

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2023046

引用格式: 徐建宁, 胡莉莉, 朱端银, 等. 变径气举柱塞变径过程受力分析与试验研究 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 90-94.

XU Jianning, HU Lili, ZHU Duanyin, et al. Experimental study on force acting on diameter-variable gas lift plunger during diameter changing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 90-94.

变径气举柱塞变径过程受力分析与试验研究

徐建宁, 胡莉莉, 朱端银, 郭邦瑞, 王泽鹏

(西安石油大学机械工程学院, 陕西西安 710065)

摘 要: 为了满足海上气井复合管柱的变径结构要求, 解决气井积液、延长气井生产寿命, 设计了一种新型变径柱塞结构, 分析了变径柱塞在扩径、碰撞缩径过程中的受力情况。模拟了柱塞排水采气工艺过程, 开展了室内变径柱塞变径行为观测、举液量与进气压力测量、举液效率分析等试验。试验结果表明, 变径柱塞可在变径管柱中顺利运行, 扩径所需进气压力与举液量成正比, 该变径密封结构具有良好的举液效率。研究结果可以为变径柱塞在海上气井的应用提供试验依据和理论参考。

关键词: 柱塞气举; 变径柱塞; 安全阀; 排水采气; 气井积液

中图分类号: TE933⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)02-0090-05

Experimental Study on Force Acting on Diameter-Variable Gas Lift Plunger During Diameter Changing

XU Jianning, HU Lili, ZHU Duanyin, GUO Bangrui, WANG Zepeng

(Mechanical Engineering College, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the diameter-variable structure of composite pipe strings in offshore gas wells, solve the problem of liquid accumulation in gas wells, and extend the production life of gas wells, a new diameter-variable plunger structure was designed. Force acting on the diameter-variable plunger during diameter enlargement and reduction caused by collision was analyzed. In addition, the plunger drainage and gas production process was simulated, and tests were carried out, such as laboratory diameter-changing behavior observation, measurement of liquid lifting capacity and intake pressure, and analysis of liquid lifting efficiency of the diameter-variable plunger. The research results show that the diameter-variable plunger can run smoothly in the diameter-variable pipe string, and the intake pressure required for diameter enlargement is proportional to the liquid lifting capacity. The diameter-variable sealing structure has excellent liquid lifting efficiency. The research results can provide an experimental basis and theoretical reference for the application of diameter-variable plungers in offshore gas wells.

Key words: plunger gas lifting; diameter-variable plunger; safety valve; drainage and gas production; liquid accumulation in gas wells

柱塞气举装置由于设备简单、前期投资和运行费用低, 在陆地上气井开发后期成为高油气比、低产能油井的首选方式^[1-4]。为改进柱塞举升技术, Zhao Kunpeng 等人^[5]采用 VOF-CFD 数值方法求解流动模型, 提出柱塞与油管最佳的直径比为 0.96。柱塞作为井筒中的气、液、固分隔装置, 可根据地层压力控制开关井, 将气井中的积液举升至井口排

出, 实现排水采气^[6-8]。出于安全考虑, 在距离海上气井井口约 200 m 处安装安全阀, 以便在发生突发情况时, 保护平台上作业人员的安全^[9-12], 通常安全阀与油管的内径不一致, 因此海上气井的生产管柱多为复合管柱结构。目前具有变径功能的柱塞大致分为弹块式组合柱塞和伞式柱塞^[13-16], 弹块式组合柱塞用于解决页岩气井井口生产时扩径、生产管柱

收稿日期: 2022-09-19; 改回日期: 2023-03-26。

作者简介: 徐建宁 (1963—), 男, 浙江平阳人, 1984 年毕业于西安石油学院石油矿场机械专业, 1995 年获西北工业大学机械学专业硕士学位, 教授, 硕士生导师, 主要从事石油钻采机械设计及工作行为分析方面的研究工作。E-mail: xujn@xsyu.edu.cn。

通信作者: 胡莉莉, 2420483024@qq.com。

缩径等问题, 柱塞由上下 2 组弹块以及中间的连接杆组成, 通过管柱缩径段时弹块在弹簧的作用下收缩扶正。伞式柱塞仿照雨伞结构, 中间有温控环支撑伞片, 通过温度变化环控制柱塞直径。然而, 弹块式组合柱塞无法在变径通过安全阀的同时保证举液效率, 而伞式柱塞温控环需要针对工况严格选择材料, 目前尚处于概念性阶段。

为此, 笔者针对海上气井复合管柱结构, 在常规柱塞结构的基础上进行了变径结构设计, 通过室内试验验证了变径柱塞稳定通过变径管柱的可行性, 分析了变径柱塞扩径所需进气压力与举液量之间的关系, 根据试验数据分析了变径柱塞举液效率, 为海上气井应用变径柱塞提供了参考。

1 变径柱塞结构设计

东海某气井油管内径为 62.0 mm, 加装安全阀处内径为 58.7 mm。关井下行时, 变径柱塞最大外径应小于安全阀内径; 开井时, 变径柱塞扩径携液上行, 与安全阀碰撞缩径以通过安全阀, 将井下液体举升至井口; 井口捕捉器捕捉变径柱塞, 完成排水采气的一次循环。

根据柱塞气举技术规范要求^[17], 为使变径柱塞获得最佳举升效率, 变径柱塞扩径时最大外径设计为 59.5 mm, 缩径时最小外径设计为 56.0 mm。变径柱塞结构如图 1 所示。

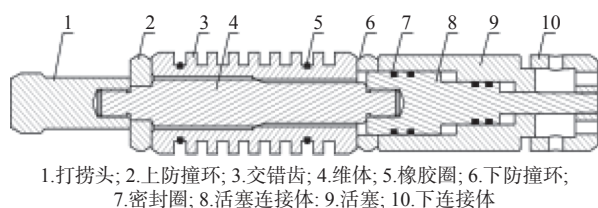


图 1 变径柱塞结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of variable diameter plunger structure

2 变径柱塞受力分析

为使扩径后的变径柱塞具有良好的密封性能, 在常规柱塞密封槽结构的基础上加入迷宫密封, 解决了变径柱塞扩径后密封槽齿间隙液体易泄露问题, 提高了变径柱塞气举效率, 改善了其密封性能。如图 2 所示, 变径柱塞交错齿通过其与锥体的接触

点处受力, 与锥体产生相对运动, 使变径柱塞扩径。

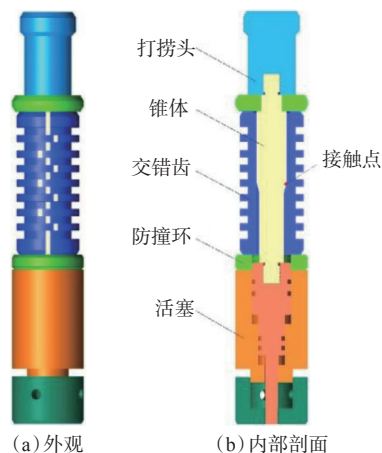


图 2 变径柱塞扩径状态结构示意图

Fig.2 Diameter enlargement of diameter-variable plunger

2.1 扩径受力分析

变径柱塞中心轴处的零部件由螺纹连接, 相互不发生相对位移。开井后, 生产管柱内气体进入变径柱塞底部空腔, 推动活塞向上运动, 使交错齿与防撞环受到向上的推力, 与锥体发生相对运动。由于锥体与交错齿接触部分具有一定斜度, 交错齿沿斜面向上运动, 完成柱塞扩径。变径柱塞扩径时锥体与交错齿接触点处的受力分析如图 3 所示。

$$F_{g1} = G_1 + G_p = \rho_l g S h_1 + m_p g \quad (1)$$

式中: F_{g1} 为气体推动活塞向上的推力, N; G_p 为柱塞重力, N; G_1 为柱塞所举液体的重力, N; ρ_l 为液体密度, kg/L; S 为油管横截面积, m^2 ; h_1 为柱塞所举液柱的高度, m; m_p 为柱塞质量, kg。

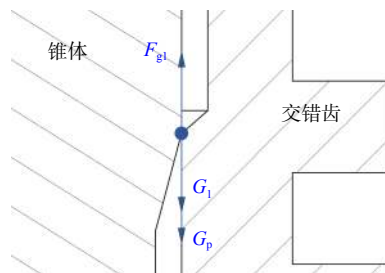


图 3 变径柱塞扩径受力分析

Fig.3 Force acting on diameter-variable plunger during diameter enlargement

当进气压力大于变径柱塞自身重力、变径柱塞举液质量和交错齿扩张弹性力施加在锥体上的垂向分力之和时, 变径柱塞开始扩径。变径柱塞发生扩径时的进气压力与变径柱塞举液量的关系曲线如图 4 所示。在变径柱塞气举过程中, 液体密度、油

管横截面积与变径柱塞自重均为定值,此时变径柱塞的举液量与扩径所需进气压力成正比。因此变径柱塞举液量越多,扩径所需进气压力越大。

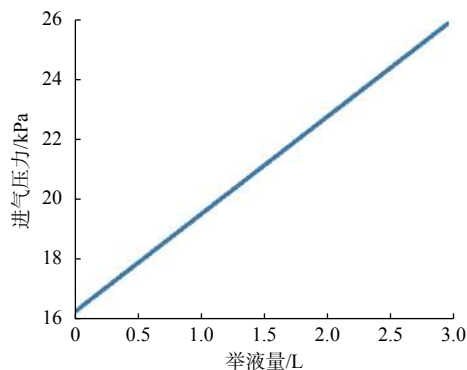


图4 举液量与进气压力的关系曲线

Fig.4 Relationship between lifting capacity and intake pressure

2.2 缩径受力分析

变径柱塞扩径后举液上行,由于变径柱塞扩径时最大外径为 59.5 mm,安全阀内径为 58.7 mm,因此变径柱塞的变径结构(交错齿)会与安全阀发生碰撞。交错齿上表面设计有 30°倒角,碰撞力 F_{im} 可以分解为径向力和轴向力,变径柱塞与安全阀碰撞缩径时交错齿与锥体接触点处的受力状况如图 5 所示。

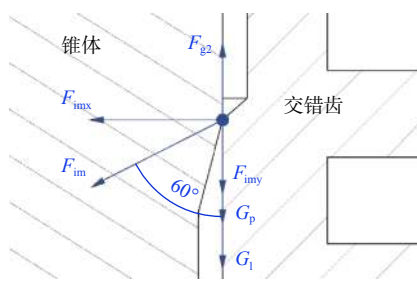


图5 变径柱塞缩径受力分析

Fig.5 Force acting on diameter-variable plunger during diameter reduction

假设柱塞在上行过程中温度不变:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2)$$

式中: p_1 为开井时变径柱塞的启动压力, MPa; V_1 为开井时变径柱塞启动时气体体积, m^3 ; p_2 为变径柱塞碰撞安全阀时的气压, MPa; V_2 为变径柱塞碰撞安全阀时气体膨胀的体积, m^3 。

采用式(2)计算交错齿与安全阀发生碰撞缩径时的气压,可得碰撞时气体作用在变径柱塞上的推力。

$$F_{imy} = F_{g2} - G_p - G_1 \quad (3)$$

$$F_{im} = \frac{F_{imy}}{\cos 60^\circ} \quad (4)$$

式中: F_{g2} 为缩径时进气压力, N; F_{im} 为交错齿与安全阀碰撞时的碰撞力, N; F_{imy} 为交错齿与安全阀碰撞时的碰撞力径向分力, N。

当进气压力小于碰撞产生的轴向力、变径柱塞和所举液体所受重力之和时,变径柱塞将缩径通过安全阀。变径柱塞排水采气的动力由开井时井底产生的压差提供,假设变径柱塞举液量不变,随着变径柱塞上行,气体体积膨胀,作用在变径柱塞上的推力逐渐减小^[18]。考虑变径柱塞上行过程会产生摩擦和其他损耗,实际开井时变径柱塞上行时进气压力应大于发生碰撞缩径时计算出的推力。

由交错齿与锥体接触点的受力分析可知,井底压力为变径柱塞扩径、缩径与整个气举过程提供动力。当变径柱塞举液量过多时,井底压力不足,无法提供足够的进气压力,变径柱塞将无法缩径通过安全阀,导致排水采气失败;当变径柱塞上方举液量过少时,无法合理利用气井能量,举液效率低,造成资源浪费。因此,变径柱塞举升时进气压力及举液量的合理选择将会成为提高举液效率的关键。

3 变径柱塞室内试验

影响柱塞排水采气的因素包括地层能量、产液能力、产气量和气液比等^[19-20],模拟柱塞排水采气过程,进行变径柱塞室内排水采气试验。空气压缩机提供变径柱塞举升的动力;柱塞泵为模拟试验提供液体来源;基于海上气井复合管柱,采用内径 62.0 mm 透明管×1.00 m+金属螺纹短节+内径 58.7 mm 透明管×1.00 m+金属螺纹短节+内径 62.0 mm 透明管×1.00 m 的管柱(见图 6)。

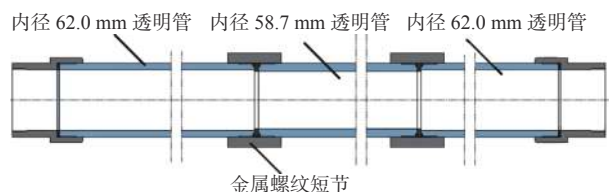


图6 变径柱塞试验管柱示意

Fig.6 Experimental pipe string of diameter-variable plunger

3.1 变径行为观测试验

通过观测透明管柱内的变径柱塞气举过程,确

定变径柱塞在上行过程中能否在一定气体压力推动下完成变径, 与缩径短节碰撞后缩径, 顺利通过试验管柱, 以验证变径柱塞结构设计的合理性。

图 7 为变径柱塞缩、扩径状态的对比, 图 7(a) 为变径柱塞缩径状态, 交错齿缝间隙合拢, 此时变径柱塞最大外径为 56.0 mm; 图 7(b) 为变径柱塞在一定气压下的扩径状态, 交错齿外扩出现间隙, 此时变径柱塞最大外径为 59.9 mm。

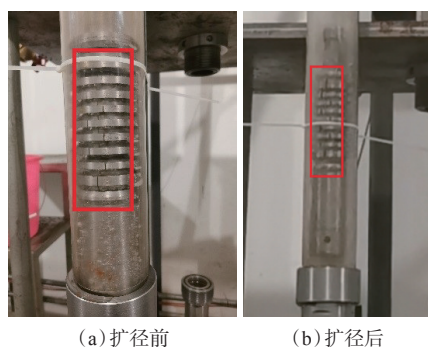


图 7 变径柱塞变径状态对比

Fig.7 Comparison of diameter-changing status of diameter-variable plunger

经验证, 变径柱塞在进气压力足够的前提下, 可以多次顺利完成扩径并与安全阀碰撞缩径, 可以在海上气井复合变径管柱中顺利运行。

3.2 举液量与进气压力试验

确定变径柱塞试验管柱后, 空气压缩机提供的气量越多, 进气压力越高。以变径柱塞上方举液量为变量, 记录扩径时对应的进气量, 获得变径柱塞扩径所需进气量与举液量之间的关系(见图 8)。由图 8 可看出, 变径柱塞在排水采气时举液量越多, 扩径所需进气量越大, 表明所需进气压力越高。

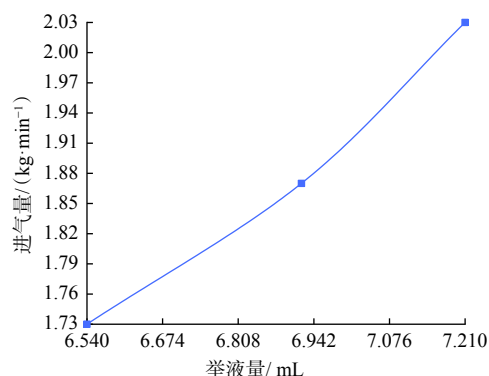


图 8 举液量与进气量的关系曲线

Fig.8 Relationship between liquid lifting capacity and air intake capacity

3.3 举液效率试验

进行变径柱塞举液效率试验, 控制试验时初始进气压力不变, 调节进气阀开度的大小, 从而改变变径柱塞气举上行的进气量; 变径柱塞气举试验的举液量为定值 21.87 L, 初始进气压力为 1.76 MPa, 进气阀开度为自变量, 试验得到进气阀开度(进气量)与变径柱塞举液效率之间的关系(见图 9)。

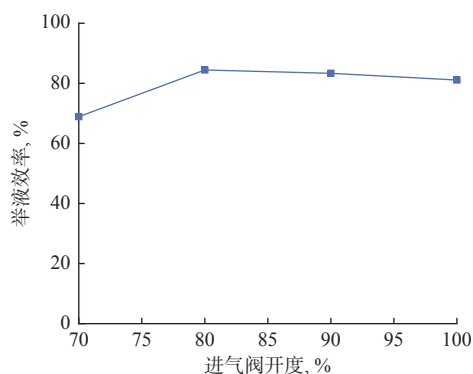


图 9 进气阀开度与举液效率的关系曲线

Fig.9 Relationship between intake valve opening and liquid lifting efficiency

由图 9 可得, 随着进气阀开度增大, 举液效率随之增大, 当进气阀开度为 70%~80% 时, 举液效率随着进气阀开度的增大而显著增大; 当进气阀开度在 80%~100% 时, 举液效率无明显变化。进气阀开度为 80% 时, 举液效果最优为 84.44%; 开度为 70% 时, 举液效果最低为 68.89%。试验表明, 变径柱塞室内排水采气试验举液效率最高可达 84.44%, 平均举液效率 75%, 可以将井底积液有效排出, 提高气井产气效率。

变径柱塞室内排水采气试验表明, 所设计变径柱塞结构可以在复合管柱结构中顺利运行, 变径柱塞扩径所需进气压力与气举时的举液量呈正比, 变径柱塞装置具有良好的举液效率, 可以满足排水采气的需求。

4 结论与建议

1) 针对海上气井复合管柱结构, 设计了一种变径柱塞, 该变径柱塞可扩径、缩径, 能顺利通过变径管柱, 满足海上气井复合管柱排液采气需求。

2) 变径柱塞扩径所需进气压力与举液量成正比, 该变径柱塞在实现变径的同时, 还具有良好的举液效率。

3)设计过程中未考虑变径柱塞与井筒之间的摩擦和井下温度与井深之间的关系,后续可进一步细化变径柱塞受力分析,为变径柱塞的精细化设计提供参考。

参考文献

References

- [1] 冯国强,隋义勇,冯国勇. 柱塞举升优化设计及敏感性分析[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 104-107.
FENG Guoqiang, SUI Yiyong, FENG Guoyong. Optimum design and sensitivity analysis for plunger lift[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 104-107.
- [2] 杜磊,王春凯. 柱塞气举排水采气技术研究[J]. 辽宁化工, 2022, 51(6): 860-862.
DU Lei, WANG Chunkai. Study on the technology of gas extraction by plunger gas lift[J]. Liaoning Chemical Industry, 2022, 51(6): 860-862.
- [3] 魏凯. 气田柱塞气举主体工艺技术探讨[J]. 石化技术, 2022, 29(12): 79-81.
WEI Kai. Discussion on the main process technology of gas field plunger gas lift[J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(12): 79-81.
- [4] 肖雨阳,李军亮. 柱塞气举排水采气井工作制度优化方法研究[J]. 天然气与石油, 2022, 40(6): 81-87.
XIAO Yuyang, LI Junliang. Study on optimization method of working system of plunger gas lift drainage gas production well[J]. Natural Gas and Oil, 2022, 40(6): 81-87.
- [5] ZHAO Kunpeng, MU Lijun, TIAN Wei, et al. Gas-liquid flow seal in the smooth annulus during plunger lifting process in gas wells[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 95: 104195.
- [6] 杨树坤,郭宏峰,郝涛,等. 海上油田电控智能控水采油工具研制及性能评价[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 76-81.
YANG Shukun, GUO Hongfeng, HAO Tao, et al. Development and performance evaluation of an electrically controlled intelligent water control and oil recovery tool for offshore oilfields[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 76-81.
- [7] 谭晓华,罗安,李晓平,等. 柱塞排水采气工艺适应性判别方法实验及理论研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 1042-1047.
TAN Xiaohua, LUO An, LI Xiaoping, et al. Experimental and theoretical study on the adaptability of plunger drainage gas production process[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3): 1042-1047.
- [8] 郎宝山. 稠油水平井大直径封漏堵水管柱的研制与应用[J]. 特种油气藏, 2022, 27(3): 157-162.
LANG Baoshan. Development and application of large-diameter sealing-plugging string in the heavy-oil horizontal well[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 27(3): 157-162.
- [9] 刘尧文,明月,张旭东,等. 涪陵页岩气井“套中固套”机械封隔重复压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 86-91.
LIU Yaowen, MING Yue, ZHANG Xudong, et al. “Casing in casing” mechanical isolation refracturing technology in Fuling shale gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 86-91.
- [10] 邵英博. 浅析海上油井井下安全阀的工作原理及技术分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(10): 243-244.
SHAO Yingbo. Analysis of the working principle and technical analysis of downhole safety valves for offshore oil wells[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(10): 243-244.
- [11] 迟国安,段秉红,高守华,等. 海上安全阀在线校验技术的应用探析[J]. 中国设备工程, 2021(增刊1): 58-61.
CHI Guoan, DUAN Binghong, GAO Shouhua, et al. Application of online calibration technology for offshore safety valves[J]. China Plant Engineering, 2021(supplement1): 58-61.
- [12] 蒋召平,王通,李海涛,等. 海上耐高温深水式井下安全阀的设计与试验[J]. 石油机械, 2019, 47(8): 74-78.
JIANG Zhaoping, WANG Tong, LI Haitao, et al. Design and test of high temperature deep-water subsurface safety valve[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(8): 74-78.
- [13] 陈晓宇,朱党辉,王大江,等. 柱塞排水采气技术在涪陵页岩气田的试验应用[J]. 钻采工艺, 2021, 44(4): 52-56.
CHEN Xiaoyu, ZHU Danghui, WANG Dajiang, et al. Experimental application of plunger drainage gas production technology in Fuling Shale Gas Field[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(4): 52-56.
- [14] 刘华敏,李牧,刘乔平,等. 涪陵页岩气田柱塞气举工艺研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 102-107.
LIU Huamin, LI Mu, LIU Qiaoping, et al. Research and application of plunger gas lift technology in the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 102-107.
- [15] 冷冰. 火驱同心双管分层注气管柱研制及试验[J]. 特种油气藏, 2020, 27(4): 149-155.
LENG Bing. Development and test of concentric dual-tube zonal-Gas injection string in fire-flooding[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(4): 149-155.
- [16] 吴勇,伊向艺,卢渊. 不关井连续生产柱塞气举技术研究[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 34(9): 3-4.
WU Yong, YI Xiangyi, LU Yuan. The research of continuous production plunger airlift without well off technique[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 34(9): 3-4.
- [17] SY/T 7623—2021 柱塞气举技术规范[S].
SY/T 7623—2021 Specification for plunger lift[S].
- [18] 周越,张国锋. 对等温条件下理想气体伯努利方程的讨论[J]. 物理与工程, 2021, 31(1): 22-24.
ZHOU Yue, ZHANG Guofeng. A discussion on the Bernoulli's equation of ideal gas under isothermal condition[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(1): 22-24.
- [19] 师浩文,刘捷,罗威,等. 棒状柱塞气举液体漏失模型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 101-106.
SHI Haowen, LIU Jie, LUO Wei, et al. Study on liquid leakage model of rod plunger gas lift[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2022, 37(1): 101-106.
- [20] 周际永. 不关井连续生产柱塞气举排水采气工艺研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
ZHOU Jiyong. Plunger lift drainage water gas production technology research for well startup continuous production[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.

[编辑 曹耐]