

东濮凹陷废弃井改造成地热井先导试验

周晓奇

中石化中原油田分公司石油工程技术研究院 河南濮阳 457001

通讯作者:Email:zxqupc@163.com

项目支持:中石化科技部项目“废弃井改造成地热井关键技术研究”(JP14002)

引用:周晓奇. 东濮凹陷废弃井改造成地热井先导试验[J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 27-34.

Cite: ZHOU Xiaoqi. Pilot test of transforming abandoned wells into geothermal wells in Dongpu Depression [J]. Well Testing, 2018, 27(4): 27-34.

摘要 将地热资源丰富的油区内废弃井改造成地热井,不仅赋予石油废弃井新的生命,还降低了地热开发的前期投入和投资风险。在东濮凹陷地热目标区块内,将优选的355口可利用废弃井分为6种类型,研究设计每一类废弃井的改造工程方案。以马古6井为例,根据其室内敏感性评价实验、水样分析、酸液体系和添加剂筛选结果,制定了酸洗解堵方案;配套流量、压力、温度及动液面测试技术,开展了现场改造先导试验,成功实施了井口恢复、储层解堵、试水测试等工艺,圆满达到了施工目的及要求,形成一套较完善的地热井测试工艺,为油田实现环保低碳供热及地热资源产业化发展提供了一套经济适用的新方法。

关键词 东濮凹陷;废弃井;地热井;工程改造;先导试验;酸洗;测试

中图分类号:TK529

文献标识码:B

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.04.005

Pilot test of transforming abandoned wells into geothermal wells in Dongpu Depression

ZHOU Xiaoqi

Petroleum Engineering and Technology Research Institute, Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China

Abstract: The geothermal resources of abandonment wells in oil fields are very rich. Remodeling these wells into geothermal wells not only gives them new life, but also reduces the initial investment and investment risk of geothermal development. In the geothermal target block in Dongpu Depression, the 355 available abandonable wells were divided into six types based on different wellbore structures, water layer position and the top depth of cement ring, etc. Each type of abandoned well was studied and their renovation plan was designed, respectively. Taking Well Magu6 as an example, according to its indoor sensitivity assessment experiment, water samples analysis, acid system and additive screening results, a scheme for plugging removal by acidization was formulated. In addition, in conjunction with flow, pressure, temperature, and dynamic liquid surface testing technologies, pilot tests were conducted in the field and successfully completed the technical tests such as wellhead recovery, plug removal, and water testing, which satisfactorily met the construction purpose and requirements. This relatively complete geothermal well test technology provides an economical and applicable new method for oilfields to realize the development of environmentally friendly low-carbon heating and industrialization of geothermal resources.

Keywords: Dongpu Depression; abandoned well; geothermal well; engineering transformation; pilot test; acid washing; well test

目前,我国地热能开发利用正处于快速发展的时期,地热能作为一种绿色低碳、可循环利用的可再生能源,具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点,是一种现实可行且具有竞争力的清洁能源^[1-3]。地热井钻探一直是地热资源开发的主要手段^[4]。但是,地热井钻探有它固有的投资高、风险大、周期相对较长等问题。

国外对废弃油气井进行地热能源的生产、改造及利用废弃井进行地热发电进行了研究报道,认为在开发地热资源方面,这些废弃井会有新的经济价

值,但均未对改造过程中的关键技术进行研究^[5-8]。近年来,国内华北、大港^[9]等油田已相继将油田已有的弃用油气井及注水井加以技术改造,作为地热井,用以地热资源的开发,但规模较小,没有形成成熟的废弃井改造成地热井的方法及工艺配套技术^[10]。阚长宾等^[11]、宋恩武等^[12-13]对废弃油井改造为地热井的可行性以及改造的方法进行了分析和探讨。刘均荣等^[14]在对油田地热资源分析的基础上,分析了利用油田中低温地热资源发电的可行性,并针对地压型地热资源的特点,对地压型地热

水驱提高稠油油藏采收率进行了探讨。Wight N. M. 等^[15]利用废弃井作为井筒循环流体发电的一种手段进行了探讨。卜宪标等^[16]认为,循环流体的流量和地温梯度是影响换热量的两个最主要因素,利用废弃油气井中循环流体的流动换热方程以及循环流体和岩石的热交换方程,可以使现有的废弃油井和气井中存在的大量热能得以有效利用。董秋生等^[17]针对有改造价值的废弃井,采用成本较低的直接射孔法将其改造为地热开采井或地热回灌井,研究了水量水温、回灌率及改造方案的可行性,使废弃井得到了二次开发。

经对东濮油田 2 000 余口废弃井筛选、井况条件分析、改造及测试方案制定、优化施工等方面展开论述^[18],针对不同的井身结构、水层位置等技术条件,将其分成了 6 种类型,形成了每一类废弃井的改造方案,实现了科学利用油田废弃井开采地热资源,减轻了废弃井治理负担,达到安全高效利用新能源的目的,为油田实现环保低碳供热及地热资源产业化发展提供一套经济适用的新方法。

1 选井分析

在东濮凹陷地热目标区块废弃油水井地质选井的基础上^[19-20],根据废弃井的井下和地面技术状况,工程优选了 355 口井;针对不同的井身结构、水层位置等技术条件,将其分成了 6 种类型,研究设计了每一类废弃井的改造方案,为进一步开展改造工艺研究提供了依据。

1.1 废弃油水井地质选井研究

针对整个东濮凹陷,以各个地热田(油田)为单位,对热负荷经济半径内的废弃井的地质资料和运行资料进行分析和大规模的排查工作,统计区域内废弃井共 2 090 口,包括可利用井 545 口,无资料不能确定的井 54 口,其它不可用井 1 491 口(表 1)。

表 1 东濮凹陷废弃井状况统计表

Table 1 Statistics of abandoned wells in Dongpu Depression

单位	废弃井 总数	地质可利用 井数
采油一厂(文东、文中)	587	205
采油二厂(濮城)	327	89
采油三厂(文明寨、马寨、卫城、古云)	334	56
采油四厂(文南)	172	47
采油五厂(胡状、庆祖、刘庄)	544	90
采油六厂(桥口)	126	58
合计	2 090	545

1.2 废弃油水井工程选井及改造方案研究

从东濮油田废弃井完井井身结构分析、工程选井以及不同类型废弃井改造原则等几个方面,对废弃油水井改造方案进行研究。

1.2.1 东濮油田废弃井完井井身结构分析

废弃油水井钻探的基本目的是进行石油矿产资源的开采,这些井的特点是完井井径一般较小、钻探深度较大,一般在外部的套管内另外下有一层油层套管,供采油使用。其井身轨迹均穿过热储层。但由于其目的为石油、天然气开采或注水使用,完井时均封闭了地下深处的热储层,同时进行了水泥固井,使地热水不能流出,保证采油气或注水的功能。

东濮油田油水井主要以射孔完井为主,部分探井为裸眼完井。其井身结构主要可分为二开射孔完井、三开射孔完井、三开裸眼完井三大类,井身结构如图 1 所示。

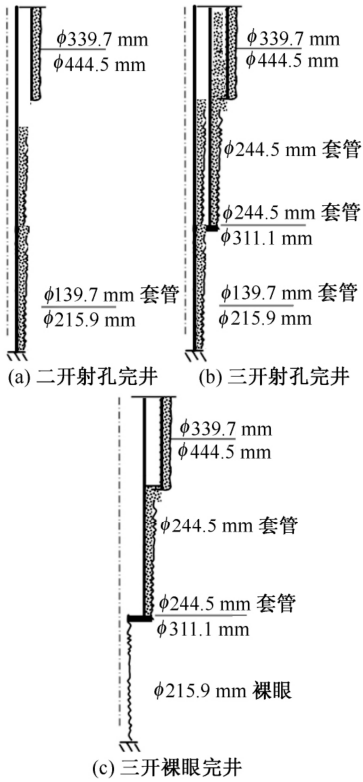


图 1 三类井身结构示意图

Fig.1 A schematic diagram of the well structure of three types

1.2.2 工程选井

废弃井与地热井在井身结构上的主要差别是,地热井有满足潜水泵下入的泵室。因此,废弃井井口附近(小于 300 m)是否具备泵室改造条件,是工

程判断是否可利用的关键。在分析油田废弃井和地热井井身结构的基础上,工程选井包括且不限于以下条件:①井身轨迹穿越目标地热储层。②目标地热储层底界至井口油层套管无变形、破漏,井筒通畅、满足地热资源开采。

1.2.3 不同类型废弃井改造原则

按照废弃井不同的井身结构、水层位置、水泥返高深度等,将满足改造条件的废弃井共分为六大类(表 2),并制定了每一类废弃井改造的工艺方案(图 2)。

表 2 废弃井井身结构分类表

Table 2 Well structure classification table of abandoned wells

工作制度	类型	套管组合	可利用条件	井数
二开完井	1	339.7 mm+139.7 mm	水泥返高>200 m,水泥返高高于水层	139
	2	339.7 mm+139.7 mm	表套下深>200 m,水泥返高低于水层	57
三开完井	3	339.7 mm+244.5 mm+139.7 mm	有油套,水泥返高在水层以下,技套下深至水层以下	77
	4	339.7 mm+244.5 mm+139.7 mm	有油套,水泥返高在水层以下,技套下深至水层以上	24
	5	339.7 mm+244.5 mm+139.7 mm	有油套,200 m<水泥返高<水层顶界	51
	6	339.7 mm+244.5 mm	无油套	7

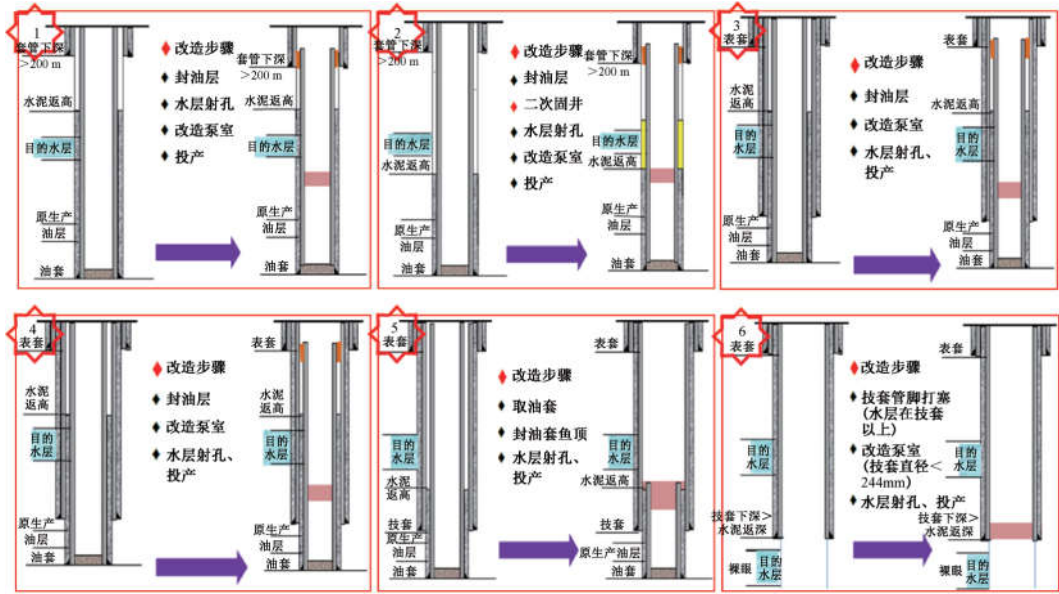


图 2 六类废弃井改造的初步方案

Fig.2 Preliminary reconstruction scheme for six types of abandoned wells

改造原则:①改造泵室,确保潜水泵入井;②封堵原生产层,防止油气外窜;③二次固井,将目的地热层分隔开,避免水层互窜;④泵室底部套管环空密封,防止产出水窜入地表水层。

2 马古 6 井改造条件分析

通过分析东濮凹陷地质构造特征、马古 6 井井身结构,明确其工程改造条件,提出下步相应改造措施^[21]。

2.1 构造特征

马古 6 井为马厂潜山带上一口预探井,自上而下钻遇地层新生界馆陶组和沙河街组、上古生界石炭二叠及下古生界奥陶、寒武系。储水层位在奥陶系,储层条件好,裂缝发育(裂缝 75.3 m/

13 层),出水量大(水 124.8 m³/d)。岩性为深灰色、灰色灰岩和白云岩夹灰质白云岩和白云质灰岩,灰色煌斑岩。马厂断裂以及马东断裂均切入奥陶系地层,断层的破碎作用以及沟通作用为热水提供了储集以及沟通的作用,其构造剖面如图 3 所示。

2.2 单井条件

在地质、工程选井研究的基础上,选定可利用井马古 6 井、毛 4 井和春古 4 井三口井(表 3)。其中马古 6 井、春古 4 井井筒处理难度小。马古 6 井钻穿奥陶系,水层厚度大,且都处于南部,故选取马古 6 井为最佳测试井。其次,毛 4 井井筒处理难度相对较大,但位于北部。为便于认识储层,故建议次选毛 4 井,春古 4 井备选。

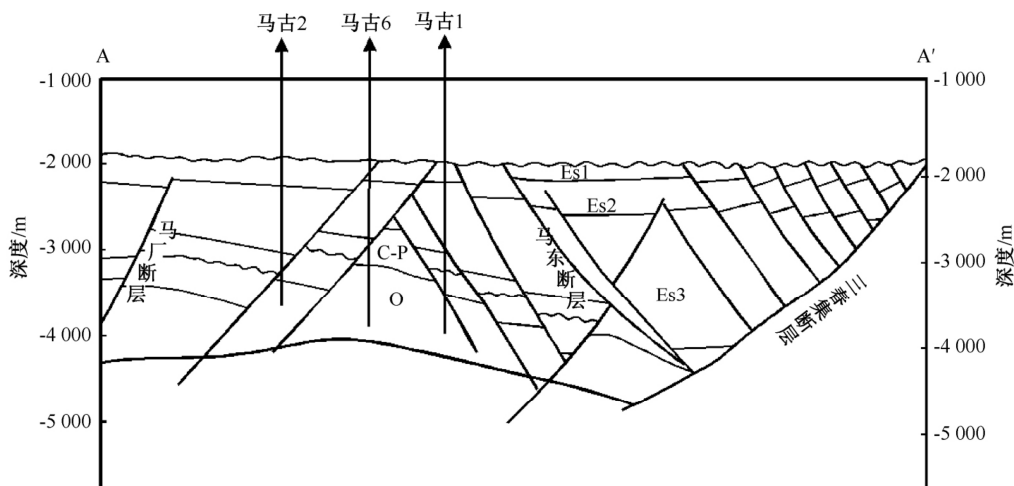


图 3 马古 6 井构造剖面图
Fig.3 Tectonic profile cross well Magu6

表 3 奥陶系选井统计表
Table 3 A statistical table of selected wells
in the Ordovician system

井号	井况条件			建议
	井下	井口	井场	
毛 4	空井筒	套管头焊死	井场、道路待完善	可利用,次选
马古 6	空井筒	套管短节+盲板	东南离村 100 m	可利用,首选
春古 4	空井筒	套管短节+盲板	在春古 1 井南西 235°、 600 m 处	可利用,备选

2.3 井身结构

马古 6 井 1985 年 10 月完钻,属于前述第 6 种完井方式,井身结构如图 4 所示。

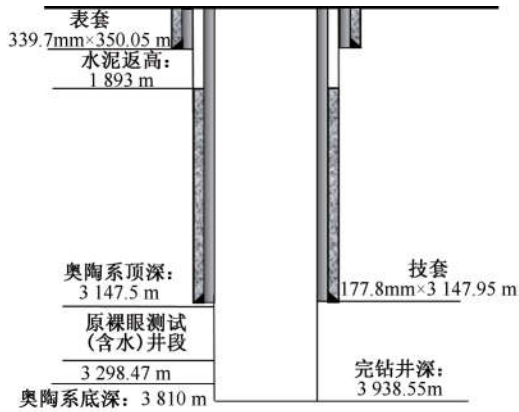


图 4 马古 6 井井身结构示意图
Fig.4 Schematic diagram of wellbore structure
for well Magu6

该井钻遇奥陶系地层超过 600 m,其酸化可改造范围较大。因此,改造的目的层即为含水层奥陶系。马古 6 井技术套管下深 3 147.95 m,接近目的层奥陶系顶部,目的层热水与上部砂岩热储中热水被技术套管隔开,不会出现水层互窜的现象。

3 改造及测试方案

在安全环保的前提下,制定改造及测试方案,确保获取地层最大水量,满足试水测试的要求,获取详细解释资料。

3.1 总体方案

(1) 开工准备。根据施工要求,对井场及进出井场道路井下整改、立井架,做好施工准备。

(2) 完善井口。对井口进行完善,满足作业要求。

(3) 压力恢复测试。装存储式压力计,测井口压力恢复。

(4) 酸洗解堵。对目的层进行酸洗解堵。

(5) 测压力温度梯度。配合钢丝作业,对地层压力、温度进行测试。

(6) 泵室改造及测试。根据井口溢流及前期资料分析,若井口水量充足,则改造泵室,并下潜水泵生产、测试;若井口水量不充分,则下电泵测试,根据测试结果进一步分析论证是否改造泵室。

(7) 完井。经测试资料解释分析后,若有开采价值,则按地热井口安装要求,装井地热生产井口完井;若无开采价值,则按油田废弃井永久性封井要求,进行封井。

马古 6 井改造及测试流程如图 5 所示。

3.2 水层酸洗方案

通过对该井井口垢样分析,石盐、黏土含量相对较高,同时考虑到储层岩性的强酸及强碱敏感性特征认为,所选用的酸液体系必须避免因反应而生成的沉淀,是油层处理的关键。

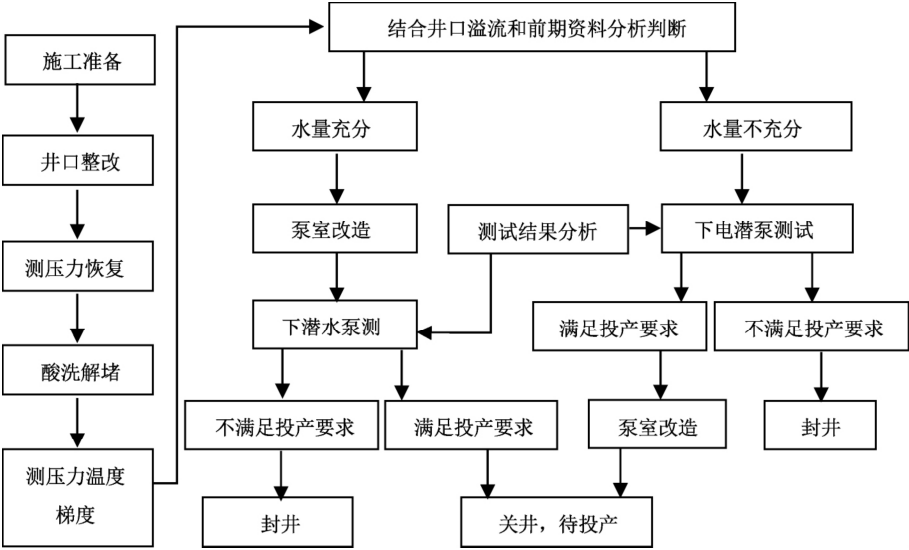


图 5 改造及测试流程框图

Fig.5 Schematic diagram of transformation and testing process

3.2.1 酸液体系优选

对 3 350.05~3 354.05 m 段岩心进行不同酸液体系的溶蚀实验,分别为盐酸体系、土酸酸液体系、磷酸体系和有机酸酸液体系,实验温度为 90℃,反应时间 2 h(表 4)。

表 4 马古 6 井岩屑溶蚀数据表

Table 4 Data sheet of debris dissolution for well Magu6		
酸液体系	酸液	溶蚀率/%
盐酸体系	15% HCl	65.9
	10% HCl	65.2
	8% HCl	63.0
土酸酸液体系	12% HCl+3% HF	53.3
	12% HCl+1.5% HF	65.2
	10% HCl+1% HF	66.7
缓速酸体系	12% HCl+3% HF+5% 缓速酸	68.8
	10% HCl+1% HF+5% 缓速酸	68.5
	12% HCl+1.5% HF+5% 缓速酸+2% HEDP	67.4
有机酸酸液体系	10% HCl+1% HF+5% 缓速酸+1.5% HEDP	67.7
	10% HCl+10% HCOOH	63.2
	10% HCl+10% HAc	63.5
	15% HCOOH	60.0
	15% HAc	39.4

以上各酸液体系反应时间均在 1 h 以上。其中,盐酸体系反应速度较快,无缓速作用;土酸体系反应产物中有 CaF₂ 生成,易堵塞地层,造成二次伤害;加入缓速酸后,缓速 20 min,而加了 HEDP 后,缓速可达 45 min,但是溶蚀率过高,易造成地层垮塌。因此,又进行了有机酸体系的溶蚀实验。该体系持续反应时间达 100 min,时间较长,缓速效果较好。综合考虑溶蚀率、缓速效果及成本后,选择溶蚀率

适中的 15% HAc 体系。

3.2.2 缓蚀剂筛选及配伍性实验

考察 3 种水溶性酸化缓蚀剂在 15% HAc 中的静态缓蚀效果(表 5)。

表 5 缓蚀剂结果

Table 5 Corrosion inhibitor result

缓蚀剂	缓蚀剂浓度/%	腐蚀速率/(g·(m ² ·h) ⁻¹)
A	0.5	18.97
	1.0	13.83
	1.5	15.67
B	0.5	1.16
	1.0	0.76
	1.5	1.27
C	0.5	0.88
	1.0	0.57
	1.5	0.96

从表 5 可以看出,缓蚀剂 A 腐蚀速率过大,达不到现场使用要求;缓蚀剂 B、C 的静态缓蚀效果均较好。

综合考虑后选用 0.5% 缓蚀剂(B、C)在室温及 90℃ 下进行配伍性实验(表 6、图 6),得出缓蚀剂 C 在高温下易产生油状物堵塞地层,与体系不配伍,最终优选 B 缓蚀剂。

表 6 配伍性实验结果

Table 6 Compatible experimental results

酸液主体配方	缓蚀剂	实验现象
15% HAc + 0.5% 缓蚀剂 + 黏土稳定剂 + 表面活性剂 + 铁离子稳定剂	B	室温, 24 h 澄清, 无浑浊
		90℃, 4h 无明显变化, 澄清
	C	室温, 24 h 澄清, 无浑浊
		90℃, 4h 浑浊, 底部有棕黄色油状物, 放置 1 h 冷却后恢复澄清

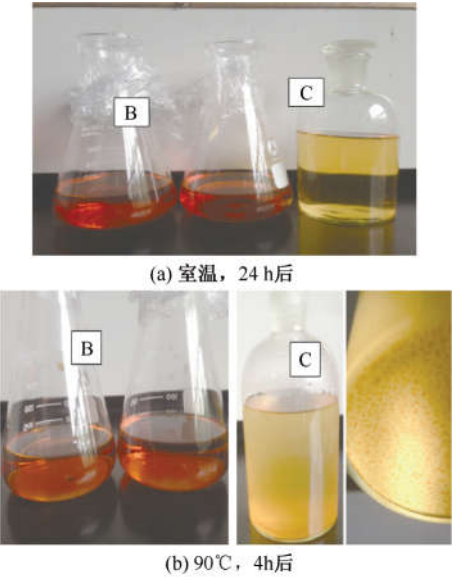


图 6 酸液主体配方配伍性实验

Fig.6 acid body formula compatibility experiments

依据马古 6 井室内敏感性评价实验、水样分析、酸液体系和添加剂的筛选结果,最终选用配方为 15% HAc+0.5%缓蚀剂 B+黏土稳定剂+表活剂+铁离子稳定剂。结合现场试水层位,决定对该井奥陶系裸眼层段 3 148.0~3 550.0 m 试水前进行酸洗解堵处理,以达到增加试水层产液量的目的。各种处理剂用量设计见表 7。

表 7 各种处理剂用量设计

Table 7 Dosage design of various processing agents

液体名称	用量/ m^3	配制
主体酸	10	缓速酸,表活剂,铁离子稳定剂,有机溶剂,缓蚀阻垢剂,防膨剂。
后置液	11	1%~2%的活性水

3.3 测试方案

(1)开展静压测试,获取井筒纵向压力及温度梯度剖面。下入测试工具串至 3 500.0 m,按测试要求录取压力温度参数。钢丝作业标准工具自上而下为:钢丝绳帽+ $\phi 42\text{ mm}\times 0.4\text{ m}$ 钨钢加重杆+ $\phi 36\text{ mm}\times 0.55\text{ m}$ 压力计+导锥。

(2)静压测试完成后,下电泵机组+压力计测试管柱,开展前期试采及试水测试。如图 7 所示,试水管柱组合自上而下为: $\phi 88.9\text{ mm}$ 油管+压力计托筒+变扣接头+潜水电泵(500 m)。

(3)试水方式采用回压试井+压力恢复试井,测试过程中采用井底压力计监测井底压力。地面远程连续监控温度、流量变化。

(4)井口条件具备时,测试过程利用全自动液面检测仪监测整个过程环空液面变化。通过环空液

面监测,获取不同工作制度下液面深度,实时了解不同工作制度下压力变化,计算井底流动压力。

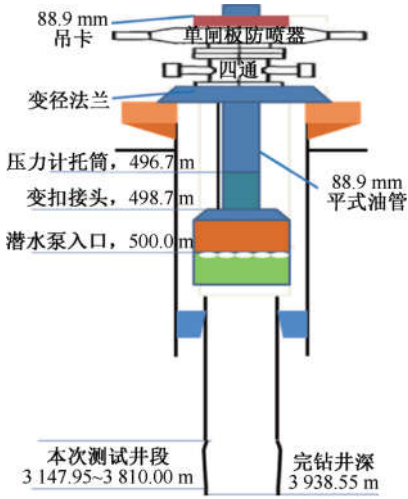


图 7 回压试井测试管柱示意图

Fig.7 A schematic diagram of a test string for back-pressure testing

4 现场施工

根据上述分析结果,进行现场施工,涉及到的关键技术工艺包括对井口、井筒以及产水层的改造等。

4.1 井口整改

电气焊配合切割表层套管,将技术套管固定在表层套管正中心,在技术套管上焊接 177.8 mm 变 139.7 mm 套管短节。装 KY65-21 井口,实测油补距 5.36 m。安装 SFZ18-21 手动防喷器。

4.2 压力恢复测试

配合测压力:压力恢复测试结果,压力值 0.1 MPa、温度值 12.2 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.3 酸洗

酸洗施工压力变化曲线如图 8 所示。

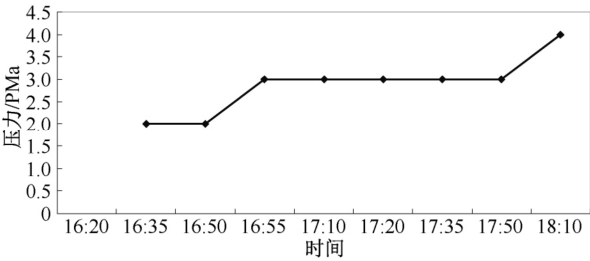


图 8 马古 6 井酸洗解堵现场施工曲线

Fig.8 Site operation curve of acid washing and plugging in well Magu 6

下入 $\phi 90\text{ mm}$ 尖钻头 $\times 0.23\text{ m}+\phi 73\text{ mm}$ 梯形扣

油管+油管挂。管鞋深度 3 549.43 m。清水 60 m³ 反洗井至进、出口水质一致;正替前置酸 10 m³,正替清水 11 m³,泵压 3 MPa,排量 300 L/min,关井反应 1.5 h;最后,再用清水 60 m³ 反洗井至进、出口一致。

4.4 测井

配合测井井段 0~3 500.0 m,测试压力温度(等措施 24 h)。

4.5 下电泵

下 $\phi 114$ mm ZD-100 型电机组+储存式电子压力计。电机深度 501.29 m。

4.6 抽水测试

2015 年 12 月 28 日 8:00-30 日 8:00 测量温度和压力,累计试抽 57 m³,温度 33.7℃。12 月 30 日 8:00-2016 年 1 月 1 日 8:00 测量温度和压力,累计试抽 195.16 m³,温度 61.4℃。电泵试水情况如图 9 所示。

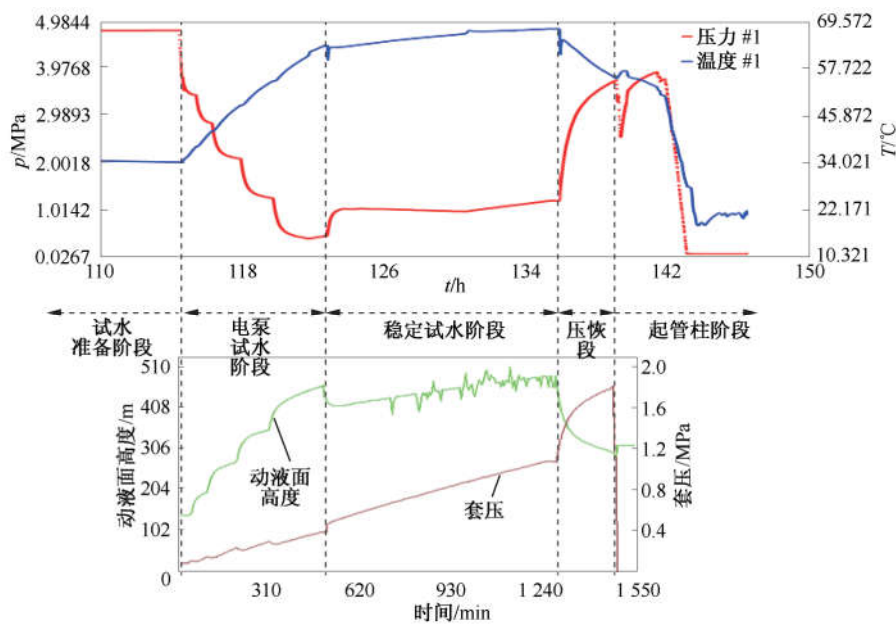


图 9 试水数据实测曲线
Fig.9 Practical test curve of water test

5 结论

(1)废弃井改造前应做好区域地热资源和水文地质评价,需要对井身条件、水层位置和水量水温以及回灌率、改造方案可行性、施工成本等进行论证评估。

(2)通过室内敏感性评价实验、水样分析、酸液体系和添加剂的筛选结果,制定了酸洗解堵方案;配套了流量、压力、温度及动液面测试技术,形成一套较完善的地热井测试方案,对今后废弃井改造成地热井起到了指导意义。

(3)通过对马古 6 井的改造,证明了废弃井开发成地热井在技术上完全可行,加之成本低、效益高,市场前景广阔。

(4)在完成废弃井改造之后,还需要进行回灌试验以及地热井产能评价,以实现地热井开发的可持续性。

致谢:感谢“废弃井改造成地热井关键技术研究”提供技术支持,感谢中原油田分公司工程技术研究院同意该文发表。

参考文献

[1] 环衍忠,王学工,王世壮,等. 废弃油井改造成地热井的可行性[A].见:刘久荣.北京地热国际研讨会论文集[C].北京:地质出版社,2002:381-385.
HUAN Yanzhong, WANG Xuegong, WANG Shizhuang *et al.* Feasibility of reforming waste oil wells into geothermal wells[A].In: Liu Jiurong.Proceedings of the 2002 Beijing International Geothermal Symposium [C]. Beijing: Geological Publishing House, 2002:381-385.

[2] 马伟斌,龚宇烈,赵黛青,等. 我国地热能开发利用现状与发展[J].中国科学院院刊, 2016,31(2):199-207.
MA Weibin, GONG Yulie, ZHAO Daiqing *et al.* Geothermal energy exploitation,utilization, and its development trend in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016,31(2):199-207.

[3] 刘澍,刘铁敏.油区地热资源的开发和利用研究[J].当代化工,2014,43(11):2370-2373.

- LIU Shu, LIU Tiemin. Development and utilization of geothermal resources in oil regions[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43(11): 2370-2373.
- [4] 李亚琛, 段晨阳, 郑秀华. 高温地热钻井的最佳实践[J]. 地质与勘探, 2016, 52(1): 173-181.
- LI Yachen, DUAN Chenyang, ZHENG Xiuhua. Best practices for high-temperature geothermal drilling [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(1): 173-181.
- [5] DAVIS A P, MICHAELDES E E. Geothermal power production from abandoned oil wells [J]. Energy, 2009, 34(7): 866-872.
- [6] CHENG W L, LI T T, NIAN Y L *et al.* Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells [J]. Energy, 2013, 59(C): 248-254.
- [7] TOMASZ L, GONET A, GRASELA A. The wells of the Lipinki oil field in the aspect of borehole heat exchangers retrained [J]. Acta Montanistica Slovaca, 2006, 11 (special issue 1): 178-182.
- [8] BUNDSCHUH J. Geothermal energy from oil and gas wells [J]. Employment Relations Today, 2016, 36(4): 45-52.
- [9] YANG Yuxin, LIN Jianwang, CHEN Wanqing *et al.* Research of Tanggu geopressurized formation geothermal field [C]. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- [10] 甄华, 莫中浩. 报废油井改造成地热井的方法[J]. 煤气与热力, 2007, 27(1): 47-50.
- ZHEN Hua, MO Zhonghao. Methods for transforming a-bandoned oil well into geothermal well [J]. Gas & Heat, 2007, 27(1): 47-50.
- [11] 阚长宾, 亓发庆, 于晓聪, 等. 利用废弃油井开发地热能[J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 90-92.
- KAN Changbin, QI faqing, YU Xiacong *et al.* Exploiting geothermal energy from the abandoned well [J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(1): 90-92.
- [12] 宋恩武, 李岚, 王少娟, 等. 将废弃油(气)井改造为地热井的方法[J]. 地热能, 2006(1): 38-40.
- SONG Enwu, LI Lan, WANG Shaojuan *et al.* Method of transforming abandoned oil (gas) well into geothermal well [J]. Geothermal Energy, 2006(1): 38-40.
- [13] 宋恩武, 李岚. 将弃用油(气)井及注水井改造成地热井的方法简介[J]. 山东国土资源, 2005, 21(6-7): 38-39, 44.
- SONG Enwu, LI Lan. Brief introduction of the method of transforming abandoned oil wells and injection wells into geothermal wells [J]. Shandong Land and Resources, 2005, 21(6-7): 38-39, 44.
- [14] 刘均荣, 于伟强, 李荣强. 油田地热资源开发利用技术探讨[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(5): 68-73.
- LIU Junrong, YU Weiqiang, LI Rongqiang. Discussion on technology for development and utilization of geothermal resources in oilfields [J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(5): 68-73.
- [15] WIGHT N M, BENNETT N S. Geothermal energy from a-bandoned oil and gas wells using water in combination with a closed wellbore [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 908-915.
- [16] 卜宪标, 马伟斌, 黄远峰. 应用废弃油气井获得地热能[J]. 热能动力工程, 2011, 26(5): 621-625.
- BU Xianbiao, MA Weibin, HUANG Yuanfeng. Geothermal energy obtained from obsolete oil and gas production wells [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(5): 622-625.
- [17] 董秋生, 黄贤龙, 郎振海, 等. 废弃油井改造为地热井技术分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 18-21.
- DONG Qiusheng, HUANG Xianlong, LANG Zhenhai *et al.* Technical analysis on transforming abandoned oil well into geothermal well [J]. Exploration Engineering (Rock&Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(6): 18-21.
- [18] 王宝玉. 河南省地热资源开发利用现状及展望[J]. 地质与勘探, 1999, 35(2): 126-129.
- WANG Baoyu. Development of gerthermal resources in Henan [J]. Geology and Exploration, 1999, 35(2): 126-129.
- [19] 曹侃. 东濮凹陷马厂地区构造与油气关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- CAO Kan. Research on structures and its relations to hydrocarbon in Machang region [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [20] 梁富康, 钱荫, 阎耀成, 等. 东濮凹陷马厂地区构造演化与油气聚集规律[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 195-199.
- LIANG Fukang, QIAN Yin, YAN Yaocheng *et al.* Study of tectonic evolution and rule of oil-gas accumulation in Machang area in Dongpu Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(6): 195-199.
- [21] 王培义, 李海泉, 刘金侠, 等. 东濮凹陷马厂地区废弃井改造条件分析——以马古6井为例[J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 171-178.
- WANG Peiyi, LI Haiquan, LIU Jinxia *et al.* Analysis of reform conditions for abandoned wells in the Machang area, Dongpu depression: An example of the Well Magu 6 [J]. Geology and Exploration, 2017, 53(1): 171-178.

编辑 王 军

第一作者简介: 周晓奇, 男, 1983年3月出生, 硕士, 工程师, 2010年毕业于中国石油大学(华东)地质工程专业, 现主要从事修井、废弃井封井工艺技术研究工作。电话: 0393-4898671, 13523938562; Email: zxqupe@163.com。通信地址: 河南省濮阳市华龙区中原路东段408号, 邮政编码: 457001。