

石油、天然气工业

低渗透率油藏时空试井解释方法研究

王成俊^{1,2} 李小瑞¹ 王香增² 江绍静² 廖新维³ 薛 媛²
(陕西科技大学¹,西安 710000;陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院²,西安 710075;中国石油大学(北京)³,北京 102200)

摘 要 低渗透油藏试井测试过程中,压力降落或恢复速度非常慢,试井数据一般只测试到早期段,导致试井解释困难和结果多解性。研究在试井解释方法理论上,提出了时空试井解释方法,确定了试井解释结果可靠性判别标准,并以国内典型超低渗透油藏为例,利用井在不同时期、不同空间的试井测试数据,结合油藏的地质认识和开发现状,对试井解释结果进行分析,确定了合理试井解释模型和解释结果,该方法可为低渗透油藏试井解释提供技术参考。

关键词 试井 低渗 径向流 解释模型

中图法分类号 TE27; **文献标志码** A

试井技术 well test 能够反演得到储层物性参数和评价井的生产能力,可以为储层改造、开发方案设计等提供数据参考^[1]。目前试井解释方法主要包括 Horner 提出的常规试井解释方法和 Everdingen 提出的现代试井解释方法^[2,3]。常规试井解释方法需要试井测试到油藏的流动状态,但由于低渗储层渗透率低,导致试井测试过程中,压力降落或恢复速度非常慢,试井数据一般只测试到早期段,从而导致常规试井解释方法很难应用到致密储层的试井解释中^[4,5];现代试井解释方法可以解释只有早期段的试井数据,但是也因为缺少反映油藏流动状态的测试数据,导致解释结果存在多解性^[6]。针对该问题, Rusesn, Mckinly 等提出早期试井分析法^[7], Rmaye 和 Earluohger 等给出短期试井分析方法^[8];国内林加恩,等人提出了用卷积、反卷积方法解释试井资料^[9,10]。但这些方法都需要大量的前期压力测试数据,而大多数油田生产过程中,很少进行压力测试,因此为这些方法的使用带来了困难。

在目前现代试井分析方法基础上,结合油藏的地质认识和开发现状,提出了时空试井解释方法,通过对比同一时期邻井试井解释结果与不同时期同井试井解释结果,判断试井解释模型和解释结果的合理性,减少低渗储层由于只有早期试井测试数据而导致的解释结果多解性问题。

1 低渗储层试井解释方法理论分析

1.1 基于时间尺度的储层物性特征分析

2016年3月3日收到 特低渗透油藏高效开发提高采收率示范工程(陕国土资矿发(2011)80号)和国家科技支撑计划(2012BAC26B00)资助
第一作者简介:王成俊(1981—),男,汉族,重庆市北碚区人,博士生,工程师。研究方向:提高采收率技术。E-mail:1742568522@qq.com。

假设低渗储层中有一口生产井以定产量生产,由此将导致以生产井为中心,地层压力下降,出现压降漏斗,如图1所示^[4]。对于致密储层,由于存在应力敏感效应,随着地层压力下降,井周围储层基本物性,尤其储层渗透率也会出现下降趋势,如图2所示^[5]。由此可以得到以下认识:如果同一口井,在不同时期进行过试井测试,两次的试井解释结果中,压力和渗透率应该存在正相关的关系。

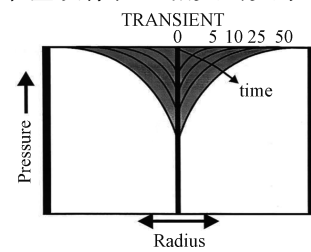


图1 压降漏斗示意图

Fig. 1 The schematic diagram of pressure cone of depression

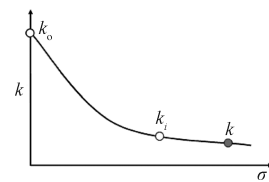


图2 应力敏感示意图

Fig. 2 The schematic diagram of stress sensitivity

对于低渗储层,由于渗透率太低,只有经过压裂改造后才能形成工业油气流。如果该井在两次测试之间进行过储层改造,经过大型水力压裂后,由于近井地带储层在压裂施工过程中处于高压状态,原本处于闭合状态的天然裂缝开启,致使近井地带基质渗透率升高,则在井周围会形成复合区,如图3所示。近井地带储层物性会发生变化,但是远井地带,

储层基本物性仍然应该满足不同时期的试井解释结果中压力和渗透率保持正相关的关系。

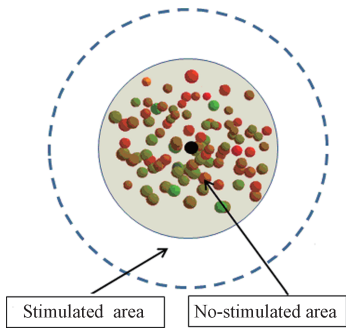


图3 改造后的储层渗流物理模型
Fig. 3 The flow model after the stimulation

1.2 基于空间尺度的储层物性特征分析

从地质角度分析,如果两口邻井在同一个沉积微相内,储层的成岩过程、岩石颗粒性质、矿物组成等都会很相似,由此会导致两口邻井的储层基本物性相似。从渗流角度分析,如图4所示,在渗流模型求解条件中,外边界条件为当 r 趋近于正无穷时,外推压力为 P_i 。两口井为邻井时,而且试井测试时间为同一时期时,可以假设两口井的共同外推压力为同一压力 P_i 值。由此可以得到以下结论:如果两口井同一时期进行过试井测试,两口井的解释结果中的外推压力应该相同或相近。

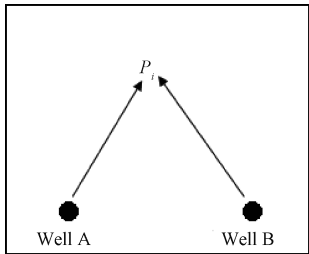


图4 邻井渗流数学模型假设条件
Fig. 4 Assumption of outer boundary for adjacent wells

1.3 基于时空尺度的试井解释结果可靠性判别标准

根据以上的分析,可以得到基于时空尺度的试井解释结果可靠性判别标准。

基于时间尺度的试井解释结果可靠性判别标准为:同一口井,在不同时期进行过试井测试,不同测试时期的试井解释结果中的平均地层压力与储层渗透率成正相关关系;基于空间尺度的试井解释结果可靠性判别标准为:同一时期,邻井试井解释结果中的基本储层物性和外推压力应为相近或相同。

2 基于时空尺度的试井解释方法

综合以上的认识,确定了基于时空尺度的试井

解释方法。

在现代试井解释方法基础上,开展单井试井解释分析,首先通过基于时间尺度的试井解释结果判别标准,对解释模型和解释结果进行初步筛选;然后在从空间角度,对比邻井的试井解释结果,依据基于空间尺度的试井解释结果可靠性判别标准,对解释模型和解释结果进行二次筛选。经过两次筛选后,综合分析并最终确定试井模型和解释结果,其技术流程如图5所示。

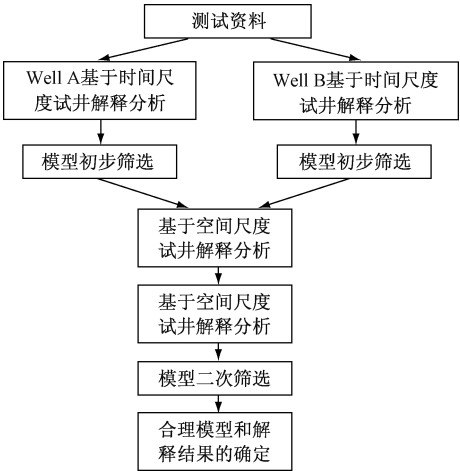


图5 基于时空尺度试井方法技术路线图
Fig. 5 Flow chart of well testing methodology based on time and space scale

3 实例分析

以A油藏井组S304-59井组为例,该井组于2010年、2011年对S303-58、S304-58油井进行了压力恢复试井测试,其井位分布图如图6所示。以S304-58井为研究对象,采用时空尺度的试井分析方法对它进行试井分析。

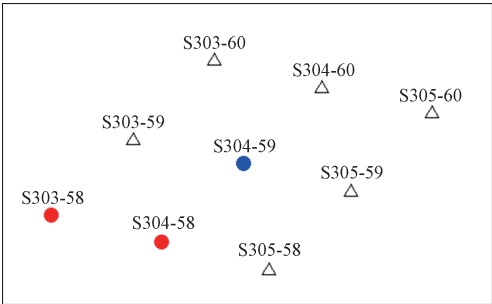


图6 S304-59井组井位分布图
Fig. 6 Geometric map of Well Group S304-58

3.1 基于时间尺度的试井解释分析

S304-58井分别于2010年和2011年开展过试井测试,2011年的试井测试曲线如图7所示,测试时间为280 h。由图7可以看出,试井曲线在测试时

间内未出现径向流段,压力导数曲线一直处于上升状态。对 S304-58 井 2011 年的试井测试资料,采用均质油藏,裂缝有限导流油藏和径向复合油藏三种模型均同样可以得到很好的拟合,拟合效果如图 7~图 9 所示。

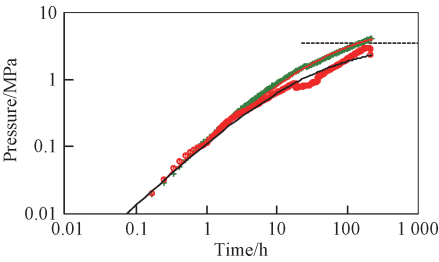


图7 S304-58 井 2011 年均质模型拟合
Fig. 7 The fitting of S304-58 in 2011 by the homogeneous reservoir model

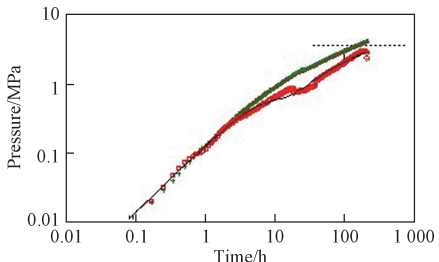


图8 S304-58 井 2011 年裂缝有限导流模型拟合
Fig. 8 The fitting of S304-58 in 2011 by the fracture finite conductivity reservoir model

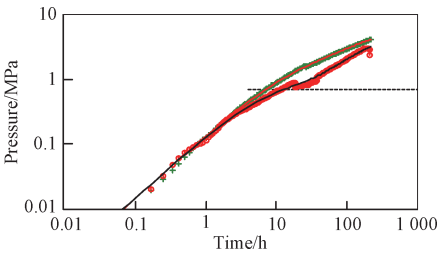


图9 S304-58 井 2011 年径向复合模型拟合
Fig. 9 The fitting of S304-58 in 2011 by the radial composite reservoir model

三种模型拟合效果均较好,解释结果如表 1 所示。由解释结果可以看出,虽然采用三种模型

都能拟合上测试曲线,但是解释结果却存在较大差异,尤其采用径向复合油藏模型时,解释的有效渗透率比均质和有限导流模型高出一个数量级。因此需要进一步研究以确定哪种模型更为合理。

S304-58 井在 2010 年也进行过试井测试,测试时间为 90 个小时,测试时间较短,试井曲线如图 10 所示。对于 2010 年的试井测试资料,采用均质油藏,裂缝有限导流油藏和径向复合油藏三种模型同样可以得到很好的拟合。解释结果如表 1 所示。由 2010 年的解释结果可以看出,采用三种模型时得到的渗透率范围接近。综合分析对比 S304-58 井在 2010 年和 2011 年的试井测试资料的解释分析结果,如表 1 所示。

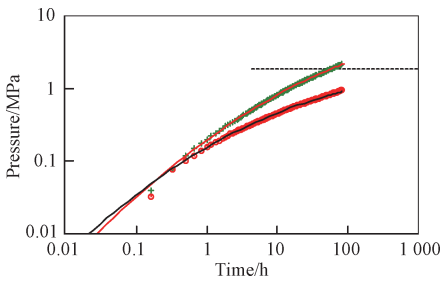


图10 S304-58 井试井测试曲线(2010 年)
Fig. 10 History match for testing data of S304-58 in 2010

当采用均质和有限导流模型时,采用时间尺度的试井解释结果可靠性标准判断,2011 年和 2010 年的储层基质物性与计算得到的地层压力呈正相关关系,即地层压力下降,解释结果的渗透率也呈下降趋势。因此选用均质和裂缝有限导流模型更为合适。

3.2 基于空间尺度的分析对比

采用时间尺度的试井解释方法,对 S303-58 井 2011 年解释数据分析。对比 S303-58 和 S304-58 解释结果,如表 2 所示。采用空间尺度试井解释结果判别标准判断,当采用有限导流解释模型时,两口井的储层渗透率和地层压力解释结果相近。因此综合分析,当选用有限导流模型时与地质认识相对应,结果更为理想。

表 1 S304-58 井 2010 和 2011 年拟合结果
Table 1 Interpreting results of S304-58 in 2010 and 2011

测试年份	解释模型	压力/MPa	渗透率/mD	表皮因子	裂缝半长/m	裂缝导流能力/(mD·m)	内区半径/m
2011	均质模型	16.8	0.055	-5.35			
	有限导流模型	17	0.059	-5.17	19.3	500	
	径向复合模型	15.2	0.273	-3.73			14.2
2010	均质模型	17.2	0.064 9	-5.55			
	有限导流模型	17.8	0.091	-5.16	19.4	580	
	径向复合模型	16.4	0.064 9	-5.55			25

表 2 S304-59 井组 2011 年油井拟合结果
Table 2 Matching results of S304-58 and S303-58 in 2011

测试年份	井号	压力/MPa	渗透率/mD	表皮因子	裂缝半 长/m	裂缝导流能 力/(mD·m)	内区半 径/m	压力/MPa
2011	S303-58	均质模型	16.4	0.033 7	-5.16			
		有限导流模型	17	0.030 1	-5.07	17.6	152	
		径向复合模型	15.2	0.102	-4.19			14.5
	S304-58	均质模型	16.6	0.049	-5.35			
		有限导流模型	17	0.035	-5.17	19.3	500	

4 结 论

(1)低渗储层由于渗透率低,压力恢复慢,一般在测试时很难测试到径向流,为试井解释带来一定困难,而目前关于早期段试井解释方法尚不成熟。

(2)基于时空尺度的试井解释方法是在现代试井解释方法基础上,基于单井不同测试时间和空间,综合确定合理的试井解释模型,并判断解释结果的可靠性,具有很好的实用效果。

(3)实例分析表明,该方法解释结果与油田地质认识和开发现状相呼应,表明该方法具有很好的实用性,可为油田的进一步认识提供可靠的数据参考。

参 考 文 献

1 廖新维,沈平平. 现代试井分析. 石油工业出版社,2002:75—79

2 Jing Dongsheng, Ding Feng. The exploration and development of tight oil in USA. Land and Resources Information,2012;(1):56—65

3 李 允,李志平. 气井及凝析气井产能试井与产能评价. 石油工业出版社,2000:101—102

4 Dou Hongen, Ma Shiying. The Enlightenment to low permeability reservoir from tight oil development. Oil Drilling & Production Technology,2012;34(2):120—124

5 张建国等. 油气层渗流力学. 中国石油大学出版社,1998:23—28

6 雷群等译. 生产动态分析理论与实践. 石油工业出版社,2008:42—46

7 Lin Senhu, Zou Caineng. The Enlightenment of tight oil in USA. Lithologic Oil-Gas reservoir,2011;23(4):25—30

8 Liao Xinwei, Shen Pingping. Modern well testing analysis. Petroleum Industry Press,2002:75—79

9 Zhang Jianguo. Oil and gas percolation mechanics. China University of Petroleum Press,1998:23—28

10 Qun Lei. The theory and practice of dynamic analysis in production. Beijing:Petroleum Industry Press,2008:42—46

The Well Test Analysis Method for Low Permeability Reservoir
Based on Time and Space Scale

WANG Cheng-jun^{1,2}, LI Xiao-rui¹, WANG Xiang-zeng², JIANG Shao-jing², LIAO Xin-wei³, XUE Yuan²
(Shaanxi University of Science & Technology¹, Xi'an 710000,P. R. China; Research Institute of Yanchang
Petroleum (Group) CO. LTD², Xi'an 710075,P. R. China; China University of Petroleum³, Beijing 102200,P. R. China)

[Abstract] It is difficult to detect the radial flow during pressure built-up period for the low permeability reservoirs. This brings much problem for well test interpretation. Taking the typical low permeability reservoirs for example, using the well test data in different periods of different space well test, combing with the reservoir geological data and the production history, and a new well testing analysis method is proposed. The method can determine the reasonable well test interpretation model, and get the reliable results. It can provide the technical reference for the low permeability reservoir well test interpretation.

[Key words] well testing low permeability radial flow interpretation model