

榆林南地下储气库注采井完井管柱的优化设计

汪雄雄¹ 樊莲莲¹ 刘双全^{1,2} 韩强辉¹

1. 中国石油长庆油田公司油气工艺研究院 2. “低渗透油气田勘探开发”国家工程实验室

汪雄雄等. 榆林南地下储气库注采井完井管柱的优化设计. 天然气工业, 2014, 34(1): 92-96.

摘要 地下储气库注采井与常规气田开发井运行工况存在着很大差异, 要求具有采气和注气双重功能, 能够实时监测井下动态, 在长期(30~50 a)频繁剧烈的注采气和压差变化下能够确保井筒的密封性和安全性。为此, 针对鄂尔多斯盆地榆林南地下储气库注采井气量大、周期性注强采的特点以及高安全性能、长使用寿命等的特殊要求, 应用节点分析方法对天然气的流入、流出注采过程、不同尺寸油管注采能力等进行了分析, 并结合冲蚀流量和临界携液流量等的计算结果, 最终确定了 I 类注采井(小于等于 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)采用 $\varnothing 139.7 \text{ mm}$ 油管, II 类注采井(小于等于 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)采用 $\varnothing 114.3 \text{ mm}$ 油管。通过管柱结构优化设计, 注采井采用井下悬挂压力计测压完井管柱, 从上至下完井工具包括“上流动短节+井下液控安全阀+下流动短节+循环滑套+永久式封隔器+磨铣延伸筒+堵塞坐落短节+带孔管+悬挂坐落短节”等。现场 2 个注采周期运行试验结果表明, 完井管柱能够满足地下储气库生产运行要求, 其设计方法可供同类储气库注采井完井设计时参考。

关键词 鄂尔多斯盆地 榆林南地下储气库 完井管柱 节点分析 敏感性 冲蚀流量 完井工具 井下安全阀 强注强采

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2014.01.014

An optimal design of completion string of an injection and production well in the Yulinnan Underground Gas Storage

Wang Xiongxiang¹, Fan Lianlian¹, Liu Shuangquan^{1,2}, Han Qianghui¹

(1. Oil & Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 2. State Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil and Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 34, ISSUE 1, pp.92-96, 1/25/2014. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Unlike a conventional gas development well, an underground gas storage (UGS) well has a dual function of gas production and injection. In this case, any downhole condition change requires to be timely monitored, and the tightness and safety of the well-bore should be ensured under long-term (30 - 50 years) frequent and intense gas production and injection with the fluctuation of differential pressure. In view of this, aimed at a large gas amount, periodic intensive injection and production, high safety performance, and long service life of an UGS well in the Yulinnan UGS, Ordos Basin, node analysis is applied to natural gas inflow and outflow dynamics and the capacity of different sized tubing. Combined with the calculation results of erosion flow and critical carrying liquid flow, the analysis results show that $\varnothing 139.7 \text{ mm}$ tubing is used in Class I wells ($\leq 200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) while $\varnothing 114.3 \text{ mm}$ tubing used in Class II wells ($\leq 80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$). With an optimal design of string structure, a pressure gauge is hung downhole in the UGS well to measure the pressure of completion string. The completion tools from top to bottom include “upper flow coupling + downhole hydraulic control safety valve + lower flow coupling + sliding side door + permanent packer + mill out extension + R landing nipple + perforated pup joint + RN landing nipple”. The test results of two injection cycles indicate that the completion string is capable of meeting the requirements for an UGS well and its design can be taken as a valuable reference.

Keywords: Ordos Basin, Yulinnan Underground Gas Storage, completion string, node analysis, sensitivity, erosion flow, completion tools, subsurface safety valve, intensive injection and production

作者简介:汪雄雄, 1982 年生, 工程师; 主要从事采气工艺研究和气田开发钻采工程方案编制工作。地址: (710021) 陕西省西安市未央区明光路中国石油长庆油田公司油气工艺研究院 1005 室。电话: (029) 86590721, 13772461006。E-mail: wxxiang_cq@petrochina.com.cn

鄂尔多斯盆地榆林南地下储气库选择上古生界二叠系山西组二段为储气层。气藏主砂体发育区气层厚度较大,向两侧砂体尖灭形成泥岩遮挡,是典型的砂岩岩性气藏,储层表现出较强的非均质性。储气层山₂³亚段的孔隙度为6.36%,渗透率为13.84 mD(最大值为409 mD),为低孔、低—中渗气藏。气藏埋深为2 841 m,原始地层压力为27.2 MPa,地层温度为86 ℃。天然气相对密度为0.58,甲烷含量为94%,H₂S含量为4.05 mg/m³,CO₂含量为1.78%。

储气库采用注气和采气双功能水平井,水平段采用筛管完井^[1],连续油管均匀布酸洗工艺。设计以

1 a 为1个注采周期,4个月采气,8个月注气和检修。采气最低井口压力6.4 MPa,注气最高井口压力28 MPa。

1 注采井产能方程的确定

由于储层非均质性强,气井产能存在差异,榆林南储气库注采井按照采气量2类井(表1)设计。气井二项式产能方程^[2]如下:

$$p_r^2 - p_{wf}^2 = a q_{sc} + b q_{sc}^2$$

式中 a 表示层流系数; b 为紊流系数; q_{sc} 为气井绝对无阻流量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

表1 榆林南储气库注采水平井产能方程参数及注采能力设计表

气井分类	地层压力/ MPa	无阻流量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	a	b	采气量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	注气量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
I类井	27.2	200	4.915 0	0.006 1	80~120	60
II类井	27.2	80	11.643 4	0.029 9	33~45	22

2 油管敏感性分析

采用节点分析方法,计算不同油管对气井产能的影响规律,用于指导注采井油管尺寸设计。选择井底为节点,首先做出流入动态曲线(IPR),然后根据给定井口压力(p_{wh}),计算各种油管尺寸的产量和井底流压(p_{wf})的关系,并做出油管动态曲线(TPR),IPR曲线和TPR曲线的交点即为各种油管的生产协调点^[3-5](图1)。

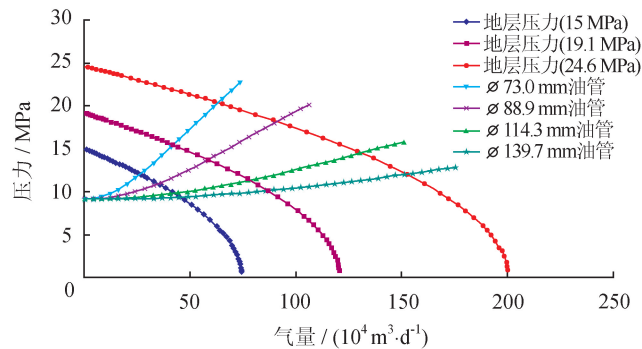


图1 油管尺寸对产量敏感性曲线图

储气库注采井产能高,油管对产量敏感。以无阻流量 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的气井为例, $\varnothing 114.3 \text{ mm}$ 及以下尺寸的油管,随着气量的增加,井筒压力损失增加明显(图2)。

3 油管尺寸的选择

注采井油管尺寸的选择首先需要满足地质与气藏

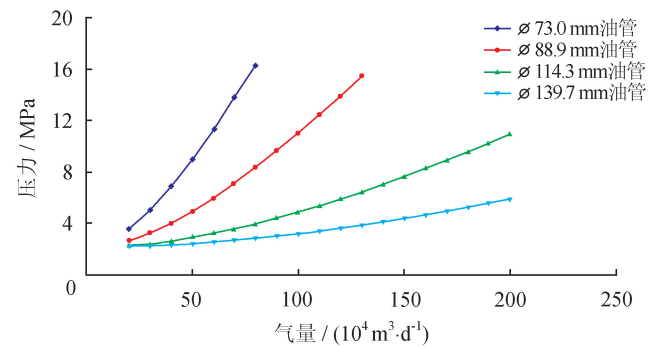


图2 不同产量对应的井筒压力损失图

工程设计的注、采气量要求,同时需要满足后期井下作业和连续酸洗作业的要求。

3.1 满足采气要求的油管尺寸

采气管柱尺寸的选择需要考虑协调点产量、冲蚀流量和临界携液流量等3个方面。

3.1.1 协调点产量计算

协调点产量是气井在一定井口压力条件下所能达到的最大气量。运用节点分析软件 PIPESIM 采用 Hagedorn-Brown 模型,在井口压力 6.4 MPa 条件下,对不同油管的协调点产量进行了计算。结果表明:在一定井口压力条件下,随着地层压力下降,油管协调点产量下降;相同条件下管径越大,协调点产量越大(图3、4)。

3.1.2 抗冲蚀性分析

高速流动的气体在金属表面上运动,在气体杂质机械磨损与腐蚀介质的共同作用下,会使油管腐蚀加

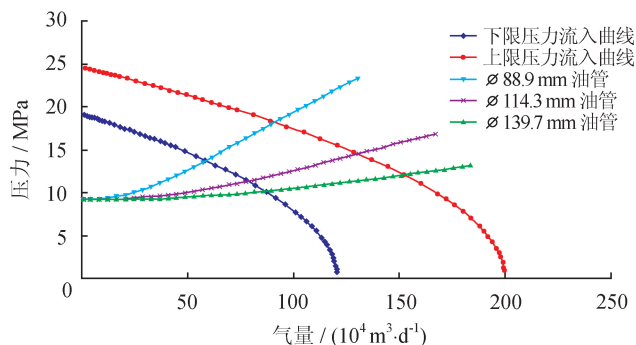


图 3 I 类井不同油管协调点产量图

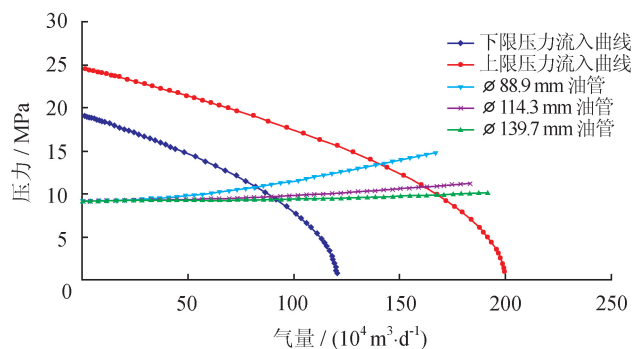


图 4 II 类井不同油管协调点产量图

速。实践表明,气体流速超过 21.3 m/s 时,管柱冲蚀趋于严重。储气库注采井运行过程中井口压力为整个井筒压力分布的最低点,冲蚀分析选择井口为研究点。表 2 是不同油管在对应井口压力下的冲蚀流量^[6-8]。

表 2 不同尺寸油管冲蚀流量计算值表

井口压力/ MPa	不同油管冲蚀流量/(10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)			
	∅73.0 mm	∅88.9 mm	∅114.3 mm	∅139.7 mm
6.4	32.05	48.16	83.37	126.14
10	41.59	59.08	102.65	152.50
14	50.45	71.86	123.33	183.22
18	57.36	81.71	140.24	208.35

3.1.3 油管携液能力分析

按照 Turner 携液模型计算了不同井底流压下的

最小携液流量(表 3)。榆林南储气库注采水平井产量高,产量能够满足携液生产的要求,携液能力不是油管尺寸确定的主要因素。

表 3 气井临界携液流量与井底流压关系表

井底流压/ MPa	不同油管临界携液流量/(10 ⁴ m ³ · d ⁻¹)			
	∅73.0 mm	∅88.9 mm	∅114.3 mm	∅139.7 mm
10	1.938	2.912	5.042	7.382
12	2.123	3.191	5.524	8.088
14	2.290	3.441	5.958	8.723
16	2.441	3.668	6.351	9.298

3.1.4 满足采气要求的油管尺寸

综合考虑注采井协调点产量、冲蚀流量、携液生产能力等因素。按照储气库上限压力(指地层压力)24.6 MPa、下限压力 19.1 MPa 两种情况,井口压力 6.4 MPa,计算不同油管的最大合理产量。

如表 4 所示,无阻流量为 200×10⁴ m³/d 时,采用 ∅139.7 mm 可以满足 86×10⁴~126×10⁴ m³/d 的采气要求;无阻流量为 80×10⁴ m³/d 时,采用 ∅114.3 mm 可以满足 35×10⁴~65×10⁴ m³/d 的采气要求。

3.2 满足注气的油管尺寸

注气产能方程采用与采气产能方程同一个产能方程。在注气压力 28 MPa 条件下,分别计算各类井的注入能力(表 5)。综合考虑协调点注气量和冲蚀流量,3 种油管均能够满足注气量要求。计算结果同时也表明,满足采气要求的油管尺寸均能够满足注气要求。

3.3 油管尺寸选择

综合油管的注、采气能力及后期作业需求,I 类井采用 ∅139.7 mm 油管,II 类井采用 ∅114.3 mm 油管。

4 管柱结构的优化设计

4.1 设计原则

- ①能够实现井下快速关断;
- ②能够实施更换管柱;
- ③能够建立井内循环;
- ④能满足动态实时监测的需要;

表 4 不同尺寸油管采气能力分析表

10⁴ m³/d

无阻流量	地层压力	∅88.9 mm			∅114.3 mm			∅139.7 mm		
		协调产量	冲蚀流量	最大产量	协调产量	冲蚀流量	最大产量	协调产量	冲蚀流量	最大产量
200	24.6 MPa	90.58	48.16	48.16	130.32	83.37	83.37	152.16	126.14	126.14
	19.1 MPa	58.37	48.16	48.16	77.39	83.37	83.37	86.96	126.14	86.96
80	24.6 MPa	56.39	48.16	56.39	65.17	83.37	65.17	66.80	126.14	66.80
	19.1 MPa	32.58	48.16	32.58	35.84	83.37	35.84	36.69	126.14	36.69

表 5 不同尺寸油管注气能力分析表

10⁴ m³/d

无阻流量	地层压力	Ø88.9 mm		Ø114.3 mm		Ø139.7 mm	
		协调气量	冲蚀流量	协调气量	冲蚀流量	协调气量	冲蚀流量
200	24.6 MPa	98	103	140	176	163	262
	19.1 MPa	125	103	198	176	223	262
80	24.6 MPa	59	103	70	176	72	262
	19.1 MPa	81	103	100	176	107	262

⑤单井工具采用同一厂家成熟产品,具有良好的防腐和密封性能。

4.2 管柱结构及功能设计

根据榆林南储气库基本情况和注采井运行过程中的功能需求,注采井采用井下悬挂压力计测压完井管柱(以下简称完井管柱),结构如图 5、表 6 所示。油管和完井工具采用气密封扣,保证管柱整体密封性。完井管柱从上至下包括:流动短节+井下液控安全阀+流动短节+滑套+锚定总成+永久式封隔器+磨铣延伸筒+筛管+喇叭口

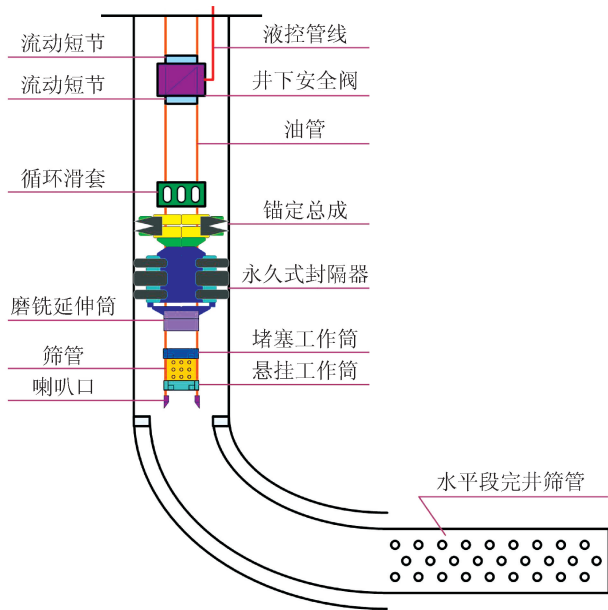


图 5 井下悬挂压力计测压完井管柱示意图

表 6 储气库注采试验井主要完井工具下深表

井下工具名称	井下工具深度/m	
	榆 A 井	榆 B 井
NE 井下安全阀	91.40	94.59
滑套	2 315.54	2 226.60
MHR 永久封隔器	2 330.09	2 240.96
R 坐落接头	2 346.47	2 257.53
RN 坐落接头	2 353.47	2 264.69
引鞋	2 353.69	2 264.89

延伸筒+堵塞工作筒+带孔管+悬挂工作筒^[9-10]。

完井管柱结构及功能特点:①安装了井下液控安全阀,能够在异常情况下快速关断井筒,防止气井失控;②循环滑套可以建立油套环空的通道,能够进行压井作业;③封隔器以上油管可以正旋起出;④永久封隔器配合环空保护液,可以减小生产流体对套管的腐蚀,延长气井使用寿命;⑤可以实现封隔器下部油管堵塞,更换上部管柱作业;⑥井内可以悬挂监测仪器;⑦管柱整体通径满足连续油管通过和作业要求^[11-13]。

4.3 完井管柱实施效果

榆林南储气库注采试验井榆 A 和榆 B 采用井下悬挂压力计测压完井管柱。榆 A 井采用 Ø114.3 mm 油管,完井管柱全井段最小内径 67.7 mm(RN 坐落短节处);榆 B 井采用 Ø139.7 mm 油管,完井管柱全井段最小内径 112.9 mm(RN 坐落短节处)。完井工具入井前测试合格,完井管柱下入施工顺利,封隔器一次坐封、试压及功能测试正常。完井后钢丝作业和连续油管储层改造管柱通过顺畅。

目前 2 口井已经完成了 2 个周期的注采试验。油套环空无带压情况,注采过程中采用存储式电子压力计监测井底压力变化(图 6、7),井下投捞检测工具钢丝作业顺利,完井管柱功能正常。

榆林南注采试验井榆 A 和榆 B 井注气过程中,井筒压力损失分析见表 7 所示,计算压力损失与实测的误差小于 2%。现场试验表明,室内节点分析软件模拟计算结果符合气井实际运行工况。

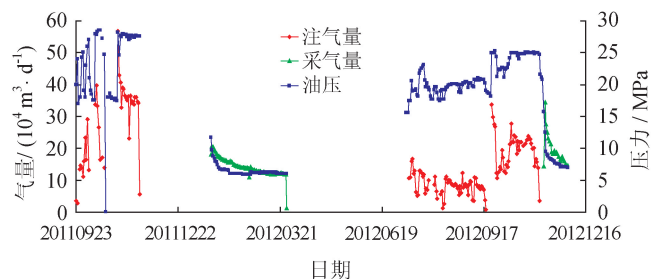


图 6 榆 A 井注采曲线图

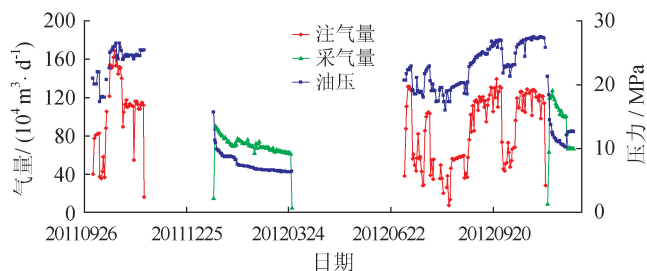


图 7 榆 B 井注采曲线图

表 7 井筒压力实际监测与模拟计算对比表

井号	注气工况		预测井底 流压/MPa	实测井底 流压/MPa	误差率
	井口压力/ MPa	注气量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)			
榆 A	27.50	35.095	33.287	32.895	1.19%
	27.70	40.627	33.721	33.219	1.51%
	27.90	38.457	33.468	33.115	1.06%
榆 B	20.08	81.654	24.298	23.859	1.84%
	24.10	103.256	28.897	28.792	0.89%
	24.38	163.774	28.479	28.246	0.82%

5 结论及认识

1) 利用节点分析方法模拟油管注采能力,是确定注采井油管合理尺寸的可靠方法。

2) 井下悬挂压力计测压完井管柱能够满足井筒安全控制、井下动态检测的要求。

3) 悬挂压力计测压完井管柱采用的永久性封隔器能够保护生产套管不与注采流体介质接触,尽可能延长注采井使用寿命。

4) 油管尺寸是限制管柱最大注采气量的主要因素。

参 考 文 献

- [1] 袁光杰,杨长来,王斌,等.国内地下储气库钻完井技术现状分析[J].天然气工业,2013,33(2):61-64.
YUAN Guangjie, YANG Changlai, WANG Bin, et al. Drilling and completion technologies for the underground gas storage (UGS) in China: A state-of-the-art appraisal [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 61-64.
- [2] 杨继胜.采气工艺基础[M].北京:石油工业出版社,1992.
YANG Jisheng. Gas production base [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [3] 金忠臣,杨川东,张守良,等.采气工程[M].北京:石油工业出版社,2004.
JIN Zhongchen, YANG Chuandong, ZHANG Shouliang, et al. Gas production engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [4] 彭建云,吴云才,杨淑珍,等.克拉 2 异常高压高产气田完井工艺技术研究[J].天然气工业,2005,25(12):77-80.

PENG Jianyun, WU Yuncai, YANG Shuzhen, et al. Abnormal high pressure and high production gas field Kela 2 well completion technology research [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(12): 77-80.

- [5] 杨再葆,王建国,张香云,等.京 58 地下储气库群潜山型地下储气库完井工艺技术[J].油气井测试,2011,20(2):44-47.
YANG Zaibao, WANG Jianguo, ZHANG Xiangyun, et al. Jing 58 underground gas storage well completion technology [J]. Well Testing, 2011, 20(2): 44-47.
- [6] 王嘉淮,罗天雨,吕毓刚,等.呼图壁地下储气库气井冲蚀产量模型及其应用[J].天然气工业,2012,32(2):57-59.
WANG Jiahuai, LUO Tianyu, LYU Yugang, et al. Research and application of the model of gas well erosion output of the Hutubi underground gas storage [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 57-59.
- [7] 潘牧,罗志平.材料的冲蚀问题[J].材料科学与工程,1999,17(3):92-96.
PAN Mu, LUO Zhiping. Erosion of materials [J]. Materials Science and Engineering, 1999, 17(3): 92-96.
- [8] 李国韬.大港地下储气库注采井完井冲蚀问题初探[J].小型油气藏,2006,11(1):62-63.
LI Guotao. Probe to the washout problem of the injection-production well in underground gas storage [J]. Small Hydrocarbon Reservoirs, 2006, 11(1): 62-63.
- [9] 徐小辉,刘利,陈进,等.玛河气田高压气藏完井工艺技术[J].天然气工业,2012,32(2):67-70.
XU Xiaohui, LIU Li, CHEN Jin. Completion of wells in high pressure gas reservoirs of the Mahe Gas Field [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 67-70.
- [10] 万仁溥.现代完井工程[M].3版.北京:石油工业出版社,2000:218-234.
WAN Renpu. Advanced well completion engineering [M]. 3rd edition. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 218-234.
- [11] 柴瑞林,张虎.长庆气田天然气井完井方式与完井管柱[J].天然气工业,2000,20(6):63-65.
CHAI Ruilin, ZHANG Hu. Well completion method and pipe string for natural gas wells in Changqing Gasfield [J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(6): 63-65.
- [12] 胡顺渠,许小强,蒋龙军.四川高压气井完井生产管柱优化设计及应用[J].石油地质与工程,2011,2(2):89-91.
HU Shunqu, XU Xiaoqiang, JIANG Longjun. Completed well production string optimum design and application of Sichuan high pressure gas well [J]. Petroleum geology and engineering, 2011, 2(2): 89-91.
- [13] 赵金洲,赵金海,杨海波,等.胜利油田水平井完井技术现状及研究展望[J].石油钻采工艺,2009,31(6):4-8.
ZHAO Jinzhou, ZHAO Jinhai, YANG Haibo, et al. Research status and prospect of horizontal well completion technology in Shengli Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(6): 4-8.