

化工设备常见腐蚀类型及防护策略研究

刘绪明 刘玉龙

陕西延长石油榆林凯越煤化有限责任公司 陕西 榆林 719111

【摘要】：化工设备在服役过程中面临复杂腐蚀环境，腐蚀问题直接影响设备运行安全、使用寿命与行业经济效益。本文系统分析化工设备常见腐蚀类型，包括均匀腐蚀、局部腐蚀及应力腐蚀开裂，阐述各类腐蚀的表现特征与形成机制；从材料优化、涂层防护、缓蚀剂应用及结构设计与运维管理四个维度，提出针对性防护策略。研究旨在为化工设备腐蚀防控提供理论参考，助力提升设备运行稳定性与行业可持续发展水平。

【关键词】：化工设备；腐蚀类型；防护策略；材料优化；涂层防护

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.065

1 引言

化工生产过程中，设备长期处于高温、高压环境，且频繁接触酸、碱、盐、硫化物等腐蚀性介质，腐蚀现象普遍存在。腐蚀不仅导致设备材质劣化、壁厚减薄，还可能引发物料泄漏、安全事故，造成严重经济损失与环境影响。因此，明确化工设备常见腐蚀类型及成因，制定科学有效的防护策略，对保障化工生产安全、降低运维成本具有重要现实意义。本文基于腐蚀机理分析，梳理核心腐蚀类型，构建系统防护体系，为工程实践提供技术支撑。

2 化工设备常见腐蚀类型

2.1 均匀腐蚀

均匀腐蚀是最常见的腐蚀形式，表现为腐蚀反应在设备金属表面均匀发生，导致材料整体厚度减薄。此类腐蚀进程平缓、规律明确，其破坏程度可通过预设腐蚀余量进行补偿。在化工生产中，碳钢结构在大气环境中的锈蚀，或在强酸、强碱溶液中的整体溶解，均属于典型均匀腐蚀。虽然均匀腐蚀的即时危害性较低，但长期忽视会导致设备关键部位强度不足，引发泄漏或结构失效。

2.2 局部腐蚀

局部腐蚀的破坏集中于金属表面特定区域，其余部位腐蚀轻微，因具有隐蔽性强、发展迅速的特点，其危害性远高于均匀腐蚀，是导致设备突发故障的主要原因。常见类型包括：

点蚀：腐蚀集中于微小区域并向纵深发展，形成细小蚀孔。多发生在钝化膜易被破坏的场景，如奥氏体不锈钢接触含氯离子介质时，钝化膜局部破裂后形成阳极溶解中心，最终导致设备穿孔。

缝隙腐蚀：发生在设备法兰结合面、垫片下方、螺栓头部等狭窄缝隙处。缝隙内介质滞留，氧扩散受阻形成氧浓差电池，引发局部金属加速腐蚀。

电偶腐蚀：两种不同电极电位的金属在导电介质中接触时，电位较负的金属作为阳极加速腐蚀，电位较正的金属作为

阴极受到保护。如碳钢管道与铜质阀门连接时，碳钢部位会出现加速腐蚀现象。

晶间腐蚀：腐蚀沿金属晶粒边界进行，导致晶粒间结合力丧失，材料力学性能急剧下降，而表面仍保持完整。不锈钢经不当焊接或热处理后处于敏化状态，极易发生此类腐蚀。

冲刷腐蚀：高速流动的介质或携带固体颗粒、气泡的流体，对金属表面产生机械冲刷，与电化学腐蚀协同作用导致材料加速流失，常见于泵体过流部件、管道弯头及换热器管程入口等区域。

2.3 应力腐蚀开裂

应力腐蚀开裂是拉应力与特定腐蚀环境共同作用引发的脆性开裂现象，属于灾难性腐蚀形式。其显著特征是构件承受的拉应力低于材料屈服强度时，裂纹仍会萌生并扩展，最终导致设备无明显塑性变形而突发断裂。该类腐蚀的发生需满足三个条件：材料对应力腐蚀敏感、存在特定腐蚀性介质、具备足够拉应力（包括工作应力或残余应力）。化工行业中，碳钢在高温浓碱环境下的碱脆、奥氏体不锈钢在含氯介质中的氯脆，以及碳钢和低合金钢在湿硫化氢环境中的开裂，均属于典型应力腐蚀开裂。

3 化工设备腐蚀影响因素

3.1 介质因素

化工生产介质的化学性质是腐蚀发生的核心内因，其成分复杂性、浓度变化及化学反应活性直接决定腐蚀的类型与速率。化工生产流程涉及的硫化物、氯化物、环烷酸、二氧化碳、硫化氢等物质，均具有强腐蚀性，且在不同工艺条件下会通过不同机制引发腐蚀。硫化物是化工介质中常见的腐蚀性成分，包括有机硫化物与无机硫化物，这类物质在生产过程中易与水接触发生水解反应，转化为硫化氢气体，而硫化氢具有强还原性，会在金属表面形成电化学腐蚀电池，加速阳极溶解，同时生成的硫化物产物附着力较差，无法形成有效保护膜，导致腐蚀持续进行。氯化物广泛存在于原油、天然气及工业用水中，其氯离子具有极强的穿透性，在高温工况下，氯化物易分解生

成氯化氢气体，该气体具有强酸性，会直接侵蚀金属表面的氧化膜，尤其对不锈钢等钝化型金属，氯离子会吸附在钝化膜缺陷处，破坏膜的完整性，引发点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀。

3.2 环境因素

温度、压力、介质流速等工艺环境参数是影响腐蚀速率的关键外部因素，其变化会通过改变腐蚀反应动力学、介质物理化学性质及界面作用状态，间接加剧或减缓腐蚀。温度升高对腐蚀的促进作用主要体现在两个方面：一方面，高温会加快腐蚀化学反应速率，根据阿伦尼乌斯方程，温度每升高 10℃，化学反应速率通常会提高 1-2 倍，同时高温会加速介质分子的扩散运动，使腐蚀性离子更易到达金属表面，缩短腐蚀反应的诱导期；另一方面，高温会降低介质的黏度，增强其流动性，破坏金属表面形成的钝化膜或腐蚀产物膜，尤其对易发生晶间腐蚀的不锈钢，高温会加剧晶粒边界的敏化过程，增加腐蚀敏感性。压力的影响主要集中在应力腐蚀开裂与气体腐蚀方面，高压环境会提高腐蚀性气体（如硫化氢、二氧化碳）在介质中的溶解度，增加腐蚀介质的浓度，同时高压会加剧设备内部的应力集中，使材料在拉应力作用下更易产生微裂纹，为腐蚀介质的渗透提供通道，进而诱发或加速应力腐蚀开裂。介质流速对腐蚀的影响具有双重性，适度的流速可带走金属表面的腐蚀产物与滞留介质，减少局部腐蚀的发生，但高流速流体（尤其是携带固体颗粒、气泡的气液固三相流）会对金属表面产生机械冲刷作用，这种冲刷会磨损表面保护膜，使金属基体直接暴露在腐蚀性介质中，同时冲刷产生的剪切应力会加速腐蚀产物的剥离，形成“冲刷-腐蚀”协同效应，导致腐蚀速率急剧增加，这种现象在泵体过流部件、管道弯头、换热器管程入口及阀门节流部位尤为突出。

4 化工设备腐蚀防护策略

4.1 材料优化与升级

选用耐蚀性能优良的材料是从源头防控腐蚀的关键手段，其核心在于根据具体工况（介质成分、温度、压力、流速等）选择适配的材料，实现耐蚀性与经济性的平衡。在强腐蚀介质环境（如含氯介质、强酸强碱、高温高压下的硫化物体系）中，普通碳钢已无法满足防护需求，需采用耐蚀合金替代，双相不锈钢兼具奥氏体不锈钢的韧性及铁素体不锈钢的耐蚀性，对氯离子引起的点蚀、缝隙腐蚀具有良好的抵抗能力，广泛应用于化工反应器、换热器等设备；哈氏合金（如 Hastelloy C 系列）具有优异的耐氧化性酸、还原性酸及含氯介质腐蚀的能力，适用于极端腐蚀工况下的设备制造；钛合金则具有极强的耐蚀性，尤其在海水、氯碱、醋酸等介质中表现突出，常用于高端化工设备的关键部件。在常温弱腐蚀环境（如普通水溶液、低压大气环境）中，可选用碳钢配合后续防护措施（如涂层、缓蚀剂），既能满足使用要求，又能有效控制成本。除了选材优

化，表面改性技术也是提升材料耐蚀性的重要途径，等离子喷涂技术通过将耐蚀材料（如陶瓷、合金）加热至熔融状态并高速喷涂到金属表面，形成致密的防护涂层，兼具耐磨、耐高温与耐蚀性能；激光熔覆技术利用高能激光束将合金粉末与基材表面熔化并快速凝固，形成与基材冶金结合的耐蚀层，显著提升表面硬度与抗腐蚀能力。

4.2 涂层防护技术

涂层防护作为一种经济高效的腐蚀防护手段，其核心原理是通过在设备金属表面形成连续、致密的隔离层，物理阻断腐蚀介质与金属基材的接触，从而抑制腐蚀反应的发生。涂层的防护效果取决于涂层材料的耐蚀性、与基材的附着力及涂层完整性，需根据设备工况（介质类型、温度、压力、流速）选择适配的涂层体系。环氧涂层具有优良的耐化学品性能、附着力强及施工工艺成熟等特点，其分子结构中的环氧基团可与固化剂反应形成交联网络，具有良好的抗渗透性，适用于常温下酸、碱、盐溶液等介质环境，广泛应用于储罐内壁、管道内壁及设备壳体的防护。陶瓷涂层（包括氧化物陶瓷、氮化物陶瓷等）具有极高的耐高温性、耐磨性与耐蚀性，其熔点高、化学稳定性强，可抵御高温下腐蚀性气体（如氯化氢、硫化氢）及熔融盐的侵蚀，适用于化工反应器、高温管道、炉管等高温工况设备的防护，常见制备方法包括等离子喷涂、溶胶-凝胶法等。环氧富锌涂层以环氧树脂为成膜物质，锌粉为主要防锈颜料，其防护机制包括物理屏蔽与牺牲阳极保护双重作用，锌粉作为阳极优先腐蚀，保护基材不受侵蚀，同时环氧树脂形成的涂层可阻挡腐蚀介质渗透，适用于钢结构、管道外壁及海洋环境中的设备防护；聚氨酯涂层具有优异的耐候性、耐磨性与抗紫外线性能，固化后形成的涂层弹性好、附着力强，可有效抵御大气、雨水及工业污染物的侵蚀，常用于户外化工设备、储罐外壁的防护。

4.3 缓蚀剂应用

缓蚀剂是一类通过少量添加即可显著减缓金属腐蚀的化学物质，其作用机制主要包括吸附作用、成膜作用及电化学抑制作用，可根据腐蚀环境与材料特性选择合适类型的缓蚀剂，实现针对性防护。根据作用机理，缓蚀剂可分为阳极型、阴极型和混合型三类：阳极型缓蚀剂（如铬酸盐、磷酸盐）通过在金属阳极表面形成致密的氧化膜或沉淀膜，抑制阳极溶解反应，从而阻断腐蚀电池的形成，但这类缓蚀剂需达到一定浓度才能发挥作用，浓度不足时可能引发点蚀；阴极型缓蚀剂（如有机胺类、亚硝酸盐）通过吸附在金属阴极表面，抑制阴极还原反应（如氧还原、氢还原），降低腐蚀电流，其特点是添加量少、缓蚀效果显著，适用于酸性、中性介质环境；混合型缓蚀剂（如咪唑啉衍生物、季铵盐类）兼具阳极抑制与阴极抑制作用，通过在金属表面形成吸附膜，同时覆盖阳极与阴极区域，阻止腐蚀性离子的迁移与反应，适用范围更广，缓蚀效率更高。

缓蚀剂的选型需结合介质性质、温度、pH值及金属材料类型综合考虑：在酸性介质（如酸洗工艺、含酸废水处理设备）中，有机胺类缓蚀剂（如十六胺、吗啉）通过吸附在金属表面形成疏水膜，抑制氢离子的还原反应，缓蚀效果显著；在中性介质（如工业循环水、冷却水系统）中，聚磷酸盐类缓蚀剂可与水中的钙离子、镁离子反应生成沉淀膜，覆盖在金属表面，同时兼具阻垢作用；在含氯离子介质（如海水、含氯化工原料）中，咪唑啉衍生物缓蚀剂具有良好的吸附性能，可在金属表面形成致密的保护膜，抵御氯离子的侵蚀，有效抑制点蚀与缝隙腐蚀。

4.4 结构设计与运维管理

优化设备结构与加强运维管理是实现腐蚀长效防护的重要保障，通过从设计源头规避腐蚀风险、在运行过程中实时监控与维护，可显著延长设备使用寿命。结构设计优化的核心是减少腐蚀介质的滞留与聚集，降低局部腐蚀风险：在设备外形设计中，避免尖锐转角与直角结构，采用圆角过渡，减少流体涡流与介质滞留；在法兰连接、垫片选型等部位，采用密封性能良好的结构，减少缝隙形成，同时预留合理的检修空间，便于后续清洁与维护；在流体通道设计中，确保流速分布均匀，避免局部湍流或死区，对于易发生冲刷腐蚀的部位（如管道弯头、泵体入口），采用加大管径、设置导流装置或增加壁厚的方式，降低冲刷强度；当不同电极电位的金属材料必须连接时，

在接触面设置绝缘垫片或绝缘涂层，阻断电偶腐蚀电池的形成，同时合理设计阴阳极面积比例，减少阳极的腐蚀速率。运维管理的核心是建立全生命周期的腐蚀监测与维护体系：定期采用无损检测技术（如超声波测厚、涡流检测、内窥镜检测）对设备关键部位（如焊缝、弯头、壁厚减薄风险区）进行腐蚀状态监测，实时掌握设备壁厚变化、腐蚀缺陷发展情况，及时预警潜在风险；定期清理设备表面的结垢、沉积物及腐蚀产物，这些物质的堆积会形成局部腐蚀环境，加速设备腐蚀，清理方式可根据沉积物类型选择化学清洗或机械清洗，清洗后需对设备表面进行钝化处理，恢复其抗腐蚀能力；对涂层防护的设备，定期检查涂层状态，发现脱落、破损、老化等问题及时补涂，确保涂层的完整性。

5 结语

化工设备腐蚀类型多样，均匀腐蚀、局部腐蚀及应力腐蚀开裂是最主要的表现形式，其发生与介质特性、环境参数及设备自身因素密切相关。腐蚀防护需采取综合措施，通过材料优化升级、涂层防护、缓蚀剂应用及科学的结构设计与运维管理，构建全流程防护体系。未来，应进一步推动低成本耐蚀材料研发、智能化监测技术应用，完善腐蚀防护标准体系，提升化工设备腐蚀防控的精准性与长效性，为行业安全生产与可持续发展提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 石化行业腐蚀防护技术研究进展[J]. 翟东;邓欣;李馨竹;杨波;余捷;陈俊锋. 山东化工, 2024(01).
- [2] 炼油化工设备中的氯腐蚀及其防护措施[J]. 陶洁. 广州化工, 2023(09).