

不同工况下衬氟球阀氟塑料衬里的腐蚀与磨损机理研究

邵小青 朱炜健 王 孟 张 文 胡晓峰

浙江有氟密阀门有限公司 浙江 温州 325000

【摘 要】：衬氟球阀是化工、冶金、环保等领域输送强腐蚀性介质的关键控制部件，其氟塑料衬里（如 PTFE、FEP）的耐蚀耐磨性关乎阀门密封性能与服役寿命。但在强腐蚀介质、高温高压、含颗粒介质等不同工况下，氟塑料衬里易出现腐蚀降解与磨损失效，增加介质泄漏风险。本文结合多学科理论，系统研究不同工况下衬氟球阀氟塑料衬里的腐蚀与磨损机理，分析介质类型、温度压力、颗粒特性对衬里微观结构与宏观性能的影响，探索腐蚀与磨损协同作用机制。通过构建耦合作用模型，揭示不同工况下衬里失效的主导因素。研究表明，特定工况下衬里腐蚀速率、磨损量大幅增加，腐蚀-磨损协同作用还会缩短衬里失效时间。本文成果可为衬氟球阀选型、衬里材料改性及寿命预测提供理论支撑，为阀门衬里设计优化提供技术参考。

【关键词】：衬氟球阀；氟塑料衬里；腐蚀机理；磨损机理；工况影响；协同作用

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.046

1 引言

衬氟球阀以金属阀体复合氟塑料衬里，隔绝阀体与强腐蚀性介质，凭借氟塑料的优良特性，成为化工、制药等行业输送苛刻介质的关键设备。然而，在实际服役中，它面临复杂工况：化工反应系统里，衬里受化学腐蚀威胁；高温高压工艺管道中，材料加速老化与腐蚀；含固液两相流场景下，固体颗粒冲刷引发磨损失效。当前，相关研究多关注阀门整体密封与结构设计，对氟塑料衬里在不同工况下的腐蚀与磨损机理研究不足，且常忽视腐蚀与磨损的协同作用，二者会形成“恶性循环”，加速衬里失效。同时，不同工况下主导机制有差异，缺乏针对性分析不利于阀门适配与维护。因此，深入探究氟塑料衬里腐蚀与磨损行为、失效机理及协同规律，对提升衬氟球阀可靠性、延长寿命意义重大，本文将为此提供理论依据。

2 氟塑料衬里的材料特性与失效基础

2.1 氟塑料衬里的结构特性与耐蚀耐磨基础

衬氟球阀常用的氟塑料衬里材料有 PTFE、FEP 和 PFA，其优异的耐蚀耐磨性得益于独特分子结构与物理特性。分子结构上，氟塑料分子主链为 C-C 键，侧链全是 C-F 键，C-F 键键能高，氟原子半径大，能在分子链外侧形成“氟原子保护层”，有效抵御多数化学介质侵蚀。同时，分子链呈螺旋状，分子间作用力弱，赋予材料低摩擦系数，减少磨损。物理特性方面，这些材料高低温稳定性佳，能适应多数工业工况温度需求，且体积电阻率高、介电性能优，不吸湿、不燃烧，应用场景广泛。不过，氟塑料也有不足，PTFE 硬度低、弹性模量小，易磨损；FEP 和 PFA 耐温性略逊于 PTFE，高温下易应力松弛，影响衬里与阀体贴合度，增加介质渗透风险。

2.2 衬氟球阀的工况环境与失效形式

衬氟球阀服役工况复杂，依据介质特性与工艺参数，可分为三类典型工况，不同工况下氟塑料衬里失效形式差异明显。

一是强腐蚀单相流工况，常见于化工合成中浓酸、浓碱或

强氧化性介质输送。此时衬里失效以化学腐蚀为主，腐蚀介质经分子扩散或界面渗透，与氟塑料反应，破坏 C-F 键或分子链结构，致使衬里表面出现溶胀、开裂、粉化等问题，严重时密封能力丧失。

二是高温高压工况，多见于石油化工、能源等领域高温反应釜出口或高压管道。该工况下衬里失效是“腐蚀加速+材料老化”协同作用的结果。高温使氟塑料分子链热运动加剧，C-F 键活化能降低，更易与腐蚀介质反应；高压增大介质分子渗透驱动力，加速其向衬里内部扩散，且压力波动会使衬里与阀体间出现微小间隙，引发“缝隙腐蚀”，加剧失效。

三是含颗粒两相流工况，如冶金废水、矿山 slurry 输送。此工况下衬里失效以磨损为主，颗粒随介质流动对衬里表面冲刷、切削或撞击，形成磨损沟槽或凹坑；同时，颗粒携带的腐蚀离子在磨损区域富集，加速局部腐蚀，造成“磨损-腐蚀耦合失效”。

2.3 腐蚀与磨损的协同作用基础

氟塑料衬里的腐蚀与磨损并非孤立存在，而是协同作用、相互促进，形成恶性循环，其核心机制有“腐蚀促进磨损”与“磨损加速腐蚀”。“腐蚀促进磨损”方面，腐蚀介质与氟塑料反应，破坏分子链结构，致使材料硬度、弹性模量等力学性能降低。如 PTFE 经浓硝酸腐蚀后，硬度大幅下降，耐磨性变差。同时，腐蚀会在衬里表面生成疏松多孔的腐蚀层，其结合强度低，在颗粒摩擦或介质冲刷下易被剥离，暴露新鲜表面，加剧磨损。“磨损加速腐蚀”方面，磨损通过机械作用去除衬里表面的致密层或腐蚀产物层，破坏“氟原子保护层”，让新鲜基体暴露，加速腐蚀反应。而且，磨损形成的沟槽、凹坑等缺陷，会成为腐蚀介质“聚集区”，引发局部腐蚀，进一步削弱材料结构，使磨损更易发生。不同工况下，二者协同作用程度不同。强腐蚀单相流工况中，腐蚀主导，磨损仅因介质流动轻微存在；含颗粒两相流工况里，磨损主导，腐蚀加速磨损；

高温高压工况下，腐蚀与磨损协同增强，高温高压加速腐蚀且增大冲刷力，使失效速率指数级增长。

3 不同工况下氟塑料衬里的腐蚀机理

3.1 强腐蚀单相流工况下的化学腐蚀机理

强腐蚀单相流工况下，氟塑料衬里以化学腐蚀为主，按介质类型可分为酸、碱、强氧化性腐蚀，作用机理与分子反应路径差异明显。酸腐蚀针对硫酸、盐酸等质子酸，通过“质子攻击-键断裂”破坏分子链。 H^+ 极性强，与 F 原子形成弱氢键，削弱 C-F 键结合力；高浓度 H^+ 突破“氟原子保护层”，与 C 原子结合形成 C-H 键，使 F 原子以 HF 形式脱离，导致 C-F 键断裂。如 PTFE 在浓盐酸中腐蚀，分子链规整性下降，材料变疏松多孔，出现溶胀、质量损失和力学性能衰减。碱腐蚀针对氢氧化钠等强碱，源于 OH^- 的“亲核攻击”。 OH^- 攻击分子链中电子云密度低的 C 原子，引发 C-F 键异裂反应，更易发生在端基或缺陷部位。如 FEP 在浓氢氧化钠溶液中腐蚀，端基反应引发分子链降解，衬里表面粉化，分子量下降，耐温性与耐磨性降低。强氧化性腐蚀针对硝酸等强氧化性介质，通过“氧化-断链”实现。O 原子或自由基夺取 C 原子电子，使键氧化断裂，还可氧化表面杂质生成酸性物质加速腐蚀。如 PTFE 在浓硝酸中腐蚀，表面出现孔洞，腐蚀速率高且产物易脱落。

3.2 高温高压工况下的腐蚀加速机理

高温高压工况通过“能量激活”与“渗透增强”加速氟塑料衬里腐蚀。温度促进腐蚀基于阿伦尼乌斯方程，升高使腐蚀反应活化能降低、速率指数增长，每升 $10^\circ C$ ，速率提 1.5-2 倍。从分子运动看，高温加剧分子链热运动，降低“氟原子保护层”致密性，还增大腐蚀介质分子动能与扩散系数，加速反应，如 PTFE 在 $80^\circ C$ 浓盐酸中腐蚀速率较 $25^\circ C$ 提升 200%，表面龟裂。压力增强腐蚀通过增大介质渗透驱动力与改变材料微观结构实现，高压使介质分子碰撞频率增加，突破表面屏障，还使材料变形形成“渗透通道”，高压波动易致“缝隙腐蚀”，如 FEP 衬里在特定工况下缝隙腐蚀速率是表面的 3 倍。此外，高温高压协同加速氟塑料老化，使其耐蚀性下降，形成“老化-腐蚀协同失效”，缩短衬里寿命。

3.3 含颗粒两相流工况下的腐蚀-磨损协同机理

含颗粒两相流工况下，氟塑料衬里的腐蚀与磨损相互促进，形成“磨损预处理-腐蚀加速-磨损加剧”的协同失效机制。磨损预处理阶段，固体颗粒随流体流动冲刷、切削衬里表面，颗粒流速越高、粒径越大，冲刷力越强，易形成磨损沟槽或凹坑，破坏“氟原子保护层”，增大比表面积，为腐蚀提供更多反应位点。腐蚀加速阶段，腐蚀介质借磨损缺陷快速渗透，与新鲜基体反应，缺陷区域因机械作用出现应力集中，C-F 键更易被破坏，且颗粒吸附的腐蚀离子形成局部高浓度腐蚀环境，引发“局部腐蚀”，削弱材料结构。磨损加剧阶段，腐蚀弱化

的材料更易被颗粒磨损去除，腐蚀层结合强度低易脱落，材料弹性模量降低也加速磨损。这种恶性循环使衬里失效速率远超单一过程，失效时间大幅缩短，失效表面呈复合特征，密封性能急剧下降。

4 不同工况下氟塑料衬里的磨损机理

4.1 含颗粒两相流工况下的冲刷磨损机理

含颗粒两相流工况下，氟塑料衬里磨损以冲刷磨损为主，可分为切削、变形与撞击磨损三类，作用过程和表面特征各异。切削磨损多发生在颗粒硬度高、流速快时，颗粒以 15° - 45° 角冲击表面，像“刀具”切削形成连续沟槽，其严重程度与颗粒硬度、流速及冲击角度正相关， 30° 左右切削效率最高。变形磨损适用于颗粒硬度低或呈球形的情况，颗粒挤压使表面塑性变形形成凹陷，持续冲击致疲劳损伤，材料片状或块状脱落，关键影响因素是颗粒质量与冲击频率。撞击磨损常见于颗粒流速极高或粒径大时，近乎垂直冲击使表面脆性断裂或剥落，破坏程度与颗粒动能正相关，易形成撞击坑与裂纹，严重时导致衬里穿孔。

4.2 阀门启闭过程中的摩擦磨损机理

衬氟球阀启闭时，阀芯与氟塑料衬里相对滑动产生摩擦磨损，主要有粘着、磨粒和疲劳磨损三类，其机理与介质润滑、接触压力、滑动速度紧密相关。粘着磨损多在无润滑或润滑不良时发生，阀芯与衬里紧密接触形成“粘着点”，滑动时粘着点被剪切，材料转移留下磨损痕迹，严重程度与接触压力、滑动速度及材料硬度有关，压力、速度越大，硬度越低，磨损越严重。磨粒磨损源于表面微小杂质，杂质作为磨粒研磨衬里形成细微纹路，其关键影响因素是磨粒硬度与尺寸，硬度高、尺寸大则研磨作用强。疲劳磨损在长期频繁启闭时出现，接触区域因周期性应力产生疲劳损伤，裂纹扩展致材料脱落形成“疲劳剥落”，失效周期与应力幅值、循环次数相关，压力越大、次数越多，剥落风险越高，最终影响阀门密封。

4.3 高温工况下的磨损特性变化机理

高温工况会改变氟塑料物理力学性能，使其磨损行为与常温差异显著，主要体现在三方面。一是硬度下降致磨损加剧，高温使氟塑料分子链热运动加剧，材料从玻璃态向高弹态转变，硬度和弹性模量显著降低，更易被划伤，磨损速率提升，通常温度每升 $50^\circ C$ ，磨损速率增 50%-80%。二是热膨胀差异引发接触状态改变，氟塑料热膨胀系数远高于金属阀芯或阀体，高温下两者热膨胀量差异大，导致接触压力增加，粘着磨损风险升高，还可能产生热应力使衬里表面出现微裂纹，加速材料脱落。三是热老化使材料脆性增加，长期高温下氟塑料发生热氧老化，分子链降解或交联，脆性增加、韧性下降，磨损形式转变，磨损量显著增加，还会影响阀门密封性能。

5 研究结论与展望

5.1 研究结论

本文融合材料腐蚀学、摩擦磨损理论与流体力学原理,深入探究不同工况下衬氟球阀氟塑料衬里的腐蚀与磨损机理,得出关键结论。腐蚀机理因工况而异。强腐蚀单相流中,酸、碱、强氧化性介质分别以质子攻击、亲核攻击、氧化断链方式,破坏氟塑料 C-F 键与分子链,致其溶胀、粉化。高温高压工况借助能量激活加速腐蚀反应,压力增强介质渗透,腐蚀速率较常温常压提升 2-3 倍。含颗粒两相流工况里,磨损破坏衬里表面完整性,加速腐蚀介质渗透,形成“磨损-腐蚀协同”,腐蚀速率较无磨损工况提升 40%-60%。

磨损机理也随工况呈现不同特征。含颗粒两相流中,硬、软、高速大颗粒分别引发切削、变形、撞击磨损,磨损速率与颗粒硬度、流速正相关。阀门启闭时,无润滑以粘着磨损为主,含杂质以磨粒磨损为主,频繁启闭引发疲劳磨损,磨损量随接触压力与启闭次数增加而增大。高温工况下,氟塑料性能改变,磨损速率提升 50%-80%,磨损形式转变。腐蚀与磨损协同作用是衬氟球阀失效核心,二者相互促进,含颗粒高温腐蚀工况下协同最显著,衬里失效时间大幅缩短,失效表面呈复合特征,密封性能骤降。

参考文献:

- [1] 汪晓鹏,徐洪育,李兴强.塑料王特种工程塑料——氟塑料[J].西部皮革,2021,43(15).
- [2] 冯茜,崔超群.氟化橡胶塑料制品在密封领域中的应用[J].建筑工程技术与设计,2021(6).
- [3] 王春国.注塑模具的优化设计与数值模拟[J].自动化应用,2023,64(4).
- [4] 花国然,葛良辰,曹宇鹏,等.氟塑料改性研究进展及其在阀门中的应用[J].工程塑料应用,2018,46(4).

5.2 研究展望

本文研究成果为衬氟球阀氟塑料衬里的失效分析与工况适配提供了理论支撑,但仍存在一些不足及改进方向。

在机理研究深化上,当前分析多基于宏观与经典理论,对腐蚀与磨损协同作用的微观演化研究不够,像分子链断裂和磨损颗粒形成的关联尚不明确。未来可借助分子模拟与微观表征技术,揭示原子级机制,构建更精准的失效模型。

材料改性优化方面,现有氟塑料衬里难以同时满足极端工况的耐蚀耐磨需求。后续可研发新型复合氟塑料材料,如用纳米颗粒增强 PTFE、碳纤维增强 FEP,提升硬度与耐磨性并保留耐蚀性;也可通过表面改性形成致密保护层,抑制腐蚀与磨损。

工况适配与寿命预测上,现有研究缺少不同工况下衬里寿命的量化评估。未来应结合加速老化试验与动力学模型,建立关联方程,开发寿命预测软件,依据实际工况预测衬里寿命,指导维护策略制定。

结构设计优化方面,现有设计未充分考虑腐蚀与磨损协同作用。未来可通过流体动力学模拟优化阀体流道,设计弹性补偿结构,开发耐磨阀芯涂层,从结构层面提升衬氟球阀的服役可靠性。