

大口径全焊接球阀阀体应力分布与轻量化设计研究

陈清辉

宝能阀门集团有限公司 浙江温州 325000

【摘要】针对大口径全焊接球阀因保守设计导致材料冗余与制造难题,本文构建了基于力学性能约束的轻量化设计理论框架。研究从厚壁圆筒与壳体力学出发,深度剖析了多场耦合下阀体应力演化机制及集中区成因;系统论证了拓扑、形状及尺寸优化的应用逻辑,揭示了材料去除与刚度保持的辩证关系。通过建立应力分布与轻量化指标的耦合模型,阐明了结构重构实现应力均匀化与材料利用率最大化的机理。本文虽未涉及量化数据,但致力于构建严密的定性理论体系,揭示设计物理本质,为高性能、低成本阀门研发提供核心理论支撑。

【关键词】大口径全焊接球阀; 阀体应力分布; 轻量化设计; 厚壁圆筒理论; 拓扑优化; 结构完整性

Research on Stress Distribution and Lightweight Design of Large-Diameter Fully Welded Ball Valves

Chen Qinghui

Baoneng Valve Group Co., Ltd. Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】 Addressing material redundancy and manufacturing challenges arising from conservative design approaches in large-diameter fully welded ball valves, this study establishes a lightweight design theoretical framework based on mechanical performance constraints. Starting from the mechanics of thick-walled cylinders and shells, the research provides an in-depth analysis of stress evolution mechanisms and concentration zone formation under multi-field coupling conditions. It systematically elucidates the application logic of topology, shape, and dimension optimization, revealing the dialectical relationship between material reduction and stiffness preservation. By developing a coupling model linking stress distribution with lightweight performance metrics, the study clarifies the structural reconstruction mechanism that achieves stress homogenization and maximizes material utilization efficiency. Although lacking quantitative data, this work contributes a rigorous qualitative theoretical framework that reveals the fundamental principles of valve design, providing essential theoretical support for developing high-performance, low-cost valves.

【Key words】 large-diameter fully welded ball valve; valve body stress distribution; lightweight design; thick-walled cylinder theory; topology optimization; structural integrity

1. 引言

大口径全焊接球阀是长输管线核心截断设备,其本质安全与经济性关乎国家能源战略。全焊接结构虽消除法兰泄漏隐患,但巨型化带来制造、运输、安装难题及失效难修复风险,对结构设计精准度要求极高。传统设计依赖薄壁理论经验公式与高安全系数,导致阀体壁厚冗余,推高成本,还引发残余应力、变形及裂纹,陷入“越厚越不安全”悖论。

轻量化设计是基于应力分布规律的结构性重构,需针对阀体几何特征识别低、高应力区,实现材料布局效能最大化。但现有研究多局限于特定工况数值模拟个案,缺乏对应力演化通用规律的理论抽象与系统化设计逻辑。

鉴于此,本文摒弃单纯数据罗列,构建严密定性理论体系。从弹性与塑性力学本源出发,阐释多维载荷下应力响应机制与集中成因,建立“应力分布-结构拓扑”映射模型,论证优化内在逻辑,揭示设计物理本质,推动该领域从“经

验试错”向“科学理性”转变,为高性能阀门研发奠定理论基石。

2. 大口径全焊接球阀阀体应力分布的理论基础

2.1 厚壁效应下的非线性应力梯度与多源耦合机制

大口径全焊接球阀的阀体本质上是承受高压的厚壁组合壳体,其径厚比往往超出薄壁理论($D/t > 20$)的适用界限,必须基于拉梅(Lamé)方程进行精确描述。在纯内压工况下,厚壁圆筒内的径向应力(σ_r)与环向应力(σ_θ)沿壁厚呈显著的非线性分布: σ_r 由内壁的最大压应力向外壁递降至零,而 σ_θ 则在内壁达到峰值,随半径增加急剧衰减。逻辑推演表明,这种“内高外低”的应力梯度意味着外层材料长期处于低应力状态,材料利用率极低,构成了结构轻量化的核心潜力区。对于大口径阀门,这种厚度效应被几何尺寸放大,若沿用等壁厚设计,将导致巨大的材料冗余。

此外, 阀体实际处于复杂的多轴应力场中。在球腔与接管过渡区, 几何曲率的突变引入了显著的弯曲应力与剪切应力分量, 使得应力状态偏离简单的薄膜理论。依据冯·米塞斯 (von Mises) 屈服准则, 材料的失效取决于等效应力而非单一分量, 这意味着局部多轴应力的耦合效应可能提前诱发塑性流动。更为关键的是, 全焊接工艺引入了不可忽视的初始残余应力场。焊接热循环导致的非均匀收缩, 在焊缝区形成高值拉伸残余应力, 并与工作载荷下的机械应力发生线性叠加。理论分析指出, 若叠加后的总应力超过屈服极限, 将引发局部塑性变形甚至冷裂纹。因此, 构建准确的应力模型必须将“内压机械应力 + 热应力 + 焊接残余应力”纳入统一的多源耦合框架, 这是评估结构真实承载能力的前提。

2.2 几何不连续处的应力集中演化与拓扑平滑逻辑

阀体作为非理想连续体, 有接管开孔、颈部过渡等大量几何不连续特征。这些区域应力流线剧烈偏转与密集化, 形成应力集中, 局部峰值应力远超名义应力。弹性力学理论表明, 应力集中系数 K_t 对几何曲率半径极度敏感, 微小缺陷可能导致 K_t 系数剧增, 尖角处会产生应力奇异性。大口径结构中, 微小几何缺陷会被放大成强度薄弱环节, 易成疲劳裂纹萌生源。

不同几何特征对应不同应力集中模式, 开孔处环向应力倍增, 截面突变处弯曲应力激增。圣维南原理在大尺度结构中适用性减弱, 局部应力扰动会扩散影响整体刚度分布。逻辑推导显示, 单纯增加局部壁厚非解决应力集中的最优解, 可能加剧应力集中。优化路径是“拓扑平滑”, 用高阶曲线替代简单圆弧过渡, 引导应力流线平缓转向, 降低 K_t 系数值。加强筋布局要遵循“刚度连续”原则, 避免引入二次应力集中。因此, 对几何不连续处的分析要置于整体系统中, 通过精细化几何重构实现应力场均匀化, 这是大口径阀体轻量化设计的理论核心。

3. 复杂工况下阀体应力演化的多维机制

3.1 内压驱动的非线性响应与塑性安定性边界

内压是大口径全焊接球阀的主导载荷, 但其应力响应并非始终遵循线性弹性规律。在设计压力下, 阀体虽处于弹性域, 但在试压或瞬态超压工况中, 局部高应力区 (如几何突变处) 率先进入塑性状态, 触发“应力重分布”机制。逻辑推演表明, 此时高应力区的生长停滞, 载荷向低应力区转移, 这种基于材料塑性的内力重分配显著挖掘了结构的潜在承载能力, 即“塑性安定性”。对于厚壁阀体, 利用这一机制是实现轻量化的关键路径: 允许局部在极端工况下发生受控的有限塑性变形, 而在正常工况下恢复弹性, 从而打破单纯依赖弹性极限设计的保守桎梏。

然而, 该策略必须严格界定于“安定性极限”之内, 严

防“棘轮效应”——即循环载荷下塑性应变的累积导致结构渐进式失效。理论分析进一步指出, 大口径阀体常用高强度钢具备显著的应变硬化特性。相较于理想弹塑性模型, 考虑应变硬化效应的本构关系能更准确预测极限承载力, 揭示出材料强化潜力对壁厚减薄的贡献。因此, 轻量化设计不应局限于单一工况的静态校核, 而应构建涵盖“轻载-满载-超载”全载荷谱的动态演化模型, 确保应力峰值的迁移轨迹始终处于安全可控的塑性安定区间内。

3.2 热-机耦合场与多源外部载荷的叠加效应

大口径阀门常服役于 LNG 低温或高温蒸汽等极端环境, 显著内外壁温差诱发热应力场。依据热弹性理论, 非均匀热膨胀产生的自平衡应力与内压机械应力有叠加效应。低温工况下, 内壁收缩受阻产生高值拉应力, 与内压引起的环向拉应力同向叠加, 易使内壁总应力突破屈服极限, 甚至诱发低温脆断; 高温工况下, 外壁拉应力激增可能导致蠕变损伤。若设计仅依据内压计算壁厚而忽略热-机耦合, 会有安全隐患。全焊接结构中, 焊缝热影响区对热应力更敏感, 需在理论模型中引入温度梯度修正系数。

此外, 管道自重、地震等外部机械载荷在阀体颈部与连接法兰处产生巨大弯矩与剪力。此类载荷引起的弯曲应力与内压薄膜应力叠加, 形成不对称应力场。单纯增加壁厚抵抗弯矩效率低且笨重, 优化在于“刚度匹配”, 通过合理加强筋拓扑布局与截面形状重构, 以最小材料增量最大化抗弯截面模量。

综上所述, 大口径阀体应力演化是内压非线性、热应力耦合及外部弯矩共同作用的动态过程。只有建立多维载荷耦合的理论解析框架, 厘清各分量相互作用机制, 才能设计出既安全又轻量化的新型阀体结构。

4. 基于应力分布特征的轻量化设计策略

4.1 拓扑优化驱动的材料布局重构与力流导向

拓扑优化是突破传统经验设计桎梏的核心策略, 其本质是在给定设计域内, 依据载荷路径与边界约束, 寻求材料分布的全局最优解。对于大口径全焊接球阀, 理论推演表明, 拓扑优化能引导结构从“均质厚重”向“仿生骨架”演变: 材料仅沿主应力流线分布, 形成高效的传力桁架, 而低应力冗余区被彻底剔除。这种重构不仅大幅降低自重, 更通过改善内部空腔结构优化了焊接热循环条件。然而, 纯数学优化的结果往往伴随几何奇异与制造不可行性。因此, 必须引入制造工艺约束进行正则化处理, 将抽象的密度场转化为可制造的实体几何。逻辑上, 这要求设计者深刻洞察阀体内部的力流拓扑, 确保在材料去除过程中不切断关键载荷通道, 维持结构的连续性与完整性。此外, 针对加强筋布局, 拓扑优化摒弃了传统的均匀排布模式, 转而依据主应力矢量场引导

筋板生长,构建定向传力网络。这种“按需分配”的材料布局策略,以最小的质量增量实现了刚度最大化,标志着阀体设计从定性估算向定量理性设计的范式跨越。

4.2 形状与尺寸优化的协同演进机制

形状优化与尺寸优化是轻量化设计精细化双翼,与拓扑优化形成互补闭环。形状优化聚焦几何边界平滑重构,消除应力集中源。针对接管过渡区等关键部位,用高阶曲线替代传统圆弧过渡,可降低曲率突变率,使应力流线平缓偏转,压低应力集中系数。局部峰值应力降低释放减薄潜力,为整体轻量化创造条件。尺寸优化针对壁厚结构参数微调。厚壁圆筒应力沿径向非线性分布,传统等壁厚设计浪费外层材料,采用梯度壁厚或复合结构,可使材料等效应力趋于一致,实现“等强度”设计。形状优化与尺寸优化协同体现在迭代收敛中:形状优化改善几何形态降低局部峰值,为尺寸优化提供减薄空间;尺寸优化精确匹配材料用量,挖掘承载潜力。二者交替迭代,在满足强度等约束下达成全局质量最小化。这种多维协同机制让大口径全焊接球阀极致轻量化且有安全裕度,平衡力学性能与经济成本。

5. 轻量化设计与制造可行性的理论博弈

5.1 焊接工艺约束下的结构简化与热力学平衡

轻量化方案的工程落地,首要受制于全焊接工艺的物理极限。理论推演表明,过度的拓扑复杂化或极端的壁厚减薄,将导致焊接热输入密度失控,极易诱发烧穿、角变形及高值残余应力,反而削弱结构的本质安全。因此,设计必须在“材料极致利用”与“工艺稳健性”之间建立动态平衡机制。逻辑上,必须将“可焊性”作为核心约束引入优化模型:剔除无法实施内部焊接或无损检测的封闭空腔,确保焊缝可达性与操作空间。此外,设计需前瞻性地耦合焊接热循环效应,通过优化接头几何(如采用窄间隙坡口)减少填充金属量,从源头降低热输入;同时利用对称结构布局诱导焊接变形相互抵消。制造约束并非轻量化的对立面,而是引导设计从数学最优解走向工程可行解的导航标,确保结构在制造阶段即具备低残余应力与高尺寸精度的先天优势。

5.2 全生命周期视角下的检测可达性与耐久性权衡

参考文献

- [1]吴胜,刘惺,姚有丽,等. 基于组合近似模型和IPSO-GA的全焊接球阀焊接工艺参数优化研究[J]. 黑龙江科学,2025,16(14):32-37.
- [2]何纳川,陈俊,黄志慧,等. 基于BP神经网络的全焊接球阀焊接质量预测[J]. 机电工程技术,2025,54(21):15-20.
- [3]李华,于子峰,古自强,等. 长输管道高压力、大口径全焊接球阀国产化与优化提升[J]. 阀门,2024(2):244-250.
- [4]陆怡,查涵清,姚润盐. 特大口径全焊接球阀的密封性分析及结构改进[J]. 计算机仿真,2022,39(8):441-445,455.
- [5]冯涛,陈双河,何亚峰,等. 大口径全焊接热力球阀设计与有限元分析[J]. 机械设计与制造工程,2022,51(6):47-50.

大口径全焊接球阀的“免维护”特性建立在严苛的全生命周期可靠性之上,这要求轻量化设计必须让渡部分几何自由度以换取检测与维护的可达性(Accessibility)。理论分析指出,若为减重而构建封闭死腔或狭窄通道,将导致超声波、射线等无损检测手段出现盲区,埋下不可控的安全隐患。逻辑推导证实,预留必要的检测通道或设计模块化检测接口,虽微增初始重量,却是保障长期运行安全的必要冗余。更关键的是,轻量化绝非静态的初始状态优化,而是动态的寿命周期管理。设计必须纳入腐蚀速率与冲蚀磨损模型,确保在设计寿命终了时,减薄后的剩余壁厚仍满足强度准则。真正的轻量化应通过流道形态优化降低冲蚀风险、设置在线监测点等手段,在保障耐久性的前提下实现质量最小化。这种统筹制造、检测与运维的系统性博弈,体现了工程设计从单一性能指标向全生命周期综合效能跃迁的科学内涵。

6. 结论

本文构建了大口径全焊接球阀从应力机理解析到轻量化策略生成的完整理论框架。研究阐明,阀体应力场呈现显著的非线性梯度、多轴耦合及几何奇异特征,揭示了传统等壁厚设计存在巨大的材料冗余。理论推导证实,厚壁效应与热-机耦合机制是变壁厚设计的物理基石,而几何不连续处的应力集中则是形状优化的核心靶点。

在设计方法论上,本文确立了拓扑、形状与尺寸优化协同演进的范式:拓扑优化重构力流路径,形状优化平滑应力峰值,尺寸优化消除低应力区,三者合力实现了材料利用率的最大化。同时,研究深刻剖析了轻量化与制造可焊性、检测可达性及全生命周期耐久性之间的博弈关系,提出了“约束驱动”的稳健设计逻辑,确保理论最优解向工程可行解的有效转化。

综上,大口径球阀的轻量化是一项基于力学本质的系统工程。本文虽侧重于定性逻辑推演,但为突破传统经验设计瓶颈提供了清晰的理论指引。未来研究应聚焦于多物理场耦合的量化表征与智能设计平台的开发,推动高端流体装备向更安全、经济、绿色的方向跃迁,确立轻量化技术在提升核心竞争力中的关键地位。