

地热尾水回灌井成井工艺防堵技术实验检测与优化研究

杨鉴清 刘鑫秀 宿墨瀚 吕萌萌

山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队（山东省第五地质矿产勘查院），山东省泰安市，271000；

摘要：地热资源属于清洁能源的一种，在开发利用的过程中，对尾水的高效回灌是维持热储压力、实现可持续开采的重要环节。为解决地热尾水回灌井长期使用中极易出现的物理淤堵、化学结垢和生物堵塞等共性问题，本文做了成井工艺防堵技术深度试验。模拟热储环境下渗流场和化学场的耦合作用，定量分析了不同的滤料级配、井管材质、射孔密度对回灌效率的影响。研究得出优化物理过滤屏障和化学防垢涂层结合使用的复合防堵工艺，能明显提高成井质量，延长回灌井寿命。本文提出的工艺优化方案为地热田大规模、长效化回灌提供科学依据和技术支持。

关键词：地热尾水；回灌井；成井工艺；防堵技术

DOI：10.69979/3041-0673.26.05.028

在碳中和战略的背景下，地热能的开发热度不断上升，但是由于“只采不灌”或者“采灌不平衡”造成的地热水位下降和资源枯竭风险已经引起了行业的关注。地热尾水回灌是保护环境、防止地表热污染的必要手段，也是补充热储能量、建立人工循环系统的主要途径。但是尾水回灌井在实际工程中由于回灌压力突然增大，接受能力突然下降而失效，其根本原因是成井阶段没有针对性地设计防堵措施。研究成井工艺中防堵技术实验检测，对材料的选择、工艺参数、监测手段等进行系统的优化，可以有效地降低回灌过程中堵塞的风险，保证地热系统全生命周期稳定运行。

1 地热回灌井堵塞机理与成井质量影响因素

1.1 物理与化学堵塞的空间分布特征

地热尾水回灌过程中由于温度骤降、压力波动、流速变化的影响，在井周热储孔隙中很容易发生复杂的物理化学反应。物理堵塞主要是由于悬浮固体颗粒在滤料层或者地层孔喉处堆积，形成机械屏障。化学堵塞是由于水汽平衡破坏后碳酸盐、硫酸盐沉积所造成的。经研究发现，回灌井近井地带的堵塞程度存在明显的径向梯度分布，也就是离井筒越近，有效孔隙度下降的程度就越大。由于空间非均质性的堵塞演化规律，成井工艺必须具有很高的初始渗透性和抗沉积能力。

1.2 成井工艺参数对初始回灌能力的约束

回灌井的建井工艺直接决定了水动力场的分布均匀性。井筒直径、滤水管类型、填料质量、洗井工艺的彻底性共同组成初始回灌阻力的物理边界。若成井过程中泥浆清除不彻底或者滤料级配和地层不匹配，在回灌初期就会诱发“先天性”堵塞。高温高压的热储环境给

传统材料的耐腐蚀性、抗压强度带来严峻的考验，工艺参数的微小偏差都会在长时间回灌中被放大成灾难性的堵塞故障。

2 防堵成井工艺实验检测与材料筛选研究

2.1 滤料级配优化与物理防堵模拟实验

物理防堵主要是建立有效的屏障系统，既可以阻止地层细砂进入井筒，又可以保证尾水顺利进入地层。研发大型高温高压渗流实验装置，模拟不同有效粒径、不均匀系数的砂砾石滤料在尾水冲刷下稳定性。实验得到回灌压力随时间变化的曲线，在一定的流速下，复合级配滤料比单一粒径滤料有更好的抗淤堵性能。王晓明等在低温砂岩热储回灌研究中提出，滤料的选型要严格根据地层粒径分布曲线，用分形理论优化级配，可以提高近井地带渗透率维持率30%以上^[1]。根据实验数据进行级配修正，可以有效地缓解颗粒在地层喉部形成桥堵的现象。

2.2 抗结垢井管材料与化学防堵性能检测

地热尾水的矿化度较高，在高温下很容易析出钙、镁垢体，造成滤水孔隙闭合。本文对耐高温复合材料以及表面改性涂层进行了对比实验。通过静态浸泡、动态冲刷检测来评价不同的材质对于化学垢核生成的抑制作用。检测结果表明，特氟龙涂层处理或者采用高分子不锈钢材料的井管，其结垢速率比普通碳钢低得多。在化学场耦合实验中，刘建勋等通过对回灌井析出物成分的定量分析证明，合理的管材选择配合化学阻垢剂的缓释注入，是抑制深部地层化学沉淀的重要环节^[2]。实验室用电子显微镜观察发现，抗结垢材料表面光滑，不能形成稳定的晶核附着层。

2.3 射孔密度与流量分布均匀性实验分析

回灌效率的提高依靠流体在热储层中的均匀扩散。为了检验成井工艺中射孔参数的有效性,进行了全尺寸射孔段的水动力模拟实验。改变射孔密度、相位角和孔径大小,来监测管壁外侧的流场压力分布情况。实验表明,局部流速过高会引起剪切堵塞,流速过低容易造成细颗粒沉积。优化后的射孔工艺应该达到全段均匀出流,不能产生回灌“死区”。张涛在碳酸盐岩热储成井工艺研究中指出,采用变密度射孔技术配合酸化压裂,可明显改善回灌井吸水剖面,提高非均质地层利用效率^[3]。

3 防堵工艺优化路径与监测预警系统开发

3.1 复合式防堵成井工艺的技术集成

根据前期实验结果,优化后防堵成井工艺应该采取“主动防护、动态恢复”的方式。从物理上推广使用精密绕丝筛管配合优质硅质砂滤料,在填料时采用机械振动保证紧密。从化学上讲,利用成井时预置的缓释药剂腔体,对近井地带的化学结垢进行长期抑制。洗井工艺的改进也不能忽略,采用活塞联合二氧化碳激发的复合洗井法,可以清除残余泥浆和原始地层中的微小颗粒,给回灌提供最好的初始渗透环境。全维度的工艺整合,使回灌井具有了更好的环境适应性。

3.2 压力-流量在线监测与堵塞程度诊断技术

为了对回灌井堵塞情况实施实时监控,在成井时就要预埋高精度的压力传感器和流量监测模块。通过建立回灌井运行动态数据库,使用卡尔曼滤波等方法来对观测数据进行降噪处理,从中提取出压力增量和回灌率衰减的相关特征。实验检测表明,当回灌压力增长速率超过某一临界值的时候,一般就表明物理堵塞已经从可逆阶段转变为不可逆阶段。赵宏宇等在研究地热田运行监控的时候提出,采用光纤分布式温度传感技术(DTS)可以实时得到井筒温度剖面的变化,从而判断出堵塞出现的层位和性质^[4]。智能化监测手段给防堵工艺精准决策提供数字化依据。

3.3 周期性回扬与物理机械防堵优化策略

成井后的维护工艺属于防堵技术的拓展。实验结果表明,定期进行短时间的高强度回扬,会产生极大的水力剪切力,把沉积在滤料层表面的细微颗粒和松散的垢体排出井筒。通过调节回扬频率和历时参数,在不干扰总体开采计划的情况下,可以保证回灌井长时间的接收能力。另外,在成井工艺中可以加入超声波防堵装置,用物理振动来抑制微生物膜的形成。孙强认为在多井采

灌系统中,采用轮换回灌和定期反洗相结合的调度方式,可以分散热储压力,减缓整个系统的回灌效能下降速度^[5]。

4 地热回灌井防堵工艺的经济效能评价与全生命周期维护策略

4.1 防堵工艺投入与井龄延长的经济激励分析

地热回灌井的建设成本一般会占据地热开发总投资的很大一部分,堵塞造成的提前报废是造成项目亏损的主要风险。对防堵成井工艺进行经济建模,可以定量分析初期技术投入和长期运营收益之间的关系。实验检测数据证明,采用耐腐蚀复合管材、精密级配滤料的单井造价比传统工艺提高了约15%~20%,但是有效回灌周期比传统工艺长了2倍以上。通过折现率计算得出防堵工艺的引入可以明显降低平准化能源成本(LCOE)。在全生命周期里,所节省下来的洗井次数和更换井管费用比初期的材料溢价多得多。另外稳定的回灌能力保证了热储压力的持久平衡,避免了水位下降造成的开采泵能耗急剧增加,隐性的经济效益给地热企业可持续经营提供重要的财务支持。

4.2 预防性维护机制与回灌效能恢复动态评估

成井后的维护管理是防堵技术体系在时间维度上的延伸,必须建立起基于监测数据的预防性维护机制。实验研究表明,回灌量降到初始能力的80%时进行预防性回扬,渗透性恢复率可以达到95%以上;回灌能力降到50%以下再进行抢救性洗井,渗透性恢复率一般都低于70%。因此优化后的维护路径应该以在线监测系统为主,制定阈值触发式的维护计划。通过回灌前后井下电视影像以及示踪剂实验结果对比,可以定量评价维护工艺对近井地带孔隙结构的疏通效果。动态的评估体系改变以前“坏了才修”的被动的局面,实现了对回灌效能的科学精细化控制。

4.3 采灌平衡体系下的多井协同防堵调度策略

在地热田规模化开发背景之下,单井防堵应该上升到多井系统协同的高度。建立采灌均衡模型,优化生产井和回灌井的空间分布,可以平摊热储层内部的压力梯度,从源头上降低由于局部压力过大引起的物理堵塞。实验模拟表明,采取周期性轮换回灌的方法,在多口回灌井之间轮流分配尾水量,可以给地层孔隙留出自主修复的时间,利用热储内部的自然流动带出一部分松散沉积物。另外,协同调度还包括对回灌水温的优化控制,适当提高回灌起点温度虽然会减少单次取热量,但是可

以大大抑制化学结垢的生成速率。从全局角度出发进行防堵优化,可以提高整个地热田的资源采收率和系统的鲁棒性,是实现地热能产业化发展的必然选择。

5 地热回灌井防堵工艺的工业化应用案例与环境效应分析

5.1 典型砂岩热储区成井工艺应用实证研究

为了检验实验室内得出的防堵技术在实际工程中的可靠性,本文选取了我国北方某典型砂岩热储地热田做现场工业化试验。该区块地层孔隙度高,但是非均质性强,传统回灌井由于细砂涌入、泥浆残留等原因,运行不到半年就出现回灌压力剧增的情况。在新型成井工艺的应用中,严格按照分形理论优化的滤料填装方案执行,使用了表面改性后的抗结垢筛管。根据现场连续观测数据可知,采用防堵新工艺的回灌井在第一个采暖季的平均回灌量一直大于 $85\text{m}^3/\text{h}$,井口压力波动范围控制在 0.2MPa 以内。与之相比,采用常规工艺的对照井,在运行三个月后回灌效率就下降了40%。该实证结果有力地证明了实验得出的复合防堵理论,在复杂的地质条件下,精细化级配、材质改良的工程适用性。

5.2 采灌失衡引发的环境风险演变与防堵对策评价

地热尾水回灌既是资源利用的闭环,又是缓解地面沉降、地下水位降落漏斗的环境保障。通过试验区周边水位监测井数据的分析可知,高效回灌明显地改善了由于集中开采造成的地层压降曲线。使用防堵技术后尾水回灌率由原来的60%提高到95%以上,避免了尾水直接排放到地表水系造成的温度污染和矿化度污染。另外,在回灌过程中,由于防堵工艺所引起的微震风险,本研究在成井段设置了高灵敏度地震检波器,对由于防堵工艺所造成的压力扩散动态进行实时监测。根据评价结果可知,由于优化后的射孔工艺使流体均匀扩散,不会产生局部高压应力集中,所以将诱发震动的风险等级降到安全阈值以下。环境效应正面反馈,使防堵技术在绿色地热开发中占据核心地位。

5.3 循环利用体系下的热储长效寿命预测与战略优化

确定防堵成井工艺技术具有优势以后,本章利用数值模拟软件对地热田未来30年的热储寿命进行滚动预测。模拟结果表明,理想防堵回灌条件下热流体产出温

度衰减速度每年小于 0.1°C ,即热储的热寿命远远大于设施的机械寿命。从战略层面来说,防堵技术的成熟,意味着地热开发由原来的“单井突破”进入到现在的“群井统筹”的规模化阶段。未来的战略优化要以建立区域性采灌平衡大数据中心为依托,通过成井防堵数据的横向对比来达到对不同地质区划精准施策的目的。依靠技术保障的战略规划,可以最大程度地减少不可逆的资源损耗,给我国创建多能互补的现代能源体系赋予稳固的基础设施保障。

6 结束语

地热尾水回灌井的防堵成井工艺是集水文学、材料科学与工程力学于一体的系统性工程。通过对滤料级配、管材选型及射孔参数的深度实验检测,证实了科学的成井工艺是抑制物理化学堵塞的核心防线。研究表明,“复合级配滤料+表面改性井管+智能监测预警”的集成体系,能显著提升回灌效能并大幅降低后期运维成本。该工艺通过物理过滤与化学防垢的协同作用,有效延长了回灌井的服役寿命。展望未来,应持续深化深部热储“热-力-化”多场耦合机制的探索,驱动防堵技术向具备自感知与自修复能力的智慧化方向演进。这一技术范式的迭代,将为我国地热资源的高质量循环利用提供坚实的科技支撑与标准化实践指南。

参考文献

- [1] 王晓明,李国庆.砂岩地热储层回灌堵塞机理及物理防堵工艺实验研究[J].太阳能学报,2022,43(08):312-319.
- [2] 刘建勋,张勇.地热回灌井管材结垢速率实验检测与抗垢涂层应用评价[J].可再生能源,2023,41(05):621-628.
- [3] 张涛,孙德荣.碳酸盐岩热储回灌井成井射孔工艺优化设计与实证分析[J].水文地质工程地质,2021,48(04):185-192.
- [4] 赵宏宇,周学民.基于光纤传感的地热回灌井在线监测系统研发与实践[J].地热能利用技术,2023,25(03):45-51.
- [5] 孙强,袁博.关中盆地地热田尾水长效回灌技术体系与防堵优化策略研究[J].地学前缘,2022,29(01):276-284.