

# 异常高压水驱气藏产能评价及预测方法

杨敏,李明,陈宝新,孟学敏,唐永亮

中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000

通讯作者:Email: yangmin-tlm@petrochina.com.cn

项目支持:国家重大专项“库车坳陷深层-超深层天然气田开发示范工程”(2016ZX05051004)、中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“前陆冲断带超深超高压气藏开发技术”(2014E-2104)

引用:杨敏,李明,陈宝新,等. 异常高压水驱气藏产能评价及预测方法[J]. 油气井测试, 2019, 28(5): 62-66.

Cite: YANG Min, LI Ming, CHEN Baoxin, et al. Productivity evaluation and forecast method for waterflooding gas reservoir with abnormal high pressure [J]. Well Testing, 2019, 28(5): 62-66.

**摘要** 异常高压水驱气藏受技术条件、井筒条件等多种因素影响,无法将压力计下入井底,难以录取到测试资料。基于常规产能测试及评价原理,综合考虑异常高压气藏的开发特点,建立考虑应力敏感因素下的气井产能方程,同时考虑气井地质条件、临界水锥产量及压差、稳产期、临界携液产量和合理利用地层能量等因素,建立了一套异常高压气藏产能评价及预测方法。经对克拉2气田四口井的产能预测,计算结果与产能测试结果误差在10%以内。该方法可以确定单井产能,合理调节生产压差和配产,进行实时的产能预测,结果可靠,为生产调控提供可靠的理论依据。

**关键词** 异常高压气藏;水驱气藏;应力敏感;产能评价;合理配产;产能预测

中图分类号:TE353

文献标识码:B

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.05.010

## Productivity evaluation and forecast method for waterflooding gas reservoir with abnormal high pressure

YANG Min, LI Ming, CHEN Baoxin, MENG Xuemin, TANG Yongliang

Exploration & Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China

**Abstract:** Due to the limitations of technology, wellbore condition and other various factors in the waterflooding gas reservoir with abnormal high pressure, it is impossible to load the pressure gauge into bottom-hole to record test data. Based on the traditional productivity testing and evaluation principles, a gas well productivity equation considering stress sensitivity was established by combining with the development performance of gas reservoir with abnormal high pressure. A set of production evaluation and forecast methods for the gas reservoir with abnormal high pressure was established by considering the gas well geology, critical water coning production and pressure drop, stable production period, critical liquid-carrying production, reasonable formation energy utilization and other aspects. The relative error between the productivity forecasts of four wells in Kela2 gas field and that of productivity testing is within 10%. This method can be used to determine single-well productivity, reasonable production pressure drop, allocation and gas well real-time productivity, which could provide certain theoretical basis for production adjustment and management.

**Keywords:** gas reservoir with abnormal high pressure; waterflooding gas reservoir; stress sensitivity; productivity evaluation; reasonable allocation; productivity forecast

产能评价是预测气井产能、分析气井动态、了解气层及井筒特性的最重要的内容<sup>[1-2]</sup>。目前,气田录取产能的方法通常采用产能试井的方式,通过改变若干次测试井的工作制度,测量在各个不同制度下的稳定产量及与之对应的井底压力,从而确定测试井的产能方程、无阻流量等。常用的产能试井的方法有三种<sup>[3]</sup>:回压试井、等时试井和修正等时试井。最近20多年来,随着现代科学技术的飞速发展,特别是电子

计算机的广泛使用和高精度电子压力计的研制成功及推广应用,资料采集技术和资料解释技术有了新的重大突破<sup>[4-6]</sup>。但是,对于异常高压气藏受技术条件、井筒条件等多种因素影响,无法将压力计下入井底,很难录取到测试资料<sup>[7]</sup>。因此,异常高压气藏的产能评价和预测就成了一个至关重要的问题,需要在现有技术的基础上,通过渗流理论结合测试情况建立产能方程,确定合理单井生产压差和单井配产,为开

发井网、完井、地面集输处理工艺等的研究及生产调控提供可靠的理论依据<sup>[8-9]</sup>。

1 产能评价及预测方法

异常高压气藏埋藏深、压力高,采用常规的监测技术录取井下资料难度大、安全风险大,同时也受技术条件、井筒条件等多种因素影响,无法将压

力计入入井底<sup>[10]</sup>。因此,在评价气井产能时总结出一套技术流程(图 1),根据单井产能资料录取情况,产能方程的建立及无阻流量评价采用三种方法,即回压试井法、不关井回压试井法和考虑岩石变形的

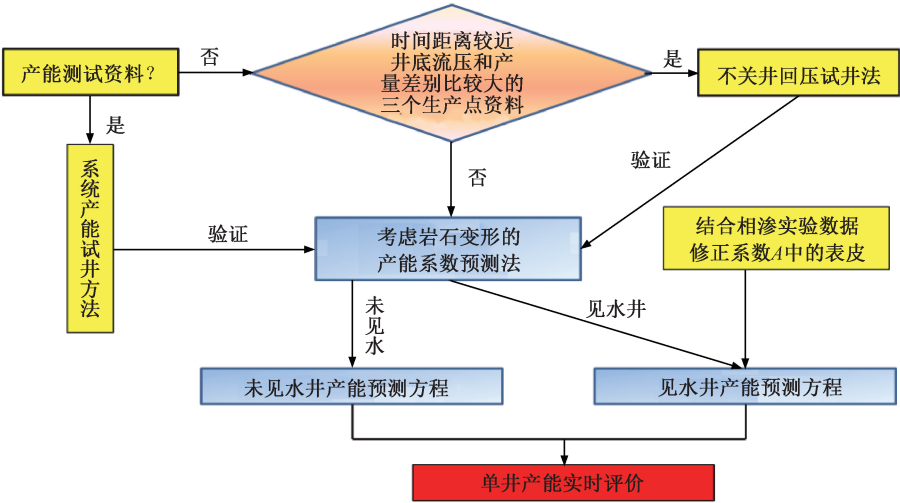


图 1 异常高压有水气藏产能评价技术流程图

Fig.1 Technical flow chart of productivity evaluation for the water-bearing gas reservoir with abnormal high pressure

1.1 回压试井法

系统产能试井是最常用的产能评价方法,根据气井二项式产能方程<sup>[13]</sup>,即

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

式中: $p_R$  为地层压力,MPa; $p_{wf}$  为井底压力,MPa; $q_{sc}$  为产气量, $m^3/d$ ;  $a, b$  分别为二项式产能方程系数。

利用测试过程中不同工作制度下的产量和压力,即可回归产能方程中的系数  $a, b$ ,从而计算气井无阻流量。

1.2 不关井回压试井法

不关井回压试井法与气井稳定试井基本相似,不需关井。在气井生产过程中,只需连续测 3 个以上不同的产气量和与之相对应的  $p_{wf}$ ,从而获取产能方程<sup>[14]</sup>,即

$$\left. \begin{aligned} p_{R1}^2 - p_{wf1}^2 &= a q_{sc1} + b q_{sc1}^2 \\ p_{R2}^2 - p_{wf2}^2 &= a q_{sc2} + b q_{sc2}^2 \\ p_{R3}^2 - p_{wf3}^2 &= a q_{sc3} + b q_{sc3}^2 \end{aligned} \right\} \bar{p}_R = (p_{R1} + p_{R2} + p_{R3})/3$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{p}_R^2 - p_{wf1}^2 &= a q_{sc1} + b q_{sc1}^2 \\ \bar{p}_R^2 - p_{wf2}^2 &= a q_{sc2} + b q_{sc2}^2 \\ \bar{p}_R^2 - p_{wf3}^2 &= a q_{sc3} + b q_{sc3}^2 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} p_{wf1}^2 - p_{wf2}^2 &= a(q_{sc1} - q_{sc1}) + b(q_{sc2}^2 - q_{sc1}^2) \\ p_{wf1}^2 - p_{wf3}^2 &= a(q_{sc3} - q_{sc1}) + b(q_{sc3}^2 - q_{sc1}^2) \\ p_{wf2}^2 - p_{wf3}^2 &= a(q_{sc3} - q_{sc2}) + b(q_{sc3}^2 - q_{sc2}^2) \end{aligned} \right\}$$

该方法能较好地指导气井配产,避免了关井测试对产量造成影响,同时确保产能评价及时、准确<sup>[15]</sup>。

1.3 考虑岩石变形的气井产能系数预测法

Al-Hussainy 于 1965 年定义了气体的拟压力  $\Psi$  (Pseudo-Pressure)。在拟压力  $\Psi$  表达下,可以使气体的渗流方程适用于整个的压力变化范围<sup>[16]</sup>。在描述气体流动过程中,最恰当的压力表示形式为拟压力  $\Psi$ ,即

$$\Psi = \int_{p_0}^p \frac{2p}{\mu Z} dp$$

式中: $\Psi$  为拟压力,  $MPa^2/(mPa \cdot s)$ ;  $p$  为地层压力,MPa; $p_0$  为初始压力,MPa; $\mu$  为黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $Z$  为偏差系数,无因次。

如果  $\mu Z$  值为常数,拟压力可以选择使用压力平方的形式近似计算;如果  $p/(\mu Z)$  为常数,则可以使用压力的形式近似计算,从而简化计算流程。对于异常高压气田,需采用拟压力形式的产能方程,

其二项式通用表达式为

$$\Psi_R - \Psi_{wf} = Aq_g + Bq_g^2$$

其中

$$A = \frac{p_{sc} T \left( \ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)}{K \pi h T_{sc}}$$
$$B = \frac{\beta p_{sc}^2 M \gamma_g T}{2 \pi^2 h^2 \mu T_{sc}^2 r_e} \left( \frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_e} \right)$$
$$\beta = \frac{1.471 \times 10^{11}}{K^{1.3878}}$$

式中： $\Psi_R$  为地层压力下拟压力， $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ； $\Psi_{wf}$  为井底流压下拟压力， $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ； $q_g$  为产气量， $\text{m}^3/\text{d}$ ； $A, B$  分别为拟压力二项式产能方程系数； $p_{sc}$  为标准状况下压力， $\text{MPa}$ ； $T_{sc}$  为标准状况下温度， $\text{K}$ ； $T$  为温度， $\text{K}$ ； $r_e, r_w$  分别为有效半径和井筒半径， $\text{m}$ ； $S$  为表皮系数，无因次； $K$  为渗透率， $\text{mD}$ ； $h$  为有效厚度， $\text{m}$ ； $M$  为气体分子量； $\gamma_g$  为气体相对密度。

对于某实测产能试井情况，对应地层压力下的产能方程可表示为<sup>[17]</sup>

$$\Psi_{R1} - \Psi_{wf1} = A_1 q_{g1} + B_1 q_{g1}^2$$

对于未来某个地层压力下对应的产能方程为

$$\Psi_{R2} - \Psi_{wf2} = A_2 q_{g2} + B_2 q_{g2}^2$$

气井在开采过程中如果没有重大措施， $A, B$  表达式中的  $h, T, r_e, r_w, S$  等参数可认为保持不变； $K, \beta, \mu$  等随压力变化而变化。由此，可得到相对关系式<sup>[18]</sup>，即

$$A_2 = \frac{K_1}{K_2} A_1$$
$$B_2 = \frac{\beta_2 \mu_1}{\beta_1 \mu_2} B_1 = \frac{K_1^{1.3878} \mu_1}{K_2^{1.3878} \mu_2} B_1$$

因此，确定了  $K, \mu$  随压力的变化关系，便可以  
通过  $A_1, B_1$  求得  $A_2, B_2$ ，从而预测未来某个地层压

力下气井的产能<sup>[19]</sup>。其中，压力与  $\mu$  的关系可根据 PVT 实验数据建立(图 2)；而地层压力与  $K$  的关系可通过覆压实验确定(图 3)。

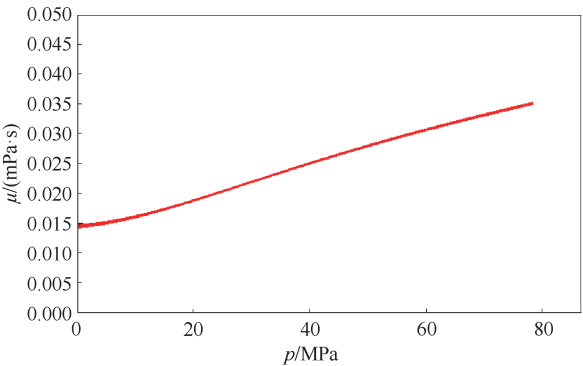


图 2 克拉 2 气田黏度随压力变化曲线  
Fig.2 Relationship between viscosity and pressure in Kela2 gas field

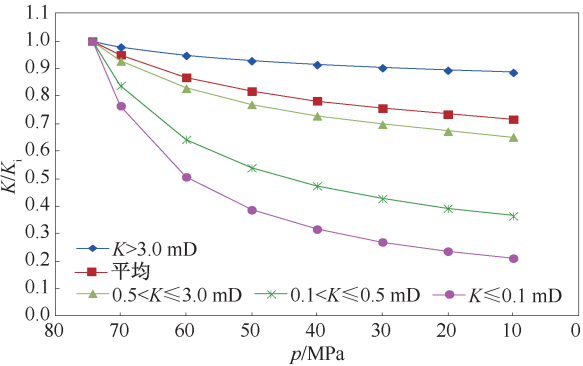


图 3 克拉 2 气田渗透率随压力变化趋势  
Fig.3 Relationship between permeability and pressure in Kela2 gas field

3 应用实例

克拉 2 气田为西气东输的主力气田，其构造位于库车坳陷克—依构造带中西段，为一近东西向展布、南北基本对称长轴背斜，整体呈向南凸出的弧形构造(图 4)，断层整体较为发育。

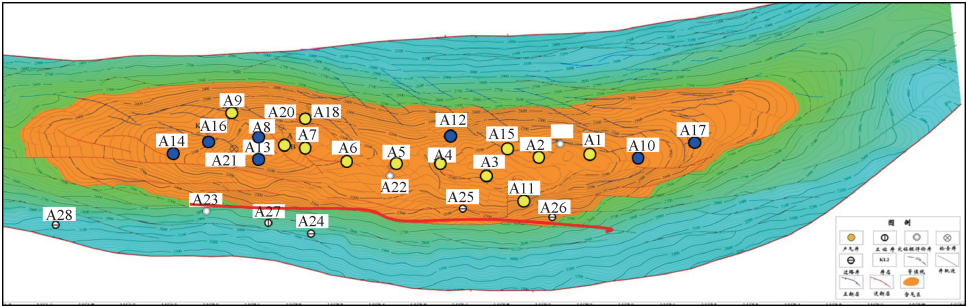


图 4 克拉 2 气田井位构造图  
Fig.4 Well structure map of Kela2 gas field

克拉 2 气田主要含气层为古近系白云岩、砂砾岩、白垩系大套砂岩,孔隙度平均为 12.44%,渗透率平均为 49.42 mD,气柱高度 468 m,裂缝仅在局部发育,气藏范围内发育 3 套全区分布的隔夹层。

截至 2019 年 4 月,克拉 2 气田已投入开发 10 年,气田产能随压力下降而下降,确定气田目前产能,制定气田合理开发对策迫在眉睫<sup>[20-21]</sup>。根据本方法的原理,需要选择有 2 次以上产能测试资料的井,利用其实测资料来验证本方法预测的准确性。因此,在克

拉 2 气田选出 A4、A7、KL16、A20 井,其中 A4 和 A7 井均位于构造高部位,且井筒状况良好,产量高,资料丰富;A16 和 A20 井为气藏评价井,中低产量。这四口井不仅资料丰富,且分布在整个气藏不同位置,产量不统计级别,对结果准确性更有指导意义<sup>[22-23]</sup>。利用本文计算方法分别对以上四口井进行了产能预测,计算得到的结果与产能测试的得到的结果基本一致,误差在 10% 以内,可以满足生产需要(表 1),说明此方法结果可靠,可以用于指导现场配产。

表 1 克拉 2 气藏考虑岩石变形的产能系数预测法准确性对比

Table 1 Accuracy comparison of productivity coefficient forecast by considering rock deformation in Kela2 gas field

井号	测试日期	无阻流量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )			地层压力/MPa	系数 B 值	系数 A 值
		实测值	计算值	差值			
A4	2005.05	1 792	—	—	74.11	0.001 500	0.377 200
	2005.09	1 333	1 511	178	73.8	0.003 200	0.179 300
A7	2005.09	2 949	—	—	73.66	0.000 453	0.503 013
	2006.04	1 791	1 859	68	71.82	0.001 600	0.013 600
A16	2000.04	310	—	—	74.00	0.042 800	4.419 300
	2005.10	288	268	-20	73.81	0.059 100	1.950 100
A20	2001.07	954	—	—	74.47	0.003 800	2.192 100
	2005.09	700	756	56	73.66	0.010 400	0.474 800

4 结论

(1)通过本文研究,总结出不同情况下确定异常高压气藏产能评价及预测方法,其中考虑异常高压岩石变形的气井产能系数预测法可以对气井产能进行预测。通过验证得到的产能评价结果可靠,可以对气田进行实时产能评价,给气藏动态分析、气藏管理提供可靠的依据。但是,有水气藏中气井出水后对于产能预测的问题考虑需要进一步深化和改进。

(2)本文技术方法适用于异常高压水驱气藏,是指导气藏产能评价和合理配产的一项重要技术,可以为无法多次测试的高压气井产能评价提供理论基础。同时,也为同类异常高压气田制定合理开发对策提供借鉴指导。

致谢:感谢国家重大专项“库车坳陷深层-超深层天然气田开发示范工程”项目支撑,以及课题负责人肖香姣和孙雄伟专家的技术指导。

参考文献

[1] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2000:38-80.

[2] 詹静,林加恩. 油气井产能分析研究[J]. 油气井测试, 2017,26(1):1-5.

ZHAN Jing, LIN Jia'en. Research on well productivity analysis [J]. Well Testing, 2017,26(1):1-5.

[3] 王鸣华. 气藏工程[M]. 北京:石油工业出版社,1997: 87-96.

[4] 祝元宠,咸玉席,李清宇,等. 基于大数据的页岩气产能预测[J]. 油气井测试,2019,28(1):1-6.

ZHU Yuanchong, XIAN Yuxi, LI Qingyu, et al. Shale gas productivity forecast based on big data [J]. Well Testing, 2019,28(1):1-6.

[5] 肖寒. 威远区块页岩气水平井基于灰色关联分析的产能评价方法[J]. 油气井测试,2018,27(4):73-78.

XIAO Han. Production evaluation method based on grey correlation analysis for shale gas horizontal wells in Weiyuan Block [J]. Well Testing, 2018,27(4):73-78.

[6] 章雨,李少华,李俊仪,等. 环江油田长 6 储层基于多元回归分析的产能评价[J]. 油气井测试,2019,28(2): 68-72.

ZHANG Yu, LI Shaohua, LI Junyi, et al. Productivity evaluation of Chang 6 formation in Huanjiang Oilfield based on multivariate regression analysis [J]. Well Testing, 2019,28(2):68-72.

[7] 冈秦麟. 气藏和气井动态分析及计算程序[M]. 北京:石油工业出版社,1996:59-71.

[8] 庄惠农. 气藏动态描述和试井[M]. 北京:石油工业出版社,2004:20-26.

[9] 许立全,李秀生. 不同产能评价方法的对比分析[J]. 油气井测试,2005,14(6):15-17.

XU Liquan, LI Xiusheng. Comparative analysis of different deliverability evaluation method [J]. Well Testing, 2005, 14(6):15-17.

[10] 常志强,肖香姣,唐明龙,等. 迪那 2 气田压力监测、试



- 井解释及产能评价技术[J]. 油气井测试, 2009, 18(1): 25-28.
- CHANG Zhiqiang, XIAO Xiangjiao, TANG Minglong, et al. Technology of pressure monitoring, well test interpretation and deliverability evaluation in gas field Dina [J]. Well Testing, 2009, 18(1): 25-28.
- [11] 郭小哲, 刘学锋. 产水气井产能方程修正新方法研究[J]. 油气井测试, 2015, 24(4): 11-13.
- GUO Xiaozhe, LIU Xuefeng. Study on new method to correct deliverability equation in water-production gas well [J]. Well Testing, 2015, 24(4): 11-13.
- [12] 张建业, 牛丛丛, 孙雄伟, 等. 高温高压气井产能测试资料分析方法选择及实际应用[J]. 油气井测试, 2016, 25(4): 17-20.
- ZHANG Jianye, NIU Congcong, SUN Xiongwei, et al. Method selection and practical application of deliverability test data analysis to high temperature and high pressure gas well [J]. Well Testing, 2016, 25(4): 17-20.
- [13] 黎洪, 彭苏萍. 高压气井产能评价方法研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 77-79.
- LI Hong, PENG Suping. High-pressure gas well productivity evaluation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(6): 77-79.
- [14] 赵宏敏, 戴家才. 基于生产测井资料的油井分层产能评价方法[J]. 江汉石油学院学报, 2001, 23(4): 31-32.
- ZHAO Hongmin, DAI Jiakai. Evaluation of layering productivity based on oil well production logging data [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2001, 23(4): 31-32.
- [15] 尹邦堂, 李相方, 李佳, 等. 巨厚高产强非均质气藏产能评价方法——以普光、大北气田为例[J]. 天然气工业, 2014, 34(9): 70-75.
- YIN Bangtang, LI Xiangfang, LI Jia, et al. A productivity evaluation method of gas reservoirs with great thickness, high deliverability and strong heterogeneity: Case studies of the Puguang in the Sichuan basin and the Dabei in the Tarim basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(9): 70-75.
- [16] 邱先强, 李治平, 刘银山, 等. 致密气藏水平井产量预测及影响因素分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(2): 141-145.
- QIU Xianqiang, LI Zhiping, LIU Yinshan, et al. Analysis of productivity equation and influence factors of horizontal wells in tight sand gas reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(2): 141-145.
- [17] 刘琦, 孙雷, 罗平亚, 等. 苏里格西区含水气藏合理产能评价方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(3): 131-135.
- LIU Qi, SUN Lei, LUO Pingya, et al. The research on the proper production capacity evaluations on the west of sulige gas field [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(3): 131-135.
- [18] 赵庆波, 单高军. 徐深气田气井多因素动态配产方法研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(3): 111-116.
- ZHAO Qingbo, SHAN Gaojun. Research of multi-factor dynamic allocation methods of gas well in Xushengas field [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(3): 111-116.
- [19] 谢兴礼, 朱玉新, 冀光, 等. 气藏产能评价方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3): 276-279.
- XIE Xingli, ZHU Yuxin, JI Guang, et al. Evaluation methodology and application of well deliverability in gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(3): 276-279.
- [20] 滕赛男, 梁景伟, 李元生, 等. 异常高压气藏常规产能方程评价方法研究[J]. 油气井测试, 2011, 20(6): 15-16, 19.
- TENG Sainan, LIANG Jingwei, LI Yuansheng, et al. The research of evaluation method of conventional productivity equation in abnormal high pressure gas reservoirs [J]. Well Testing, 2011, 20(6): 15-16, 19.
- [21] 李军诗, 刘鹏程, 王晓冬, 等. 克拉2气田克拉203井压力异常与产能分析研究[J]. 油气井测试, 2004, 13(5): 12-14.
- LI Junshi, LIU Pengcheng, WANG Xiaodong, et al. Abnormal pressure study and productivity analysis of Well Kela203 in gas field Kela2 [J]. Well Testing, 2004, 13(5): 12-14.
- [22] 周静, 张城玮, 周伟, 等. 异常高压气井产能评价技术研究[J]. 油气井测试, 2016, 25(3): 35-37, 41.
- ZHOU Jing, ZHANG Chengwei, ZHOU Wei, et al. Research on productivity estimation technology to abnormal high pressure gas well [J]. Well Testing, 2016, 25(3): 35-37, 41.
- [23] 刘启国, 江晓敏, 程晓旭, 等. 异常高压气井流入动态特征及产能试井分析方法研究[J]. 油气井测试, 2008, 17(4): 5-7.
- LIU Qiguo, JIANG Xiaomin, CHENG Xiaoxu, et al. Study on test analysis method for abnormally pressured gas well about inflow performance characteristic and productivity [J]. Well Testing, 2008, 17(4): 5-7.

编辑 王 军

第一作者简介: 杨敏, 女, 1980年出生, 硕士, 高级工程师, 2006年毕业于大庆石油学院油气田开发专业, 目前主要从事气藏工程研究工作。电话: 0996-2172723, 13779660013; Email: yangmin-tlm@petrochina.com.cn。通信地址: 新疆库尔勒市石化大道26号塔里木油田勘探开发研究院天然气所, 邮政编码: 841000。