

工业管道阀门密封失效原因分析与优化改进研究

韩凯航 董胜帅 吉元鑫 万丽丽 张 显

河南泉舜流体控制科技有限公司 河南 郑州 450001

【摘 要】：工业管道系统中阀门的密封性能直接影响介质输送的安全性、经济性和环境友好性。密封失效不仅造成介质泄漏和能量损失，还可能引发设备损坏、生产中断及安全事故。本文从阀门密封结构的基本原理出发，系统分析了密封失效的典型模式及其内在机理，包括密封面磨损与划伤、密封比压不足、密封元件老化与腐蚀、热交变引起的密封松弛等。在此基础上，从密封副材料优化、密封面加工工艺改进、密封结构弹性补偿设计、密封元件选型规范及安装维护管理等方面提出了系统化的优化改进措施，旨在提升工业管道阀门密封的长期可靠性，降低泄漏风险。

【关键词】：工业管道；阀门密封；失效分析；结构优化

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.040

1 引言

阀门是工业管道系统中使用最多的控制元件，也是分布最广的元件之一，密封性能好坏直接影响到管道系统的安全运行以及介质输送效率^[1]。阀门密封失效造成介质泄漏，在供水、供热、电力、冶金等众多的工业领域中都是比较常见的现象。内漏造成介质流失、能耗增加，外漏会带来环境污染、设备腐蚀、人身伤害。阀门密封失效原因很复杂，牵涉设计选型、材料质量、制造精度、安装质量、操作维护和工况变化等诸多方面^[2]。

2 阀门密封失效的典型模式与机理分析

2.1 密封面磨损与划伤

密封面磨损也是造成阀门内漏的原因之一。阀门启闭时，密封副（阀瓣和阀座）之间有相对运动，就会产生摩擦磨损。根据磨损机理的不同可以分为磨粒磨损、粘着磨损和疲劳磨损三种基本形式^[3]。

磨粒磨损是介质中携带的硬质颗粒（铁锈、焊渣、砂粒等）在密封面相对运动时产生切削作用，在密封面上形成划痕或者沟槽。这类磨损在供水管道、供热管网的阀门中比较常见，由于管道内壁腐蚀产物、施工残留物容易积聚在阀座底部，在阀门关闭时被压入密封面。磨粒磨损的特征就是密封面有和运动方向一致的细密划痕，严重的时候就会产生贯穿性的沟槽，使介质直接泄漏^[4]。

粘着磨损是在密封副材料亲和性较高、硬度相当的时候发生的。当密封面在高压下接触时，微观凸起会冷焊在一起，相对运动时焊点就会被撕裂，在密封面上产生麻点或者凹坑。该种磨损在高温阀门中更严重，因为高温使材料的抗粘着性降低。粘着磨损的典型特征就是密封面产生不规则的麻点、撕裂等痕迹，

泄漏量随着启闭次数的增多而迅速增大^[5]。

疲劳磨损就是密封面反复接触、分离所造成的微观疲劳裂纹的扩展。阀门频繁启闭时，密封面表层的微观凸起受到交变接触应力的作用，慢慢产生疲劳裂纹，最后造成表层材料剥落。疲劳磨损是密封面产生细微的剥落坑，初期泄漏量小，但是随着剥落面积增大，泄漏量迅速增大。

2.2 密封比压不足与分布不均

密封比压是指单位密封面积上的压紧力，是保证密封的参数。当实际密封比压小于最小必需密封比压的时候，密封面的微观孔隙不能被有效封闭，介质就会泄漏。密封比压不足的原因主要有以下几方面。

其一为关闭力不够。依靠阀杆推力实现密封的阀门，如果驱动装置输出力矩不够、阀杆螺纹磨损或者传动机构故障，都会造成阀瓣不能压紧阀座，密封比压达不到设计要求。其二，密封副磨损造成接触面积增大。随着密封面的磨损，实际接触面积增大，在相同的关闭力作用下，密封比压降低。当密封面磨损到一定程度时，即使关闭力正常，密封比压也会小于临界值。第三点就是弹性元件的疲劳松弛。部分阀门（蝶阀、球阀）靠弹性阀座来提供密封比压，长期使用后弹性元件的弹性变差，密封比压也随之变小。

密封比压分布不均匀也会造成密封失效。由于阀体刚度不够、密封面加工精度差或者阀杆载荷偏心，密封面上的比压分布会非常不均匀。局部比压过高时加快了磨损速度，局部比压过低的地方就成了泄漏通道。比压分布不均问题在大口径阀门中比较明显，因为大口径阀门的阀体刚度较低，在介质压力的作用下容易产生弹性变形，造成密封面偏斜。

2.3 密封元件老化、腐蚀与热损伤

密封元件有非金属密封圈、垫片、填料等，它们的磨损、老化是造成阀门外漏的主要原因。

非金属密封圈（橡胶、聚四氟乙烯等）在长时间的使用中会老化。橡胶材料在氧气、臭氧、紫外线和热的作用下慢慢变硬、龟裂，失去弹性；聚四氟乙烯虽然化学稳定性好，但是长期受到应力作用时会产生蠕变松弛，使密封比压降低。老化速度同环境温度成指数关系，温度每升高 10°C ，老化速率大约增加一倍。因此高温工况下非金属密封元件的寿命大大降低。

腐蚀也是金属密封面、金属密封元件的又一危险。介质中含有的氯离子、溶解氧、二氧化碳等腐蚀性组分会腐蚀密封面材料，使表面出现化学或者电化学侵蚀。点蚀造成密封面产生微小蚀坑，成为泄漏通道，均匀腐蚀使密封面尺寸发生变化，改变密封副的配合状态。应力腐蚀开裂是密封元件在腐蚀介质和拉应力共同作用下发生的脆性断裂，多发生在阀杆或者密封环的应力集中处。

热损伤有热膨胀造成的密封间隙改变以及高温氧化引发的材料性能衰退这两种情况。当阀体和阀瓣、阀座的热膨胀系数不同的时候，温度变化就会造成密封副的配合间隙发生变化。如果设计时没有留有足够的热膨胀余量，高温下会出现过盈配合，造成密封面过度挤压而损坏；低温下会出现间隙过大，密封失效。

2.4 热交变与压力波动引起的密封松弛

在工业管道系统当中，温度以及压力出现周期性的变化情况很普遍。热交变、压力波动都会给阀门密封带来很大影响。

热交变对中法兰螺栓预紧力、垫片密封性能都有影响。升温时，螺栓与法兰材料的热膨胀不同会造成螺栓预紧力降低。螺栓预紧力小于垫片密封所需要的最小应力时，中法兰就会出现泄漏现象。反复的热交变还会造成螺栓的疲劳蠕变，使预紧力慢慢下降。垫片材料在热交变作用下也会产生压缩永久变形，密封应力松弛，回弹能力降低，不能补偿法兰面的微小分离。

压力波动对密封副的影响也不能小视。当介质压力突然下降的时候，密封副两侧的压差发生改变，从而引起密封比压瞬间降低，出现短暂的泄漏现象。压力波动频繁的时候，密封面受交变载荷影响，加快了疲劳磨损的速度。对于依靠介质压力辅助密封的阀门（平行式闸阀等），压力波动会影响密封比压的稳定性，压力过低时密封会失效。

3 阀门密封失效的优化改进措施

3.1 密封副材料优化与表面处理技术

对于密封面的磨损问题，应该从材料升级、表面强化两个方面来加以改善。第一，选择高硬度、抗擦伤的密封副材料。对于金属密封阀门来说，推荐在密封面上堆焊司太立合金（Stellite）或者镍基合金，这些材料具有较好的高温硬度、抗粘着性以及耐腐蚀性，可以大大延长密封寿命。对非金属密封阀门选用抗老化性更好的材料，即增强聚四氟乙烯、聚醚醚酮等。

第二部分采用先进的表面处理工艺。密封面经过渗氮、渗硼或者激光熔覆处理之后，表面硬度和耐磨性大大提高。渗氮处理可以形成不锈钢密封面的硬化层，从而提高不锈钢密封面的抗磨粒磨损、抗粘着磨损的能力。激光熔覆技术可以在密封面局部熔覆陶瓷或者金属陶瓷涂层，涂层和基体呈冶金结合，耐磨性很高。

3.2 密封结构改进与弹性补偿设计

为了克服密封比压不够、分布不均的现象，可以采用弹性补偿密封结构。传统的刚性密封副对加工精度、安装质量要求很高，稍有偏差就会造成比压分布不均匀。弹性补偿设计就是用弹性元件在密封副中起到作用，使密封面可以自动适应阀体变形、加工误差，从而保证密封比压均匀。

常见的弹性补偿结构有以下几种类型，浮动阀座结构，即阀座与阀体之间设置波形弹簧或者碟形弹簧，阀座可以沿轴向微小移动，在弹簧力的作用下始终与阀瓣良好接触；挠性阀瓣结构，即阀瓣设计为具有一定挠性的薄壁结构，在关闭力的作用下产生弹性变形，贴合阀座曲面，特别适合于球面密封；背压辅助密封结构，即在密封圈的背面引入介质压力，利用介质压力辅助压紧密封圈，压力越大密封越紧。

中法兰密封可以使用活载螺栓或者碟形弹簧垫圈代替普通的平垫圈。活载螺栓依靠碟形弹簧的弹性变形来补偿螺栓预紧力的松弛，在热交变工况下保持恒定的螺栓载荷。垫片方面，建议使用具有较好回弹性能的柔性石墨复合垫或者金属缠绕垫，不能用纯橡胶或者石棉垫片。

3.3 密封元件选型与安装工艺规范

密封元件的选择决定阀门的外漏是否可靠。填料的选择要考虑介质的温度、压力和腐蚀性等各方面的情况。高温工况下选用柔性石墨填料，耐温可达 600°C 以上，自润滑性好、压缩回弹大。填料组合应为上、中、下三段式结构，中间设隔离环以平衡填料压力，

底部设防挤出环防止填料被高压介质吹出。填料压盖螺栓预紧力矩要准确控制，过紧会加大阀杆摩擦，过松会造成泄漏。

垫片的选择要根据法兰形式、压力等级、介质性质来定。高温高压工况用金属缠绕垫（带内外环）或齿形组合垫。垫片安装前应检查法兰密封面有无划伤、腐蚀，法兰螺栓应均匀紧固，紧固顺序为对角交叉，分2~3步达到设计力矩。

3.4 安装维护管理制度优化

阀门密封失效的预防不能只依靠设计和制造质量来保证，还要和安装、调试、操作、维护等管理环节联系起来。

安装时要保证管道清洁，不得有焊渣、铁锈等杂质混入阀门密封面内。管道吹扫应在阀门安装前进行，或者采用旁路保护的方式。阀门安装时应使阀体不承受附加的管道应力，法兰密封面平行，螺栓紧固力矩相同。

操作阶段要制订操作规程。对闸阀、截止阀等截断类阀门来说，不能长时间处于微开状态，以免密封面被介质冲蚀。启闭时应平稳，不能快开快关造成密封面的冲击损伤。对经常处于全开或者全关状态的阀门，应定期（半年一次）做全行程操作，防止密封面因为长时间的静态接触而产生黏着或者结垢。

维护阶段要实行阀门密封状况定时检查制度。检测方法有：通过阀门出口温度或者压力变化来判断内漏情况，用便携式超声波检漏仪检测外漏点，定期检查填料压盖螺栓力矩，必要时进行热紧。对已经出现密封失效的阀门及时进行拆检，分析失效原因，有针对性地修复或者更换。

4 不同工况下阀门密封失效的针对性对策

（1）高温工况下的密封优化：高温是造成密封失效的最主要因素。高温工况下应该采取以下措施：选用耐热材料，密封副用司太立合金或者镍基合金堆焊，填料和垫片选用柔性石墨；设计热补偿结构，阀体与

阀瓣之间留有足够大的热膨胀间隙，中法兰采用活载螺栓或者碟簧垫圈；加强散热措施，长颈阀盖可以降低填料函温度，延长填料寿命；操作注意事项，升温过程要缓慢，首次升温到工作温度后要及时进行热紧。

（2）高压差工况下的密封优化：高压差工况下，介质经过密封面的时候高速冲刷成为造成密封失效的重要因素。对策有采用多级降压阀芯结构，把总压降分成若干个小压降，减小密封面上流速；在密封面下游加装节流套或者迷宫式通道，消耗流体动能；选用耐冲蚀密封副材料，如碳化钨或者陶瓷涂层；设计平衡式阀芯，减小关闭力，降低密封面磨损。

（3）腐蚀性介质工况下的密封优化：腐蚀性介质对密封面的化学侵蚀、电化学腐蚀是主要的威胁。对策有选择耐腐蚀的密封副材料，如哈氏合金、钛材、双相不锈钢等；密封面堆焊耐腐蚀合金，如 Inconel 625；避免缝隙结构，防止缝隙腐蚀；控制介质中腐蚀性组分含量，必要时使用缓蚀剂；密封圈材料要和介质相容，不能发生溶胀或者降解。

（4）频繁操作工况下的密封优化：频繁操作的阀门，密封面磨损速度比普通的阀门要快得多。优化措施有提高密封面硬度，采用司太立合金堆焊或者碳化铬涂层，降低密封比压设计值，在保证密封的基础上减小接触压力，使用耐磨的非金属密封圈，如增强 PTFE 或者 PEEK，改善密封面润滑条件，在介质允许的情况下加入润滑剂。

5 结语

工业管道阀门密封失效原因很多，有磨损、比压不够、老化腐蚀、热交变等。解决密封失效问题要从密封副材料、密封结构、密封元件选型、安装维护管理等各方面综合考虑。经过上述措施的系统实施之后，阀门密封失效率可大大降低，阀门使用寿命可得到延长，工业管道系统安全、经济运行。随着状态监测技术、智能诊断技术的发展，阀门的密封可靠性会由原来的被动维修变为现在的主动预防。

参考文献：

- [1] 路镐然,李星,叶当卫,等.阀门密封焊缝切割装置设计与控制方法研究[J].工程机械,2025,56(12):15-18.
- [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] 朱朝峰.高压差工况下阀门密封结构优化与动态密封技术研究综述[J].阀门,2025(6):686-690.
- [4] 夏轩.阀门密封系统中微振动对密封性能的影响及减振设计优化[J].大众文摘,2025(8).
- [5] 范凌燕,叶芳.高温高压环境下阀门密封材料的选用与性能研究[J].模型世界,2025(22):72-74.