

# 川西坳陷洛带气田致密砂岩气藏压力恢复试井特征分析

吴晓光,袁莉,李萌,王志文,林绍文

中国石化西南石油工程有限公司测井分公司 四川成都 610100

通讯作者:Email:122783907@qq.com

项目支持:中石化西南油气田科研项目“洛带气田遂宁组气藏剩余未动用储量精细评价”(15000033-18-ZC0609-0001)

引用:吴晓光,袁莉,李萌,等. 川西坳陷洛带气田致密砂岩气藏压力恢复试井特征分析[J]. 油气井测试,2021,30(1):59-65.

Cite: WU Xiaoguang, YUAN Li, LI Meng, et al. Pressure build-up test characteristics of tight sandstone gas reservoir in Luodai gas field, Western Sichuan depression [J]. Well Testing, 2021,30(1):59-65.

**摘要** 川西坳陷洛带气田遂宁组致密砂岩储层多具备独立的压力系统,压裂后压力恢复缓慢,多未出现径向流特征。针对致密砂岩气井压裂后的不同渗流特征,选择相应的试井井例,对洛带气田遂宁组气藏压力和产能进行监测;对储层水力压裂改造效果、井底污染情况进行评价;对砂体形状、连通情况,以及边界特征进行识别,辅助气藏地质认识;对地层压力恢复试井特征进行分析。结果表明,压力恢复作业前,应排出井底积液、排除井内异常工况,降低压力恢复的异常波动;评价解释需结合气藏地质特征和测试、测井、地震资料等多种动静态资料,以提高解释精度。该分析为遂宁组气藏特征描述、压裂效果评价、合理开发等提供了科学依据,对类似地质条件和生产工况下的致密砂岩气井压力恢复试井解释具有一定的借鉴意义。

**关键词** 洛带气田;遂宁组;致密砂岩气藏;试井解释;压裂;压力恢复;线性流

**中图分类号**:TE353      **文献标识码**:B      **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2021.01.011

## Pressure build-up test characteristics of tight sandstone gas reservoir in Luodai gas field, Western Sichuan depression

WU Xiaoguang, YUAN Li, LI Meng, WANG Zhiwen, LIN Shaowen

Well-Logging Services Company, SINOPEC Southwest Petroleum Engineering Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China

**Abstract:** The tight sandstone reservoirs of Suining Formation in Luodai gas field of Western Sichuan Depression mostly have independent pressure system, and the pressure recovery is slow after fracturing, and most of them have no radial flow characteristics. According to the different seepage characteristics of tight sandstone gas wells after fracturing, the corresponding well test cases are selected to monitor the pressure and productivity of Suining Formation gas reservoir in Luodai gas field; the effect of reservoir hydraulic fracturing and bottom hole pollution are evaluated; the sand body shape, connectivity and boundary characteristics are identified to assist gas reservoir geological understanding; and the formation pressure recovery well test characteristics are analyzed. The results show that before the pressure recovery operation, the bottom hole liquid should be drained, the abnormal working conditions in the well should be eliminated, and the abnormal fluctuation of pressure recovery should be reduced; the evaluation and interpretation should be combined with the geological characteristics of the gas reservoir and a variety of dynamic and static data such as testing, logging and seismic data to improve the interpretation accuracy. This analysis provides a scientific basis for the description of Suining Formation gas reservoir characteristics, fracturing effect evaluation and reasonable development, and has a certain reference for pressure build-up test interpretation of tight sandstone gas wells under similar geological conditions and production conditions.

**Keywords:** Luodai gas field; Suining formation; tight sandstone gas reservoir; well test interpretation; fracturing; pressure recovery; linear flow

川西坳陷洛带气田陆相遂宁组( $J_3sn$ )致密砂岩气藏单个砂体厚度薄,砂体展布非均质强,由于河道频繁迁移、改道和废弃,纵向上多期河道叠加形成迷宫状空间砂体结构<sup>[1-2]</sup>。砂体空间展布复杂,刻画难度大,通过沉积微相精细建模研究可以

对砂体的展布规律进行静态表观描述,然而对于地震剖面上看似连通的砂体是否真正连通依然略显不足。

遂宁组( $J_3sn$ )致密砂岩气藏气源主要来自下伏须家河组煤系烃源岩( $T_3x$ ),属于远源次生气藏,气

藏含气丰度低,储层低孔、低渗,单井自然产能低。针对遂宁组储层敏感性特征的新型压裂液配方、配套压裂工艺及返排措施成为了遂宁组特低渗致密砂岩气藏难动用储量的升级和增储上产的关键技术,促进了遂宁组气藏产能的大幅度增长<sup>[3-4]</sup>。吴志均等(2002)、罗金丽等(2001)曾通过压力恢复试井评价分析了川西其他工区开发较早的陆相蓬莱镇组、沙溪庙组致密砂岩气藏的压裂效果,并对气井压裂后的压力恢复试井特征进行了归纳分类,但对于致密砂岩压裂气井生产历史中后期井筒积液效应导致的试井曲线异常分析,以及有边界气藏类型压力恢复特征分析等存在不足<sup>[5-6]</sup>。

遂宁组致密砂岩气藏压裂后投产多年,多数气井目前低压低产且井底存有积液,同时前期多未进行过压力恢复试井作业和相关分析,水力裂缝当前开启情况未知,井筒积液效应导致的压力恢复双对数曲线异常普遍存在。随着气田的持续深入开发以及挖潜需要,在前人研究的基础上,通过压力恢复试井监测了洛带气田遂宁组气藏压力和产能,评价了储层水力压裂改造效果、井底污染情况,同时对砂体形状、连通情况以及边界特征进行了识别,辅助气藏地质认识,为气藏精细描述提供了技术参数,为洛带气田认识遂宁组气藏、监测气井动态、指导生产提供了科学依据。

## 1 气藏地质背景及储层特征

洛带气田位于川西坳陷东部缓坡构造带上,其西侧为龙泉山北向东构造带,总体上为一个北东向宽缓的鼻状构造。区内地层自上而下依次发育第四系(Q),白垩系(K),侏罗系蓬莱镇组(J<sub>3p</sub>),遂宁组(J<sub>3sn</sub>),上、下沙溪庙组(J<sub>2s+x</sub>),千佛崖组(J<sub>2q</sub>),自流井组(J<sub>1z</sub>),上三叠统须家河组(T<sub>3x</sub>)及下伏地层。该气田已经相继发现了上(蓬莱镇组)、中(遂宁组)和下(沙溪庙组)气藏,均为致密砂岩气藏,气藏开发均需要经过压裂才能有效释放储层产能,获得较理想的产量。上部蓬莱镇组、遂宁组气藏是正在开发的主力气藏,沙溪庙气藏尚未进入大规模开发阶段。

遂宁组沉积相主要为三角洲前缘斜坡亚相为主,以及少部分的浅湖亚相,沉积微相控制砂体展布,遂宁组含气层位及产气层位均处于浅湖砂坝、三角洲前缘水下分流河道、河口砂坝及远砂坝等有利沉积微相较厚的砂体分布范围内,储层总体上呈

层状、似层状和透镜状<sup>[7-8]</sup>。遂宁组上部一般为棕褐色泥岩、粉砂质泥岩夹褐灰色粉砂岩、细粒长石岩屑砂岩;中部为浅褐灰、褐灰色粉砂岩、细粒长石岩屑砂岩夹棕褐色泥岩、粉砂质泥岩;下部为棕褐色泥岩、粉砂质泥岩与褐灰色粉砂岩、泥质粉砂岩、细粒长石岩屑砂岩略等厚-不等厚互层,整体地层特征表现为以泥岩为主的砂泥岩薄互层,含气砂体主要分布在遂宁组中上部。

洛带气田遂宁组储层为低孔、低渗致密砂岩,埋深主要在1 500 m附近,最大埋深2 000 m以上。根据248个砂岩心的统计结果,储层孔隙度1.63%~10.22%,平均为5.826%,明显低于上覆蓬莱镇组砂岩;渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 6.88 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均 $0.565 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,高于 $0.100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层仅占15%左右,渗透率与储层孔隙度呈现良好的正相关关系。遂宁组储层测井特征可以简单概括为“四低一高”,即低自然伽玛、低声波、低中子、相对低密度,高电阻率<sup>[9-10]</sup>。储层致密化程度高、毛管压力高、含水饱和度高,储层非均质性强,常被分隔成孤立的、独具压力系统的“储集体”。

## 2 压力恢复试井特征

遂宁组致密砂岩气井经过压裂改造后,近井周围以人工压裂缝系统渗流为主的高渗流带及较远端-远端低渗流带组成了井下渗流系统。压力恢复试井特征以井储表皮效应和裂缝线性流为主,压力恢复后期多未出现径向流特征,少数井可以见到非渗透性边界特征。压力恢复解释储层有效渗透率低,井下天然气渗流困难,流动阻力大,气藏压力平衡过程缓慢,单井波及范围较小,生产井未曾发现有井间干扰现象。总体来说遂宁组致密砂岩气井压裂后的渗流特征主要有有限(无限)导流垂直裂缝井+均质气藏、有限(无限)导流垂直裂缝井+径向复合气藏、垂直裂缝井+有边界气藏以及异常压力恢复特征等几类。

### 2.1 有限(无限)导流垂直裂缝井+均质气藏

罗金丽等(2001)曾对川西气田百余口陆相低渗透致密储层气井压裂后的压力恢复试井特征进行了统计分析,大多数气井压力恢复特征表现为有限导流垂直裂缝特征,少部分气井表现为均质无限导流垂直裂缝特征<sup>[6]</sup>。洛带气田遂宁组气井压裂后压力恢复试井多数井表现为类似特征。

以L653井为例,该井位于洛带鼻状构造轴部偏

南端西北翼,产层段为遂宁组 1 498~1 510 m,1 538~1 546 m;2003 年 3 月底投产,初期油压 11.32 MPa,套压 11.2 MPa,产气  $1.47 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,产水  $0.53 \text{ m}^3/\text{d}$ ;至 2015 年 9 月关压恢前油压 1.15 MPa,套压 1.30 MPa,日产气  $0.34 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,累计产气  $5 591.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,日产水  $0.08 \text{ m}^3$ 。该井双对数拟合图上显示导数曲线斜率近似为  $1/2$ ,在拟合曲线的尾端,拟压力差与导数曲线距离近似为 0.301 个对数周期,为明显的无限导流垂直裂缝渗流特征(图 1),表明经过压裂,近井地带形成了较好的互相连通的裂缝网络,且压裂裂缝导流能力比较强,经过 10 余年的持续开采,该井压裂缝依然保持了较好的开启性,解释总表皮系数 -6.92,井下无污染,裂缝半长 198.7 m,有效渗透率  $0.084 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。然而,由于储层本身孔渗特征较差,导致该井经过较长时间(关井时间累计 1 432 h,约 59.7 d)的关井压力恢复双对数拟合曲线仍未出现径向流。

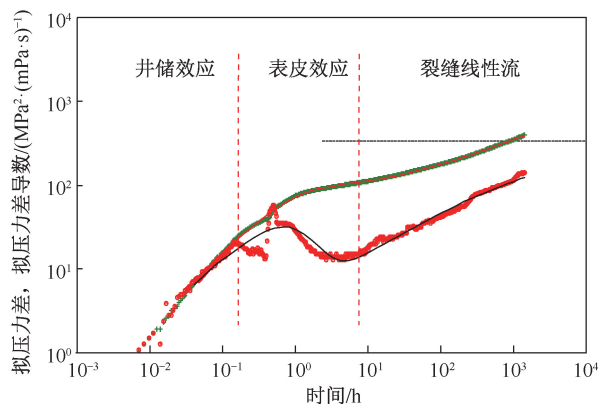


图 1 L653 井压力恢复双对数拟合曲线图

Fig. 1 Fitting curve of log-log curve of pressure build-up in Well L653

## 2.2 有限(无限)导流垂直裂缝井+径向复合气藏

受沉积微相控制,洛带气田遂宁组气井所控制的河道砂体在空间上具有较强的非均质性,造成相邻砂体物性的差异;亦或受储层压裂改造影响,造成了两个物性、渗透性有差异的砂体在空间上的联通,在压力恢复双对数拟合图版上表现为早期井储表皮效应,中期裂缝线性流、后期导数末端上翘(外区渗透性变差)或者下掉(外区渗透性变好)。少部分气井在压力恢复曲线特征上可表现出类似特征。

LS57D 井位于洛带鼻状构造轴部遂宁组 JSN<sub>1</sub><sup>2</sup> 砂组河道砂体分布区,压力恢复双对数拟合结果具有压裂井径向复合储层渗流特征,内区渗透性差,外区渗透性好,解释渗透率  $0.604 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,流度比 0.46(内外区渗透率比),裂缝半长 57.4 m,复合半

径 77.4 m(图 2)。该井自 2015 年 11 月投产,初始产量  $1.42 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,油压 17.5 MPa,至今已累产气  $1 572.154 2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,累计产水  $4.95 \text{ m}^3$ 。目前产量  $0.46 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,油压 4.4 MPa,不产水,井下气源充足,证实了该井存在在外区供气的可能。

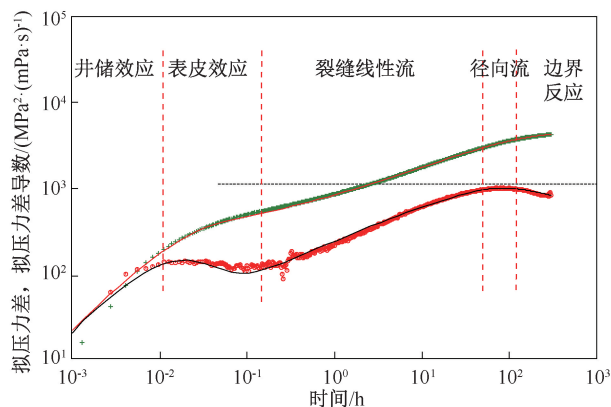


图 2 LS57D 井压力恢复双对数拟合曲线图

Fig. 2 Fitting curve of log-log curve of pressure build-up in Well LS57D

## 2.3 垂直裂缝井+有边界气藏

X4 井是一口新钻井,位于洛带鼻状构造轴部构造相对高部位,目的层遂宁组 JSN<sub>1</sub><sup>1+2</sup> 砂组位于有利沉积相带,地震预测河道砂体储层发育。该井在完井测试后进行了压力恢复试井作业,压力恢复双对数曲线图显示在井储效应之后,出现了裂缝表皮扰动,中期斜率近于  $1/4 \sim 1/2$  的裂缝线性流特征,径向流特征、末期边界效应(导数曲线尾部骤然跌落),如图 3 所示。

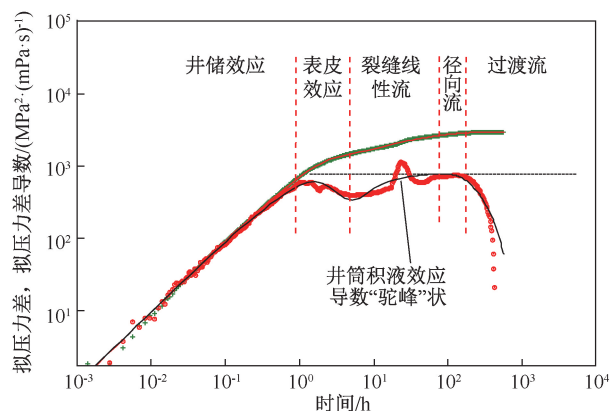


图 3 X4 井压力恢复双对数曲线拟合图

Fig. 3 Fitting curve of log-log curve of pressure build-up in Well X4

该井关井前井内流压梯度存在明显的上下两段,在 900 m 以上平均为 0.023 MPa/100 m,900 m 以下平均流压梯度为 0.165 MPa/100 m,指示井内



流态在 900 m 以下存在气液混相,井底存有积液。关井压力恢复后,井内静压梯度自下而上稳定在 0.04 MPa/100 m 左右,井内为纯气相(图 4)。压力计位置垂深 1 516.4 m,产层中部垂深 1 531.4 m。

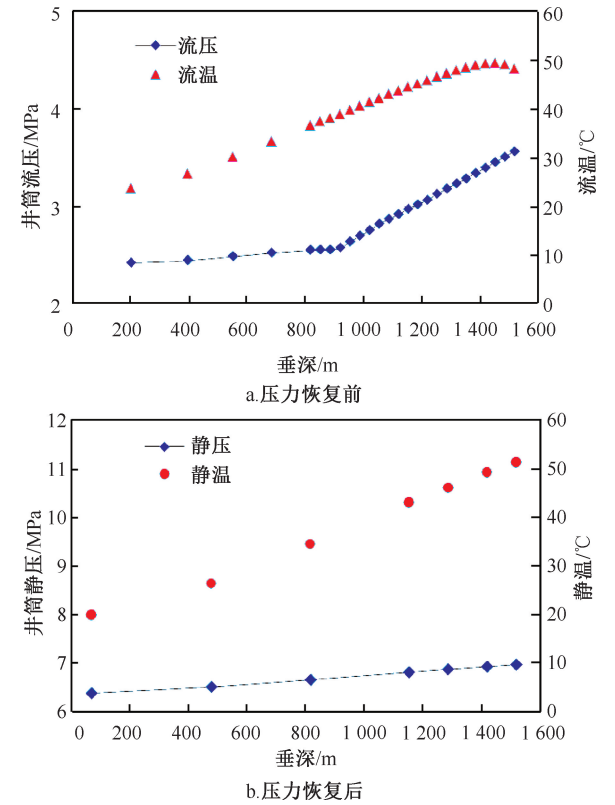


图 4 X4 井井筒内压力梯度剖面

Fig. 4 Pressure gradient profile in Well X4

由于是低渗透性气井,压差较大,关井后井内气水重力分异,相态重新分布(井筒积液效应),关井压力恢复在 20~30 h 周期内陡然抬升,导数曲线出现“驼峰状”,之后压力恢复速率又被地层能量所平衡至正常恢复状态(图 5)。

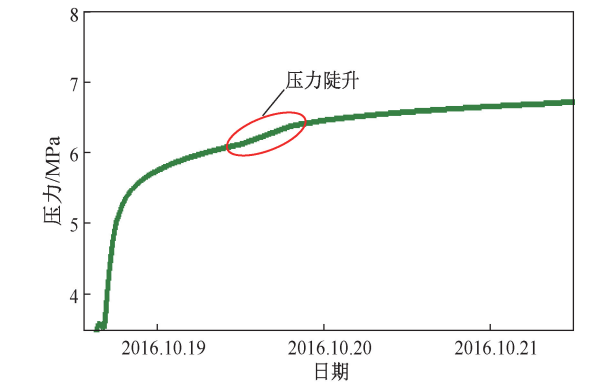


图 5 X4 井关井压力恢复前期压力曲线

Fig. 5 Pressure curve of Well X4 in the early stage of shut in pressure recovery

双对数图版上拟压力导数曲线约在 200 h 后开

始出现迅速下落,其尾部趋势线接近于零(图 3),疑为非渗透性边界反映到井底,该井所控制的封闭区域内的压力趋于平衡。导数曲线下掉可由定压边界、底水侵入、封闭边界效应等原因造成<sup>[11-13]</sup>。X4 井气藏钻井地质设计初始认为是水下分流河道砂体(图 6),地震平面振幅异常显示该井位于河道砂体内部,在该井筒的东北、西北和东南方向,砂体有较明显尖灭特征,指示在该井目的层的东北、西南和东南方向疑似存在非渗透性边界。

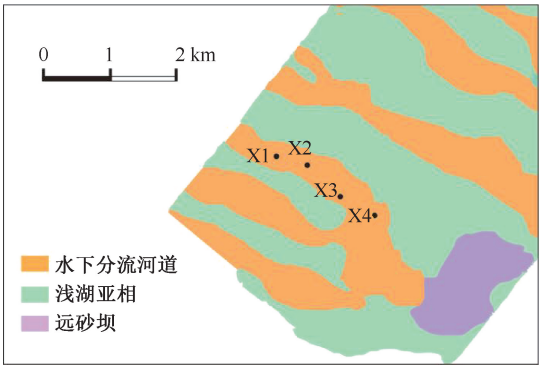


图 6 X1~X4 井遂宁组 JSN<sub>1</sub><sup>1+2</sup> 沉积微相简图

Fig. 6 Sedimentary microfacies diagram of Well X1-X4

从横向对比剖面来看(图 7、图 8),该井处于同河道的构造相对高部位,构造位置有利,3 口邻井当前均有不错产能(表 1),本井关井前稳定产量为  $0.96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。4 口井之中构造位置最低的 X1 井测井曲线电性特征也比较好的(图 8),且不产水,排除了边底水入侵对 X4 井压力恢复造成导数曲线下掉的可能性,同时基于该地区气藏特点,几乎不存在定压边界的地质条件,排除了定压边界效应的影响。

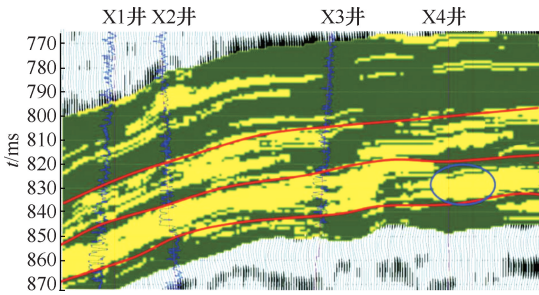


图 7 X4 井地震波阻抗反演砂体(预测)

Fig. 7 Inversion of sand body by seismic impedance in Well X4 (Prediction)

综合认为,X4 井下气藏渗流特征上存在非渗透性边界,压力恢复曲线渗流特征也反映出了边界特征,因此压力恢复解释模型选择“井储+表皮+有限导流垂直裂缝+非渗透边界”。非渗透边界分别采取了“圆形封闭边界”、“矩形封闭边界”、“夹角形边界”等

模型进行了拟合,几种模型拟合计算的参数基本在一个数量级,后期导数曲线尾部跌落特征只有矩形与圆形边界的拟合效果较好,结合该井的实际地质条件,综合选择近圆形边界拟合结果作为本井压力恢复解释的最终结果,解释裂缝半长 22.1 m,气藏半径 135.1 m,渗透率  $0.394\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。本井地质

设计原认为该井位于连续的水下河道砂体内部,地震上表现为强振幅,低阻抗区域异常特征,经过压力恢复解释及气层对比重新认识后,认为该井气藏应为孤立的长宽比接近的近圆形单体透镜状岩性气藏,沉积微相为三角洲前缘河口砂坝,修正了原先气藏地质认识砂体叠置连通上的偏差。

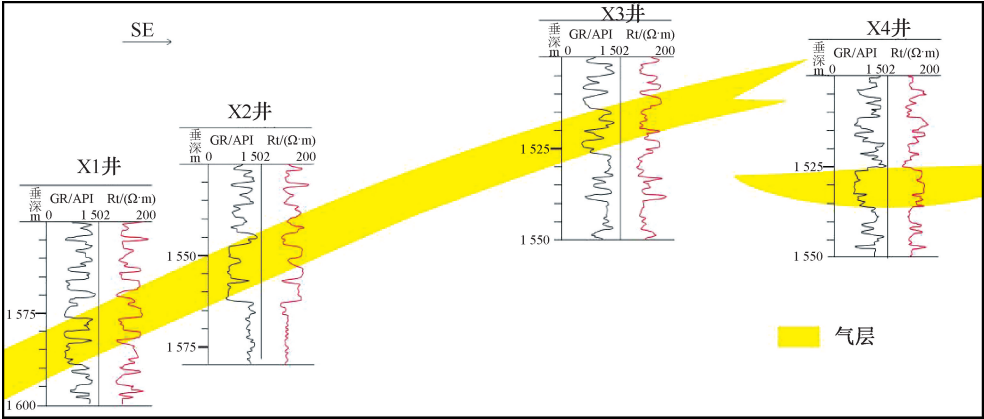


图 8 X1~X4 井遂宁组 JSN<sub>1+2</sub> 气藏剖面图  
Fig. 8 Suining group JSN<sub>1+2</sub> gas reservoir profile of Well X1-X4

表 1 X4 井同河道邻井生产情况\*

Table 1 Production condition of adjacent wells in the same channel of Well X4

邻井井号	油/套压/ MPa	产气/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产水/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	累计产气/ (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )
X3	0.33/1.70	0.13	0.00	1 152.280
X2	0.35/11.80	1.28	0.00	506.916
X1	0.35/11.00	0.96	0.00	350.050

\* 截止到 2016 年 10 月 18 日;砂组代码 JSN<sub>1+2</sub>。

2.4 异常压力恢复特征气藏

在开关井、井筒回压、岩石润湿性、微孔隙毛管力等作用下,井筒积液可对储层微毛管孔道产生反渗吸水锁效应,堵塞气体渗流通道,降低有效渗透率,加剧储层伤害<sup>[14-16]</sup>。众多学者针对井筒积液如何影响压力恢复试井进行了诸多研究和讨论<sup>[17-18]</sup>。井筒积液效应通过影响压力计实际测值,导致压力导数曲线的“驼峰”状、“台阶”状、“倒喇叭”状等异常形变特征、非地层特征的真实反映<sup>[19-22]</sup>。研究区内遂宁组气井普遍存在低压低产低渗的“三低”特征,气流携液能力差,多数气井开采时间长,井底多存有积液,井筒积液效应的影响普遍存在,在双对数压力恢复模板上多出现在恢复的早期(井储表皮效应段)以及中期(裂缝线性流)。但总体来说,经过分析基本都能够识别出积液效应,不影响曲线渗流特征的整体判断。

以 X5-1 井为例。该井压力恢复前井底存在积

液,压力恢复后井筒内为纯气相,压力恢复导数曲线在 10~30 h 内出现“驼峰状”异常,可较清楚的判断出该井为垂直压裂气井渗流特征(图 9),解释总表皮系数 -6.52,裂缝半长 196.0 m,有效渗透率  $0.128\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。

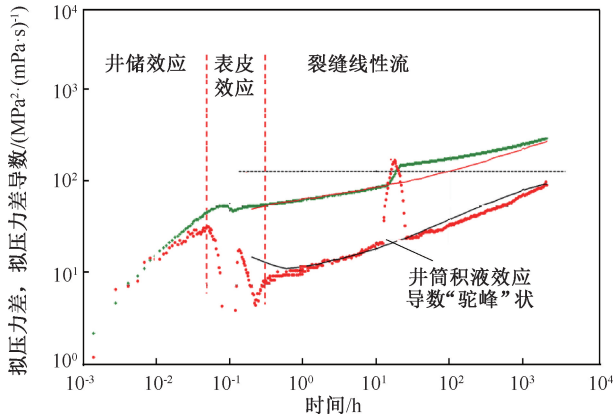


图 9 X5-1 井压力恢复双导数曲线拟合图  
Fig. 9 Fitting curve of log-log curve of pressure build-up in Well X5-1

研究区内曾出现过井内落鱼对压力恢复曲线整体较大的异常影响案例。以 LS35D 井为例。该井关压力恢复之前现场井口油压 1.5 MPa、套压 8 MPa,二者差别较大。现场分析井下可能存在异常工况,决定继续关井进行压力恢复。井底压力在整个关井恢复期间异常波动,导数曲线杂乱,已经无法识别地层渗流特征(图 10)。

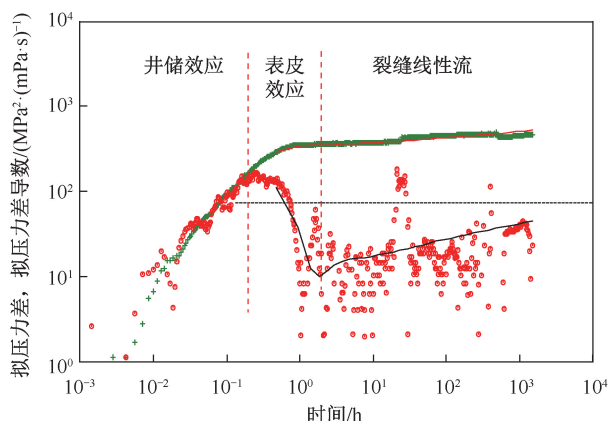


图 10 LS35D 井压力恢复双导数曲线拟合图

Fig. 10 Fitting curve of log-log curve of pressure build-up in Well LS35D

该井压力恢复前流压梯度测试和压力恢复后静压梯度测试均显示井底有积液,试井作业完毕后进行井下复杂井况处理,井内打捞出外径 50 mm 的圆形钢球。后根据同井场邻井的压力恢复特征,勉强采用有限导流压裂缝井模型进行了解释,解释表皮系数 $-3.88$ ,裂缝半长 358.0 m(结果与实际不相符),有效渗透率 $0.179 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。综合分析认为,该井压力恢复的异常波动是井内落鱼和积液共同影响结果,其中落鱼影响的比重更多一些。

### 3 结论

(1)受沉积微相控制,以及砂体空间上非均质性的影响,川西坳陷洛带气田遂宁组气井压裂后压力恢复试井流动特征多样,压裂缝线性流特征明显,显示压裂施工造缝效果好。由于有效渗透率低,压力平衡过程非常缓慢,大多数气井经过压力恢复未达到径向流特征段。

(2)鉴于压力恢复解释的多解性,以及遂宁组气藏地质特征的复杂性,建议在进行压力恢复作业之前,注意排出井底积液和排除井内异常工况,降低压力恢复的异常波动。同时,在解释时,注意结合气藏地质特征和测试、测井、地震资料等多种动静态资料。此外,在模型特征不清晰时,宜选取多种模型进行解释,以提高解释的合理性和准确度。

(3)洛带气田遂宁组致密砂岩气藏压裂后的压力恢复曲线渗流特征分析结果,对类似地质条件 and 生产工况下的致密砂岩气井压力恢复试井解释具有一定的借鉴意义。

致谢:感谢西南石油工程有限公司测井分公司同意本论文公开发表。

### 参考文献

- [1] 贾存善,周东升,饶丹. 川西坳陷洛带构造沉积成岩作用对油气聚集的控制[J]. 石油实验地质, 2003, 25(S1):553-556.  
JIA Cunshan, ZHOU Dongsheng, RAO Dan. Control of sedimentary diagenesis on hydrocarbon accumulation in Luodai structure of Western Sichuan depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(S1):553-556.
- [2] 李毓,王洪辉. 四川洛带遂宁组气藏微相精细建模研究及应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(4):362-366.  
LI Yu, WANG Honghui. Study and application about the fine modeling of microfacies in Suining formation gas pools in Luodai of Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(4):362-366.
- [3] 谭明文,张绍彬,张朝举,等. 洛带气田遂宁组特低渗致密砂岩气藏压裂改造技术应用研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(4):89-91.  
TAN Mingwen, ZHANG Shaobin, ZHANG Chaoju, et al. Application study of hydraulic fracturing technology in tight sandstone reservoir of Suining formation with ultra-low permeability in Luodai gas field [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(4):89-91.
- [4] 张晟,黄小军,任山,等. 洛带气田遂宁组气藏多层分层压裂工艺研究与应用[J]. 钻采工艺, 2008, 31(4):78-79, 87.  
ZHANG Sheng, HUANG Xiaojun, REN Shan, et al. Research and application of multilayer and separate layers fracturing technology in Sunning formation gas reservoir of Luodai gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(4):78-79, 87.
- [5] 吴志均,唐红君,冯文光. 川西致密砂岩气藏压裂效果的试井解释评价[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(6):52-54.  
WU Zhijun, TANG Hongjun, FENG Wenguang. Evaluation of postfracture response by well test interpretation in tight sandstone gas reservoirs in west Sichuan [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(6):52-54.
- [6] 罗金丽,靳正平. 川西致密砂岩气藏试井曲线特征分析[J]. 矿物岩石, 2001, 21(4):65-70.  
LUO Jinli, JIN Zhengping. Character analysis of well test curve for west Sichuan compact sandstone gas reservoir [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(4):65-70.
- [7] 卜淘,王洪辉,孙华. 川西洛带气田遂宁组气藏薄储层识别技术[J]. 天然气工业, 2007, 27(9):31-33.  
PU Tao, WANG Honghui, SUN Hua. Thin reservoir recognition technique for gas bearing reservoir of Suining formation in Luodai gas field, west Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(9):31-33.

- [8] 袁海锋,徐国盛,倪根生,等. 川西洛带气田遂宁组沉积相及与储集物性关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2008,35(1):15-21.  
YUAN Haifeng, XU Guosheng, NI Gensheng, et al. The relation between sedimentary facies and reservoir physical property of the upper Jurassic Suining Formation in Luodai fields of west Sichuan basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008,35(1):15-21.
- [9] 林绍文,李定军,罗丽琼,等. 洛带气田遂宁组致密砂岩储层测井评价[J]. 天然气工业,2006,26(4):44-46.  
LIN Shaowen, LI Dingjun, LUO Liqiong, et al. Logging evaluation of Suining formation tight sandstone reservoirs in Luodai gas field [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(4):44-46.
- [10] 罗啸泉,卜淘. 川西洛带气田遂宁组气藏储层特征[J]. 中国西部油气地质,2006,2(4):411-415.  
LUO Xiaoquan, PU Tao. The reservoir characteristics of Suining formation gas pool in Luodai gas field in the Western Sichuan depression [J]. West China Petroleum Geosciences, 2006,2(4):411-415.
- [11] 庄惠农. 气藏动态描术和试井[M]. 北京:石油工业出版社,2009:203-212.
- [12] 刘能强. 实用现代试井解释方法[M]. 北京:石油工业出版社,2008:149-150.
- [13] 张筠,葛祥,王志文. 洛带气田遂宁组致密储层的快速产能评价[J]. 测井技术,2007,31(4):342-346.  
ZHANG Yun, GE Xiang, WANG Zhiwen. Quick evaluation on productivity of compacted clastic reservoir in Suining formation of Luodai gas field [J]. Well Logging Technology, 2007,31(4):342-346.
- [14] 田巍,杜利,王明,等. 井筒积液对储层伤害及产能的影响[J]. 特种油气藏,2016,23(2):124-127.  
TIAN Wei, DU Li, WANG Ming, et al. Effect of liquid on reservoir and productivity [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016,23(2):124-127.
- [15] 张大椿,刘晓,李远亮. 凝析气藏井筒积液的诊断及排除方法综述[J]. 特种油气藏,2009,16(3):10-14.  
ZHANG Dachun, LIU Xiao, LI Yuanliang. An overview of liquid loading diagnosis and removal methods for condensate gas reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009,16(3):10-14.
- [16] 陈凯,姚为英,张强,等. 渤海某凝析气田气井井筒积液分析及处理措施[J]. 油气井测试,2020,29(2):37-42.  
CHEN Kai, YAO Weiying, ZHANG Qiang, et al. Analysis of liquid accumulation and treatment measures for gas wells in a condensate gas field of Bohai [J]. Well Testing, 2020,29(2):37-42.
- [17] 傅玉,黄全华,陈家晓. 考虑井筒积液的凝析气井试井分析[J]. 油气井测试,2008,17(1):1-4.  
FU Yu, HUANG Quanhua, CHEN Jiaxiao. Well testing analysis for gas-condensate well considering well bore accumulated liquid [J]. Well Testing, 2008,17(1):1-4.
- [18] 林加恩,梁继德,张奇斌,等. 一种新的井筒积液气井试井分析方法[J]. 天然气工业,2006,26(12):118-120.  
LIN Jia'en, LIANG Jide, ZHANG Qibin, et al. A new well test analysis technique for gas wells with liquid yield effects [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(12):118-120.
- [19] 朱绍鹏,李茂,刘双琪,等. 凝析气井压力恢复试井解释的新认识[J]. 油气井测试,2010,19(1):28-30.  
ZHU Shaopeng, LI Mao, LIU Shuangqi, et al. New understanding about pressure buildup analysis in condensate gas well [J]. Well Testing, 2010,19(1):28-30.
- [20] 蒋裕强,李成勇,曹成惠,等. 高产气井试井压力资料异常原因分析[J]. 天然气工业,2008,28(7):90-92.  
JIANG Yuqiang, LI Chengyong, CAO Chenghui, et al. Reason analysis on abnormal pressure data from high-productivity gas well testing [J]. Natural Gas Industry, 2008,28(7):90-92.
- [21] 田新建,廖伟伟,补璐璐,等. 利用“异常”试井曲线分析油水井工程问题[J]. 油气井测试,2018,27(4):67-72.  
TIAN Xinjian, LIAO Weiwei, BU Lulu, et al. Utilizing the “abnormal” well test curve to analyze the engineering problems in oil and water wells [J]. Well Testing, 2018,27(4):67-72.
- [22] 孙艳波. JL 气田 HS 组气藏产水气井压力恢复试井解释[J]. 油气井测试,2020,29(2):75-78.  
SUN Yanbo. Well test interpretation of pressure buildup for water-producing gas wells in HS group gas reservoir of JL gas field [J]. Well Testing, 2020,29(2):75-78.

编辑 王 军

第一作者简介:吴晓光,男,1985 年出生,硕士,工程师,2011 年毕业于中国石油大学(华东)地质学专业,现从事试井、测井资料处理解释及油气地质综合评价研究工作。电话:028-84872363,15102815903;Email:122783907@qq.com。通信地址:四川省成都市龙泉驿区鲸龙路 66 号中石化西南石油工程有限公司测井分公司,邮政编码:610100。