下的流体流动性比较稳定，各流层之间产生的干扰较少，此时的压头损失主要是由于黏性力导致的，并且其增长比较缓慢；而在湍流状态下的流体流动性不稳定较高，在流体质点之间会产生激烈的碰撞以及混合过程，快速的压头损失增长。在绝大多数工业应用中，经过阀门的流体都处在湍流状态，因此湍流状态下压头损失的设计及分析是阀门设计的关键点。

## 3 阀门结构优化设计的核心思路与方法

阀门结构优化设计的核心目标是通过改进阀门的流道形态、阀芯结构、阀座形式等关键部件<sup>[4]</sup>，减少流场分离、漩涡等不稳定流动现象，降低沿程压头损失与局部压头损失，同时保证阀门的调节性能、密封性能等基本功能不受影响。基于前文对压头损失影响因素的分析，本文提出以下结构优化设计的核心思路与常用方法，见表 1。

表 1 结构优化设计的核心思路与常用方法

优化方法	核心优化方向	针对的压头损失类型	预期优化效果
流线型流道设计	平滑流道过渡，减少形态突变	局部压头损失	减少流场分离，降低漩涡损耗
提高流道壁面光滑度	降低壁面摩擦系数	沿程压头损失	减少流体与壁面摩擦力
流线型阀芯设计	优化阀芯外形，引导平稳绕流	局部压头损失	降低阀芯周围流场扰动
弹性阀座设计	提升阀座与阀芯配合精度	局部压头损失	减少泄漏流，优化流道顺畅性

### 4.1 优化流道设计，减少流动阻力

阀门流道的设计优化是减小阀门压头损失的重要手

段,其基本思想就是让流道尽可能地按照流体自身的运动方向来走,以减小流动阻力及能量损耗。常见的阀门流道设计优化方法主要有以下几种:

一是采用流线型流道设计。将阀门内部的流道截面设计为圆形、椭圆形等流线型形状,避免采用方形、三角形等非流线型截面,减少流道壁面对流体的扰动;同时,保证流道的平滑过渡,避免出现突然扩大、缩小或急剧转弯的结构。对于流道的转弯处,采用大曲率半径的圆弧过渡,减少流场分离现象的产生,降低局部压力损失<sup>[5]</sup>。

二是加大阀内流通通道面积,在不破坏整个阀门的紧密性和强度的情况下,对阀门的内流通通道进行适当的扩大,减小流体经过阀门的流动速度。由于压力损失大小与流体流速的平方呈正相关关系,因此流体流速降低后可有效减小其压力损失。但与此同时也要注意的是,流道截面积不可过分放大,否则会导致阀门体积太大,影响阀门的安装及使用。

三是增加流道壁面光滑度。通过采取高精度加工工艺、壁面抛光处理等措施来增加阀门内部流道的壁面光滑程度,以减小流体与壁面间的摩擦阻力,降低沿程压力损失,并且光滑的壁面也可以减小流体在壁面附近产生的旋涡从而减小局部压损。

#### 4.2 改进阀芯结构,优化流量特性

阀芯作为阀门中的核心控制机构,其结构形式对阀门的流场及压损有着直接的影响作用。而阀芯结构优化的主要思想就是改善阀芯的外形以及开阀的形式,使得流体经过阀芯的过程中流道的变化更加平滑,从而降低流场的分离和旋涡形成情况。具体的优化措施为:

一是采用流线型阀芯。把阀芯形状设计成流线型(如球型、纺锤型等),代替原来常见的平板型、锥形阀芯等非流线型结构。流线型阀芯可引导流动的流体平滑地流过阀门,减小流体在阀芯周围绕流的情况,从而降低局部压损;此外,流线型阀芯还对阀门流量特性有改善作用,让流量调节更加平缓。

二是改善阀芯的开启形式及开启度区间。对截止阀、闸阀类的阀门可以改进阀芯的开启形式,使阀芯在开启过程中流道截面逐渐变大,并避免出现流道突然开启的现象;合理设置阀芯的开启度区间,在常用的工况下,阀芯处于大的开启度的状态,减小速度,减少压损。另外还可以通过在阀芯上开导流孔、导流槽等形式来引导流体的方向,减少流场混乱。

#### 4.3 优化阀座结构,提升配合精度

阀座与阀芯的配合质量直接影响流体的泄漏量与流动路径,进而影响压力损失。弹性阀座具有一定变形量,

在阀芯关闭时能起到良好的密封作用,减小泄露;当阀芯打开时,能随着阀芯动作而适当形变,使流道更加通畅,减小局部阻力。同时,弹性阀座还可减小阀芯与阀座间的磨损,提高阀门寿命。利用高精尖加工设备及加工技术,减小阀座和阀芯的尺寸公差以及形位公差,保证二者间的配合间隙合理;合理的配合间隙可避免产生局部狭窄流道的现象,减少流体在流动过程中产生的扰动,从而降低压 力损失,减少泄漏流,避免浪费能量。

#### 4.4 整体结构集成优化

阀门结构优化设计并不是单独对其中某一个零部件进行优化,而应从整体入手,进行集成化优化,在对流道、阀芯、阀座等关键零件进行优化的同时,还要考虑到阀门的进出口连接方式、阀体外形结构等等,并通过建立阀门内流场数值模型,仿真分析不同结构参数下流场的分布以及压力损失的情况。可以找出结构设计中的问题,为优化设计提供科学依据。数值模拟技术成本低、效率高、可重复性好等特点能有效缩短优化设计周期,提高优化效果。

### 5 结论

本文基于流体力学基本原理,其中影响压力损失的主要因素与阀门的结构,流体性质以及流动工况存在紧密联系,其中阀门结构(流道设计、阀芯结构、阀座形式等)是最关键的影响因素。通过对影响因素的分析提出了一系列的优化对策,其中阀门结构优化设计的基本思路为减少流动扰动及流场分离,降低摩擦阻力和局部阻力,主要手段有优化流道、优化阀芯、优化阀座以及结构整体集成化等,通过结构优化可实现阀门压力损失的有效降低,提高阀门的工作性能。

#### 参考文献

- [1] 张威.阀门密封技术研究现状及发展趋势分析[J].阀门,2020(5):21-24.
  - [2] 葛永松.石化行业阀门泄漏原因分析及对策[J].化学工程与装备,2022(3):156-157.
  - [3] 李东安,何同均,王柳,等.阀门泄漏检测方法探析[J].检验检测,2022(6):60-62.
  - [4] 蔡定硕,陶正良,严春雷.高压蒸汽阀中气流流动特性的定性分析[J].汽轮机技术,2003,45(01):36-38.
  - [5] 相晓伟,毛靖儒,孙弼,等.汽轮机调节阀通流及损失特性研究[J].西安交通大学学报,2006,40(7):762-766.
- 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。