阀门密封结构设计与可靠性分析

万丽丽　董胜帅　李　静　韩凯航　吉元鑫

河南泉舜流体控制科技有限公司 河南 郑州 450001

【摘　要】：阀门是流体控制系统的主要部件，它的密封性好坏直接影响到设备的使用寿命、运行安全和介质泄漏。密封结构设计包含密封副材料匹配、密封比压分布、密封面形貌以及弹性补偿等各个方面，可靠性分析还要考虑材料性能退化、工况参数变化和失效模式耦合等各方面因素。本文对常见的密封结构类型及其适用工况进行了阐述，分析了密封副材料选择对密封性能的影响机理，研究了密封面加工精度和表面完整性对密封可靠性的规律，提出了基于失效模式和影响分析的密封可靠性评价方法，论述了高温、高压、腐蚀性介质等严苛工况下密封结构优化设计的方法，为阀门密封系统工程设计及可靠性提高提供理论依据。

【关键词】：阀门；密封结构；密封副；可靠性分析；失效模式

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.056

1 引言

阀门属于各种流体输送系统必不可少的控制元件，具有启闭、调节、分流、止回等功能。阀门的密封性能同供水、供热、电力、冶金等系统的安全、运行效率、环保有关。根据统计可知，在阀门失效事故中，大约有六成和密封失效有关，即内漏、外漏、密封副磨损或者腐蚀等[1]。随着工业装置向着高温、高压、高腐蚀和长周期运行方向发展，阀门密封结构的可靠性也不断提高。密封结构的设计不但是阀门产品开发的重要技术，也是保证系统安全运行的重要环节。传统的密封设计大多依靠经验类比以及静压试验来检验，缺少对密封机理的深入了解以及对全寿命周期可靠性进行评价的能力[2]。因此，从密封原理入手，对密封结构设计要素进行深入研究，建立科学的可靠性评价方法，对提高阀门产品质量、工程安全具有十分重要的意义[3]。本文就阀门密封结构设计关键技术问题展开论述，从密封副设计、材料选择、加工工艺、可靠性分析等方面入手，给阀门工程技术人员提供系统的理论指导。

2 阀门密封结构设计的关键要素

2.1 密封比压的确定与分布优化

密封比压是指单位密封面积上所受的压力，它是评价密封性能好坏的参数之一。设计密封比压时，应使它处于最小必需密封比压和材料许用比压之间。最小必需密封比压由介质密封难易程度决定，气体介质比液体介质需更高的密封比压，低粘度介质比高粘度介质需更高的密封比压[4]。金属密封副最小密封比压一般用经验公式来计算；非金属密封副则根据材料的弹性模量和压缩回弹特性来定。密封比压的均匀性也是影响密封可靠性的又一重要因素。实际密封面上的比压分布一般不均匀，和阀杆载荷传递路径、密封面加工误差、阀体刚度等有关。优化密封比压分布的措施有，合理设计阀杆与阀瓣的连接方式，使关闭力均匀作用在密封面上，采用浮动阀座或者弹性阀座结构，利用阀座的弹性变形来补偿加工误差和装配偏差，在密封面外侧加装辅助密封圈，减小对主密封面的比压要求[5]。大口径阀门可以采用双阀座或者多片式密封结构来分散密封载荷，提高比压的均匀性。

2.2 密封面形貌与表面完整性

密封面微观形貌直接影响到初始密封性能以及磨合特性。从微观角度来说，任何一个加工表面都会存在峰谷起伏，流体泄漏就是通过密封面之间的连通孔隙发生的。密封面粗糙度过大会造成初始泄漏率高，粗糙度过小则密封副在磨合过程中容易产生粘着磨损，反而会降低密封寿命。因此密封面粗糙度应根据密封副材料及使用工况来定，一般为 Ra0.2～0.8 μm。除了粗糙度之外，密封面的波纹度、平面度、圆度等宏观几何误差对密封性能的影响也比较大。平面度超差会造成局部比压集中或者悬空，引起局部泄漏；圆度误差会影响锥面密封接触宽度的均匀性。密封面表面完整性包含表面残余应力、加工变质层以及微裂纹等，在高循环疲劳或者热交变工况下，会引发密封面剥落或者开裂。堆焊硬质合金密封面时要严格控制堆焊工艺参数，防止热影响区产生脆性相或者气孔缺陷。研磨、珩磨等精加工工艺应在热处理之后进行，以消除加工应力造成的变形。

2.3 弹性补偿与温度适应性

阀门在使用中，密封副会受到温度变化造成的热膨胀不同、压力波动造成变形、长时间工作产生的磨损和塑性变形等影响。为了保持密封比压的稳定，密封结构要有一定的弹性补偿能力。常见的弹性补偿结构有阀座加装波形弹簧或者碟形弹簧，在温度变化时自动调节阀座的位置；采用弹性密封圈（O 形圈、唇形密封圈等）作为辅助密封，利用橡胶或者聚合物的

高弹性补偿密封面间隙；设计挠性阀瓣或者挠性阀座，使在外力或者介质压力的作用下产生可控的变形，贴合密封面。温度适应性属于阀门密封设计时要考虑的因素之一。高温工况下，金属材料的热膨胀会造成密封副间隙增大或者过盈量失衡；低温工况下，非金属密封材料会变得脆硬、收缩。设计时要计算出各个温度下密封副的间隙变化量，然后合理确定初始过盈量或者预压缩量。对温差较大的地方，可采用热膨胀系数相近的密封副材料，在密封结构中设置温度补偿间隙。

2.4 密封结构的防腐蚀与抗冲蚀设计

腐蚀、冲蚀是造成阀门密封失效的两种主要原因。腐蚀介质对密封面的化学侵蚀会造成表面完整性被破坏，表面粗糙度增大，严重时还会出现蚀坑或者贯穿性孔洞。抗腐蚀密封设计有选择耐腐蚀密封副材料（哈氏合金、蒙乃尔合金、钛合金等），密封面堆焊或者喷涂耐腐蚀合金，密封面渗氮、渗硼等表面改性处理。冲蚀是高速流体中颗粒对密封面的机械磨损，多出现在节流阀或者启闭次数较多的工况。抗冲蚀设计要点为优化阀内流道结构，减小流体对密封面的直接冲击，在密封面迎流方向加设保护凸缘或导流槽，改变介质流向，选用高硬度密封副材料，如碳化钨、碳化铬等，采用迷宫式密封或多级节流结构，降低密封面处的流速。

3 阀门密封可靠性分析方法

3.1 失效模式与影响分析

阀门密封失效模式有泄漏量超标的、密封面磨损的、密封面腐蚀的、密封圈老化龟裂的、弹性元件疲劳断裂的、热咬死的。对每一个失效模式要分析它的产生原因、影响程度和检测难易程度。泄漏量超标的原因为密封比压不够、密封面损坏、异物卡住、阀杆驱动不力等。密封面磨损和启闭次数、介质含固量、润滑条件、材料硬度有关。影响分析要评价失效后果，对有毒、易燃易爆的介质来说，密封失效会造成泄漏火灾爆炸事故，危险等级最高，对一般的水蒸气或者压缩空气来说，密封失效只是影响系统效率，危险等级低。根据失效模式发生概率和影响程度来确定密封结构的主要控制点。例如对频繁启闭的阀门来说，密封面耐磨性是首先要考虑的指标，对高温工况来说，密封副的热稳定性是重要的，对腐蚀性介质来说，密封面材料的耐蚀性是决定性的。

3.2 密封性能退化规律与寿命预测

阀门密封性能的下降是逐渐发生的，一般以泄漏率随时间呈指数增长的方式表现出来。初始磨合阶段密封面微凸体慢慢磨平，实际接触面积变大，泄漏率降低；稳定磨损阶段密封面以均匀磨损为主，泄漏率缓慢增加；剧烈磨损阶段密封面出现划伤、剥落或者腐蚀坑，泄漏率急剧上升。密封寿命预测要创建退化模型，把磨损率，腐蚀速率，启闭次数，温度循环以及介质压力变动等要素纳入考量范围。加速寿命试验是评价密封可靠性的方法之一，用提高试验应力（温度、压力、循环频率）来缩短试验周期，外推到常规工况下的寿命。在可靠性设计中可以采用安全系数法，即把计算寿命乘以一个合适的系数（一般取 2.5～5），作为密封结构的更换周期。

3.3 密封可靠性试验验证方法

密封可靠性试验属于检验设计合理性的方法之一。基本试验有静压密封试验、低压气密试验、高压水压试验。静压密封试验是在常温下进行的，用以检验密封副的初始密封能力；低压气密试验主要用来检测气体介质阀门的微小泄漏，常用气泡检漏或者氦质谱检漏的方法；高压水压试验是检验阀体强度和密封结构的极限承压能力。可靠性强化试验有温度循环试验，模拟阀门在变温工况下密封性能的变化，压力脉冲试验，考核密封结构在压力波动时的抗疲劳能力，寿命试验（启闭循环试验），检验密封副的耐磨性及弹性元件的疲劳寿命。试验结果要加以统计分析，算出密封可靠度的置信区间。对批量生产的阀门可以使用抽样检验的方法，用抽检样本的密封性能来推断整批产品的合格率。

4 严苛工况下密封结构设计优化策略

4.1 高温工况密封设计

高温工况下阀门密封遇到的主要问题就是材料强度变低，热膨胀不一样，氧化腐蚀。优化策略有选择耐高温密封副材料，石墨、司太立合金、镍基合金等；用柔性石墨填料代替传统的 PTFE 填料，耐温可达 550℃以上；设计热补偿结构，在阀座背面设置波形弹簧来补偿阀体和阀瓣的热膨胀差；控制密封面硬度，防止高温软化造成粘着磨损。高温高压阀门可以采用压力自紧式密封结构，即用介质压力推动阀盖或者阀座贴紧密封面，压力越大密封越紧。该类结构消除了螺栓预紧力随温度变化的影响，可靠性更好。

4.2 高压差工况密封设计

高压差工况下，流体经过密封面的时候高速射流会引发气蚀、闪蒸和剧烈的振动，造成密封面被破坏。优化设计策略有多种，用多级降压阀芯把总压降分成若干个小压降，减小密封面处的流速，在密封面下游装设多孔节流套或者迷宫式流道来消耗流体动能，选用耐气蚀材料，例如硬质合金、陶瓷等，设计平衡式阀芯结构以减小阀杆驱动力，防止关闭力不够造成密封失效。高压气体介质可采用软密封结构，依靠 PTFE 等材料的弹性变形达到零泄漏的效果，但是需要考虑软密封材料的抗挤出能力，在密封圈后面加装挡圈。

4.3 腐蚀性介质工况密封设计

腐蚀性介质对密封结构的侵蚀有均匀腐蚀、点蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀开裂。设计要点为根据介质腐蚀性等级选择合适的不锈钢或者特种合金（双相不锈钢、哈氏合金等），避免密封面产生缝隙，防止缝隙腐蚀，控制密封面加工残余拉应力，必要时进行去应力退火，对含氯离子介质，避免使用奥氏体不锈钢，优先选用钛材或者镍基合金，衬里阀门可以采用 PTFE 或者 PFA 全衬结构，使金属阀体和介质完全隔离。密封圈材料要具备抗介质溶胀、抗老化性能，氟橡胶用作耐油介质，乙丙橡胶用作耐酸碱介质。

5 结语

阀门密封结构设计属于一个包含材料科学、摩擦学、弹塑性力学和流体力学等诸多学科交叉的综合工程。本文从密封的基本原理入手，对密封副的设计、材料的选择、形貌的控制、弹性补偿等关键技术要素进行了系统的论述，对失效模式分析、性能退化规律和可靠性试验等评价方法也做了论述，针对高温、高压差和腐蚀性介质等严苛的工况提出了设计优化的方法。阀门密封可靠性的提高不能只依靠密封结构的改进，还要结合制造工艺控制、安装调试规范和运维监测手段来形成全生命周期的质量保证体系。伴随着新材料、新工艺以及数字化仿真技术的发展，阀门密封设计会朝着更加精确、更加适应、更加耐用的方向不断前进，给各种流体控制系统安全运行、节能降耗提供强有力的保障。

参考文献：

[1] 戴义明,戴京,戴兵.极端压力条件下的阀门耐久性与可靠性分析[J].中国机械,2024(27):149-152.

[2] 尹志猛,迟浩,刘欢.面向智能制造的阀门密封结构数字化优化设计方法探析[J].数码设计(电子版),2024(5):0885-0887.

[3] 肉孜麦麦提·巴克,邱福寿,伊凌霄.高温热采截止阀新型结构设计与性能研究[J].科学研究与应用,2025,04(01).

[4] 郑志成.内楔式闸阀密封结构的设计与分析[J].现代工程科技,2025(14).

[5] 吴宏亮,蒋志鹏,何超,等.阀门类零件表面处理装置结构设计及气动控制仿真分析[J].装备制造技术,2024(12):130-133.