

利用产气剖面精细描述多层气藏动态特征

万玉金¹, 钟世敏², 王小鲁³, 郭 辉², 王婷婷⁴

- 1. 中国石油勘探开发研究院四川盆地研究中心 北京 100083
- 2. 中国石油勘探开发研究院气田开发研究所 北京 100083
- 3. 中国石油青海油田公司天然气处 甘肃敦煌 736202
- 4. 中国石油华北油田公司勘探开发研究院 河北任丘 062552

通讯作者: Email: wanyj69@petrochina.com.cn

项目支持: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目《天然气开发关键技术研究》课题《疏松砂岩气藏长期稳产技术》(2016ZX05015-004)

引用: 万玉金, 钟世敏, 王小鲁, 等. 利用产气剖面精细描述多层气藏动态特征[J]. 油气井测试, 2018, 27(3): 72-78.

Cite: WAN Yujin, ZHONG Shimin, WANG Xiaolu *et al.* Using gas production profile to describe the dynamic characteristics of multilayer gas reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(3): 72-78.

摘要 受层间非均质性等影响, 多层气藏表现出层间日产气量差异大、各小层出水顺序及产水量也不相同的情况, 采用常规方法无法了解每个小层的生产状况。对产气剖面测试成果在多层气藏动态分析中的应用进行了系统梳理, 以台南气田 F 气藏为例, 阐述了产气剖面可用于了解单井分层产气量及其随时间的变化、确定各小层的无阻流量、识别各小层出水顺序与出水量、分析整个气藏的分层产量贡献与剩余气分布。分析表明, 通过有计划、系统地测试产气剖面, 可以准确认识多层气藏的动态特征, 优化确定科学的开发技术政策, 提高气藏开发效果。该分析对多层气藏开发动态监测优化设计与动态分析具有借鉴意义。

关键词 产气剖面; 生产测井; 动态监测; 多层气藏; 分层产能; 台南气田

中图分类号: TE344 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.03.012

Using gas production profile to describe the dynamic characteristics of multilayer gas reservoirs

WAN Yujin¹, ZHONG Shimin², WANG Xiaolu³, GUO Hui², WANG Tingting⁴

- 1. Sichuan Basin Research Center of RIPED, Beijing 100083, China
- 2. Gas Field Development Research Institute of RIPED, Beijing 100083, China
- 3. Gas Development Division of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China
- 4. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 065007, China

Abstract: Due to the heterogeneity among layers, the daily gas production, the order of water out, and the volume of water produced in each layer of a multi-layer gas reservoir are different. However, conventional methods cannot obtain the production status of each layer. This paper systematically collates and analyzes the application of gas production profile test results in the dynamic analysis of multi-layer gas reservoirs. Taking the F gas reservoir in the Tainan Gas Field as an example, the gas production profiles can be used to understand the gas production of each layer in individual wells and their changes over time, determine the open flow capacity, identify the order of water out, analyze the production contribution of each layer as well as residual gas distribution of the entire gas reservoir. The analysis shows that by systematically testing gas production profiles, it is possible to accurately recognize the dynamic characteristics of multi-layer gas reservoirs, optimize development technology plans, and improve gas reservoir development effect. Which has important guiding significance for dynamic monitoring optimal design and dynamic analysis of multi-layer gas reservoirs development.

Keywords: gas production profile; production logging; dynamic monitoring; multi-layer gas reservoir; layered productivity; Tainan gas field

对于多层气藏, 各小层具有不同的地层系数和 储容系数。由于层间非均质性的存在, 分层产量存

在较大差异,各小层的稳产能力也不同。此外,不同层的出水时间亦不同,出水量也不一样。这些层间生产动态的差异无法用常规方法获得,而通过生产测井获取的产气剖面是解决上述问题最直接、最可靠的技术手段。

由于单井存在层间物性差异、气藏内存在井间干扰与平面非均质,以及气井与气水界面距离的差异等,影响因素多而错综复杂,由此多层气藏动态分析是一项非常具有挑战性的工作。李得信等^[1]、张小军等^[2]介绍了多层气藏动态监测中产气剖面测试的设计。Fetkovich等^[3]分析了体积比、渗透率比和表皮系数对分层产量的影响,并阐述了多层合采气井产量的递减规律。朱华银等^[4]采用物理模拟实验探索了多层合采动态规律。史进等^[5]、顾岱鸿等^[6]、陈仲良等^[7]研究了多层合采气井产量劈分方法和斜井的试井分析方法。Ansari A. M.等^[8]、Eissa M.等^[9]介绍了利用多次生产测井成果、采用SIP方法计算分层无阻流量的方法。万玉金等^[10]、李江涛等^[11]、孙勇^[12]探索了多层气藏储量动用程度及影响因素。赵志恒^[13]、张予生等^[14]、易珍丽等^[15]研究了井底积液对产气剖面测试资料的影响,以及产气剖面在水侵特征分析中的应用。李冰毅等^[16]基于试验区地质及动态监测资料,应用数值模拟、室内实验及现场实施方法,对低孔、低渗气藏多层合采开发模式下的产出特征进行了研究。夏竹君^[17]、鲁明春等^[18]、万玉金等^[19]介绍了生产测井在涩北气田的综合应用。杨素卿等^[20]、侯明月等^[21]介绍了产气剖面在水平井中的应用。熊钰等^[22]研究了多层开采的技术界限。

上述文献都只介绍了产气剖面在某一方面或在某一领域的应用。本文在分析各种应用方法的基础上,较为系统地总结了产气剖面测试成果在多层气藏动态分析中的作用,并以台南气田F气藏为例,阐述了具体应用过程。本文总结的技术方法,

对于类似多层气藏开发动态监测优化设计与动态分析具有借鉴意义。

1 产气剖面测试成果应用

利用产气剖面测试成果,可了解单井分层产量贡献及其分层产量随时间的变化;可确定各小层的无阻流量;可掌握各小层的出水情况及其不同层位的出水顺序,并据此推测各小层的出水时间。此外,还可用于分析全气藏的分层产量贡献与剩余储量分布。下面,以台南气田F气藏为例,具体阐述其应用过程。

台南气田位于柴达木盆地三湖地区,属于第四系生物成因、无断层发育的背斜构造气藏。气藏具有含气井段长、气层多而薄、气水层间互等特点。本文研究目标为F气藏,共有a-e六个含气小层,埋藏深度1700 m左右,跨度为37 m,各小层含气面积由上向下(a-e)逐渐减小。第一口生产井于2005年12月投产,2009年11月F气藏全部建成投产。至2016年底,累计获产气剖面139井次,其中8口井单井历年测试产气剖面超过8次,2口井达到13次。丰富的产气剖面资料,为多层气藏生产动态分析奠定了坚实的基础。

1.1 确定单井分层产量贡献

产气剖面测试成果最直接的应用,就是量化给出各小层的产量贡献。台南气田F气藏TN1井、TN2井和TN3井等三口井均射开四个小层(图1),而各井、各小层的产量均存在较大差异。TN1井各小层产气量随深度增加而增加,且表现出较大的层间差异,其中顶部a小层不产气;b和c小层日产气分别为 $0.47 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $2.73 \times 10^4 \text{ m}^3$;而d小层日产气量最高,达 $6.87 \times 10^4 \text{ m}^3$;与TN1井不同的是TN2井c小层日产气量最高;d小层次之;b、a两小层的日产气量依然较低。TN3井各小层产量剖面亦呈现出随深度增大的趋势,但各小层产量相对较为均衡,日产气 $0.91 \times 10^4 \sim 3.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

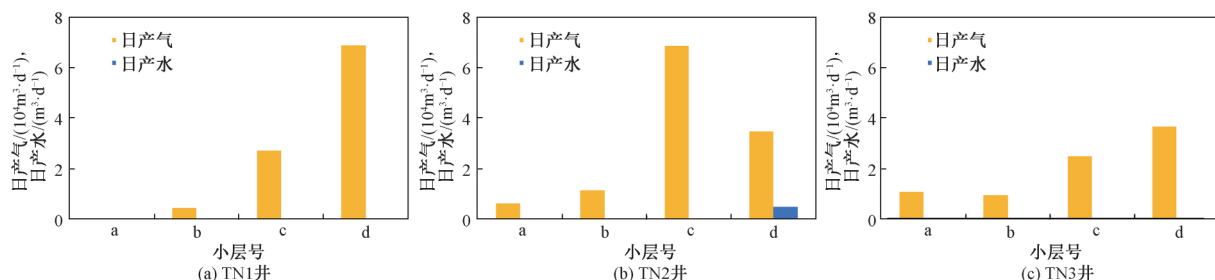


图1 三口井产气剖面测试成果对比图

Fig.1 comparison of gas production profiles test results in three gas wells

井与井之间,以及同一口井各小层间产量的都存在差异,从另外一个侧面也反应了储层在平面上(井间)与纵向上(层间)的非均质特征。

1.2 了解单井分层产量随时间变化

随着时间的推移,分层产量也在变化。由此,通过在同一口井中多次测试产气剖面,即可了解分层产量随时间的变化规律。

图 2 为 TN4 井在 2008 年至 2011 年三次测试的产气剖面成果对比图,随着时间的推移,主

产层和次产层的位置,以及分层产量都在不断调整。2008 年,最下部的 e 小层为主产层;d 小层为次产层;两年之后,e 小层仍为主产层,但 b 小层产量超过 d 小层变为次产层;至 2011 年 10 月,d 小层产量超过 e 小层变为主产层,b 小层仍保持为次产层。3 次测试过程中 c 小层产能低,且日产气相对较为稳定;a 和 b 两个小层在 2010~2011 两年间比较稳定,但均比 2008 年产量有大幅提高。

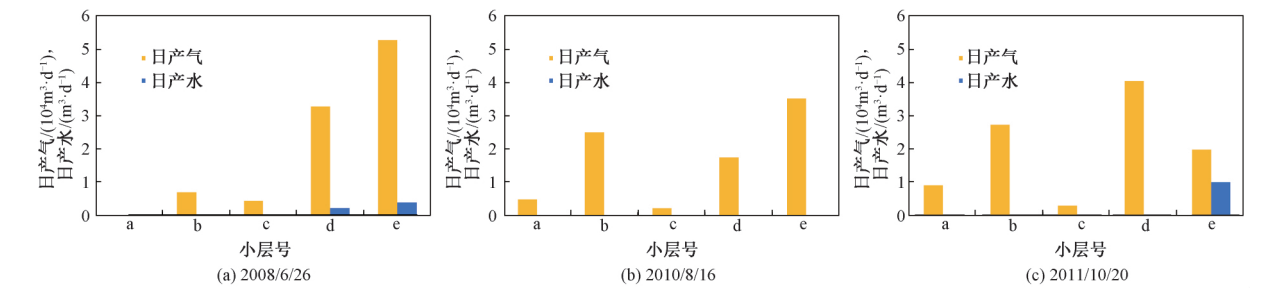


图 2 TN4 井不同时间产气剖面测试结果对比图
Fig.2 Comparison of test results of gas production profiles at different times in Well TN4

单井分层产量随时间变化较大,其原因是多方面的。分层产量变化不仅受本井的地质条件和生产条件的影响,还受邻井井间干扰的影响。此外,边界条件也会影响分层产量,由此需要进行系统、全面地分析才能清楚地了解产量变化规律及其主控因素。具体而言,本井影响因素主要包括:各小层的地层系数、储容系数、表皮系数、单井配产、出水及出砂等;邻井干扰的影响主要包括:邻井射孔层位及其与本井对应关系、邻井配产,以及井间相对产量的变化等,而边界条件主要是指气井周围的气水边界、断层或者岩性边界等。

TN4 井 e 小层储层物性好,初期产量高,但产量逐年降低,主要是因为受水侵的影响;d 小层储量高、物性较好,产量相对较高,2018 年 8 月产量降低可能是井间干扰引起的,2011 年在 e 小层产量下降后,d 小层产能恢复并达到较高的产量;a、b 两小层

早期产量低主要是储层物性差,或存在一定污染引起的,随着地层压力降低,生产压差增大,潜在产能得以发挥。

1.3 确定单井分层无阻流量

利用连续多次生产测井,获得 2 次以上、最好 3 至 4 次的产气剖面测试资料,即可计算分层无阻流量。该方法于上世纪八十年代提出,被称为 SIP (Selective Inflow Performance Method) 方法,即选择性流入动态方法。2009 年 Ansari A. M.采用 SIP 方法计算了卡塔尔北方气田多层合采气井各小层的无阻流量。

2013 年 7 月,针对台南气田 F 气藏 TN4 井采用 3 个工作制度,分别进行了产气剖面测试,获得 3 个流压条件下 a~e 等 5 个小层的产量(表 1)。将 3 次产气剖面测试获得的流压—分层产量绘制在 IPR 曲线上(图 3),即可计算分层无阻流量。

表 1 TN4 井三个工作制度条件下产气剖面测试成果数据表
Table 1 Gas production profile test Results data sheet for Well TN4 under three working conditions

测试日期	工作制度 /mm	井底流压 /MPa	日产气 /(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	分层日产气/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)				
				a	b	c	d	e
2013/7/11	5.0	12.28	3.73	0.86	0.82	0.19	1.49	0.37
2013/7/16	5.5	12.21	4.47	0.72	1.25	0.18	1.56	0.76
2013/7/21	6.0	12.14	4.57	0.82	1.01	0.18	1.74	0.82

TN4 井 2013 年 7 月产气剖面测试成果表明,d 小层产能最高,无阻流量为 10.94×10⁴ m³/d;b、e、a

小层产能依次减少;c 小层产能最低,无阻流量仅为 1.62×10⁴ m³/d。

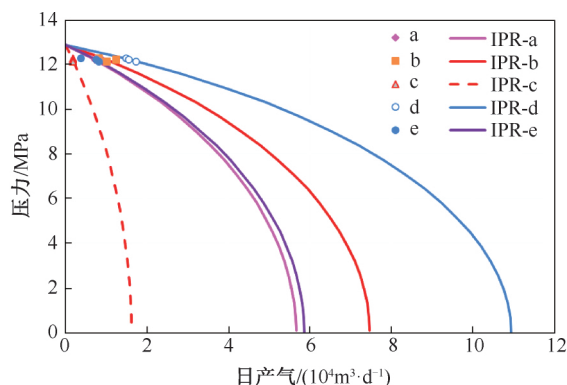


图3 TN4井各小层产气剖面测试成果及IPR曲线

Fig.3 IPR curves and test results of gas production profiles in Well TN4

TN4井2013年7月测试成果(表1)与2011年10月测试成果相比,分层产量略有变化,但总体趋

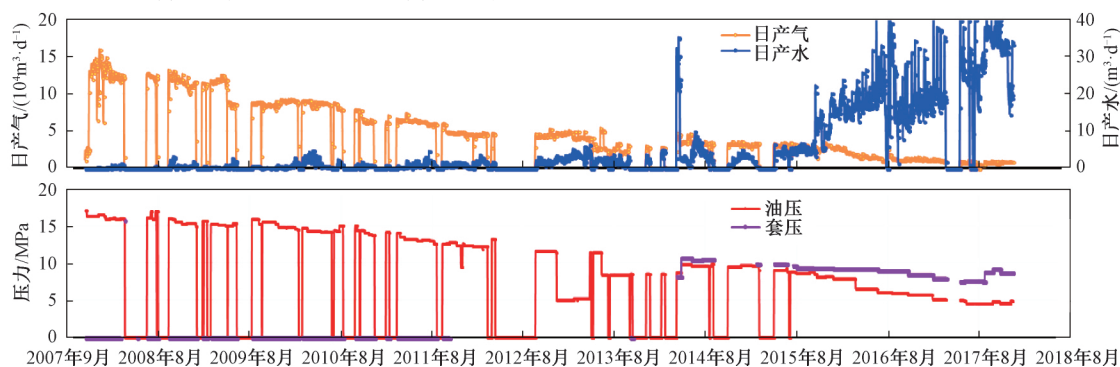


图4 TN5井生产曲线

Fig.4 Production curve of Well TN5

通过生产曲线,可以观察到产水量及水气比的变化,从而确定出水时间,但难以确定具体的水层位。而产气剖面则可以给出分层产气与产水量,能够更为准确的识别出水层位、估算各小层出水时间。在2008年至2016年期间,TN5井共测试产气剖面9次,平均每年测一次产气剖面,图5给出其中8次产气剖面的测试成果。

2008-2009年两次产气剖面(图5(a)、5(b))展现出TN5井初期分层产能差异。各小层产量基本没有随时间调整,但层间产量差异明显。d小层产气量最高,日产气 $6.85 \times 10^4 \sim 7.08 \times 10^4 \text{ m}^3$;其次为e小层;c小层和b小层依次降低;a小层的产量最低,日产气仅为 $0 \sim 0.39 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

从出水层位上看,在射开的5个小层中,由下向上依次出水。2008-2009年只有e小层出水(图5(a)、(b)),日产水 $0.35 \sim 0.50 \text{ m}^3$ 。2010年4月测试时,d小层已经出水(图5(c))。至2011年4月,d小层日产水 $0.6 \sim 0.8 \text{ m}^3$,由于出水d小层日产气下降到 $3.36 \times 10^4 \sim 3.94 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图5(d)、(e)),下

势一致,表明两年开采过程中,生产相对稳定,分层产能没有明显变化,层间产量没有大的调整。2013年e小层无阻流量相对较低,主要还是由于该层出水引起的。

1.4 确定出水顺序及分层出水量

TN5井位于F气藏最东部,共射开5个小层。该井于2007年11月投产,初期产气量为 $12 \times 10^4 \sim 14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。随着气藏规模建产,2009年6月TN5井产量调减到 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右(图4)。自2010年11月,日产水开始缓慢增加,由 0.7 m^3 上升到2015年底的 5.0 m^3 以上,相应地日产气由 $7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 逐渐递减到 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右;随后日产水量快速上升,达到 $20 \sim 40 \text{ m}^3$,产气量进一步递减。到2017年3月,日产气 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右。

降幅度超过40%。随后的2年(2012-2013年)未进行生产测井。

至2014年8月再次测试时,c小层日产水已经高达 1.7 m^3 (图5(f)),一年后c小层日产水更是高达 4.0 m^3 (图5(g)),该层日产气也由2011年4月的 $1.18 \times 10^4 \text{ m}^3$ 下降到2014-2015年 $0.49 \times 10^4 \sim 0.67 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2016年9月,水侵进一步加剧,底部4个小层全部出水(图5(h)),气井日产水 45.6 m^3 。

生产曲线(图4)只能给出单井日产气、日产水随时间的总体变化,而产气剖面测试成果(图5)能够进一步给出各小层在不同时间节点上的日产气与日产水情况。通过产气剖面测试,可以清楚地了解TN5井的出水顺序与分层产量变化:①e小层为次主力产层,但距气水界面近,最先出水;然而由于出水量相对较小,对气井生产基本没有影响;②d小层为主力气产层,d小层出水导致本层产气量大幅度下降,进而导致全井产量递减;③c小层产能居中,出水后水气比上升快,对c小层产气量影响较大,但气井产量还维持在 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上;④b小

层出水后,主力产气层全部出水,侵入水在各小层均形成连续水侵通道,气井产水量快速上升,致使气井产气量大幅降低;⑤在 5 个小层中 a 小层物性

最差,气产量始终较低,但相对比较稳定;另外,由于 a 小层含气面积大,TN5 井射孔部位距气水界面较远,由此该层尚未见水。

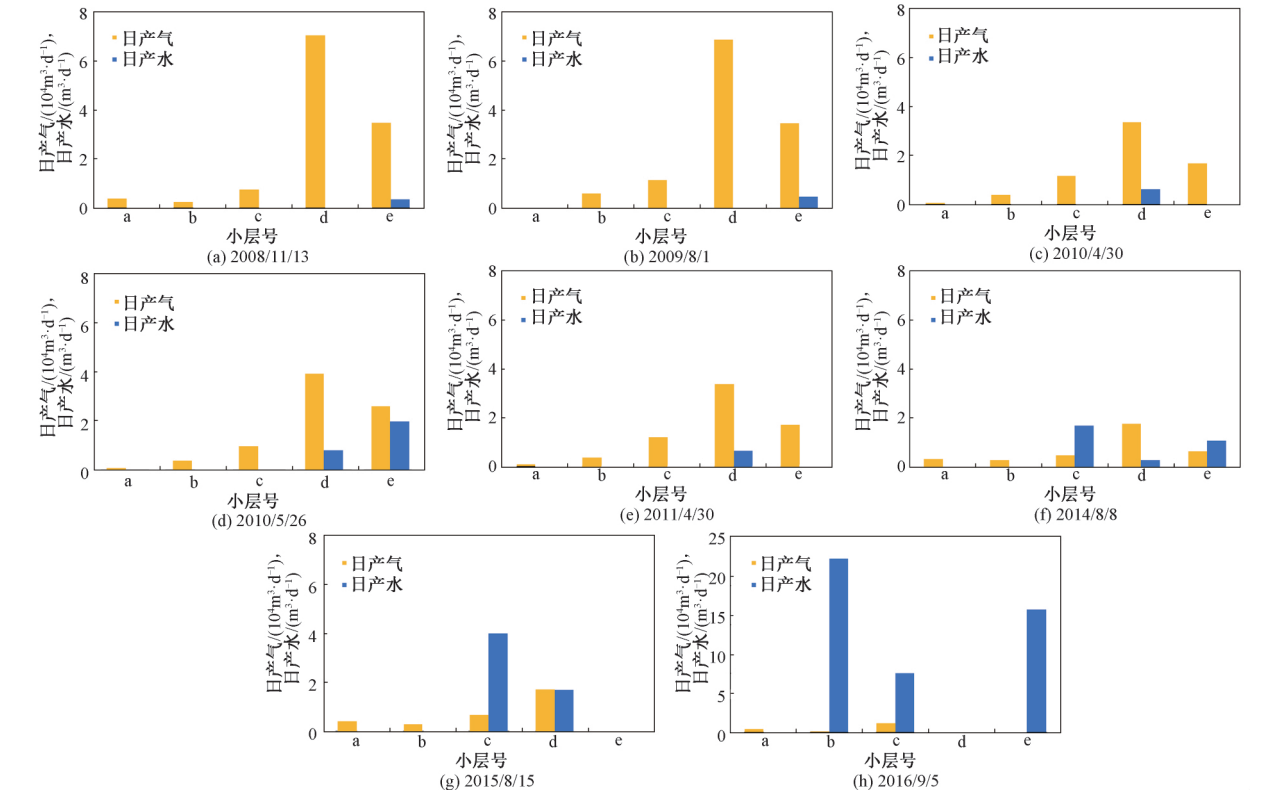
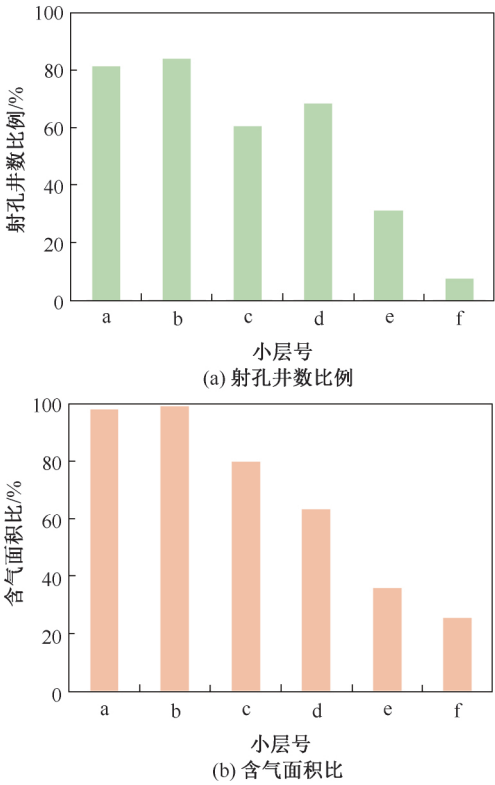


图 5 TN5 井不同时间产气剖面测试成果图
Fig.5 Results of production profile of Well TN5 by vintage

1.5 确定气藏分层产量贡献

台南气田 F 气藏共射开 6 个含气小层,射孔井数比例(图 6(a))与含气面积比(图 6(b))基本一致,即各小层井控程度基本一致;每个小层都有超过一半 (58.3% ~ 95.7%) 的井进行了产气剖面测试,由图 6(c)可以看出,产气剖面测试井所占比例平均为 60%;测试井既有位于构造高部位的井,也有距气水界面较近的边翼部气井,可见产气剖面测试井具有较好的代表性。

在 2010 年以前,台南气田 F 气藏基本还未受到边水的影响,产气剖面测试成果基本反应了各井各小层的产气量贡献。而目前,由于受到边水的影响,常规产气剖面测试无法得到准确结果。首先对具有多次测试成果的气井计算各小层平均值,代表该井的产气剖面;然后,将所有测试井各小层产气量相加代表气藏内各小层的产量贡献;最后将各小层产气量之和除以测试井数,得到气藏各小层平均产量贡献(图 6(d))。



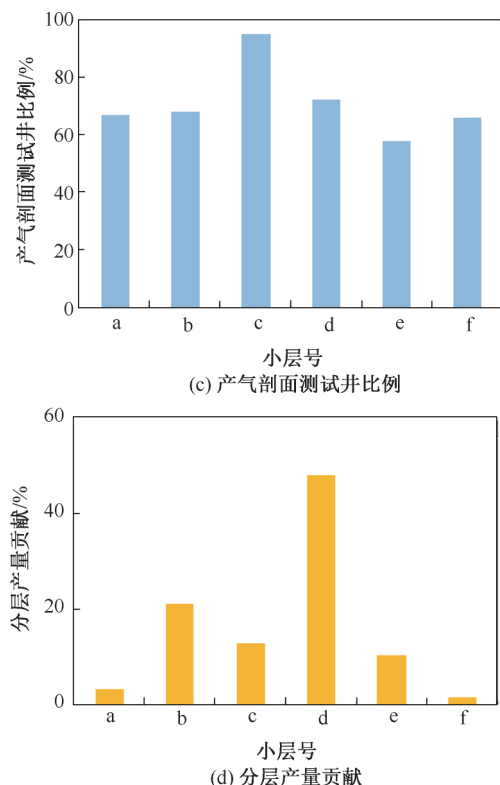


图6 气田F气藏各小层参数柱状图

Fig.6 Bar chart of small layer parameters of gas reservoir in F gas-field

对于F气藏,对比分析各小层的平均产气量贡献表明:①a小层含气面积大、射孔井数多,但储层物性差,产量贡献不大;②d小层厚度大、物性好,射孔井数较多,且d小层还部署了水平井,由此产量贡献最大,约占气藏总产量的50%;③随着埋藏深度的增大及含气面积的减小,其他各小层(b、c、e和f)由上到下产量贡献依次减少,f小层平均产量贡献最低。

上述方法主要适用于开发早期气藏分层产能贡献的分析,在此基础上,结合单井动态储量评价,可以估算分层剩余储量,用于开发潜力分析。气藏见水后,受出非均匀水侵的影响,单井产气剖面会有较大的调整,应分时间段、分区,按累产气或井控面积等参数加权平均,进行分层产能贡献分析。

2 结论

(1)产气剖面测试对于多层气藏动态监测与动态分析具有不可替代的作用。可充分利用产气剖面测试成果,分析分层产量贡献及其随时间的变化、确定分层无阻流量、识别不同层位的出水顺序及分层出水动态,此外还可用于分析全气藏的分层产量贡献与剩余气分布。

(2)在多层气藏开发过程中,建议有计划、系统地安排产气剖面测试,与常规动态监测方法相结合,深化认识多层气藏开发特征。

(3)分层产量随时间变化受本井、邻井及边界条件等多种因素影响,要更加准确地了解其变化规律,还需要进一步做大量深入细致的研究,如数值模拟准确拟合产气剖面随时间变化、分层产能变化规律等。

致谢:感谢国家重大专项“疏松砂岩气藏长期稳产技术”的支持和相关科研人员的支持;感谢中国石油勘探开发研究院及相关单位同意该论文的发表。

参 考 文 献

- [1] 李得信,张洪,方惠军.涪北气田动态监测技术[J].油气井测试,2012,21(3):46-48,51.
LI Dexin, ZHANG Hong, FANG Huijun. The dynamic monitoring tech in Sebei gas field [J]. Well Testing, 2012, 21(3): 46-48, 51.
- [2] 张小军,王小鲁,沈生福,等.涪北气田动态监测体系及优化研究[J].天然气勘探与开发,2012,35(3):37-40.
ZHANG Xiaojun, WANG Xiaolu, SHEN Shengfu et al. Dynamic monitoring system used for Sebei gas field and its optimization [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2012, 35(3): 37-40.
- [3] FETKOVICH M J, BRADLEY M D, THRASHER T S et al. Depletion performance of layered reservoirs without crossflow [J]. SPE Formation Evaluation, 1990, 5(3): 310-318.
- [4] 朱华银,胡勇,李江涛,等.柴达木盆地涪北多层气藏合采物理模拟[J].石油学报,2013,34(S1):136-142.
ZHU Huayin, HU Yong, LI Jiangtao et al. Physical simulation of commingled production for multilayer gas reservoir in Sebei gas field, Qaidam Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(S1): 136-142.
- [5] 史进,盛蔚,李久锦,等.多层合采气藏产量劈分数值模拟研究[J].海洋石油,2015,35(2):56-60.
SHI Jin, SHENG Wei, LI Jiudi et al. Study on numerical simulation of production allocation in multi-layer gas reservoirs [J]. Offshore Oil, 2015, 35(2): 56-60.
- [6] 顾岱鸿,崔国峰,刘广峰,等.多层合采气井产量劈分新方法[J].天然气地球科学,2016,27(7):1346-1349.
GU Daihong, CUI Guofeng, LIU Guangfeng et al. A new method of production splitting for multilayer commingled gas well [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(7): 1346-1349.
- [7] 陈仲良,王怒涛,呈皇辉,等.有关多层合采和斜井的试井解释[J].油气井测试,2017,26(3):29-32.
CHEN Zhongliang, WANG Nutao, CHENG Huanghui et al. Well test interpretation about multilayer commingled and inclined well [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 29-32.

- [8] ANSARI A M, MAHMOUD Y I. Multi-layer testing: theory and practice [C]. Paper IPTC 13546 presented at the International petroleum technology conference, Doha, 7-9 December 2009.
- [9] EISSA M, KUMAR A, ZAOUALI Z *et al.* Integrated workflow to evaluate and understand well performance in multi-layer mature gas reservoirs [C]. SPE 164356, 2013.
- [10] 万玉金,孙贺东,黄伟岗,等.涩北气田多层气藏储量动用程度分析[J].天然气工业,2009,29(7):58-60.
WAN Yujin, SUN Hedong, HUANG Weigang *et al.* Reserves producing level analysis of multilayer gas reservoir in the Sebei gas filed [J]. Natural Gas Industry, 2009,29(7):58-60.
- [11] 李江涛,张绍辉,杨莉,等.涩北气田气层动用程度研究[J].油气井测试,2014,23(1):30-32,76.
LI Jiangtao, ZHANG Shaohui, YANG Li *et al.* Study on utilization level of gas reservoir in Sebei gas field [J]. Well Testing, 2014,23(1):30-32,76.
- [12] 孙勇.试井资料在油层动用状况及措施效果评价中的作用[J].油气井测试,2012,21(3):26-28.
SUN Yong. Effect of well test data on used condition of oil reservoir and evaluation of measure effectiveness [J]. Well Testing, 2012,21(3):26-28.
- [13] 赵志恒.青海涩北气田井底积液产气剖面解释方法研究[D].成都:西南石油大学,2007.
ZHAO Zhiheng. Study on the interpretation method of gas production profile with liquid in the wellbore in Sebei gas field, Qinghai [D]. Chengdu: Southwest petroleum university, 2007.
- [14] 张予生,夏元剑,王成荣,等.柴达木盆地涩北气田出水井产气剖面曲线特征[J].吐哈油气,2008,14(3):378-380.
ZHANG Yusheng, XIA Yuanjian, WANG Chengrong *et al.* Gas production profile curve characteristics of wet wells in Sebei gas field in Chaidamu basin [J]. Tuha Oil & Gas, 2008,14(3):378-380.
- [15] 易珍丽,侯淞泽,李延华,等.涩北二号疏松砂岩气田水侵特征分析[J].天然气技术与经济,2013,2(2):25-29.
YI Zhenli, HOU Songze, LI Yanhua *et al.* Water-invasion characteristics of Sebei II gas field [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2013,2(2):25-29.
- [16] 李冰毅,李晓慧,汪洁.低孔低渗气藏多层合采开发模式下的产出特征研究[J].油气井测试,2017,26(2):20-22,32.
LI Bingyi, LI Xiaohui, WANG Jie. Output characteristics research of commingling production model in low porosity and low permeability gas reservoir [J]. Well Testing, 2017,26(2):20-22,32.
- [17] 夏竹君.产气剖面测井技术在涩北一号气田的应用[J].天然气技术,2008,2(5):36-38.
XIA Zhujun. Application of gas-producing profile to Sebei-1 gasfield [J]. Natural Gas Technology, 2008,2(5):36-38.
- [18] 鲁明春,岳龙,李国现,等.连续油管存储式测井技术在涩北气田的试验应用[J].青海石油,2014,32(2):69-73.
LU Mingchun, YUE Long, LI Guoxian *et al.* Application of coiled tubing logging technology to Sebei gas field [J]. Qinghai Oil, 2014,32(2):69-73.
- [19] 万玉金,李江涛,杨炳秀.多层疏松砂岩气田开发[M].北京:石油工业出版社,2016:102-108.
- [20] 杨素卿,朱秋琳,黄晓玲,等.水平井产气剖面分析及开发启示[J].天然气技术与经济,2015,9(3):37-40.
YANG Suqing, ZHU Qiulin, HUANG Xiaoling *et al.* Gas-production profile of horizontal well: its implications for development [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2015,9(3):37-40.
- [21] 侯明月,郭海敏,戴家才,等.水平井生产测井解释方法研究[J].测井技术,2004,28(1):80-82.
HOU Mingyue, GUO Haimin, DAI Jiakai *et al.* On interpretation method for production logging in horizontal wells [J]. Well Logging Technology, 2004,28(1):80-82.
- [22] 熊钰,张烈辉,阳仿勇,等.多层气藏一井多层开采技术界限研究[J].天然气工业,2005,25(7):81-83.
XIONG Yu, ZHANG Liehui, YANG Fangyong *et al.* Study on technical policy and threshold value of multiple-zone production with one well for multi-layered gas reservoir [J]. Natural Gas Industry, 2005,25(7):81-83.

编辑 王军

第一作者简介:万玉金,男,1968年出生,博士,教授级高级工程师,1990年毕业于大庆石油学院油藏工程专业,主要从事气藏开发前期评价与气田开发方案编制等工作。电话:010-83596278,13700362822;Email:wanyj69@petrochina.com.cn。地址:河北省廊坊市广阳区石油分院C楼221,邮政编码:065007。