

孔喉分布约束的低渗储层渗透率定量表征方法

张建民, 江远鹏, 黄凯, 苏彦春

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津 300452

摘要 低渗透储层逐渐成为海上油田开发技术攻关的重点, 它的渗透率受控于孔隙结构。目前低渗透储层渗透率的定量表征主要依据孔隙度建立孔渗关系, 因低渗储层孔渗关系差, 所以传统方法存在计算精度低的问题。为此提出基于孔喉分布约束的渗透率定量表征方法, 在表征过程中考虑孔隙结构影响, 依据孔喉半径将孔隙空间划分为不同类型, 通过将不同类型孔隙空间赋予不同的权值, 表征不同孔喉半径对孔隙空间影响, 并将各类孔隙空间加权后之和定义为各类孔喉体积综合系数。与传统方法比较, 该系数与渗透率具有更好的相关性。通过在新方法中引入核磁共振测井, 可实现渗透率解释结果的连续分布。应用结果表明, 新方法解释渗透率具有较高精度, 为低渗储层渗透率表征提供了一种切实可行的技术方法。

关键词 低渗储层; 渗透率; 孔喉分布约束

中图分类号 TE122.2³

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.22.011

Quantitative Characterization of Permeability Based on the Pore and Throat Distribution Constraint

ZHANG Jianmin, JIANG Yuanpeng, HUANG Kai, SU Yanchun

Bohai Oil Research Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China

Abstract Low permeability reservoirs are becoming a focus of the offshore oilfield development technologies. The permeability can be controlled by the pore structure, and the quantitative characterization of the permeability can be established based on the relationship between the porosity and the permeability. However, this kind of relationship is not very reliable, which reduces the accuracy of the permeability calculation. This paper proposes a new method of the permeability quantitative characterization based on the pore and throat distribution constraints. The pore space is divided into different types based on the size of the pore throat radius, which are given different weights to characterize the effect of the pore throat radius, and the sum of all weighted pore spaces is defined as the pore throat volume coefficient. Compared with the traditional method, the coefficient of the permeability has a better correlation. Through the introduction of the NMR logging in the new method, for a continuous distribution of the permeability interpretation, the application results show that the permeability explained by the new method enjoys a high accuracy, therefore, this method provides a viable technology for the permeability characterization of low permeability reservoirs.

Keywords low permeability reservoir; permeability; pore and throat distribution constraint

随着勘探程度的不断深入, 渤海油田低渗储层的探明储量逐年增加, 而动用程度却较低, 制定合理的开发方案、高效开发低渗储层对确保油田增储上产显得尤为重要^[1]。目前制约低渗储层开发的一个技术瓶颈是难以精确表征渗透率。

低渗储层孔渗关系差(图1), 通常储层孔隙度相差不大, 而渗透率相差数量级, 传统依据孔隙度计算中、高渗储层的渗透率解释方法对低渗储层的渗透率解释精度低, 难以满足产能评价及开发方案部署的精度要求。本文从理论分析着手, 以

投稿日期: 2013-05-22; 修回日期: 2014-05-20

作者简介: 张建民, 工程师, 研究方向为开发地质与油藏工程, 电子信箱: zhangjm2@cnooc.com.cn

引用格式: 张建民, 江远鹏, 黄凯, 等. 孔喉分布约束的低渗储层渗透率定量表征方法[J]. 科技导报, 2014, 32(22): 67-72.

岩心分析化验数据为基础,研究低渗储层孔隙结构分布特征对渗透率的影响,并建立两者之间的定量关系,以对渤海油田低渗储层进行渗透率解释。

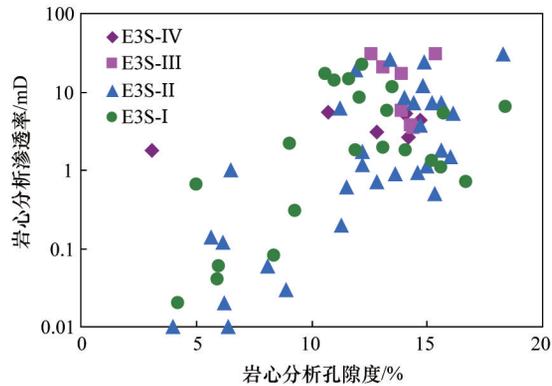


图1 低渗储层孔渗相关性

Fig. 1 Correlation of porosity and permeability for low permeability reservoir

1 低渗储层孔喉分布对渗透率影响分析

1.1 低渗储层孔喉分布特征

低渗储层常规物性分析中经常出现孔隙相差不大而渗透率相差数量级的情况。岩石的渗透率不仅与孔隙度有关,还取决于孔隙结构^[2]。图2所示为3条岩心压汞孔喉分布曲线,3块岩心的孔隙度约为16%,而渗透率差异较大。通过对3条分布曲线进行划分,得出各孔径段控制的孔隙空间所占总孔隙的比例(图3),渗透率为48.2 mD的I号岩心 > 1 μm 孔喉控制的孔隙空间占 66.0%,而 < 0.1 μm 孔喉控制的孔隙空间仅占 8.4%;渗透率为 0.63 mD 的 III 号岩心大孔喉控制的孔隙空间较少, > 1 μm 的孔喉控制的孔隙空间仅占 5.9%, < 0.1 μm 孔喉控制的孔隙空间占 28.2%。分析表明,在孔隙度相同的情况下,随着渗透率的增大,大孔喉控制的孔隙空间增多,而小孔喉控制的孔隙空间减少。

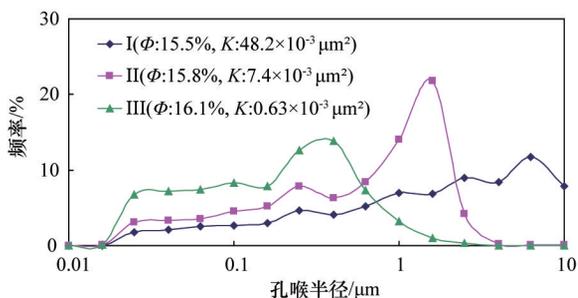


图2 岩心压汞孔喉半径分布频率

Fig. 2 Pore throat radius distribution frequency curve of core pressure mercury

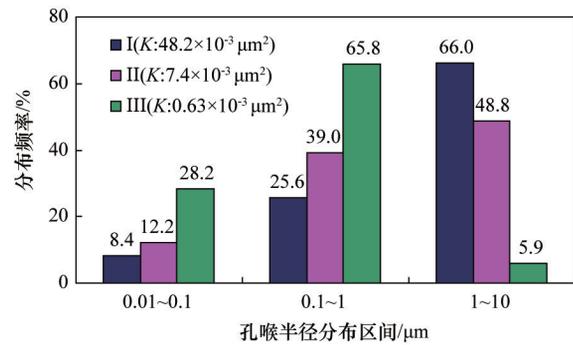


图3 岩心孔喉分布频率对比

Fig. 3 Comparison of core pore throat distribution frequency

1.2 孔喉分布影响渗透率的机理

等体积大小的孔隙空间,内部孔径如何影响渗透率,针对此问题,本文将一个大的孔隙空间划分为2个等大的孔隙空间(图4),通过对比可知,划分前后孔隙度、迂曲度及骨架体积不变,而孔隙的总表面积增加为划分前的1.4倍,依据Kozeny-Carman公式可知^[3],划分后储层渗透率减小1倍。研究证实,大孔径对渗透率的增大作用要大于等体积的小孔径。因此,在进行低渗储层渗透率定量表征过程中,要兼顾孔隙度以及孔隙结构特征,并且依据孔喉半径划分孔隙空间,以此提高渗透率解释精度具有一定的理论依据。

Kozeny-Carman公式为

$$K = \frac{\Phi^3}{2\tau^2(1-\Phi)^2} \left(\frac{V_s}{A} \right)^2 \quad (1)$$

式中, Φ 、 V_s 、 τ 、 A 分别为孔隙度、骨架体积、迂曲度和孔隙总表面积。

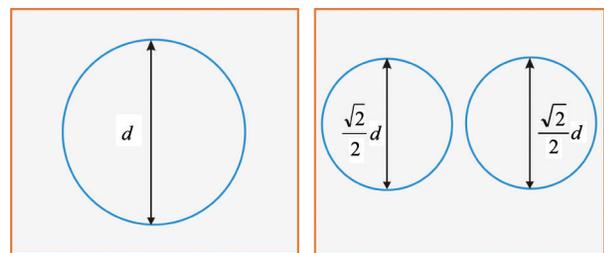


图4 孔隙空间的划分对比

Fig. 4 Comparison of pore space division

2 孔喉分布约束的渗透率定量表征模型的建立

2.1 孔喉划分

通过研究两个油田的低渗储层特征,并对储层孔喉半径分布频率进行统计,研究表明控制储层大部分孔隙空间的孔喉半径小于 1 μm(图5),因此主要针对小于 1 μm 的孔喉半径进行划分可以有效表征储层孔隙结构的差异。本次研究采用的孔喉划分标准为李道品提出的喉道划分方案^[4](表1),该方案适用于对低渗储层孔喉系统的划分。根据李道品孔

喉划分方案将孔喉划分为5种类型,由于中喉道和细喉道粒级相当且差异不大故归为一类,在一定程度上减少孔喉划分类型的数量有利于提高运算效率,便于该方法的推广应用。

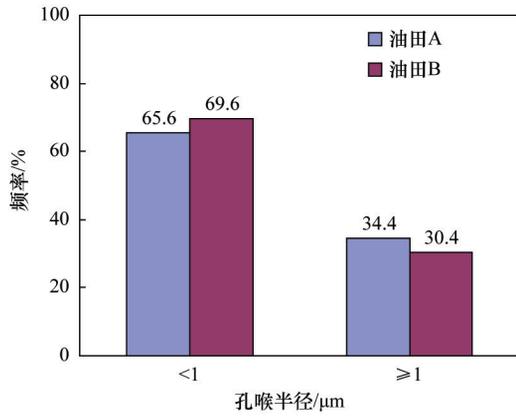


图5 油田A及油田B孔喉半径分布频率

Fig. 5 Pore throat radius distribution frequency in oilfields A and B

表1 李道品喉道划分方案

Table 1 Li Daopin throat division scheme

| 喉道类型 | 喉道半径/μm | |
|------|---------|-------------|
| 粗喉道 | > 4.0 | |
| 中喉道 | 4 ~ 2 | |
| 细喉道 | 2 ~ 1 | |
| 微喉道 | 微细喉道 | 1.0 ~ 0.5 |
| | 微喉道 | 0.5 ~ 0.025 |
| | 吸附喉道 | < 0.025 |

2.2 孔喉分布体积

依据李道品喉道划分方案,对压汞孔喉分布曲线进行划分,获取各类孔喉控制的孔隙空间所占总孔隙的比例(图6),

其与岩心分析孔隙度的乘积为单位体积内各类孔喉控制的孔隙空间体积,简称为各类孔喉体积,其中粗喉、中细喉、微细喉、微喉及吸附喉控制的孔喉体积分别用 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 表示,按照孔隙组成结构对孔隙空间的划分,实现对孔隙空间的分门别类(图7)。

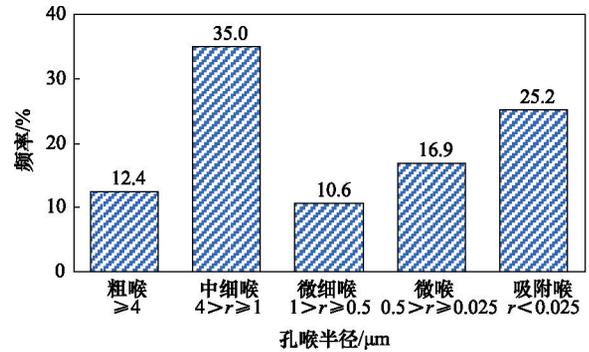


图6 岩心孔喉分布的划分

Fig. 6 Division of core pore throat distribution

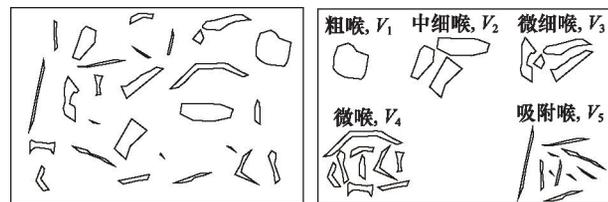


图7 孔隙空间的划分

Fig. 7 Division of pore space

以渤中油田A为例,通过对沙河街组低渗储层58块岩心压汞数据进行孔喉分布的划分,得出的各类孔隙空间分布频率与岩心分析孔隙度相乘计算出各类孔喉分布体积,其与岩心分析渗透率的统计关系表明,粗喉、中细喉对应体积与渗透率相关性大,且对渗透率起到增大的作用,而微细喉、微喉及吸附喉对应体积与渗透率相关性差,且两者之间存在负相关性(图8)。

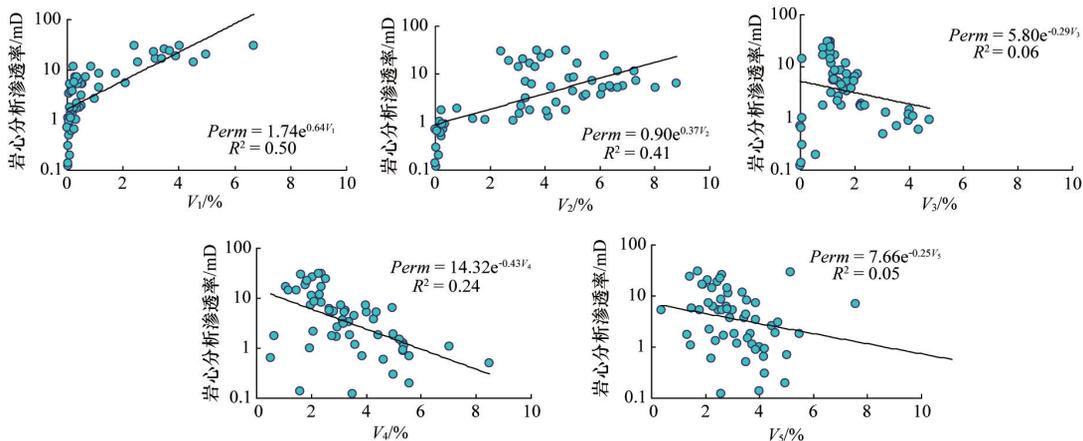


图8 A油田各类孔喉分布体积与渗透率关系

Fig. 8 Relationship between different types of pore throat distribution volume and permeability in oilfield A

2.3 渗透率解释模型的确定及权值分析

新渗透率定量表征模型是在原有基于孔隙度的渗透率解释模型基础上(式(2)),通过引入各类孔喉体积,并对不同类型孔喉体积赋予不同的权值,各类孔喉体积加权后之和定义为各类孔喉体积综合系数(V),从而建立基于孔喉分布约束的渗透率解释新模型(式(3)),新方法兼顾孔隙度和孔喉分布两种渗透率的影响因素。

$$Perm = 10^{aPor+b} \quad (2)$$

式中, Por 、 $Perm$ 分别表示孔隙度与渗透率。

$$Perm = 10^{cV_1+dV_2+eV_3+fV_4+gV_5} \quad (3)$$

式中, V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 为各类孔喉体积, c 、 d 、 e 、 f 、 g 为对应权值。

由于不同类型孔喉体积与渗透率具有不同的相关性,且对渗透率的影响权重也不同,通过对各类孔喉体积赋予不同的权值来表征这种影响差异。权值的获取方式是通过设置大量权值组合,计算各类孔喉体积加权后之和 V 与岩心分析渗透率的对数值 $\ln(Perm)$ 之间的线性相关性,选取相关性最大的权值组合作为定量解释模型中各类孔喉体积的权值。本研究从58块岩心中选取30块岩心压汞数据进行权值的求解,用剩余28块岩心压汞数据检验新渗透率定量表征模型的

可靠性。此次权值求取过程共设计了10万组加权组合,采用最小二乘法确定 V 与 $\ln(Perm)$ 之间的线性相关系数,部分程序代码为:

For $n = 1$ To 30

$$S_{xy} = S_{xy} + (V(n) - AveV) * (\ln Perm(n) - Ave \ln Perm)$$

$$S_{xx} = S_{xx} + (V(n) - AveV)^2$$

$$S_{yy} = S_{yy} + (\ln Perm(n) - Ave \ln Perm)^2$$

Next

$$R = S_{xy} / (S_{xx} * S_{yy})^{0.5}$$

计算得出油田A沙河街组低渗储层粗喉、中细喉、微细喉、微喉及吸附喉对应的各类孔喉体积的权值分别为1、0.4、0.3、0.1、0.1,建立油田A沙河街组低渗储层基于孔喉分布约束的渗透率定量表征关系式:

$$Perm = 0.2948e^{0.7197(V_1+0.4V_2+0.3V_3+0.1V_4+0.1V_5)} \quad (4)$$

将剩余28块岩心的各类孔喉体积代入公式4中,计算出每块岩心的渗透率值,通过与传统基于孔隙度计算方法相比,新方法计算渗透率值与岩心分析渗透率值更加吻合(图9),平均只相差2倍,而传统方法计算渗透率与岩心分析渗透率平均相差4倍,故新方法解释精度提高1倍。

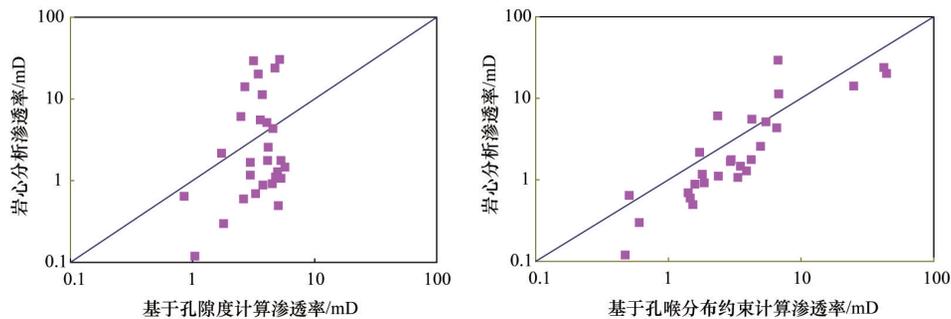


图9 两种方法计算渗透率与岩心分析渗透率的对比

Fig. 9 Comparison between two methods for calculating the permeability and core analysis permeability

3 应用实例

已有研究表明,核磁共振 T_2 分布谱与孔喉半径分布频率都反映岩石的孔隙结构,且两者之间存在密切的相关性^[5-10]。本文进一步对两种曲线做出对比,图10所示为油田A3井两块岩心的核磁共振 T_2 分布谱与压汞实验得到的岩石孔喉分

布频率的对比,对比发现两者曲线分布形态相似。通过建立 T_2 值与孔喉半径的对应关系,实现对核磁共振 T_2 分布谱的划分间接获取各类孔喉分布频率(图11)。由于核磁共振 T_2 分布谱是连续分布的测井曲线,因此也可实现渗透率解释结果的连续分布。

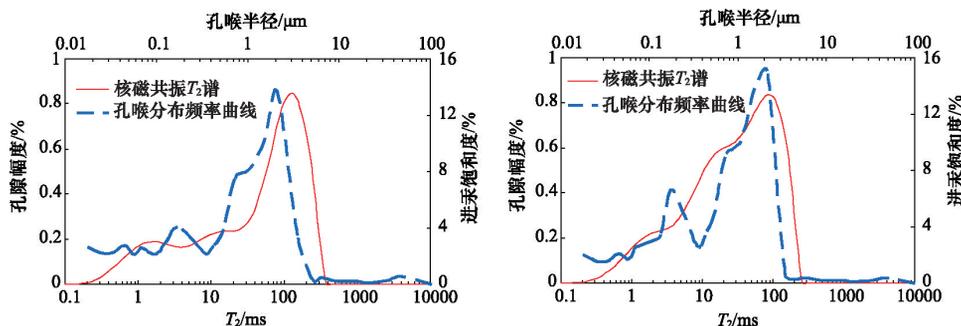


图10 压汞孔喉分布频率曲线与岩心核磁共振 T_2 分布谱对比

Fig. 10 Comparison of pressure mercury pore throat distribution frequency curve and core NMR T_2 distribution spectrum

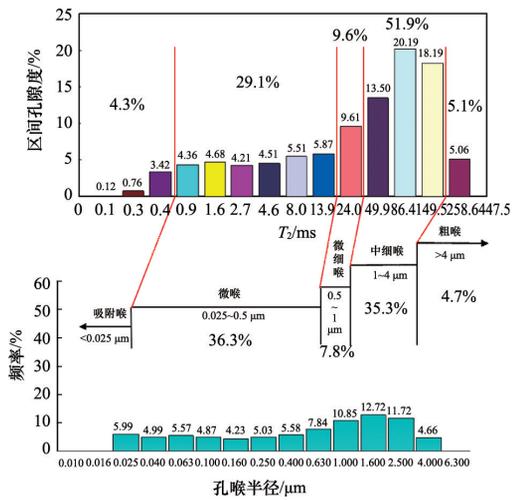


图 11 岩心核磁共振 T₂分布谱与压汞孔喉分布频率的划分对比
Fig. 11 Comparison between the division of core NMR T₂ distribution spectrum and pore throat distribution frequency

渗透率表征新方法采用测井解释孔隙度值,通过与对应核磁共振 T₂分布谱划分得出的各类孔喉分布频率相乘,得出各类孔喉体积,由已知孔喉体积加权后的综合系数与渗透率的定量关系式,对油田 A1 井沙二段低渗储层的渗透率进行定量表征。通过与孔隙度及 T₂截止值两种方法解释的渗透率进行对比分析(图 12),第 3 道为核磁共振测井 T₂分布谱;第 4 道为划分核磁共振 T₂分布谱得出的各类孔喉分布频率;第 5 道为孔隙度曲线及岩心分析孔隙度;第 6 道为孔喉体积加权综合系数曲线;第 7 道为各种方法解释渗透率曲线,青绿色曲线为核磁共振 T₂截止值法解释渗透率曲线,黑色曲线为利用孔隙度解释的渗透率曲线,红色曲线为采用新方法定量表征的渗透率曲线,红色离散点为岩心分析渗透率值,从图 12 可直观得出,新方法解释的渗透率值与岩心分析渗透率值最接近,定量表征渗透率的精度最高,从而也进一步证实了新方法对于定量表征低渗储层的渗透率具有较好的效果,具有较好的应用和推广前景。

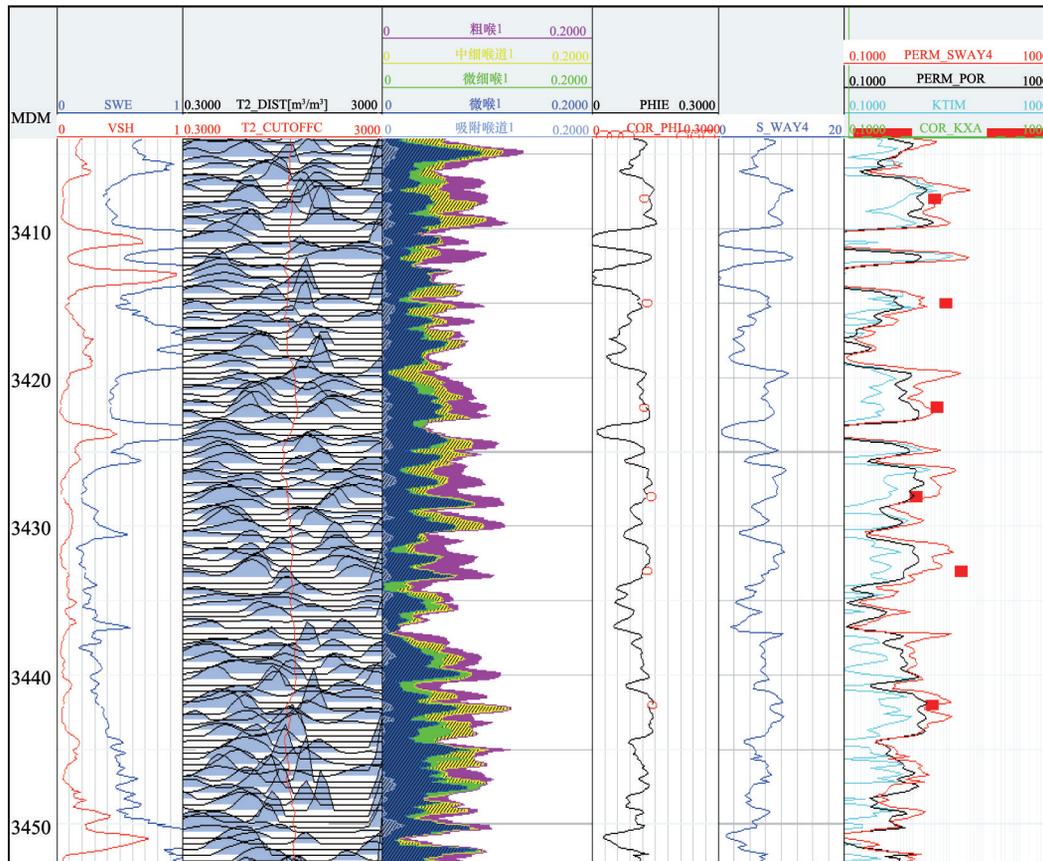


图 12 1 井沙二段渗透率定量表征成果
Fig. 12 Result diagram of permeability quantitative characterization in the Es₂ of 1 well

4 结论

1) 低渗储层孔渗关系差,传统依据孔隙度计算中、高渗储层的渗透率解释方法对低渗储层的渗透率解释精度低,低

渗储层渗透率更受控于孔隙结构,研究低渗储层孔隙结构对提高渗透率解释精度至关重要。

2) 大孔径对渗透率的增大作用要大于等体积的小孔径,

因此,组成孔隙空间的孔径不同是导致低渗储层孔隙度相差不大而渗透率相差数量级的重要因素。

3) 新方法通过将各类喉道控制的孔喉体积赋予不同的权值来表征不同孔径大小对渗透率的影响差异,并建立新的渗透率解释模型。实践表明,相对于传统基于孔隙度的渗透率解释方法,新方法对低渗储层渗透率解释精度高,从而也进一步证实通过对孔喉系统的划分,能够很大程度上提高低渗储层渗透率解释精度。

4) 核磁共振 T_2 分布谱与压汞孔喉分布曲线都能表征岩石孔隙结构,两者具有密切的关系并且在曲线形态上相似,故通过引入核磁共振测井实现新方法对渗透率解释结果的连续分布,增强了该方法的适用性。

参考文献(Reference)

- [1] 蒋凌志, 顾家裕, 郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 13-18.
Jiang Lingzhi, Gu Jiayu, Guo Bincheng. Characteristics and mechanism of low permeability clastic reservoir in chinese petroliferous basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1):13-18.
- [2] 何更生. 油层物理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
He Gengsheng. Petrophysics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [3] Wyllie M R J, Gardner G H F. The generalized Kozeny—Carman equation[J]. AIME, 1958, 32(1): 101-124.
- [4] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
Li Daopin. The development of the low permeability sandstone oil field [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [5] 何雨丹, 毛志强, 肖立志, 等. 核磁共振 T_2 分布评价岩石孔径分布的改进方法[J]. 地球物理学报, 2005, 48(2): 373-378.
He Yudan, Mao Zhiqiang, Xiao Lizhi, et al. An improved method of using NMR T_2 distribution to evaluate pore size distribution[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(2): 373-378.
- [6] 查传钰, 车文华, 顾伟康. 用核磁测井资料评价岩石孔径分布[J]. 江汉石油学院学报, 1998, 20(2): 38-42.
Zha Chuanyu, Che Wenhua, Gu Weikang. Evaluating pore size distribution with nuclear magnetic log data[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1998, 20(2): 38-42.
- [7] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 56-73.
Xiao Lizhi. Magnetic resonance imaging logging and rock's magnetic resonance and its application[M]. Beijing: Science Press, 1998: 56-73.
- [8] Yakov V, Win L S. A practical approach to obtain primary drainage capillary pressure curves from NMR core and log data[J]. Petrophysics, 2001, 42(4):334-343.
- [9] 运华云, 赵文杰, 刘兵开, 等. 利用 T_2 分布进行岩石孔隙结构研究[J]. 测井技术, 2002, 26(1):18-25.
Yun Huayun, Zhao Wenjie, Li Bingkai, et al. Researching rock pore structure with T_2 distribution[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(1): 18-25.
- [10] 刘堂宴, 马在田, 傅容珊. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(4):737-742.
Liu Tangyan, Ma Zaitian, Fu Rongshan. Analysis of rock pore structure with NMR spectra[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(4): 737-742.

(责任编辑 马骁骁)

·学术动态·



2014 中国国际营养学论坛在长春召开

2014年6月20—21日,由中国抗癌协会肿瘤营养与支持治疗专业委员会主办的“2014 中国国际肿瘤营养学论坛第二届暨全国肿瘤营养与支持治疗学术会议”在吉林长春召开,来自美国、日本、意大利、中国大陆及台湾地区的肿瘤营养领域的专家、学者 500 多人与会,围绕肿瘤外科治疗的营养、放疗患者的营养、化疗患者的营养、肿瘤患者的营养筛查、恶液质的机制与治疗、慢性炎症机制与恶性肿瘤等研究进展展开交流。

石汉平教授在报告中提出,代谢调节疗法是一种全新的抗肿瘤疗法,它通过采用不同手段调节肿瘤患者正常细胞代谢、干扰肿瘤细胞代谢,从而达到抗肿瘤的作用;李鸿立教授介绍了慢性炎症引起肿瘤的机制及如何通过抗炎治疗来控制肿瘤;李苏宜教授结合多年肿瘤营养代谢治疗的经验,提出了恶性肿瘤能量营养素代谢治疗的新思维,明确指出营养治疗是肿瘤内科治疗的重要组成部分;刘云鹏教授、葛声教授、丛明华教授分别介绍了肿瘤患者恶液质的慢性炎症机制、蛋白质代谢及治疗;王昆教授阐述了疼痛与营养不良的关系;于康教授介绍了肿瘤患者营养筛查方法及对临床营养治疗的重要作用;林源教授、陈公琰教授、陈克能教授、谢丛华教授分别综述了围手术期患者的营养治疗、化疗患者的营养治疗、肿瘤患者的胃粘膜保护、放疗患者的营养治疗方面的最新进展。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35548/n38620/15797458.html>。