

流道结构改良对阀门水力损耗的优化探究

董胜帅 万丽丽 雷 霆 韩凯航 李 静

河南泉舜流体控制科技有限公司 河南 郑州 450001

【摘 要】：阀门作为流体输送系统中的关键控制元件，其内部流道结构直接影响流体流动状态与能量损失。传统阀门流道普遍存在局部涡流、流动分离及回流区，导致水力损耗较大。本文探讨了流道截面优化、过渡段流线型设计、导流装置设置、多级降压结构及表面减阻等改良途径，阐述了不同改良措施对降低流动阻力的作用机制，旨在为低能耗阀门的设计与优化提供理论参考。

【关键词】：阀门；流道结构；水力损耗；流线型设计；减阻

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.067

1 引言

阀门在各种流体输送系统中被广泛使用，起调节流量、截断通路、改变流向的作用。阀门工作时，流体流过阀体内部通道，由于流道截面积突然变化、流向改变和内部构件的阻碍，会带来不同程度的能量损失，也就是水力损耗^[1]。水力损耗不但降低了流体输送效率，而且增大了动力设备的能耗，对系统经济性造成不良影响。据有关统计数据，在长距离输送管道系统当中，阀门处局部阻力损失所占比例是很大的。因此，降低阀门水力损失成了阀门设计和优化的主要方向^[2]。

2 流道结构改良的设计原则

2.1 流线型设计理念

流线型设计属于减小阀门水力损失的最基本方法。流线型即阀门内部通道的边界轮廓要顺应流体自然运动轨迹，不能出现突变的尖角、台阶、死区。流线型流道可以促使流体平滑地改变方向、速度，减小流动分离、涡流的产生^[3]。阀门入口、出口处应设足够的渐扩或渐缩过渡段，使截面变化平缓。流道拐弯处用圆弧过渡代替直角转弯，弯曲半径和流道直径的比值越大越好。对阀体内腔复杂的结构，用填充或者导流的方法来消除流动死区，使流体可以顺畅地通过^[4]。

流线型设计的又一重要方面就是保持流道截面面积的连续变化。根据连续性方程和伯努利方程，截面面积的突然变化会造成流速突然增大、压力突然减小，加大能量损耗。因此在设计时要使流道面积沿着流动方向连续平滑，减小由于局部加速、减速所引起的涡流损失。用三次样条曲线来构造流道轮廓，可以得到比简单的圆弧过渡更平滑的型线，从而减小流动阻力。

2.2 水力直径与断面形状的匹配

流道的水力直径是四倍截面积和湿周之比，它体现的是通

道的通行能力。在一定的通流面积下，水力直径越大，湿周越小，流体和壁面的摩擦阻力就越小。因此在阀门流道的设计中应该选用水力直径大的截面形状。圆形截面水力直径最大，是管道、阀门流道的最好形式。但是由于阀体内部结构所限，有时要采用矩形或者异形截面。此时应尽量增大截面的高宽比或者采用圆角过渡来减小湿周。

断面形状的匹配还要考虑流速均匀性。阀腔扩张段、收缩段内各流层层流速变化要一致，不能有局部高速区或者低速停滞区。三维流道设计时可以使用多平面、多曲面的复合轮廓来适应非对称流动。通过合理安排入口段、喉部和出口段的几何参数，可以使得流体在经过阀门时速度场比较均匀，减少湍动能耗散。

2.3 流动对称性与周期性

对称性设计在多通道阀门中就更加重要。多通阀门（三通阀、四通阀等）各个出口通道的流动路径要尽可能保持对称，不能因为路径长短不同、弯曲程度不一样而造成流量分配不均、额外涡流损失。采用对称的流道布置可以使得流体在分流或者合流的时候相互抵消一部分涡旋，从而减小合流区的冲击损失。对于需要双向流动的阀门，流道结构应该设计成双向对称的，使正反两个方向的水力性能接近。

周期性流道结构在迷宫阀、多级降压阀里很常见。设置多个扩张室、收缩口，使流体在周期性变化的过程中慢慢消耗掉自己的能量，保持流速、压力梯度的稳定。周期性结构单元尺寸及数量要按照压降需求、流体物性改善设计来定，保证降压效果和水力效率。

3 流道改良的主要技术途径

3.1 流道截面渐变技术

流道截面渐变技术就是改变入口、出口和阀腔内部截面面

积的变化率来减小水力损失。在阀门入口处要采用渐缩形流道,使流体平滑地加速进入阀腔,防止突缩造成涡流。渐缩段的锥角不宜太大,一般控制在较缓的范围内,以保证壁面附近流体不脱离。阀腔出口处应该用渐扩形流道,使流体由高速状态慢慢减速到管道流速,扩散角不宜过大,否则会造成边界层分离和回流。对长行程阀门的阀腔来说,可以沿流动方向布置多个渐变段,使得面积的变化分段完成,每一段的面积变化率都处于合适的区间内。

截面渐变可以采用非对称或者三维曲面的设计。当阀门流道存在偏心或者偏转的时候,传统的圆锥形或者棱锥形渐变已经不能满足流线的要求了。此时可以采用自由曲面造型,用计算流体动力学模拟结果逆向修正流道型线,使实际流动路径上的压力梯度分布均匀。三维打印技术的应用使复杂的渐变流道得以制造出来,给截面渐变技术的推广打下了工艺基础。

3.2 导流装置与整流结构

导流装置是改善阀门内流动状态,减小涡流损失的一种有效方法。常用的导流装置有导流叶片、导流锥、分流栅等。在阀门流道的转弯处或者分支处装设导流叶片,可以把大尺度的涡旋分解成许多小尺度的涡旋,使主流沿着预定的方向流动,减少由于流动分离而造成的能量损耗。导流叶片数量、曲率及安装角度要依照流场特点加以调节,叶片表面要光滑以减小摩擦损失。

导流锥一般安装在球阀、蝶阀的阀腔内,在阀瓣后面疏导流体,填平阀瓣下游低压区,抑制回流和尾迹涡流的产生。导流锥的形状可以是锥形、水滴形或者翼型,它的轮廓要和阀瓣形状相适应。调节阀的套筒上开有不同大小、形状的节流孔,可以起到分流、均压的作用,减小流体通过节流口时的湍流强度。整流格栅或者整流网装在阀门出口处,可破碎大尺度涡旋,使流速分布更均匀,减小下游管道局部阻力损失。

3.3 多级降压流道设计

对承受高压差的阀门来说,单级节流会带来很高的流速和强烈的空化现象,造成很大的水力损失以及噪声振动。多级降压流道设计把总的压降分成若干个较小的压降,分段控制流速,防止产生超声速流动和剧烈的湍流。多级降压阀一般采用迷宫式流道、叠片式流道或者轴流式多级节流结构。迷宫式流道是由许多曲折的流槽组成,流体经过每一个转折处都会消耗一部分压力能,流速也较低。叠片式流道是由许多带节流孔的金属片叠合而成的,流体依次经过各个层的节流孔,每一层都完成了一次降压和扩压。

多级降压流道级数的多少要根据进出口压差、流体性质来定。级数太少,降压效果不大;级数太多,流道过长,制造成

本高。每一级节流面积要逐级增大,来补偿流体密度变化所造成的流速影响。多级降压流道在减小水力损失的同时可以抑制空化,提高阀门的使用寿命。

3.4 表面形貌与减阻涂层

流道内壁表面状态对水力损耗也有一定的影响。粗糙表面会增大湍流的壁面摩擦阻力,光滑表面可以减小摩擦损失。通过精密加工、抛光或者化学研磨等工艺提高流道内壁的光洁度,可以减小流体在近壁区的速度梯度,减小湍动能耗散。对大型阀门,在流道内壁涂覆低表面能的减阻涂层,例如含氟聚合物涂层或者陶瓷涂层。此类涂层有疏水或者疏油的特性,可以减小流体和壁面之间的粘附力,减小摩擦阻力。

仿生表面纹理也成了减阻研究的前沿方向。模仿鲨鱼皮或者荷叶表面的微结构,在流道内壁加工出有特定取向的微沟槽或者微突起,可以改变近壁区湍流拟序结构,降低壁面剪切应力。但是阀门流道上应用仿生表面要考虑加工可行性及清洗问题,目前还处在实验验证阶段。

4 不同阀门类型的流道改良特点

4.1 截止阀流道改良

截止阀的流道为“S”形,流体从进口进入阀腔后向下绕过阀瓣再向上流向出口,流动路径曲折且有多个截面突变。传统截止阀水力损失大。其流道改良可以从以下几个方面入手,将阀腔底部设计成圆弧流线型,消除直角死区;将阀瓣头部由平面改为锥面或者球面,并延长阀瓣导向段,使流体环绕阀瓣时保持层流状态;在阀座出口处设置导流尾翼,引导流体平稳流出。另外,把传统的截止阀直通式流道改成角式或者直流式,可以明显减小流动路径、减少转向次数、降低局部阻力。

4.2 球阀流道改良

球阀的流道为直通式,全开时基本为等截面圆孔,水力损耗小。但是部分开启时球体通道和管道轴线形成夹角,流体流过不规则孔口时会产生强烈的涡流。改良措施有球体通道为文丘里管形状,入口处渐缩、喉部平直、出口处渐扩,使流体在经过球体时达到加速、匀速、减速的平稳过渡,在球体和阀座之间加设导流环,减小泄漏流造成的涡流,在大尺寸球阀中,在球体内侧设分流筋,改造为C型、V型,把主流分割引导,减小湍流强度。

4.3 蝶阀流道改良

蝶阀的阀瓣是类圆盘形的,在全开时阀瓣与流向平行,但是仍然占据了一部分流道的空间,产生了绕流尾迹。改良措施有阀瓣采用流线型翼型截面,代替等厚平板,使流体在阀瓣两侧保持附着流动,减少分离区;在阀瓣背面加装扰流板,抵消

尾迹涡流强度；减小阀瓣厚度与通径之比，用薄型或者曲面阀瓣；在阀体流道内壁上设置导流槽，引导流体绕过阀瓣轴端。

4.4 调节阀特殊流道改良

调节阀要在全行程范围内有较好的调节特性，水力损失小。其流道改进一般会用到等百分比流量特性同流道几何的匹配设计。套筒式调节阀是在套筒上开一个形状特殊的节流窗口，流量随着行程的变化而按一定规律变化，同时窗口形状经过优化可以使得流体射流角度合理，减少冲击损失。迷宫式调节阀具有多级折流结构，把高压差分解成许多小压差，使流速一直处在安全范围之内，从而减少空化以及噪声。

5 流道改良效果的评估与验证

流道改善效果的评价一般用数值模拟和实验测试相结合的方式。计算流体动力学仿真可以清楚地显示阀门内部速度场、压力场、湍动能分布，用不同的流道方案的总压损失系数来比较，从而定量评价改良的效果。仿真时要设定合适的边界条件以及湍流模型，还要检验网格的独立性。实验测试用流

量-压差试验来测定阀门在不同的开度、流量下所造成的压力降，从而得到阻力系数和流量系数。

流道改良效果表现在噪声、振动水平的降低上。水力损耗减少一般伴随着湍流噪声降低，用声压级测量来评价。另外，改良后的阀门应具有原有的密封性、机械强度，不能为了追求低水力损失而降低其它重要性能。设计时要进行多目标优化，即水力效率、结构可靠性、制造成本三者之间的平衡。

6 结语

阀门流道结构改进属于减小水力损失，改善流体输送系统能效的关键技术途径。本文从水力损耗产生的机理入手，对流道几何形态对流动阻力的影响规律进行了系统的分析，给出了流线型设计、截面渐变、导流装置、多级降压、表面减阻等改进措施的技术原理。不同种类的阀门其流道特性是不同的，需要对不同的流道特性采取相应的改良措施。伴随着计算流体动力学及材料制造技术的发展，复杂流道结构的优化设计、精密制造变得可行，给低水力损耗阀门的发展打下了基础。

参考文献：

- [1] 程杰明,陶吉全,王涛,等.水电站技术供水电控泄压阀设计及动作的优化[J].三峡大学学报(自然科学版),2025,47(S1):113-118.
- [2] 胡伟勇,董雪旺.景电泵站出水阀门开度对水力性能的影响机制研究[J].数字农业与智能农机,2025(9):66-69.
- [3] 梁武科,丁科,李其昌,等.阀门开度对余压发电水轮机水力性能的影响研究[J].节能,2024,43(3):30-33.
- [4] 杨国苗,李小芹,唐学林,崔春亮,彭致功,张兴峰,封顶梁.大型管网关阀优化方案及阀门开度扰动对流量均匀性影响[J].排灌机械工程学报,2025,43(1):101-108.