

考虑应力敏感的短时测试气井产能评价方法

蔡珺君¹, 欧家强¹, 占天慧², 姚永君¹, 甘笑非¹, 邓庄¹, 周莲莲¹

(1. 中国石油西南油气田公司川中油气矿, 四川成都 610051; 2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610051)

摘要:在气藏开发早期,气井产能的评价主要采用试油资料,但为保护环境和天然气资源,试油测试时间往往较短。此外,应力敏感现象使得气井在测试、开发过程中均存在渗透率变化的问题。因此,如何运用气井早期的短期测试数据,描述气井生产过程中的真实流动状态,从而正确评价气井产能,为下步开发技术政策的制定提供技术支撑是亟需解决的难题。从应力敏感现象和渗流方程出发,通过对气井不稳定流动、稳定流动的产能方程进行修正,建立了考虑应力敏感短期测试的气井产能方程计算方法。通过实例应用,讨论了短时测试以及应力敏感对气井产能的影响。研究表明:考虑应力敏感的短时流动气井无阻流量明显偏小,如果忽视气藏的应力敏感特性和测试情况,均会高估气井产能。

关键词:应力敏感 短时测试 产能评价 无阻流量

中图分类号:TE328 文献标志码:A

Productivity evaluation method of gas well considering stress sensitivity in short - term test

CAI Junjun¹, OU Jiaqiang¹, ZHAN Tianhui², YAO Yongjun¹,
GAN Xiaofei¹, DENG Zhuang¹, ZHOU Lianlian¹

(1. Central Sichuan Division, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China;

2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China)

Abstract: In the early stage of gas reservoir development, the testing data are mainly used to evaluate the productivity of gas well. However, the testing time is usually short due to the protection of environment and natural gas resources. In addition, the stress sensitivity causes the permeability change in the test and development process. Therefore, it is a difficult problem that how to describe the actual flow state in the production process of gas well by using the short - term testing data in the early stage so as to correctly evaluate the productivity of gas well and provide the technical support for the next development. Based on the stress sensitive phenomenon and filtration equation, by correcting the productivity equation of gas well under the unsteady or steady flow, it was established the calculation method for productivity equation of gas well considering stress sensitivity in short - term test. Finally, an example was applied to discuss the influence of short test time and stress sensitivity on the productivity. The study indicated that the absolute open - flow capacity of gas well considering stress sensitivity in short - term test was obviously smaller. If the characteristics of stress sensitivity and the test situation were ignored, the over - estimated productivity of gas well would be obtained.

Key words: stress sensitivity; short - term test; productivity evaluation; absolute open - flow capacity of gas well

气井产能方程的建立至关重要,它不仅是气井动态描述的手段,也是生产组织的依据。产能方程的建立一般通过回压试井、等时试井和修正等时试井等方法。但在气田开发早期,为保护环境,减少天然气放喷,通常采用短时测试,测试过程一般是变化气井工作制度,每个工作制度生产若干小时。短时测试气井尚未达到稳定,如果直接采用稳定条件下

的产能方程描述气井的生产动态,将乐观评价气井产能。

收稿日期:2018-09-19;改回日期:2018-10-26。

第一作者简介:蔡珺君(1987—),博士,工程师,主要从事油气田渗流理论、试井及油气藏动态分析研究。E-mail:swadings@petrochina.com.cn。

此外,应力敏感贯穿气井测试和生产过程,VAI-RONS 等^[1]通过实验研究表明,高压或低渗气藏气体在多孔介质渗流时往往表现出明显的应力敏感特征。OSTENSEN^[2]研究指出,应用不考虑应力敏感的常规产能模型来分析应力敏感气藏的稳定试井资料时,一般会产生较大偏差。

针对上述问题,亟需建立一种方法,通过运用气井早期的短期测试数据,描述气井生产过程中的流动状态,从而正确评价气井产能。

1 应力敏感现象

应力敏感是指油气藏外部压力保持不变时,当从油气藏岩石孔隙中采出流体时,孔隙压力从原始地层压力 p_i 下降至 p ,岩石因被压缩,其相关物性发生变化的现象^[3]。渗透率为应力敏感重要的研究对象,描述渗透率的应力敏感通常采用应力敏感指数,它定义为地层压力下降一定数值时渗透率的损失百分数^[4]:

$$SI_p = \frac{K_i - K}{K_i} \quad (1)$$

式中, SI_p 为应力敏感指数,%; K_i 为原始地层压力(p_i)下的储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K 为某地层压力(p)下的储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

许多学者通过实验手段对应力敏感进行了大量研究^[5-11],传统的实验手段均采用定内压变外(围)压的方式进行^[11]。室内评价的岩石应力敏感曲线不能直接反映岩石对孔隙压力的敏感程度,需将室内测试的外应力敏感曲线转换至内应力敏感曲线,其表达为^[4]:

$$SI_p = 1 - e^{-b\phi(p_i-p)} \quad (2)$$

式中, ϕ 为岩石孔隙度,%。

联立式(1)和式(2),某地层压力(p)下的储层渗透率可以表示为:

$$K = K_i e^{-b\phi(p_i-p)} \quad (3)$$

从式(3)中可以看出,生产压差越大,渗透率越低。

2 气井产能方程的不同形式

2.1 非稳态条件气井产能方程

对于均质无限大地层,在不稳定状态下,拟压力与产量的关系式为^[12]:

$$\psi(p_e) - \psi(p_{wf}) = A'_\psi q_{sc} + B'_\psi q_{sc}^2 \quad (4)$$

式中, ψ 表示真实气体的拟压力, $\text{MPa}^2 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$; q_{sc} 表示产气量, $10^4 \text{ m}^3 / \text{d}$; A'_ψ 表示气井不稳定条

件的 Darcy 渗流项系数, $\text{MPa}^2 (10^4 \text{ m}^3 / \text{d})^{-1} / (\text{mPa} \cdot \text{s})$; B'_ψ 表示气井的不稳定条件非 Darcy 渗流项系数, $\text{MPa}^2 (10^4 \text{ m}^3 / \text{d})^{-2} / (\text{mPa} \cdot \text{s})$; 下标 e 表示气藏, wf 表示井底流动。

气井拟压力表达式为^[13]:

$$\psi = 2 \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp \quad (5)$$

式中, p 为压力, MPa ; p_0 为任一参考压力, 可以取零或者 0.1 MPa ; μ 为气体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; Z 为天然气偏差因子, 无因次。

气井的 Darcy 渗流项系数 A'_ψ 和非 Darcy 渗流项系数 B'_ψ 的表达式分别为:

$$A'_\psi = \frac{14.6 \bar{T}}{Kh} \left(\lg \frac{8.09 \times 10^{-3} Kt}{\phi \mu C_t r_w} + 0.8686 S \right) \quad (6)$$

$$B'_\psi = \frac{12.69 \bar{T}}{Kh} D \quad (7)$$

式中, h 为储层厚度, m ; \bar{T} 表示气藏平均温度, K ; t 表示时间, h ; C_t 为气藏综合压缩系数, MPa^{-1} ; r_w 表示井半径, m ; S 表示表皮因子, 无因次; D 为非达西流系数, $(\text{m}^3 / \text{d})^{-1}$; 下标 w 表示井眼。

对于不稳定流动, A'_ψ 值随时间变化, 直到达到稳定流。 $\frac{\psi(p_R) - \psi(p_{wf})}{q_{sc}}$ 与在直角坐标系中是一系列平行直线, 其斜率等于 B'_ψ , 截距为 $A'_{\psi t}$, 应用最小二乘法可以确定出斜率和截距的值。

2.2 拟稳态条件气井产能方程

对于拟稳态的圆形有界地层^[12]:

$$\psi(p_e) - \psi(p_{wf}) = A_\psi q_{sc} + B_\psi q_{sc}^2 \quad (8)$$

式中, A_ψ 表示气井拟稳定条件的 Darcy 渗流项系数, $\text{MPa}^2 (10^4 \text{ m}^3 / \text{d})^{-1} / (\text{mPa} \cdot \text{s})$; B_ψ 表示气井的拟稳定条件非 Darcy 渗流项系数, $\text{MPa}^2 (10^4 \text{ m}^3 / \text{d})^{-2} / (\text{mPa} \cdot \text{s})$, 其表达式分别为:

$$A_\psi = \frac{29.22 \bar{T}}{Kh} \left(\lg \frac{0.472 r_e}{r_w} + \frac{S}{2.302} \right) \quad (9)$$

$$B_\psi = \frac{12.69 \bar{T}}{Kh} D \quad (10)$$

3 短时测试气井产能方程的求解

应用试油期间的测试数据, 通过式(4)拟合得到不同时间下的 A'_ψ , $A'_{\psi t}$ 的表达式由式(6)改写成:

$$A'_{\psi t} = \frac{14.61 \bar{T}}{Kh} \left(\lg \frac{8.09 \times 10^{-3} \bar{K}t}{\phi \mu C_t r_w} + 0.8686 S \right) \quad (11)$$

$A'_{\psi t}$ 的 t 在半对数上是一条直线, 其斜率为 m 。

$$m = 14.61 \frac{14.61 \bar{T}}{\bar{K}h} \quad (12)$$

\bar{K} 为试油期间不同时间下的储层平均渗透率, 其表达式为:

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i e^{-b\phi \Delta p_n}}{n} \quad (13)$$

式中, n 为试油气井工作制度个数, 一般 $n = 4$, Δp 为对应工作制度的生产压差, MPa。

联立式(12)和式(13), 即可求解原始地层压力下的渗透率:

$$K_i = \frac{14.61 n \bar{T}}{mh \sum_{i=1}^n K_i e^{b\phi \Delta p_n}} \quad (14)$$

$A'_{\psi t}$ 的 t 在半对数的拟合线的截距为 $A'_{\psi t=1}$, 那么表皮因子可以由下式计算:

$$S = 1.151 \left(\frac{A'_{\psi t=1}}{m} - \lg \frac{8.09 \times 10^{-3} \bar{K}}{\phi \mu C_t r_w} \right) \quad (15)$$

联立式(8)、(11)和(13)可以求解紊流系数:

$$D = \frac{B'_\psi}{0.869 m} \quad (16)$$

将本小节求解参数代入拟稳态条件气井产能方程公式, 并用式(3)修正渗透率, 即可得到气井产能方程。

4 应用实例

灯影组气藏 M 井, 生产层位为灯四段, 射开井段 5 279 ~ 5 315 m, 试油期间分别开展 (15.6, 20.6, 25.6, 30.6) $\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 每个制度 2.5 h 的短时测试, 试油流程图见图 1。

根据试油期间的测试数据, 应用式(4)拟合不稳定时间下的 B'_ψ 和 $A'_{\psi t}$, 如表 1 所示。

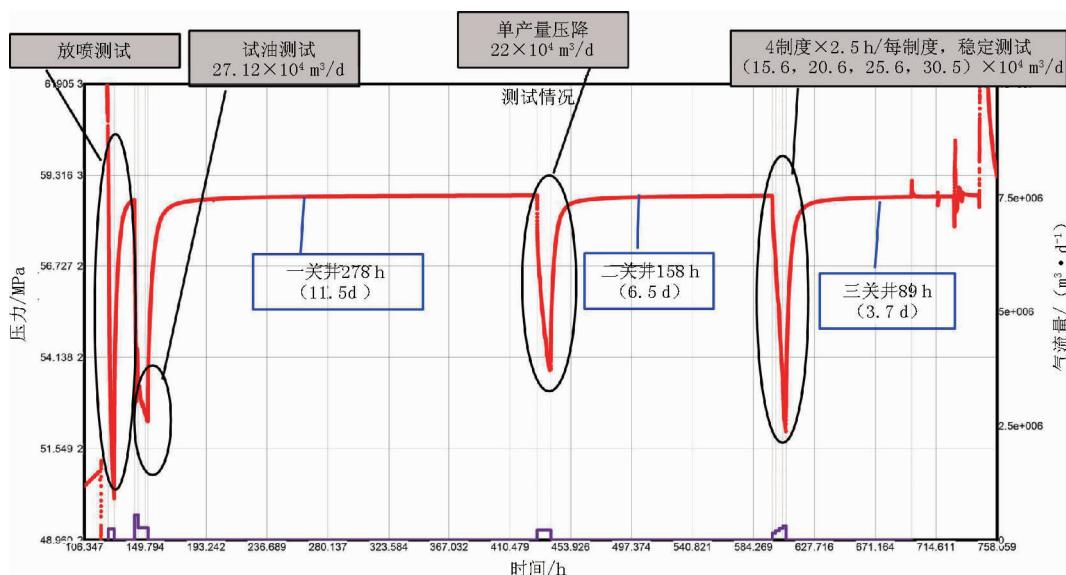


图 1 M 井试油期间专项测试流程

表 1 A'_{ψ} 和 B'_ψ 计算统计

$t = 0.5 \text{ h}$		$t = 1 \text{ h}$		$t = 1.5 \text{ h}$		$t = 2 \text{ h}$		$t = 2.5 \text{ h}$	
$\Delta \psi$	$\Delta \psi / q_{sc}$	$\Delta \psi$	$\Delta \psi / q_{sc}$	$\Delta \psi$	$\Delta \psi / q_{sc}$	$\Delta \psi$	$\Delta \psi / q_{sc}$	$\Delta \psi$	$\Delta \psi / q_{sc}$
2 355.41	150.99	3 185.15	204.18	3 854.30	247.07	4 416.39	283.10	5 567.33	356.88
6 611.20	320.93	7 387.42	358.61	7 976.27	387.20	8 458.06	410.59	9 689.29	470.35
10 706.40	418.22	11 643.21	454.81	12 660.32	494.54	13 061.81	510.23	14 774.83	577.14
16 380.79	535.32	16 942.88	553.69	17 183.77	561.56	17 852.92	583.43	19 619.48	641.16
$A'_{\psi} = -221.27$		$A'_{\psi} = -136.50$		$A'_{\psi} = -62.88$		$A'_{\psi} = -15.45$		$A'_{\psi} = 64.08$	
$B'_\psi = 25.01$		$B'_\psi = 22.89$		$B'_\psi = 21.02$		$B'_\psi = 20.01$		$B'_\psi = 19.19$	

拟合 A'_{ψ} 与 $\lg t$, 如图 2 所示, 可以确定出截距为 $A'_{\psi t}$ 为 -169.03, 斜率 m 为 563.19, 通过式(13)和式

(15) 分别计算平均渗透率为 $0.235 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 表皮因子为 -5.3。

将不稳定流动描述方程计算结果代入式(9)和式(10), 可求解稳定状态下气井产能方程系数, 不考虑应力敏感时的 IPR 曲线如图 3 所示。从图中可见, 若使用试油测试数据, 直接套用气井拟稳定阶段的产能方程, 计算所得的无阻流量为 $75.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 事实上, 井底压力并未达到稳定, 应使用气井不稳定流动方程描述试油期间的气井流动, 计算无阻流量为 $57.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由此可见, 对于试油期间的短期测试, 直接应用气井产能方程将高估气井产能。通过表 1 可以发现高估产能是因为错误地将随时间变化的 A'_ψ 当做稳定阶段的 A_ψ , 事实上, A'_ψ 是随着时间不断增加, 直到变化成稳定状态下的 A_ψ 。

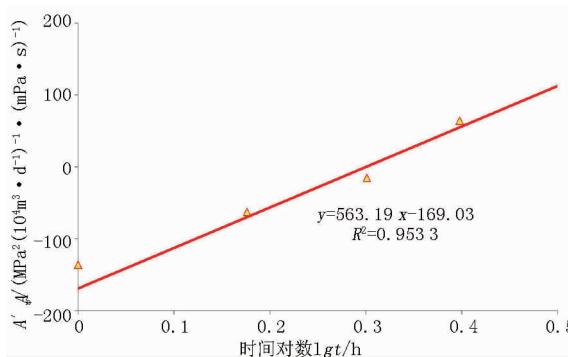
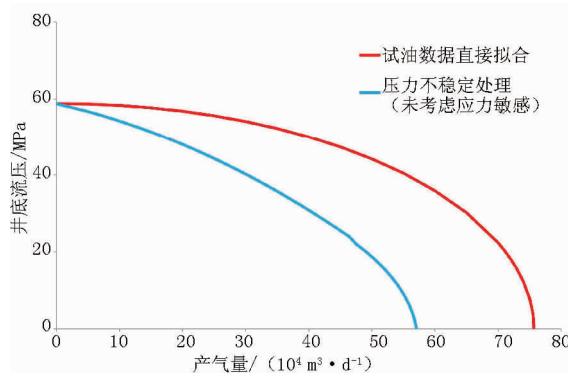
图 2 A'_ψ 与 $\lg t$ 拟合图

图 3 短时测试确定气井 IPR 曲线

为说明应力敏感对产能方程及 IPR 曲线的影响, 首先定义统一储层岩石的应力敏感指数为地层压力下降 10 MPa 的数值, 当 $SI_p < 0.1$ 时, 为弱敏感; 当 $SI_p = 0.1 \sim 0.3$ 时, 为中等敏感, 当 $SI_p > 0.3$ 时, 为强敏感^[2]。通过实验, M 井的应力敏感指数为 0.02, 属于弱应力敏感。

图 4 为考虑应力敏感的产能方程曲线对比图, 从此图可以看出, 未考虑应力敏感的产能方程 $\frac{\psi(p_R) - \psi(p_{wf})}{q_{sc}}$ 与 q_{sc} 在直角坐标系中为一直线, 随着应力敏感的增强, 气井产能方程线会逐渐变化成

曲线, 值得注意的是应力敏感越强, 则偏离未考虑应力敏感的产能方程越早, 出现拐点也较早, 反之, 偏离得越晚, 拐点出现越晚。因此气井生产需要控制好生产压差, 避免产能方程出现拐点。

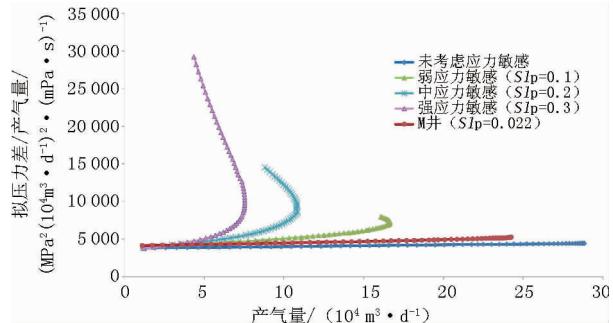


图 4 考虑应力敏感的气井产能方程对比

图 5 为考虑应力敏感的气井无阻流量对比, 可见应力敏感对气井的无阻流量影响较大。与传统气井产能方程不同的是, 较大的生产压差会引起渗透率下降, 从而导致无阻流量下降。应力敏感越强, 其无阻流量随生产压差增加而减小的速度越快, 反之, 无阻流量减小速度越慢。因此, 在气井生产中应考虑到应力敏感对无阻流量的影响, 科学合理配产。

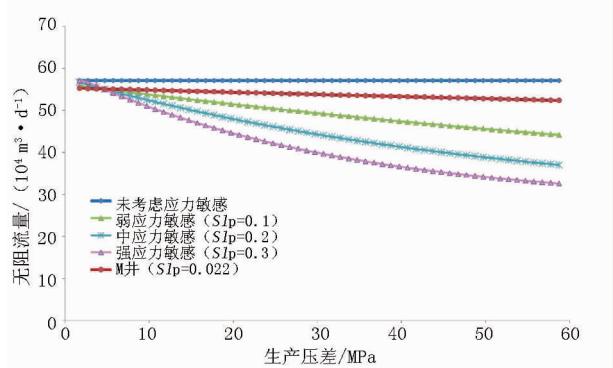


图 5 考虑应力敏感的气井无阻流量对比

5 结论

(1) 短期测试数据不能直接应用气井产能方程, 应通过不稳定流动方程确定气井关键参数, 进而求取稳定条件下的气井产能方程系数。如果直接应用气井产能方程, 通常会高估实际产能。

(2) 从气井渗流方程出发, 建立了考虑应力敏感的气井产能方程修正方法。此方法可描述气井不同应力敏感强度对气井产能方程的影响。应力敏感越强, 产能方程出现拐点越早, 反之, 拐点出现越晚。

(3) 理论分析和实例应用均表明, 考虑应力敏感的气井无阻流量明显偏小, 应力敏感越强, 无阻流

(下转至第 68 页)

筒)的积液,保证了 S 气田的平稳生产。

参考文献:

- [1] 王彦鹏,曾顺鹏,陈启文,等. 苏东气田气井出水水源快速识别方法研究[J]. 长江大学学报(自科版),2015,12(29):87 - 90 + 7.
- [2] 廖意. 涠北气田气井出水分析及对策研究[D]. 长江大学,2012.
- [3] 邓勇,杜志敏,陈朝晖. 涠北气田疏松砂岩气藏出水规律研究[J]. 石油天然气学报,2008(2):336 - 338.
- [4] 孙虎法,王小鲁,成艳春,等. 水源识别技术在涩北气田气井出水中的应用[J]. 天然气工业,2009,29(7):76 - 78 + 140 - 141.
- [5] 朱文娟,杨志兴,黄导武,等. 西湖凹陷低渗储层水的赋存状态及出水特征研究[J]. 石油地质与工程,2017,31(2):91 - 93 + 133.
- [6] 李锦,王新海,朱黎鹤,等. 气藏产水来源综合判别方法研究

(上接第 60 页)

量减小量越大,如果忽视气藏的应力敏感特性,会高估气井产能。

(4) 在气井生产组织中,应考虑应力敏感,控制合理生产压差。

参考文献:

- [1] VAIROS J, HEARN C L, DAREING D W, et al. Effect of rock stress on gas production from low - permeability reservoirs[J]. JPT, 1971, 23(9):1161 - 1167.
- [2] OSTENSEN R W. Microcrack permeability in tight gas sandstone [C]. SPE 10924, 1983
- [3] 李传亮. 油藏工程原理第 2 版[M]. 北京:石油工业出版社, 2011;96 - 100.
- [4] 李传亮. 储层岩石的应力敏感性评价方法[J]. 大庆石油地质与开发,2016,25(1):40 - 42
- [5] 李传亮. 低渗透储层不存在强应力敏感[J]. 石油钻采工艺, 2005,27(4):61 - 63.

[J]. 天然气地球科学,2012,23(6):1185 - 1190.

- [7] 姚园. M 气田主力气藏出水分析及治水对策研究[D]. 西南石油大学,2015.
- [8] 何更生,唐海. 油层物理[M]. 北京:石油工业出版社,2011: 175 - 176.
- [9] 黄东杰,杨宇,伊向艺,等. 子洲气田山_2 段单井出水机理研究[J]. 新疆石油天然气,2010,6(3):46 - 48 + 53 + 115.
- [10] 李晓平,刘启国,孙万里,等. 气井凝析液量研究[J]. 钻采工艺,2001,24(6):38 - 40 + 5.
- [11] MCKETTAJJ, WEHE A H. Use the chart of water content of natural gas[J]. Pet Ref, 1958(8):153 - 154.
- [12] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京:石油工业出版社,2008:149.
- [13] 李爱芬. 油层物理[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2011;284.

(编辑 谢葵)

- [6] 郑荣臣,王昔彬,刘传喜. 致密低渗气藏储集层应力敏感性试验[J]. 新疆石油地质,2006,27(3):345 - 347.
- [7] 郭平,张俊,杜建芬,等. 采用两种实验方法进行气藏岩心应力敏感研究[J]. 西南石油大学学报,2007,29(2):7 - 9.
- [8] 肖文联,李闽,赵金洲,等. 低渗致密砂岩渗透率应力敏感性试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(3):775 - 779.
- [9] 李传亮. 岩石应力敏感指数与压缩系数之间的关系式[J]. 岩性油气藏,2007,19(4):95 - 98.
- [10] 李传亮,涂兴万. 储层岩石的 2 种应力敏感机制——应力敏感有利于驱油[J]. 岩性油气藏,2008,20(1):111 - 113.
- [11] 曲岩涛,房会春,朱健,等. SY/T 5358—2010 储层敏感性流动实验评价方法[S]. 北京:石油工业出版社,2010:18 - 21.
- [12] 庄惠农. 气藏动态描述和试井[M]. 北京:石油工业出版社,2014.
- [13] AI - HUSSAINY, RAMEY, CRAWFORD P B. The flow of real gases through porous media[J]. JPT, 1966(5):624 - 636.

(编辑 谢葵)

二氧化碳智能分注工艺管柱成功下井

日前,由江苏油田工程技术研究院研发的二氧化碳智能分注管柱成功下井,井下仪器设备突破高温高压极限,通讯正常。

智能分层注二氧化碳为国内首次。经过近两年研究,攻克多项关键技术,成功研发了耐压 60 MPa、耐温 125 ℃ 的智能配注器、过线顶封封隔器等配套工具。

试验井井深 3 362 m,井温超过 120 ℃。经过细致周到的反复准备,3 216 m 电缆完好下入井筒,井下配注仪器在 121.5 ℃ 的高温下工作正常,两层水嘴 100% 开启,并在施工过程中完整录取了地层压力、温度等参数。下一阶段,技术人员将对测调系统的可靠性和井下二氧化碳计量的准确性进行试验和优化。

(油科)