介质侵蚀工况下阀门密封结构失效成因与防控对策

雷 霆 吉元鑫 董胜帅 韩凯航 张 显
河南泉舜流体控制科技有限公司 河南 郑州 450001

【摘 要】：阀门密封结构是流体控制系统中最关键的薄弱环节，其失效不仅导致介质泄漏和能源损失，更可能引发安全事故与环境污染。在腐蚀性介质、含固体颗粒流体、高温高压及多相流等侵蚀性工况下，密封结构的失效机制呈现出显著的耦合性与复杂性。本文从介质侵蚀的基本类型出发，系统分析了电化学腐蚀、冲蚀磨损、应力腐蚀开裂及密封材料老化退化四类主要失效模式的成因机理，揭示了腐蚀与冲蚀的协同效应、密封面微环境演化及多场耦合作用等深层机制。在此基础上，从密封材料适配升级、密封结构优化设计、表面防护技术应用及运维管理强化四个维度提出了系统的防控对策。研究表明，阀门密封结构在侵蚀工况下的失效防控需以失效机理的准确识别为前提，以材料—结构—工艺的系统匹配为核心，以全生命周期管理为保障，方能实现密封可靠性的实质性提升。

【关键词】：阀门密封；介质侵蚀；腐蚀失效；冲蚀磨损；防控对策

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.046

1 引言

阀门属于流体控制系统的关键执行元件，它的密封性能直接影响到整个系统安全以及运行状况。石油化工、火力发电、煤化工、油气田开发、海洋工程等领域中的阀门长期处于腐蚀性介质、含固体颗粒流体、高温高压、多相流等恶劣工况中，密封结构失效问题严重[1]。阀门密封结构的失效不同于一般的机械零件失效，它具有很强的介质依赖性。密封面处在工艺介质之中，受到化学腐蚀、物理冲刷、温度交变以及机械载荷的共同影响，它的失效一般不是由单一因素造成的，而常常是多种侵蚀机理互相影响的结果[2]。

2 阀门密封结构的典型失效模式

介质侵蚀造成阀门密封结构失效有各种典型的模式。

密封面腐蚀失效是造成密封失效的最常见的一种形式。铜合金截止阀阀瓣密封面由于脱成分腐蚀、冲刷和缝隙腐蚀的共同作用而失效，管路中的泥沙会促进缝隙的产生，并增大冲刷力。密封面出现局部腐蚀之后，表面粗糙度变大，密封比压分布不均，进而造成泄漏[3]。

密封面冲蚀磨损多见于含固体颗粒或者高流速流体的工况。V 型调节球阀在煤化工工艺管道中冲蚀磨损机理为切削和变形同时作用，当介质流速、颗粒质量流量和颗粒尺寸增大时，最大冲蚀率和平均冲蚀率随之增大[4]。冲蚀磨损造成密封面的几何形状发生变化，密封比压降低到零，密封失效。

应力腐蚀开裂是由腐蚀介质和拉应力共同作用所引起的。川渝气田阀门轴承组件受力部位在腐蚀介质作用下出现压应力诱导腐蚀。裂纹产生之后沿晶界或者穿晶方向不断扩展，最后造成密封结构突然失效，危害性很大[5]。

密封材料老化退化，主要是对非金属密封元件造成影响。核电厂海水蝶阀的丁腈橡胶密封圈在使用过程中发生严重的老化，拉伸性能、压缩永久变形明显降低，在阀门反复开关动作时受到挤压最终造成开裂。温度循环、介质渗透、应力累积三者一起加快了橡胶材料的老化速度。

3 介质侵蚀工况下密封结构失效的机理分析

3.1 腐蚀与冲蚀的协同效应

腐蚀和冲蚀的共同作用，就是介质侵蚀工况下密封结构失效的主要机理。两者不是简单的相加关系，而是通过多条途径互相促进，产生出一个大于 2 的效果。

一方面腐蚀改变密封面的表面状态和力学性能。腐蚀产物膜虽然可以起到一定的保护作用，但是冲蚀会将它剥离掉，使新鲜的金属表面暴露在腐蚀介质中，腐蚀速率随之大大提高。冲蚀造成的表面塑性变形、加工硬化都会影响到材料的腐蚀性能。变形区位错密度增大，电化学活性增强，优先进行阳极溶解。当腐蚀产物在密封面缝隙里堆积起来的时候，还会产生闭塞电池效应，从而加快局部腐蚀。

含有氯离子、硫化氢的介质中协同作用更加明显。氯离子破坏钝化膜，给点蚀的萌生创造条件；硫化氢促进氢的渗入，增大氢致开裂的可能性。密封面在点蚀、冲蚀的交替作用下产生粗糙的损伤表面，密封比压分布严重不均匀，局部泄漏通道慢慢扩展成贯穿性

的泄漏路径。

3.2 密封面微环境演化与失效的自加速特性

阀门启闭时密封面接触状态、介质流动状态都会发生剧烈变化，密封面微环境也随之变化，表现出自加速失效的特点。

阀门关闭时，密封面之间有很小的间隙。腐蚀性介质在毛细作用下进入间隙，形成狭窄的溶液滞留区。由于间隙内外物质交换受阻，腐蚀产物的累积造成局部溶液成分发生明显改变，氧浓度下降、氯离子增多、pH 值降低。这种微环境变化促进了缝隙腐蚀的萌生与扩展。

阀门开启、调节时密封面间隙的几何形状以及流体动力学状况都会随之改变。部分开启状态，高速流体在狭窄的密封间隙里流动的时候会产生局部节流效应，流速突然增大，冲蚀作用就更加明显。流体的空化效应也会给密封面带来气蚀损伤。开启过程中密封面之间存在着相对运动，因此在接触区就会产生摩擦以及微动磨损，从而加大了材料的损伤。

该种微环境的演化有自加速性。初始的表面粗糙或者局部缺陷会改变局部的流场，加快了这个区域的冲蚀和腐蚀。损伤区域的扩大又使密封面的接触状况发生变化，从而引起恶性循环。阀门频繁开启或者关闭的时候，密封面受到的磨损速度比稳定运行时快得多。

3.3 多场耦合作用下的失效加速

阀门密封结构在实际使用中会受到温度场、应力场和流体动力场三者相互作用的影响，三者之间的相互影响大大加快了失效的速度。

温度场影响的方面有很多。温度升高会加快电化学反应的速度，增大腐蚀介质的侵蚀性，高温时材料的屈服强度降低，蠕变松弛造成密封比压下降，温度循环产生的热膨胀和收缩会在密封面上产生交变应力，加快疲劳损伤。煤制气装置中高温阀门要面对合成气的高温腐蚀性以及黑水的强磨蚀性两种考验。

应力场的影响也不能忽略。密封面接触应力分布不均的时候，高应力区最先出现应力腐蚀开裂。周期性高压载荷会造成重要的地方出现应力集中现象，从而加快微裂纹的产生和发展速度。密封结构受到温差和压差的共同影响，在热应力的作用下，应力腐蚀的风险也随之增大。

流体动力场决定着腐蚀介质以及冲蚀颗粒怎样作用于密封面，从而产生怎样的作用力。流速、流态、颗粒浓度、粒径分布等都会影响到冲蚀速率。多相流工况下，气液两相交替冲击会加大密封面所受的载荷。

多场耦合不是各个场单独起作用的简单相加，而是通过相互加强的方式产生协同效应。温度升高使材料软化，抗冲蚀能力降低；应力集中处首先出现腐蚀，使材料强度下降；流体冲刷又把腐蚀产物带走，露出新的表面。耦合关系造成密封结构的失效速率远远大于单一因素作用时的预期值。

4 介质侵蚀工况下阀门密封结构失效的防控对策

4.1 密封材料的合理选型与升级

材料选型属于防控密封失效的第一步。根据不同的介质侵蚀类型以及工况条件来选用具有相应耐蚀性、耐磨性的密封材料。

腐蚀性介质工况下应该选用耐蚀合金材料。在含硫化氢、二氧化碳的油气田工况下，镍基合金（Inconel 718）的耐蚀性比一般不锈钢好得多。在海水等含有氯离子的环境下，应该选用耐点蚀、缝隙腐蚀性能好的铜镍合金或者双相不锈钢。阀门主体材料和密封面材料之间不能形成明显的电偶腐蚀对，即不同的材料组合后，两者的腐蚀电位差应在安全范围内，或者采取绝缘隔离措施。

对含固体颗粒的冲蚀工况，密封面材料要具有较高的硬度以及抗冲蚀性。钴基合金（Stellite）以及镍基合金堆焊层属于常用的密封面耐磨材料。堆焊工艺选择不当，堆焊层致密性及结合强度都会受到影响。

高温腐蚀工况下应该选用具有耐高温、耐腐蚀性能的材料。SF-5T 合金在 230～400℃的环烷酸腐蚀环境下具有较好的抗冲蚀性以及热态组织稳定性。陶瓷基复合材料、镍基合金在煤制气装置的高温阀门上已经使用。改性聚四氟乙烯和镍基合金的组合密封，在高压低温工况下也有很好的密封效果。

4.2 密封结构的优化设计

合理的密封结构设计可以起到防失效的作用。从密封型式选择、密封面几何设计、多级密封配置等几个方面进行改进。

密封形式的选择要根据工况特点来定。在高压、高温或者腐蚀性介质工况下，金属密封比非金属密封有较好的耐久性、可靠性。金属密封面加工精度、表面粗糙度影响密封比压分布是否均匀。密封面形面设计改进可以改善密封比压分布，消除边缘效应。

密封面几何设计要考虑介质流动特性。通过改善密封面的角度、流道的形状等来减小流体在密封间隙

处的局部加速、涡流，从而降低冲蚀速率。在易发生冲刷的地方设置防护结构，加装耐磨衬套或者导流环，可以将冲蚀损伤控制在非关键处。

多级密封可以提高密封系统容错性。单道密封结构的内漏率比双道密封结构要大得多。采用主密封和辅助密封相结合的方式，在主密封出现初期的损伤时，辅助密封仍然可以起到一定的密封作用，给计划维修争取到一个时间段。

自密封结构的改善也不能忽视。高压工况下自密封结构的泄漏一般和密封面预紧力衰减、材料蠕变松弛有关。采用合理的密封面自紧结构，依靠介质压力自动补偿密封比压的衰减，可以大大延长密封的使用寿命。

4.3 表面防护技术的应用

表面防护技术是通过不改变基体材料来提高密封面抗侵蚀能力的一种有效方法。表面堆焊属于阀门密封面常用的表面强化手段。采用堆焊钴基、镍基或者铁基合金，使密封面得到高硬度、高耐蚀性合金层。堆焊层厚度、均匀性、稀释率都会影响防护效果。表面化学热处理（渗氮、渗硼）适合于口径小的关闭件。38CrMoAlA 制成的阀瓣经过渗氮处理后，渗氮层厚度可达 0.4mm 以上，耐蚀性、耐磨性大大提高。热喷涂、激光熔覆等先进表面处理技术也有一定的应用前景。激光熔覆层和基体有冶金结合，结合强度高，稀释率低，在密封面上可以形成厚度可控的合金防护层。新型化学镀 Ni-P 复合封孔工艺采用了“微轴承效应”，使涂层减磨自润滑和耐蚀性能得到双方面的提高。

4.4 安装工艺改进与运维管理强化

密封结构的可靠度不但与设计、材料有关，而且很大程度上受安装质量及运维管理状况的影响。

安装工艺的改进要重点放在密封件预压缩量的控制以及密封面的清洁度上。预压缩量过大造成密封件永久变形失效，预压缩量过小造成密封比压不够。应确定准确的预压缩量控制标准，使用专用工具保证安装精度。安装前密封面要彻底清理干净，残留在上面的金属碎屑、杂质会刮伤密封面，形成泄漏通道。阀杆安装的同轴度偏差也应该控制在允许范围内。

运维管理上要创建密封件的定时检测和更换制度。对非金属密封件要按照工况条件和使用时间来制订预防性更换计划，防止由于老化造成突然失效。在线泄漏监测系统使用可以将阀门的泄漏率大幅度降低。对高压阀门来说，可以使用智能热紧技术来达到密封比压的动态调节。

全生命周期数据管理属于提高运维水平的主要途径。经由创建密封结构从安装、运转到维修的全部档案，保存失效数据和维修记载，能给之后的选型改良和维修办法制订赋予支撑。推行数字化全生命周期管理框架之后，维修工作就可以由原来的被动维修变为现在的主动预防了。

5 结语

介质侵蚀工况下阀门密封结构的失效是由腐蚀、冲蚀、应力、温度等多方面因素共同造成的，机理比较复杂。本文对电化学腐蚀、冲蚀磨损、应力腐蚀开裂和密封材料老化退化这四种主要的失效模式进行了系统的分析，发现了腐蚀和冲蚀之间的协同作用、密封面微环境的变化以及多场耦合等深层次的原因，从材料选择、结构设计、表面保护、运维管理四个方面给出了系统的控制措施。阀门密封结构在侵蚀工况下失效防控，首先要对失效机理进行准确识别，其次要建立材料、结构、工艺三者之间的系统匹配关系，最后要保证全生命周期管理。密封材料的选择要与具体的工况条件相匹配，结构设计要考虑介质流动特性及应力分布规律，表面防护技术要同基体材料和服役环境相适应，运维管理要涵盖安装到报废的全部过程。四者共同作用才能使阀门密封可靠性得到实质性的提高，保证流体控制系统长时间的安全运行。

参考文献：

[1] 王斌.高压阀门密封结构优化对油气开采泄漏风险控制的影响[J].石油石化物资采购,2025(20):58-60.

[2] 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).

[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] 张峰铭.超高压石油化工阀门密封结构优化与验证[J].化工设计通讯,2025,51(4):108-110.

[5] 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.