

文章编号: 1004—5589 (2016) 04—1076—08

辽河油田东部凹陷火成岩储层孔隙结构评价

王文华¹, 欧伟明², 刘宗利², 周大鹏²

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;
2. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026

摘要: 对火成岩储层的核磁共振测井资料和实验室压汞资料进行对比, 采用插值法建立地层孔隙流体的横向弛豫时间 T_2 与压汞曲线的压力 P_c 之间的关系, 发现它们之间满足对数关系, 并用 T_2 谱构造毛管压力曲线。分别利用线性方法和对数方法构造毛管压力曲线, 对数方法构造的毛管压力曲线与实验测量的毛管压力曲线更接近。将研究结果应用于辽河油田东部凹陷火成岩储层孔隙结构的评价中, 发现分选系数小、孔喉歪度大、最大进汞饱和度高和平均孔喉半径大的毛管应力曲线对应的孔隙结构较好。

关键词: 核磁共振测井; T_2 谱; 毛管压力曲线; 火成岩; 孔隙结构; 辽河油田东部凹陷

中图分类号: P588.14; P618.130.21 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2016.04.018

Pore structure evaluation for igneous rock reservoirs in eastern depression of Liaohe Oilfield

WANG Wen-hua¹, OU Wei-ming², LIU Zong-li², ZHOU Da-peng²

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Through the comparison of NMR logging data with laboratory pressure mercury data of igneous rock reservoirs, the relationship between transverse relaxation time T_2 and pressure P_c of the formation pore fluid is established by using interpolation method, which is logarithmic relationship. According to this relationship, the authors use T_2 spectrum to construct capillary pressure curves. Linear method and logarithmic method are used to construct capillary pressure curves, and the capillary pressure curve by logarithmic method is closer to the experimental capillary pressure curve. The application of research results in the study of igneous rocks in eastern depression of Liaohe Oilfield has a good effect in evaluating pore structure of igneous rock reservoirs. The study found that a capillary stress curve with small sorting coefficient, large pore throat slanting degrees, high value maximum into mercury saturation and big average pore throat radius has better corresponding pore structure.

Key words: NMR logging; T_2 spectrum; capillary pressure curve; igneous rocks; pore structure; eastern depression of Liaohe Oilfield

0 引言

应用压汞法得到毛管压力曲线, 利用毛管压力

曲线的形态特征及其特征参数, 可以定性和定量地描述储层孔隙结构、评价储层的储集性能。由核磁共振弛豫机制可知, T_2 谱与孔隙结构有直接关

收稿日期: 2016-04-02; 改回日期: 2016-10-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (2012CB822002)

系^[1-2], 可以利用 T_2 谱构建毛管压力曲线^[3]。这样与传统的毛管压力曲线测量相比, 核磁共振测井测量具有效率高、对地层无损害等特点, 并且可以在井中获得连续的地层信息。因此, 利用 T_2 谱构造毛管压力曲线的方法在实际生产应用中具有重要意义。

目前关于利用 T_2 谱研究储层孔隙结构的工作, 主要包括两种方法: 线性转换刻度系数法和非线性转换刻度系数法。Yakov 首次提出线性转换刻度系数法, 国内的运华云、刘堂宴、李海波等人均对这种转换方法进行了研究, 但转换后得到的核磁共振毛管压力曲线与实际的毛管压力曲线相比在大孔隙部分吻合较好, 而在小孔隙部分出现分叉的现象^[3-6]。由于实际地层中孔隙结构十分复杂, 不同大小孔隙的转换系数 C 不同, T_2 谱分布与孔径半径分布之间的关系为非线性。何雨丹提出了分段幂函数刻度法, 将大孔隙和小孔隙部分分别采用不同幂函数构造核磁共振毛管压力曲线, 该方法获得更可靠的毛管压力曲线, 精度得到明显提高^[7]。

火成岩油气藏作为深层的优势油气藏, 其储层的研究十分重要^[8,9]。辽河东部火成岩以玄武岩为主, 中部夹粗面岩, 以薄层状溢流相为主, 裂隙式喷发。火成岩储层孔隙结构极其复杂, 孔隙和裂缝发育, 并且互相连通交织, 次生作用影响强烈, 从微观到宏观, 火成岩储层的孔隙结构都表现出强烈的非均质性^[10-12], 因此火成岩储层的 T_2 谱分布与孔径半径分布之间是非线性关系。

本文利用三次样条插值法找到 T_2 谱分布与毛管压力曲线压力 P_c 分布之间的关系, 提出一种用对数函数将 T_2 谱构造核磁共振毛管压力曲线的方法。与线性转换刻度方法相比, 该方法得到的核磁共振毛管压力曲线与实测毛管压力曲线吻合得更好, 将研究结果应用于辽河油田东部凹陷火成岩储层孔隙结构的评价中, 取得较好的效果。

1 理论基础

压汞毛管压力与毛管半径之间的关系为^[4]

$$P_c = \frac{0.735}{r_c} \quad (1)$$

式中: P_c 为毛管压力, MPa; r_c 为毛管半径, μm 。

由核磁共振弛豫机制可知, 岩石的横向弛豫时间 T_2 与孔隙的比表面积 S/V 直接相关, 可以近似表示为^[1]

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) \quad (2)$$

由(2)式可以看出, 观测的弛豫时间 T_2 和孔隙空间大小及形状有关。相同孔隙空间, 孔隙结构越复杂, 比表面越大, 表面相互作用的影响越强烈, T_2 时间就越短。比表面与孔隙结构有关, 对球状孔隙、柱状管道孔隙, 其比表面与孔径成线性关系, 所以

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \cdot \frac{F_s}{r_c} \quad (3)$$

式中: F_s 为孔隙形状因子, 对于球形孔隙, $F_s = 3$; 对于柱状孔隙, $F_s = 2$ 。

由式(1)和式(3)得

$$P_c = \frac{0.735}{\rho_2 \cdot F_s} \cdot \frac{1}{T_2} = C \times \frac{1}{T_2} \quad (4)$$

式中: $C = \frac{0.735}{\rho_2 \cdot F_s}$, 称为转换系数。

而实际地层中孔隙结构十分复杂, 并不是简单的柱状孔隙、球状孔隙, 孔隙比表面与孔径是非线性关系, 即 F_s 是不确定的值, 考虑到孔隙内流体的弛豫时间与比表面有关, 所以随着孔隙半径大小的变化, 不同大小的横向弛豫时间 T_2 的转换系数 C 也是个变量, 即毛管压力 P_c 与 $\frac{1}{T_2}$ 之间满足一种非线性的函数关系, 函数表示:

$$P_c = f\left(\frac{1}{T_2}\right) \quad (5)$$

式中: f 是一个函数, 根据(7)式, 可将 T_2 谱分布构造毛管压力曲线。

2 插值法构建 T_2 谱分布与毛管压力曲线之间关系的方法和步骤

岩芯毛管压力的转换步骤:

(1) 对毛管压力曲线 $P_c - S_{Hg}$ (S_{Hg} 为对应毛管压力下的进汞饱和度) 进行三次样条插值^[13]。

(2) 对 T_2 谱幅度从右到左逆向累加, 得到时间 T_{2i} ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) 对应的 T_2 谱幅度累加百分数 S_i , 即

$$S_i = 100\% \times \sum_{j=i}^{j=N} \frac{A_j}{\varphi} \quad (6)$$

式中: A_i 为 T_2 谱中时间 T_{2i} 对应的幅度值, φ 为 T_2 谱计算得到的孔隙度。

(3) 进行三次样条插值后的毛管压力曲线搜索与 T_2 谱幅度累加百分数 A_i 值最接近的进汞饱和度和 S_{Hg_i} , 找到与之对应的毛管压力 P_{Ci} , 也就找到 T_2 谱中与横向弛豫时间 T_{2i} 一一对应的毛管压力 P_{Ci} 。

(4) 以横向弛豫时间 T_2 的倒数 $\frac{1}{T_2}$ 为横坐标, 毛管压力 P_c 为纵坐标绘制散点图 $\frac{1}{T_2}-P_c$, 做回归分析 (图 1)。

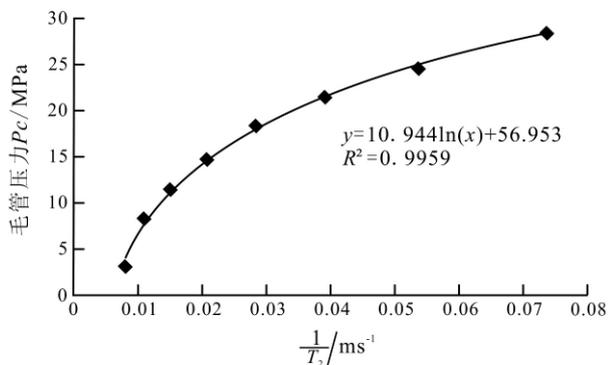


图 1 T_2 倒数 $\frac{1}{T_2}$ 与相应的毛管压力 P_c 的相关图

Fig. 1 Relationship between $\frac{1}{T_2}$ and P_c

按照此步骤对本地区 15 块岩芯的资料做分析, 得到 $\frac{1}{T_2}-P_c$ 散点图, 在总共 15 块岩芯压汞资料中, 有 11 块岩芯的 $\frac{1}{T_2}-P_c$ 满足对数关系, 有两块近似线性关系, 有两块在小孔隙是线性关系, 在大孔隙是对数关系。可看出本地区火成岩的横向弛豫时间的倒数 $\frac{1}{T_2}$ 与毛管压力 P_c 之间满足一种对数关系, 即

$$P_c = a * \ln\left(\frac{1}{T_2}\right) + b \quad (7)$$

式中: a 、 b 为转换系数, 它们可根据横向弛豫时间的倒数 $1/T_2$ 与毛管压力 P_c 之间的相关关系来确定。选取满足对数关系的 8 块岩芯的横向弛豫时间 T_2 和毛管压力 P_c 的数据做散点图 (图 2)。

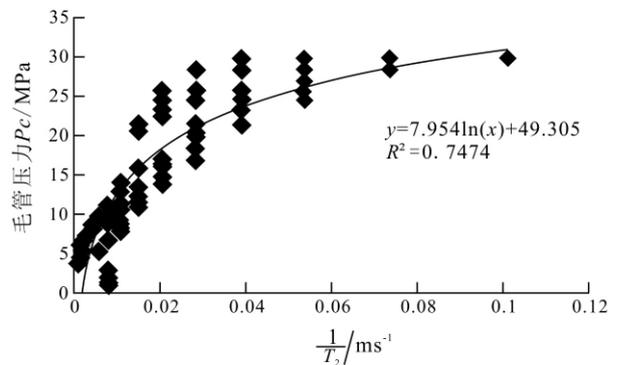


图 2 T_2 的倒数 $1/T_2$ 与相应的毛管压力 P_c 的对数关系图

Fig. 2 Logarithmic relationship between $\frac{1}{T_2}$ and P_c

由图 2 看出 T_2 的倒数 $\frac{1}{T_2}$ 与相应的毛管压力 P_c 的对数关系为:

$$P_c = 7.954 \times \ln\left(\frac{1}{T_2}\right) + 49.305 \quad R^2 = 0.7474 \quad (8)$$

由公式 (8) 可将横向弛豫时间 T_{2i} 转换成毛管压力 P_{Ci} 。由公式 (7) 将 T_2 谱从高端向低端累积, 一般实验室用压汞法获得毛管压力曲线的最大压力在 (30 ± 0.3) MPa, 选取与毛管压力为 30 MPa 相对应的横向弛豫时间 T_2 作为累积截止值, 得到一系列的 T_2 谱幅度累加百分数 S_i , 作 $P_{Ci}-S_i$ 的关系曲线, 这样就完成了利用 T_2 谱对毛管压力曲线的构造。

3 毛管压力曲线的构建效果

选取 $\frac{1}{T_2}-P_c$ 满足对数关系的 11 块岩芯中剩余 3 块岩芯, 图 3 是对这 3 块岩芯 (从上到下依次为

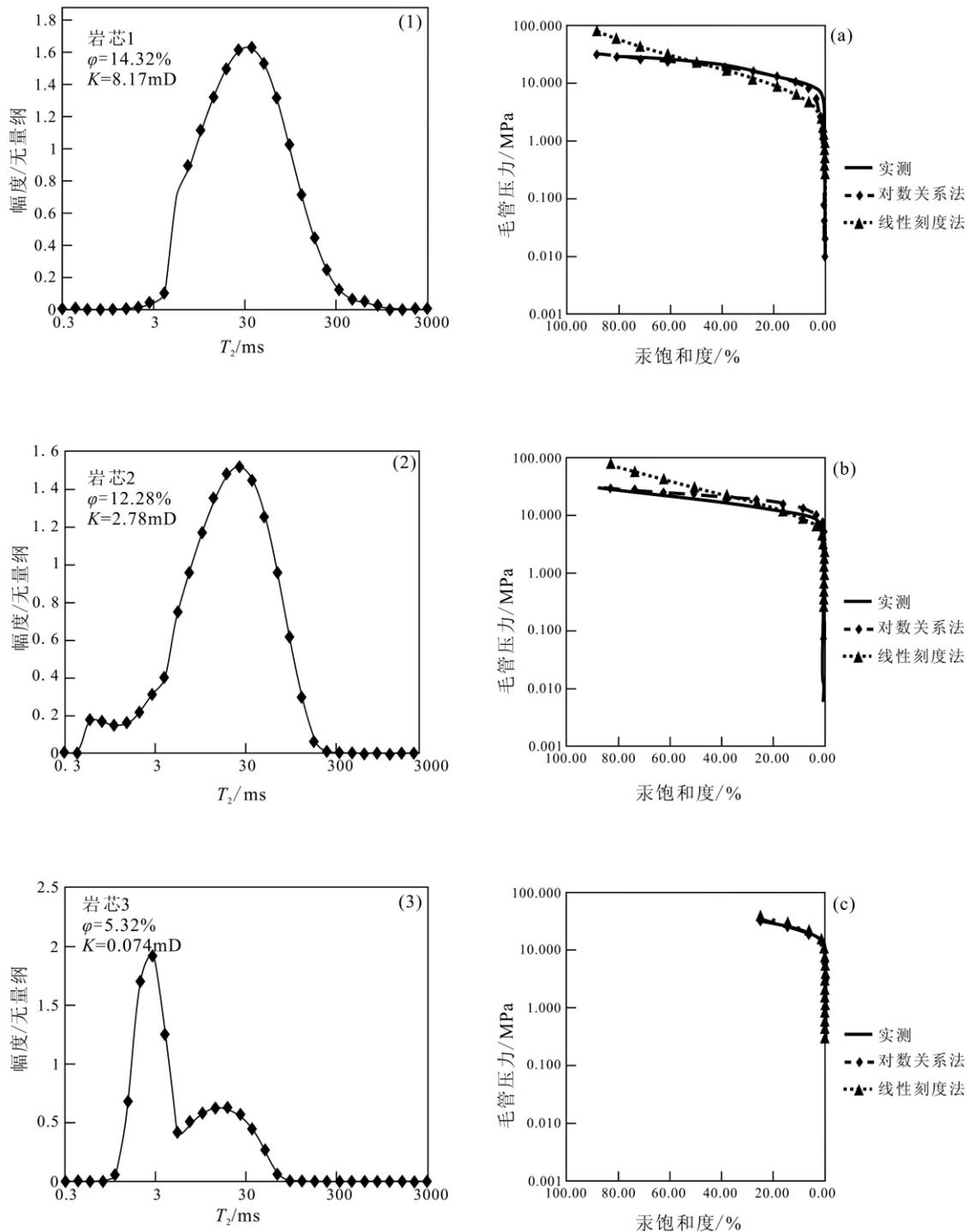


图 3 T_2 谱及其构造的毛管压力曲线与实测毛管压力曲线的对比

Fig. 3 T_2 spectrum and comparison between constructional capillary pressure curves and actual experiment curves

岩芯 1、岩芯 2、岩芯 3) 分别采用对数关系法构造的毛管压力曲线和线性刻度法构造的毛管压力曲线与实验室测量的毛管压力曲线, 线性刻度法的转换

系数由相似对比法获得^[14]。

由图 (3) 可以看出, 岩芯 1 和岩芯 2, 采用线性刻度法构造的毛管压力曲线, 在大孔隙部分与实

实验室测量得到的毛管压力曲线拟合得较好,在小孔隙部分出现了分叉现象;采用对数关系法构造的毛管压力曲线与实验室测量的毛管压力曲线无论在小孔隙部分还是大孔隙部分拟合得都很好。岩芯3,采用线性刻度法和对数关系法与实测毛管压力曲线拟合得都很好。可见对数关系法可以更加精确地构建出火成岩储层的毛管压力曲线,从而有利于做出更加准确的孔隙结构评价。

$\frac{1}{T_2}-P_c$ 满足对数关系的11块岩芯中,不同岩芯的 $\frac{1}{T_2}-P_c$ 对数关系式不同,因此本文的转换方法只适用于同时进行了压汞测量和核磁共振测量的岩

样,得到的转换公式也只适用构建这一井段的毛管压力曲线。对于油田测井,不可能对每口井、每个深度点都取芯进行压汞测量。通过大量的岩芯资料对比分析发现,岩样的孔渗综合指数 $Q = \sqrt{K \cdot \varphi}$ (式中, K 为渗透率, mD; φ 为孔隙度, %) 与各种转换系数有非常好的相关性^[14,15]。因此在没有压汞测量资料的情况下,可以利用孔渗综合指数与转换系数的相关公式(图4),来求得对数法转换公式的待定参数,进而获取每口井、每个深度点的转换关系式,实现利用核磁共振测井资料连续构建毛管压力曲线。

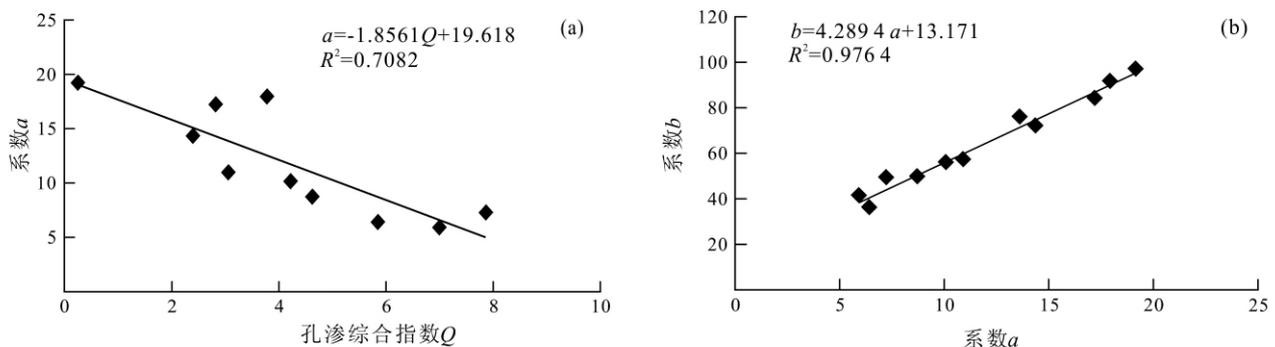


图4 孔渗综合指数 Q 与转换系数的相关图

Fig. 4 Correlation of Q and conversion coefficient P_c

4 孔隙结构评价的应用及效果分析

由于核磁共振资料的连续性,可以连续构建出毛管压力曲线,并可以求取平均孔喉半径、排驱压力、分选系数、孔喉歪度等定量特征参数^[16,17],根据这些特征参数结合核磁共振测井资料得到储层孔隙度、渗透率,可以在井段中定性或者定量对火成岩储层的孔隙结构进行连续评价。

图5所示层段试油结论为油水同层,日产油 14 m^3 :孔隙度为12%~18%,多数>15%,渗透率为10 mD到30 mD,属于一类储层;该层分选系数<0.03,孔喉歪度>0,属于分选好,粗歪度的储层,具有良好的储渗能力;岩芯分析的最大进汞饱和度为72%~92%,平均孔喉半径较大。

图6所示层段试油结论为干层的井段:孔隙度为2%~7%,渗透率较低,多数<0.01 mD,属于

四类储层;该层分选系数<0.03,孔喉歪度为0,属于分选好、偏细歪度的储层,储渗能力较差;岩芯分析的最大进汞饱和度达为20%~50%,平均孔喉半径较小。

由图5和图6的对比分析,可以看出分选系数小、孔喉歪度大、最大进汞饱和度高和平均孔喉半径大的毛管应力曲线对应的孔隙结构较好。因此,利用核磁共振 T_2 谱资料转换成的核磁共振毛管压力曲线,可以对火成岩储层进行孔隙结构评价,为油田的勘探开发及开采提供参考。

5 结论

(1) 火成岩储层的孔隙结构十分复杂,结合实验室资料,由插值法找到 T_2 谱与孔喉半径分布之间满足对数关系,本文提出的对数关系法构建的毛管压力曲线可以更精确地构建毛管压力曲线。

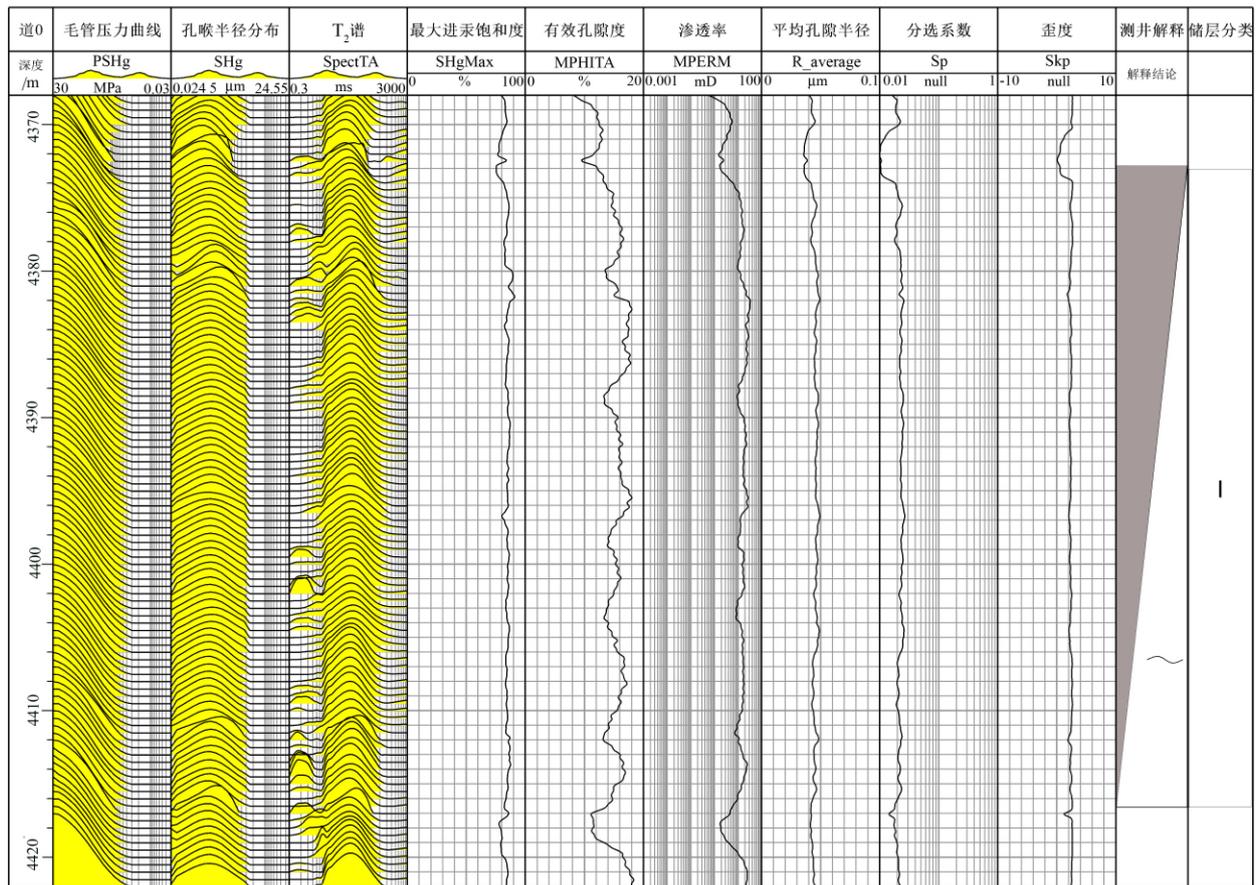


图 5 A 井段核磁共振测井资料评价孔隙结构的应用

Fig. 5 Application of NMR logging data of Well A in evaluation of pore structure

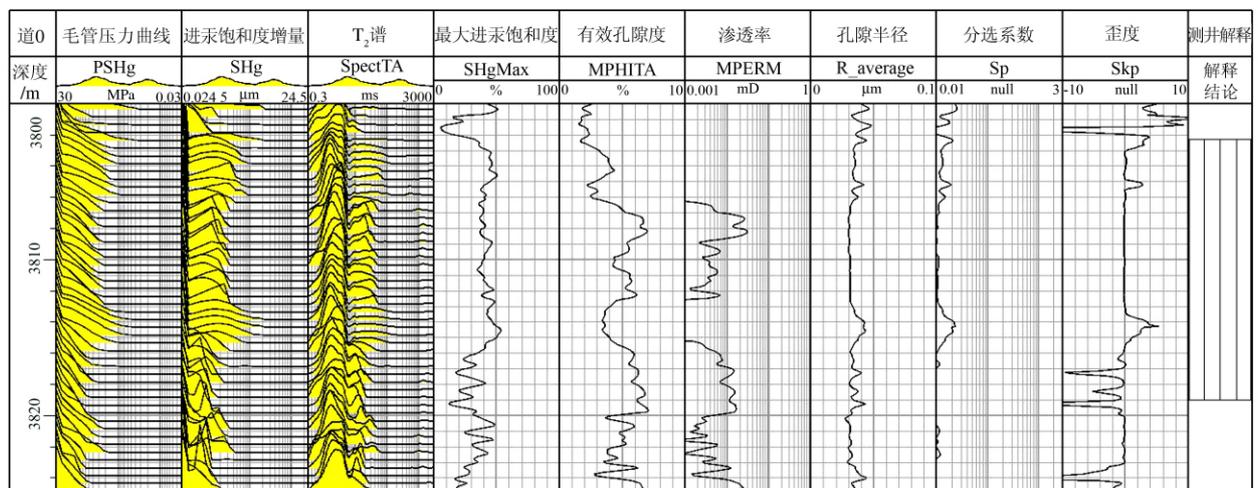


图 6 B 井段核磁共振测井资料评价孔隙结构的应用

Fig. 6 Application of NMR logging data of Well B in evaluation of pore structure

(2) 在缺少压汞测量资料的情况下, 由孔渗综合指数与转换公式之间的关系, 利用核磁共振资料可以连续地构建出毛管压力曲线。

(3) 由毛管可以求取储层孔隙的特征参数, 根据井的实际试油结果, 可以看出分选系数小、孔喉歪度大、最大进汞饱和度高和平均孔喉半径大的毛管应力曲线对应的孔隙结构较好, 根据核磁共振测井资料能够准确地对火成岩储层进行孔隙结构评价。

参考文献:

- [1] 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 Li-zhi. Nuclear magnetic resonance imaging logging and nuclear magnetic resonance and its application [M]. Beijing: Science Press, 1998: 56-73.
- [2] 李静叶, 王祝文, 刘菁华, 等. 核磁测井资料在大庆油田储层评价中的应用 [J]. 世界地质, 2012, 31 (1): 187-192.
LI Jing-ye, WANG Zhu-wen, LIU Jing-hua, et al. Application of NMR logging data on reservoir evaluation in Daqing oilfield [J]. Global Geology, 2012, 31 (1): 187-192.
- [3] 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.
- [4] 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): 18-21.
YUN Hua-yun, ZHAO Wen-jie, LIU Bing-kai, et al. Researching rock pore structure with T_2 distribution [J]. Well Logging Technology, 2002, 26 (1): 18-21.
- [5] 刘堂宴, 王绍民, 傅容珊, 等. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析 [J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38 (3): 328-333.
LIU Tang-yan, WANG Shao-min, FU Rong-shan, et al. Nuclear magnetic resonance spectrum of rock pore structure analysis [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38 (3): 328-333.
- [6] 李海波, 朱巨义, 郭和坤. 核磁共振 T_2 谱换算孔隙半径分布方法研究 [J]. 波谱学杂志, 2008, 25 (2): 273-280.
LI Hai-bo, ZHU Ju-yi, GUO He-kun. Methods for calculating pore radius distribution in rock from NMR T_2 spectra [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2008, 25 (2): 273-280.
- [7] 何雨丹, 毛志强, 肖立志, 等. 利用核磁共振 T_2 分布构造毛管压力曲线的新方法 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35 (2): 177-181.
HE Yu-dan, MAO Zhi-qiang, XIAO Li-zhi, et al. A new method to obtain capillary pressure curve using NMR T_2 distribution [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35 (2): 177-181.
- [8] 李军, 张军华, 韩双, 等. 火成岩储层勘探现状、基本特征及预测技术综述 [J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50 (2): 382-392.
LI Jun, ZHANG Jun-hua, HAN Shuang, et al. Igneous reservoir exploration situation, basic characteristics and prediction technology review [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50 (2): 382-392.
- [9] 杨学峰, 冯肖宇, 尚云志. 徐家围子地区火山岩储层测井分类方法研究 [J]. 测井技术, 2014, 38 (5): 547-552.
YANG Xue-feng, FENG Xiao-yu, SHANG Yun-zhi. Research of volcanic reservoir classification method in Xujia-wei area [J]. Well Logging Technology, 2014, 38 (5): 547-552.
- [10] 杨晓辉, 王祝文, 王文华, 等. BP神经网络算法在火成岩泥质含量计算中的应用 [J]. 世界地质, 2015, 34 (4): 1120-1124.
YANG Xiao-hui, WANG Zhu-wen, WANG Wen-hua, et al. Application of BP neural network algorithm in shale content calculation of igneous rocks [J]. Global Geology, 2015, 34 (4): 1120-1124.
- [11] 金成志, 杨双玲, 舒萍, 等. 升平开发区火山岩储层孔隙结构特征与产能关系综合研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26 (2): 38-41.
JIN Cheng-zhi, YANG Shuang-ling, SHU Ping, et al. Comprehensive research on relationship between productivity and pore structure characteristics of volcanic reservoir in Shengping developing area [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26 (2): 38-41.
- [12] 罗蛰潭, 王允诚. 油气储集层的孔隙结构 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 57-59.
LUO Zhi-tan, WANG Yun-cheng. The pore structure of reservoir [M]. Beijing: Science Press, 1986: 57-59.

- [13] 胡罡, 陆正元, 罗平. 三次样条插值在排驱压力计算中的应用 [J]. 新疆石油地质, 2004, 25 (5): 544-545.
HU Gang, LU Zheng-yuan, LUO Ping. Application of cubic spline interpolation function to calculation of drainage capillary pressure [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25 (5): 544-545.
- [14] 刘卫, 肖忠祥, 杨思玉, 等. 利用核磁共振(NMR)测井资料评价储层孔隙结构方法的对比研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44 (6): 773-778.
LIU Wei, XIAO Zhong-xiang, YANG Si-yu, et al. Comparative studies on methods of evaluation of reservoir pore structure by using NMR (nuclear magnetic resonance) well logging data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44 (6): 773-778.
- [15] 邵维志, 丁娱娇, 刘亚, 等. 核磁共振测井在储层孔隙结构评价中的应用 [J]. 测井技术, 2009, 33 (1): 52-56.
SHAO Wei-zhi, DING Yu-jiao, LIU Ya, et al. The application of NMR log data in evaluation of reservoir pore structure [J]. Well Logging Technology, 2009, 33 (1): 52-56.
- [16] 洪秀娥, 戴胜群, 郭建宇, 等. 应用毛细管压力曲线研究储层孔隙结构: 以卫城油田 E_{s_4} 储层为例 [J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24 (1): 53-54.
HONG Xiu-e, DAI Sheng-qun, GUO Jian-yun, et al. Study on reservoir pore structure by using capillary pressure curve-taking E_{s_4} reservoir in Weicheng oilfield as an example [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2002, 24 (1): 53-54.
- [17] 原海涵. 毛管理论在测井解释中的应用: 毛管电动力学与多孔性岩石 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 9-11.
YUAN Hai-han. Original burke capillary theory application in well logging interpretation, capillary electro-dynamics and more porosity of rock [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 9-11.