

基于岩性相—流动单元的低孔低渗储层 产能精细预测

——以东海陆架盆地西湖凹陷N构造为例

崔维平¹, 杨玉卿¹, 刘建新², 刘志杰¹

1 中海油田服务股份有限公司; 2 中海石油(中国)有限公司上海分公司

摘要 针对海域中深层低孔低渗储层纵向非均质性强、孔隙结构较差、孔渗关系复杂、常规孔渗模型计算的渗透率难以满足产能精细预测要求的难题,应用高分辨率电成像测井资料,在岩性和沉积层理构造识别的基础上,结合成岩作用,将储层划分为若干个微尺度的岩性相单元,有效刻画出储层纵向上的非均质性特征和岩性相单元内相对均一的良好孔渗关系。在岩性相单元框架约束下,利用储层品质因子和岩性相(相当于流动单元)指数将储层划分为6类流动单元。应用测井解释物性结果和岩心相渗分析资料,获取各类储层静态渗透率,精度提高了44%。在此基础上,建立静态渗透率和动态渗透率转换模型,将动态渗透率应用到渗流力学稳态流产能预测方法中。对东海陆架盆地西湖凹陷N构造古近系花港组储层进行产能精细预测,取得了良好的应用效果,与DST测试结果相比符合率达到85.9%以上。

关键词 低孔低渗储层; 岩性相; 流动单元; 静态渗透率; 动态渗透率; 产能精细预测; 西湖凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

0 前言

随着中国海上成熟领域勘探程度的加深,油气发现的难度越来越大,而中深层勘探潜力巨大,是石油天然气增储上产的重要领域^[1-3]。近几年,中国海油在多个盆地的中深层勘探中获得了低孔低渗油气藏的重要发现^[4],但由于海上油气田DST(Drill-stem testing,中途测试)资料不充分,造成对储层产能的评价和认识难度较大^[5-6]。因此,针对海上中深层,利用测井资料准确识别预测甜点储层,寻找有利的油气富集区,建立精确的产能预测模型,对降低勘探成本、编制勘探开发方案、提升勘探开发效率意义重大^[7-9]。

海上中深层低孔低渗储层的显著特点是纵向非均质性强,通常在埋深、岩性、层位、相带以及成岩背景相似的条件下,储层的物性及产能差异很大,这给产能预测带来很大困难。主要表现是由于孔隙结构差,孔渗关系复杂,基于常规的孔渗模型计算的渗透率难以满足产能精细预测的要求^[10-12]。

研究表明,采用不同方法建立储层分类模型,构建岩心分析孔隙度与渗透率之间的关系,是准确求取渗透率较为有效的方法之一^[13-16]。而基于FZI(Flow Zone Indicator,流动单元指数)流动单元方法求取渗透率^[17-18],是当前建立储层分类模型最有效的方法^[19],且得到了广泛应用^[20-22]。但通过流动单元方法求取渗透率依然存在2个难题:一是海上低孔低渗储层渗透率差异大,并主要受控于孔喉结构,不同流动单元之间在常规测井响应方面差异较小^[23],据此准确识别并划分不同流动单元的难度较大;二是通过流动单元法获得的是静态渗透率,直接用于产能预测产生的误差较大。

针对上述问题,首先利用高分辨率电成像资料,在岩性和沉积层理构造准确识别的基础上,结合成岩作用,将储层划分为若干个微尺度的岩性相单元,有效刻画出储层纵向上的非均质性特征;在岩性相单元框架约束下,利用储层品质因子和流动单元指数建立流动单元模型,应用常规测井资料多元拟合获取各类流动单元的储层静态渗透

收稿日期:2021-06-08; 改回日期:2021-08-26

本文受中海油重大专项课题“中深层储层测井新技术资料处理与解释”(编号:CCL2017SHPS006EXP)资助

第一作者: 崔维平, 硕士, 高级工程师, 现为中海油田服务股份有限公司专家, 主要从事测井地质方面的研究工作。通信地址: 065201 河北省廊坊市三河市燕郊行宫西大街海洋局中院; E-mail: 407937370@qq.com

率;在此基础上,基于测井解释物性结果和岩心相渗分析资料,建立静态渗透率和动态渗透率转换模型,将动态渗透率应用到渗流力学稳态流的产能预测方法中,以求获得满意效果。本方法在东海盆地西湖凹陷N构造古近系中深层低孔低渗气藏中应用,在数口井中进行产能精细预测,预测结果与DST测试结果相比,符合率达到85%以上,满足了勘探开发需求。

1 研究区概况

西湖凹陷是东海陆架盆地东部坳陷的一部分,是我国东海海域油气勘探的重点凹陷。位于西湖凹陷的N构造含气层段为古近系花港组,埋深在3 500~4 500 m之间;主要储层为湖泊—辫状河三角洲体系的水下分流河道砂体(图1),砂体厚度较大,一般为几十米到百米以上,岩性以细砂岩为主,局部发育含砾砂岩和中砂岩。根据岩心数据分析统计,N构造花港组储层孔隙度基本小于10%,渗透率变化范围大,介于 $(0.01\sim 366)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;孔渗关系复杂,纵向非均质性极强,相近孔隙度的岩心渗透率差别达到两个数量级以上,属于典型的孔隙结构非常复杂、纵向非均质性强的低孔低渗储层;裂缝发育较少,且均被其他矿物充填,对储层质量影响不大。因此,探讨并准确评价这类储层的渗透率并对储层的产能做出可靠预测,特别是确定大套厚层储层中的主要贡献段,对勘探开发具有很大现实意义。

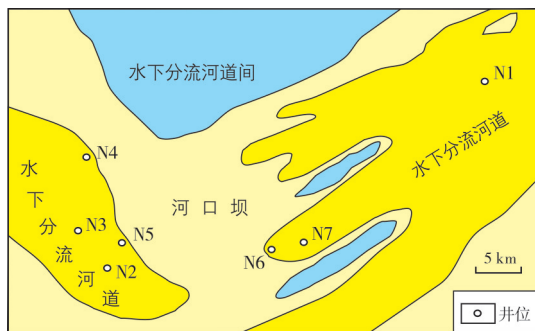


图1 西湖凹陷N构造古近系花港组沉积微相图

Fig. 1 Sedimentary microfacies of the Paleogene Huagang Formation of N structure in Xihu Sag

2 渗透率建模

2.1 岩性相单元识别与划分

本文采用Maill提出的岩性相概念^[24],用岩性及

其发育的沉积层理构造来表征岩相单元。因为是从电成像测井的角度进行表征,所以岩性及其沉积构造均可有效识别出来^[25-28],而且可以建立纵向连续的序列,为储层岩性相精细评价奠定良好基础^[29]。

岩性相包含岩性和沉积构造等特征,它深刻揭示了储层成因单元内部宏观非均质性及沉积环境条件的变化。同一沉积环境,水动力能量条件的变化,主要体现在沉积物粒度、结构与沉积构造的变化,即岩性相单元的变化^[29-30]。因此,每一个岩性相单元内部具有相对均质性,即同一岩性相单元具有相对良好的孔渗关系,不同的岩性相单元其物性相差很大。

鉴于研究区目的层厚度大、非均质性强,先把砂体在纵向上划分为若干个岩性相单元,把非均质砂体转换为若干个相对均质的单元。前人的岩性相划分方案重点强调储层的沉积作用^[24,30],但是通过对西湖凹陷N构造12口井岩心实验分析资料、测井资料及录井资料综合分析,认为成岩胶结作用对储层质量的影响不可忽视。因此,充分考虑沉积作用和成岩作用,基于成像测井资料,在岩性和沉积层理构造识别的基础上,把研究区主要储层划分出9类岩性相单元,即钙质胶结砂岩、块状层理砂砾岩、块状层理砂岩、槽状交错层理细中砂岩、板状交错层理细中砂岩、槽状交错层理含砾细砂岩、板状交错层理含砾细砂岩、槽状交错层理细砂岩、板状交错层理细砂岩。主要岩性相类型的成像测井响应特征见图2。

2.2 流动单元划分

流动单元是从宏观到微观的不同级次上的、在垂向及侧向上连续的、影响流体流动的岩石特征和流体本身渗流特征相似的储集岩体^[31],不同流动单元之间孔渗值存在差异。对流动单元的划分,目前主要通过岩心物性分析资料。根据Amaefule等^[32]提出的平均水力单井的流动单元划分方法,利用孔隙度(ϕ)及渗透率(K)构建储层品质因子(RQI)和标准化孔隙度指数(ϕ_z),进而表征流动单元指数(FZI):

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\phi}} \quad (1)$$

$$\phi_z = \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (2)$$

$$FZI = \frac{RQI}{\phi_z} \quad (3)$$

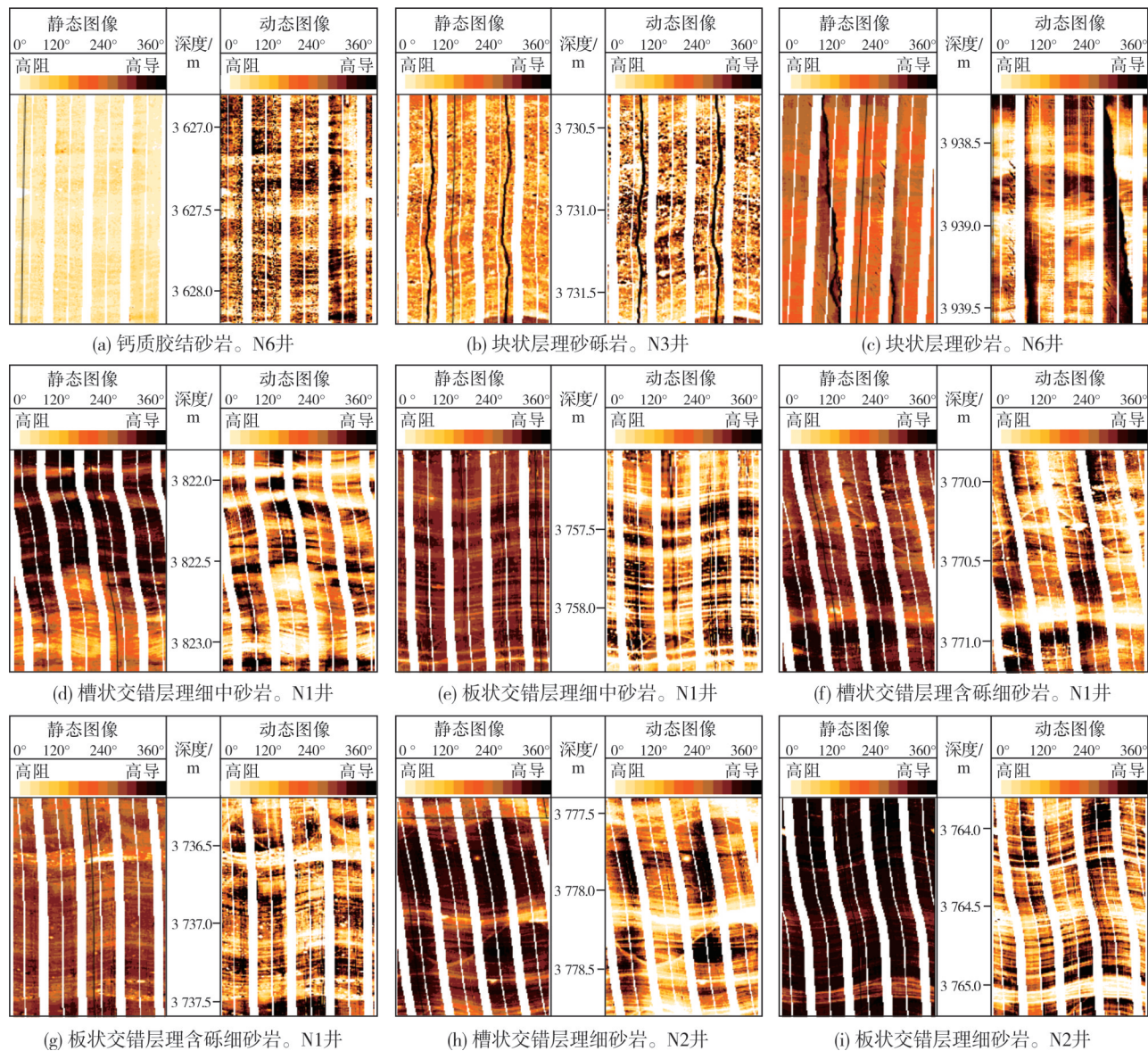


图2 西湖凹陷N构造花港组主要岩性相类型
Fig. 2 Main lithofacies types of Huagang Formation of N structure in Xihu Sag

上述公式中: RQI 为储层品质因子, μm ; K 为渗透率, μm^2 ; ϕ 为孔隙度,%; ϕ_z 为标准化孔隙度指数,%; FZI 为流动单元指数, μm 。 FZI 是一个综合判定参数,其值主要由实验室测定的孔隙度和渗透率决定。实际上 FZI 主要取决于岩石孔隙结构,具有相同 FZI 的储层孔喉特征相似^[31],并具有相对一致的孔渗相关性。

根据 FZI 斜率、变化率及拐点等特征,将研究区花港组储层划分为6个流动单元孔隙带(表1,图3a)。不同流动单元带孔渗相关性差,但同一流动单元带具有较好的孔渗相关性(图3b),由此建立了与之相

应的渗透率解释模型。

表1 西湖凹陷N构造花港组渗透率模型
Table 1 Permeability model of Huagang Formation of N structure in Xihu Sag

流动单元类型	$FZI/\mu m$	孔渗关系	相关系数
I	>3.0	$K=0.0031 \times \phi^{3.8632}$	0.98
II	$2.07 \sim 3.0$	$K=0.0036 \times \phi^{3.3782}$	0.93
III	$1.35 \sim 2.07$	$K=0.0018 \times \phi^{3.3126}$	0.94
IV	$0.87 \sim 1.35$	$K=0.0008 \times \phi^{3.2522}$	0.94
V	$0.57 \sim 0.87$	$K=0.0003 \times \phi^{3.3243}$	0.89
VI	<0.57	$K=0.0001 \times \phi^{3.3304}$	0.85

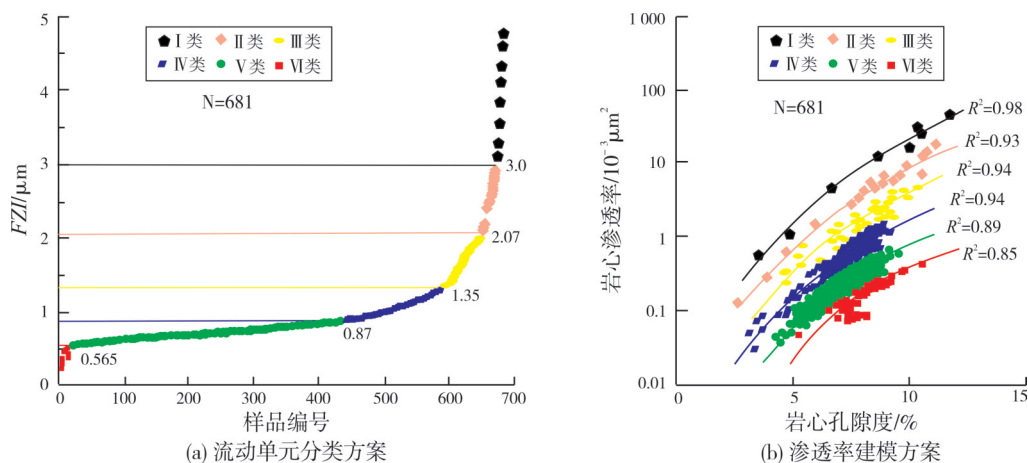


图3 西湖凹陷N构造花港组流动单元法渗透率建模效果

Fig. 3 Effect of permeability modeling based on flow units of Huagang Formation of N structure in Xihu Sag

2.3 岩性相约束的流动单元自动识别

在岩心实验分析的基础上确定流动单元的划分方案及响应的渗透率模型后,最终需用测井曲线信息建立流动单元识别方法,才能进行全井段渗透率的连续计算。因此,必须结合岩心数据和测井数据,在岩心深度准确归位的基础上,进行流动单元的测井识别。

在识别流动单元时,一种方法是应用现代大数据分析思路,应用现有的数据分析软件,进行聚类分析及模式识别。其中最常用的是Fisher判别的经典算法,通过对样本点流动单元指数和测井数据的载入和分析,可以生成不同流动单元类型样本基于测井数据的判别函数,进而进行流动单元判别。但是,受到样本数量和质量的限制,该方法通常误差较大,在样本数量越庞大的地区应用效果越好^[33]。

而最常用的流动单元识别方法还是通过分析流动单元最相关的几个测井敏感参数,利用常规测井资料以及岩心刻度方法进行多元拟合计算,建立流动单元指数计算模型。这种方法操作简便,适用性广,同时精度也能达到评价要求。本次研究建立的流动单元识别模型如下式所示:

$$\lg FZI = 0.01 \times POR - 0.0363 \times CNL + 0.967 \times DEN - 0.0127 \times SH - 2.31 \quad (4)$$

式中: FZI 为流动单元指数, μm ; POR 为孔隙度, %; CNL 为中子值, %; DEN 为密度值, g/cm^3 ; SH 为泥质含量, %。

从图3b和表1可以看出,除I类流动单元带具有相对更好的孔渗相关性外,其他5类流动单元带

的孔渗相关性依然较差,且部分流动单元带界限不明晰。究其原因,除了岩心样品数据有限外,还与常规测井数据的纵向分辨率低、储层本身孔隙结构差而导致其电性差异小有关。

前已述及,岩性相单元是基于成像测井资料建立的,是沉积与成岩作用的综合表现,其内部具有相对一致的孔渗关系,不同单元之间则界限明显。流动单元是基于常规测井资料来表征的,对于受沉积与成岩作用影响小、物性相对较好的储层求解效果良好,对于孔渗关系复杂、孔隙结构差的储层求解效果不很理想。但岩性相单元与流动单元之间的共同点是其内部的物性具有相对一致性,即其含义是相似的。因此,用岩性相约束流动单元,可以大幅度提升渗透率的计算精度。

以N2井为例,通过对研究区9种岩性相的物性分析(表2)可知:槽状交错层理细中砂岩、槽状交错层理含砾细砂岩主要为I类流动单元;板状交错层理细中砂岩、槽状交错层理细砂岩主要为II类流动单元;板状交错层理含砾细砂岩、板状交错层理细砂岩主要为III类流动单元;块状层理砂砾岩为IV类流动单元;块状层理砂岩主要为V类流动单元;钙质胶结砂岩主要为VI类流动单元。在岩性相约束下,对流动单元进行了自动识别,如图4所示。很显然,约束后的流动单元与岩性相单元完全对应。从流动单元的计算渗透率与岩心渗透率交会图(图5)可知,岩性相约束之前两者的相关系数为0.73,约束之后相关系数为0.86,后者渗透率计算精度提高了44%。

表2 西湖凹陷N2井花港组岩性相类型物性统计
Table 2 Physical property statistics of lithofacies types of Huangang Formation of Well N2 in Xihu Sag

岩性相类型	流动单元类型	厚度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
槽状交错层理细中砂岩	I	26.9	>13.1	>28.0
槽状交错层理含砾细砂岩	I	15.6	12.0~13.1	10.0~28.0
板状交错层理细中砂岩	II	69.2	11.5~12.0	8.1~10.0
槽状交错层理细砂岩	II	49.9	9.2~11.5	3.2~8.1
板状交错层理含砾细砂岩	III	39.9	8.0~9.2	2.8~3.2
板状交错层理细砂岩	III	244.5	6.9~8.0	0.5~2.8
块状层理砂砾岩	IV	30.6	6.0~6.9	0.2~0.5
块状层理砂岩	V	87.6	5.1~6.0	0.05~0.2
钙质胶结砂岩	VI	51.3	<5.1	<0.05

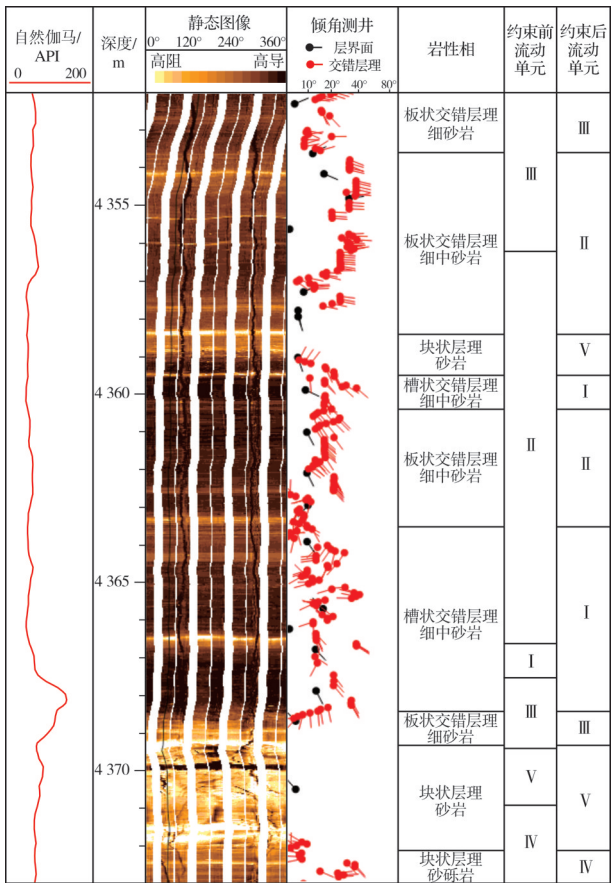


图4 西湖凹陷N2井花港组H3砂层组岩性相约束前后流动单元划分结果对比

Fig. 4 Comparison of flow unit division results of H3 sand group in Huangang Formation of Well N2 in Xihu Sag before and after lithofacies constraint

通过上述方法计算的渗透率为静态渗透率,而油气藏产能预测或动态模拟运算工程中要使用动态渗透率(有效渗透率),只有获取静态渗透率后,才能得到特定渗流条件下的有效渗透率^[34]。根据

气相动态渗透率定义,气相有效渗透率是静态渗透率(空气渗透率)与气水相对渗透率的乘积:

$$K_g = K \times K_{rg} \quad (5)$$

式中: K_g 为气相有效渗透率, K 为空气渗透率, K_{rg} 为气水相对渗透率,单位为 $10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。通过气水相渗实验可获得 K_{rg} 和 K 值,其中 K_{rg} 为相渗曲线气相相对渗透率最大值(端点值)(图6),进而可以计算出 K_g 。

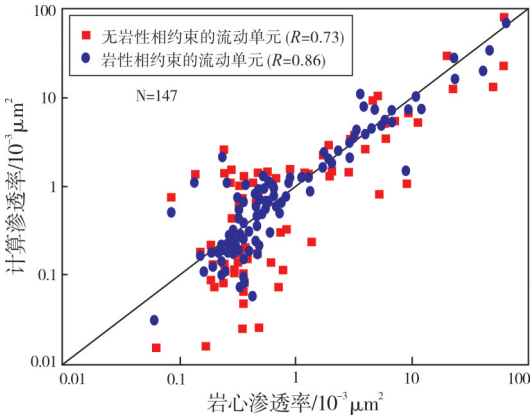


图5 西湖凹陷N2井花港组计算渗透率与岩心渗透率交会图
Fig. 5 Crossplot of calculated permeability and core permeability of Huangang Formation of Well N2 in Xihu Sag

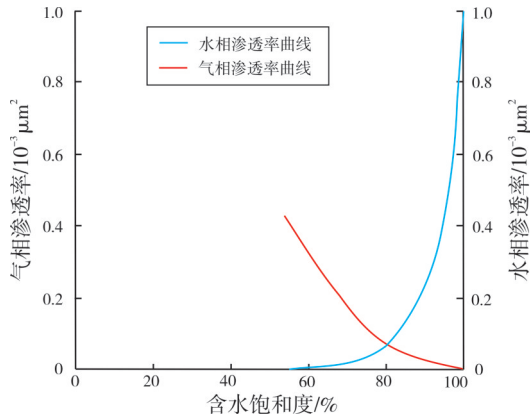


图6 西湖凹陷N2井花港组气驱水相渗实验曲线
Fig. 6 Phase permeability curve of gas driving water test of Huangang Formation of Well N2 in Xihu Sag

3 产能精细预测

对油气层的产能进行定性或定量评价一直是油气勘探与开发领域的一项基本任务。对储层产能进行正确评价,不仅可以检验油气勘探的成果,而且可以为油气田开发提供最基本的依据。研究表明,常规储层总体具有相对均质且较好的渗透性,故产能预测效果往往较好,而对于厚层非均质性强的低孔低渗储层,其产能预测难度较大,尚无统一

有效的方法。传统上采用平均的渗透率值作为输入参数,预测效果往往差异较大。本文基于岩性相单元约束的储层分类与渗透率精细求解,把产层段划分为若干个不同的流动单元,使复杂的、非均质性强的厚层低孔低渗储层转变为一个相对均质的层段;然后基于达西定律的稳态流渗流力学理论,分别进行产能预测,具有良好的理论基础。根据达西定律,完善井(表皮系数为零的井)均匀不可压缩流体的平面径向稳态渗流的产出方程计算公式为:

$$q_g = \frac{7.03 \times 10^{-4} K_g h (P_r^2 - P_{wf}^2)}{\mu_g z T \left[\ln \left(\frac{r_e}{r_w} \right) - 0.75 + s_i + Dq_g \right]} \quad (6)$$

式中: q_g 为产气量, m^3/d ; K_g 为气相有效渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; h 为储层厚度,m; P_r 为地层压力,MPa; P_{wf} 为流动压力,MPa; μ_g 为气体黏度, $Pa \cdot s$; z 为气体偏差系数,无量纲; T 为温度, $^{\circ}C$; r_e 为泄流半径,m; r_w 为井径,m; s_i 为表皮系数,无量纲; Dq_g 为非达西表皮系数,无量纲。

基于以上公式,逐层分别进行产能预测,再进行

全层段产能叠加,获得测试全层段砂体的总体产能。

4 预测效果

N1井为西湖凹陷N构造的一口重点勘探井,在目的层花港组3 873~3 903 m井段进行了DST测试。N1井的该井段共划分出4种岩性相单元,分别为槽状交错层理细砂岩、板状交错层理细砂岩、块状层理砂岩及钙质胶结砂岩,识别出Ⅱ、Ⅲ、Ⅴ、Ⅵ等4类流动单元,其中块状层理砂岩和钙质胶结砂岩分别为Ⅴ、Ⅵ类流动单元,属于无效储层,无产能贡献。该井段共划分出15个岩性相单元和流动单元,通过精细的动态、静态渗透率计算,按生产压差14.6 MPa、分流动单元进行了产能预测,然后叠加计算获得该层段总的产能为 $55.44 \times 10^4 m^3$ (表3)。实际DST测试结果为日产气 $58.59 \times 10^4 m^3$,与预测结果高度吻合,达到了高精度产能预测的目的。另外,通过表3可以看出各测试层段的贡献情况:在15个层段或流动单元中,有7个层段无产出或产出低于 $1 \times 10^4 m^3$,有些层段如11号层,厚度仅2.1 m,但产能贡献达到 $13 \times 10^4 m^3$ 以上。

表3 西湖凹陷N1井花港组产能预测统计表

Table 3 Statistics of predicted productivity of Huagang Formation of Well N1 in Xihu Sag

序号	岩性相	流动单元	顶深/m	底深/m	厚度/m	静态渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	动态渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	生产压差/ MPa	单层产能/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)
1	槽状交错层理细砂岩	Ⅱ	3 873.0	3 877.6	4.6	5.7	4.34	14.60	145 717.1
2	板状交错层理细砂岩	Ⅲ	3 877.6	3 883.9	6.3	3.1	2.17	14.60	99 860.7
3	槽状交错层理细砂岩	Ⅱ	3 883.9	3 886.2	2.3	4.5	3.32	14.60	55 689.6
4	板状交错层理细砂岩	Ⅲ	3 886.2	3 887.6	1.4	2.8	1.93	14.60	19 766.6
5	块状层理砂岩	Ⅴ	3 887.6	3 888.2	0.6	0.015	0.00	14.60	0.0
6	钙质胶结砂岩	Ⅵ	3 888.2	3 889.9	1.7	0.001	0.00	14.60	0.0
7	板状交错层理细砂岩	Ⅲ	3 889.9	3 890.9	1.0	0.56	0.19	14.60	1 371.1
8	钙质胶结砂岩	Ⅵ	3 890.9	3 891.8	0.9	0.001	0.00	14.60	0.0
9	槽状交错层理细砂岩	Ⅱ	3 891.8	3 895.7	3.9	3.0	1.55	14.60	44 030.2
10	块状层理细砂岩	Ⅴ	3 895.7	3 896.9	1.2	0.02	0.00	14.60	0.0
11	槽状交错层理细砂岩	Ⅱ	3 896.9	3 899.0	2.1	10.0	8.69	14.60	133 223.7
12	板状交错层理细砂岩	Ⅲ	3 899.0	3 900.3	1.3	0.8	0.47	14.60	4 418.2
13	块状层理砂岩	Ⅴ	3 900.3	3 901.0	0.7	0.01	0.00	14.60	0.0
14	板状交错层理细砂岩	Ⅲ	3 901.0	3 901.9	0.9	2.8	1.93	14.60	12 707.1
15	槽状交错层理细砂岩	Ⅱ	3 901.9	3 903.0	1.1	6.1	4.69	14.60	37 638.3
合计									554 422.6

利用上述方法,对西湖凹陷N构造中深层低孔低渗气藏的数口井进行产能精细预测(表4),预测结果与实际测试结果吻合很好,从绝对值看总体符合率达

到85.9%,验证了本方法的可靠性。但是,对于产能很低的特低渗储层,精确的渗透率求取难度很大,加之存在其他影响因素,预测结果误差往往较大。

表4 西湖凹陷N构造7口井花港组预测产能与实际产能对比表

Table 4 Comparison between predicted productivity and actual productivity of Huagang Formation of 7 wells of N structure in Xihu Sag

序号	井名	射孔厚度/ m	生产压差/ MPa	实际产能/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	预测产能/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
1	N1	30	14.6	58.59×10^4	55.44×10^4
2	N2	38	24.4	25.8×10^4	23.41×10^4
3	N3	55	15.0	产气微量	9 075
4	N4	20	24.1	产气微量	13 600
5	N5	5	6.6	气4 674/液9.5	2 111
6	N6	32	21.5	6 465	5 361
7	N7	43	25.0	12×10^4	90 868

5 结 论

(1)中深层低孔低渗储层厚度大,纵向非均质性强,进行产能预测并确定不同层段的实际贡献值难度很大,目前没有成熟可用的有效方法。本文提出一种适用于厚层非均质性强的低孔低渗储层产能预测的新方法:首先基于高分辨率的电成像测井资料对储层进行岩性相单元精细划分;在此框架约束下,开展基于常规测井资料的储层流动单元分类,在相对均质、孔渗关系良好的流动单元模型中,借助岩心岩石物理分析资料,实现动静态渗透率转换;最后以流动单元为准,按照达西定律的稳态流渗流力学理论进行产能预测。

(2)本方法应用于东海陆架盆地西湖凹陷古近系中深层低孔低渗气藏,在数口井的产能预测中,预测结果与实际测试结果的总体符合率达到85.9%,特别是在数十米厚的测试层段中,比较清楚地确定出主要产能贡献段,这对于后期的有效勘探开发具有很大的现实意义。

(3)本方法强调对储层纵向进行精细划分,更加适用于低孔低渗、孔隙结构复杂、非均质性强的碎屑岩储层的渗透率计算和产能预测,应用前景较好。但是,对于特低渗储层,因受限于测井资料精度问题,储层参数和产能预测结果往往有较大误差。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,张永峰,赵霞.中国天然气工业发展前景与挑战[J].天然气工业,2014,34(2):1-11.
- [2] 谢玉洪.南海西部低渗油气藏勘探开发探索与实践[J].中国海上油气,2018,30(6):80-85.
- [3] 宋延杰,陈济强,唐晓敏,等.低孔渗泥质砂岩三水孔隙结

合导电模型及其在海上油田的应用[J].大庆石油学院学报,2010,34(6):100-105.

- [4] 谢玉洪.中国海油近海油气勘探实践与思考[J].中国海上油气,2020,32(2):1-13.
- [5] 赵立新,廖新维.电缆地层测试油气层产能预测技术研究及应用[J].测井技术,2009,33(3):284-288.
- [6] 杨冬,张海荣,吴一雄,等.电缆地层测试资料在低渗气藏产能预测中的应用[J].中国海上油气,2018,30(6):109-114.
- [7] 许建红.低渗透油藏产能主要影响因素分析与评价[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(2):144-148.
- [8] 毛志强,李进福.油气层产能预测方法及模型[J].石油学报,2009,21(5):58-61.
- [9] 宋宣毅,刘月田,马晶,等.基于灰狼算法优化的支持向量机产能预测[J].岩性油气藏,2020,32(2):134-140.
- [10] 肖慈珣,肖崇礼,栗英姿,等.天然气储层产能的测井评价与预测[J].石油与天然气地质,1999,20(4):279-289.
- [11] 陈志强,吴思源,白蓉,等.基于流动单元的致密砂岩气储层渗透率测井评价:以川中广安地区须家河组为例[J].岩性油气藏,2017,29(6):76-83.
- [12] 夏瑜,陈浩,姚锋盛,等.致密砂岩气藏渗透率定量评价新方法及应用:以东海陆架盆地西湖凹陷X气藏为例[J].天然气勘探与开发,2020,43(3):78-85.
- [13] 赖锦,王贵文,罗官幸,等.基于岩石物理相约束的致密砂岩气储层渗透率解释建模[J].地球物理学进展,2014,29(3):1173-1182.
- [14] 孟万斌,吕正祥,唐宇,等.基于砂岩组构分类评价的储层渗透率预测[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(2):1-13.
- [15] 陈科贵,陈旭,张家浩.复合渗透率测井评价方法在砂砾岩稠油油藏的应用:以克拉玛依油田某区八道湾组为例[J].地球科学进展,2015,30(7):773-779.
- [16] 郑香伟,吴建,何胜林,等.基于流动单元的砂砾岩储层渗透率测井精细评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(1):286-294.
- [17] EBANKS W J. Flow unit concept-integrated approach to reservoir description for engineering projects [J]. AAPG bulletin, 1987, 71(5): 551-552.
- [18] LARUE D K, LEGARRE H. Flow units, connectivity, and reservoir characterization in a wave-dominated deltaic reservoir: Meren Reservoir, Nigeria [J]. AAPG bulletin, 2004, 88(3): 303-324.
- [19] 吕明针,林承焰,张宪国,等.储层流动单元划分方法评价及优选[J].岩性油气藏,2015,27(1):74-88.
- [20] 焦翠华,徐朝晖.基于流动单元指数的渗透率预测方法[J].测井技术,2006,30(4):317-319.
- [21] 马凤春,柳金城,吴颜雄,等.基于流动单元的多油层储层参数计算和评价方法研究[J].现代地质,2020,34(2):370-377.
- [22] 刘成川,陈俊,黎华继,等.中江气田沙溪庙组气藏致密砂

- 岩储层测井评价[J].石油物探,2020,59(1):131-140.
- [23] 王清辉,冯进,管耀,等.基于动态资料的低孔低渗砂岩储层渗透率测井评价方法:以陆丰凹陷古近系为例[J].石油学报,2019,40(增刊1):206-216.
- [24] MIAL A D. Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary [M]//MIAL A D. Fluvial sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geologists, memoir 5, 1978: 597-604.
- [25] 杨玉卿,崔维平,李俊良,等.电成像测井在珠江口盆地西部低阻油层研究中的应用[J].中国海上油气,2011,23(6):369-373.
- [26] 杨玉卿,崔维平,田洪.碎屑岩成像测井沉积学研究及其在海上油田的应用[J].海相油气地质,2012,17(3):40-46.
- [27] 崔维平,杨玉卿.利用测井资料识别重力流沉积及意义[J].岩性油气藏,2011,23(5):78-81.
- [28] 崔维平,杨玉卿,李俊良,等.电成像测井在珠江口盆地西部沉积相研究中的应用[J].石油天然气学报,2012,34(3):89-95.
- [29] 杨玉卿,崔维平,冯进,等.基于岩性相单元的低孔低渗碎屑岩储层质量精细评价:以珠江口盆地 HZ25-7 构造古近系文昌组为例[J].海相油气地质,2017,22(3):85-94.
- [30] 杨玉卿,崔维平,王猛.成像测井沉积学研究进展与发展趋势[J].中国海上油气,2017,29(3):7-18.
- [31] 欧家强,罗明高,王小蓉.低渗透油藏中储层流动单元划分[J].西安石油大学学报(自然科学版),2008,23(5):24-28.
- [32] AMAEFULE J O, ALTUNBAY M, TIAB D, et al. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells [C]//SPE annual technical conference and exhibition. Texas: Houston, 1993.
- [33] 张国珍,杨华,赵志魁,等.低孔低渗油气藏测井评价技术及应用[M].北京:石油工业出版社,2009:31-90.
- [34] 王猛,刘志杰,杨玉卿,等.基于区域测井大数据和实验资料的储层流动单元渗透率建模方法[J].地球物理学进展,2021,36(1):274-280.

编辑:董庸

Fine productivity prediction of reservoir with low-porosity and low-permeability based on lithofacies unit and flow units: an example from N structure, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

CUI Weiping, YANG Yuqing, LIU Jianxin, LIU Zhijie

Abstract: In view of the problems of strong longitudinal heterogeneity, poor pore structure, complex porosity-permeability relationship, and that permeability calculated by conventional porosity-permeability can't meet the requirements of fine productivity prediction for low-porosity and low-permeability reservoirs of medium-deep formation in the sea area, the reservoir are divided into several micro-scale lithofacies units based on the identification of lithology and sedimentary bedding structure by logging data of high-resolution electrical imaging combined with diagenesis, which effectively depict the characteristics of longitudinal heterogeneity and relatively uniform and good porosity-permeability relationship of the reservoir. Under the constraints of the lithofacies unit framework, the reservoirs are divided into 6 types of flow units with the reservoir quality factor and lithofacies (equivalent to flow unit) index. Using logging interpretational results of physical property and core permeability analysis data to obtain static permeability of various reservoirs, the accuracy has increased by 44%. On this basis, the conversion model of static permeability and dynamic permeability is established, and the dynamic permeability is applied to the method of the steady-state flow productivity prediction. The fine productivity prediction of Paleogene Huagang Formation reservoir of N structure in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin has achieved good application effect, and the coincidence rate is more than 85.9% compared with DST test results.

Key words: low-porosity and low-permeability reservoirs; lithofacies; flow unit; static permeability; dynamic permeability; fine productivity prediction; Xihu Sag

CUI Weiping, First author: MSc, Senior Engineer, Expert of China Oilfield Services Co., Ltd., mainly engaged in the research of logging geology. Add: Middle Court of Ocean Bureau, Xinggong West Street, Yanjiao, Sanhe City, Langfang, Hebei 065201, China