

小型集成化气井排采工艺测试评价平台建设

张凤辉¹, 杨万有¹, 吴华晓², 郑春峰¹, 李昂¹, 赵景辉¹

- 1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300452
- 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院 天津 300459

通讯作者:Email:liang4@cnooc.com.cn

项目支持:中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司科研项目“适合海上积液气井的井下气液分离装置开发”(GCJSLZBG-1709)

引用:张凤辉,杨万有,吴华晓,等. 小型集成化气井排采工艺测试评价平台建设[J]. 油气井测试,2020,29(6):15-21.

Cite: ZHANG Fenghui, YANG Wanyou, WU Huaxiao, et al. Construction of a compact platform for quantitative evaluation and test to gas well drainage and production processes [J]. Well Testing, 2020,29(6):15-21.

摘要 为量化评价多种排采工艺适用性,基于海上气井生产特点和积液特征,设计并开发了占地面积小、操作方便的气井排采工艺评价试验平台。该试验平台配备有高压动力源、工艺评价物模系统、压力/流量测量仪及气液分离罐。工艺评价物模系统兼顾多种排采工艺评价装置,所有测量数据实现实时数据采集与远程调控,试验平台可对不同排采工艺在不同井斜和不同工况条件下的临界携液速度、分离效率、排液率、携液能力和井筒流态分布特征进行评价。以渤海某油田 B01 井为例,运用该试验平台开展了新型管道式高效气液分离器评价试验,证实该分离器特性曲线形态呈现“半交叉 X 形状”规律,最优工作区间含气率为 40%~70%,井斜角小于 70°,有效指导了高效分离器工艺参数设计,可为海上不同类型气井排采工艺优选提供试验评价手段。

关键词 集成化平台;排采工艺;气液分离;评价方法;分离器;海上气井

中图分类号:TE353 **文献标识码:**B **DOI:**10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.06.003

Construction of a compact platform for quantitative evaluation and test to gas well drainage and production processes

ZHANG Fenghui¹, YANG Wanyou¹, WU Huaxiao², ZHENG Chunfeng¹, LI Ang¹, ZHAO Jinghui¹

- 1. Engineering Technology Company, CNOOC Energy Development Co., Ltd., Tianjin 300452, China
- 2. Bohai Petroleum Research Institute, CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300459, China

Abstract: According to the production and liquid loading characteristics of offshore gas wells, a compact platform that is easy to operate for quantitatively evaluating and testing the suitability of gas well drainage and production processes has been designed and developed. The platform is equipped with a high-pressure power source, a physical model system, a pressure/flow meter, and a gas-liquid separator. The physical model system for process evaluation is useful for a variety of discharge and production processes. All data can be collected in real time and under remote control. The platform can evaluate various discharge and production processes at different well deviations and under different working conditions, including critical liquid carrying rate, gas-liquid separating rate, drainage rate, liquid carrying capacity and flow regimes. Taking Well B01 in an oil field in Bohai as an case, we tested the new pipeline gas-liquid separator on the platform, and found that the characteristic curve of the separator likes a “half crossing X”, and the gas cut in the optimal working interval is 40% to 70%, and the well deviation is less than 70°. These findings are effective to guide how to design separator parameters. The platform provides test and evaluation methods for selecting the optimal drainage and production processes for offshore gas wells.

Keywords: compact platform; drainage and production processes; gas-liquid separation; evaluation method; separator; offshore gas wells

在海上气田开发过程中,气井含水会不断上升,造成气井井筒积液甚至水淹停喷,气井产水量的不断增加对天然气的生产构成了严重的威胁,井底积液会造成气井产气量的减少甚至停产,影响气

田的高效开发^[1]。随着石油开采技术的发展,丛式井、大斜度井及水平井更为广泛的应用于海上气田的开发,这也造成海上气田开发难度大、作业成本高及作业风险高。

海上气井常用排采方式可分为间歇性排液和连续性排液方式。间歇性排液方式有泡排、连续油管诱喷及间歇气举等,该类工艺具有间歇排液量大,排液初期见效显著优点^[2-3];连续性排液方式有涡流^[4]、速度管柱^[5-6]、柱塞气举^[7]、机抽^[8-10]等,该类工艺排液具有连续性,排液量偏低,排采效果与地层能量紧密相关。然而,所有排采工艺成功应用的前提需准确预测不同参数(如井斜、含气率、压力及排液量等)条件下临界携液速度排液率、携液能力、井筒流态分布特征和分离效率等参数。所以,有针对性的选取高效排采参数是保障气井高效开采的重要手段。

石油行业多采用搭建试验平台的方式用于模拟实际生产过程中的问题,用于指导关键参数的设计及优选。例如高凯、廖开贵等人分别搭建了用于模拟气井排液携砂和气井排液采气工艺模拟系统^[11-12],李文庆、吴海浩、杨万有等人为了模拟油井结蜡规律,搭建了相应的试验评价系统^[13-15]。气井排采工艺测试评价试验平台是在气井排采工艺评价方法的基础上,通过模拟井下条件的排采试验获取工艺评价参数,实现多种井下排采工艺技术的效果评价,对石油天然气开发具有重要的指导意义。在现有的试验平台中公布有一种气井全生命周期工艺试验系统,该系统可以进行气井全生命周期工艺模拟及工程试验,包括气井压后排液、低压气井

诱喷排液、井下节流、修井工艺等施工工艺验证性试验^[16-18]。但该工艺需要借助陆地试验井才能完成,一方面在试验井井下难以获得井筒携液能力,井筒流态分布、分离效率及排液率等关键参数的评价,另一方面试验井成本投入较高,作业工作量较大^[19-20]。因此,开发一种占地面积小、操作便捷、集成化程度高、井筒多参数模拟评价且能够兼顾多种排采工艺测试评价的试验平台对油气田开发具有十分重要的现实意义。

1 测试评价平台设计

设计的测试平台具有很好的兼容性,可灵活方便的安装/更换海上气田开发常用的排采工艺评价装置(如高效气液分离器、速度管、液体泡排、气体加速泵、连续油管诱喷及氮气气举等),可实现井筒携液能力,井筒流态分布、分离效率及排液率在不同运行工况条件下的排采效果评价,占地空间小(5 m×2 m×3 m),系统具有小型化、集成化、自动化和多参数评价于一体的特点。

1.1 测试评价平台工作原理

测试评价平台上游连接的供气装置和供液装置提供带压液/气来源(来液由高压水泵提供动力,来气由空气压缩机提供动力),如图1所示。

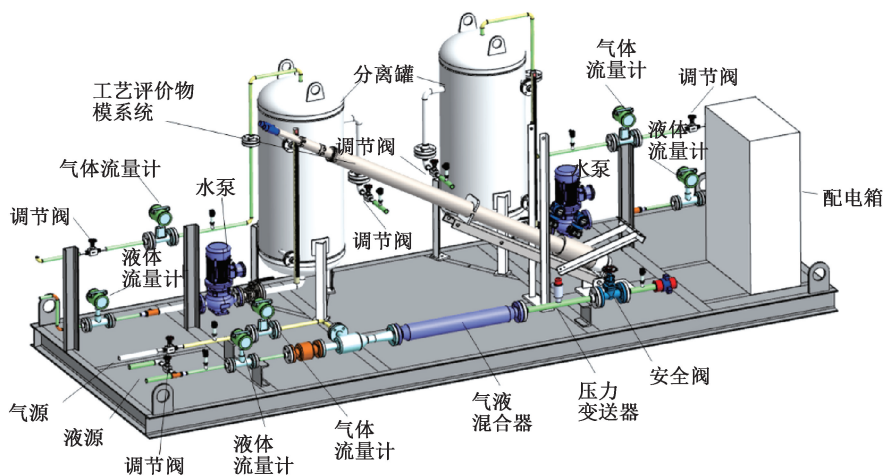


图1 平台三维效果展示图
Fig. 1 3D display of the platform

工艺评价物模系统前端连接有液体流量计、气体流量计和压力变送器。所提供的带压来液和带压来气通过设置的气液混合器充分混合后进入工艺评价物模系统。工艺评价物模系统后端连接有两个出口,出口端设置有两个分离罐,分离罐内设置连续液面记录仪,两个出口端连接有气体流量

计,用于精准计量分离后的气中含液率和液中含气率。两个分离罐经过重力沉降分离后气体计量后放空,液体计量后回流至水罐。在小型集成化测试评价平台各个节点位置安装有气体流量计、液体流量计、压力变送器和电控调节阀,在工艺评价物模系统两端设置有差压传感器。测试评价平台实现

10 种实时在线数据(入口压力,入口含气率,入口气量,入口液量,分流比,气灌和液灌的液位高度,液路/气路压差及出口压力)的采集、远传及存储,所有节点阀门实现远程无极调节。

1.2 测试评价平台评价方法

运用小型集成化排采工艺测试评价平台可实现多种井型的井筒积液、井筒携液和气液两相分离试验评价功能。

1.2.1 平台具备井筒积液试验验证功能

测试平台中安装的工艺评价物模系统具备角度调节功能,可实现 0°~90°无极调节,用来模拟直井、大斜度井和水平井井筒积液和携液规律。可根据实际井况条件设置入口来液压力、来液流量,入口来气压力、来气流量,入口含气率等关键参数,进而可以实现不同入口条件垂直管、倾斜管及水平管的积液规律的认识。

1.2.2 平台具备井筒携液能力评价试验验证功能

测试平台中安装的工艺评价物模系统具备很好的兼容性,可灵活方便的安装/更换海上气田开发常用的排采工艺评价装置,用来模拟评价增设速度管排液、泡沫排液、连续油管诱喷排液、氮气气举排液、气体加速泵排液及涡流排液等多种工艺后井筒携液能力的改善水平,进而指导不同排采工艺最优参数的选择。试验者可根据实际井况条件设置入口来液压力、来液流量,入口来气压力、来气流量,入口含气率等关键参数,通过远程控制电控调节阀开度控制工艺评价物模系统出口和出口的压力、流量和压差,模拟不同参数评价工艺的携液能力,进而优选排液工艺最优控制参数。

以速度管柱携液能力评价为例。开启供气装

置和供液装置使液体/气体通过混合器充分混合后进入工艺评价物模系统,通过调节电控调节阀实现试验所需的流量和压力值,混合气液进入速度管柱装置实现速度管柱携液举升。通过调节速度管柱出口端电控调节阀的开度,实现不同压力下的携液能力评价,通过调节井斜控制装置实现不同井斜下携液能力评价,通过改变速度管柱内径大小实现不同管径下携液能力评价。

1.2.3 平台具备气液两相分离性能评价试验验证功能

测试平台中安装的工艺评价物模系统上安装高效气液分离器装置,开启供气装置和供液装置使液体/气体通过混合器充分混合后进入工艺评价物模系统,并调节电控调节阀实现试验所需的流量和压力值,混合气液进入高效气液分离器装置实现气液分离。通过调节高效气液分离器出口端的出液口及出气口的开度,实现不同分流比下的分离效率评价,通过调节井斜控制装置实现不同井斜角度下分离效率评价,通过改变来液来气量模拟不同含气率下分离效率评价。

2 测试评价平台系统组成

小型集成化排采工艺测试评价平台主要有供气装置和供液装装置、气液掺混器、工艺评价物模系统、气路/液量计量系统、管汇阀门系统及气液分离罐组成。

2.1 数据采集系统

数据采集系统主要采集气体流量、液体流量、各个节点处的压力、含气率和液位高度等数据,所有采集数据实现实时在线采集与存储并以曲线形式显示,如图 2 所示。

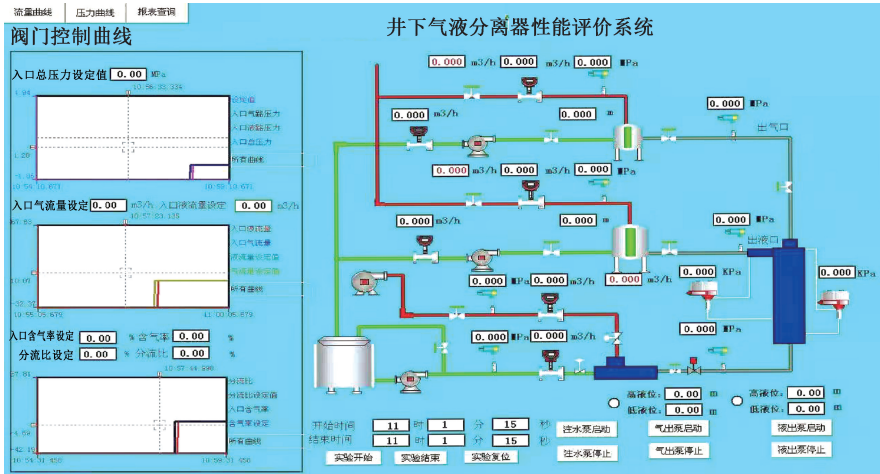


图 2 试验平台数据采集系统显示界面
Fig. 2 The display window of the data acquisition system

2.2 工艺评价物模系统

工艺评价物模系统可根据实际试验需求进行定制安装,如速度管排液、泡沫排液、连续油管诱喷排液、氮气气举排液、气体加速泵排液、涡流排液、高效气液分离器及气体处理器等。

2.3 气路/液量计量系统

压力变送器以螺纹连接、输出电流 4~20 mA、24 V 供电、量程 0~25 MPa。差压传感器以螺纹连接、测量范围 0~17 kPa、输出电流 4~20 mA、24 V 供电。气体流量计耐压 15 MPa、耐温 70 ℃、量程 1.5~2 000 Sm³/h,输出电流 4~20 mA、24 V 供电。液体流量计耐压 20 MPa、耐温 70 ℃,24 V 供电、输出电流 4~20 mA,流量范围 0.6~15.0 m³/h。

2.4 管汇阀门系统

管汇阀门系统采用电控调节阀,可实现实时在线采集、远传及存储,远程无极调节。

2.5 供气/液装置

供气装置采用大型空气压缩机,最大排量 1 200 Sm³/h,最大输出压力 15 MPa,供液装置采用高压柱塞泵,最大排量 8 m³/h,最大输出压力 20 MPa。

2.6 气液掺混器

气液掺混器由文丘里喷射混合器和静态混合器组合,耐压 20 MPa,气体最大流量 1 500 Sm³/h,液体最大流量 10 m³/h。

3 实际井测试评价验证

利用所设计的小型集成化排采工艺测试评价平台可实现多种井型的井筒积液、井筒携液和气液两相分离试验评价功能,并可以根据不同的试验要求设计合理的试验方案,达到评价验证的效果。

以海上某油田 B01 井为例。该井生产初期产气约 12×10⁴ m³/d,产水 1.8 m³/d,地层压力 22.1 MPa。随着生产的进行,地层压力逐渐降低,产水量逐渐增大,产气量降低。截止关停前,产水量增加至 55 m³/d,产气降低至 10 000~16 000 m³/d。为恢复该井产能,预采用井下管道式高效气液分离器与常规潜油电泵配合使用,将气液在进泵前进行分离,分离后的液流流至油套环空,通过电泵增压举升至地面,分离后的气通过排气管举升至井口。

为优化设计高效气液分离器参数,利用气井排采工艺评价试验平台对管道式高效气液分离器开

展分离效率性能评价试验,主要评价不同井斜、不同分流比及不同含气率等敏感性因素对该分离器分离效果的影响程度,确定分离器合理运行工作区间。

3.1 试验参数设计

为评价管道式旋流高效气液分离器分离效率性能,需引入两个指标参数的定义,即

分离效率定义:

$$\varepsilon = Q_{\text{gg}}/Q_{\text{lg}} \tag{1}$$

式中: Q_{gg} 为分离器气出口总气量,m³/h; Q_{lg} 为分离器入口总气量,m³/h; ε 为分离效率,%。

分流比定义:

$$F = Q_{\text{L}}/Q_{\text{I}} \tag{2}$$

式中: Q_{L} 为分离器出液口总流量,m³/h; Q_{I} 为分离器入口总流量,m³/h; F 为分离比,小数。

基于海上某油田 B01 井生产参数、井身轨迹,试验按照不同井斜角(45°、60°和 70°)、不同含气率(30%、50%和 65%)在不同分离比下分离效率性能,按照分离比为 0.15、0.25、0.35、0.55、0.70 进行试验评价,试验参数的选用见表 1、表 2。

表 1 不同井斜角度情况下气液分离器分离效率评价试验参数选用表

Table 1 Evaluation parameters of separating efficiency of gas-liquid separators at different well deviation

含气率/ %	井斜角/ (°)	气量①/ (m ³ ·d ⁻¹)	气量②/ (m ³ ·d ⁻¹)	液量/ (m ³ ·d ⁻¹)	入口流量①/ (m ³ ·d ⁻¹)
65	45	103.4	10 490	55.6	159.0
65	60	103.4	10 490	55.6	159.0
65	70	103.4	10 490	55.6	159.0

①10 MPa 条件下;②折算至标准状况下。

表 2 不同含气率情况下气液分离器分离效率评价试验参数选用表

Table 2 Evaluation parameters of separating efficiency of gas-liquid separators at different gas cut

含气率/ %	井斜角/ (°)	气量①/ (m ³ ·d ⁻¹)	气量②/ (m ³ ·d ⁻¹)	液量/ (m ³ ·d ⁻¹)	入口流量①/ (m ³ ·d ⁻¹)
30	60	23.8	2 383	55.6	79.4
50	60	55.6	5 560	55.6	111.2
65	60	103.4	10 490	55.6	159.0
75	60	166.8	16 680	55.6	222.4

①10 MPa 条件下;②折算至标准状况下。

3.2 试验步骤

以入口含气率 65%,井斜 60°,工作压力为 10 MPa、入口总流量 159 m³/d 为例,具体试验步骤如下:

步骤 1:按图 1 连接试验设备,检查管路是否畅通,检查电路确保用电安全,调试水泵、压缩机,将水罐中充满 2/3 工业用水,气液分离器调整到与地面垂直线 60° 夹角;

步骤 2:通过控制台打开所有电控调节阀,开启空气压缩机和高压水泵,缓慢提升空气压缩机和高压水泵压力,实验系统稳定循环 5 min,检查实验管路中是否存在泄漏点,保证试验系统完整循环;

步骤 3:保持出气口/出液口电控调节阀开度不变,缓慢调节空气压缩机和高压水泵在设定的工作压力,使压缩机压力缓慢上升,系统压力稳定在 10 MPa;

步骤 4:保持出气口/出液口电控调节阀开度不变,缓慢调节空气压缩机和高压水泵在设定的工作排量,按照 65% 的含气率,调节入口来气总量和来液总量(来气总量 103.4 m³/d,来液总量 55.6 m³/d),在整个过程中应确保系统工作压力 10 MPa 不变;

步骤 5:保持出气口电控调节阀开度不变,缓慢同步调节出液口电控调节阀开度,调节使分流比达到设定值(如 $F=0.15$);

步骤 6:记录实时采集数据,内容包括入口总气量、总液量,出液口液量、气量,出气口气量、液量,含气率,分流比,入口压力,出液口压力,出气口压力,气路压降和液路压降等;

步骤 7:增加分流比值(如改变分流比 $F=0.30$),重复步骤 5~步骤 6,直至完成所有分流比评价试验;

步骤 8:按照表 1 改变井斜角(如改变井斜角为 0°),重复各组实验重复步骤 4~步骤 6,直至完成所有井斜角评价试验;

步骤 9:按照表 2 改变含气率(如改变为 30% 含气率),重复各组实验重复步骤 4~步骤 6,直至完成所有含气率评价试验;

步骤 10:试验完成后先停空气压缩机气体,再停止高压水泵供水,拆卸设备、清洗设备。

3.3 试验结果评价

通过试验评价分析了不同井斜角、分流比、入口含气率等条件下管道式高效气液分离器分离效率性能,可有效指导了气液分离举升关键参数的优化设计。

3.3.1 试验评价实时数据采集

按照上述试验步骤,评价管道式高效气液分离器分离效率性能,试验时系统平台采集到的实时数据如图 3 所示。

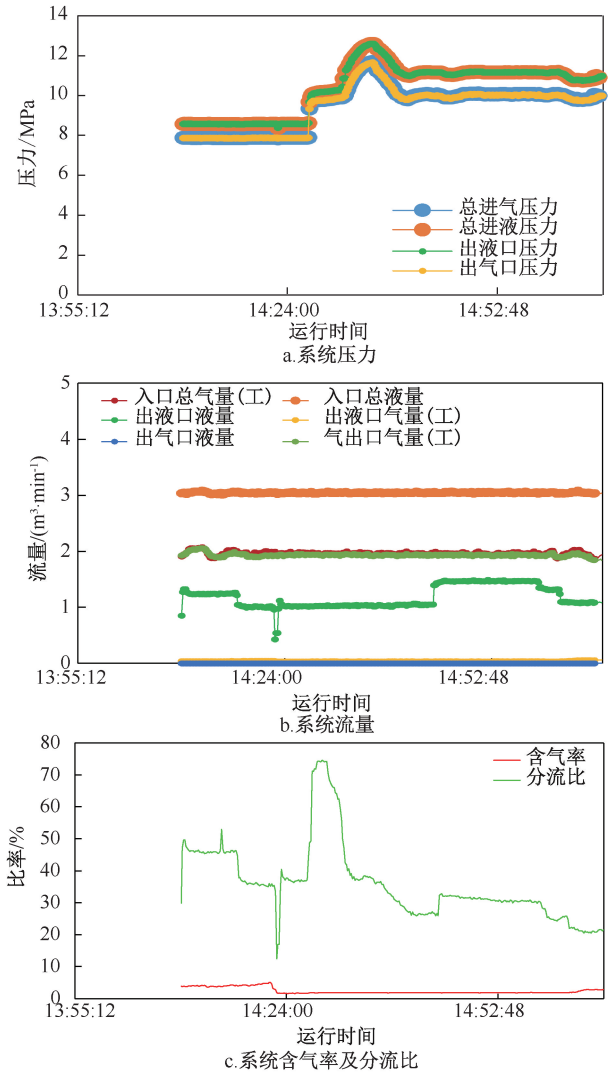


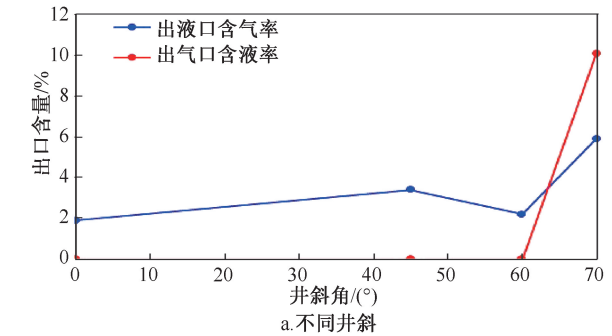
图 3 气井排采工艺评价试验平台实时数据采集曲线图

Fig. 3 Real-time data acquisition of the experiment platform for evaluation and test to gas well drainage and production processes

从图中可以看出,进出口压力一致性较好,进出口流量平稳,含气率及分流比数据稳定,采集数据具有较高的质量,可用于试验评价。

3.3.2 试验结果分析

高效气液分离器分离性能评价试验结果如图 4 所示。



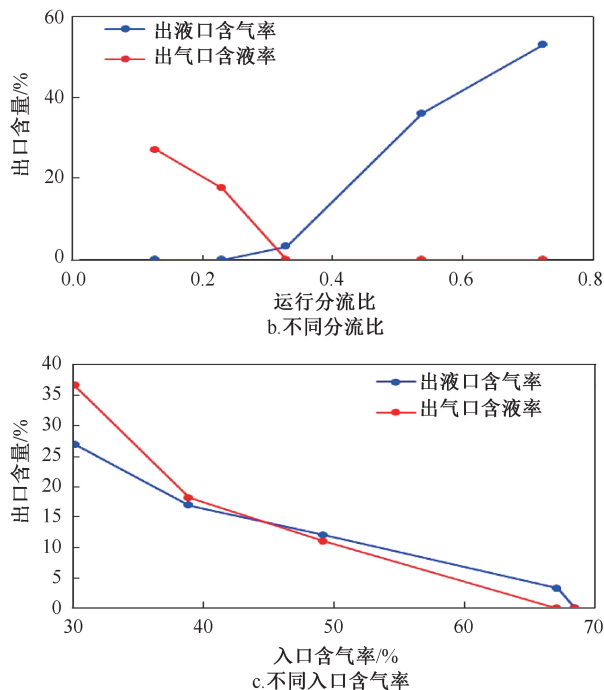


图 4 不同敏感性因素情况下高效气液分离器分离性能评价曲线图

Fig. 4 Evaluation of separating performance of gas-liquid separators with different sensitivity factors

试验结果表明:

(1)改变井斜角度,出气口含液率小于 10%,出液口含气率小于 8%,当井斜大于 70° 时分离器出口端含率增加,分离效果变差。

(2)不同分流比下气液分离器性能曲线形态呈现“半交叉 X 形状”规律,且存在一个最优分流比,该运行区间内分离器处于高效分离状态。

(3)随着入口含气率的增加,气液分离器出液口含气率和出气口含液率随之减少,当入口含气率上升至 40% 时,出口含量下降至 15% 以下。因此,该分离器更适用于高含气率工况,而对低含气率工况适用较差。

基于气液分离器性能评价试验结果,综合考虑 B01 井配产指标及井身结构,采用自主编制的计算软件模拟气液分离举升工艺后日产液 55 m^3 、日产气 $15\,000 \text{ m}^3$,推荐高效分离器下深 2 511 m (MD),气液分离器入口压力 9.8 MPa,分离效率 93%。

4 结论

(1)开发了一套井筒多参数模拟的排采工艺评价试验平台,具有占地面积小、操作方便、数据实时采集和远程调控等优点,可模拟不同井斜、气液比、压力等条件下井筒积液规律和多种排采工艺适用

性,可为排采工艺评价提供科学试验平台。

(2)应用试验平台对海上某油田 B01 井进行气液分离举升关键参数评价试验,高效气液分离器下深处井斜角小于 70° ,最优工作区间含气率在 40%~70%,有效指导了气液分离举升关键参数的优化设计。

(3)未来可进一步优化试验流程,用于评价油气水三相流体流态分布、不同运行工况条件下排采效率,有效指导高气液比油井、凝析气藏举升方式优选。

致谢:感谢工程技术分公司和中海油天津分公司同意本文公开发表;感谢工程技术分公司“适合海上积液气井的井下气液分离装置开发”项目组相关技术人员的大力支持。

参考文献

- [1] 谢双喜,王亚慧,王东,等. 渤海气田气井井筒积液预测方法分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2018, 15(23): 60-63.
XIE Shuangxi, WANG Yahui, WANG Dong, et al. Analysis of prediction method for wellbore fluid accumulation of gas wells in Bohai gas field [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2018, 15(23): 60-63.
- [2] 于相东,陈天应,张克杨,等. 苏里格气田泡沫排水采气技术工艺应用及效果分析[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 56-57.
YU Xiangdong, CHEN Tianying, ZHANG Keyang, et al. Application of foam draining and extraction technology of Sulige gas field and its effect analysis [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 56-57.
- [3] 田向东,康露,杨志,等. 海上油气井快速诱喷测试技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 41-46.
TIAN Xiangdong, KANG Lu, YANG Zhi, et al. Fast testing of induced flows in offshore oil/gas wells [J]. Well Testing, 2018, 27(2): 41-46.
- [4] 冯翠菊,王春生,张冀,等. 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, et al. 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.
- [5] 赵彬彬,白晓弘,陈德见,等. 速度管柱排水采气效果评价及应用新领域[J]. 石油机械, 2012, 40(11): 62-65.
ZHAO Binbin, BAI Xiaohong, CHEN Dejian, et al. Effect assessment of drainage gas recovery through velocity string and its new application area [J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(11): 62-65.
- [6] 贾俊敏,孙翠容. 英买气田小直径油管排水采气技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(6): 54-58.
JIA Junmin, SUN Cuirong. Small diameter tubing drainage

- and gas recovery technology in Yingmai gas field [J]. Well Testing, 2019,28(6):54-58.
- [7] 殷庆国,刘方,贺杰新,等. 柱塞气举排水采气工艺技术研究与应[J]. 石油机械,2018,46(9):69-74.
- YIN Qingguo, LIU Fang, HE Jiexin, et al. Study and application of plunger gas lift for water drainage and gas recovery technology [J]. China Petroleum Machinery, 2018,46(9):69-74.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 刘汉斌. 同步回转采气工艺在大牛地气田的试验效果分析[J]. 天然气勘探与开发,2018,41(2):78-82.
- LIU Hanbin. Test results of synchronal rotary gas production in Daniudi gas field [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018,41(2):78-82.
- [11] 高森,刘凯文,伍远平,等. 气井排液携砂量动态监测系统的研制[J]. 石油机械,2018,46(1):67-71.
- GAO Sen, LIU Kaiwen, WU Yuanping, et al. Development of dynamic monitoring system for sand flow in drainage process of gas well [J]. China Petroleum Machinery, 2018,46(1):67-71.
- [12] 廖开贵,李颖川,刘永辉,等. 采气工艺模拟实验井测控系统研究[J]. 钻采工艺,2007,30(3):46-48.
- LIAO Kaigui, LI Yingchuan, LIU Yonghui, et al. Monitoring system study on gas production process simulating experiment well [J]. Drilling & Production Technology, 2007,30(3):46-48.
- [13] 李文庆,于达,吴海浩,等. 高压水合物/蜡沉积实验环路的设计与建设[J]. 实验室研究与探索,2011,30(12):13-16.
- LI Wenqing, YU Da, WU Haihao, et al. Design and construction of a high pressure experimental flow loop for hydrate /wax deposition [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2011,30(12):13-16.
- [14] 吴海浩,徐孝轩,周元欣,等. 输油管道蜡沉积试验新技术及装备[J]. 石油矿场机械,2012,41(8):30-35.
- WU Haihao, XU Xiaoxuan, ZHOU Yuanxin, et al. New technology and equipment of oil pipeline wax deposition experiment [J]. Oil Field Equipment, 2012,41(8):30-35.
- [15] 杨万有,李昂,郑春峰,等. 动态结蜡剖面评价试验装置设计与建设[J]. 石油机械,2017,45(10):111-115.
- YANG Wanyou, LI Ang, ZHENG Chunfeng, et al. Design and construction of experimental device for dynamic wax deposition profile evaluation [J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(10):111-115.
- [16] 李汉勇,宫敬,于达,等. 石油管线蜡沉积试验研究进展[J]. 石油矿场机械,2010,39(6):5-11.
- LI Hanyong, GONG Jing, YU Da, et al. Progress in the experimental study on wax deposition in petroleum pipeline [J]. Oil Field Equipment, 2010,39(6):5-11.
- [17] 孙虎,韩静静,徐迎新,等. 一种气井全生命周期工艺试验系统;CN106869863A[P]. 2017-02-07.
- [18] 杨韵桐. 低产液高含水油气水三相流气液分离装置设计及分离效率研究[J]. 石油管材与仪器,2019,5(3):6-10.
- YANG Yuntong. Design of gas-liquid separation device for low-yield liquid and high-water-cut oil-gas-water three-phase flow and separation efficiency study [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2019,5(3):6-10.
- [19] 刘彩玉,耿海洋,张勇. 气液分离方法及试验台的搭建[J]. 机械设计与制造工程,2017,46(6):71-75.
- LIU Caiyu, GENG Haiyang, ZHANG Yong. The test apparatus design of gas-liquid separation method and the construction [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017,46(6):71-75.
- [20] 高宇. 串联型气液分离装置研制及试验研究[J]. 石油矿场机械,2016,45(7):48-52.
- GAO Yu. Development and experimental study of series type gas liquid separation device [J]. Oil Field Equipment, 2016,45(7):48-52.

编辑 张静仪

第一作者简介:张凤辉,男,1968年出生,硕士研究生,高级工程师,1992年毕业于南京航空航天大学电力电子技术专业,长期从事采油工艺技术和油水井测试技术研究工作。电话:022-66907342;Email:zhangfh5@cnooc.com.cn。通信地址:天津市塘沽区渤海石油路688号滨海新村西区研究院主楼113室,邮政编码:300452。