

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2022116

引用格式: 刘欢乐, 薛世峰, 孙志扬, 等. 喷射旋流复合排液工具结构参数优化及现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 90-96.

LIU Huanle, XUE Shifeng, SUN Zhiyang, et al. Structural parameter optimization and field test of a jetting and helical combination drain tool [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 90-96.

喷射旋流复合排液工具结构参数优化及现场试验

刘欢乐^{1,2}, 薛世峰¹, 孙志扬³, 周 朝², 范 杰²

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 3. 中石化江汉油田分公司石油工程技术研究院, 湖北武汉 430035)

摘 要: 为了降低生产流体在井筒中产生的压降、充分利用积液气井自身能量进行低成本排水采气, 研制了喷射旋流复合排液工具。在设计喷射旋流复合排液工具结构的基础上, 研制了其性能测试试验系统, 测试了不同气体流量下放置不同结构参数该工具时的模拟井筒压降, 开展了结构参数的单因素分析和正交试验分析, 得到了不同条件下喷射旋流复合排液工具最优的结构参数。研究结果表明, 喷射旋流复合排液工具的主要结构参数均会影响流体在井筒中产生的压降; 要使井筒中的压降最小, 不同产量的气井对应不同结构参数的工具。结构参数优化后的喷射旋流复合排液工具在西南地区 M 气田 A 井进行了现场试验, 在相同生产周期内, 累计产气量平均增加 20.95%, 累计产水量平均增加 21.59%, 验证了该工具的排液增产效果。研究和现场试验表明, 喷射旋流复合排液工具为积液气井低成本排水采气提供了一种新的技术手段。

关键词: 排水采气; 积液气井; 喷射旋流; 排液工具; 结构优化; 现场试验

中图分类号: TE358; TE931⁺.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)03-0090-07

Structural Parameter Optimization and Field Test of a Jetting and Helical Combination Drain Tool

LIU Huanle^{1,2}, XUE Shifeng¹, SUN Zhiyang³, ZHOU Chao², FAN Jie²

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China; 3. Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec Jiangnan Oilfield Company, Wuhan, Hubei, 430035, China)

Abstract: In order to reduce the pressure drop of production fluid in the wellbore and make full use of the energy of gas wells with fluid accumulation for low-cost drainage and gas recovery, a jetting and helical combination drain tool was developed. Based on the design of the tool structure, the performance test system of the tool was built. The simulated wellbore pressure drops at different gas flow rates with different structural parameters were tested, and the single factor analysis and orthogonal test analysis of the structural parameters of the tool were carried out. In addition, the optimal structural parameter combinations of the tool at different conditions were obtained. The results show that the main structural parameters of the tool affect the pressure drop of the fluid in the wellbore. Moreover, gas wells with different production rate require tools with different structural parameter combinations to minimize the wellbore pressure drop. After the optimized tool was run in Well A, the cumulative gas production increased by an average of 20.95%, and the cumulative water production increased by an average of 21.59% over a same production period. The drainage stimulation effect of the tool was demonstrated. The successful application of this tool provides a new technical method for low-cost drainage and gas recovery in gas wells with fluid accumulation.

Key words: drainage and gas recovery; gas well with fluid accumulation; jetting and helical; drain tool; structural optimization; field test

收稿日期: 2022-08-12; 改回日期: 2023-03-22。

作者简介: 刘欢乐 (1985—), 男, 陕西绥德人, 2008 年毕业于西安石油大学石油工程专业, 2011 年获中国石油大学 (北京) 油气田开发工程专业硕士学位, 在读博士研究生, 副研究员, 主要从事完井工程、采油气工程等方面的研究工作。E-mail: liuhuanle0404@163.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“涪陵页岩气井排水采气技术研究”(编号: P19025-3) 和中国石化科技部前瞻项目“井下气体压缩增能增产机理探索”(编号: P22231) 联合资助。

近年来,在积液气井中应用涡流排水采气技术,将涡流工具下至气井预定位置,从而排出井筒中存在的积液,具有工艺简单、安全可靠及成本低等优势^[1-4]。2003年,美国马拉松石油公司首次将涡流工具应用于美国 Carthage 气田等积液气井生产^[5-6];2010年起,中国石油、中国石化先后引进该技术,并进行了现场应用^[7-9]。但是,该工具在部分积液井的增产效果不明显,主要原因是对工具的作用机理认识不清,结构参数优化缺乏针对性。为此,国内外专家和学者从数值模拟和试验评价 2 个方面进行了相关研究^[10-11]。数值模拟方面,主要利用 FLUNT 软件进行分析,李隽等人^[12-15]利用该软件证实了气液两相在井筒中呈类环状流动,且气体的流速对螺旋流动的强度能够产生一定的影响;陈德春等人^[16-18]利用该软件定量分析了流体轴向上密度和持液率的变化情况;徐建宁等人^[19]利用该软件进行了正交试验,分析了影响排采效果的因素。试验评价方面,A. J. Ali 等人^[20]最早开展了涡流排采室内模拟试验,采用内径 50.8 mm、长度 38.0 m 的 PVC 圆管进行有、无涡流工具的对比试验,测试结果表明,涡流工具能够提高模拟井筒的携液量,并降低井筒压降;周朝等人^[21-25]建立了不同生产条件下的涡流工

具结构优化模型,利用试验方法对模型的准确性进行了验证。然而,目前的数值模拟方法仅能分析工具以上 2 m 内井筒的气液运动规律,而室内试验的温度和压力条件不同于井底的实际情况,因此,需要进一步完善涡流工具结构参数的优化方法。

为此,笔者在现有涡流工具的基础上研制了喷射旋流复合排液工具,利用自主设计的试验系统进行了喷射旋流复合排液试验,分析了喷射旋流复合排液工具结构参数对模拟井筒压降的影响;以模拟井筒压降最小为目标,通过正交试验和极差分析得到了不同气体流量所对应工具最优的结构参数,并进行了现场试验,为积液气井应用喷射旋流复合排液工具进行排采提供了优化方法和理论依据。

1 工具结构及工作原理

以现有的涡流工具和射流泵为基础,研制了喷射旋流复合排液工具,其主要由密封条、打捞头、旋流体、导流管、开有吸入孔的喷射管和接箍卡套等部件组成(见图 1)。生产流体通过喷射管内部的喷射结构进行加速、旋流体内部的螺旋结构进行分相,最终达到降低井筒压降的目的。

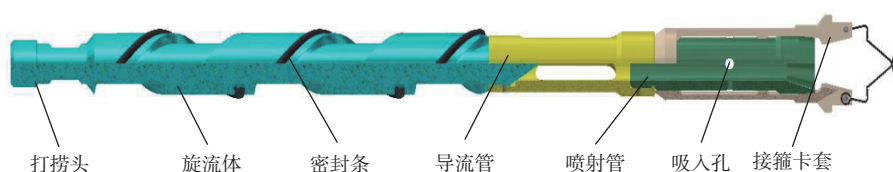


图 1 喷射旋流复合排液工具的基本结构

Fig.1 Basic structure of jetting and helical combination drain tool

喷射旋流复合排液工具的打捞头用于连接钢丝作业工具;旋流体用于引导气液两相混合流体做螺旋运动;旋流体上的密封条遇水膨胀后紧贴油管内壁,避免流体通过工具与油管之间的空隙;导流管用于引导流体平稳地从喷射管进入旋流体中;接箍卡套用于将工具卡在油管接箍处,从而将工具固定在井筒中;喷射管用于对气液两相混合流体进行缓慢加速,上面开有 4 个吸入孔,便于回流的液体被二次吸入;接箍卡套用于将工具固定在预定位置的油管接箍处。

利用钢丝作业将喷射旋流复合排液工具下至预定位置后,井底流体通过喷射管进入工具中,由于喷射管出入口面积不同,流体流出后势能减小,动能增大,速度高于入口流速,便于携带井筒中的积

液。然后,流体通过导流管和旋流体向井筒中流动,由于螺旋槽的引导作用和密封条的密封作用,气液混合流体的流动状态由直线紊流变为分相旋流,由于液相的密度较大,其被甩向油管壁并沿管壁以液膜的形式进行螺旋流动,而气相由于密度较小,在油管中心以气柱的形式向上运动。对于摩擦损失,当积液气井的井筒中存在喷射旋流复合排液工具时,气液两相混合流体通过时流体流动路径会变长,会使局部摩擦损失增大;而气液混合流体流过工具后,气液两相混合流动变为气液分相流动,相互干扰明显减少,井筒摩擦损失将会变小。在整个井筒中会出现摩擦损失“一增一减”现象。因此,只有通过优化工具的结构参数,使井筒摩擦损失的降低值小于局部摩擦损失的增加值,才能从整

体上降低整个井筒中的摩阻损失,进而提高气井的携液能力。另外,该工具不需要外界补充能量,也不需要后期维护,因此应用成本较低。

2 工具性能测试试验

根据喷射旋流复合排液工具性能测试需求,研制了测试其性能的试验装置,其主要由空压机、稳压罐、储水罐、阀门、气体流量计、液体流量计、气液混合器、模拟井筒、球阀、气液分离罐、单向阀和压力表组成(见图2)。

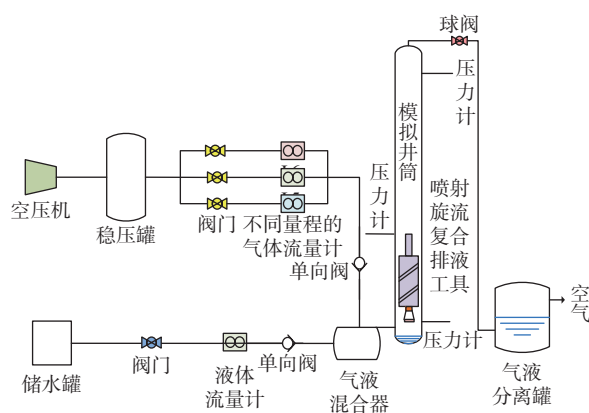


图2 工具性能试验装置

Fig.2 Tool performance test device

工具性能测试试验装置模拟井筒的内径 60 mm,高度约 15 m。试验用的喷射旋流复合排液工具通过 3D 打印获得。试验时,气液两相流体通过气液混合器,被均匀混合后进入模拟井筒,测试模拟井筒下入不同结构参数喷射旋流复合排液工具后,在不同气体流量条件下的井筒压降,分析工具结构参数对模拟井筒压降的影响,从而得到不同气体流量条件下工具最优的结构参数。

3 影响模拟井筒压降的因素分析

3.1 单因素分析

喷射旋流复合排液工具的螺旋角为 55° ,旋流体长度为 300 mm,螺旋体中径为 35 mm,螺旋槽宽度为 30 mm,喷射管内径为 20 mm,喷射管长度为 150 mm,吸入孔直径为 8 mm。设定气体流量为 60, 70 和 $80 \text{ m}^3/\text{h}$,分别测试并记录对应的模拟井筒压降;然后,改变螺旋角,其值分别取 25° , 35° , 45° , 65° 和 75° ,重复上述试验过程。根据试验测试结果,得到不同气体流量条件下不同螺旋角工具对应的模

拟井筒压降(见图3)。

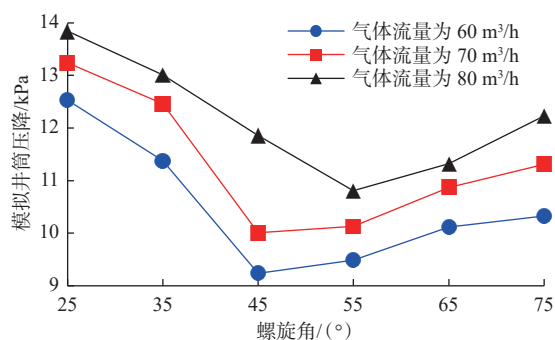


图3 不同气量下不同螺旋角工具所对应的模拟井筒压降

Fig.3 Simulated wellbore pressure drops for tools with different helix angles at different gas flow rates

从图3可以看出:在气体流量相同的条件下,随着螺旋角增大,模拟井筒压降先减小后增大,其主要原因是随着螺旋角增大,气液两相混合流体通过工具的阻力会减小,故模拟井筒压降会变小;随着螺旋角增大,涡流作用产生的向心力将会变弱,气液两相之间分相的效果变差,故模拟井筒压降又会变大。另外,在不同气体流量下,最小模拟井筒压降所对应的螺旋角各不相同,说明气体流量会对工具的最优螺旋角产生一定的影响。

利用螺旋角对井筒压降的测试评价方法,测试了旋流体长度、螺旋体中径、螺旋槽宽度、喷射管内径、喷射管长度及吸入孔直径对井筒压降的影响。测试结果表明,旋流体长度、螺旋体中径、螺旋槽宽度、喷射管内径、喷射管长度及吸入孔直径的变化也会影响井筒压降。

3.2 正交试验分析

由单因素分析结果可知,螺旋角、旋流体长度、螺旋体中径、螺旋槽宽度、喷射管内径、喷射管长度和吸入孔直径等结构参数均会对模拟井筒压降产生影响。为了得到在某一气体流量下工具最优的结构参数,采用正交试验方法优化工具的结构参数^[26]。

3.2.1 正交试验方案

根据已有涡流工具的结构参数,考虑喷射旋流复合排液工具本身的结构特征,并结合工具结构参数单因素分析结果,确定了喷射旋流复合排液工具各影响因素的取值水平(见表1)。

根据表1确定的工具主要结构参数及取值水平,采用正交试验方法制定试验方案,利用3D打印了32个不同结构参数的喷射旋流复合排液工具。在气体流量为 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 的条件下,32个不同结构参数工具的压降测试结果见表2。

表 1 各影响因素取值水平

Table 1 Value level of each influencing factor

水平	影响因素						
	旋流体长度/mm	螺旋角/(°)	螺旋体中径/mm	螺旋槽宽度/mm	喷射管内径/mm	喷射管长度/mm	吸入孔直径/mm
1	200	35	30	10	15	100	4
2	300	45	35	20	20	150	6
3	350	55	40	30	25	200	8
4	400	65	45	40	30	250	10

表 2 不同结构参数喷射旋流复合排液工具的模拟井筒压降

Table 2 Simulated wellbore pressure drops for jetting and helical combination drain tools with different structural parameter

序号	旋流体长度/mm	螺旋角/(°)	螺旋体中径/mm	螺旋槽宽度/mm	喷射管内径/mm	喷射管长度/mm	吸入孔直径/mm	井筒压降/kPa
1	200	35	30	10	15	100	4	12.23
2	200	45	35	20	20	150	6	12.71
3	200	55	40	30	25	200	8	14.69
4	200	65	45	40	30	250	10	10.69
5	300	45	35	40	15	100	6	9.85
6	300	35	30	30	20	150	4	12.05
7	300	65	45	20	25	200	10	10.07
8	300	55	40	10	30	250	8	9.30
9	350	65	40	40	15	150	8	8.00
10	350	55	45	30	20	100	10	10.81
11	350	45	30	20	25	250	4	9.33
12	350	35	35	10	30	200	6	7.52
13	400	55	45	10	15	150	10	9.20
14	400	65	40	20	20	100	8	9.56
15	400	35	35	30	25	250	6	10.69
16	400	45	30	40	30	200	4	10.02
17	200	65	30	30	15	250	4	9.13
18	200	55	35	40	20	200	6	9.49
19	200	45	40	10	25	150	8	9.98
20	200	35	45	20	30	100	10	8.38
21	300	55	35	20	15	250	6	9.69
22	300	65	30	10	20	200	4	12.93
23	300	35	45	40	25	150	10	11.91
24	300	45	40	30	30	100	8	8.69
25	350	35	40	20	15	200	8	11.07
26	350	45	45	10	20	250	10	12.10
27	350	55	30	40	25	100	4	8.80
28	350	65	35	30	30	150	6	7.44
29	400	45	45	30	15	200	10	8.83
30	400	35	40	40	20	250	8	8.62
31	400	65	35	10	25	100	6	9.56
32	400	55	30	20	30	150	4	6.21

3.2.2 正交试验结果分析

以螺旋角、螺旋槽宽度和旋流体中径等7个参数为影响因素,以模拟井筒压降最小为试验目标,根据正交试验结果,采用极差分析方法,确定最优试验方案(见表3)。

根据极差分析结果,可以得到各影响因素对压降的影响程度,其排序为螺旋角>旋流体长度>螺旋槽宽度>旋流体中径>喷射管长度>喷射管内径>

吸入孔直径。对实际的积液气井进行优化时,可以重点关注影响程度较大的螺旋角、旋流体长度及螺旋槽宽度等因素。同时,得到了喷射旋流复合排液工具最优的结构参数:螺旋角45°,旋流体长度300 mm,螺旋体中径35 mm,螺旋槽宽度30 mm,喷射管内径25 mm,喷射管长度150 mm,吸入孔直径8 mm。利用同样的方法,得到气体流量分别为70和80 m³/h时,工具最优的结构参数(见表4)。

表3 极差分析结果

Table 3 Range analysis results

计算结果	旋流体长度	螺旋角	螺旋体中径	螺旋槽宽度	喷射管内径	喷射管长度	吸入孔直径
K_1	87.5	83.3	80.7	83.8	83.0	77.9	80.7
K_2	76.5	72.5	74.9	80.0	84.1	77.5	77.0
K_3	78.2	82.1	79.9	75.3	75.2	84.6	76.5
K_4	77.4	81.7	84.0	80.4	77.3	79.6	82.4
最大值	87.5	83.3	84.0	82.8	84.1	84.6	82.4
最小值	76.5	72.5	74.9	76.3	75.2	77.5	76.5
极差	11.0	10.8	9.1	8.5	8.9	7.1	5.9

表4 不同气体流量下喷射旋流复合排液工具的最优结构参数

Table 4 Optimal structural parameter combinations of jetting and helical combination drain tool at different gas flow rates

气体流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	最优结构参数						
	旋流体长度/mm	螺旋角/(°)	旋流体中径/mm	螺旋槽宽度/mm	喷射管内径/mm	喷射管长度/mm	吸入孔直径/mm
60	300	45	35	30	25	150	8
70	300	45	40	30	25	150	8
80	300	55	40	40	25	150	8

从表4可以看出,不同气体流量下,喷射旋流复合排液工具最优的结构参数不同。因此,对于实际积液井,需要根据生产动态数据选择气体流量,优化喷射旋流复合排液工具的结构参数。

4 现场试验

喷射旋流复合排液工具需要依靠气井自身能量排出井筒积液,仅适用于还有自喷能力的气井。根据选井原则,选择西南地区M气田的A井开展了先导试验。该井为水平井,井深4 200 m,水平段长1 050 m,下喷射旋流复合排液工具前间歇生产,井筒处于积液状态。该井的井底温度105 ℃,井底压力3.8 MPa,气体压缩系数0.96,气体在地面的温度

为15 ℃,气体在地面的压力为0.1 MPa,利用气体状态方程,得到井底过喷射旋流复合排液工具气体流量为1 374 m³/d,因此,试验气体流量为60 m³/h对应最优结构参数的工具适合该积液气井。为此,选择表4中气体流量60 m³/h对应的最优结构参数加工喷射旋流复合排液工具;随后,将其下入该井井深约3 000 m、井斜角约50°的位置。

该井投产后,选取喷射旋流复合排液工具入井后的3个间歇生产周期与未下该工具前最后3个间歇生产周期的生产情况进行对比,结果如图4所示。

从图4可以看出:下入喷射旋流复合排液工具前3个间歇周期的累计产气量分别为18.22×10⁴, 19.72×10⁴和18.19×10⁴ m³/d,而下入该工具后3个间歇周期的累计产气量分别为22.13×10⁴, 22.72×10⁴和

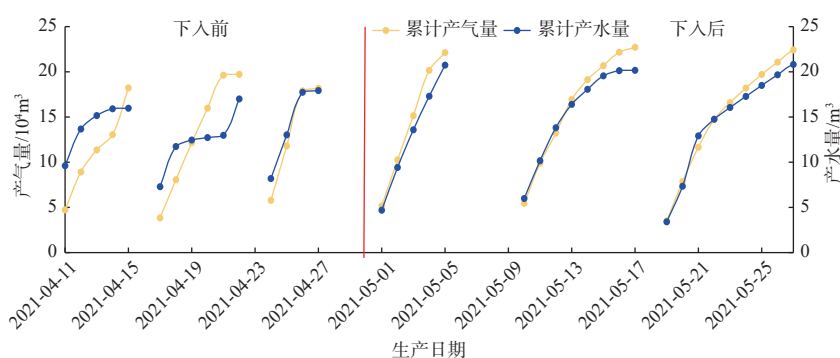


图 4 下入喷射旋流复合排液工具前后产量的变化情况

Fig.4 Production changes before and after tool running

$23.04 \times 10^4 \text{ m}^3$, 平均提高了 20.95%; 下入该工具前 3 个间歇周期的累计产水量分别为 15.97, 17.00 和 17.93 m^3 , 下入该工具后 3 个间歇周期的累计产水量分别为 20.74, 20.17 和 20.98 m^3 , 平均提高了 21.59%。应用该工具后, 产气量和产水量均有所增加, 说明该工具能够起到排液增产的作用。

5 结论与建议

1) 喷射旋流复合排液工具利用喷射管内部的喷射结构加速和旋流体内部的螺旋结构分相, 能够实现低成本排水采气。

2) 利用自主设计的喷射旋流复合排液工具性能测试系统, 完成了不同条件下不同结构参数喷射旋流复合排液工具的压降测试试验。利用正交试验测试了工具的性能, 利用极差分析方法, 得到了不同气体流量所对应工具最优的结构参数。

3) 与下入喷射旋流复合排液工具前相比, A 井下入该工具后累计产气量平均提高 20.95%, 累计产水量平均提高 21.59%, 说明该工具能够在积液气井中起到排液增产的效果。

4) 为了进一步提高喷射旋流复合排液工具的排液增产效果, 建议在优化该工具结构参数的基础上优化该工具的下入位置和下入级数, 并扩大该工具的应用规模。

参考文献

References

- [1] 王辉, 周朝, 周忠亚, 等. 页岩气井排水采气工艺综合优选方法[J]. 钻采工艺, 2022, 45(2): 154-159.
WANG Hui, ZHOU Chao, ZHOU Zhongya, et al. Comprehensive optimal selection method of drainage gas recovery technology for shale gas horizontal wells[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45(2): 154-159.
- [2] 周朝, 何祖清, 付道明, 等. 页岩气水平井全井筒临界携液流量模型[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(6): 791-797.
ZHOU Chao, HE Zuqing, FU Daoming, et al. Full-hole critical liquid carrying flow model of shale-gas horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(6): 791-797.
- [3] 蔡萌, 王美, 孙春龙, 等. 新型井下轴流式入口旋流器分析及优选[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(5): 594-599.
CAI Meng, WANG Yang, SUN Chunlong, et al. Analysis and optimization of a novel downhole axial flow inlet hydrocyclone[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(5): 594-599.
- [4] 周舰. 低压低产气井井下智能机器人排水采气技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 85-89.
ZHOU Jian. Drainage gas recovery technique with downhole intelligent robots in low pressure and low production gas wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 85-89.
- [5] SIMPSON D A. Vortex flow technology finding new applications[J]. Rocky Mountain Oil Journal, 2003, 83(45): 113103.
- [6] 黄艳, 余朝毅, 钟晓瑜, 等. 国外排水采气工艺技术现状及发展趋势[J]. 钻采工艺, 2005, 28(4): 57-60.
HUANG Yan, SHE Chaoyi, ZHONG Xiaoyu, et al. Resent situation and development tendency on the foreign technology of dewatering gas production[J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(4): 57-60.
- [7] 杨旭东, 卫亚明, 肖述琴, 等. 井下涡流工具排水采气在苏里格气田探索研究[J]. 钻采工艺, 2013, 36(6): 125-127.
YANG Xudong, WEI Yaming, XIAO Shuqin, et al. Research of downhole vortex dewatering gas recovery in Sulige Gas Field[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(6): 125-127.
- [8] 谢川. 川西产水气井井下涡流工具模拟与优化[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
XIE Chuan. Simulation and optimization of downhole vortex tools for water-gas wells in western Sichuan[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [9] 杨涛, 余淑明, 杨桦, 等. 气井涡流排水采气新技术及其应用[J]. 天然气工业, 2012, 32(8): 63-66.
YANG Tao, YU Shuming, YANG Hua, et al. A new technology of vortex dewatering gas recovery in gas wells and its application[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(8): 63-66.
- [10] 叶长青, 熊杰, 康琳洁, 等. 川渝气区排水采气工具研制新进展[J]. 天然气工业, 2015, 35(2): 54-58.
YE Changqing, XIONG Jie, KANG Linjie, et al. New progress in

- the R & D of water drainage gas recovery tools in Sichuan and Chongqing gas zones[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(2): 54–58.
- [11] 郭秀庭, 强华, 秦晓东, 等. 旋流排水采气技术研究 [J]. *油气井测试*, 2015, 24(3): 68–71.
- GUO Xiuting, QIANG Hua, QIN Xiaodong, et al. Research on vortex drainage gas recovery technology[J]. *Well Testing*, 2015, 24(3): 68–71.
- [12] 李隽, 李楠, 李佳宜, 等. 涡流排水采气技术数值模拟研究 [J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(6): 65–68.
- LI Juan, LI Nan, LI Jiayi, et al. Numerical simulation research on eddy current drainage gas recovery technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(6): 65–68.
- [13] 冯翠菊, 王春生, 张冀. 天然气井下涡流工具排液效果影响因素分析 [J]. *石油机械*, 2013, 41(1): 78–81.
- FENG Cuiju, WANG Chunsheng, ZHANG Hong. Influencing factor analysis of the liquid discharge effect of downhole vortex tool in natural gas wells[J]. *China Petroleum Machinery*, 2013, 41(1): 78–81.
- [14] 陈杰, 杨志, 耿凤康, 等. 井下涡流工具结构参数优化 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(30): 12385–12396.
- CHEN Jie, YANG Zhi, GENG Fengkang, et al. Structural parameter optimization of downhole vortex tool[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(30): 12385–12396.
- [15] 吴丹, 颜廷俊, 谢双喜, 等. 气井涡流排液采气工具参数仿真及结构优化 [J]. *石油机械*, 2014, 42(8): 111–115.
- WU Dan, YAN Tingjun, XIE Shuangxi, et al. Numerical simulation and structural optimization of vortex tool for liquid discharge in gas well[J]. *China Petroleum Machinery*, 2014, 42(8): 111–115.
- [16] 陈德春, 姚亚, 韩昊, 等. 气井涡流携液机理和携液效率数值模拟研究 [J]. *石油机械*, 2015, 43(9): 91–94.
- CHEN Dechun, YAO Ya, HAN Hao, et al. Numerical simulation on fluid-carrying mechanism and efficiency of vortex flow in gas wells[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(9): 91–94.
- [17] 陈德春, 姚亚, 韩昊, 等. 气井涡流工具排液效果及结构参数优化实验 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2016, 35(4): 109–112.
- CHEN Dechun, YAO Ya, HAN Hao, et al. Optimizing experiment on the liquid discharge effects and its structural parameters for gas-well vortex tool[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2016, 35(4): 109–112.
- [18] 于淑珍, 胡康, 宋渊娟, 等. 涡流排水采气技术机理研究及应用 [J]. *钻采工艺*, 2015, 38(3): 49–51.
- YU Shuzhen, HU Kang, SONG Yuanjuan, et al. Mechanism research and application of vortex drainage gas recovery technology[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(3): 49–51.
- [19] 徐建宁, 邵乐, 梁慧荣, 等. 基于正交试验的涡流排水采气影响因素分析 [J]. *石油矿场机械*, 2014, 43(11): 52–56.
- XU Jianning, SHAO Le, LIANG Huirong, et al. Based on orthogonal experiment analysis of factors affecting vortex drainage gas[J]. *Oil Field Equipment*, 2014, 43(11): 52–56.
- [20] ALI A J, SCOTT S L, FEHN B. Investigation of new tool to unload liquids from stripper-gas wells[R]. SPE 84136, 2003.
- [21] 周朝, 吴晓东, 张同义, 等. 排液采气涡流工具结构参数优化实验研究 [J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(6): 105–110.
- ZHOU Chao, WU Xiaodong, ZHANG Tongyi, et al. Experimental research for parameter optimization of the vortex tool for drainage gas recovery[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(6): 105–110.
- [22] ZHOU Chao, WU Xiaodong, ZHANG Tongyi, et al. Dynamic analysis for two-phase vortex flow and optimization of vortex tools to unload liquid from gas wells[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 173: 965–974.
- [23] 周朝, 吴晓东, 张同义, 等. 井筒两相涡流场液膜动力学分析与涡流工具优化 [J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(2): 54–59.
- ZHOU Chao, WU Xiaodong, ZHANG Tongyi, et al. Hydrodynamic analysis of liquid film of two-phase vortex flow in wellbore and optimization of vortex tool[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2020, 35(2): 54–59.
- [24] 宋先知, 李嘉成, 石宇, 等. 多分支井地热系统注采性能室内实验研究 [J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(1): 81–87.
- SONG Xianzhi, LI Jiacheng, SHI Yu, et al. Laboratory-scale experimental study on the injection-production performance of a multilateral-well enhanced geothermal system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(1): 81–87.
- [25] 叶正荣, 裴智超, 周祥, 等. 克拉2气田排水采气工艺优选及效果分析 [J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(3): 335–340.
- YE Zhengrong, QIU Zhichao, ZHOU Xiang, et al. Optimization and effect analysis of drainage gas recovery technology in Kela 2 Gas Field[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(3): 335–340.
- [26] 李庆东. 试验优化设计 [M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2016: 36–74.
- LI Qingdong. Optimum design of experiments[M]. Chongqing: Southwest Normal University Press, 2016: 36–74.

[编辑 滕春鸣]