

# 天津馆陶组地热回灌井钻井和射孔工艺探讨

马忠平<sup>1</sup>, 王艳宏<sup>2</sup>, 沈健<sup>1</sup>, 刘赞<sup>1</sup>, 王连成<sup>1</sup>

(1. 天津地热勘查开发设计院, 天津 300250; 2. 天津市地质工程勘察院, 天津 300191)

**摘要:** 天津地热在开采的同时重视回灌, 有效地保护了宝贵的地热资源。天津在基岩裂隙型地热中回灌效果良好, 但馆陶组地热井回灌量欠佳, 为了解决这一问题, 进行了研究探索。介绍了采用射孔工艺成井, 在保证取水效果的同时, 使稳定无压回灌量达到了  $101 \text{ m}^3/\text{h}$ , 取得了很好的效果。

**关键词:** 地热; 回灌井; 射孔技术; 馆陶组

**中图分类号:** P634; TE249    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2014)08-0036-04

**Discuss on Drilling and Perforating Technologies for Geothermal Recirculation Well in Guantao Formation of Tianjin/** MA Zhong-ping<sup>1</sup>, WANG Yan-hong<sup>2</sup>, SHEN Jian<sup>1</sup>, LIU Zan<sup>1</sup>, WANG Lian-cheng<sup>1</sup> (1. Tianjin Geothermal Exploration and Development-designing Institute, Tianjin 300250, China; 2. Tianjin Geo-engineering Investigation Institute, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** The recirculation being paid attention in the geothermal exploitation can effectively protect the valuable geothermal resources. Recirculation effects are good in bedrock fracture geothermal exploitation in Tianjin, but not in Guantao formation, on which the pertinence study is made. The paper introduces the perforating technology in well completion, stable non-pressure recirculation volume reaches to  $101 \text{ m}^3/\text{h}$  with water taking effect being ensured at the same time.

**Key words:** geothermal energy; recirculation well; perforating technology; Guantao formation

## 0 引言

地热资源作为一种清洁能源, 为推动经济和环境发展发挥了巨大作用, 取得了较好的经济效益和社会环境效益。新近系馆陶组热储层是天津市滨海新区地热资源开发利用的主要热储层, 近年来开发强度呈逐年增大趋势, 但随着开采强度的增大, 热储压力也逐年下降。地热回灌开发方式是资源可持续发展的重要途径, 地热尾水回灌是资源持续开发的主要手段。针对滨海新区孔隙型热储馆陶组回灌试验和地面配套设施, 我们进行了多年的研究探索, 也同步对成井工艺进行了实践探索研究, 逐步经历了大口径填砾成井、单层过滤器成井、双层笼状过滤器成井、射孔成井等工艺。采用射孔成井工艺, 在天津馆陶组地热回灌井中应用极大地提升了回灌能力。本文总结了 TG-46B 地热回灌井施工工艺和心得体会, 以便与同行商榷。

## 1 射孔成井技术简介

射孔成井技术是指在产层段下入套管, 用水泥封固产层后再用专用的射孔工具将套管及水泥环射穿, 并射入地层一定深度, 构成目的层至套管内连通

孔道的一项工艺技术。该技术作为石油钻井领域比较成熟的技术, 在油气层成井中广泛使用。射孔技术在天津地热井中多作为出水量不理想, 增加取水段的补救和增产措施, 近年来被尝试性地应用于孔隙型热储成井工艺中, 效果较好, 尤其是在地热回灌井中应用, 极大提升了回灌能力。

地热井射孔后整个孔道的内壁成为渗水断面, 然后汇集将孔道作为集水廊道, 地下水以紊流的形式沿此廊道涌出。钻井施工至设计深度完钻, 成井前先进行物探测井分析, 主要目的是查明所钻遇地层的岩性、热储层的顶底板埋深、渗透率、孔(裂)隙率等地质参数。根据测试结果选择孔隙发育且泥质含量小, 同时胶结性较好的砂岩段作为有效含水层, 确定射孔的位置。射孔参数包括: 射孔密度、射孔孔道直径、孔道深度、射孔相位角、产层射开长度等。钻井中产层总是被钻井液污染, 一般认为在距井壁 300~400 mm 的范围内地层的伤害是最严重的, 射孔时将这一严重伤害带射穿, 使不受污染的产层和井筒连通, 可以提高产量。射孔方式有多种, 在地热井施工中最为常用的是电缆输送聚能式射孔技术。

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-06-06

基金项目: 天津市国土资源和房屋管理局项目“天津市滨海新区馆陶组热储会馆技术集成与示范”

作者简介: 马忠平(1970-), 男(满族), 辽宁丹东人, 天津地热勘查开发设计院副院长、高级工程师, 探矿工程专业, 从事地热钻井技术工作, 天津市河东区卫国道 189 号, ma\_zhongping@sina.com。

2 TG-46B 井地层情况

该井地层从新到老有:新生界第四系、新近系明化镇组、馆陶组以及古近系东营组(见表1),按照各层的岩性特征,综合地质录井岩性描述、钻时录井曲线和物探曲线,分析确定各层的岩性特征如下。

表1 TG-46B 井钻遇地层

地层	地层代号	底板埋深/m	钻遇厚度/m
第四系	Q	620	620
新近系明化镇组	上段 Nm <sub>上</sub>	1260	640
	下段 Nm <sub>下</sub>	1734	474
新近系馆陶组	上段 Ng <sub>上</sub>	1880	146
	中段 Ng <sub>中</sub>	1956	76
	下段 Ng <sub>下</sub>	2070	114
古近系东营组	Ed	2080	10(未钻穿)

①第四系平原组(Q):上部以土黄色、浅灰色、灰黄色粘土为主,下部为砂质土与灰色、灰绿色、浅灰色粉细砂层明显变厚增多,属于上细下粗的正旋回沉积。

②新近系明化镇组(Nm):本井明化镇组厚1114 m,按岩性特征进一步划分为上、下两段。上段底板深度为1260 m,厚640 m,下段1260~1734 m,厚474 m。明化镇组与下伏馆陶组整合接触。

②<sub>1</sub>明化镇组上段(Nm<sub>上</sub>):岩性为棕红色、灰绿色、棕黄色泥岩夹不等厚以灰绿色、灰白色粉~细砂为主的砂岩;其中上部主要为粉细砂岩,胶结较差,松散。下部砂岩颗粒渐粗,变为中细砂岩,分选磨圆较差,矿物成分为石英、长石和亮色云母片;偶夹炭质条带。

②<sub>2</sub>明化镇组下段(Nm<sub>下</sub>):岩性主要为棕红色、棕黄色、灰绿色泥岩,泥质结构,块状构造,泥岩成岩性较差,易造浆,可钻性好,灰白色、浅灰色、灰绿色砂岩,砂岩成分以石英、长石为主,分选性较差,磨圆度一般,较上段砂岩泥质含量较大,多为泥质胶结。下部发育大段灰绿色泥岩、棕红色泥岩。

③新近系馆陶组(Ng):本组沉积岩相为一套河流相碎屑岩沉积,沉积旋回明显,分为下粗段、中细段和上粗段,分别为Ng<sub>上</sub>、Ng<sub>中</sub>、Ng<sub>下</sub>。其中馆陶组上段底板埋深1880 m,层厚146 m。馆陶组中段底板埋深1956 m,层厚76 m。馆陶组下段底板埋深2070 m,层厚114 m。

③<sub>1</sub>馆陶组上段(Ng<sub>上</sub>):馆陶组上段岩性颗粒相对较粗,主要以浅灰色、灰黄色中粗砂岩和少量灰绿色、灰白色粉细砂岩为主,局部砂岩泥质含量较高。

③<sub>2</sub>馆陶组中段(Ng<sub>中</sub>):灰绿色、棕红色、棕黄色泥岩与灰绿色、灰白色、灰色粉砂岩互层,砂岩颗粒

相对较细,以粉细砂为主,泥质含量大,且多为泥质胶结;泥岩性软,质纯。

③<sub>3</sub>馆陶组下段(Ng<sub>下</sub>):本段砂砾岩整体颜色主要以灰色、浅黄、黄褐色为主,夹有少量杂色砂砾岩,粒径呈上粗、中细、下粗排列,整体磨圆度也较差,多为棱角状,矿物成分以石英、燧石为主,含泥量较大。砂砾岩普遍夹有薄层泥岩,泥岩以灰色、灰绿色为主,质纯、细腻。

④古近系东营组(Ed):所见东营组地层砂岩发育较差,以灰绿色、灰白色粉细砂岩和灰绿色泥岩互层,整体多为灰绿色泥岩,且砂岩泥质含量较重。

3 热储层特征

该回灌井热储层为新近系馆陶组,顶板埋深1734 m,厚度336 m。上部岩性为灰绿色、灰白色、浅灰色砂岩,薄层灰绿色泥质粉砂岩,夹不等厚的暗棕红色泥岩、灰绿色泥岩;下部岩性以杂色砾岩为主,颜色为浅黄色、浅灰为主,成分以石英、燧石为主。综合地质录井及测井曲线发现,本井馆陶组底部砾岩发育较差,泥质胶结,孔隙度低,渗透率低,富水性较差,砂层富水性好,取水段深度1739.7~2043.8 m,孔隙度为27.08%~32.53%,渗透率为 $(559.11 \sim 1002) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

水质化验检测报告表明,该热储层水化学类型为Cl·HCO<sub>3</sub>-Na型,矿化度为1458.6 mg/L,硬度为37.5 mg/L(以CaCO<sub>3</sub>计),pH值为8.31,为碱性水。

4 TG-46B 井成井工艺

天津馆陶组地热回灌井(取水层深度>1500 m,以前均采用过滤器成井工艺,回灌效果不佳,回灌量40 m<sup>3</sup>/h左右,结合以前采用射孔工艺修井的经验,决定尝试射孔工艺。TG-46B井为一口定向回灌井,依据以往钻时录井、岩屑录井、取心资料和测井结果,该区域馆陶组砂岩地层储水条件好,胶结性较好,具备射孔成井条件,因此在TG-46B回灌井施工中,设计采用了二开射孔成井工艺,如地层出砂可补下Ø177.8 mm过滤器用于挡砂。完井后经洗井抽水试验,出水量为120.63 m<sup>3</sup>/h,井口水温70℃,静水位61.6 m,动水位埋深84.5 m,水清砂净。TG-46B回灌井造斜点为750 m,完井水平位移316.36 m,闭合方位角为115.76°,最大井斜角18.92°,完钻井斜角10.39°。

4.1 井身结构及套管程序

该井井身结构及套管程序见表 2,固井数据见表 3,井身结构示意图见图 1。

表 2 井身结构及套管程序								
回次	井段 /m	钻头直径 /mm	钻头型号	下入套管直径 /mm	壁厚 /mm	钢级	下入井段 /m	重叠长度 /m
一开	0 ~ 400	444.5	MP2	339.7	9.65	J55	400	-
二开	400 ~ 2080.68	311.2	HP2, SHT33G	244.5	8.94	J55	2080.68	32.04

表 3 固井数据							
回次	固井井段 /m	固井方法	水泥型号	水泥质量 /t	水泥浆密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	试压压力 /MPa	稳定时间 /min
一开	0 ~ 400	内管	R32.5	30	1.70	-	-
	368 ~ 400	挤水泥	G 级油井水泥	5	1.85	4.5	30
二开	1580 ~ 2080.68	内管固井	G 级油井水泥	22	1.85	-	-

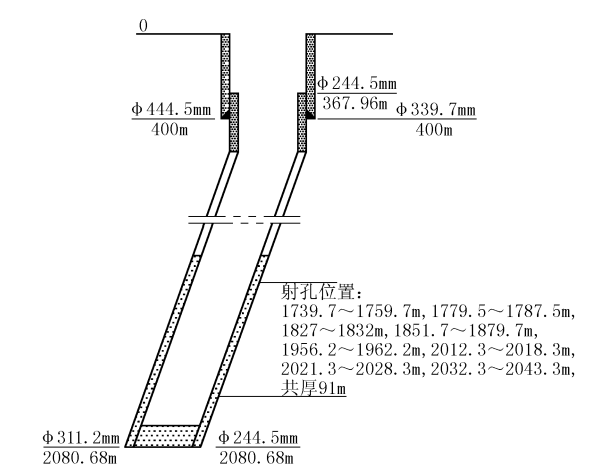


图 1 TG-46B 回灌井井身结构示意图

4.2 钻井液控制

TG-46B 井为保证施工质量,加快施工进度,采用水基聚合物钻井液体系,该钻井液体系主要优越性在于钻至泥岩地层能较好地抑制造浆,用极压润滑剂提高润滑性,降低泥饼粘滞情况,避免粘吸压差卡钻事故发生,保证了孔内安全。钻井液性能见表 4。

表 4 钻井液基本情况					
井段	钻井液类型	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	粘度 /s	失水量/[mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	pH 值
一开	水基聚合物钻井液	1.16 ~ 1.19	25 ~ 32	9.8 ~ 12	10 ~ 11
二开	水基聚合物钻井液	1.16 ~ 1.20	30 ~ 50	7 ~ 10	8 ~ 12

完成钻孔施工后,通过测井曲线解释成果分析热储层的渗透率、孔隙度及含水层的厚度,同时应选择胶结性较好的地层进行,在此基础上确定射孔层段。

TG-46B 回灌井成孔后进行物探测井,依据测井结果,分析热储段厚度、孔隙度、渗透率、泥质含量和井温等因素,选取在 1739.7 ~ 1759.7、1779.5 ~ 1787.5、1827 ~ 1832、1851.7 ~ 1879.7、1956.2 ~ 1962.2、2012.3 ~ 2018.3、2021.3 ~ 2028.3、2032.3 ~ 2043.3 m 进行射孔作业(表 5 所示),射孔选用 Ø102 mm 枪/Ø12.7 mm 弹,孔道直径≥13 mm,孔道深度≥700 mm,射孔密度 15 孔/m,相位角 90°,射开取水层总厚度 91 m,采用电缆输送聚能式射孔技术。

表 5 TG-46B 地热井测井解释成果									
层号	起始深度/m	终止深度/m	厚度/m	电阻率/(Ω·m)	声波时差	孔隙度/%	渗透率/(×10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )	泥质含量/%	解释结论
23	1739.7	1752.0	12.3	10.94	374.95	32.53	1002.00	12.25	水层
24	1778.8	1787.7	8.9	5.32	353.40	31.97	987.10	5.26	水层
25	1827.0	1832.0	5.0	3.61	339.83	29.77	699.07	4.82	水层
26	1851.7	1879.7	28.0	5.29	353.54	31.25	903.86	7.83	水层
27	1900.4	1905.0	4.6	3.13	337.30	28.80	626.48	6.61	水层
28	1956.2	1962.0	5.8	4.38	333.69	28.64	588.62	6.16	水层
29	1971.8	1981.6	9.8	1.97	332.42	27.07	461.74	8.86	水层
30	1983.8	2004.2	20.4	2.09	329.29	23.45	331.05	14.75	水层
31	2012.4	2018.3	5.9	2.37	328.73	28.59	665.43	4.94	水层
32	2021.5	2028.3	6.8	2.03	331.23	28.95	602.99	5.36	水层
33	2032.3	2043.8	11.5	1.79	330.78	27.08	559.11	8.90	水层
34	2060.6	2065.6	5.0	2.07	320.83	25.83	367.97	7.54	水层

5 回灌试验效果

TG-46B 井累计回灌 89 h,回灌前静水位埋深 63.42 m,对应液面温度 25 ℃,无压最大回灌量 101

m<sup>3</sup>/h(见图 2),经计算动水位为 0 m 时最大回灌潜力 129 m<sup>3</sup>/h,比以往采用过滤器成井工艺平均回灌量 40 m<sup>3</sup>/h,有了很大的提高。

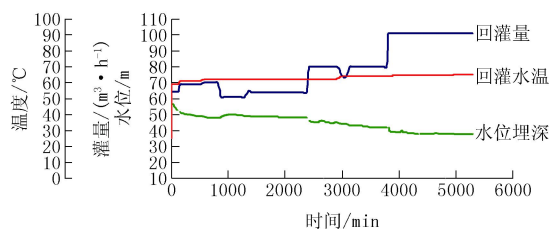


图2 TG-46B井回灌试验历时曲线图

## 6 结论和建议

(1) 天津馆陶组地层赋水性好、渗透率大且胶结性较好(取水层深度一般 $>1500\text{ m}$ ),采用射孔成井方式,实施过程中要有足够的穿透深度,射透钻井液严重污染层( $300\sim400\text{ mm}$ ),形成稳定回灌流体运移通道,该工艺虽然在平面上比过滤器方式的过水断面小,但纵向增加了透水面积,增大了回灌能力。

(2) 射孔工艺相比过滤器成井工艺,水层与过水通道对位更精确,管外采用水泥固井,出水砂层和泥岩完全隔离,回灌水与地层泥岩没有接触,可以避免回灌水中混入泥岩地层颗粒或胶体,污染地层,影响回灌。

(3) 射孔成井要保证射孔井段固井质量,要考虑井径因素,水泥附加量和替量的准确性,如果套管外环水泥固井质量不好或没固井,将大大影响该井长期回灌效果。

(4) 射孔井段不易过短,以避免水流过快导致地层出砂,同时使用时(或采灌井交替使用)不易超强度开采。

(5) 在孔深较浅(一般 $<1500\text{ m}$ ),目的层埋深较浅的地热井中,储层胶结程度一般较差,较为松散,考虑选用一开大口径填砾过滤器成井工艺,在天津DL-25H井中试验,回灌潜力可达 $101.9\text{ m}^3/\text{h}$ ,效果也不错。

(6) 对于胶结性较差的松散地层,采用二开单层过滤器成井工艺。在储层条件允许时,回灌井过滤器长度适当增加,可减小回灌阻力,增大回灌能力。各段泥岩和砂岩之间要加胶皮止水器,以减小泥岩坍塌对回灌的影响。

(7) 射孔成井工艺在天津馆陶组回灌井中使用效果良好,已有近20口井的成功经验,但在其他地区适用性还有待验证。

## 参考文献:

- [1] 步玉环,王德新.完井与井下作业[M].山东东营:中国石油大学出版社,2006.
- [2] 林黎,王连成,赵苏民,等.天津地区孔隙型热储层地热流体回灌影响因素探讨[J].水文地质工程地质,2008,(6):125-128.
- [3] 天津市滨海新区馆陶组热储回灌技术集成与示范研究报告[R].天津:天津地热勘查开发设计院,2012.
- [4] 马忠平,庞海,王艳宏,等.天津地区地热钻井及成井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(12):9-11.
- [5] 编写组.钻井手册(甲方)[M].北京:石油工业出版社,1990.
- [6] 许刘万,伍晓龙,王艳丽.我国地热资源开发利用及钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(4):1-5.
- [7] 沈健,边宗斌,武佩良.射孔技术在天津市滨海新区馆陶组热储层回灌工程中的应用[A].第十三届科协年会第14分会场——地热能开发利用与低碳经济研讨会论文集[C].2011.

## (上接第35页)

(3) 聚磺钻井液体系在伊拉克艾哈代布油田的应用体现出了很强的抑制能力、抗污染能力和稳定性,解决了以往该区块钻井中坍塌、卡钻、钻井周期长等一系列难题,在AD205H井现场应用中证明,该体系满足于在伊拉克艾哈代布油田施工需要。

(4) 在合理的工程措施和优质的钻井液保障下,AD205H井创造了艾哈代布油田的多项施工记录,单只钻头进尺、平均机械钻速以及单井采收率均得到了显著提高。

## 参考文献:

- [1] 朱洪刚.伊拉克艾哈代布油田水平井钻井液技术[J].科技与企业,2013,(15).
- [2] 汪绪刚,张文华,李应光,等.伊拉克艾哈代布油田快速钻井技术[J].石油钻探技术,2013,41(1).
- [3] 袁波,汪绪刚,汪世国,等.聚磺钻井液在伊拉克艾哈代布油田水平井中的应用[J].钻井液与完井液,2011,28(5).
- [4] 顾永福.聚磺钻井液技术在WASIT油田应用[J].中国石油和化工标准与质量,2012,(4).
- [5] 汪世国,盖军慧,汪绪刚,等.伊拉克AHDEB油田钻井液完井液技术研究与应用[J].化学与生物工程,2013,(2).
- [6] 谷玉堂,王佳庆,奚广春,等.水平井快速钻井技术在伊拉克AHDEB油田AD205H井的应用[J].内蒙古石油化工,2011,(12).