

# 咸阳地热 WH1 井砂岩地层回灌试验研究与应用

徐胜强<sup>1</sup>, 陆斌<sup>2</sup>, 崔世波<sup>3</sup>, 薛亚斐<sup>4</sup>, 段凯<sup>5</sup>, 周林波<sup>1</sup>

(1. 中石化石油工程技术研究院储改所, 北京 100101; 2. 中石油长城钻探公司, 北京 100101; 3. 中石化新星石油公司, 北京 100083; 4. 中石油长庆油田公司, 陕西 西安 710018; 5. 中石油川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司, 陕西 西安 710018)

**摘要:** 地热是一种新型绿色能源, 我国地热资源丰富, 部分区域地热开发已经形成一定规模, 具有一定的研究基础, 地热尾水回灌形成可持续循环利用技术是目前遇到的突出难题, 在砂岩地层回灌尤为困难。汾渭盆地的地热能源较为丰富, 已经形成了规模开发, 咸阳地热 WH1 井首次进行了砂岩回灌尝试, 获得了施工及回灌等相关数据。对砂岩地层尾水回灌进行了试验, 积累了施工经验, 为后继施工打下了基础。

**关键词:** 地热; 水力喷射; 砂岩热储; 尾水回灌

**中图分类号:** TE249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)07-0005-04

**Experimental Study on Geothermal Well Recharge Test in Sandstone Formation/XU Sheng-qiang<sup>1</sup>, LU Bin<sup>2</sup>, CUI Shi-bo<sup>3</sup>, XUE Ya-fei<sup>4</sup>, DUAN Kai<sup>5</sup>, ZHOU Lin-bo<sup>1</sup>** (1. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China; 2. CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100101, China; 3. SINOPEC Star Petroleum Co., Ltd., Beijing 100083, China; 4. CNPC Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi 710018, China; 5. CCDC Changqing Down-hole Technology Company of CNPC, Xi'an Shaanxi 710018, China)

**Abstract:** Geothermal energy is a new kind of green energy and its development has formed a certain scale in some regions in China. The geothermal tail water recharge as a sustainable recycling technology currently becomes a prominent problem; especially when it is applied in sandstone layer. There is abundant geothermal energy in Fen-Wei basin where the scale development has formed. The sandstone recharge was tried in WH1 geothermal well in Xianyang for the first time with the related data of construction and recharge. Tail water recharge test was made to accumulate the construction experience, which lays the foundation for subsequent construction.

**Key words:** geothermal energy; hydraulic jet; sandstone geothermal reservoirs; tail water recharge

## 0 引言

地热资源是一种清洁能源, 并且具备储量大、可再生和不污染环境等特点。我国地热资源丰富, 开发利用地热资源对于缓解我国能源紧张形势, 改善能源结构, 节能减排, 保护环境具有重要意义。汾渭盆地面积  $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 地热分布约  $8719 \text{ km}^2$ , 预计地热资源总量为  $(1.3 \sim 1.74) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。咸阳地区属于汾渭盆地地热资源重点的开发区块, 预测储量  $495.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 可采储量  $7.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前地热开发面临的突出问题是地热尾水回灌难题, WH1 井首次进行了砂岩热储地层的增产增注措施, 将传统的水力喷射技术运用到地热新能源开发领域, 获得了一定的技术成果和施工经验。

## 1 WH1 井储层条件

咸阳地热田属中~低温地热田, 热储为第四系下更新统和新近系中、上新统, 包括 4 个热储层, 自

上而下依次为: 第四系下更新统三门组 ( $Q_{1s}$ )、新近系上新统张家坡组 ( $N_{2z}$ )、新近系上新统蓝田灞河组 ( $N_{2l+b}$ )、新近系中新统高陵群 ( $N_{1gl}$ ), 热储类型为中低温传导型砂岩孔隙裂隙型热储。

咸阳城区蓝田灞河组砂岩孔隙度一般为  $11.5\% \sim 30.8\%$ , 主要在  $10\% \sim 25\%$  之间, 平均值  $20\%$ , 渗透率一般为  $10.7 \sim 337.3 \text{ mD}$ , 平均值为  $79.7 \text{ mD}$ , 为中孔、低渗型储层。

蓝田灞河组砂岩孔隙度相对集中, 主要在  $10\% \sim 30\%$  之间, 占总统计数据的  $96\%$ , 渗透率数值变化大, 相对分散, 主要集中于  $0 \sim 100 \text{ mD}$  之间, 占总统计数据的  $82\%$ , 最高频率位于  $0 \sim 50 \text{ mD}$  之间。蓝田灞河组是咸阳城区地热水开发水量最大的储层段, 储层砂体单层厚度一般为  $10 \sim 15 \text{ m}$  之间, 最大厚度为  $23.3 \text{ m}$ , 由若干层砂岩上下叠置, 部分储层中的砂岩体之间夹厚度不等的灰黄色泥岩及粉砂岩。

收稿日期: 2013-12-03; 修回日期: 2014-06-20

基金项目: 中石化科技部项目“汾渭盆地地热尾水回灌工艺技术研究”部分内容

作者简介: 徐胜强 (1974-), 男 (汉族), 河南南阳人, 中石化石油工程技术研究院储改所高级工程师, 石油工程专业, 从事油气田储层改造及增产作业理论研究和现场施工工作, 北京市朝阳区安慧桥北辰时代大厦 610, xsqqsx\_94@163.com。

## 2 WH1 井井身结构及施工准备

WH1 井处于西安凹陷北部缓斜坡区的中断阶带南部,采用三开结构:一开井径 444.5 mm,  $\varnothing$ 339.7 mm 表层套管(壁厚为 9.65 mm, 钢级 N80), 下深 20 m; 二开井径 311.15 mm,  $\varnothing$ 244.5 mm 技术套管(壁厚 10.03 mm, 钢级为 N80), 下深 1414.15 m, 全井段水泥固井; 三开井径 215.9 mm,  $\varnothing$ 139.7 mm 生产筛管(壁厚 9.19 mm), 下深 1066.58 m, 筛孔直径 2 cm, 孔隙率 > 18%, 滤水管有效长度 243.86 m。二开、三开套管采用“穿袖”方式连接, 三开套管坐于井底,

未进行悬挂, 为施工工艺选择和施工增加了难度。

为获得吸水及产出基础数据, 落实 WH1 井各层段产吸水情况, WH1 井首先进行了试注和试排工作, 通过试井测试和资料处理, 逐段划分各个水层在产出和吸水时的贡献值, 为下步制订改造增注选层选段提供依据。通过对吸水效果好的层位进行对比, 并结合相应的储层物性参数资料分析, 解释出吸水强度较高, 吸水效果较好的层位有 6 层, 测井解释剖面效果见图 1。张家坡组由于采用固井完井工艺, 在尚未射孔打开的情况下未进行测试。

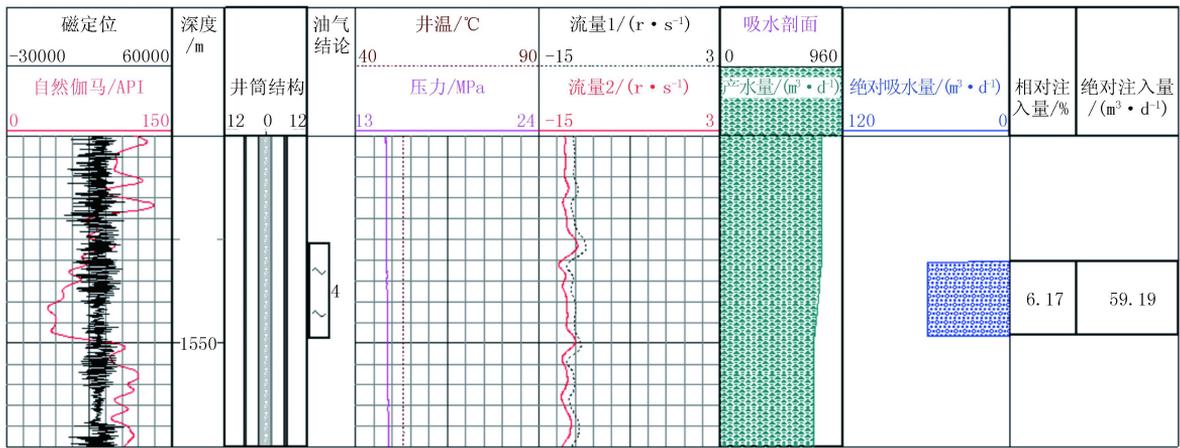


图1 吸水剖面测试图

## 3 储层改造

蓝田灞河组采用的是筛管完井工艺, 如果实现储层增注改造, 选择水力喷射技术实现定点定向改造技术, 蓝田灞河组喷射射孔过程中压力正常, 但环空始终不返液, 在注入 20 m<sup>3</sup> 交联胍胶后井筒仍无返出液, 砂岩地热储层在经历 2 个采水期后显示了其超强吸水能力。考虑持续顶替液体消耗太大, 采用增大喷点间距避免砂埋卡钻的技术调整措施, 直接上提管柱对喷砂点进行喷射加砂一体化连续施工。经现场施工实际检验工艺和方法可行, 施工及加砂过程比较顺利。图 2 为典型施工曲线, 可以看出施工压力偏低, 施工时间偏长, 施工耗费液体较

多, 调整后的施工主要参数见表 1。

张家坡组采用了固井完井方式, 在 178.10 ~ 1183.10 m 井段采用射孔卡封工艺进行针对性改造,

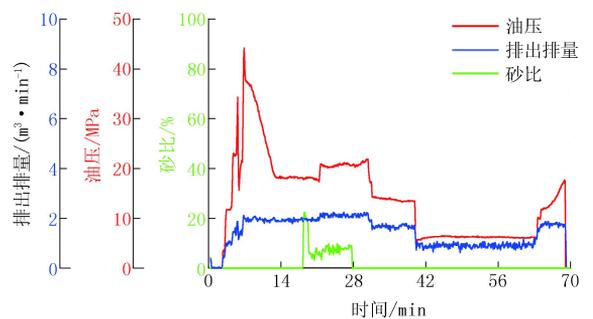


图2 典型施工曲线

表1 WH1 井蓝田灞河组喷砂射孔加砂压裂施工参数

层数	喷射深度/m		施工时间	注入液量/m <sup>3</sup>		泵注压力/MPa	砂量/m <sup>3</sup>		平均砂比/%		实际使用胍胶液/m <sup>3</sup>
	设计	实际		设计	实际		设计	实际	设计	实际	
第一层	2145	2145.86	9:28 ~ 10:35	91.1	100	18.1 ~ 42.0	2.0	1.5	8.0	7.5	80.0
第二层	2058	2058.10	11:27 ~ 11:47	88.0	46	18.1 ~ 30.4	2.0	1.5	8.0	6.5	34.0
第三层	1925	1925.02	12:33 ~ 12:52	86.7	41	17.7 ~ 31.0	2.0	1.5	8.0	7.1	27.0
第四层	1823	1822.84	13:26 ~ 13:42	85.8	41	22.1 ~ 32.2	2.0	1.5	8.0	6.8	
第五层	1722	1722.16	14:17 ~ 14:33	84.7	37.5	15.7 ~ 27.3	2.0	1.5	8.0	7.1	27.0
第六层	1495	1495.10	15:28 ~ 15:43	82.3	38	15.8 ~ 26.0	2.0	1.5	8.0	6.4	
第七层	1440	1439.81	16:07 ~ 16:25	82.3	43	12.9 ~ 35.0	2.0	1.5	8.0	8.0	

选用弹型为127深穿透射孔弹,孔密20孔/m,现场实际发射率100%。射孔后采用了通井措施,压裂最高泵压35 MPa,地层吸水少,无法压开地层。经调整钻具位置打压验证原钻具位置卡准了射孔段,恢复原钻具位置继续坐封后反复试挤无效,地层不能破裂,吸收量逐渐减小,起钻检查封隔器及油管完好。施工曲线如图3所示。

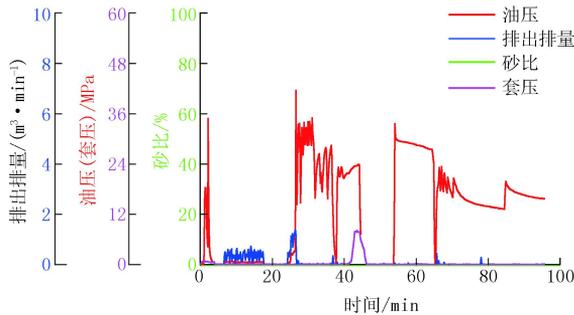


图3 张家坡组第一次施工压裂曲线

分析地层不能压开的原因:

- (1) 套管在钻井和固井过程中,因为储层渗透性好,导致泥浆大量滤失至地层,形成较大深度的滤饼;
- (2) 因为9 $\frac{5}{8}$  in 套管和102枪之间间隙较大,聚能射孔弹能量衰减,射孔效果不理想;
- (3) 施工前孔密已调整至20孔/m,原枪弹型增加射孔意义不大。

改变原来射孔加砂压裂工艺,在张家坡优选1180.5、1269.9、1348.0 m三个砂体进行喷砂射孔加砂,第一喷点1348.0 m,泵注压力25.1 MPa,排量2.5 m<sup>3</sup>/min,环空以200 L/min注入清水,加砂4 m<sup>3</sup>;第二喷点1269.9 m,泵注压力25.1 MPa,排量2.5 m<sup>3</sup>/min,环空以200 L/min注入清水,加砂4 m<sup>3</sup>,平均砂比8.2%;第三喷点1180.5 m,泵注压力26~27 MPa,排量3 m<sup>3</sup>/min,加砂量6 m<sup>3</sup>,平均砂比8.6%。

#### 4 压后处理

考虑到施工中可能存在井底沉砂,压裂措施后采用捞砂泵技术捞砂,捞砂泵依靠抽吸作用将沉砂抽入储砂管中,起钻捞出砂子,捞砂过程中异常情况较多,经常出现地层出砂掉块导致的无进尺。为适应井下砂面情况多次改进了捞砂工具,累计捞砂16次,捞出压裂砂及地层出砂2560 L。因起下管柱扰动砂面恢复、砂泥胶结遇阻等原因,砂面未能顺利捞下。尝试大排量反循环冲砂,但井筒漏失严重,无法建立循环。采用50 m<sup>3</sup>/h左右排量可持续灌入,液面始终不能恢复至井口,累计灌入7098 m<sup>3</sup>无返出。采用泡沫流体冲砂,利用负压平衡进行冲砂,利用泡

沫洗井液冲砂施工,虽建立了冲砂循环,冲出了部分地层砂,但井筒内的平衡难以调适,且容易受外界条件及砂子上返过程的干扰,最终仍未能成功将井筒砂子冲到地面,泡沫洗井液冲砂未能见效。

#### 5 施工小结

WH1井热储改造实际施工情况表明:经过2个供暖季采水后,钻井期间形成的泥浆滤饼屏蔽作用已经消失,地层漏失严重,采用交联胍胶不能建立循环,相反石英砂在水射流的带动下直接破开地层,进入了裂缝中。张家坡组原计划进行水力压裂,选用的双封选压钻具,但是多次限压保护下微量吸收但不能压开地层,表现为射孔不完善,但目前与9 $\frac{5}{8}$  in 套管配套的最大枪型为102枪,最大深穿透弹为深穿透127射孔弹,射孔前将孔密已加密至20孔/m,在未能压开地层的情况下,调整为水力喷射射孔加砂,整个水力喷射施工过程顺利,10段累计完成加砂25 m<sup>3</sup>,压后第一次探砂面位置在1955.87 m,井筒沉砂6.0 m<sup>3</sup>,近19 m<sup>3</sup>支撑剂进入地层,实现了造缝和改造目的。正常的循环顶替工艺程序在地热井改造过程中未能进行,砂岩热储显示了其异于常规油气藏的施工特性。改造后的持续返吐支撑剂及地层出砂,捞砂遇到支撑剂与地层出砂混合胶结导致无进尺,循环冲砂因大量漏失无法建立流程,砂岩地热储层的改造尝试显示了其特有的技术难点。

#### 6 改造后注水效果

水力喷射改造后,形成了有效的高导流通道,提高了地层的回灌能力,由原来的20 m<sup>3</sup>/h迅速灌满井筒变得基本灌不满井筒。将裂缝参数输入到原地质模型中,重新评价其地层回灌能力,模拟结果表明,改造后回灌能力大幅度提高,在回灌速度40 m<sup>3</sup>/h下平均回灌压力降低45%(见图4),即回灌能力约提高1倍,且回灌速度越高,回灌能力增加幅度越大(见图5)。

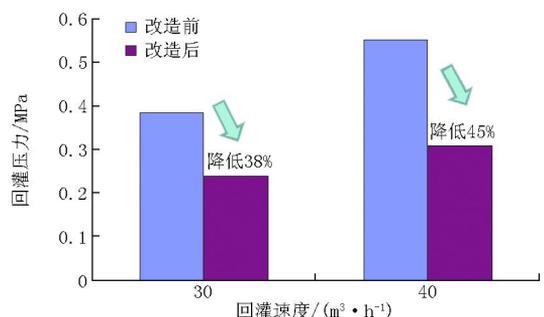


图4 改造前后回灌压力对比

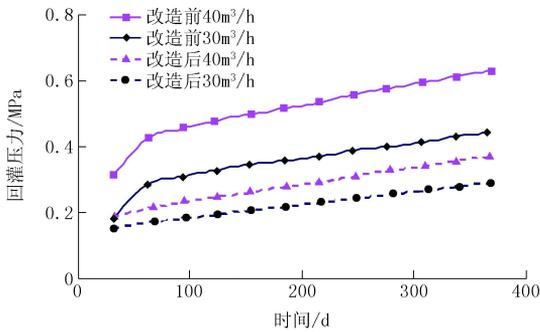


图5 回灌压力模拟图

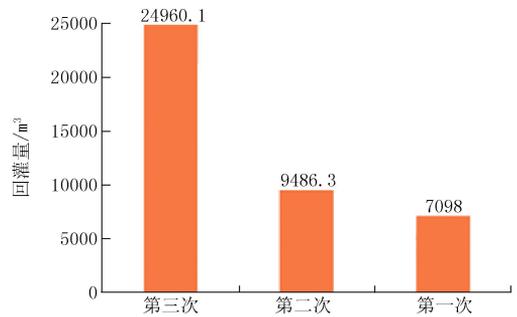


图7 回灌水量柱状图

喷射改造措施后,对 WH1 井进行排液作业,排量 500 L/min,折算排量 30 m<sup>3</sup>/h,累计排液时间 139.5 h,排出液量 4185 m<sup>3</sup>,排液初期液体比较浑浊,后期变得清澈,排液结束 10 min 内测排液管内液面高度 20.7 m,排液前测液面 13.0 m。

为进行井筒冲砂,采用 80 m<sup>3</sup>/h 左右排量灌水可暂时将液面恢复至井口,但稍做停泵液面就会迅速下降,需灌水 0.5~2 h 才能再次灌满井筒。采用 50 m<sup>3</sup>/h 左右排量可持续灌入,液面始终不能恢复至井口,累计灌入 7098 m<sup>3</sup> 无返出。考虑到地层的强吸水能力,采用水泥车正冲砂疏松胶结,用排量 400~1000 L/min 的排量进行正冲,冲砂至 1885 m,累计 1 h 始终无返出。

WH1 井第二次灌水累计灌水 9486.3 m<sup>3</sup>,液面在 22.4~1.35 m,井口始终未返水,停灌后液面迅速回落。供暖期后进行的第三次灌水历时 210.5 h,排量 31.1~68.2 m<sup>3</sup>/h,平均 54.97 m<sup>3</sup>/h,累计灌入 2496.1 m<sup>3</sup>,液面 13.8~1.35 m,未灌满井口,改造后 3 次回灌,累计回灌量达到 41544.4 m<sup>3</sup>,见图 6、图 7。

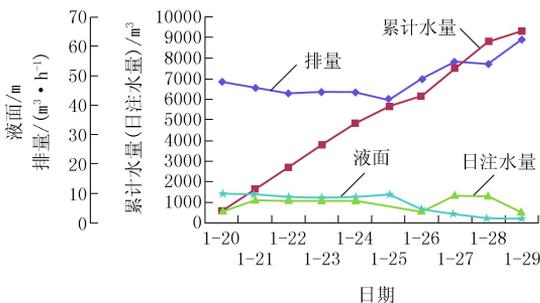


图6 第3次灌水参数曲线图

以上回灌均为自然回灌状态,未进行地面加压,如果进行地面增压至 0.3~0.5 MPa,回灌效果将更加显著,储层改造措施见到比较明显的效果。

## 7 结论与认识

砂岩地层地热井的尾水回灌持续利用是个世界性

难题,咸阳 WH1 井的实施在汾渭盆地砂岩地层进行了首次尝试,取得了一定的认识,积累了施工经验和数据,首次录取了大量施工及回灌数据,对进一步探索砂岩回灌措施打下了坚实的基础。实际施工中部分过程虽未能按原计划进行,但为将来施工积累了经验教训。

(1)首次在汾渭盆地砂岩地层进行了地热储层的增产增注改造措施,将油气层储层改造技术应用于地热资源开发领域,积累了相关施工经验和数据。钻井技术应用于地热资源开发领域,积累了相关施工经验和数据。

(2)地热井的出砂问题在本次施工中尤其是改造后显现尤为突出,极大地干扰了后期施工,延误了施工进度,影响了施工效果,地热井出砂问题值得以后关注和重点研究。

(3)砂岩热储层的首次水力喷射改造措施显示了改造效果,改造后的地层吸水大幅度提高,体现了地热井改造的可行性和必要性。

## 参考文献:

- [1] 崔会贺,姚广宇,徐胜强.水力喷射定向射孔在水平井压裂技术中的运用[J].特种油气藏,2007,14(3):85-87.
- [2] 杨方,李静,任雪娇.中国干热岩勘查开发现状[J].资源环境与工程,2012,26(4):339-341.
- [3] 徐怀颖,张宝生.环渤海及京津地区油田地热能利用的前景[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(4):182-185.
- [4] 孙芳,孙鸣.安阳东区 HDR-2 地热井施工及开发利用[J].西部探矿工程,2012,(9):54-56.
- [5] 王连成,沈健,程万庆,等.天津市地热集中开采区蓟县系迷雾山组热储回灌布局探析[J].中国房地产,2012,(7):52-57.
- [6] 王学峰,曹宏玉.矿山水回灌技术的应用与研究[J].赤峰学院学报(自然科学版),2012,28(6):117-118.
- [7] 朱家玲,朱晓明,雷海燕.地热回灌井间压差补偿对回灌效率影响的分析[J].太阳能学报,2012,33(1):56-62.
- [8] 杨东兰,王培义.中原油田水平井水力喷射压裂技术研究及应用[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2011,33(9):134-136.
- [9] 曲海,李根生,刘营.拖动式水力喷射分段压裂工艺在筛管水平井完井中的应用[J].石油钻探技术,2012,40(3):83-86.