



# 基于核磁共振测井 $T_2$ 谱评价储层孔隙结构 仿真实验设计

谢然红, 王翔宇, 金国文, 郭江峰

(中国石油大学(北京)地球物理学院, 北京 102249)

**摘要:** 储层孔隙结构评价对油气资源勘探开发和二氧化碳地质封存等具有重要意义。将核磁共振测井横向弛豫时间 ( $T_2$ ) 谱转换为毛管压力曲线是进行储层孔隙结构评价的有效手段。针对转换模型理论性强、原理抽象复杂等特点, 利用 MATLAB GUI 设计了基于核磁共振测井  $T_2$  谱评价储层孔隙结构的仿真实验。该交互界面包含毛管压力曲线数据预处理、核磁共振  $T_2$  谱转换毛管压力曲线及孔隙结构特征参数提取等模块。通过在仿真实验中利用不同转换方法将核磁共振  $T_2$  谱转换为毛管压力曲线, 并将处理结果与实验测量数据在图形界面进行对比, 最终从转换所得毛管压力曲线中提取孔隙结构特征参数, 进行储层孔隙结构评价。该仿真实验操作简单, 能将不同方法的处理过程与结果直观展示给学生, 增强学生对不同转换模型预测毛管压力曲线的理解与认识, 提高了地球物理测井教学效果。

**关键词:** 孔隙结构评价; 毛管压力曲线; 核磁共振测井  $T_2$  谱; MATLAB 仿真实验

中图分类号: G64; P631.8

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230529

## Simulation Experiment Design for Reservoir Pore Structure Evaluation Based on Nuclear Magnetic Resonance Logging $T_2$ Spectra

XIE Ranhong, WANG Xiangyu, JIN Guowen, GUO Jiangfeng

(College of Geophysics, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

**Abstract:** Reservoir pore structure evaluation is of great significance for the oil and gas resources exploration and development as well as carbon dioxide geological storage. It is an effective means to predict capillary pressure curves based on the transverse relaxation time ( $T_2$ ) spectra from nuclear magnetic resonance (NMR) logging for the reservoir pore structure evaluation. Aiming at the strong theoretical nature of the conversion model and the complexity of the principle, a simulation experiment for NMR logging  $T_2$  spectra-based reservoir pore structure evaluation is designed with MATLAB GUI. The interactive interface contains three modules, i.e., capillary pressure curve preprocessing, NMR  $T_2$  spectrum-based capillary pressure curve prediction and pore structure characteristic parameter extraction. In the simulation experiment, the different prediction methods are used to convert NMR  $T_2$  spectra to capillary pressure curves, and the results are compared with the measured data on the graphical interface. Pore structure characteristic parameters are finally extracted from the predicted capillary pressure curves and used to evaluate the reservoir pore structure. The simulation experiment system is easy to operate, and it can visualize the processing results for the different methods to students, which enhances their understanding and knowledge of the different models to predict capillary pressure curve and improves the teaching effect of geophysical well logging.

**Key words:** pore structure evaluation; capillary pressure curve; NMR logging  $T_2$  spectrum; MATLAB simulation experiment

储层孔隙结构是指岩石内部存在的孔隙及喉道, 包括其几何形状、尺寸、分布和相互连通关系, 这些特征反映储层孔隙结构的变化情况<sup>[1]</sup>。毛

管压力曲线是研究岩石孔隙结构常用的手段, 可以通过实验测量来定量评价孔隙和喉道特征, 目前主要有压汞法、隔板法等实验室测量方法<sup>[2]</sup>。传

收稿日期: 2023-11-12; 修回日期: 2024-03-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42174131); 北京市高等教育学会课题(MS2022052); 中国石油大学(北京)教改项目(yjs2023017)。

作者简介: 谢然红(1966-), 女, 博士, 教授, 主要从事岩石物理、核磁共振测井方法及应用、测井储层评价以及油气输导层评价等方面的研究。E-mail: xieranhong@cup.edu.cn

统实验方法的高成本和低时效性以及受限于钻井取心的限制,导致无法对储层孔隙结构进行连续评价。核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)测井通过对地层孔隙流体中氢核信号的观测,可以获得孔隙度、渗透率和孔径大小分布等储层信息<sup>[3-8]</sup>。前人对核磁共振测井  $T_2$  谱转换毛管压力曲线的方法进行了广泛研究。文献[9]采用线性转化法建立核磁共振测井  $T_2$  谱和毛管压力曲线之间的转换关系。文献[10]利用幂函数法预测毛管压力曲线。文献[11]采用分段幂函数法预测致密砂岩样品毛管压力曲线。文献[12-13]针对致密储层,提出对大孔部分利用幂函数,小孔部分添加增大倍数项的方法,预测毛管压力曲线。但是,上述转换模型的建立及应用等涉及较为复杂的公式和模型,单纯理论推导不易于学生理解,实际操作复杂。因此,如何使学生更好地理解并便捷地利用核磁共振测井  $T_2$  谱预测毛管压力曲线,进而求取储层孔隙结构特征参数进行孔隙结构评价是当前本科教学需要解决的问题。

MATLAB 软件具有丰富的库函数和多样的绘图工具,使其成为数据处理和可视化的主流软件之一<sup>[14]</sup>。MATLAB 图形用户界面(graphic user interface, GUI)模块具有形象易懂、灵活方便的特点,利用该功能可以将复杂抽象的公式和推导过程封装化,利用控件函数将处理结果直观展示在图形界面中。本文利用 MATLAB GUI 模块设计了核磁共振测井  $T_2$  谱评价储层孔隙结构仿真实验,通过处理测井资料,进一步加深学生对核磁共振测井评价储层孔隙结构的认识。

## 1 基于核磁共振测井 $T_2$ 谱的储层孔隙结构评价方法

### 1.1 理论基础

岩石孔隙流体存在3种不同的弛豫机制<sup>[15]</sup>:自由弛豫、表面弛豫和扩散弛豫,关系为:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2D}} \quad (1)$$

式中:  $T_{2B}$  为横向自由弛豫时间,单位 ms;  $T_{2S}$  为横向表面弛豫时间,单位 ms;  $T_{2D}$  为横向扩散弛豫时间,单位 ms。

对于亲水岩石,自由弛豫在岩石完全饱和和水时可以忽略,扩散弛豫在磁场梯度很小且回波间隔较短时可以忽略<sup>[16]</sup>。此时  $T_2$  可以表

示为:

$$\frac{1}{T_2} \approx \frac{1}{T_{2S}} = \rho \left( \frac{S}{V} \right) = \rho \frac{F_S}{R_p} \quad (2)$$

式中:  $R_p$  为岩石孔隙半径,单位  $\mu\text{m}$ ;  $F_S$  为岩石孔隙形状因子,当其为圆柱形时,  $F_S$  取 2,球形时,  $F_S$  取 3。

毛管压力( $P_c$ )曲线描述了非润湿相流体注入多孔介质(岩石)时,毛细管压力与非润湿相流体饱和度的关系。流体进入孔隙时的毛管压力由流体的表面张力和喉道半径( $R_{pt}$ )所决定。油藏物理学中,通常假设喉道为圆柱状,则  $P_c$  与  $R_{pt}$  的关系为:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{R_{pt}} \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  为表面张力,单位 N/m;  $\theta$  为流体内表面与孔隙壁的接触角,单位( $^\circ$ )。

在实际地层中,基于假设条件:  $R_{pt} = f(R_p)$ ,通过联合方程(2)和方程(3),可以得出关系为:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{f(\rho F_S T_2)} = g(T_2) \quad (4)$$

式中:  $f$ 、 $g$  表示函数关系。

通过上述公式推导,可以确定核磁共振  $T_2$  谱与  $P_c$  之间存在函数映射关系。因此,基于核磁共振  $T_2$  谱能够预测毛管压力曲线。

### 1.2 构建转换模型

本文分别利用线性转化法、幂函数法及扩展幂函数法建立转换模型,并针对核磁共振  $T_2$  谱预测毛管压力曲线搭建 MATLAB GUI 教学界面进行对比展示<sup>[17-18]</sup>。

#### 1.2.1 线性转化法

线性转化法利用平均饱和度误差最小化求取刻度系数。该方法首先将  $T_2$  谱的幅度反向累加并归一化,得到与压汞毛管压力曲线物理意义相似的曲线。平均饱和度误差函数  $h(c)$  表示为<sup>[19]</sup>:

$$h(c) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N$$

$$\sqrt{\frac{1}{P_{c\max} - P_{c\min}} \int_{P_{c\min}}^{P_{c\max}} (S_{nw}(P_c)_i - S_w(P_c = cT_2^{-1})_i)^2 dP_c} \quad (5)$$

式中:  $N$  代表样品数量,  $S_{nw}$  代表压汞实验中不同  $P_c$  下的非润湿相饱和度,  $S_w$  代表含水饱和度,  $P_{c\max}$  代表有效进汞压力上限,  $P_{c\min}$  代表有效进汞

压力下限。

根据计算不同转换系数时的平均饱和度误差，获得转换系数  $C$  与平均饱和度误差之间的函数关系。通过寻找该函数极小值处的最佳转换系数  $C$ ，使得转换的毛管压力曲线与压汞实验测量毛管压力曲线的相似程度达到最高。

### 1.2.2 幂函数法

通过对核磁共振  $T_2$  谱和岩心样品压汞实验数据分析，得出  $T_2$  与压汞得到的平均孔喉半径( $R_{pt}$ )不是线性关系，而是幂函数关系。利用幂函数来构建毛管压力曲线<sup>[11]</sup>，公式为：

$$P_c = \frac{q}{T_2^p} \tag{6}$$

式中： $q$ 、 $p$  代表待定参数，可以根据岩心实验进行标定。

### 1.2.3 扩展幂函数法

线性转化法和幂函数法适用于孔隙结构相对简单的常规砂岩储层孔隙结构评价，扩展幂函数法则适用于评价孔隙结构更加复杂的致密砂岩储层。针对致密储层，扩展幂函数法对大孔部分利用幂函数拟合，对小孔部分添加增大倍数项  $S$ ，构建转化公式为<sup>[12-13]</sup>：

$$P_c = g(T_2) = \frac{E}{T_2^D} (1 + S) \tag{7}$$

式中： $g$  表示函数关系， $S = \frac{A}{(BT_2 + 1)^C}$ 。

取  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数时， $S$  与  $T_2$  的关系如图 1 所示。当  $T_2$  较大时， $S \approx 0$ ；当  $T_2$  较小时， $S$  不可忽略，对小孔部分计算  $P_c$  存在的误差进行修正。

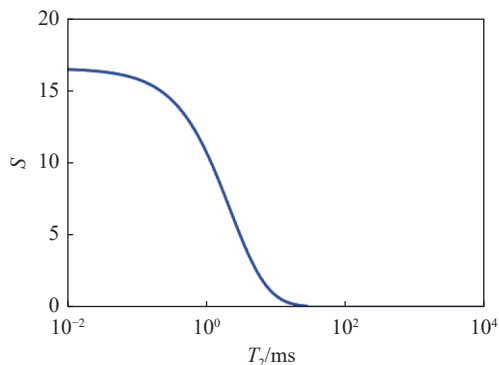


图 1 增大倍数  $S$  与  $T_2$  的关系图

实际应用时，首先通过线性插值使得毛管压力曲线与  $T_2$  谱的数据点个数相同，然后通过求解下式来确定转化模型中的参数：

$$\min \sum_{i=1}^m |\lg(P_{cm,i}) - \lg(g(T_{2m,i}))| \tag{8}$$

式中： $m$  为毛管压力曲线测量点数； $P_{cm,i}$  表示  $P_c$  通过插值后的第  $i$  个数据点； $T_{2m,i}$  表示  $T_2$  通过插值后的第  $i$  个数据点。

采用不同方法预测致密砂岩样品毛管压力曲线的结果如图 2 所示。由图可见，线性转化法(黑色点划线)误差较大；幂函数法(蓝色虚线)大孔部分效果较好，小孔部分误差较大；扩展幂函数法的预测结果(红色实线)优于线性转化法和幂函数法的预测结果，与岩心测量数据(黑色圆圈)吻合较好，能很好地反映岩石的孔隙结构特征。

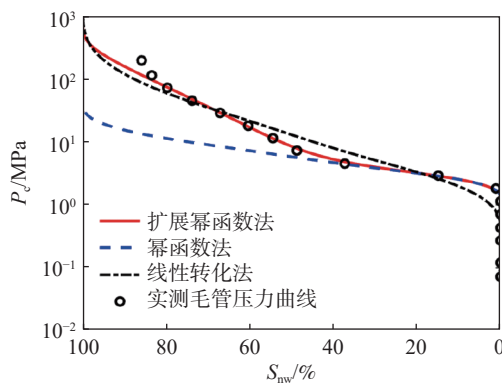


图 2 不同方法预测的  $P_c$  曲线与岩心实验测量  $P_c$  曲线图

## 2 基于 MATLAB GUI 的核磁共振测井 $T_2$ 谱评价储层孔隙结构仿真实验设计

### 2.1 主菜单界面

本文所设计仿真实验的主菜单界面如图 3 所示，包括毛管压力曲线数据预处理、核磁共振  $T_2$  谱转换毛管压力曲线及孔隙结构特征参数提取 3 个子模块。学生按照顺序点击“毛管压力曲线数据预处理”“核磁共振  $T_2$  谱转换毛管压力曲线”“孔隙结构特征参数提取”按钮，进入对应模块对岩心样品的实验室测量毛管压力曲线数据进行预处理，选择不同方法将核磁共振  $T_2$  谱转换毛管压力曲线，最终基于转换的毛管压力曲线提取孔隙结构特征参数，进行孔隙结构评价。

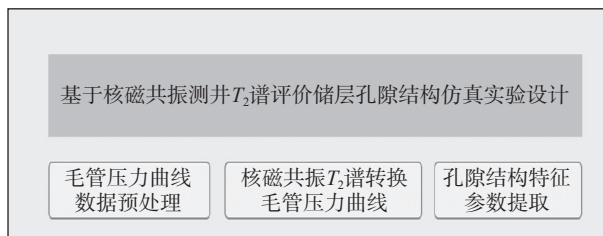


图 3 主菜单界面

### 2.2 毛管压力曲线数据预处理仿真

本文所设计仿真实验的第1个子模块为“毛管压力曲线数据预处理”，其MATLAB GUI界面如图4所示，学生通过选择不同样品号，点击“加载数据”按钮，显示所选择样品号的实验测量毛管压力曲线，通过点击“数据处理”按钮，即可显示通过麻皮效应<sup>[20]</sup>校正后的毛管压力曲线。图4(a)为3号样品实验测量原始毛管压力曲线，排驱压力为1.36 MPa，最大汞饱和度为92.87%。图4(b)展示了麻皮效应校正后的结果，校正后最大汞饱和度为88.24%。此外，学生可以通过“保存数据”按钮将数据进行保存，用于后续其他子模块的调用，通过“清除数据”按钮清除图中图形数据，并重新选择不同岩心样品号，得到不同毛管压力曲线数据。

### 2.3 核磁共振 $T_2$ 谱转换毛管压力曲线仿真

本文所设计仿真实验的第2个子模块为“核磁共振  $T_2$  谱转换毛管压力曲线”，其MATLAB GUI界面如图5所示。学生首先通过“加载数据”按钮加载麻皮效应校正过的毛管压力曲线及对应的核磁共振测井  $T_2$  谱数据，然后选择“转换模型”单选按钮组，点击3种不同转换模型，其中包含线性转化法、幂函数法和扩展幂函数法，

最后点击“数据处理”按钮得出对应转换模型预测的毛管压力曲线与实验测量毛管压力曲线对比结果。界面中位于“转换模型”单选按钮组模块下的“转换表达式”文本框显示当前使用转换模型的函数表达式，“最佳转换系数”文本框的内容表示当前使用转换模型的各个系数值，“决定系数(R-squared)”文本框显示预测毛管压力值与实验测量毛管压力值的相关度。

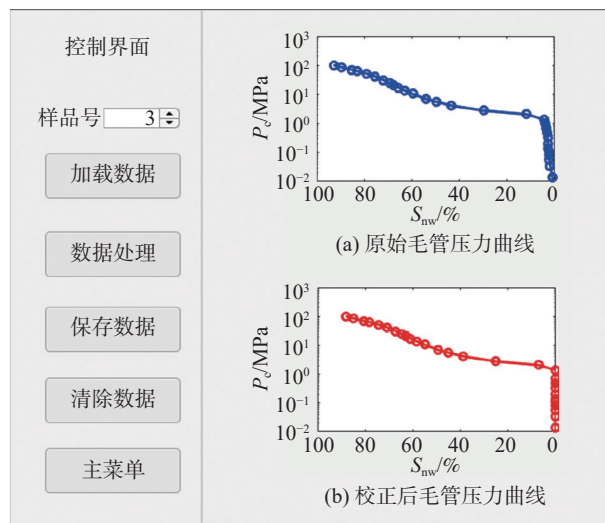


图4 毛管压力曲线数据预处理仿真界面

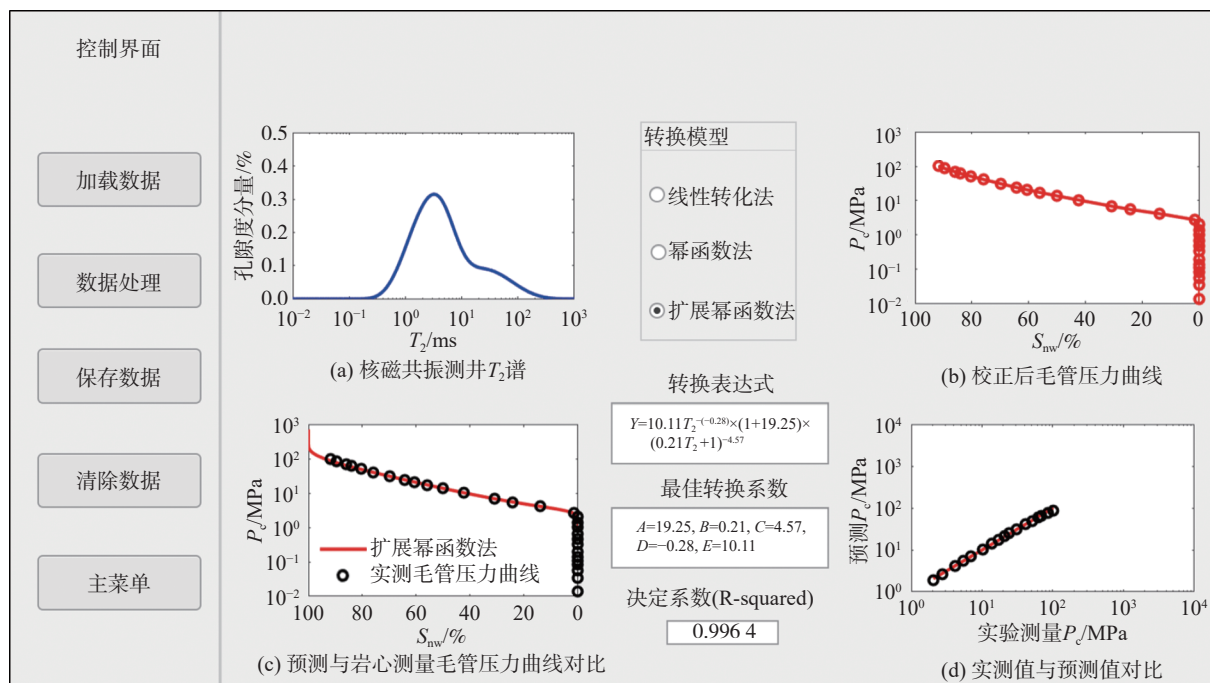


图5 核磁共振  $T_2$  谱转换毛管压力曲线仿真界面

图5(a)和5(b)分别对应所选岩心样品的核磁共振测量  $T_2$  谱及麻皮效应校正后的毛管压力曲

线。图5(c)展示了扩展幂函数法预测毛管压力曲线与岩心测量毛管压力曲线的对比。图6展示了

部分岩心样品预测与实验测量毛管压力曲线对比，可以看出扩展幂函数法无论是在大孔隙部分或是小孔隙部分，预测结果与实验测量结果吻合

均较好。图 5(d)为预测毛管压力与实验测量毛管压力对比图，可以看出数据点分布在 45°线上，决定系数为 0.9964。

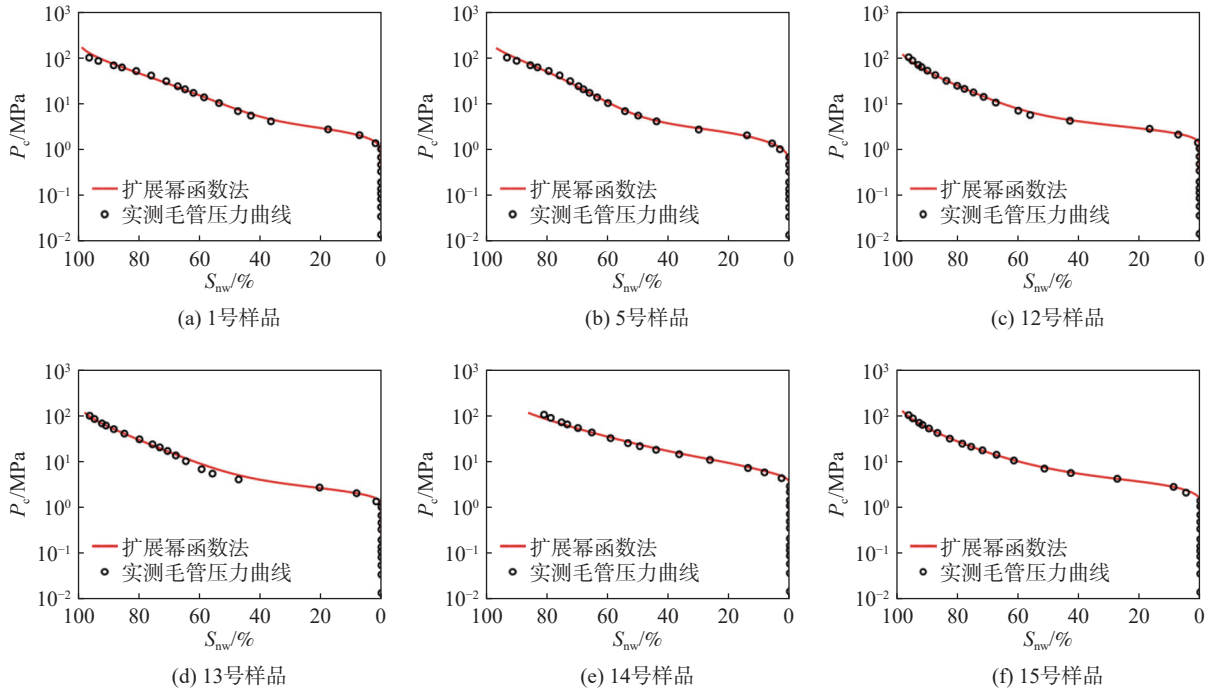


图 6 部分岩心样品利用扩展幂函数法转化毛管压力曲线与压汞实验测量毛管压力曲线对比图

### 2.4 孔隙结构特征参数提取仿真

本文所设计仿真实验的第 3 个子模块为“孔隙结构特征参数提取”，其 MATLAB GUI 界面如图 7 所示。学生通过点击“加载数据”按钮在图 7(a)中显示由第 2 个子模块得到的预测毛管压力曲线。通过点击“数据处理”按钮，在图 7(b)中显示出预测与实测孔喉半径分布对比图，并在图 7(a)的预测毛管曲线中标识出排驱压力点(红色实心圆)、汞饱和度为 16% 的毛管压力点(蓝色实心圆)、汞饱和度为 50% 的毛管压力点(绿色实心圆)、汞饱和度为 84% 的毛管压力点(黄色实心圆)，以及在文本框内显示依据预测毛管压力曲线提取的孔隙结构特征参数，包括排驱压力( $P_D$ )、饱和度中值压力( $P_{C50}$ )、最大孔喉半径( $r_{MAX}$ )及平均孔喉半径( $D_M$ )。

其中，孔喉半径由式(3)计算得到。而最大孔喉半径为排驱压力对应的孔喉半径。平均孔喉半径  $D_M$  即孔喉大小平均值，计算公式为<sup>[21]</sup>：

$$D_M = \frac{D_{16} + D_{50} + D_{84}}{3} \quad (9)$$

式中： $D_{16}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{84}$  分别表示进汞饱和度为 16%、50%、84% 时所对应的喉道半径，单位  $\mu\text{m}$ 。

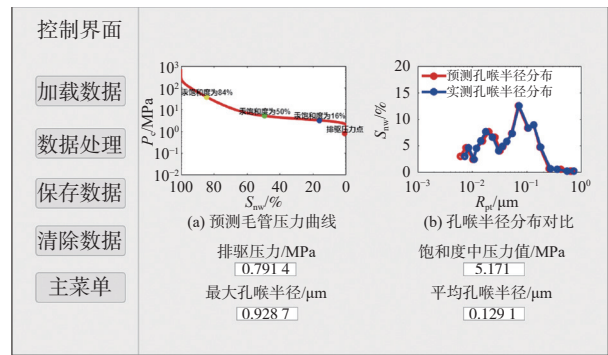


图 7 孔隙结构特征参数提取仿真界面

### 2.5 储层孔隙结构评价

分析提取的孔隙结构特征参数与渗透率( $k$ )的相关性，如图 8 所示，可以看出  $P_D$ 、 $P_{C50}$  与渗透率呈负相关，与  $r_{MAX}$ 、 $D_M$  呈正相关。利用  $P_D$ - $k$  和  $P_{C50}$ - $k$  交会图难以对岩心样品进行有效分类， $r_{MAX}$ - $k$  交会图与  $D_M$ - $k$  交会图相比，对岩心样品分类效果更优。因此，选择  $r_{MAX}$ - $k$  交会图将岩心样品分为 3 类，分类标准如表 1 所示。当  $r_{MAX} \geq 0.56 \mu\text{m}$  时，孔隙结构较好，为第 I 类；当

$0.28 \mu\text{m} < r_{\text{MAX}} < 0.56 \mu\text{m}$  时, 孔隙结构次之, 为第 II 类; 当  $r_{\text{MAX}} \leq 0.28 \mu\text{m}$  时, 孔隙结构最差, 为第 III 类。

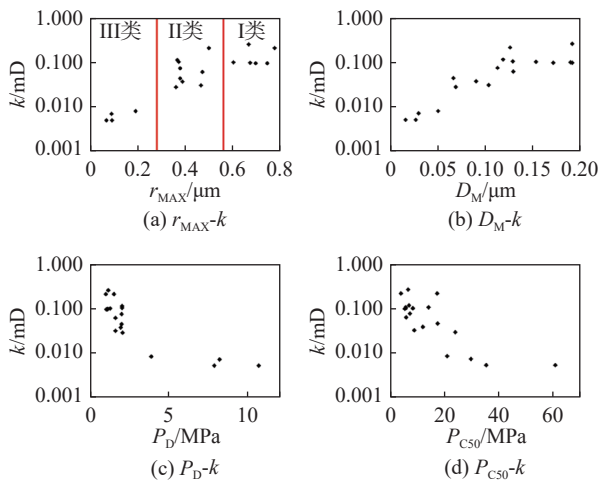


图 8 孔隙结构特征参数与渗透率交会图

表 1 基于  $r_{\text{MAX}}$  的致密砂岩储层分类准则

类别	分类准则
I	$r_{\text{MAX}} \geq 0.56 \mu\text{m}$
II	$0.28 \mu\text{m} < r_{\text{MAX}} < 0.56 \mu\text{m}$
III	$r_{\text{MAX}} \leq 0.28 \mu\text{m}$

### 3 实际测井资料处理

依据本文设计的基于 MATLAB GUI 的核磁共振测井  $T_2$  谱评价储层孔隙结构仿真实验, 对实际

测井资料进行处理和解释, 以进一步提高本次仿真实验教学效果。

本文处理的测井资料来自长庆油田 A 井致密砂岩层段, 该地区储层孔隙结构复杂, 常规方法难以有效评价储层孔隙结构。A 井致密砂岩储层孔隙结构评价成果图如图 9 所示, 其中, 第 1 道为深度道 (DEPTH); 第 2 道为岩性指示道, 包含井径曲线 (CAL)、自然伽马曲线 (GR) 和自然电位曲线 (SP); 第 3 道为三孔隙度曲线道, 包括补偿中子孔隙度曲线 (CNL)、密度曲线 (DEN) 和声波曲线 (AC); 第 4 道为 NMR  $T_2$  谱 ( $T_2$ \_DIST); 第 5 道为核磁共振孔隙度 (POR, 黑色实线) 和岩心分析孔隙度 (PHIT, 红色圆点); 第 6 道为采用核磁共振  $T_2$  谱计算的渗透率 ( $k$ , 黑色实线) 和岩心分析渗透率 ( $k$ , 红色圆点); 第 7 道为利用扩展幂函数模型根据  $T_2$  谱预测的毛管压力曲线 (MICP\_PREDIC), 不同的颜色表示随非润湿饱和度变化所对应的不同的毛管压力值; 第 8 道为预测的排驱压力曲线 ( $P_D$ \_PRED) 和岩心分析的排驱压力 ( $P_D$ ); 第 9 道为预测的饱和度中值压力曲线 ( $P_{C50}$ \_PRED) 和岩心分析的饱和度中值压力 ( $P_{C50}$ ); 第 10 道为最大孔喉半径曲线 ( $r_{\text{MAX}}$ ); 第 11 道为储层分类结果 (CLASS), 其中红色代表第 I 类储层, 蓝色代表第 II 类储层, 绿色代表第 III 类储层。

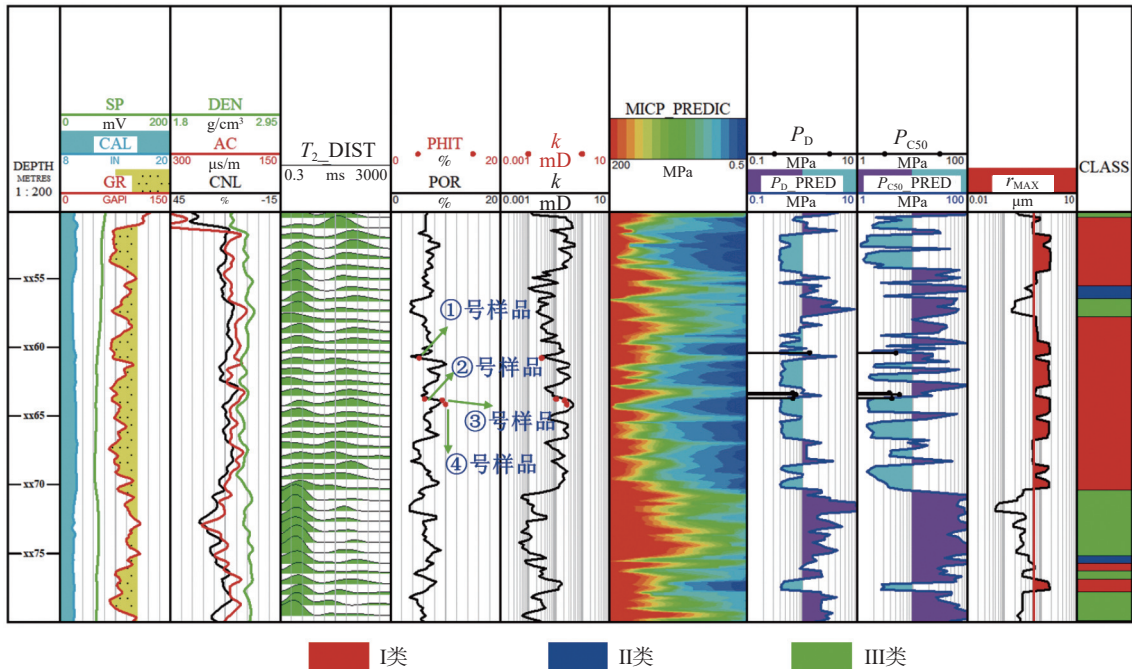


图 9 A 井致密砂岩储层孔隙结构评价成果图

通过图 9 中第 2 道伽马曲线可以看出，伽马值平均分布于 70~100 GAPI，整体较低，说明该深度段为储层段；通过第 5 道孔隙度曲线可以看出，核磁共振测量的孔隙度分布范围为 3.5%~9.2%，第 6 道渗透率曲线分布范围为 0.02~0.42 mD，依据孔渗分布范围可以判断出该储层段较为致密；根据第 8 道预测的排驱压力曲线及第 9 道预测的饱和度中值压力曲线，结合图 10 中基于核磁

共振测井  $T_2$  谱预测毛管压力曲线与岩心压汞实验测量所得毛管压力曲线对比效果较好，证实了该转换方法的有效性。由第 7~9 道及第 4 道核磁共振  $T_2$  谱可知，在 xx50~xx55 及 xx60~xx70 层段， $T_2$  谱双峰明显，且长弛豫部分占比较多，毛管压力曲线形态较平缓，排驱压力和饱和度中值压力较小，最大孔喉半径较大，储层分类结果以 I 类为主，表明该层段孔隙结构较好，为优质储层。

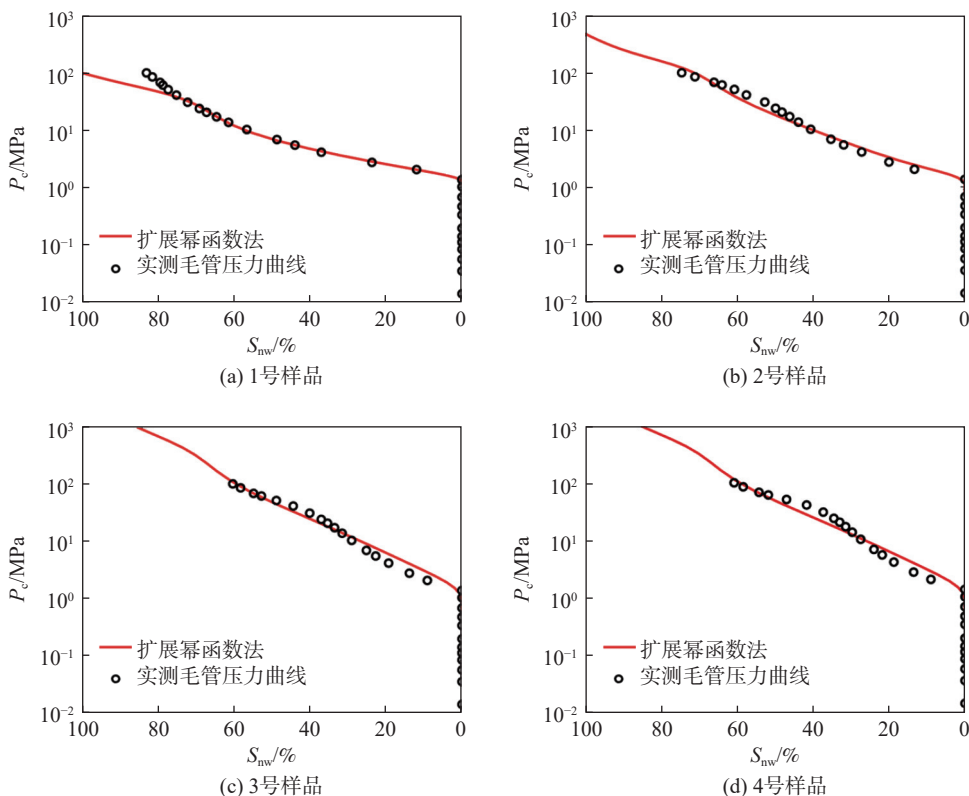


图 10 A 井 xx60~xx65 层段基于核磁共振测井预测毛管压力曲线与岩心压汞实验测量毛管压力曲线对比图

#### 4 结束语

本文利用 MATLAB GUI 模块设计了基于核磁共振测井  $T_2$  谱评价储层孔隙结构的仿真实验，设计的 GUI 界面直观简洁，便于学生理解与操作，包括毛管压力曲线数据预处理、核磁共振  $T_2$  谱转换毛管压力曲线及孔隙结构特征参数提取等模块，并将 MATLAB GUI 仿真实验手段与测井资料处理相结合，教学成效显著提升。该仿真实验是中国石油大学“资源勘查工程”和“勘查技术与工程”两个国家级一流本科专业“地球物理测井”课程的实训实践教学内容。通过仿真实验加深了学生对核磁共振  $T_2$  谱转换毛管压力曲线及孔隙结构特征参数提取等知识和原理的理解，使学生们

更加直观深入地了解如何利用核磁共振测井  $T_2$  谱评价储层孔隙结构，充分调动了学生参与课程实训实践教学的积极性，增强了学生自主学习的能力，激发了学生的学习动力，提高了本科课程的高阶性、创新性和挑战性。

#### 参考文献

[1] 郝乐伟, 王琪, 唐俊. 储层岩石微观孔隙结构研究方法  
与理论综述[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(5): 123-128.  
[2] 董大鹏, 王瑞晗, 金禹含. 毛细管压力曲线构造中半渗透隔板法研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(20): 86-87.  
[3] 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.

- [4] LEVITT M H. Spin dynamics: Basics of nuclear magnetic resonance[M]. 2nd ed. West Sussex: Wiley, 2008.
- [5] SONG Y Q, RYU S, SEN P N. Determining multiple length scales in rocks[J]. *Nature*, 2000, 406(6792): 178–181.
- [6] LIU M, XIE R H, GUO J F, et al. Characterization of pore structures of tight sandstone reservoirs by multifractal analysis of the NMR  $T_2$  distribution[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(12): 12218–12230.
- [7] GUO J F, XIE R H, XIAO L Z. Pore-fluid characterizations and microscopic mechanisms of sedimentary rocks with three-dimensional NMR: Tight sandstone as an example[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 80: 103392.
- [8] JIN G W, XIE R H, LIU M, et al. Petrophysical parameter calculation based on NMR echo data in tight sandstone[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5618–5625.
- [9] MARSCHALL D, GARDNER J S, MARDON D, et al. Method for correlating NMR relaxometry and mercury injection data[C]// [S. l.]: [s. n.], 1995, 9511: 40.
- [10] 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.
- [11] 闫建平, 温丹妮, 李尊芝, 等. 基于核磁共振测井的低渗透砂岩孔隙结构定量评价方法: 以东营凹陷南斜坡沙四段为例[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(4): 1543–1552.
- [12] WU B H, XIE R H, LIU M, et al. Novel method for predicting mercury injection capillary pressure curves of tight sandstone reservoirs using NMR  $T_2$  distributions[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(19): 15607–15617.
- [13] 刘秘. 致密油储层孔隙结构核磁共振测井评价及储层分类方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2015.
- [14] 张伟, 赵懿, 潘潞. Forward 软件二次开发调用 Matlab 函数方法[J]. *石油工业计算机应用*, 2016(2): 32–34.
- [15] COATES G, 肖立志, PRAMMER M. 核磁共振测井原理与应用[M]. 孟繁莹, 译. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [16] 邓克俊. 核磁共振测井理论及应用[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010.
- [17] 谢然红, 谷明宣, 金国文, 等. 核磁共振双等待时间测井储层流体识别仿真实验设计[J]. *实验技术与管理*, 2023, 40(5): 105–109.
- [18] 谢然红, 徐陈昱, 郭江峰, 等. 二维核磁共振评价页岩流体饱和度实验仿真[J]. *实验室研究与探索*, 2024, 43(3): 94–98.
- [19] LOWDEN B, PORTER M, POWRIE L.  $T_2$  relaxation time versus mercury injection capillary pressure: implications for NMR logging and reservoir characterisation[C]//Society of Petroleum Engineers. *Proceedings of European Petroleum Conference*. [S. l.]: [s. n.], 1998.
- [20] 张关根, 赖翔友. 麻皮效应对压汞资料的影响[J]. *石油勘探与开发*, 1988, 15(6): 80–82.
- [21] 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.

编辑 王燕