

水力泵求产流压诊断方法

梅显旺

中国石油大庆油田有限责任公司试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

通讯作者:Email:meixianwang@petrochina.com.cn

项目支持:大庆油田有限责任公司试油试采分公司科研项目“致密油水平井压后渗吸机理及求产方案优化研究”(QR/AO/4-2-08-2016001)

引用:梅显旺. 水力泵求产流压诊断方法[J]. 油气井测试,2021,30(4):32-36.

Cite: MEI Xianwang. Diagnosis method of flow pressure using hydraulic pump for production [J]. Well Testing, 2021,30(4):32-36.

摘要 油井大规模压裂后,在大斜度井及水平井压后排液求产过程中,为及时掌握水力泵求产流压,需定期反洗泵芯回放压力,但会导致泵芯入座困难,影响连续求产。通过研究水力泵工作原理,建立水力泵泵芯压力理论计算公式,利用地面泵压、排量及产量实时预测泵芯压力;统计分析以往异常井资料,利用预测泵芯压力、实际泵芯压力,以及管柱监测压力三者数据对比,形成了水力泵求产流压诊断方法。该方法可及时排除水力泵异常情况,科学合理调整泵排参数,提高水力泵排液求产效率,为试油提质增效提供技术保障。

关键词 水力泵;泵芯;压力预测;求产流压;诊断方法;参数优化

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.04.006

Diagnosis method of flow pressure using hydraulic pump for production

MEI Xianwang

Well Testing & Perforation Company, PetroChina Daqing Oilfield Company Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: In fluid production of wells after large-scale fracturing of highly deviated wells and horizontal wells, it is necessary to backwash the pump core regularly to play back the pressure in order to master the flow pressure of hydraulic pump for production in time. However, it will lead to the difficulty of pump core seating when resending the pump core and influence the production. By studying the working principle of the hydraulic pump, the calculation formula of the core pressure theory of the hydraulic pump is established in this paper, which uses the surface pump pressure, displacement and output to predict the pump core pressure in real time. Based on the statistical analysis of the abnormal data of wells in the past, comparing the predicted pump core pressure, the actual pump core pressure and the string monitoring pressure, the diagnosis method of flow pressure using hydraulic pump for production is formed. This method can eliminate the abnormal situation of hydraulic pump in time, adjust the pump discharge parameters scientifically and reasonably, improve the efficiency of hydraulic pump discharge for production, and provide technical support for improving the quality and efficiency of oil testing.

Keywords: hydraulic pump; pump core; pressure prediction; producing flow pressure; diagnosis method; parameter optimization

近年来,随着油田勘探开发的不断深入,直井缝网及水平井体积压裂井逐年增多,该类井压裂规模较大,一般达到千方砂万方液的压裂规模^[1-4]。高辉等^[5]针对压裂后试油排液求产中排液参数变化的问题,通过对先采用螺杆泵、后采用水力泵的井实际排液求产数据进行分析,从排液能力、工作制度调整、井底流压及产能求取的准确性等方面对两者的优缺点进行应用对比,提出螺杆泵与水力泵在水平井排液求产中的选择原则。由于大规模压裂后排液初期产液量大、后期需达到低流压求产目的,相对于螺杆泵等其他杆式泵,水力泵由于活动

部件少,地面工作制度调整灵活,能适应一定量含砂、高黏度及高气油比流体的举升,在大斜度井及水平井压后排液求产中应用越来越广泛^[6-7]。

在水力泵现场应用过程中,陈悦祥、马金良等、帅培勤等针对射孔-压裂-水力泵排液工艺技术原理,开展多联作工艺技术研究,探索了水力泵排液技术在大庆油田水平井试油中的应用、压裂与水力泵快速返排联作工艺在海拉尔油田斜井上应用,以及一趟管柱分层射孔与水力泵排液联作技术应用^[8-10]。在工作制度优化方面,李楠、李军贤、徐贵针对高凝油井在常规试油过程中,原油易结蜡且流

动困难,无法达到试油求产目的,利用 Wellflo 软件模拟分析注入流体温度、下泵深度、泵压及泵入量的变化对井筒温度分布的影响,优选水力泵排液的施工参数,配合地面流程加热及保温技术,成功完成了3井次的试油测试^[11-13]。针对压后产能评价,徐加祥等、张印、牛丽娟等应用数模方法对影响水平井压后产能的地质和工程因素进行分析,研究储层渗透率、压裂段数、井底流压、裂缝半长和簇间距等因素对压后产能的影响,优化了水平井压裂的裂缝形态参数,从而更好地指导水平井压裂设计的编制,提高压裂水平井的施工效果和成功率^[14-16]。但如何根据井型、地层产液量等地质工程因素,科学合理选择水力泵泵型、泵芯配比等参数,仍是目前亟待解决的技术难题。本文通过研究水力泵工作原理,根据水力泵工作特性曲线,建立不同配比下水力泵泵芯压力计算公式,利用地面泵压、排量及产量实时预测泵芯压力,结合实际水力泵求产流压资料,分析判断水力泵求产工况,及时调整水力泵工作制度,提高排液求产效率。

1 水力泵泵芯压力预测方法

水力喷射泵(简称水力泵,又称射流泵)是利用水力射流原理将注入井内的高压动力液能量传递给井下油层产出液的无杆水力采油设备,在多油田有着广泛应用^[17-19]。水力泵采油系统由地面(包括动力液供给和产出液收集处理系统)和井下(包括动力液及产出液在井筒内流动系统和射流泵)两大部分组成。射流泵主要由喷嘴、喉管和扩散管组成。高压动力液的压能通过喷嘴转换为高速流动液体的动能,形成喷射,并在喷嘴处形成低压区,高速流动的动力液与被吸入低压区的油层产出液在喉管中混合,流经截面不断扩大的扩散管,流速降低将液体动能转换为压能,混合液压力升高被举升到地面。水力泵工作原理如图1所示。

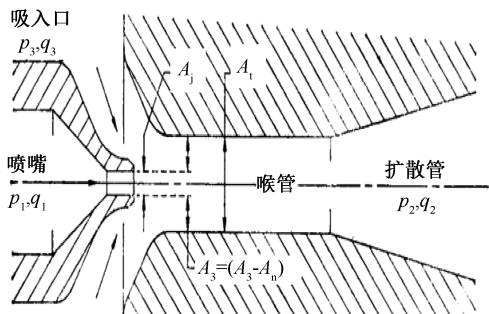


图1 水力泵工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of hydraulic pump

水力泵工作特性曲线反映了水力泵面积比 R 取不同值时流量比 M 和压力比 H 的对应关系,以及不同泵效 η 与 M 的对应关系(图2)。

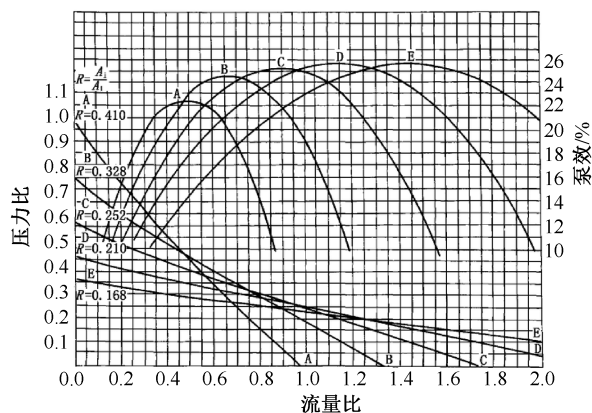


图2 水力泵工作特性曲线

Fig. 2 Working characteristic curve of hydraulic pump

其中面积比 R 是指喷嘴面积 A_j 和喉管面积 A_l 之比;流量比 M ,又称喷射率,是指油井产液量 q_3 和喷嘴流量 q_1 之比;压力比 H ,又称举升率,是指井筒液通过泵出口获得的压力增量与动力液在泵内损失的压之比,即

$$H = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_2}$$

泵效 η 是指传给采出液的功率与动力液损失功率之比,即

$$\eta = HM = \frac{(p_2 - p_3) q_3}{(p_1 - p_2) q_1}$$

将 H 与 M 对应关系定义为 $H = f(M)$,进而推导出泵芯压力理论计算公式,即

$$p_3 = \rho_{\text{液}} g h_{\text{泵}} - f\left(\frac{q_3}{q_1}\right) p_{\text{泵}}$$

式中: p_3 为泵芯压力, MPa; $\rho_{\text{液}}$ 为返排液密度, kg/m^3 ; $h_{\text{泵}}$ 为泵芯深度, m; $p_{\text{泵}}$ 为地面泵压, MPa。

2 水力泵求产流压诊断方法

由水力泵泵芯压力理论计算公式可知,泵芯压力主要受水力泵面积比、泵深、泵压、排量、地层产液量和返排液密度综合作用影响。利用该方法根据实际求产资料可实时预测泵芯压力,及时分析判断井下求产情况。

水力泵求产管柱同时携带储存压力计监测井底流压变化(图3)。正常情况下,管柱及流体进液通道畅通,水力泵泵芯以下处于一个压力系统,预测泵芯压力、实际泵芯压力和管柱监测压力三者一

致,数值相差不大。

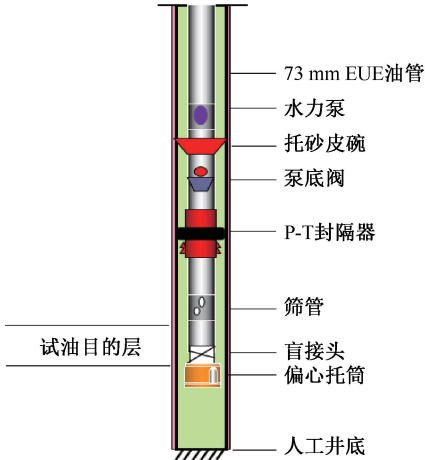


图 3 A 井水力泵求产管柱示意图
Fig. 3 Structure diagram of hydraulic pump production string in Well A

例如 A 井压裂后采用水力泵求产。由水力泵求产产量压力曲线可以看出(图 4),泵深 1 816.0 m、泵压 16 MPa 下日产液 30.8 m³,理论计算泵芯压力 6.16 MPa,实际泵芯压力 5.78 MPa/1 816.0 m,管柱监测压力 6.19 MPa/1 863.2 m,三者相差不大,说明水力泵工作正常,同时也验证了理论公式

的可行性。

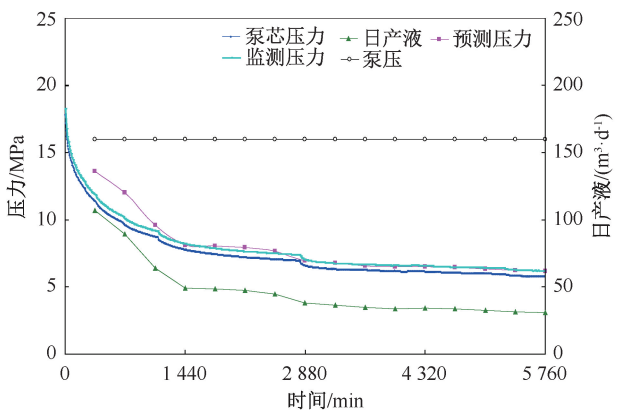


图 4 A 井水力泵求产产量压力曲线
Fig. 4 Production and pressure curve of hydraulic pump production in Well A

但是在水力泵实际应用过程中,部分井由于水力泵进液通道堵塞、喷嘴喉管配比不合理以及刺大等原因,导致泵工作异常,预测泵芯压力、实际泵芯压力和管柱监测压力三者相差较大。统计分析异常井资料,结合水力泵工作原理,深入剖析异常原因,建立了水力泵求产工况分析表(表 1),为今后水力泵施工提供指导。

表 1 水力泵求产工况分析统计表

Table 1 Statistical table of working condition analysis of hydraulic pump production			
水力泵工况	压力对比	原因分析	应对措施
正常	预测泵芯压力等于实际泵芯压力 等于管柱监测压力	井深导致求产流压高于设计要求 产量高导致求产流压高于设计要求	更换较大面积比泵芯求产 更换较小面积比泵芯求产
异常	预测泵芯压力等于实际泵芯压力 小于管柱监测压力	筛管堵塞,水力泵进液通道受限	更换水力泵排液求产管柱, 做好管柱防砂堵、油稠堵塞
异常	预测泵芯压力小于实际泵芯压力 等于管柱监测压力	喉管扩散管刺大,水力泵泵效低	更换水力泵泵芯, 做好动力液清洁工作

3 应用实例

利用水力泵求产流压诊断方法,对水力泵施工异常井进行原因剖析,科学合理制定应对措施,取得了较好的效果。

3.1 筛管堵塞井实例

B 井压裂后采用水力泵求产。由产量压力曲线可以看出(图 5),第一次水力泵深度 1 572.7 m,喷嘴 3.4 mm,喉管 5.5 mm,泵压 16 MPa 下日产油 1.2 m³、日产水 2.8 m³,预测泵芯压力 0 MPa,实际泵芯压力 0 MPa,管柱监测压力 18 MPa,起出水力泵管柱发现筛管堵塞。更换求产管柱,加大筛管长度及开孔尺寸,泵压 18 MPa 下日产油 10.8 m³、日产水 6.0 m³,预测泵芯压力 0 MPa,实际泵芯压力

0.34 MPa,管柱监测压力 0.88 MPa,三者压力相差不大,水力泵求产正常,取得较好试油效果。

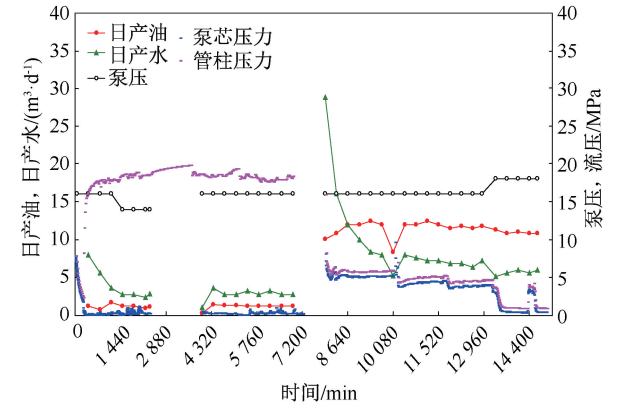


图 5 B 井水力泵排液求产曲线
Fig. 5 Production curve of hydraulic pump discharge in Well B

3.2 喉管扩散管刺大井实例

C井压裂后采用水力泵求产。由水力泵求产产量压力曲线可以看出(图6),水力泵深度1756.69 m,喷嘴3.4 mm,喉管5.5 mm,泵压18 MPa下日产水10.8 m³,预测泵芯压力1.16 MPa,实际泵芯压力6.64 MPa,管柱监测压力7.17 MPa,预测泵芯压力与实际泵芯相差较大,反洗出泵芯检查喉管扩散管刺大。更换新的泵芯重新求产,同时加强了动力液的清洁过滤,泵压20 MPa下日产水7.2 m³,预测泵芯压力0 MPa,实际泵芯压力0 MPa,管柱监测压力0.44 MPa,三者压力相差不大,水力泵求产正常。

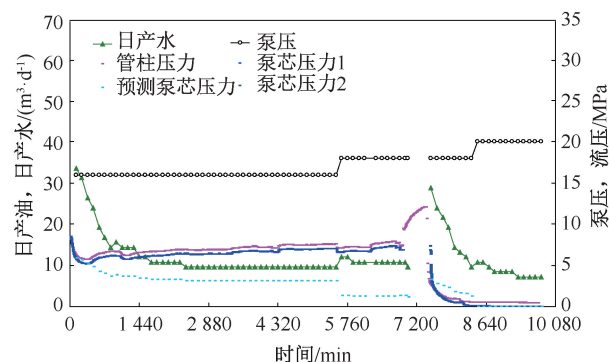


图6 C井水力泵排液求产曲线

Fig. 6 Production curve of hydraulic pump discharge in Well C

3.3 求产流压高井实例

D井压裂后采用水力泵求产,由水力泵求产产量压力曲线可以看出(图7),水力泵深度1657.43 m,第一次泵芯喷嘴3.2 mm、喉管5.2 mm、面积比0.378,泵压20 MPa下日产液82.3 m³,井底流压12.2 MPa较高;第二次泵芯喷嘴3.2 mm、喉管5.8 mm、面积比0.304,泵压20 MPa下日产液111.2 m³,井底流压8.1 MPa;第三次泵芯喷嘴3.2 mm、喉管5.6 mm、面积比0.326,泵压20 MPa下日产液86.4 m³,井底流压7.7 MPa。

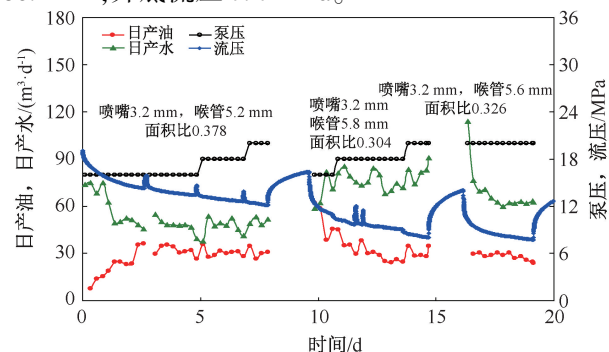


图7 D井水力泵排液求产曲线

Fig. 7 Production curve of hydraulic pump discharge in Well D

通过扩大喉管直径,降低水力泵泵芯面积比,扩大泵芯进液通道,有利于提高产液量,降低泵芯压力。

4 结论

(1)水力泵正常求产情况下,预测泵芯压力、实测泵芯压力和管柱监测压力三者一致,能够反映地层真实产能。

(2)当预测泵芯压力与实际泵芯压力一致,管柱监测压力较高时,说明地层供液充足,筛管等水力泵进液通道存在堵塞,需要更换水力泵求产管柱,进一步分析排查工程原因,做好管柱防砂堵、油稠堵塞等措施。

(3)当预测泵芯压力低于实际泵芯压力时,及时检查喷嘴、喉管,发现有无刺大损坏现象,影响水力泵求产效率,及时更换新的泵芯求产,同时做好动力液清洁工作。

(4)实际求产流压高于设计要求时,正常情况下通过提高地面泵压,延长求产时间,可降低井底流压。但是针对深井及高产井,还需要根据水力泵工作特性曲线,优选泵芯喷嘴喉管大小,确定最优面积比。

致谢:感谢大庆油田试油试采分公司同意本文公开发表;感谢于书新、王锐、马威奇等项目组成员在论文修改、施工总结和试井解释方面做出的贡献。

参考文献

- [1] 吴奇,胥云,王腾飞,等. 增产改造理念的重大变革——体积改造技术概论[J]. 天然气工业,2011,31(4):7-12,16.
WU Qi, XU Yun, WANG Tengfei, et al. The revolution of reservoir stimulation: An introduction of volume fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2011,31(4):7-12,16.
- [2] 叶成林,王国勇. 体积压裂技术在苏里格气田水平井开发中的应用——以苏53区块为例[J]. 石油与天然气化工,2013,42(4):382-386.
YE Chenglin, WANG Guoyong. Application of stimulated reservoir volume to horizontal wells in Sulige gas field—A case study in Su 53 block [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013,42(4):382-386.
- [3] 许江文,郭大立,计勇,等. 压裂改造措施分析及优化技术[J]. 大庆石油地质与开发,2011,30(5):105-108.
XU Jiangwen, GUO Dali, JI Yong, et al. Treatment analysis and optimization technique for fracturing stimulation [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2011,30(5):105-108.
- [4] 朱磊. 致密油储层体积压裂工厂化作业在大庆油田的研究和应用[J]. 油气井测试,2017,26(4):70-74.
ZHU Lei. Research and application of factorial cubic

- fracturing for tight oil reservoir in Daqing Oilfield [J]. Well Testing, 2017,26(4):70-74.
- [5] 高辉. 螺杆泵与水力泵在水平井排液求产中的适应性分析[J]. 油气井测试,2018,27(3):22-27.
GAO Hui. Adaptability analysis of screw pump and hydraulic pump during the production of horizontal wells [J]. Well Testing, 2018,27(3):22-27.
- [6] 师国臣,张佳民,魏纪德,等. 大庆油田高效举升与节能技术的新发展[J]. 大庆石油地质与开发,2009,28(5):246-252.
SHI Guochen, ZHANG Jiamin, WEI Jide, et al. New development of high efficiency and energy saving artificial lift system in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2009,28(5):246-252.
- [7] 孙永涛,马魁魁,陆爱华. 浅海试油排液工艺的对比及优选[J]. 油气井测试,2010,19(3):33-35.
SUN Yongtao, MA Kuikui, LU Aihua. Comparison and optimization of oil test tech at shallow sea [J]. Well Testing, 2010,19(3):33-35.
- [8] 陈悦祥. 水力泵排液技术在大庆油田水平井试油中的应用[J]. 油气井测试,2016,25(2):45-47.
CHEN Yuexiang. Application of hydraulic pump drainage technology in oil test to horizontal wells in Daqing Oilfield [J]. Well Testing, 2016,25(2):45-47.
- [9] 马金良,刘泽宇,李春宁,等. 一趟管柱分层射孔与水力泵排液联作技术[J]. 油气井测试,2018,27(2):22-26.
MA Jinliang, LIU Zeyu, LI Chunling, et al. Integration of layered perforation and flowback by hydraulic pump in one trip [J]. Well Testing, 2018,27(2):22-26.
- [10] 帅培勤,陈娟炜,黄显辉,等. 压裂与水力泵快速返排联作工艺在海拉尔油田斜井上成功应用[J]. 油气井测试,2013,22(5):48-50.
SHUAI Peiqin, CHEN Juanwei, HUANG Xianhui, et al. Successful application of fracturing and hydraulic pump quick unflowing tech at sloped well in the Hailaer Oilfield [J]. Well Testing, 2013,22(5):48-50.
- [11] 李楠. 高凝油井水力泵排液参数分析及优化[J]. 油气井测试,2019,28(1):14-19.
LI Nan. Analysis and optimization of discharge parameters of hydraulic pump in high pour-point oil well [J]. Well Testing, 2019,28(1):14-19.
- [12] 李军贤. 地层出砂井测试工艺优化[J]. 油气井测试,2018,27(2):47-52.
LI Junxian. Optimization of testing techniques for wells with formation sand production [J]. Well Testing, 2018,27(2):47-52.
- [13] 徐贵. 开发评价井试油工作制度优化及资料分析的几点认识[J]. 油气井测试,2004,13(6):67-70.
Xu Gui. Some ideals for optimum of well test working system and data analysis in developmental and interpreted well [J]. Well Testing, 2004,13(6):67-70.
- [14] 徐加祥,杨立峰,丁云宏,等. 致密油水平井体积压裂产能影响因素[J]. 大庆石油地质与开发,2020,39(1):162-168.
XU Jiaxiang, YA NG Lifeng, DING Yunhong, et al. Influencing factors on the productivity of the volume-fractured horizontal well in the tight oil reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020,39(1):162-168.
- [15] 张印. 低渗透油藏水平井压裂产能影响因素分析[J]. 石化技术,2017,24(1):157-163.
ZHANG Yin. Analysis of factors influencing fracture capacity of horizontal well in low permeability reservoirs [J]. Petrochemical Industry Technology, 2017,24(1):157-163.
- [16] 牛丽娟,徐健,于书新,等. 致密油藏水平井压后产能评价技术及其应用[J]. 大庆石油地质与开发,2014,33(5):245-248.
NIU Lijuan, XU Jian, YU Shuxin, et al. Productivity evaluating technique and its application for the horizontal well after fractured in the tight oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014,33(5):245-248.
- [17] 钱宇. 大庆油田水平井试油中水力泵排液技术的应用分析[J]. 化学工程与装备,2020(3):126-127.
QIAN Yu. Application analysis of hydraulic pump drainage technology in horizontal well test in Daqing Oilfield [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(3):126-127.
- [18] 张峥,盖连民,田家宏,等. 水力泵排液求产工艺技术在吉林油田的应用[J]. 油气井测试,2007,16(4):59-61,64.
ZHANG Zheng, GAI Lianmin, TIAN Jiahong, et al. Application of technology of hydraulic pump and flow back to acquire productivity in Jilin Oilfield [J]. Well Testing, 2007,16(4):59-61,64.
- [19] 韩锋. 水力泵排液技术在辽河油田探井试油中的应用[J]. 油气井测试,2009,18(2):64-65.
HAN Feng. Application of hydraulic pump unloading technology in well testing of exploration wells in Liaohe Oilfield [J]. Well Testing, 2009,18(2):64-65.

编辑 刘振庆

第一作者简介:梅显旺,男,1987年12月出生,硕士,工程师,2009年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,主要从事勘探试油管理及试井评价工作。电话:0459-5576596; Email:meixianwang@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市大庆油田有限责任公司试油试采分公司,邮政编码:163412。