

# 酸化液压技术在地热增产中的应用分析

王 平, 宗振海, 李振杰, 徐云鹏, 田光辉

(天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

**摘 要:**阐述了酸化液压技术在天津地热增产中的应用和取得的宝贵经验。得出的结论为:酸化液压工艺可以视地质条件应用于以碳酸盐热储层为目的层的地热井增产施工中,是一项值得在地热开发中推广的技术。在应用该技术前,应重视对基础地质资料的分析研究,特别是酸化前抽水试验资料的分析,弄清酸化液压技术应用的前提和必要条件,以达到理想的效果。

**关键词:**酸化液压技术;碳酸盐热储层;地热开发;地质条件;抽水试验

**中图分类号:**TE249 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)10-0030-04

**Application Analysis on Acidification and Crushing Technology for Increasing Geothermal Yield/WANG Ping, ZONG Zhen-hai, LI Zhen-jie, XU Yun-peng, TIAN Guang-hui** (Tianjin Geothermal Exploration and Development Designing Institute, Tianjin 300250, China)

**Abstract:** This article elaborated the valuable experience with two examples that the acidification and crushing technology can be used to increase geothermal exploit amount. Acidification and crushing technology is worth to spread in geothermal exploration, which can be used according to geological conditions in improving geothermal yield construction in the carbonate geothermal reservoirs while they are as the target layers. Before the application, attention should be paid to the analysis and study on the basic geological data, especially on the analysis on pumping test data before acidification; application prerequisite of acidification and crushing technology also should be made clear in order to achieve the ideal effects.

**Key words:** acidification and crushing technology; carbonate geothermal reservoir; geothermal development; geological condition; pumping test

酸化液压(也叫酸化压裂)技术是保持油田高产、稳产的有效措施之一。近年来,天津地热在开发奥陶系等基岩地热井中遇到了完井后产量低的情况,采用酸化液压技术对地热井增产取得了良好的效果和宝贵的施工经验。

## 1 酸化液压技术的基本原理

地面高压压裂泵车以高于储层能吸收的速度,先从井的套管或油管向井下注入冻胶液体,这样高的注入速度使井筒内压力增高,一直达到克服地层的地应力和岩石张力强度,这时处理层段岩石开始出现破裂形成裂缝或者扩大原有微小裂隙;而后泵入酸液,在处理层段将形成的裂隙酸蚀成沟槽。注酸压力高于热储层破碎压力,酸液同时发挥化学作用和水力作用来扩大、延伸、压裂和沟通裂缝,形成延伸远、流通能力高的渗流通道<sup>[1]</sup>。酸化液压后,这些沟槽仍然保持张开具有足够的导流能力及足够长度的裂缝,扩大了有效井径。根据承压水井 Dupuit 公式<sup>[2]</sup>,地热井的产水量与井的有效井径成正比,

当酸化液压扩大了有效井径后,产量会与之提升。

$$Q = 2.73KM_s_w / \lg \frac{R}{r_w} \quad (1)$$

式中:  $Q$ ——抽水量,  $m^3/d$ ;  $K$ ——含水层渗透系数,  $m/d$ ;  $M$ ——热储层有效厚度,  $m$ ;  $s_w$ ——稳定降深,  $m$ ;  $R$ ——抽水影响半径,  $m$ ;  $r_w$ ——井半径,  $m$ 。

根据近年来天津地热井的施工案例,酸化液压技术作为基岩地热井一项有效的增产技术手段,可以视地质条件用于地热完井增产中。笔者以 2 个实例介绍一下酸化液压技术在地热井中的应用情况,总结其中取得的经验。

## 2 天津市南开区中心城上城小区 NKR-24D 地热井完井增产施工

### 2.1 地热井简介

NKR-24D 井是我院施工的一眼古生界奥陶系地热井,井深为 2010.36 m,井身结构为三开,裸眼成井(见图 1)。

### 2.2 构造与地质情况

收稿日期:2011-02-26

作者简介:王平(1982-),男(汉族),黑龙江齐齐哈尔人,天津地热勘查开发设计院助理工程师,水文与水资源工程专业,从事水文地质、工程地质和热储工程研究工作,天津市河东区卫国道 189 号, wangping830114@163.com。

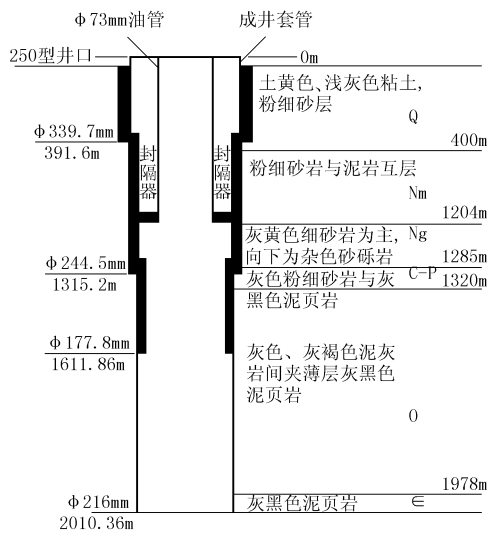


图1 NKR-24D 井成井结构及酸化管柱安装示意图

NKR-24D 井处于Ⅲ级构造单元沧县隆起的次一级构造单元双窑凸起北部。双窑凸起位于沧县隆起高部位,北起海河断裂,南至静海,西以天津断裂为界与大城凸起相邻,东以白塘口西断裂为界与白塘口凹陷相接。为一个走向北北东,倾向北西西向的单斜构造,地层倾角约 13°,基岩顶界地层由西向东依次发育古生界~中新元古界,其间古生界~青白口系有不同程度的缺失;新生界馆陶组局部缺失。NKR-24D 井钻遇新生界第四系、新近系明化镇组、馆陶组、古生界石炭-二叠系、奥陶系和寒武系地层(见图 1)。

2.3 热储层情况

NKR-24D 井完井热储层分布在古生界奥陶系,顶界埋深 1320 m,以灰白色、灰褐色灰岩为主,夹少量灰黑色灰岩,厚度为 611 m。完井后测井成果显示该井Ⅱ类裂隙有 2 层,厚度 14.50 m,Ⅲ类裂隙有 5 层,厚度 35.70 m,一共占储层总厚度的 7.6%,而且Ⅲ类裂隙在未酸化时基本不具有产水能力,所以有效裂隙仅占 2.2%,孔隙度 1.94%~5.78%,渗透率  $(0.21 \sim 1.75) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,表明该井天然状态下层间连通性不好,富水性较差<sup>[3]</sup>(见表 1)。

表1 NKR-24D 井测井解释成果表(三开)

| 起止深度<br>/m    | 声波时<br>差/( $\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 孔隙<br>度/% | 渗透率<br>/( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) | 泥质<br>含量/% | 井温<br>/℃ | 解释结论  |
|---------------|--|-----------|--|------------|----------|-------|
| 1379.2~1388.9 | 180.66   | 3.80      | 0.32                                       | 2.65       | 55.1     | Ⅲ类裂缝层 |
| 1603.5~1609.2 | 191.32   | 4.15      | 0.52                                       | 6.2        | 57.5     | Ⅲ类裂缝层 |
| 1623~1629.1   | 191.78   | 5.78      | 1.75                                       | 2.89       | 57.5     | Ⅱ类裂缝层 |
| 1641~1649.4   | 182.18   | 1.94      | 0.12                                       | 6.56       | 58.8     | Ⅱ类裂缝层 |
| 1725.8~1735.7 | 179.61   | 1.55      | 0.11                                       | 6.99       | 59.9     | Ⅲ类裂缝层 |
| 1831.7~1837.9 | 174.02   | 1.49      | 0.10                                       | 4.71       | 62.1     | Ⅲ类裂缝层 |
| 1849.1~1853.3 | 173.65   | 1.64      | 0.10                                       | 3.82       | 62.2     | Ⅲ类裂缝层 |

2.4 完井试水情况

本井完井后利用空压机进行了 24 h 的连续洗井作业,洗井作业后水清砂净进行了历时 9 h 的抽水试验(利用 4 in 深井泵下深 148 m),待水位基本稳定后测得水量 47.33 m<sup>3</sup>/h,水温 54 ℃,动水位 144.45 m,水位变化幅度 3~7 cm/h。按照天津地区地热单井资源评价技术要求,水位稳定标准为:每小时观测水位波动 5~8 cm<sup>[4]</sup>,所以本次试水达到了稳定(见表 2)。

表2 NKR-24D 井完井试水数据表

| 时间            | 水温/℃ | 水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 动水位/m         | 动水位变化值/m |
|---------------|------|---------------------------------------|---------------|----------|
| 22:40<br>(开泵) | 39   | 72.67                                 | 62.5<br>(静水位) |          |
| 23:03         | 40   | 48.10                                 | 143.8         | 81.3     |
| 23:12         | 42   | 47.33                                 | 144.18        | 0.38     |
| 23:22         | 42   | 47.33                                 | 144.08        | -0.1     |
| 00:00         | 44   | 47.33                                 | 144           | 0.08     |
| 01:00         | 53   | 47.33                                 | 144           | 0        |
| 02:00         | 54   | 47.33                                 | 144.1         | 0.1      |
| 03:00         | 54   | 47.33                                 | 144.27        | 0.17     |
| 04:00         | 54   | 47.33                                 | 144.34        | 0.07     |
| 05:00         | 54   | 47.33                                 | 144.39        | 0.05     |
| 06:00         | 54   | 47.33                                 | 144.42        | 0.03     |
| 07:00         | 54   | 47.33                                 | 144.45        | 0.03     |

2.5 酸化液压施工

为提高该井的产能,对该井实施了酸化液压增产,施工步骤分述如下。

2.5.1 室内实验及选液

在进行酸化液压之前,对处理层进行了室内物理化学性质的实验分析,通过录井岩屑真实地了解地层及流体的物理化学性质,选择酸化液压措施材料。尽可能地模拟井下压力、温度的条件来选择与之相容性(又称配伍性)好的酸化液压措施液体,对产层进行有效的改造,从而达到产层尽可能少的伤害条件下,增加尽可能多的产量。室内实验数据见表 3。

表3 NKR-24D 井岩屑溶蚀率检测 results 表

| 序号 | 井深/m | 溶蚀率/% | 序号 | 井深/m | 溶蚀率/% |
|----|------|-------|----|------|-------|
| 1  | 1618 | 91.66 | 4  | 1850 | 86.38 |
| 2  | 1728 | 84.04 | 5  | 1910 | 78.10 |
| 3  | 1842 | 82.50 | 6  | 1942 | 69.63 |

注:酸液浓度 20% HCl,溶蚀 1 h,温度 40 ℃。

由表 3 数据可见:用 20% HCl 溶液,在 40 ℃下岩石的溶蚀率都比较高,因此选用 20% HCl 溶液作为处理液。

根据图 2 总表皮系数变化模拟结果,泵入酸量达到 100 m<sup>3</sup> 以后,随着酸量的增大,裂隙总表皮溶蚀趋

向 0。从经济成本及预期效果考虑选用 20% HCl 100 m<sup>3</sup> 用于本次酸化液压作业。

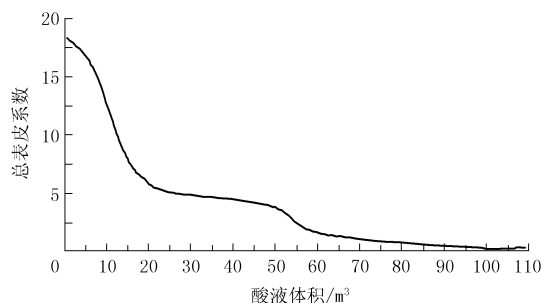


图 2 总表皮系数变化模拟结果

## 2.5.2 主要施工工艺及参数

- (1) 酸化工艺: 盐酸酸压工艺。
- (2) 挤注方式: 正挤。
- (3) 挤注压力:  $\leq 20$  MPa。
- (4) 排酸方式: 汽化水排酸。

## 2.5.3 施工用料(见表 4、表 5)

表 4 施工液量配置表

| 序号 | 施工液名称   | 用量/m <sup>3</sup> | 配 置  |
|----|---------|-------------------|--|
| 1  | 施工管柱完成液 | 20                | 600 kg NH <sub>4</sub> Cl + 20 m <sup>3</sup> 清水   |
| 2  | 盐酸溶液    | 100               | 65 t 31% HCl + 2.0 t 缓蚀剂 + 2.0 t 助排剂 + 1.0 t 铁离子稳定剂 + 2.0 t 防膨剂 + 40.0 m <sup>3</sup> 清水 |
| 3  | 顶替液     | 14                | 14 m <sup>3</sup> 清水   |

表 5 备料名称及数量表

| 名称                 | 规格  | 主要技术指标          | 用量                  |
|--------------------|-----|-----------------|---------------------|
| 31% 盐酸             | 工业品 | 总酸度 $\geq 31\%$ | 65 t                |
| PH-101 缓蚀剂         | 工业品 |                 | 2.0 t               |
| PPZ-1 助排剂          | 工业品 |                 | 2.0 t               |
| PWT-1 铁离子稳定剂       | 工业品 |                 | 1.0 t               |
| PH-303 防膨剂         | 工业品 |                 | 2.0 t               |
| NH <sub>4</sub> Cl | 工业品 |                 | 0.6 t               |
| 清水                 |     |                 | 60.0 m <sup>3</sup> |

## 2.5.4 施工工序

### 2.5.4.1 井口安装

井口安装 250 型采油树, 并加固, 采油树四周用钢丝绳固定。

### 2.5.4.2 施工管柱完成

如图 1 所示, 完成酸化施工管柱, 封隔器下深 1200 m( 错开套管节箍位置), 封隔器以下替满 3% NH<sub>4</sub>Cl 液体, 座封封隔器。

### 2.5.4.3 配液

配制处理液混合均匀, 酸液用水为清水。

### 2.5.4.4 地面管线试压

接好地面施工管线, 高压管汇清水试压 25 MPa,

不刺不漏为合格。

### 2.5.4.5 打平衡

施工时, 套管打平衡  $\leq 5$  MPa。

### 2.5.4.6 泵酸

按施工泵注程序注酸( 按定压方式施工), 泵注程序如表 6 所示。

表 6 施工程序表

| 作业内容 | 施工液名称 | 数量 /m <sup>3</sup> | 泵压 /MPa   | 排量 /(m <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup> ) | 需用时间 /min |
|------|-------|--------------------|-----------|---|-----------|
| 正挤   | 盐酸溶液  | 100                | $\leq 20$ | 0.5 ~ 1.0                                 | 100 ~ 200 |
| 正挤   | 清水    | 12.0               | $\leq 20$ | 0.5 ~ 1.0                                 | 12 ~ 24   |

### 2.5.4.7 排液

(1) 放喷排液, 控制油嘴放喷( $\phi 6 \sim 11$  mm 油嘴), 排出残酸浓度  $< 0.2\%$ ;

(2) 放喷结束后, 采用汽化水排液。

酸化前后洗井、抽水对比见表 7。采取酸化措施后该井洗井上水时间与上水间隔明显变短, 立柱泵压变化幅度减小, 说明酸化后有效打通了裂隙, 使得该井补给条件畅通, 补给量增加。实际抽水情况也证明了这一点, 该井的出水量由 47.33 m<sup>3</sup>/h 提高到 119.33 m<sup>3</sup>/h, 水温上升到 57 °C, 动水位提高到 73.67 m。

表 7 酸化前后洗井、抽水情况对比表

| 项目  | 抽水情况  |        |  | 洗井情况   |          |          |           |
|-----|-------|--------|--|--------|----------|----------|-----------|
|     | 静水位/m | 动水位/m  | 水量/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> ) | 水温 /°C | 上水时间/min | 时间间隔/min | 泵压变化/MPa  |
| 酸化前 | 62.5  | 144.45 | 47.33                                  | 54     | 13 ~ 15  | 60 ~ 70  | 5.2 ~ 1.7 |
| 酸化后 | 70.2  | 73.67  | 119.3                                  | 57     | 9 ~ 10   | 4 ~ 28   | 5 ~ 4     |

## 3 天津市津南区小站镇 JNR-09 地热井酸化液压经验总结

JNR-09 井构造位置处于沧县隆起东部的小韩庄凸起上的北闸口次凹陷中, 万家码头地热田的北东部。小韩庄凸起在平面上呈北东(NNE)向展布, 在空间上为一个南高北低的断块状剥蚀孤山, 东部、南部陡峭, 北部、西部平缓。凸起最高部位在万家码头一带, 基岩隐伏深度在 900 m 左右。凸起东侧以沧东断裂为界与黄骅拗陷相接, 该井处于沧东断裂带上。

JNR-09 井身结构为四开, 裸眼完井, 完钻井深为 2403.98 m, 热储层为奥陶系灰岩。本井储层顶界埋深 1858 m, 揭露厚度 545.98 m( 未穿), 测井解释成果( 完井) 见表 8。根据测井解释, 该井有 I 类裂缝层 2 层, 总厚度 20.90 m, II 类裂缝层 4 层, 厚度 65.10 m, III 类裂缝层 4 层, 总厚度 38.20 m。I、II

类裂缝层总厚度占裸眼段长度的 16.83%。含水层孔隙度为 0.40%~5.37%,渗透率为  $(0.10 \sim 0.85) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,泥质含量为 3.50%~13.91%<sup>[5]</sup>。

表 8 JNR-09 井测井解释成果表(四开)

| 起止深度/m          | 厚度/m  | 孔隙度/% | 渗透率/ $(\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$ | 泥质含量/% | 井温/ $^{\circ}\text{C}$ | 解释结论  |
|-----------------|-------|-------|---------------------------------------|--------|------------------------|-------|
| 1896.40~1908.60 | 12.20 | 2.85  | 0.11                                  | 12.75  | 76.0                   | Ⅲ类裂缝层 |
| 1916.30~1927.70 | 11.40 | 1.48  | 0.10                                  | 6.58   | 76.3                   | Ⅱ类裂缝层 |
| 1932.60~1947.00 | 14.40 | 1.37  | 0.10                                  | 6.47   | 74.9                   | Ⅰ类裂缝层 |
| 1953.00~1961.70 | 8.70  | 1.52  | 0.10                                  | 6.31   | 74.8                   | Ⅱ类裂缝层 |
| 1975.30~1981.80 | 6.50  | 5.37  | 0.85                                  | 5.70   | 75.5                   | Ⅰ类裂缝层 |
| 1995.50~2030.80 | 35.30 | 1.64  | 0.10                                  | 6.97   | 76.3                   | Ⅱ类裂缝层 |
| 2057.30~2067.00 | 9.70  | 0.40  | 0.10                                  | 3.50   | 77.3                   | Ⅱ类裂缝层 |
| 2217.80~2232.30 | 14.50 | 1.50  | 0.10                                  | 6.81   | 81.3                   | Ⅲ类裂缝层 |
| 2236.80~2242.40 | 5.60  | 0.76  | 0.10                                  | 7.73   | 81.7                   | Ⅲ类裂缝层 |
| 2252.10~2258.00 | 5.90  | 5.15  | 0.71                                  | 13.91  | 82.1                   | Ⅲ类裂缝层 |

据此可以看出该井岩溶裂隙发育,孔隙度大、渗透率大。

测井后对本井进行了抽水试验。可以看出,JNR-09 井的流量和水位是不稳定的,流量后期逐渐减小,水位持续下降(见图 3)。

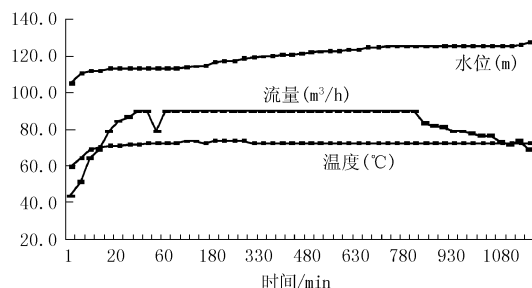


图 3 JNR-09 井酸化前抽水试验历时曲线

在这种情况下,采用与 NKR-24D 井相似的酸化液压施工工艺,对本井进行了增产施工。施工完成后又对本井进行了抽水。

可以看出酸化后的抽水试验具有与酸化前相同的特征:动水位和流量不能达到稳定,具有持续下降的特点。酸化后水量看似有所增长,但这是以动水位下降为条件的,单位降深涌水量并不会增加(见图 4)。

通过两次抽水试验分析,造成此次酸化液压失败的原因为:JNR-09 井目的层处于一个相对封闭的地质环境中,该井可能处于一个四周均为隔水边界的地质构造带中央,或者很可能该井四周区域奥陶系地层有所缺失,致使该井四周没有导水通道,所以没有良好的侧向补给来源。本井两次抽水消耗的只是奥陶系热储层的静储量,这是有限的“盆中

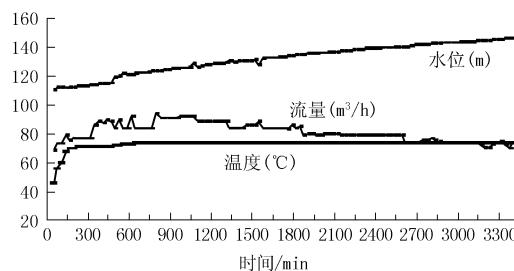


图 4 JNR-09 井酸化后抽水试验历时曲线

水”,所以抽水时水位、流量会持续下降,导致了地热井产量无明显提升。

#### 4 酸化液压技术适应性分析

从上述 2 个例子可以看出,应用酸化液压技术的前提条件是热储层为碳酸盐岩地层,同时储层应发育一定的裂隙。但是,仅仅从裂隙发育情况看并不能决定酸化液压的效果。比如与 NKR-24D 井相比,虽然 JNR-09 井热储层裂隙发育情况要好,其Ⅰ类裂隙比 NKR-24D 井多 20.90 m,Ⅱ类裂隙多 50.60 m,Ⅲ类裂隙基本相等,但其酸化液压效果并不理想。原因就是忽略了对于 JNR-09 井基础地质资料的分析,特别是对酸化前抽水试验资料的认识不够,导致了增产的失败。所以在酸化液压时单考虑测井解释裂隙发育情况,而忽略基础地质条件,也不能达到令人满意的增产结果。

#### 5 结语

(1)实践证明,酸化液压工艺可以视地质条件应用于对基岩裂隙型地热井的增产施工中,是一项值得在地热开发中推广的技术。该技术可以应用于天津市以碳酸盐热储层为目的层的地热井完井增产中。

(2)应用酸化液压技术之前,应重视对基础地质资料的分析研究,特别是酸化前抽水试验资料的分析,弄清酸化液压技术应用的前提条件和必要条件,只有这样才能达到理想的结果。

#### 参考文献:

- [1] 王连成,李明朗,程万庆,等.酸化压裂方法在碳酸盐岩热储层中的应用[J].水文地质工程地质,2010,(5).
- [2] 薛禹群.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1997.64.
- [3] 王平,张连弟.天津市南开区中新城上城小区 NKR-24D 地热井完井报告[R].天津:天津地热勘查开发设计院,2009.
- [4] 天津市国土资源和房屋管理局.地热资源管理法规文件汇编[S].2007.
- [5] 王继革,林圣明.天津市津南区小站镇 JNR-09 地热井完井报告[R].天津:天津地热勘查开发设计院,2009.