

基于物探测井信息及有限试井资料的多井产能预测方法

朱磊

中海油研究总院,北京 100028

摘要 为克服某些井试井资料少、难以获取有效产能信息,引入产能刻度因子,基于地质统计学理论,研究了影响小层产能刻度因子的小层有效渗透率、有效厚度的计算方法,建立了使用试井动态资料刻度物探测井静态资料,用刻度后的静态资料进行整个气藏的产能预测。该方法能够充分利用地震、物探和测井等静态信息,结合少量重点井的试井动态解释结果进行产能预测。将该方法应用于M气田的某些井,预测得到的产能接近气井实际产能,满足工程计算的需要。

关键词 物探测井;试井;静态资料;动态资料;产能预测;刻度因子

中图分类号 TE373

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.09.010

The method of multi well deliverability forecasting based on the geophysical logging information and the limited well testing data

ZHU Lei

CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China

Abstract Due to the limited well test data, it is difficult to obtain effective information about deliverability in some wells. In this paper, the calibration factor of deliverability is introduced and the calculation methods of the influencing factors are studied, to establish a deliverability forecasting method. The geophysical logging static information is first calibrated by the dynamic data of the well test. Then the deliverability of the whole field is forecasted by the calibrated static data. The seismic data, the geophysical logging data at the beginning of exploration and production, and the well test dynamic data of few important wells are made the best use in this method. This method is applied in some wells in the M gas field. The forecasting deliverability results agree well with the actual deliverability. The calculation precision of the new method is high enough to meet the demand of the project design.

Keywords geophysical logging; well test; static data; dynamic data; deliverability forecast; calibration factor

气井产能是气田开发方案设计、气井合理配产的重要依据。目前预测气井产能的稳定试井方法有回压试井、等时试井、修正等时试井和一点法试井等^[1],缺点是测试时间长。为了克服这一缺点,在具备充分试井资料的前提下,基于不稳定试井^[2]、压力恢复试井^[3,4]建立了产能预测的新方法。但在气田勘探开发初期,缺少必要的试井资料,或由于超深井、高温高压井、含有酸性气体的井,井下状况复杂、测试环境恶劣,使得试井工作的开展存在很大的技术难度和操作风险,无法正常入井底进行试井,只能获得有限的试井资料。

因此如何利用仅有的试井资料,获得整个气田的产能信息成为当务之急。为了实现该目标,必须充分利用气田勘探开发初期获得的地震、物探和测井等静态信息,结合少量重点井的试井动态解释结果,使用动态资料刻度静态资料,然后用刻度后的静态资料来预测整个气藏的产能。

1 使用有限单井试井资料预测气藏产能的局限性

目前钻杆地层测试试井方法发展比较成熟,在测试时,主要通过封隔器将测试层段与井眼流体分隔开,通过长时间大

收稿日期:2014-10-31;修回日期:2014-12-05

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05030-005)

作者简介:朱磊,工程师,研究方向为石油工程设计,电子信箱:zhulei2@cnooc.com.cn

引用格式:朱磊.基于物探测井信息及有限试井资料的多井产能预测方法[J].科技导报,2015,33(9):59-63.

排量抽吸地层流体引起测试层扰动,同时记录稳定状态下的流量和压降,并记录停止抽吸后的测试层压力随时间的变化,测试示意图见图1。但该方法只是针对单井而言,使用有限单井试井资料进行整个气藏的产能预测时,存在很多局限性。

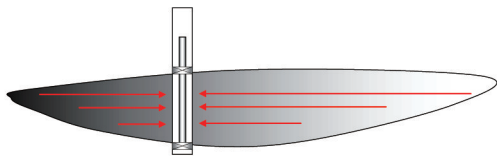


图1 试井方法测试示意

Fig. 1 Schematic diagram of well test method

1.1 单井试井探测区域的局限性

从渗流方程的角度而言,由某一抽吸地层流体流量引起压力波动传播的距离,只与地层的性质和测试时间有关,与抽吸流量大小无关,即针对同一性质储层,测试时间的长短决定了测试探测半径的大小。

产能试井的纯测试时间可以持续几十个小时甚至更长,径向探测距离较长时,可达到几百米,完全可以达到单井控制的所有范围。但由于油气藏地质结构的复杂性,裂缝、断层、岩性变化和低渗透边界等广泛发育,必然使整个油气藏内部出现不同的压力体系,因而仅使用一口或几口井的测试结果无法评估整个油气田的真实产能水平。如图2所示,A气田6口不同的开发井分别位于不同的局部构造或同一构造的不同区域,所以使用任何一口井的测试产能来代替其他井的产能信息都会出现偏差,甚至是完全错误的。

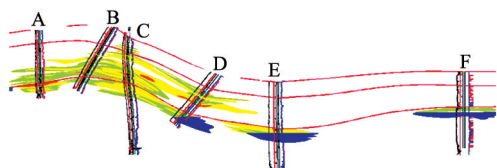


图2 单井试井探测区域的局限性示意

Fig. 2 Schematic diagram of the limitations about the single well test detection zone

1.2 渗透率的局限性

实际的储层具有空间非均质和各向异性。单井产能测试的径向探测距离较长,一般为几百米,几百米的储层不可能是均质和各向同性的,测试求得的储层渗透率是其探测范围内的动态平均值,是单井控制范围内储层渗透率的空间非均质和各向异性的综合反映,可直接用于单井产能计算,只能真实反映单井生产的实际动态;但对于整个油气藏来说,由于可能存在互不连通的多套油气体系,单井控制范围内获得的储层渗透率不能代表整个油气藏范围内的储层参数,因此,由单井测试得到的渗透率直接用于油气藏产能评价将引起很大的误差。

图3为某一气藏的实际地质模型,可直观地看出,测试井

控制范围内的渗透率不断变化;模型的网格大小为 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$,单井的产能测试探测半径基本局限在圆形区域内,也就是说,单井测试解释的渗透率近似是井点所控制网格的渗透率,不能代表整个气藏范围内的渗透率平均值。

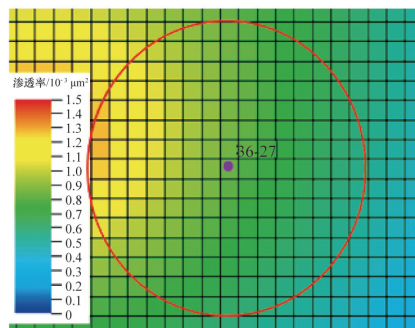


图3 M气田实际地质模型的渗透率模型

Fig. 3 Permeability model based on the M gas field actual geological model

1.3 储层厚度的局限性

实际的储层是不等厚的,单井产能几百米的探测范围的储层厚度也不断变化,实际上,单井测试求得的产能结果能反映储层厚度的平均概念;对于整个油气藏来说,由于其径向距离远比单井探测半径大得多,储层厚度的不均匀性将更加突出,因此,由单井测试得到的储层厚度直接用于油气藏产能评价将引起很大的误差。

图4为与图3对应地质模型的储层厚度属性模型,可以直观地看出,测试井控制范围内的储层厚度不断变化;模型的网格大小同样为 $25\text{ m}\times 25\text{ m}$,单井的探测半径基本局限在圆形区域内。就是说,单井测试解释的储层厚度是井点所在区域的厚度,不能代表整个油气藏范围内储层厚度平均值。

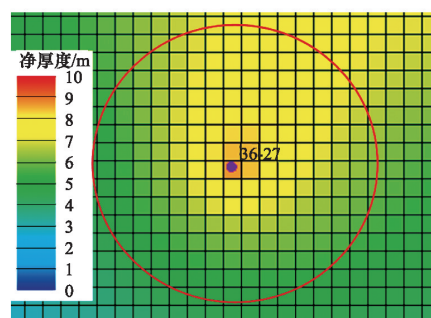


图4 M气田实际地质模型的储层厚度模型

Fig. 4 Reservoir thickness model based on the M gas field actual geological model

2 多井产能预测理论

为了有效利用有限的试井资料评价储层产能,参考地震、测井、录井和取心资料,选择典型测试井。选择地震解释位于局部构造中心位置,测井解释地层缺失少、油气显示明

显、取芯资料丰富、流体物性实验参数多的探井或开发井,并制定周密的试井方案来完成典型井的产能测试。

1) 利用地震精细解释结果确定各开发井所处的详细构造位置,确定各含油气层段的圈闭消息,计算出有效供气半径,如图5所示。

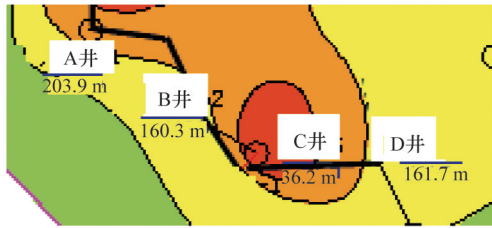


图5 各产能评价井位置示意

Fig. 5 Schematic diagram of the locations of the production capacity wells

2) 利用测井资料确定不同评价井之间的小层对应关系,获得各井中不同含油气层位的有效厚度、测井渗透率等静态数据,如图6所示。

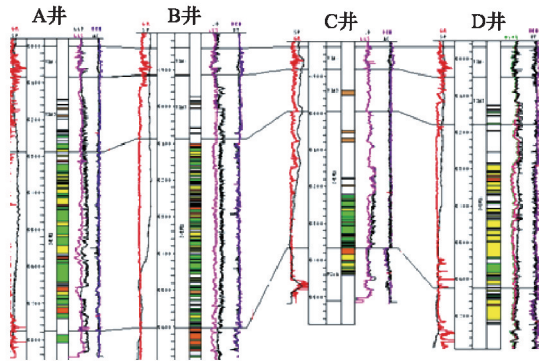


图6 各评价井之间储层对应关系示意

Fig. 6 Schematic diagram of the reservoir of the production capacity wells

3) 对典型测试井进行系统试井,并通过数值模拟等方法对笼统试井的解释结果进行合理批分,获得各小层的产能批分系数和典型井的产能评价当量因子。

对于产能试井,气井的稳定测试流量计算公式^[1]为

$$p_R^2 - p_{wf}^2 = \frac{36.846 \times 10^3 \bar{\mu}_g \bar{Z} \bar{T} p_{sc} q_g}{KhT_{sc}} \left(\ln \frac{0.472r_e}{r_w} + S_a \right) \quad (1)$$

式中, p_R 为产层的压力; p_{wf} 为井底压力; $\bar{\mu}_g$ 为气相的平均黏度; \bar{Z} 为气相的平均压缩因子; \bar{T} 为产层的平均温度; p_{sc} 为标准状态下的压力; q_g 为产气量; K 为产层渗透率; h 为产层厚度; T_{sc} 为标准状态下的温度; r_e 为有效供气半径; r_w 为井径; S_a 为表皮系数。

对于含有多个产层同时生产的气藏,而各个产层的井底流压、地层有效渗透率、地层厚度和供气半径等参数又各不相同,不能直接使用式(1)计算测试井的流量。对此,可以针对各个小层,分别使用其测井渗透率、测井小层有效厚度等

静态参数,计算出测试井中各个生产小层的测井理论产量 $Q_{j,c}$,然后使用数值积分获得全井的理论测试产量 Q_c ,即

$$Q_{j,c} = \frac{K_{l,j} h_{l,j} T_{sc} (p_R^2 - p_{wf,j}^2)}{36.846 \times 10^3 \bar{\mu}_{g,j} \bar{Z}_j \bar{T}_j p_{sc}} \left(\ln \frac{0.472r_{el,j}}{r_w} + S_a \right)^{-1} \quad j=1,2,\dots,N \quad (2)$$

$$Q_c = \sum_{j=1}^N Q_{j,c} \quad (3)$$

式中, $K_{l,j}$ 为各小层的测井渗透率; $h_{l,j}$ 为各小层的测井有效厚度; $r_{el,j}$ 为各小层的圈闭有效供气半径;各变量的下标 j 表示测试井中各小层的序号, N 表示所有小层的总数; $p_{wf,j}$ 为第 j 层的井底流压,具体计算方法详见文献[5]。

在计算出 $Q_{j,c}$ 和 Q_c 后,可分别计算各小层的产能批分系数 $\delta_{j,c}$,即

$$\delta_{j,c} = \frac{Q_{j,c}}{Q_c} \quad (4)$$

将计算出的理论测试产量 Q_c 与实际试井获得的稳定产量 Q_0 进行对比,将两者的比值定义为测试典型井的产能评价当量因子 ψ_i ,即

$$\psi_i = \frac{Q_c}{Q_0} \quad (5)$$

使用式(5)计算典型井的产能评价当量因子时,可使用实测的视表皮系数 S_a 。

4) 利用典型测试井的产能评价结果对其他开发井的测井资料进行动态刻度。从典型井的产能批分系数和产能评价当量因子的推导过程可以看出,如果通过相似性原理使用该方法来预测其他井的产能,须对计算公式中使用的小层测井有效渗透率、测井有效厚度和供气半径等主要参数进行相似性动态刻度。

设已测试井的各参数的下标为 x ,待刻度井的各相应参数的下标为 y ,已测试井各小层的理论测井流量为

$$Q_{j,c,x} = \frac{K_{l,j,x} h_{l,j,x} T_{sc} (p_{R,x}^2 - p_{wf,j,x}^2)}{36.846 \times 10^3 \bar{\mu}_{g,j,x} \bar{Z}_{j,x} \bar{T}_{j,x} p_{sc}} \left(\ln \frac{0.472r_{el,j,x}}{r_{w,x}} + S_{a,x} \right)^{-1} \quad j=1,2,\dots,N_x \quad (6)$$

待刻度井对应小层的理论测井流量为

$$Q_{j,c,y} = \frac{K_{l,j,y} h_{l,j,y} T_{sc} (p_{R,y}^2 - p_{wf,j,y}^2)}{36.846 \times 10^3 \bar{\mu}_{g,j,y} \bar{Z}_{j,y} \bar{T}_{j,y} p_{sc}} \left(\ln \frac{0.472r_{el,j,y}}{r_{w,y}} + S_{a,y} \right)^{-1} \quad j=1,2,\dots,N_y \quad (7)$$

由式(7)除以式(6),并整理可得

$$\frac{Q_{j,c,y}}{Q_{j,c,x}} = \frac{K_{l,j,y} h_{l,j,y} \bar{\mu}_{g,j,x} \bar{Z}_{j,x} \bar{T}_{j,x}}{K_{l,j,x} h_{l,j,x} \bar{\mu}_{g,j,y} \bar{Z}_{j,y} \bar{T}_{j,y}} \left(\frac{p_{R,y}^2 - p_{wf,j,y}^2}{p_{R,x}^2 - p_{wf,j,x}^2} \right) \left(\frac{\ln \frac{0.472r_{el,j,y}}{r_{w,y}} + S_{a,y}}{\ln \frac{0.472r_{el,j,x}}{r_{w,x}} + S_{a,x}} \right) \quad j=1,2,\dots,N_y \quad (8)$$

式中,由于 $p_{wf,j,y}^2$ 无法获得,所以可利用相似性原理,近似取

$$\left(\frac{p_{R,y}^2 - p_{wf,j,y}^2}{p_{R,x}^2 - p_{wf,j,x}^2}\right) \approx 1, \text{ 则上式可简化为}$$

$$\frac{Q_{j,c,y}}{Q_{j,c,x}} = \frac{K_{l,j,y} h_{l,j,y} \bar{\mu}_{g,j,x} \bar{Z}_{j,x} \bar{T}_{j,x}}{K_{l,j,x} h_{l,j,x} \bar{\mu}_{g,j,y} \bar{Z}_{j,y} \bar{T}_{j,y}} \left(\frac{\ln \frac{0.472r_{el,j,y} + S_{a,y}}{r_{w,y}}}{\ln \frac{0.472r_{el,j,x} + S_{a,x}}{r_{w,x}}} \right) \quad j = 1, 2, \dots, N_j \quad (9)$$

定义 $\frac{Q_{j,c,y}}{Q_{j,c,x}} = \xi_j$, 称为第 j 层的刻度因子, 则有

$$Q_{j,c,y} = \xi_j \cdot Q_{j,c,x} \quad (10)$$

5) 利用刻度后的测井资料对未采取稳定试井测试的开发井进行产能预测。使用式(7)分别对未测试井的各个小层测井理论产量 $Q_{j,c,y}$ 进行计算, 然后可利用式(11)计算未测试井的理论试井产量 Q_{c0} 。式(11)即为未测试井的产能计算基本方程。

$$Q_{c0} = \frac{Q_{c,y}}{\psi_i} = \frac{\sum \xi_j Q_{j,c,x}}{\psi_i} = \frac{\sum Q_{j,c,x} \frac{K_{l,j,y} h_{l,j,y} \bar{\mu}_{g,j,x} \bar{Z}_{j,x} \bar{T}_{j,x}}{K_{l,j,x} h_{l,j,x} \bar{\mu}_{g,j,y} \bar{Z}_{j,y} \bar{T}_{j,y}} \left(\frac{\ln \frac{0.472r_{el,j,y} + S_{a,y}}{r_{w,y}}}{\ln \frac{0.472r_{el,j,x} + S_{a,x}}{r_{w,x}}} \right)}{\psi_i} \quad (11)$$

3 刻度因子影响因素计算方法

在使用式(9)计算未测试井各小层的刻度因子时, 小层渗透率和有效厚度的取值方法非常重要, 须进行专门研究。

1) 储层渗透率宏观各向异性计算方法。区域化变量隶属于地质统计学研究范畴, 能够反映某种现象空间分布特征。许多现象和特征如砂体、孔隙度、渗透率等都可视为区域化变量。在地质统计学研究中, 用变差函数来表征某一范围内区域化变量的相关关系和空间结构^[6-8]。

变差函数(即变量增量的方差, 反映了变量在某一方向某段距离内的变化程度)是把一个地质体看成是空间中的一个域 V , V 内的 $x, x+h$ 是沿某一方向相距 h 的 2 个点, 则变差函数是在任一方向 a , 相距 $|h|$ 的 2 个区域化变量值 $Z(x)$ 及 $Z(x+h)$ 的增量的方差(即: 增量与增量平均值的偏差程度), 它是 h 和 a 的函数(即距离和方向的函数), 表达式为

$$r(h, a) = \frac{1}{2V} \int_V [Z(x) - Z(x+h)]^2 dx \quad (12)$$

理想的变差函数的曲线如图 7 所示, a 为函数的变程, 主要表征某方向上的区域变量的连续性、相关性, 不同方向上的变差图可反映区域化变量的各向异性, 即可以根据不同方向上的变差函数的变程评价各方向上的区域变量的相关性, 不同的相关性能反映区域变量在不同方向上的性质差异, 即通常所说的各向异性。

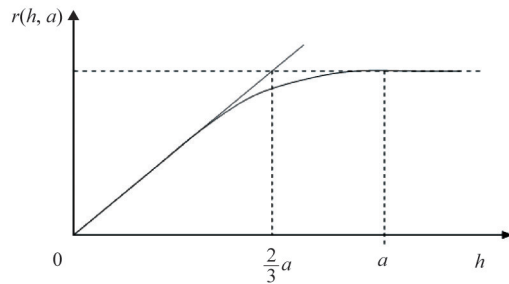


图 7 理想的球状变差函数曲线

Fig. 7 Graph of the ideal Globular variation function

如果以渗透率为区域变量的已知变量, 进行实验变差函数分析, 可评价地层空间渗透率的各向异性。由于不同井所处空间和平面位置不同, 在使用式(9)计算未测试井各小层的刻度因子时, 建议依据岩心渗透率实验分析的结果, 对已测试井和未测试井的测井渗透率进行修正, 以保证计算结果可靠性更高。

2) 井间储层参数计算方法。由于从测井数据获得的储层参数只代表井眼附近储层特征, 而对于相距较远的各井之间的储层特性则无法确定。引入基于地质统计学的储层建模横向预测技术, 可以根据测试井与邻井参数对井间储层进行预测, 将储层任意一点的参数同测试井的参数有机地联系起来, 拓展测试井的产能预测范围。

克里金插值方法^[6,9,10]是储层地质建模中最常用的井间参数预测方法, 在进行井间储层参数预测时, 首先将储层划分为若干网格(图 8), 以确定的井点参数, 应用变差函数对平面上的已知井点参数进行分析, 计算实验变差函数曲线, 在评价储层各向异性的同时, 应用实验变差函数曲线, 使用克里金插值方法预测井间未知参数, 应用公式(13)对系统中的每个网格赋值, 由赋值后的每个网格组成了井间储层参数值, 将整个储层联系起来(图 9)。

$$Z^*(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i) \quad (13)$$

式中, u 为空间位置; $Z^*(u)$ 为在空间位置 u 的计算值; $Z(u_i)$ 为空间位置上存在的已知参数; λ_i 为任意计算参数与各已知参数的权重。

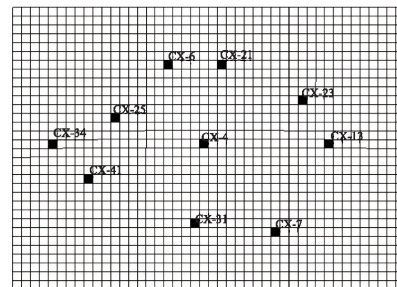


图 8 储层平面网格划分示意

Fig. 8 Schematic diagram of reservoir grid division

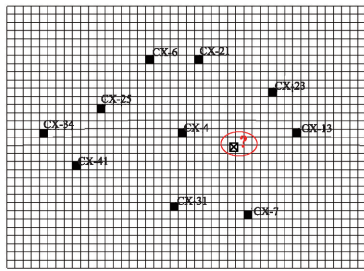


图9 克里格插值方法示意

Fig. 9 Schematic diagram of Kriging interpolation

如图9所示,假设要计算某一位置的参数值(圆圈定的网格),根据克里金插值方法,计算该位置参数与各已知参数的最小协方差与权重,然后计算该位置的参数,以此类推,可以得到储层任意一点的参数值。

在实际生产过程中测试井动态反映的是单井控制范围内储层参数的平均值,如与产能息息相关的储层有效渗透率和有效厚度,但实际的储层是不等厚、非均质且各向异性,所以,储层平均有效厚度和平均有效渗透率的准确计算,决定了单井产能预测精度。

在计算储层参数时,需遵循以下步骤:1) 应用区域变量的变差函数分析各向异性椭圆^[6],确定各向异性椭圆的方向和长短轴比;2) 应用克里金插值方法,实验变差函数模型,对储层渗透率和有效厚度进行产值预测,得到测井渗透率和储层有效厚度的属性模型;3) 利用储层地质建模中相控^[6]的方法,以变差函数分析的各向异性椭圆为依据,提取单井控制范围内的动态渗透率和储层有效厚度的网格值;4) 在计算储层有效厚度时,将提取的各网格的有效厚度算术平均,见式(14)。在计算有效渗透率时,利用加权方法,计算渗透率的加权平均值,见式(15)。

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad (14)$$

$$\bar{K} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n h_i k_i \quad (15)$$

4 实例应用

M油田的C井进行了完整的产能测试,其测试无阻流量为 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。A、B、C、D井的井位图如图5所示,物探测井信息及层位对比图如图6所示。利用本研究建立的产能预测方法,及A、B、D井的物探测井资料进行产能刻度标定,产能计算结果见表1。

表1 新方法产能预测结果

Table 1 Predictions made by the new method

井名	产能预测/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	产能试井/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	误差
A	316	348	0.092
B	532	582	0.086
D	465		

由于A、B井也进行了产能试井,利用建立新方法进行产

能预测的值与产能试井结果误差在10%以内,满足工程计算的需要。

5 结论

1) 通过引入基于地质统计学的储层建模横向预测技术,将储层任意一点的渗透率同测试井的渗透率有机地联系起来,利用变差函数分析方法,准确计算储层动态渗透率和储层厚度平均值,提高了产能预测精度。

2) 针对目前有限单井试井资料预测气藏产能方法存在的局限性,建立了使用物探、测井信息和有限试井成果预测多井产能的方法,充分利用地震、物探和测井等静态信息,结合少量重点井的试井动态解释结果进行产能预测,避免了由于试井资料较少而导致无法进行产能预测的缺陷,能够为气田开发获得比较精确的全气藏产能信息提供经济可靠的技术手段。

3) 新方法产能预测的误差在10%以内,满足工程计算要求,可在仅有少量试井资料的情况下能够帮助完成常规的生产动态分析工作,从而大量节省测试所需的人力、物力。

参考文献 (References)

- [1] 李士伦. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
Li Shilun. Natural gas engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [2] 唐洪俊, 钟水清, 徐永高, 等. 用不稳定试井确定气井产能方法的评价与研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(3): 31-32.
Tang Hongjun, Zhong Shuiqing, Xu Yonggao, et al. Evaluation and research of determining gas well deliverability method by using nonstabilized well test[J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(3): 31-32.
- [3] 李治平, 赵必荣, 张敏渝, 等. 应用气井压力恢复曲线确定气井产能[J]. 天然气工业, 1998, 18(6): 63-65.
Li Zhiping, Zhao Birong, Zhang Minyu, et al. By use of the pressure build-up curve of gas well to determine its productivity[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(6): 63-65.
- [4] 唐洪俊, 赵必荣. 用压力恢复试井资料预测气井产能的新方法[J]. 钻采工艺, 1996, 19(6): 41-43.
Tang Hongjun, Zhao Birong. Evaluation and research of determining gas well deliverability method by using the pressure build-up test[J]. Drilling & Production Technology, 1996, 19(6): 41-43.
- [5] 陈元千. 气井垂直管流计算方法的推导与应用[J]. 断块油气田, 2010, 17(4): 443-447.
Chen Yuanqian. Derivation and application of calculating methods of vertical pipe flow in gas wells[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(4): 443-447.
- [6] 吴胜和. 储层建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
Wu Shenghe. Reservoir modeling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [7] Jensen C L, Mayson H J. Evaluation of permeability determined from repeat formation tester measurements made in the Prudhoe Bay field[C]// SPE 60th Annual Technical Conference, Las Vegas, USA, September 22-25, 1985.
- [8] Yildiz Turhan, Langlinais Julius. A reservoir model for wireline formation testing[C]//SPE Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, USA, March 6-8, 1990.
- [9] Semmelbeck M E, Dewan J T, Holditch S A. Invasion-based method for estimating permeability from logs[C]//SPE Annual Technical Conference, Dallas, USA, October 22-25, 1995.
- [10] Akram A H, Fitzpatrick A J, Halford F R. A model to predict wireline formation tester sample contamination[C]//SPE Annual Technical Conference, New Orleans, Louisiana, USA, September 27-30, 1998.

(编辑 陈华姣)