

储气库井试气工作制度及求产方法

刘宝华

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:sc_liubaohua@petrochina.com.cn

项目支持:中国石油大庆油田有限责任公司科技研发项目“试气方案设计及动态分析方法研究”(QR/SC/7-5-02 201301)

引用:刘宝华. 储气库井试气工作制度及求产方法[J]. 油气井测试,2021,30(6):41-46.

Cite: LIU Baohua. Gas testing working system and production method of gas storage well [J]. Well Testing, 2021,30(6):41-46.

摘要 大庆区块 S 站储气库砂岩气藏开采近 20 年,储层产能处于中后期,油藏整体欠压。以常规试气求产方法对储气库井进行试气效果不佳,甚至储层流体无法产出,无法对产能进行合理评价。根据实验区 S 站和 C51 储气库气田枯竭特点,通过优化该类型储层“一开一关”或“二开二关”开井方案、求产时间,以及不同级别油嘴下试气求产工作制度,保证了开井求产施工连续性,获取单井产能、原始地层压力,以及不同工作制度下的流压,获得合理的地层参数。SS1 井采用敞口控制分离器档板为 26 mm 试气,气突破及冲刷污染带后产量逐渐上升,最终充分解除井筒附近储层污染,获日产气 69 034 m³。优化后的大庆储气库试气求产方法为科学合理制定低压污染带储层注采方案提供了依据。

关键词 储气库;砂岩气藏;单井产能;储层污染;工作制度;试气;注采方案;地层参数

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.06.007

Gas testing working system and production method of gas storage well

LIU Baohua

Oil Testing and Production Branch, PetroChina Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163412, China

Abstract: The sandstone gas reservoir of S gas storage in Daqing block has been exploited for nearly 20 years whose production capacity was in the middle/late stage, and the overall reservoir was under pressure. The conventional gas testing method for gas storage wells has poor effect even cannot produce the reservoir fluids, so it is impossible to evaluate the production capacity reasonably. According to the gas field depletion characteristics of S station and C51 gas storage in the experimental area, by optimizing the well opening scheme of “one opening and one closing” or “two opening and two closing”, the production time, the gas testing and production system under different levels of nozzles of this type of reservoirs, the continuity of well opening and production construction is ensured. In addition, the single well production capacity, original reservoir pressure and flow pressure under different working systems can be obtained, so as to obtain reasonable formation parameters. The bore diameter of the open control separator baffle plate used in the gas testing process of well SS1 is 26 mm. After the gas breakthrough and scouring the pollution zone, the gas daily production gradually increases and reaches 69 034 m³ till the pollution near the wellbore is completely removed. The optimized gas testing and production method of Daqing gas storage provides a basis for scientifically and reasonably formulating the injection production scheme of low-pressure polluted reservoir.

Keywords: gas storage; Sandstone gas reservoir; single well production capacity; reservoir pollution; working system; gas testing; injection production scheme; formation parameters

中国近几十年已建成枯竭油气藏、盐穴 2 种类型的地下储气库^[1-3]。圈闭类型主要为自然形成的断块、断背斜和断鼻,储集空间为岩石孔隙结构,如粒间孔、溶孔和裂缝。盐穴型储气库分布在中国南方地区,地层时代局限为中-新生界,埋藏较浅,运行压力相对较低;圈闭类型为人造盐腔,储集空间为整个盐腔自由空间,单腔库容和工作气量较小;

注采灵活、速度快,每年可多次注采循环。含水层型储气库资源全国均有分布,特征与枯竭油气藏型类似,但一般优选埋深适中的建库目标^[4]。国外较早开始建设地下储气库。1963 年在美国克罗拉多 DENVER 附近,首次建成废弃矿坑储气库;法国在 1956 年开始地下战略储气库的建设;1959 年前,苏联建成第一个盐层地下储气库^[5]。从储气库近一

个世纪的发展来看,无论是季节调峰、应急供气、还是战略储备,都已经成为各国非常重视的一项工程。从国家和地区分布来看,全球地下储气库主要分布在天然气市场比较成熟的地区,北美、欧洲和独联体国家(主要是俄罗斯和乌克兰)拥有全球 98% 的在运地下储气库,占全球天然气日产量的一半。截至 2017 年底,美国有 388 座在运地下储气库,加拿大有 62 座,欧洲有 142 座地下储气库,独联体国家有 48 座。我国对地下储气库的建设起步较晚。在大庆油田曾利用枯竭气藏建造过两座地下储气库。萨尔图 1 号地下储气库于 1969 年建成,运行十多年后,因储气库与市区扩大后的安全距离问题而被拆除^[6]。大庆喇嘛甸地下储气库于 1975 年建成,于 1999 年对储气库进行扩建^[7]。20 世纪 90 年代初,我国真正开始研究地下储气库。杨明清等^[8]针对我国处于储气库建设初级阶段,分析了俄罗斯储气库建设关键技术,描述了俄罗斯储气库建设未来发展规划。在此基础上,对中俄储气库合作前景进行了分析,建议中国与俄罗斯在储气库建设方面开展合作,促进中国储气库建设快速发展。张光华^[9]针对我国多个省区在用气量高峰期都出现天然气供应紧张的状况,分析了中石化储气库发展建设面临的主要问题,提出充分借鉴和分享发达国家的经验,积极探索适合的战略储气库建设之路。马新华等^[10]针对中国复杂地质条件和储气库周期性大流量强注强采交变载荷工况,提出了以非均质水侵储集层有效库容量设计为核心的建库关键指标设计方法,实现了建设和运行高效且零事故。肖学兰^[11]提出了五条储气库建设、标准及管理建议,及时把握地下储气库建设技术研究现状。魏欢等^[12]通过分析天然气消费市场与天然气资源分离、能源结构等诸多因素,提出如何在资源与市场分离的情况下合理布局地下储气库,实现地下储气库工作气量占年消费量的 10%,达到基本供需平衡,保障天然气产业高速可持续发展。袁光杰等^[13]针对国内在建和拟建地下储气库基本情况,分析了环空带压、井身结构、钻井施工、固井、老井处理、关键工具和装备,以及规范和标准等方面存在的主要问题,指出应建立适合国内地质特点的储气库钻完井工程设计和施工技术规范。韩红旭等^[14]、张浩然等^[15]为避免苏里格地区气井压裂后对储层造成二次伤害,影响气井产能,结合伴注排液、连续油管气举排液等技术,通过工艺原理、适用条件、使用方法

等方面在现场实际应用情况的类比分析,提出合理利用地层弹性能量和气体携液能力是提高排液效率的重要手段,根据气井压后的实际情况,选择合适的排液方式,可达到指导作业现场快速排液的目的。李春等^[16]针对地下储气库扩容达产阶段压力、库存及地层流体处于不稳定状态等特征,建立了以井为单元、立足于单周期的配产配注综合方法。腰世哲等^[17]针对文 96 区块地质特征及注采井特殊要求,从井身结构、固井设计、完井设计、储层保护技术等方面开展了详细研究,形成适合文 96 地下储气库的注采井钻井配套技术。张晓冉等^[18]针对 SCA-DA 系统特点,提出应对文 96 地下储气库进行智能化集中管理。齐桂雪^[19]结合目标储气库地质、开发特征,通过室内实验,开展工况条件下多周期注采循环岩石渗透率应力敏感性评价、孔隙度应力敏感性评价,为储气库注采参数优化和库容评价提供依据。王志战^[20]以文 23 储气库为例,研究了枯竭砂岩气藏型储气库录井关键技术,建立了该储气库沙三段盐膏层断缺条件下盖层识别与评价方法,提高了井筒封闭完整性。贾善坡等^[21]综合本领域相关研究成果和全球现有储气库数据库资料,建立含水层储气库选址评价的目标层次结构模型,提出储气库选址评价体系中各基本指标的等级划分标准,研究成果对国内含水层储气库选址具有一定的指导意义。马小明等^[22]提出断层封闭性强弱是影响断块建库成败的关键,采用断层泥分布率、泥岩涂抹系数法对断层封闭性进行定量判别,确定了板南地区 BG1 断块断层具有良好封闭性,为断块型地下储气库封闭性评价提供了借鉴。

需要指出的是,国外储气库开发技术在我国还不完全适应,技术方面国内外的气井动态分析研究成果均是针对气田开采阶段,以优化气井生产和延长气井生命为目的。而试气阶段的方案制定是以获取地层参数和产能为目标。目前,还没有适合于大庆储气库建设的试气方案设计可借鉴。

1 储气库开关井工作制度优化

大庆储气库作为天然气调峰及战略储备的重要区域建设还处于初级阶段。王海燕^[23]、毕晓明等^[24]针对大庆储气库注采工艺,优化了考虑多因素影响的储气库气井注采能力。大庆区块 S 站储气库均属于枯竭气田型储气库,与常规开发气田存在显著差异(图 1)。截止到目前,储气库完成 SQ1 井等

5 口井试气,按照常规工作制度进行,其中“二开一关、二开二关”初开时间较短,如 SX2 井、SX3 井初开井时间分别为 20 min 和 5 min;CX1 井和 SS1 井均按常规试气工作制度采用“一开二关”进行,即射孔后直接关井。

曲线反向,得不到储层真实产能方程,无法科学合理制定注采方案。

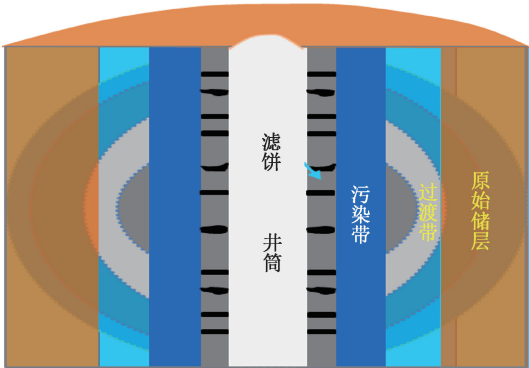


图 2 储气库井筒储层污染带示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wellbore reservoir pollution zone of gas storage

根据大庆区块四站和朝 51 储气库枯竭气田型特点,为避免储层污染导致产能偏低等结果,保证合理获得储层参数,采取优化开关井制度及时间方案,以期达到好的效果。其中开井初期以目的层为依据,参照试气方案,通过试井方法进行模拟设计,增加不同条件下一开井试气求产时间。这样,可以解除井筒附近污染,获得准确、可靠的原始地层压力。大庆区块四站和朝 51 储气库测试开关井制度及时间优化数据见表 1,压力历史曲线如图 3 所示。

由于部分井完井过程中泥浆入侵储层等原因(图 2),未初开井或初开井时间短,无法解堵井筒附近污染,导致地层流体状况不清。由此,按照常规试气工作制度及求产方法,无法录取到真实可靠的压力、温度、产量等地层参数,造成二项式产能方程

表 1 测试开关井制度及时间优化数据表

Table 1 Data sheet of the testing well switch system and time optimization

地质目的	工作制度	开井时间/min		关井时间/min		备注
		一开	二开	一关	二关	
压力,产量,地层参数	二开二关	30 ~ 60	2 880 ~ 4 320	4 320 ~ 5 760	4 320 ~ 5 760	一开井解堵
产量,地层参数	一开一关	2 880 ~ 4 320	/	4 320 ~ 5 760	/	一开井求产
压力,产量	二开一关	30 ~ 60	2 880 ~ 4 320	4 320 ~ 5 760	/	一开井解堵
产量,清晰流体性质	长开	2 880 ~ 4 320	/	/	/	长开井求产

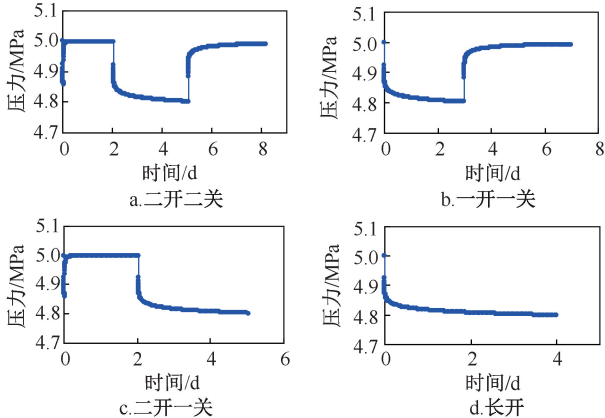


图 3 工作制度优化后的压力历史展开曲线

Fig. 3 Pressure history expansion curve after working system optimization

2 储气库试气求产方案优化

目前,储气库求产方式与火山岩和致密压后求产相似,采用逐级放大油嘴系统试气。根据储气库储层特征,试气求产过程逐渐解堵效果一般,影响获得准确可靠的产能方程,降低了注采效率。因此,需要对试气工作制度进行优化。

首先,试气初期采用大油嘴控制解堵。经过现场试验,这类储层开井初期采用 10 mm 油嘴试气,解堵效果不明显。优化后,采用大于 20 mm 油嘴控制开井试气并降低井筒液柱压力,地层产能突破污染带得到有控制的充分释放;其次,根据储层产能进行储层-井筒-地面节点分析,选择合理

的试气工作制度,系统试气后,得到了储层真实产能,同时进行试井分析,解释出合理的储层参数(图 4)。

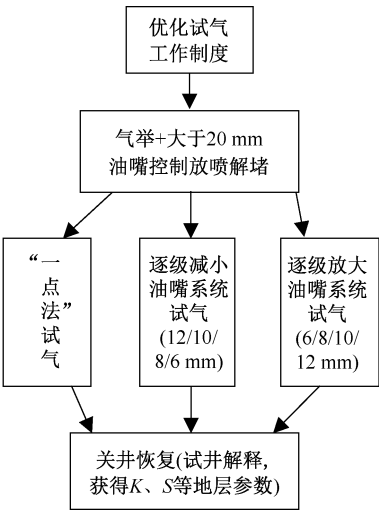


图 4 储气库试气工作制度优化流程图
Fig. 4 Optimization flow chart of gas testing system of gas storage

技术特点:采用大油嘴控制放喷解堵效果较好;缩短试气周期,提高试气效率,降低试气成本;获得准确可靠的产能方程,提高注采效率。

3 实例应用

SS1 井是位于松辽盆地中央坳陷区朝阳沟阶地四站背斜构造上的一口水平井(图 5),葡萄花油层具有统一的压力系统,气藏中部地层压力 5.81 MPa,温度 37.5 ℃,地层砂体较为完整。主要目的层为 8I-8Ⅷ号层,全井解释葡萄花储层有效长度 543.0 m,其中气层 302.6 m,差气层 240.4 m,平均厚度 45.0 m。

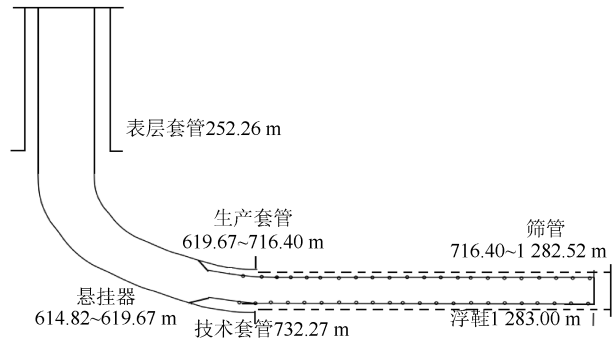


图 5 SS1 井井身结构示意图
Fig. 5 Wellbore structure diagram of Well SS1

本井试气初期(图 6①阶段),采用两相分离器临界流量计测气,3.61 mm 油嘴、8 mm 挡板,井口压

力由 3 MPa 降至 0 MPa,日产气由 4 451 m³ 降至 0 m³,气体无法从储层排出。随后,连续油管下深至 600.0 m,累计举出液 17.3 m³,其中清水 14.5 m³,泥浆 6.1 m³。出口见天然气(图 6②阶段)。后采用敞口控制分离器挡板为 26 mm 试气。在此期间,气突破及冲刷污染带后产量逐渐上升,最终充分解除井筒附近储层污染,而后分别采用 4.36 mm、6.35 mm、7.94 mm 和 11.91 mm,以及 15.88 mm 油嘴进行系统试气(图 6③阶段),日产气 69 034 m³。

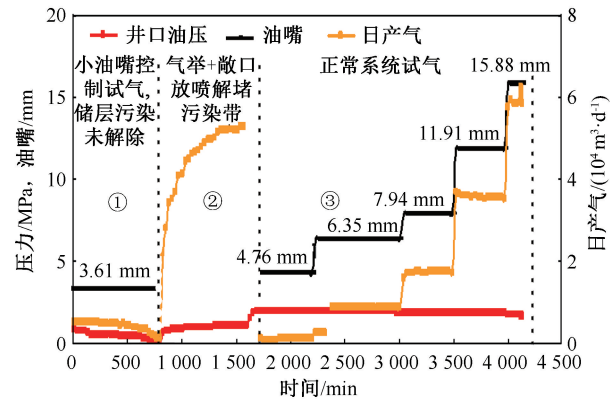


图 6 SS1 井试气前储层污染及解堵后试气曲线图
Fig. 6 Gas testing curve of reservoir pollution before gas testing and after plugging removal of Well SS1

本井解堵前储层流动能力差,气产量低;解堵后产量较高并进行了压力计测压。采用水平井数值模型,对测压数据进行试井解释分析(图 7、图 8),得到表皮系数为-3.15,渗透率为 95 mD,说明储层物性变好,污染解除。保证连续试气,通过系统试井,获得二项式产能方程,计算无阻流量为 21.186×10⁴ m³/d。

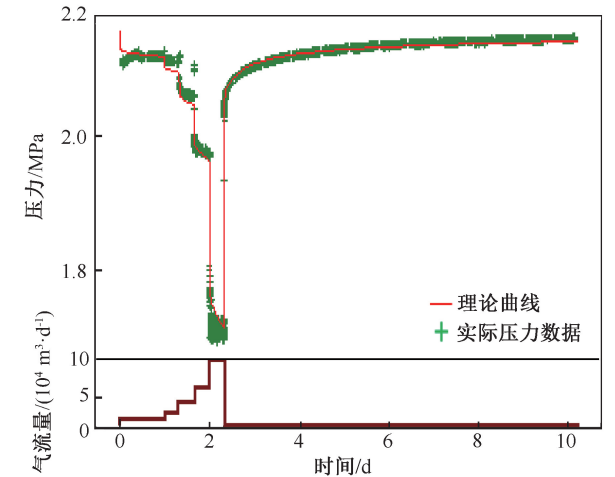


图 7 SS1 井压力历史拟合曲线
Fig. 7 Pressure history fitting curve of Well SS1

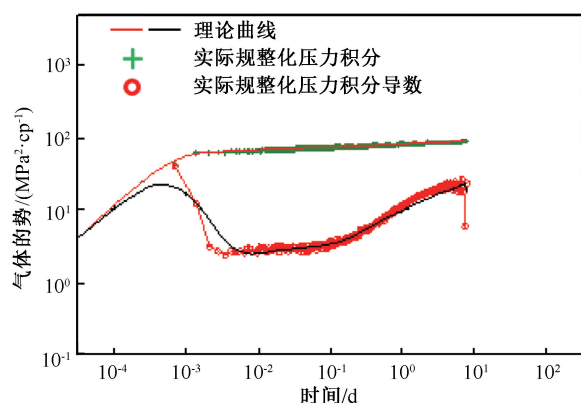


图8 SS1井双对数拟合曲线

Fig. 8 Double logarithm fitting curve of Well SS1

综合以上实例,SS1井作为较早开发区块的一口水平井,由于储层压力开始衰竭,钻井过程中易在井筒附近形成污染过渡区域。针对本井实际情况,需要在试气初期开关井时间及工作制度方面制定合理的方案,才能使产能得到释放。

4 结论

(1) 本文优化完善了大庆储气库试气工作制度,根据S站储气库砂岩油藏不同的地质目的选用合理工作制度,达到求取渗透率、表皮系数等地层参数目的,为储气库区块气井后期开发注采提供有效支撑。

(2) 本文优化了大庆储气库试气求产方法,指出大油嘴控制放喷解堵效果较好,有效缩短了试气周期,提高了试气效率,降低了试气成本。实例验证方法可靠。但值得注意的是,该种试气方法适用于低压储层,并且由于污染改变了井筒周边的导流能力,无法试气求产。

(3) 随着大庆储气库持续开发,涉及区域及层位不断扩大;同时,井筒结构多样,需要继续完善不同岩性、井型及储层深度条件下储气库井试气工作制度及求产方法,更好的指导后续试气施工。

致谢:感谢大庆油田试油试采分公司程晓刚、黄小云两位专家的悉心指导与帮助;感谢中国石油大学石军太、张洪老师的指导。

参考文献

[1] 何蕾. 枯竭油气藏型储气库运行可靠性研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2018.
HE Lei. Study on operation reliability of depleted gas storage [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.

[2] 徐凤兰,刘述忍,李琳琳,等. 枯竭油气藏储气库试注氮气评价注气能力方法[J]. 油气井测试,2021,30(4):

7-12.

XU Fenglan, LIU Shuren, LI Linlin, et al. Evaluation of gas injection capacity of depleted oil-gas reservoirs by nitrogen injection test in gas storage [J]. Well Testing, 2021,30(4):7-12.

[3] 张博,吕柏霖,吴宇航,等. 国内外盐穴储气库发展概况及趋势[J]. 中国井矿盐,2021,52(1):21-24.
ZHANG Bo, LYU Bolin, WU Yuhang, et al. Development and trend of salt-cavern gas storage in domestic and abroad [J]. China Well and Rock Salt, 2021,52(1):21-24.

[4] 魏雨泽. 中国地下储气库特征及建库导向探讨[J]. 世界石油工业,2021,28(5):62-70.
WEI Yuze. Discussion on characteristics and construction guidance of underground gas storage in China [J]. World Petroleum Industry, 2021,28(5):62-70.

[5] 苏欣,张琳,李岳. 国内外地下储气库现状及发展趋势[J]. 天然气与石油,2007,25(4):1-4,7.
SU Xin, ZHANG Lin, LI Yue. Status and development trend of foreign underground gas storages [J]. Natural Gas and Oil, 2007,25(4):1-4,7.

[6] 杨伟,王雪亮,马成荣. 国内外地下储气库现状及发展趋势[J]. 油气储运,2007,26(6):15-19.
YANG Wei, WANG Xuiliang, MA Chengrong. Underground gas storage—status and development worldwide [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2007,26(6):15-19.

[7] 沙宗伦,方凌云,方亮,等. 大庆喇嘛甸地下天然气储气库开发技术研究[J]. 天然气工业,2001,21(5):80-83.
SHA Zonglun, FANG Lingyun, FANG Liang, et al. A study of development technique of Lamadian underground natural gas storage in Daqing [J]. Natural Gas Industry, 2001,21(5):80-83.

[8] 杨明清,吴佼翰,卞玮,等. 俄罗斯地下储气库现状及未来发展[J]. 石油钻采工艺,2018,40(5):671-676.
YANG Mingqing, WU Jiaohan, BIAN Wei, et al. Present situation and future development of underground gas storage reservoirs in Russia [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018,40(5):671-676.

[9] 张光华. 中石化地下储气库建设现状及发展建议[J]. 天然气工业,2018,38(8):112-118.
ZHANG Guanghua. Underground gas storage of Sinopec: Construction status analysis and development proposals [J]. Natural Gas Industry, 2018,38(8):112-118.

[10] 马新华,郑得文,申瑞臣,等. 中国复杂地质条件气藏型储气库建库关键技术与实践[J]. 石油勘探与开发,2018,45(3):489-499.
MA Xinhua, ZHENG Dewen, SHEN Ruichen, et al. Key technologies and practice for gas field storage facility construction of complex geological conditions in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(3):489-499.

[11] 肖学兰. 地下储气库建设技术研究现状及建议[J]. 天然气工业,2012,32(2):79-82.

- XIAO Xuelan. Research and proposals on underground gas storage construction technologies [J]. Natural Gas Industry, 2012,32(2):79-82.
- [12] 魏欢,田静,李建中,等. 中国天然气地下储气库现状及发展趋势[J]. 国际石油经济,2015,23(6):57-62.
- WEI Huan, TIAN Jing, LI Jianzhong, et al. Status and development trend of underground gas storage in China [J]. International Petroleum Economics, 2015,23(6):57-62.
- [13] 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.
- [14] 韩红旭,贾建鹏,白建文,等. 苏里格气田快速排液技术[J]. 油气井测试,2020,29(1):35-42.
- HAN Hongxu, JIA Jianpeng, BAI Jianwen, et al. Rapid drainage technology in Sulige gas field [J]. Well Testing, 2020,29(1):35-42.
- [15] 张浩然,李引贤,雷迪澍. 试论苏里格气田排水采气工艺技术研究与应用[J]. 石化技术,2016,23(9):189,184.
- ZHANG Haoran, LI Yinxian, LEI Dishu. Application of drainage gas recovery in Sulige gas field [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016,23(9):189,184.
- [16] 李春,钟荣,王皆明,等. 地下储气库扩容达产阶段配产配注方法[J]. 石油管材与仪器,2019,5(2):39-42,46.
- LI Chun, ZHONG Rong, WANG Jieming, et al. Production and injection allocation method for underground gas storage at the stage of capacity expansion and production [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2019,5(2):39-42,46.
- [17] 腰世哲,张延斌,纪成学,等. 文96地下储气库注采井钻井技术[J]. 西部探矿工程,2015,27(1):45-47.
- YAO Shizhe, ZHANG Yanbin, JI Chengxue, et al. Wen 96 drilling technology for underground gas storage and injection wells [J]. West-China Exploration Engineering, 2015,27(1):45-47.
- [18] 张晓冉,薛辉,张磊,等. 文96地下储气库SCADA系统[J]. 油气田地面工程,2014,33(10):90-91.
- ZHANG Xiaoran, XUE Hui, ZHANG Lei, et al. Wen 96 SCADA system for underground gas storage [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014,33(10):90-91.
- [19] 齐桂雪. 枯竭气藏型储气库储层应力敏感性实验研究[J]. 石油地质与工程,2020,34(3):76-80.
- QI Guixue. Experimental study on reservoir stress sensitivity of underground storage of depleted gas reservoirs [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020,34(3):76-80.
- [20] 王志战. 枯竭砂岩气藏型储气库录井关键技术研究——以文23储气库为例[J]. 石油钻探技术,2019,47(3):156-162.
- WANG Zhizhan. Key mud logging technologies for depleted sandstone gas storage——Case study of the Wen 23 gas storage [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019,47(3):156-162.
- [21] 贾善坡,金凤鸣,郑得文,等. 含水层储气库的选址评价指标和分级标准及可拓综合判别方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(8):1628-1640.
- JIA Shanpo, JIN Fengming, ZHENG Dewen, et al. Evaluation indices and classification criterion of aquifer site for gas storage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(8):1628-1640.
- [22] 马小明,何雄涛,李建东,等. 板南地下储气库断层封闭性研究[J]. 录井工程,2011,22(4):77-79.
- MA Xiaoming, HE Xiongtao, LI Jiandong, et al. Study on fault sealing for Bannan underground gas storage [J]. Mud Logging Engineering, 2011,22(4):77-79.
- [23] 王海燕. 考虑多因素影响的储气库气井注采能力优化[J]. 大庆石油地质与开发,2019,38(3):54-58.
- WANG Haiyan. Optimization of the injection-production capacity of the gas storage well considering the influences of the multiple factors [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019,38(3):54-58.
- [24] 毕晓明,王海燕. 火山岩储层供气特征与开发规律[J]. 大庆石油地质与开发,2018,37(1):55-59.
- BI Xiaoming, WANG Haiyan. Gas supply characteristics and development laws of the volcanic reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018,37(1):55-59.

编辑 王 军

第一作者简介:刘宝华,男,1982年1月出生,工程师,2008年毕业于西南石油大学石油工程专业,现从事试气地质管理及解释评价工作。电话:0459-5691945,15504599307;Email:sc_liubaohua@petrochina.com.cn。通信地址:黑龙江省大庆市让胡路区乘南十八街铁人大道大庆油田试油试采分公司地质大队,邮政编码:163412。