

面向高压工况的阀体流道结构拓扑优化与强度分析

杨遥

华都阀门集团有限公司 浙江温州 325025

【摘要】高压流体控制系统对阀体的承载能力和流通性能提出了苛刻要求,传统经验式设计方法在减轻重量、降低流阻与保证强度之间难以取得理想平衡。本文针对高压工况下阀体流道结构的优化设计问题展开研究,在分析高压阀体失效机理与设计要求的基础上,探讨了流道结构对流动特性和应力分布的影响规律。文章引入拓扑优化理论,建立了以最小流动能耗和最大结构刚度为目标的多目标优化模型,研究了变密度法在流道构型设计中的应用途径。通过对优化结果的分析,探讨了危险部位的应力集中成因与改进策略。研究表明,拓扑优化能够生成非直观的高性能流道构型,在满足高压强度要求的前提下显著改善流场均匀性并降低压力损失,为高性能阀体的自主开发提供依据。

【关键词】高压阀体;流道结构;拓扑优化;强度分析;多目标优化

Topological Optimization and Strength Analysis of Valve Body Flow Channel Structures for High-Pressure Applications

Yang Yao

Hua Du Valve Group Co., Ltd. Wenzhou, Zhejiang 325025

【Abstract】 High-pressure fluid control systems impose stringent requirements on valve body load-bearing capacity and flow performance. Traditional empirical design methods struggle to achieve optimal balance between weight reduction, flow resistance mitigation, and structural strength assurance. This study investigates the optimization design of valve body flow channel structures under high-pressure conditions. Based on analyzing failure mechanisms and design requirements of high-pressure valves, we explore the influence patterns of flow channel structures on flow characteristics and stress distribution. By applying topological optimization theory, we establish a multi-objective optimization model targeting minimum flow energy consumption and maximum structural stiffness, while investigating the application of variable density methods in flow channel configuration design. Through optimization result analysis, we investigate stress concentration mechanisms in critical areas and propose improvement strategies. The research demonstrates that topological optimization can generate non-intuitive high-performance flow channel configurations that significantly enhance flow field uniformity and reduce pressure loss while meeting high-pressure strength requirements, providing fundamental support for independent development of high-performance valve bodies.

【Key words】 High-pressure valve body; Flow channel structure; Topological optimization; Strength analysis; Multi-objective optimization

引言

在现代流体控制技术领域中,阀体作为核心执行部件,其性能优劣直接影响到系统的控制精度、响应速度以及运行安全性。随着工程装备向高压、大流量方向的持续发展,阀体所承受的工作压力不断提高,内部流道结构的复杂性与设计难度也随之增加。传统阀体设计往往依赖于设计者经验积累和反复试验修改,这种模式在面对复杂流道布局和多物理场耦合问题时,不仅研发周期长,且难以保证设计结果的全局最优性。特别是在高压工况下,流道结构既要满足低流阻、高通流能力的要求,又要确保在巨大压力载荷下不发生强度失效,这对设计方法提出了严峻挑战。

长期以来研究者们针对阀体结构的改进开展了大量工作,主要集中在两个方面:一是通过经验公式和计算流体力学分析对流道局部形状进行参数化修正以减小流动损失,二是通过有限元方法对阀体壁厚和加强筋布局进行校核以提高承压能力。然而这种串行设计思路往往将流动性能与结构

强度作为相互独立的环节分别处理,忽视了二者之间的内在耦合关系。实际上流道形状的改变不仅影响流体阻力,也直接改变了压力载荷的分布规律进而影响阀体应力状态,反之为了满足强度要求而增加的结构材料也可能对流道空间形成约束影响流动顺畅性。

在这一背景下将拓扑优化方法引入阀体流道结构设计过程具有重要的理论意义和工程价值。拓扑优化作为一种先进的理念设计工具,能够在给定的设计空间、边界条件和性能目标下自动寻求最优的材料分布方案或流道构型,突破传统设计思维的局限。本文从高压阀体的服役特性出发分析流道结构对流动与强度的影响机理,探讨基于变密度法的流道拓扑优化理论,研究优化结果的强度分析方法,旨在形成一套面向高压工况的阀体流道结构设计理论框架。

一、高压工况下阀体的失效机理与设计要求

1.1 高压阀体主要失效模式

阀体在高压工况下服役时其失效模式主要表现为强度失效和功能失效两大类。从力学角度来看,高压流体对阀体壁面施加的静压力是主要外载荷,这种载荷会使阀体内部产生复杂应力场,当局部应力超过材料屈服极限时阀体将发生塑性变形导致密封面泄漏或运动部件卡滞,当应力超过强度极限时则会发生爆破事故。更为隐蔽的是交变压力工况下的疲劳失效,长期压力波动会在应力集中部位萌生裂纹并逐步扩展,最终导致穿透性裂纹引发泄漏。

从流体动力学角度来看,高压介质在流道内高速流动时会因流道形状突变产生局部涡流和压力波动,这些现象不仅造成能量损失降低阀门流通能力,还可能诱发流致振动和噪声。更为严重的是当局部流速过高时流体中的微小颗粒会对壁面产生冲蚀磨损,长期作用会改变流道几何形状进一步恶化流动特性。此外当介质为可压缩流体时局部压力降低到饱和蒸气压以下还会产生气蚀现象,气泡溃灭时释放的冲击能量会对壁面造成严重剥蚀损伤。

1.2 高压阀体的多维度设计要求

上述失效机理表明高压阀体的设计必须同时满足多重性能要求,在强度方面要求阀体具有足够的静强度和疲劳强度,应力分布尽可能均匀避免过高应力集中区域。在流动性方面要求流道内流动顺畅压力损失小,流动稳定性好避免严重涡流和速度突变。在结构布局方面要求阀体结构紧凑重量轻以满足装备轻量化需求。这些要求之间往往存在矛盾,如何在多种约束条件下寻求最优平衡点正是拓扑优化方法所要解决的核心问题。

二、流道结构拓扑优化的理论基础与模型构建

2.1 拓扑优化的核心设计思想

拓扑优化的基本思想是在给定的设计域内通过优化算法确定材料的最佳分布方式,使结构在满足约束条件的前提下达到指定的性能最优。与尺寸优化和形状优化不同,拓扑优化不预先假定结构的具体形式,而是允许在设计域内自由生成新的构型,因此具有更大的设计自由度更有可能获得突破性的创新方案。

应用于阀体流道设计时,拓扑优化解决的是如何在给定阀体轮廓空间内布置固体区域和流体区域,使得流动能耗最小、结构刚度最大,同时满足强度和制造工艺限制。

2.2 流道拓扑优化的主流方法:变密度法

目前应用于流道结构拓扑优化的主流方法是变密度法,该方法将设计域离散为有限个单元并为每个单元赋予介于0和1之间的人工密度变量,密度为1代表固体材料、密度为0代表流体区域。通过建立单元密度与材料弹性模量、流体渗透率等物理属性之间的插值函数,将离散的材料布局问题转化为连续变量的优化问题,在此基础上构建目标函数和约束条件,采用数学规划算法求解密度变量的最优分布。

2.3 多目标优化模型的构建

针对高压阀体的设计需求需要构建多目标优化模型,流动性能的目标通常以流动阻力最小来表征,具体可表示为流体内能量耗散率最小或进出口压差最小。结构刚度的目标

通常以柔顺度最小来表征,柔顺度越小意味着结构刚度越大在外载荷作用下变形越小。

这两个目标往往相互冲突:为减小流动阻力希望流道宽阔顺直,但这会减少固体材料用量降低结构刚度;为增大刚度希望多布置固体材料,但这会压缩流道空间增加流动阻力。因此需要采用加权求和法协调两个目标,根据具体工程需求确定合适的权重系数。

2.4 优化模型的约束条件设置

在约束条件设置上需要综合考虑多方面因素。体积约束用于限制固体材料总用量避免优化结果过度保守或激进。强度约束需要转化为应力约束,但由于应力是局部量且具有高度非线性,通常采用全场应力约束的凝聚方法间接控制。此外还需要考虑制造工艺约束如最小尺寸控制、拔模方向约束等,确保优化结果具有良好的可制造性。

三、基于变密度法的流道构型生成与演化规律

3.1 流道构型的自动生成过程

基于前述建立的优化模型通过数值迭代计算可以实现流道构型的自动生成,在迭代初始阶段设计域内的密度分布通常设置为均匀值,此时整个区域呈现模糊的灰度状态。随着优化算法迭代推进,密度分布逐渐发生分化:对流通畅性贡献较大的区域密度值逐渐趋向于0形成流体通道,对结构刚度贡献较大的区域密度值逐渐趋向于1形成承载结构,中间密度区域则对应着流固交界面的过渡带。

3.2 流道拓扑的演化规律性特征

观察流道拓扑的演化过程可以发现一些规律性特征,在只考虑流动性能单目标优化时生成的流道构型往往呈现出最短路径和最大水力直径的特征,尽可能减小流动阻力。当引入结构刚度目标后流道周围会演化出支撑结构和加强肋,这些结构沿着主应力迹线分布用尽可能少的材料提供尽可能大的刚度贡献。

在多目标协同作用下最终的流道构型往往是流动路径与承载路径的折中与融合:流道不再是简单直线或曲线,而是根据应力分布产生弯曲和分叉以避免在应力集中区域开孔或穿行。

3.3 优化过程中的数值不稳定现象抑制

优化过程中需要关注数值不稳定现象的抑制问题,棋盘格现象和灰度单元现象是变密度法中常见的数值问题,前者表现为单元密度周期性振荡,后者表现为大量单元处于中间密度状态,二者都会影响优化结果的工程可用性。

通常采用灵敏度过滤技术和密度过滤技术抑制棋盘格现象,通过施加惩罚因子迫使中间密度向两端演化。对于高压阀体设计而言还需要特别注意流固交界面的清晰度,可以引入拉普拉斯平滑或形态学滤波等后处理技术使优化结果更加规整。

四、优化流道的强度分析与校核方法

4.1 强度分析的流固耦合特征

通过拓扑优化获得流道构型后还需要对其进行详细的强度分析与校核,以验证其是否满足高压工况下的安全要求。与常规结构的强度分析不同,流道结构的受力状态具有明显的流固耦合特征:流体压力作用于壁面形成分布载荷,同时流体流动产生的动压力也会对壁面产生附加作用力。

4.2 强度分析的前期模型处理

进行强度分析时首先需要建立精确的几何模型,拓扑优化得到的结果通常是由离散单元密度构成的粗糙模型,需要采用几何重构技术将其转化为边界光滑的实体模型,这一过程需要处理好尖角和细小特征避免引入虚假应力集中。

完成几何重构后需要施加准确的边界条件,压力载荷应根据流体分析结果以非均匀分布的形式施加于壁面。对于多体装配的阀体还需要考虑各部件之间的接触关系和预紧力作用。

4.3 应力分析的重点与评价指标

应力分析的重点是识别危险部位并进行详细应力评估,由于流道结构存在较多曲面过渡和截面变化,应力集中难以完全避免,需要重点关注流道转弯内侧、截面突变处以及螺纹连接部位。在这些区域应采用较细网格进行局部细化分析准确捕捉应力峰值。

对于塑性材料可以采用等效屈服应力作为评价指标,对于脆性材料则需要关注主应力大小。同时应考虑压力波动的影响在静强度分析基础上进行疲劳强度评估。

4.4 高应力区域的修正策略

当分析结果表明某些区域应力水平过高时需要优化结果进行局部修正,常见修正措施包括:在应力集中部位增加过渡圆角半径使应力流传递更加平顺;在局部薄弱区域增加材料厚度或增设局部加强结构;调整流道走向使高压区域避开结构敏感部位。这些修正应尽可能小地改动优化构型以保留拓扑优化的性能优势,修正后的模型需要重新进行分析验证直至满足设计要求。

五、面向制造的结构参数化与工程化处理

5.1 优化结果的结构参数化重构

拓扑优化产生的结果虽然具有理论上的最优性,但往往呈现复杂自由曲面和不规则形态,直接采用传统加工方法制造存在困难。因此需要引入参数化重构和工程化处理环节,将优化结果转化为便于制造的具体结构形式,在保持性能优势的前提下充分考虑制造工艺可行性。

参数化重构的第一步是特征识别与提取,观察优化结果

的几何形态识别出其中的主要流动通道、连接结构、加强肋等典型特征,将这些特征用参数化的几何要素进行描述。对于流道部分可以用中心线和变截面来描述,中心线走向由优化结果中的主流区域拟合得到,截面形状和面积沿程变化根据优化结果的局部尺寸确定。对于承载结构部分可以根据应力分布提取出主要力流路径,将这些路径转化为具有适当截面尺寸的加强结构。

5.2 基于制造工艺的结构调整

在参数化基础上需要根据不同的制造工艺对结构进行调整,对于采用铸造工艺生产的阀体需要考虑拔模斜度、分型面位置、最小铸出孔直径等工艺要求,对优化构型中不利于铸造成型的部位进行修改。对于采用增材制造技术生产的阀体则需要考虑支撑结构添加和悬垂面限制。对于采用机械加工完成的部位需要保证刀具可达性和加工基准合理性。这些工艺约束的引入可能会在一定程度上牺牲优化结果的理论性能,但换来了工程可实现性。

5.3 工程化模型的性能复核

完成参数化重构后需要对工程化模型进行性能复核,由于重构过程中对几何形状进行了简化和调整,模型的流动性能和强度特性可能与优化结果存在差异,需要通过计算流体力学和有限元分析对工程化模型进行仿真验证,确认其主要性能指标仍满足设计要求。如果偏差过大则需要返回重构环节进行调整,这种从拓扑优化到参数化重构再到性能验证的循环迭代过程构成了现代阀体结构设计的重要范式。

六、结语

本文围绕面向高压工况的阀体流道结构设计问题,从理论层面系统探讨了基于拓扑优化的研究思路。通过对高压阀体失效机理的分析明确了流动性能与结构强度协同优化的必要性。在优化理论层面构建了以最小流动能耗和最大结构刚度为目标的数学模型,阐述了变密度法在流道构型生成中的应用原理。针对优化结果的工程化应用探讨了强度校核的方法要点以及面向制造的结构参数化处理途径,形成了从理论优化到工程实现的基本框架。

随着计算力学和优化技术的不断发展阀体流道结构设计正经历从经验设计向科学设计的深刻转变。未来研究可进一步探索多物理场耦合作用下的拓扑优化方法,将热效应、流固耦合振动等因素纳入优化模型使设计结果更加贴近实际工况。通过持续的理论创新和突破必将为高压流体控制装备的性能提升提供更加有力的技术支撑。

参考文献

- [1]陈俊翔,孔祥东,许克龙,等.高压螺纹插装式溢流阀综合性能优化[J].中国机械工程,2023,34(24):2909-2919+2926.
- [2]王丹.应力线性化方法在阀体优化设计中的应用[J].石油和化工设备,2021,24(01):5-7.
- [3]蒲志新,郭建伟,潘玉奇,等.2PPaPaR并联机构性能分析及优化设计[J].中国机械工程,2023,34(19):2304-2312.
- [4]傅俊勇,范宇恒,董文勇,等.先导式溢流阀结构参数对泄漏的影响[J].液压与气动,2021,45(12):140-148.