

地热井水水质劣化对潜水泵、板式换热器结垢腐蚀的影响研究

史 媛 王芳勇

胜利石油管理局有限公司热力分公司 山东 东营 257200

摘 要：地热井水在开采与利用过程中普遍存在水质劣化现象，主要表现为矿化度升高、成垢离子浓度变化、溶解氧增加及腐蚀性组分富集。水质劣化直接导致潜水泵与板式换热器两类关键设备出现严重的结垢与腐蚀问题，造成系统效率下降、能耗上升、设备寿命缩短。本文系统分析了地热井水水质劣化的化学动力学机制与热力学驱动力，分别揭示了潜水泵在高速流动与温升条件下的结垢、腐蚀机理，以及板式换热器在窄通道、强湍流、温度梯度场中的结垢、腐蚀规律。在此基础上，提出了控制技术路径。研究表明，地热井水水质劣化对两类设备的影响具有显著的协同放大效应，必须采取系统化、针对性的防控策略。

关键词：地热井水；水质劣化；潜水泵；板式换热器；结垢；腐蚀

引言

地热能作为清洁可再生能源，应用日益广泛。地热井水化学成分复杂且动态变化，在长期开采中常因补给条件改变、温压扰动、回灌混合及空气渗入等因素导致水质劣化，表现为总溶解固体升高、硬度增加、溶解氧渗入、pH 漂移及腐蚀性离子浓度上升等。这严重威胁关键设备安全：井下潜水泵在高温高压高矿化环境中易同时发生结垢与腐蚀，前者增加流道阻力、降低效率，后者引发壁厚减薄甚至断裂；板式换热器因流道狭窄（2-5 mm），对结垢极为敏感，垢层不仅削弱换热性能，还诱发垢下腐蚀，加速板片穿孔。两类设备失效将导致高昂维修成本和停井停产损失。现有研究多聚焦单一设备或参数，缺乏对“水质劣化—结垢腐蚀—性能衰减”全链条的系统分析，尤其缺少两类设备响应机制的对比。本文拟从化学热力学与动力学角度，阐明水质劣化对潜水泵与板式换热器的影响机理，并提出综合防控路径。

1 地热井水水质劣化的化学机制

1.1 地热水化学体系的初始特征

地热水在天然状态下处于高温高压的还原环境，与岩石矿物长期作用达到溶解平衡。典型地热水具有以下特征：pH 值多为中性至弱碱性（6.5-8.5）；阴离子以碳酸氢根、硫酸根、氯离子为主；阳离子以钠、钙、镁、钾为主；同时含有硅酸、铁、锰等微量组分。在封闭还原条件下，溶解氧含量极低（ $< 0.1\text{mg/L}$ ），铁、锰以低价态（ Fe^{2+} 、 Mn^{2+} ）稳定存在，碳酸钙、硫酸钙等难溶盐处于饱和或亚稳态。

1.2 水质劣化的驱动因素

第一，压力温度骤降导致的脱气与过饱和。地热水从井底提升至地表过程中，压力从数兆帕降至常压，二氧化碳、硫化氢等气体大量逸出。二氧化碳脱气使水中碳酸平衡向右移动，碳酸根浓度升高，碳酸钙饱和指数急剧上升，形成强烈的结垢倾向。第二，溶解氧的侵入与氧化性增强。井口及回灌系统的开放性使空气中氧溶解进入地热水。溶解氧不仅直接参与金属腐蚀的阴极反应，还将低价态离子氧化—— Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} 并水解生成氢氧化铁沉淀， Mn^{2+} 氧化生成二氧化锰。这些沉淀物兼具有垢与腐蚀产物的双重属性^[1]。第三，回灌水混合引发的化学不相容。回灌水常采用处理后的尾水或地表水，其温度、离子组成、pH 值与原生地热水存在差异。混合过程可能突破某种难溶盐的溶度积，引发碳酸钙、硫酸钡、硫酸锶等结垢。此外，回灌水中可能携带细菌、有机物，进一步加剧生物垢与微生物腐蚀。第四，长期开采导致的水-岩平衡破坏。持续抽取使热水层压力下降，原生孔隙水中离子浓度因蒸发浓缩而上升；同时，水位降低可能诱发浅层冷水下渗，改变地热水的化学类型。

1.3 关键劣化指标及其演变规律

水质劣化可量化为若干核心指标的异常变化：总溶解固体升高，表明矿化度增加；总硬度升高，反映钙镁离子累积；碳酸钙饱和指数增大，指示结垢风险上升；溶解氧含量从近乎为零上升至数毫克每升，标志体系从还原转为氧化；pH 值可能向酸性或碱性漂移，取决于脱

气与氧化过程的相对强度；氯离子、硫酸根浓度升高加剧点蚀与应力腐蚀倾向；铁、锰含量升高反映腐蚀产物在地热水中的悬浮与再沉积。

2 潜水泵的结垢腐蚀机理与影响规律

2.1 潜水泵的工作环境特征

潜水泵安装于地热井动水位以下数十至数百米，电机与泵体完全浸没于地热水中。其工作环境具有三高特征：高温（通常 50-120℃）、高压（最高可达数兆帕）、高流速（叶轮流道内流速可达 3-8m/s）。泵体材料通常为铸铁、铸钢或不锈钢，叶轮材质以球墨铸铁、不锈钢或青铜为主。泵内流道几何形状复杂，存在局部涡流、流速突变的区域，这些区域最容易成为结垢与腐蚀的优先发生部位。

2.2 结垢机理与垢层演化

潜水泵结垢以碳酸钙、硫酸钙和硅酸盐为主要成分。结垢过程遵循多步机理：首先，地热水中的成垢离子在高温、压力降低及脱气的共同作用下达到过饱和；其次，过饱和溶液在金属表面发生均相或异相成核，形成微小晶粒；再次，晶粒在壁面生长并相互连接形成连续垢层；最后，垢层在热力学驱动力下持续增厚。潜水泵特有的流动条件显著影响结垢行为。高速流动强化了对流传质，加速成垢离子向壁面输送，但同时也增加壁面剪切力，可能抑制垢层附着。二者的竞争决定了临界结垢流速的存在——低于该流速时结垢速率随流速增加而上升，高于该流速时剪切力占主导，垢层难以稳定生长^[2]。此外，泵内压力分布极不均匀，叶轮进口处压力最低，二氧化碳脱气最剧烈，碳酸钙结垢倾向最强；叶轮出口及导叶区域压力恢复，硫酸钙等高溶解度盐类可能在此沉淀。垢层对泵性能的影响具有非线性特征。初期垢层仅改变壁面粗糙度，增加水力摩擦损失，泵效率小幅下降。当垢层厚度超过边界层厚度后，流道截面积显著减小，流量与扬程双双下降。垢层的不均匀分布还会破坏叶轮的动平衡，引起振动与噪声，加速机械密封失效。严重时垢块脱落并卡滞于叶轮与导叶间隙，导致泵堵转或断轴。

2.3 腐蚀机理与失效模式

潜水泵腐蚀以电化学腐蚀为主体，水质劣化从多个维度加剧腐蚀进程。第一，溶解氧的侵入使阴极去极化过程得以持续，地热水从近乎无氧转变为含氧环境，碳钢的均匀腐蚀速率可提高一到两个数量级。第二，氯离子浓度升高破坏不锈钢表面钝化膜，诱发点蚀与缝隙腐蚀。地热水中氯离子含量常达数百甚至数千毫克每升，

加之地热高温提高了离子迁移率，点蚀电位显著负移。第三，硫化物（如 H_2S 、 HS^- 、 S^{2-} ）在还原区存在，其与铁反应生成硫化铁垢，该垢层疏松多孔、不具备保护性，且与金属基体形成电偶，加速局部腐蚀。第四，碳酸钙结垢与腐蚀存在耦合——垢层覆盖区域因氧扩散受阻形成阳极区，垢层边缘氧易达形成阴极区，构成氧浓差电池，导致垢下加速穿孔。潜水泵常见的腐蚀失效模式包括：均匀腐蚀导致壁厚减薄，主要发生在铸铁泵壳与碳钢轴套上；点蚀导致应力集中，在交变应力作用下转化为疲劳裂纹；应力腐蚀开裂发生于不锈钢轴或紧固件，受氯离子与拉应力联合作用；电偶腐蚀发生于不同金属接触部位，如不锈钢轴与青铜叶轮之间；冲刷腐蚀发生于高速流道中的钝化膜破坏部位，腐蚀与机械磨损交替加速。

3 板式换热器的结垢腐蚀特征与影响分析

3.1 板式换热器的结构特点与水力热力条件

板式换热器由一组波纹金属板片叠合而成，板间形成网状触点的狭窄流道。其水力热力特征包括：流道宽度仅 2-5 毫米，水力直径小；波纹结构诱发强烈湍流，雷诺数常达 3000-10000；板片两侧分别为地热水与清洁流体，形成温度梯度场；板片厚度通常 0.5-1.0 毫米，壁薄而敏感。常用的板片材料为奥氏体不锈钢（304、316L）或钛合金，密封垫片为三元乙丙橡胶或氟橡胶。

3.2 结垢行为与传热恶化机理

板式换热器的结垢过程受温度边界层与流体动力学共同控制。地热水侧壁面温度高于主流温度（加热工况）或低于主流温度（冷却工况），壁面过冷或过热影响成垢盐的溶解度。碳酸钙具有负溶解度系数——温度升高溶解度降低，因此在加热侧壁面结垢倾向尤为严重。硅酸盐结垢则受 pH 值与温度双重影响，在高温区形成玻璃状硬垢。板式换热器狭窄流道对结垢高度敏感。垢层每增厚 0.1 毫米，流动阻力增加显著，压降上升 10%-30%；垢层热阻使总传热系数下降，由于板片本身热阻很小，垢层热阻可占总热阻的 50% 以上^[3]。更为严重的是，波纹结构中的局部低流速区（如波谷、触点附近）优先结垢，垢层分布不均导致流量再分配——清洁流道流速上升、压降增大，已结垢流道流速降低、结垢加速，形成“正反馈偏流”现象。最终部分流道被完全堵塞，有效换热面积锐减。

3.3 腐蚀特征与失效形式

板式换热器的腐蚀受狭窄流道与薄壁结构的双重约束。不锈钢板片在含氯地热水中的点蚀是主要腐蚀形

态。点蚀诱导期取决于氯离子浓度、温度与 pH 值——水质劣化使氯离子上升，点蚀电位降低，诱导期缩短。一旦点蚀萌生，在垢下或垫片缝隙处迅速发展为穿孔。缝隙腐蚀发生于密封垫片与板片的接触区域，该处滞留溶液因氧消耗而酸化、氯离子富集，形成自催化加速环境，导致板片边缘腐蚀穿孔，密封失效泄漏。应力的参与进一步加剧失效风险。板式换热器的夹紧螺栓施加预紧力使板片承受压缩或弯曲应力。在氯离子环境中，奥氏体不锈钢对应力腐蚀开裂敏感，裂纹从点蚀坑底部萌生，沿晶或穿晶扩展，最终导致板片脆断。此外，地热水中若含硫化氢，可引发氢致开裂，对高硬度材料尤为危险。

4 影响差异与控制对策

4.1 两类设备受影响程度的对比分析

潜水泵与板式换热器对水质劣化的响应存在显著差异。从主导机理看，潜水泵受流动诱导的结垢-冲刷-腐蚀耦合控制，而板式换热器受传热强化结垢与缝隙腐蚀联合控制。从敏感参数看，潜水泵对溶解氧、氯离子、碳酸钙饱和指数均敏感，板式换热器对氯离子、温度梯度、pH 值更为敏感。从失效后果看，潜水泵性能衰退表现为效率下降直至堵转，过程渐进但有突发卡滞风险；板式换热器衰退表现为传热恶化与泄漏，后者常为突变性失效。从修复难易看，潜水泵检修需提井作业，耗时数天至数周；板式换热器可在线切换清洗或更换板片，停机时间较短但频次可能更高。

4.2 综合控制技术与实施路径

针对水质劣化对潜水泵与板式换热器的影响，应构建“源头控制—过程干预—末端防护”的综合技术体系。源头控制方面，优化回灌水处理工艺，使回灌水质与原生地热水化学相容，避免混合结垢；采用全封闭采灌系统，减少空气进入，控制溶解氧含量低于 0.5mg/L；对于高结垢倾向地热水，可在井口增设阻垢剂加注装置，选择对碳酸钙、硅酸盐均有抑制作用的复合阻垢剂。过程干预方面，在潜水泵选型时优先采用抗结垢流道设计——增大叶轮流道宽度、优化叶片进口角、减

少局部凸起；材料选择上，泵体可采用双相不锈钢或涂层防护，轴承与密封采用耐磨耐蚀材料。对于板式换热器，选择宽通道板型或不对称流道设计以降低结垢敏感性；板片材料根据氯离子浓度分级选用——氯离子低于 200mg/L 时用 304 不锈钢，200-1000mg/L 时用 316L 或 904L，高于 1000mg/L 时用钛材^[4]。运行优化方面，控制潜水泵在高效区运行，避免长期低流量工况——低流量时流速降低，结垢加速；对于板式换热器，定期切换地热水侧流向，使结垢倾向在两个流道间重新分布；建立在线监测系统，通过压降、温差、振动等参数实时判断结垢腐蚀状态，触发自动反洗或化学清洗程序。

5 结语

地热井水水质劣化源于物理化学条件变化、离子平衡破坏及氧化还原环境演变，对潜水泵与板式换热器的结垢腐蚀影响既有共性，又因结构差异而表现不同：潜水泵在高速流动与压力梯度下，结垢与腐蚀协同加速水力性能衰退和机械失效；板式换热器则因流道狭窄、温度梯度大，对垢层沉积和点蚀极为敏感。二者共同威胁系统安全与经济运行。本文系统解析了水质劣化的化学驱动力，阐明两类设备的结垢腐蚀机理与交互规律，构建了综合评价指标，并提出多维度防控对策。未来研究应聚焦三方面：一是锶、钡、氟等微量组分对结垢的影响；二是新型耐蚀材料及表面改性技术的适用性验证；三是基于大数据与机器学习的结垢腐蚀预测模型，支撑智能运维。

参考文献

- [1] 王贵玲, 蔺文静, 张薇. 我国地热资源水质特征与结垢腐蚀风险评价 [J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 45-54.
- [2] 刘久荣, 林沛, 郑佳. 地热井泵结垢机理与防治技术研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 112-121.
- [3] 杨立, 李静, 张晓晖. 板式换热器在地热供暖系统中的腐蚀失效分析 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2023, 35(2): 187-194.
- [4] 孙占学, 张卫民, 刘金辉. 中低温地热流体化学特征及结垢趋势预测方法 [J]. 地球科学, 2020, 45(9): 3412-3422.