

地热井酸化压裂施工措施评价系统

郑桐

中国石化河南油田分公司石油工程技术研究院 河南南阳 473132

通讯作者: Email: 39410159@qq.com

项目支持: 中国石油化工集团有限公司项目“灰岩热储重点区块酸压技术研究”(2018JP17018)

引用: 郑桐. 地热井酸化压裂施工措施评价系统[J]. 油气井测试, 2022, 31(6): 34-39.

Cite: ZHENG Tong. Evaluation system for construction measures of acid fracturing in geothermal wells[J]. Well Testing, 2022, 31(6): 34-39.

摘要 地热储层大部分为致密的砂岩储层或裂缝性碳酸盐岩储层,岩性致密,孔隙度小,渗透率极低,需要借助自然裂缝或人工压裂打开流动通道。采用地热井酸压措施评价系统 Q-S 模型确定地热井产量与动液面下降关系,计算井底最佳压差和最大产水量,提高了地热井措施预判依据的准确性;根据热平衡方程,计算最大产水量的有效供热面积,为地热井酸化压裂施工效果评价提供定量数据。采用该评价系统对河南濮阳、山西太原、河北辛集等地热井进行施工评价,依据施工投入费用和产出效益计算出投资回收期、投入产出比等经济评价指标,为地热井酸化压裂后投产泵深及产水量的确定提供了合理依据。

关键词 Q-S 模型;地热井;酸化压裂;致密砂岩;投入产出比;投资回收期

中图分类号: TE357

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.06.007

Evaluation system for construction measures of acid fracturing in geothermal wells

ZHENG Tong

Sinopec Henan Oilfield Branch Petroleum Engineering Technology Research Institute, Nanyang, Henan 473132, China

Abstract: Most geothermal reservoirs are tight sandstone or fractured carbonate reservoirs with tight lithology, small porosity and extremely low permeability, which require natural fractures or artificial fracturing to open the flow channel. The Q-S model of the acid pressure measure evaluation system of geothermal well was used to determine the relationship between the production of geothermal well and the drop of dynamic fluid level, calculate the best pressure difference at the bottom hole and calculate the maximum water production, which improved the accuracy of the prediction basis of geothermal well measure. According to the heat balance equation, the effective heating area of maximum water production is calculated, which provides quantitative data for the evaluation of acidizing fracturing construction effect of geothermal Wells. The evaluation system is used to evaluate the construction of geothermal Wells in Henan Puyang, Shanxi Taiyuan and Hebei Xinji, etc. According to the construction input cost and output benefit, the payback period, input output ratio and other economic evaluation indexes are calculated, which provides a reasonable basis for the determination of pump depth and water production after acidizing fracturing of geothermal Wells.

Keywords: Q-S mode; geothermal well; acid fracturing; tight sandstone; input-output ratio; payback period

地热资源已成为新能源的一个重要组成部分。由于地热储层大部分为致密的砂岩储层或裂缝性碳酸盐岩储层,岩性致密,孔隙度小,渗透率极低,需要借助自然裂缝或人工压裂来打开流动通道^[1-3]。

储层岩石物性较好的地热井,在钻井过程中,泥浆漏失进地层,造成近井地带污染导致产水量降低。采用酸化措施后,相同水位降、单位出水量较酸化前分别提高 3.56 倍和 5.40 倍,井口温度分别提高 3℃ 和 4℃,也取得很好的增产效果;对储层岩

性复杂、裂缝连通性差,造成产水量低的地热井,需要通过酸压以获得较长的酸蚀裂缝,来扩大储层裂缝的连通能力^[4-6]。

由于酸压工艺技术复杂,投资比较高,需要开发一套专用软件,从渗透率变化、投资回收期等角度对地热井的酸压效果进行评价。

在此基础上,开发了一套 B-S(程序架构)的“地热井酸化压裂施工措施评价系统”,从技术经济角度,实现地热井投入产出数据管理、计算酸化后合理的最大产水量和投入产出比等共享功能,满足地

热井酸化压裂措施效果评价需要。

1 地热井产能预测模型

依据施工投入费用和产出效益计算出投资回收期、投入产出比等经济评价指标,对比酸压前后的试井资料计算渗透率变化和最大产水量,为地热井酸化压裂后投产泵深及产水量的确定提供合理依据。

1.1 产水渗流模型的选择

选用地热井试井施工前后日产液量数据 Q $\{Q_1, Q_2\}$ 和对应的施工前后环空液面下降深度数据 S $\{S_1, S_2\}$ 计算出方程系数 a 和 b ,从而确定该井的渗流方程,就可以确定该井的日产液量 Q ,从而为选泵提供合理依据^[7-8]。

根据 Q-S 模型可知,若要确定地热井产水模型,关键在于确定模型系数 a 和 b ,而模型系数与渗流方程有关,渗流方程曲线的曲度系数决定了不同的渗流方程,计算渗流方程曲线的曲度系数公式为

$$n = \frac{\lg S_2 - \lg S_1}{\lg Q_1 - \lg Q_2} \quad (1)$$

计算渗透率 K

$$K = \frac{Q \times \mu \times \lg \frac{r_e}{r_w}}{0.1728 \times h \times (p_f - \Delta p_h)} \quad (2)$$

式中: K 为渗透率, mD; p_f 为地热井地层静压, Δp_h 为液柱压力, MPa; Q 为地热井产液量, m^3/h ; r_e 为供液半径, m; r_w 为地热井井筒半径, m; h 为生产层厚度, m; μ 为地热井生产层流体黏度, $mPa \cdot s$; Q_1 为试井施工前产液量, m^3/h ; Q_2 为试井施工后产液量, m^3/h ; S_1 为 Q_1 对应的液面下降高度, m; S_2 为 Q_2 对应的液面下降高度, m; n 为 Q-S 模型渗流方程曲度系数(无量纲)。

当 $n > 2$ 时,选定 Q-S 模型为对数型

$$Q = a + b \lg S \quad (3)$$

当 $n = 2$ 时,选定 Q-S 模型为抛物线型

$$S = aQ + bQ^2 \quad (4)$$

当 $1 < n < 2$ 时,选定 Q-S 模型为幂函数型

$$\lg Q = \ln a + b \lg S \quad (5)$$

当 $n = 1$ 时,选定 Q-S 模型为直线型

$$Q = a + bS \quad (6)$$

式中: S 为地热井液面下降深度, m; a 和 b 为 Q-S 模型产水渗流方程系数。

当 $n < 1$ 时,地热井试井数据有误,需要重新获取正确的试井数据。

当方程确定后,根据地热井试井收集的产量及环空水面下降高度,通过解方程组计算出模型系数 a 和 b ,进而根据已确定的渗流方程,计算该井最大产水量和效益。

1.2 地热井最大产量的确定

地热井最大产水量与地层渗透率、地层压力有关,地层渗透率好,地层压力大,流入井筒的水量多;当以最大产量进行采水时,产水压差达到最佳值;高于最佳产水压差,因供水富余,水面上升;低于最佳产水压差,供液面不足或负压过大损坏井筒,产生事故。根据 Behrmann 算法计算最大产水量时的最佳产水压差^[9-10]。

当近井储层渗透率小于 100 mD 时,砂岩地层微粒发生运移的最小负压值为

$$\Delta p = \frac{163.59\varphi \times d_p^{0.3}}{K^{0.3333}} \quad (7)$$

当近井储层渗透率大于 100 mD 时,砂岩地层微粒发生运移的最小负压值为

$$\Delta p = \frac{386.66\varphi \times d_p^{0.3}}{K^{0.5}} \quad (8)$$

式中: φ 为生产层位孔隙度; d_p 为地热井生产层有效厚度, m; Δp 为砂岩地层微粒发生运移的最小负压, MPa; K 为地热井生产层渗透率, mD。

将计算的最佳产水压差代入下面公式,可以计算出井筒液柱的最低高度,即

$$\Delta h = \frac{p_f - \Delta p}{gl \times 10^{-6}} \quad (9)$$

把计算的动液面高度代入下面公式,就可以计算出液面下降高度,即

$$S = H - \Delta h - H_0 \quad (10)$$

式中: Δh 为油层厚度, m; g 为牛顿重力加速度系数 $9.8, m/s^2$; l 为液体密度, kg/m^3 ; p_f 为地层静压, MPa; H 为地热井生产层中部深度, m; H_0 为地热井静液面深度, m。

将计算的井筒液柱最低高度代入已确定的 Q-S 模型,计算地热井最大产水量。

2 地热井产能评价模型

要全面评价施工效果,必须采用多项参数从多个方面进行综合评价,并根据评价目的选择适合的评价参数。通过对地热井酸化压裂施工资金流动和热效应方程,计算投资回收期和投入产出比,是评价地热井酸化压裂施工效果最简单直观

的方法。

地热井酸化压裂后的效益不但受施工效果影响,而且受生产条件如泵参数、实际供热面积等影响,为了真实反映地热井酸化压裂的效果,采用地热井最大产水量对应的效益进行评价^[11-12]。

地热井供热面积计算公式为

$$S = ZC_w\rho_w(t_y - t_p)/B \quad (11)$$

式中: S 为供暖面积, m^2 ; Z 为热水最大开采量, m^3/h ; C_w 为热水比热, $J/(kg\cdot^{\circ}C)$; ρ_w 为热水密度, kg/m^3 ; t_y 为井口水温, $^{\circ}C$; t_p 为弃水温度, $^{\circ}C$; B 为热负荷, W/m^2 。

计算地热井酸化压裂前后的供热经济效益增加额公式为

$$\Delta R = 24 \times 360 \times [(S - S_0)R_0 - (Q - Q_0)C] \quad (12)$$

式中: ΔR 为供热效益增加额,万元/年; Q 为酸化压裂施工后热水最大开采量, m^3/h ; Q_0 为酸化压裂施工前热水开采量, m^3/h ; S 为酸化压裂施工供暖面积, m^2 ; S_0 为酸化压裂施工前供暖面积, m^2 ; R_0 为供热价格,元/ m^2 ; C 为供热增量成本,元/ m^3 。

计算地热井酸化压裂评价指标,采用地热井酸化压裂施工投入产出比公式,即

$$R_k = \frac{[C_0 + 24 \times 360 \times (Q - Q_0)CY]}{24 \times 360 \times (S - S_0)R_0Y} \quad (13)$$

计算地热井酸化压裂投资回收期的公式为

$$P_1 = \frac{C_0r_0 + C_0}{\Delta R + w_1 + w_2} \quad (14)$$

式中: w_1 为地热井折旧成本,万元/年; w_2 为地热无形资产摊销额,万元/年; r_0 为银行贷款利率,万元; C_0 为地热井酸化压裂施工总费用,万元; Y 为地热井生产年限,年; R_k 为地热井酸化压裂施工投入产出比; P_1 为地热井酸化压裂投资回收期,d。

3 系统开发

根据地热井酸化压裂施工措施评价、最大产水量计算等实际需要,进行数据的输入,修改,查询,删除操作以及施工信息对比和统计计算等操作,主要包括系统整体功能设计、模块功能设计两个方面^[13-14]。

3.1 系统功能设计

根据地热井酸化压裂施工措施实际费用数据和试水数据、施工井结构与地层信息、评价基础数据、评价结果共享数据的需要,设计了如图1所示的数据库及共享结构。

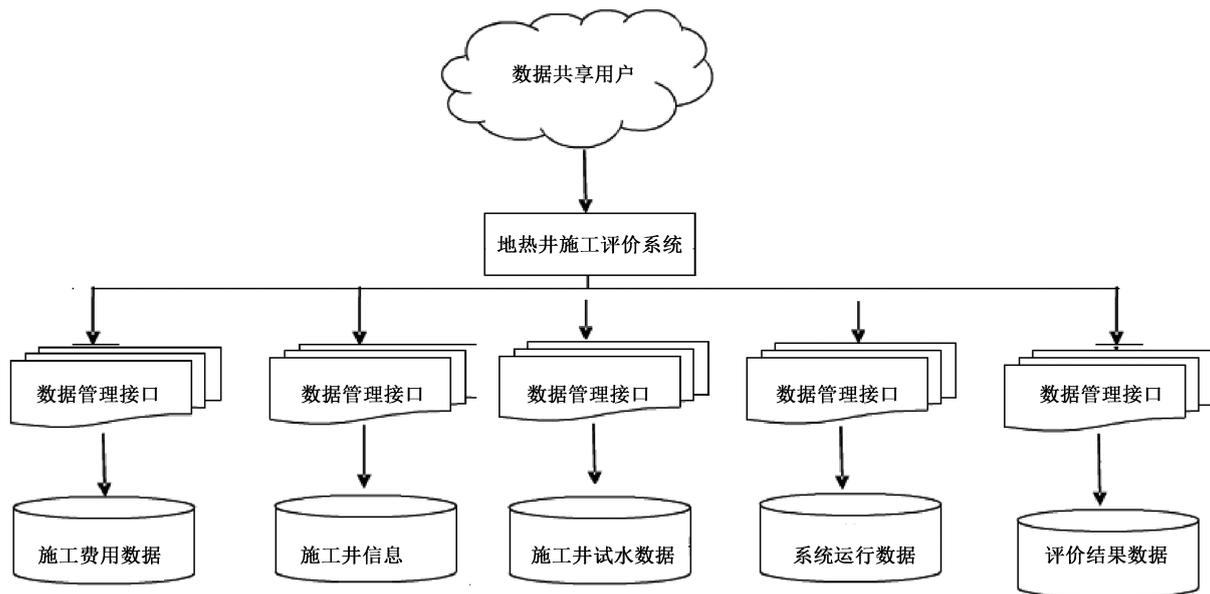


图1 地热井酸化压裂措施效果评价系统数据库及共享结构示意图

Fig. 1 Database and shared structure of evaluation system of acidizing fracturing measures for geothermal Wells

从图1可以看出,系统采用B-S(程序架构)设计技术,实现数据采集与评价结果分享的分离共享,即数据采集在客户端进行录入和评价完成后,再上传共享数据库,便于查阅。

3.2 评价系统功能设计

地热井酸化压裂施工措施评价系统的功能主要是根据地热井酸化压裂施工措施前后产水量计算效益的实际需要,进行数据的输入,修改,查询,删除操

作,以及施工信息对比和统计计算等操作,设计了数据中数据表对应的地热井施工费用数据管理、地热井

试水数据管理、最大产水量计算、施工效果评价指标计算、施工井结构及地层参数管理等功能,如图 2 所示。

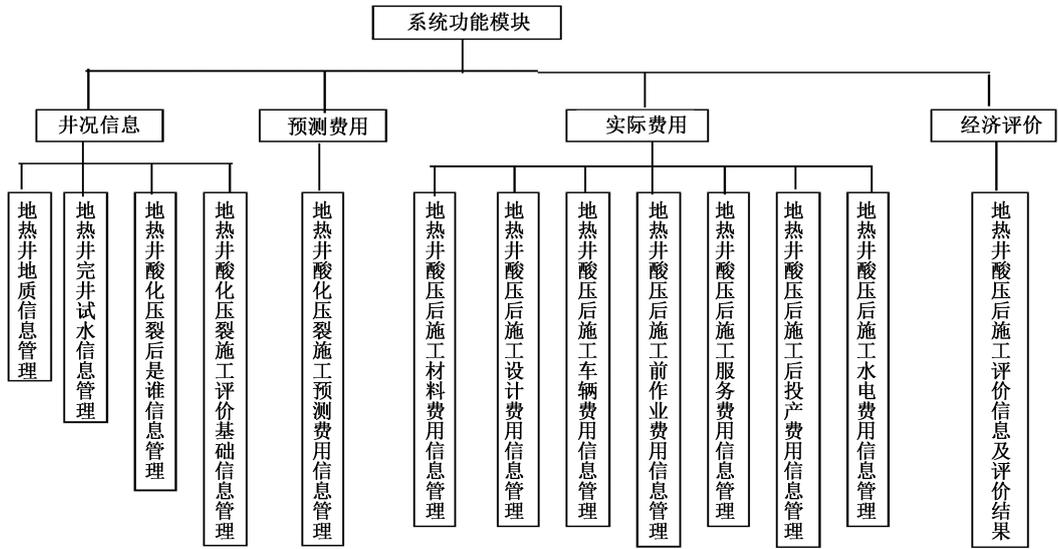


图 2 系统详细功能模块图

Fig. 2 Detailed functional module diagram of the system

3.3 评价系统程序开发

在电脑 Microsoft Windows 操作系统下采用 Macromedia Dreamweaver 8 开发 asp 程序文件,综合应用 C+、Vb 等语言书写代码,实现数据库连接和管理功能,能够采用 JS 和 Vbs 脚本对操作进行交互性编程, E 语言开发客户端,实现本地操作,减小网络压力,同

时避免相关数据泄密。客户端完成地热井酸化压裂施工效果评价相关数据录入和维护,并依据试井数据计算最大产水量,统计酸化压裂施工费用,计算投入产出比和投资回收期。以上评价结果及相关数据确认无误后,共享系统采用 asp 代码开发,上传到 web 端,实现数据共享。评价系统开发结果如图 3。



图 3 地热井酸化压裂施工评价信息及评价结果

Fig. 3 Evaluation information and results of acidizing fracturing of geothermal well

通过曲度系数确定 Q-S 模型,进而精确计算最大产水量,实现计算酸压井最大产水量以及确定评价指标的目的。

4 实际应用

南乐文昌苑探采 1 井位于河南省南乐县南环绿化带以北 80 m, G106 国道以西 500 m, 位于华北板块-渤海湾盆地-内黄凸起。内黄凸起为一中生代-新生代早期断块隆起,其西界为汤东断裂,东界为长垣大断裂,南界为焦作—商丘深断裂。内黄凸起主要受上述三条断裂的共同控制,新生界的沉积总体上呈现中部薄、四周厚的特征。另外,由于次级北西向、北东向断裂的影响,在内黄县宋村和南乐县元村等地发育有次级的新生代小断注。通过对本井测井曲线的分析认为:中完砂泥岩段水层较发育,物性好,含水性好,井温在 35.6~46.6℃之间;完井段为奥陶系地层,水层发育较分散,单层厚度较薄,完井段测量井段内井温在 56.7~65.6℃之间。

采用该评价系统对河南濮阳、山西太原、河北辛集等地热井进行施工评价,依据施工投入费用和产出效益计算出投资回收期、投入产出比等经济评价指标,为地热井酸化压裂后投产泵深及产水量的确定提供合理依据。应用验证了地热井酸化压裂施工措施评价系统的有效性。

以探采 1 井为例:中深度为 2 524 m;静水位埋深 80.42 m,渗透率 16~1 244.80 mD,试井 S_1 为 12.28 m, Q_1 为 62 m³/h, S_2 为 28.48 m, Q_2 为 90 m³/h, 供热半径 288 m,水井半径 0.108 m,水层厚度 2 m。

根据地热井酸压施工前后的产量与液面下降深度,通过公式(1)计算曲度系数 n 为 2.2573;根据曲度系数,确定式(3)为 Q-S 模型的形式。

将 S_1 、 Q_1 、 S_2 、 Q_2 代入公式,建立方程组,进而解方程或方程组计算模型参数 a 为 -21.49, b 为 76.65,确定 Q-S 模型为

$$Q = 76.65lgS - 21.49 \quad (15)$$

以净水深度 80.42 m 计算地层静压 24.358 MPa,以 $Q_1 = 62 \text{ m}^3/\text{h}$ 对应的动水面计算流压为 0.12 MPa, 供液半径为 288 m,井筒半径为 0.107 95 m,通过公式(2)计算出渗透率为 58.228 mD。

由于计算的渗透率值小于 100 mD,根据公式(7)计算最大产水量时的最小负压为 6.192 4 MPa;根据最小负压,由公式(9)计算最大产水量

时的动液面高度为 $1.824 \times 10^{-5} \text{ m}$;根据动液面高度,由公式(10)计算最大产水量时的动液面下降高度为 2 443.579 m,从而计算地热井产水量为 238 m³/h。

根据地热井最大产水量,考虑抽汲能力差异,选用三分之二计算值作为的最大产量 Q ,即 $Q = 158.8 \text{ m}^3/\text{h}$,代入公式(11)计算地热井供热面积为 707 538 475 m²。根据地热井供热面积(该井施工前不产水),通过公式(12)计算供热经济效益增加额;地热井酸压评价指标包括酸压施工投入产出比与酸压投资回收期,通过公式(13)计算酸压施工投入产出比为 0.191,通过公式(14)计算酸压投资回收期为 13.91 d。

综上所述,本方法通过曲度系数确定 Q-S 模型,进而精确计算最大产水量,可实现计算酸压井最大产水量以及确定评价指标的目的。

5 结论

(1)通过计算曲度指数,选定 Q-S 模型;然后用 Behrmann 算法模型计算井底最佳压差,由井底最佳压差计算地热井动液面及液面下降深度,并代入选定的 Q-S 模型计算最大产水量,确保产水量最大化,提高了地热井措施预判依据的准确性。

(2)地热井酸化压裂施工措施评价系统根据热平衡方程,计算最大产水量的有效供热面积,为地热井酸化压裂施工效果评价提供定量数据,评价结果可信度高。

致谢:感谢中国石化河南油田分公司石油工程技术研究院领导和同事们在论文撰写过程中提供的支持和帮助。

参考文献

- [1] 王佩佩. 稠油油藏效益注汽主要方法及评价——以金家油田金 17 块 Ed3363 小层为例[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(4): 78-83.
WANG Peipei. Main methods and evaluation on the efficiency of steam injection for heavy oil reservoirs - By taking Ed3363 sublayer of block Jin 17 in Jinjia Oilfield as an example [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(4): 78-83.
- [2] 康玲,王时龙,李川. 增强型地热系统(EGS)的人工热储技术[J]. 地热能, 2008, (9): 13-16.
KANG Ling, WANG Shilong, LI Chuan. Artificial heat storage technology for enhanced geothermal systems (EGS) [J]. Geothermal Energy, 2008, (9): 13-16.
- [3] 朱焕来. 松辽盆地北部沉积盆地型地热资源研究[D].

- 大庆:东北石油大学,2011.
- ZHU Huanlai. Research on the sedimentary geothermal resources in north Songliao basin [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [4] 李庭春. 管理信息系统开发特点及原则分析[J]. 现代计算机(专业版),2008,(5):88-89.
- LI Tingchuan. Analysis of characteristic and principle on development of management information system [J]. Modern Computer, 2008,(5):88-89.
- [5] 白云龙. 管理信息系统开发与软件工程[J]. 现代企业教育,2007,(6):179-180.
- BAI Yunlong. Management information system development and software engineering [J]. Modern Enterprise Education, 2007,(6):179-180.
- [6] 周文涛. MIS 系统开发的相关介绍[J]. 经济技术协作信息,2007,21-24.
- ZHOU Wentao. Introduction of MIS system development [J]. Information on Economic and Technological Cooperation, 2007,21-24.
- [7] 徐凤根,朱兴珊,颜其彬,等. 储层定量评价中指标权重的计算途径[J]. 石油学报,1996,17(2):30-35.
- XU Fenggen, ZHU Xingshan, YAN Qibin, et al. An approach to define weight of indexes in the quantitative evaluation of reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996,17(2):30-35.
- [8] 姬永红. 酸化压裂技术在鲁西南碳酸盐岩地热井中的应用[J]. 勘察科学技术,2017,(4):62-64.
- JI Yonghong. Application of acid fracturing technology in geothermal well of carbonate rock in southwest of Shandong province [J]. Site Investigation Science and Technology, 2017,(4):62-64.
- [9] 林天懿,柯柏林,杨森,等. 碳酸盐岩热储酸化压裂增产机理研究及应用[J]. 城市地质,2018,13(3):21-26.
- LIN Tianyi, KE Bailin, YANG Miao, et al. The acid-fracturing stimulation mechanism and application in hydrothermal-carbonate geothermal reservoir [J]. Urban Geology, 2018, 13(3):21-26.
- [10] 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,2010,37(5):128-132.
- WANG Liancheng, LI Minglang, CHENG Wanqing, et al. Application of acidifying & fracturing technology to carbonate rock reservoir [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010,37(5):128-132.
- [11] 马忠平,杜槟,鲍卫和,等. 酸化压裂工艺在地热井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(2):45-47.
- MA Zhongping, DU Bin, BAO Weihe, et al. Application of acid-fracture technology in geothermal well construction [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007,34(2):45-47.
- [12] 吕殿臣. 酸化压裂技术在地热井增产中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量,2013,33(22):156.
- LYU Dianchen. Application of acidizing fracturing technology in geothermal well stimulation [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013,33(22):156.
- [13] 刘军,郭培培,孟宪伟,等. 一种获取油藏静压的新方法——以渤海 P 油田为例[J]. 石油地质与工程,2020,34(3):118-121.
- LIU Jun, GUO Peipei, MENG Xianwei, et al. A new method of obtaining reservoir static pressure - by taking Bohai P Oilfield as an example [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020,34(3):118-121.
- [14] 蒋尔梁,刘洪涛,解勇珍,等. 春光油田携砂液对防砂过程中近井地带渗流特征影响实验研究[J]. 石油地质与工程,2019,33(2):108-111.
- JIANG Erliang, LIU Hongtao, XIE Yongzhen, et al. Experimental study on the influence of sand-carrying fluid on seepage characteristics near wellbore during sand control in Chunguang Oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019,33(2):108-111.

编辑 方志慧

第一作者简介:郑桐,女,工程师,硕士,2010年毕业于中南民族大学,现主要从事油气勘探压裂酸化技术研究。电话:0377-63835191;Email:39410159@qq.com。通信地址:河南省南阳市宛城区赤虎街道,邮政编码:473132。