

超声波除垢技术在油田地热开采系统中的应用效能分析 ——以胜利油田为例

王芳勇 史 媛

胜利石油管理局有限公司热力分公司 山东 东营 257200

摘 要：地热资源开发利用是实现油田低碳转型的重要路径，然而地热开采系统中的结垢问题严重制约了换热效率与系统稳定性。本文以胜利油田地热开采系统为研究对象，系统分析超声波除垢技术的作用机理及应用效能。研究表明，超声波通过空化效应、机械振动效应和剪切效应，能够有效抑制垢晶形成与附着，实现在线除垢与防垢。胜利油田垦90接转站现场试验数据显示，应用超声波防除垢装置后，加热炉热效率从56%提升至78%以上，注水系统效率从46.23%提高4.73个百分点，换热器传热系数提升8%—12%，单台加热炉年节约综合成本约35万元。与传统化学除垢方法相比，超声波技术实现了无污染、连续运行、低成本的优势，在胜利油田地热开采系统中具备良好的适用性和推广价值。

关键词：超声波除垢；地热开采；胜利油田；结垢控制；换热效率

引言

在全球能源结构转型与“双碳”目标引领下，油田地热资源开发利用正成为传统油气企业绿色转型的重要突破口。近年来，胜利油田确立“油田之中建热田”发展战略，已建成各类地热余热利用项目51个，盘活弃置井25口，年清洁供热能力达346万吉焦，年度绿热交易量已达41万吉焦。在地热开采与利用过程中，结垢问题始终是制约系统效率与运行安全的关键技术瓶颈。地热流体中富含 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等成垢离子，在温度、压力变化及 CO_2 脱气条件下极易析出碳酸钙、硫酸钙等硬质垢层。中高温地热田中代表性垢物是钙垢和硅垢，其中钙垢成分以 CaCO_3 为主，多形成于因压力下降导致 CO_2 脱气的开采井或者地面设备。胜利油田部分油区因产出液中钙、镁离子和碳酸根离子浓度偏高，处于严重过饱和状态，集输系统内结垢现象十分普遍，某些油区的集输管道内平均结垢速度达到2—5mm/月。传统除垢方法主要包括化学清洗法、机械除垢法和高压水射流法等。化学清洗法虽效果显著，但存在化学药剂成本高、管道腐蚀风险大、废液处理困难等问题；机械除垢法和高压水射流法均需停运设备，不仅造成生产中断，还难以实现连续在线除垢。近年来，物理场防除垢技术——特别是超声波技术——因其绿色、高效、可在线运行等优势，在油田系统中受到日益广泛的关注。

1 超声波除垢技术原理与机理分析

1.1 超声波的基本物理特性

超声波是指频率高于20kHz的弹性机械波，在液体介

质中传播时具有方向性好、能量集中、穿透能力强等特点。用于防除垢领域的超声波频率通常介于20—100kHz之间，功率根据应用场景可从数十瓦至数千瓦不等。超声波在介质中的传播伴随着声压的周期性变化，这一特性使其能够在液体中诱发一系列非线性效应。

1.2 超声波除垢的主要作用机理

超声波防除垢技术的核心机理可归纳为空化效应、机械振动效应和剪切效应三个层面。

1.2.1 空化效应

空化效应是超声波除垢最主要的作用机理。当超声波在液体中传播时，产生交替的高压区和低压区，在低压区形成微小气泡或空腔，这些气泡在声压的周期性作用下迅速膨胀、压缩乃至崩溃。气泡崩溃瞬间在局部产生极高的压力（可达数百兆帕）和温度（可达数千摄氏度），形成强烈的微射流和冲击波^[1]。这一能量足以击碎已形成的垢层微晶结构，使其从金属表面脱落。同时，空化效应还能打断垢晶体的生长链，抑制晶体向更大尺寸发展，从而发挥防垢作用。

1.2.2 机械振动效应

超声波在传播过程中引起管壁和换热面产生高频微幅振动。这种振动使垢层与金属基体之间的结合界面产生应力集中，当交变应力超过垢层的附着力时，垢层便发生疲劳剥离。研究表明，超声波防除垢技术通过破坏污垢的附着条件来阻止污垢形成的，超声脉冲振荡波会使加热炉管、板壁发生高频振动，在金属管、板壁和附近的介质之间产生一系列效应来进行防垢和除垢。

1.2.3 剪切效应与增溶作用

超声波的空化微射流对垢层产生高频的冲刷作用，能够“剪切”掉已附着在管壁的垢微粒并抑制其在管壁的进一步沉积。此外，超声波还具有“增溶”作用，能够提高物质的溶解度，防止垢晶体的析出，同时对已经形成的垢晶体具有“粉碎”作用，减少和抑制垢晶体的生成和长大。

1.3 超声波参数对除垢效果的影响

超声波除垢效果与频率、功率、作用时间等参数密切相关。研究表明，当超声波频率和功率分别达到50kHz和400W时，除垢效果和强化传热效果达到最佳，降低换热器压力损失、提高换热功率和换热系数的综合效果最为显著^[2]。此外，超声波的布置方式——如换能器在管道或设备上的安装位置和数量——也对除垢效果产生重要影响。

2 胜利油田地热开采系统结垢现状分析

2.1 胜利油田地热资源开发概况

胜利油田地处渤海湾盆地济阳坳陷，蕴藏着极为丰富的中深层地热资源。该区域地热资源总量折合标煤约250亿吨，平均地温梯度达3.4—4.2℃/百米，具有规模大、温度高、分布广的特点。近年来，胜利油田坚持油田热田协同开发，已建成各类地热余热利用项目51个，盘活弃置井25口。孤东采油厂东一联合站的采出液余热利用项目利用两口弃置气井改造和10口电泵采油井余热集中提取，年清洁供热能力达20.9万吉焦，用热成本降低59%，替代天然气638万立方米，年减排二氧化碳1.35万吨。

2.2 地热系统的结垢特征与危害

胜利油田地热流体具有高矿化度特征，其成垢离子浓度普遍偏高，处于严重过饱和状态。在地热开采和利用过程中，随着温度、压力的变化以及CO₂的脱气逸出，成垢离子从溶液中析出并沉积在管道、换热器和井筒内壁，形成致密坚硬的水垢层。以胜利油田垦90接转站为例，该区块结垢主要集中在加热炉盘管、掺水管线、原油外输管线等处，白云石、方解石、霏石是主要的结垢形式，区块管道的平均年结垢速率为24.05mm，结垢现象十分严重。结垢对地热开采系统的危害体现在多个方面。在换热设备上，垢层的导热系数仅为金属材料的1/50—1/100，导致换热效率显著下降——垦90站内5台800kW掺水加热炉设计效率为85%，受结垢影响热效率最低时仅56%左右，日均多消耗燃油2.5t，运行3—4个月即需酸洗除垢，平均13个月即需更换炉管。在注水管网系统中，管线结垢导致注水系统效率仅46.23%，比全厂

平均水平低4.73个百分点，年多耗电60万kWh；结垢还经常堵塞掺水表和注水表叶轮，影响计量精度。此外，结垢还造成严重的垢下腐蚀问题，管线穿孔事故频发——2010年该站掺水总干线穿孔12次，单井管线穿孔32次。

2.3 现有除垢方法的局限性

针对上述结垢问题，胜利油田目前主要采用停炉酸洗、高压水射流等方法进行定期除垢。这些方法虽能暂时缓解垢层累积问题，但存在明显不足。化学清洗不仅耗费大量化学药剂，其废液处理也面临环保压力；停炉清洗造成生产中断，影响系统的连续运行能力；频繁的机械清洗对金属壁面造成磨损，缩短设备使用寿命。因此，寻找一种可在线运行、绿色环保、经济高效的除垢技术成为亟待解决的现实课题。

3 超声除垢技术在胜利油田的应用效能分析

3.1 技术方案与试验设计

胜利油田技术检测中心在垦90接转站对超声波防除垢技术进行了系统的实验区试验。该站平均日产液量800m³，日产油量40t，日注水量1000m³，日掺水量200—300m³。试验在掺水生产管线上引出一个旁路并分出两路支线，其中一条支线安装超声波防除垢装置，另一条支线不采用任何防除垢技术，试验时间为35天，试验管段直径10cm，长度5m，掺水水温约45℃，压力约1MPa，流速约1m/s。

3.2 效能评估指标体系

本研究从热效率提升、泵效改善、能耗降低、设备运行周期延长以及综合经济效益等多个维度构建效能评估体系。

3.3 现场试验数据与效能分析

3.3.1 换热效率提升

应用超声波防除垢技术后，加热炉热效率从56%提升至78%以上，提高了22个百分点以上。超声波对板式换热器表面聚合物垢的防除效果研究也证实，超声波的应用能够显著降低换热器的压力损失，提高换热功率和换热系数。在注水系统方面，应用超声波防除垢装置后，注水系统效率从46.23%提高至全厂平均水平以上，提升了4.73个百分点。

3.3.2 能耗与成本节约

结合胜利油田东三联区域一体化能效提升实践，注水管线除垢后注水量下降0.23万立方米/天，注水单耗下降0.07千瓦时/吨，管线除垢平均压力损失降低0.84兆帕。孤东采油厂对三号联合站注水管线除垢后，管网压力损失降低0.6兆帕，年节电15.2万千瓦时^[3]。在加热炉系统中，单台炉日均节省燃油2.5t，按年均运行300天计算，

单台加热炉年可节约燃料费约30万元,加上停炉清洗费和维修费,年综合成本节约约35万元。

3.3.3 设备运行周期延长

原需每3—4个月进行一次酸洗的加热炉,在应用超声波防除垢装置后可延长至6个月以上清洗一次,炉管更换周期也从平均13个月延长至24个月以上,显著降低了维护频次和成本。

3.3.4 综合效能评价

综合而言,超声波除垢技术在胜利油田地热开采系统中的应用效能主要体现在三个方面:一是在线运行优势——该技术实现了阻垢与除垢的连续在线操作,无需停运设备;二是绿色环保优势——不需要化学试剂,对环境无污染;三是节能降耗优势——提升了换热效率和泵效,降低了油气生产的能耗成本。该技术应用于加热炉、换热器和注水管网等关键设备后,实现了清洁生产与经济效益的双重收益。

4 超声波除垢技术的推广前景与优化方向

4.1 技术适应性分析

从技术经济角度分析,超声波除垢技术在胜利油田地热开采系统中具备良好的适用性。地热流体系统具有液流连续、垢物类型明确、设备结构相对固定的特点,超声波的传播路径较为明确且易于实施在线监测与控制,为超声波技术的应用提供了基本条件。与化学法相比,超声波技术在环保性方面具有显著优势;与停炉清洗相比,其在连续运行方面的优势更加突出^[4]。随着超声波换能器性能的提升和智能控制技术的引入,超声波除垢技术的可靠性正不断提高,综合性价比优势日益显现。

4.2 在不同环节的扩展应用

在胜利油田地热开采系统中,超声波除垢技术已在加热炉防垢、换热器除垢、注水管线清垢等环节取得积极成效。未来可进一步向中深层地热井筒防垢、采出液余热回收系统、地热供热管网等环节拓展。利用超声波技术维护地热井的长期稳定生产,将成为油田地热规模化开发利用的重要技术支撑。

4.3 技术优化建议

为进一步提升超声波除垢技术的应用效能,建议从以下方面开展优化研究:(1)开展多参数协同优化研究,针对胜利油田不同区域地热流体的物性差异,确定最佳的超声波频率、功率和换能器布置方案;(2)研发智能化超声波除垢系统,结合在线垢层厚度监测和人工智能算法,实现超声参数的自动调节与能效优化;(3)加强超声波与其他物理场(如磁场、电场)的协同除垢技术研究,探索多场耦合除垢增效路径;(4)建立超声波除垢技术的经济性评价模型,为大规模推广应用提供决策依据。

5 结语

结垢问题是制约油田地热开采系统高效稳定运行的关键技术瓶颈。超声波除垢技术以其在线运行、绿色环保、综合效益显著等优势,为油田地热开采系统的结垢控制提供了可行解决方案。胜利油田垦90接转站等现场试验证明,超声波技术可显著提升加热炉热效率、注水泵效和换热器传热效率,延长设备运行周期,降低综合运行成本,具有良好的技术经济性。在“双碳”背景下,胜利油田正加速从传统油气生产企业向多元绿色能源供应商转型,地热资源的规模化开发利用成为转型战略的重要组成部分。超声波除垢技术作为绿色物理防垢方法,在保障地热系统高效运行方面具有不可替代的价值。建议进一步加大该技术在油田地热全产业链的推广应用力度,并结合智能化手段持续优化技术方案,为油田企业绿色低碳转型提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]杜红勇.超声波防除垢技术在油田加热炉上的应用研究[J].节能,2012,31(1).
- [2]王新伟,高亚洁,门驰,等.超声波对板式换热器表面聚合物垢的防除效果[J].中国石油大学学报(自然科学版),2025,49(6):215-223.
- [3]超声波阻垢与除垢技术研究进展[J].中国能源,2008,(4):92-96.
- [4]胜利油田分公司.东三联区域一体化能效提升实践[R].国家发展改革委,2020.