

# $T_2-P_c$ 二维核磁共振岩心测试技术与应用

陈瑶<sup>1</sup>, 张官<sup>1</sup>, 郑国庆<sup>2</sup>, 彭庆<sup>3</sup>, 覃莹瑶<sup>1</sup>

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100;

2. 中国石油 新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000;

3. 中国石油 新疆油田分公司 陆梁油田作业区, 新疆 克拉玛依 834000)

**摘要:**作为一种无损、高效、非侵入式的检测手段,核磁共振技术一直在油气岩心分析中发挥着重要作用。但传统核磁共振(NMR)检测结果( $T_2$ 谱)反映的是岩石孔隙的大小分布特征,孔隙的连通性无法直接被表征。通过对实验流程和数据处理方法的改进,在标准核磁 $T_2$ 谱的基础上,增加毛管压力( $P_c$ )维度,得到 $T_2-P_c$ 二维核磁实验图谱,从另一个视角解决了核磁实验不能反映孔隙连通性的问题。实际应用表明, $T_2-P_c$ 二维核磁实验不但能够对储层连通性进行直观评价,也可以得到不同生产压差下的束缚水饱和度,从而为油气勘探开发提供更多储层信息。

**关键词:**  $T_2$ 谱;毛管压力;二维核磁共振;束缚水饱和度

中图分类号: TE135

文献标识码: A

## Core testing technology with $T_2-P_c$ two-dimensional nuclear magnetic resonance and its application

CHEN Yao<sup>1</sup>, ZHANG Gong<sup>1</sup>, ZHENG Guoqing<sup>2</sup>, PENG Qing<sup>3</sup>, Qin Yingyao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Xinjiang Oilfield, CNPC, Karamay, Xinjiang 834000, China; 3. Luliang Oilfield Operation Area, Xinjiang Oilfield, CNPC, Karamay, Xinjiang 834000, China)

**Abstract:** As a non-destructive, efficient and non-invasive detection method, nuclear magnetic resonance (NMR) technology has always played an important role in the analysis of oil and gas cores, but the traditional nuclear magnetic resonance detection results ( $T_2$  spectrum) only reflect the size distribution characteristics of rock pores, while the connectivity of pores cannot be directly characterized. Through the improvement of experimental procedures and data processing methods of the standard nuclear magnetic  $T_2$  spectrum, the capillary pressure dimension is added in to obtain the  $T_2-P_c$  two-dimensional nuclear magnetic experiment spectrum, which solves the problem that the nuclear magnetic experiment cannot reflect the pore connectivity. Practical application shows that the  $T_2-P_c$  two-dimensional nuclear magnetic experiment can not only intuitively evaluate reservoir connectivity, but also obtain bound water saturation under different production pressure differentials, thus providing more reservoir information for oil and gas exploration and development.

**Key words:**  $T_2$  spectrum; capillary pressure; 2D NMR; bound water saturation

核磁共振(NMR)岩心分析技术利用岩石孔隙流体中氢核磁共振现象进行测量,具有无损、便捷、准确等优点<sup>[1-9]</sup>。通过直接观测样品中流体信号,核磁共振技术不但可以得到样品流体含量(对应孔隙度),而且基于饱和水样品信号的衰减特征通过相关反演处理可以得到孔隙分布状态。此外通过对比不同饱和状态岩心的测量,可以获取样品的

含油性、束缚流体饱和度、 $T_2$ 截止值等重要参数信息<sup>[9-10]</sup>。由于核磁共振技术的独特优势,在油气勘探程度日益深入的今天,越来越受到人们的重视,尤其在低渗透储层评价中发挥着重要作用<sup>[11]</sup>。束缚水饱和度是决定低渗透油气藏开发效果的关键参数,核磁共振技术在该领域发挥着不可替代的作用,国内外众多学者致力于核磁共振 $T_2$ 截止值

收稿日期: 2020-05-10; 修订日期: 2020-07-08。

作者简介: 陈瑶(1998—),女,硕士研究生,从事超低渗岩心核磁实验与渗透率方法研究。E-mail: chenyaoyao\_sc@163.com。

通信作者: 张官(1987—),男,博士,讲师,从事核磁共振测井方法与软件开发研究。E-mail: zhanggong@yangtzeu.edu.cn。

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划项目(Q20181320)资助。

的研究,以求得更加精确的束缚水饱和度<sup>[12-16]</sup>。尽管核磁共振技术获取束缚水饱和度的方法在许多油气田取得了成功应用,但由于客观的物理原理,导致其在具有复杂孔隙结构空间的储层评价中遇到困难。如图 1 所示,简化模型由两种喉道和孔隙组成,当其配置关系不一样时,储层物性将有很大差异(情形一明显优于情形二),但两种情形在核磁共振  $T_2$  谱中可能呈现出同样的结果。其原因是核磁共振实验反映的是岩石孔隙的大小分布特征,而孔隙的连通性无法直接被表征。

对于孔隙连通性的表征,毛管压力( $P_c$ )曲线测定是一个非常有效的手段,是研究储层孔隙喉道结构的基础<sup>[17]</sup>。压汞法与半渗透隔板法实验是获取毛管压力曲线常用的两种方法:前者基于汞对绝大多数岩石都属于非润湿相的性质,将汞压入被测岩样的毛细孔中时,毛细孔与汞的接触面会产生与外界压力相反的毛细管力,当外界压力足以克服毛细管力时,汞就会侵入岩样的孔隙,此时外界的压力值就等于相应孔径的毛管压力值<sup>[18-19]</sup>;后者是利用半渗透隔板在一定压力范围内只允许单相流体通过的特性,在小于突破压力的情况下,只有润湿相能通过半渗透隔板,将岩心放在隔板上,利用加压的方法在两端建立驱替压差,把润湿相液体从孔隙中驱替出来时所需要的压力就等于这些孔隙的毛管压力<sup>[20]</sup>。毛管压力曲线能够弥补核磁共振  $T_2$  谱不能反映连通性的短板,将两者结合起来进行研究已成为一种趋势,通常以表面弛豫率为桥梁,

建立  $T_2$  谱与毛管压力曲线的数学转换关系<sup>[18-21]</sup>。这种方法在许多油气田得到了很好的应用效果,但要注意的,毛管压力曲线本质反映的是孔隙喉道的特征,并不能很好地区分孔隙尺寸(图 2)。

本文通过改进实验流程,优化数据处理方法,以多次离心状态下核磁共振实验数据为基础,从  $T_2$  弛豫时间和毛管压力( $P_c$ )两个维度分析孔隙的连通状态,弥补了传统核磁共振实验不能反映连通性、毛管压力曲线不能反映孔隙尺寸的不足。

## 1 实验方法

### 1.1 传统核磁共振 $T_2$ 谱测试技术

传统核磁共振实验基于 CPMG 脉冲序列,测量并采集岩心回波串衰减曲线,通过反演软件处理得到  $T_2$  分布谱,进而计算得到  $T_2$  几何平均值等核磁参数,通过标样刻度后可以计算出岩心核磁孔隙度<sup>[10]</sup>。图 3 所示为实际核磁共振  $T_2$  测试得到的结果。实际实验时,一般测量饱和水样品和离心后样品两组  $T_2$  谱,对比离心  $T_2$  谱与饱和  $T_2$  谱的差异,可

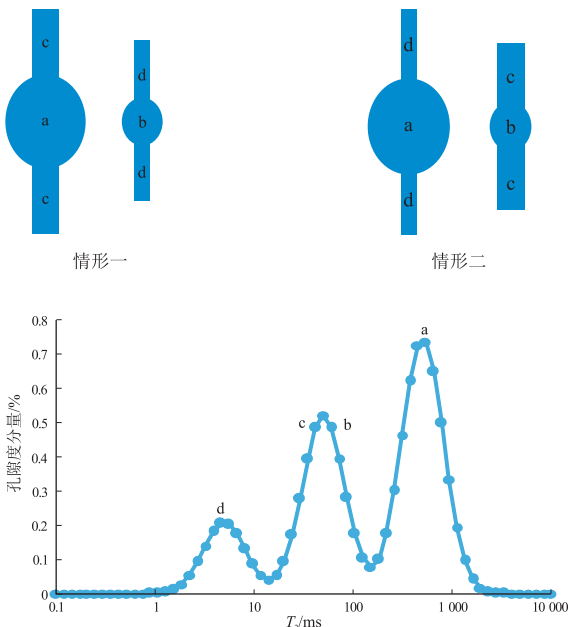


图 1 传统核磁共振  $T_2$  谱局限性

Fig.1 Limitations of traditional NMR  $T_2$  spectrums

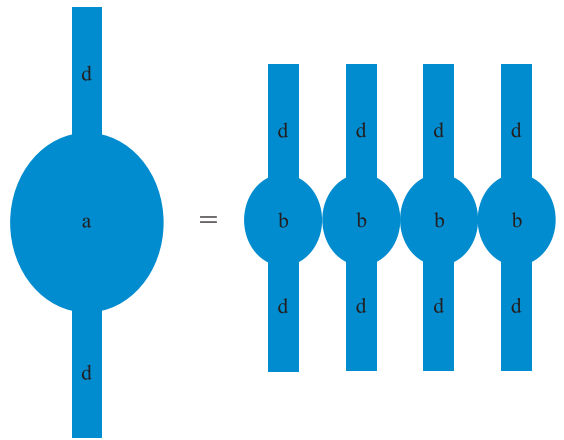


图 2 毛管压力曲线局限性

Fig.2 Limitations of capillary pressure curves

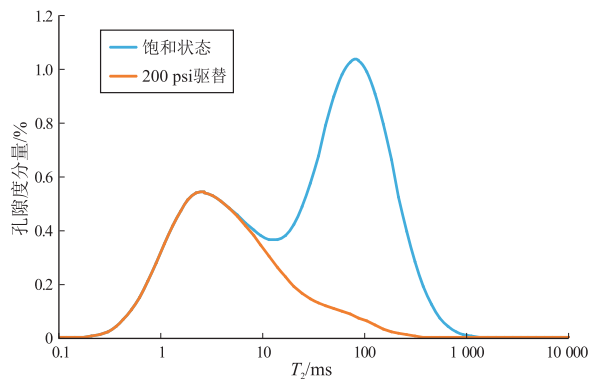


图 3 传统核磁共振  $T_2$  测试实验结果

Fig.3 Traditional NMR  $T_2$  test results

以得到可动水饱和度、束缚水饱和度及  $T_2$  截止值等重要参数。

### 1.2 $T_2-P_c$ 二维核磁共振实验

#### 1.2.1 实验流程改进

首先,对完全饱和水的岩心进行核磁共振测量,得到饱和状态下  $T_2$  谱;然后选取不同大小的离心力进行离心和实验测量,得到不同离心力下的  $T_2$  谱(图4)。

#### 1.2.2 数据处理与成图方法

将所得到的  $T_2$  谱依次进行相减处理,即可得到不同离心力下从岩心中驱替出的自由流体所对应的  $T_2$  谱(图5a),本文将这种方法称为“ $T_2$  谱域差分法( $T_2$  SDD)”。

饱和状态( $P_c = 0$  psi)对比,可判断出孔隙中的可动流体与束缚流体的分布,由此得到不同生产压差下的束缚水饱和度。相较于  $T_2$  分布谱,此图谱中不同离心力驱替时的  $T_2$  分布被连续表征,使实验数据处理结果更为直观。

## 2 数据处理方法优化

实际应用中发现,岩心核磁实验中普遍存在离心  $T_2$  谱不完全在饱和  $T_2$  谱的包络线之下,若用  $T_2$  SDD 会在  $T_2-P_c$  二维谱中出现负值的情况(图6),明显和实际不符合。

为解决该问题,可以在回波拟合前,直接将不同离心状态下的回波进行相减,然后再将相减后的回波进行  $T_2$  谱反演,从而保证没有负值的出现,本文将这种方法称为“差分回波反演法”(DEI)(图7)。为了验证该方法的有效性,本文采用数值模拟方法进行了正反演模拟<sup>[22]</sup>。

### 2.1 构造 $T_2-P_c$ 二维谱

根据对数坐标下的一维高斯分布公式,分别构

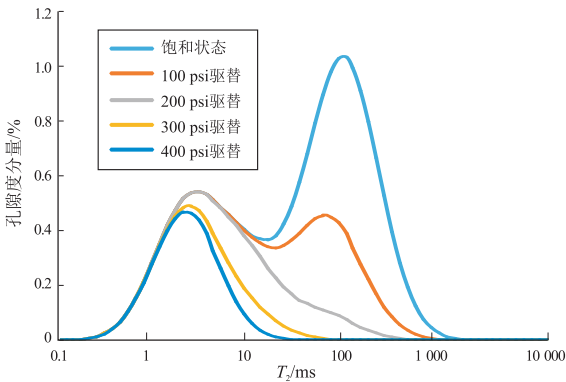


图4 不同离心力驱替后  $T_2$  谱

Fig.4  $T_2$  spectrums after different centrifugal force displacements

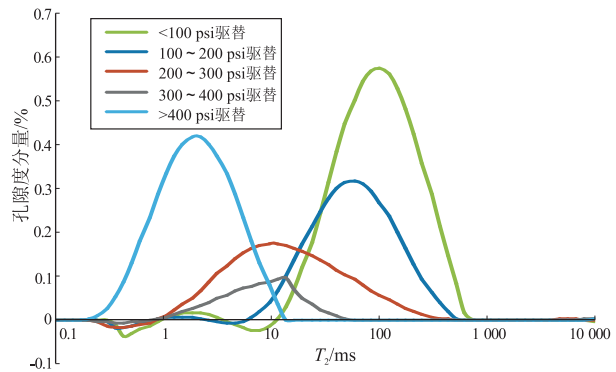
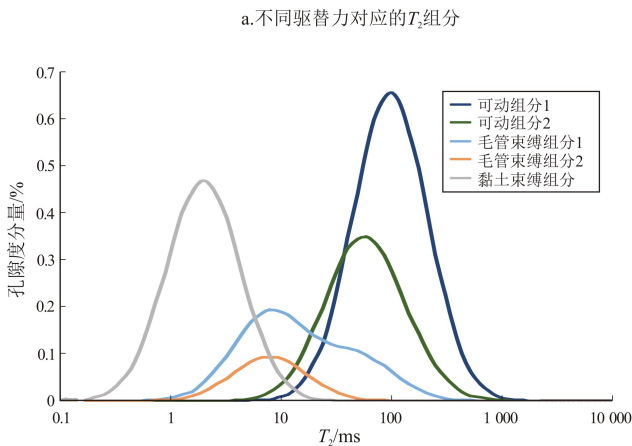
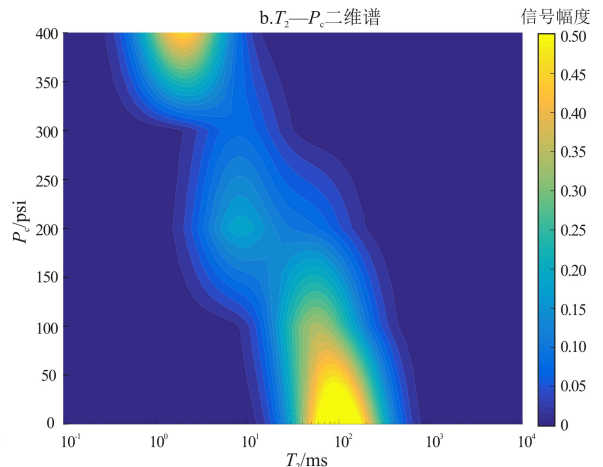


图6  $T_2$ SDD 出现负值

Fig.6 Negative values of  $T_2$ SDD



a.不同驱替力对应的 $T_2$ 组分



b. $T_2-P_c$ 二维谱

图5  $T_2-P_c$  二维谱成图方法

Fig.5 Mapping method of  $T_2-P_c$  two-dimensional spectrum

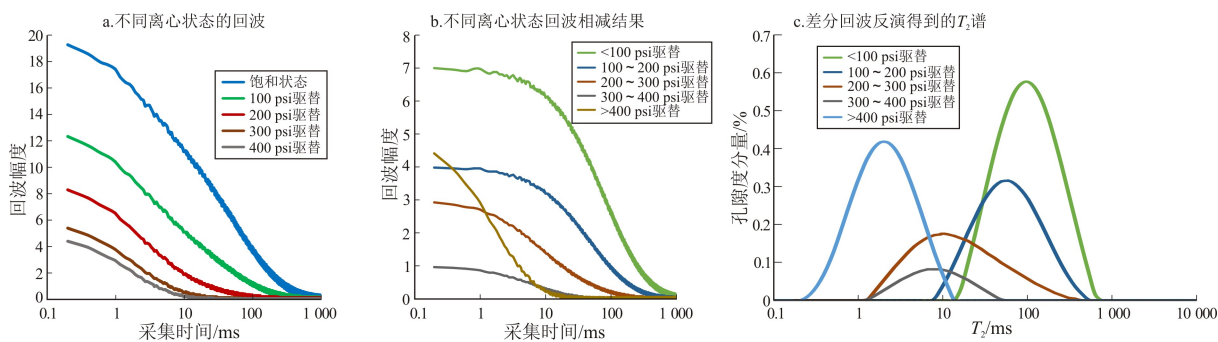


图 7 差分回波反演法

Fig.7 Differential echo inversion

造不同毛管压力组分的  $T_2$  谱:

$$A_j = \sum_{g=1}^n F_g H_g \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_g} \exp\left(-\frac{(\ln T_{2j} - \ln T_{2g, \text{mid}})^2}{2 \sigma_g^2}\right), j=1, 2, \dots, m$$

式中:假设存在具有不同  $T_2$  弛豫时间的  $n$  组孔隙,  $F_g$  是第  $g$  种孔隙的孔隙度分量,  $H_g$  是第  $g$  种孔隙中流体的含氢指数,  $T_{2g, \text{mid}}$  是第  $g$  种孔隙的  $T_2$  弛豫中心值,  $\sigma_g$  是第  $g$  种孔隙  $T_2$  峰值的中心展布宽度。

设置毛管压力从 0~400 psi, 间隔 50 psi。图 8a 所示是构造出的具有 9 种不同毛管压力组分的  $T_2$  谱, 图 8b 是其所对应的  $T_2$ - $P_c$  二维谱图。

### 2.2 模拟数据采集

对 2.1 构造的模拟谱模拟不同驱替状态下的 CPMG 回波采集, 模拟采集到的自旋回波信号如图 9 所示。

### 2.3 数据处理

#### 2.3.1 $T_2$ SDD 处理

反演方法本质上是在求解第一类 Fredholm 积分方程, 前人对于此类方程的求解问题, 提出了多种算法, 本文选用经典的奇异值分解 (SVD) 算法<sup>[23]</sup>进行求解, 得到  $T_2$  谱 (图 10a)。运用前文提

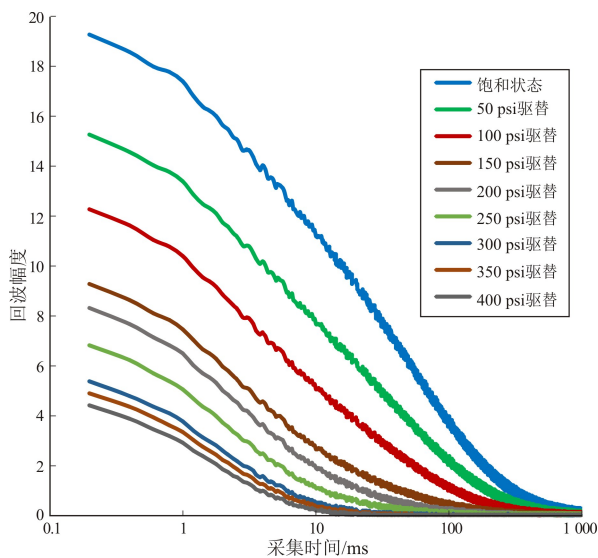


图 9 模拟采集的回波信号

Fig.9 Acquisition of echo signal by simulation

出的  $T_2$ SDD 处理方法对模拟数据进行处理, 所得结果如图 10b 所示。

#### 2.3.2 DEI 处理

根据前文提出的 DEI 处理方法, 将图 9 所示模

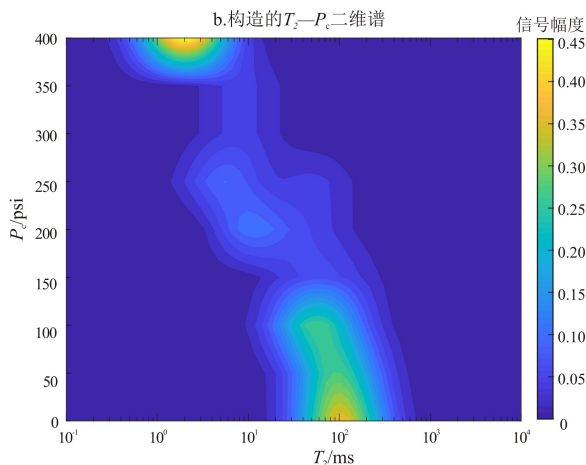
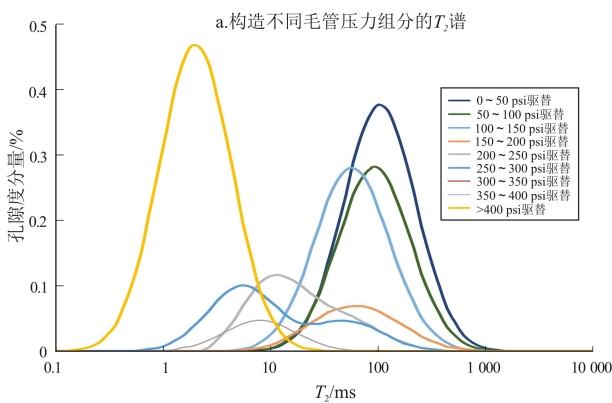


图 8 数值模拟所得结果

Fig.8 Results of numerical simulation

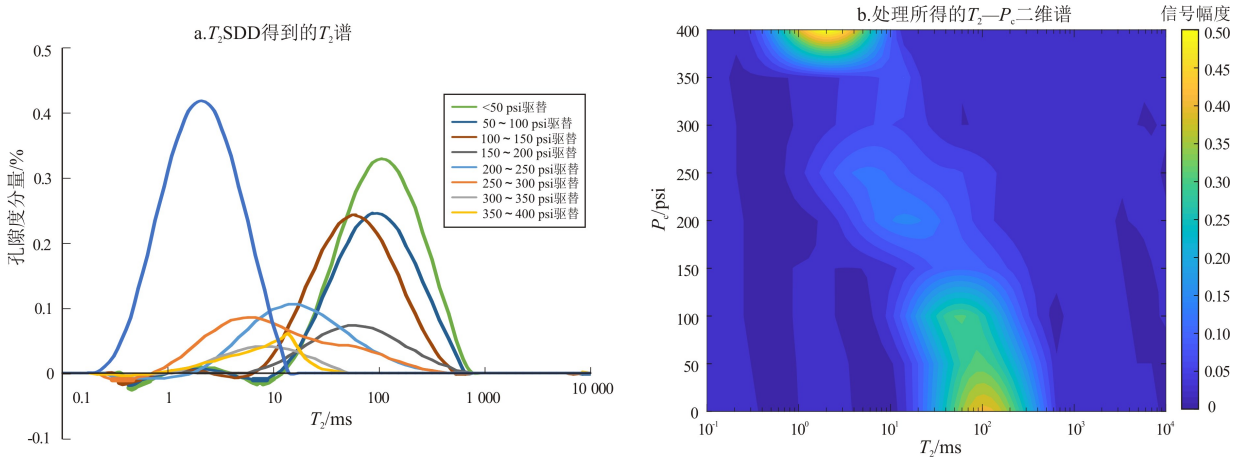


图 10  $T_2$ SDD 处理结果  
Fig.10  $T_2$ SDD processing results

拟采集的不同离心状态下的回波信号进行相减,然后再将相减后的回波进行  $T_2$  谱反演,再利用 DEI 处理,得到结果如图 11 所示。

2.4 结果分析

直接由模拟数据得到的  $T_2-P_c$  二维谱,减小了数据处理时带来的误差,是理想化的结果。图 8 可作为对照,对两种方法处理后的结果进行对比分析。将  $T_2$ SDD 和 DEI 得到的结果与模拟的结果进行对比,发现运用 DEI 处理后的  $T_2$  谱(图 11a)与模拟构造的  $T_2$  谱(图 8a)更为相似,并且能够克服  $T_2$ SDD 处理后出现负值的缺点。同样,DEI 处理得到的  $T_2-P_c$  二维谱(图 11b)与模拟构造的  $T_2-P_c$  二维谱(图 8b)更为相似,当离心力相同时(如  $P_c = 200$  psi),可动流体与束缚流体分布在图 11b 中更为清晰;当  $T_2$  值一定时(如  $T_2 = 10$  ms),图 11b 中定性表征的孔隙的连通性与图 8b 中模拟结果的连通性更为贴近。

3 应用实例

3.1 岩心实验

为了验证  $T_2-P_c$  二维核磁共振岩心测试技术在实际应用中的效果,本文选取某地区砂岩岩心 3 块,其孔渗参数如表 1 所示,分别对其进行岩心分析实验。

实验采用纽迈分析仪器股份有限公司的 MicroMR02-050V 型核磁共振岩心分析仪进行测量,其磁场强度为  $(0.055 \pm 0.01)$  T,主频为 2 MHz。根

表 1 某地区砂岩岩心参数  
Table 1 Sandstone core porosity and permeability parameters in a field

编号	孔隙度/%	渗透率/ $(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	束缚水饱和度/%
1	18.85	5.970	36.13
2	9.63	0.188	45.98
3	9.08	0.603	33.92

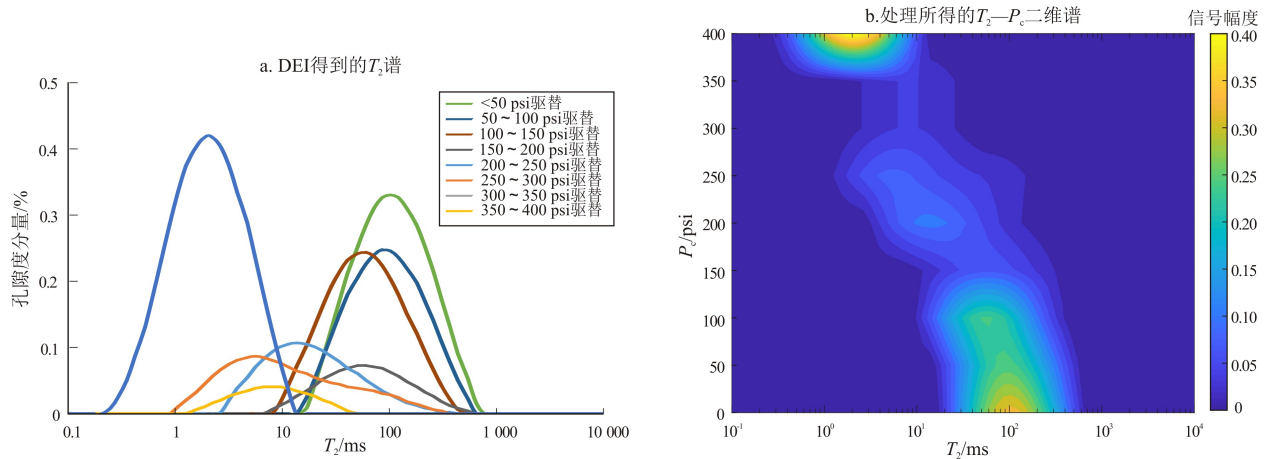


图 11 DEI 处理结果  
Fig.11 DEI processing results

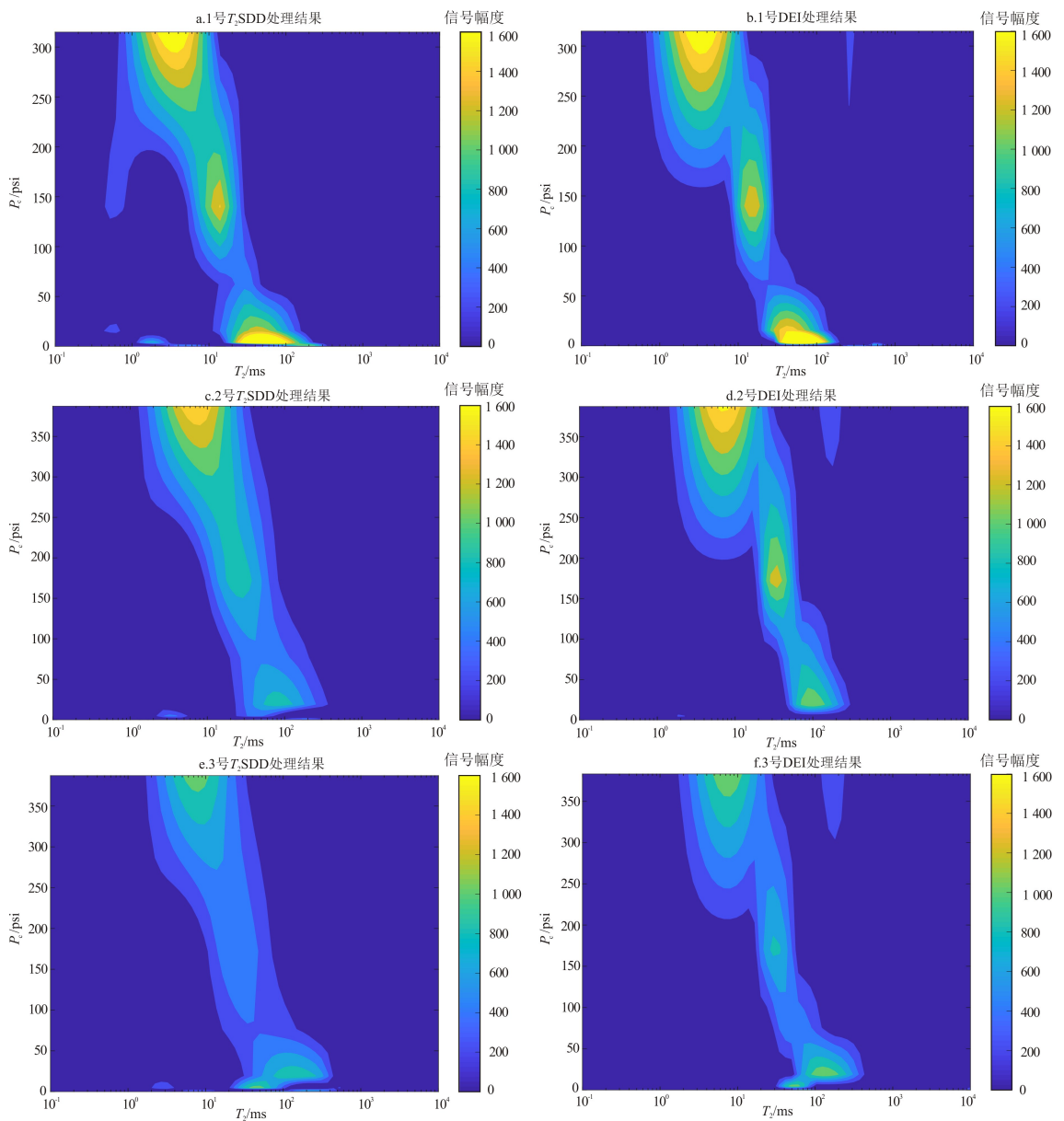


图 12 岩心分析实验结果  
Fig.12 Core experiment results

据本文所提出的改进的实验流程对岩心进行实验操作,并对数据进行处理,结果如图 12 所示。

### 3.2 分析与讨论

对比图 12 中不同岩心用相同方法处理所得到的  $T_2-P_c$  二维谱,在同样大小的离心力作用下(如  $P_c = 100$  psi 时),孔隙度相近的 2 号岩心与 3 号岩心所能驱替出的流体体积并不相同,3 号岩心在该离心力下能驱替出更多的流体,因此 3 号岩心的束缚水饱和度要小于 2 号;当  $T_2$  值一定时(如  $T_2 = 100$  ms),对于同样大小的孔隙,2 号岩心驱替流体所需驱替力更大,因此 3 号岩心的连通性优于 2 号岩心。

对比图 12a, b 发现,运用 DEI 与  $T_2$ SDD 两种方法处理所得结果趋势相同,但 DEI 所得结果更

为清晰。 $T_2$ 谱在多次离心过程中出现不能完全包络的现象是扩散耦合效应<sup>[24]</sup>的体现, $T_2$ 谱相减处理后表现为负值,在  $T_2$ SDD 处理结果中也有所体现,但  $T_2-P_c$  二维谱中反映的是不同孔隙中流体驱替的难易程度,不应存在负值,故利用 DEI 在数据处理时避免了负值是符合真实情况的。

以上实验结果证明得到  $T_2-P_c$  二维谱的实验流程和数据处理方法是对传统实验的改进。当不同岩心的孔隙大小分布相同时, $T_2-P_c$  二维谱可对孔隙的连通性进行评价,弥补了传统核磁共振实验不能反映连通性的不足。同时,改变驱替岩心所用的离心力大小,可以得到不同压力条件下岩心中驱替出的流体体积,从而可以获取不同生产压差下的束缚水饱和度。

## 4 结论

(1)  $T_2-P_c$  二维核磁共振岩心测试技术解决了传统的核磁实验不能反映岩心孔隙连通性的问题,所得到的  $T_2-P_c$  二维谱图既能够对储层连通性进行直观评价,也能得到不同生产压差下的束缚水饱和度,为油气勘探开发提供新的思路。

(2) 获取  $T_2-P_c$  二维谱有两种方法:  $T_2$  谱域差分法 ( $T_2$ SDD) 与差分回波反演法 (DEI)。这两种方法在理论上都能很好地用于  $T_2-P_c$  二维核磁共振岩心测试技术,但在实际应用中,运用  $T_2$ SDD 对  $T_2$  谱进行差分时会有负值的存在,DEI 在回波拟合前直接将不同离心状态下的回波进行相减,从而避免了该问题。故实际应用中,DEI 效果优于  $T_2$ SDD。

(3) 所提出的  $T_2-P_c$  二维核磁共振岩心测试技术中,  $T_2$  谱的信噪比不同可能会对  $T_2-P_c$  二维谱带来影响,同时,岩心的离心次数会对驱替出的流体体积产生影响,从而对  $T_2-P_c$  二维谱造成影响,这些都将成为下一步的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 王志远,张烈辉,谭龙,等.砾岩储集层聚合物驱油机理与控制因素实验研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(3):109-114.  
WANG Zhiyuan, ZHANG Liehui, TAN Long, et al. Study on mechanism and controlling factors of polymer flooding in conglomerate reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(3): 109-114.
- [2] 张明玉,孔垂显,齐洪岩,等.基于核磁共振实验的火山岩气藏原始含气饱和度分析[J].新疆石油地质,2020,41(3):288-294.  
ZHANG Mingyu, KONG Chuixian, QI Hongyan, et al. Analysis on original gas saturation of volcanic gas reservoir based on NMR experiment [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(3): 288-294.
- [3] 张全培,吴文瑞,刘丽萍,等.鄂尔多斯盆地镇北地区延长组超低渗透储层孔隙结构及其分形特征[J].油气地质与采收率,2020,27(3):20-31.  
ZHANG Quanpei, WU Wenrui, LIU Liping, et al. Pore structure and fractal characteristics of ultra-low permeability reservoirs in Yanchang Formation in Zhenbei area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 20-31.
- [4] 魏赫鑫,赖枫鹏,蒋志宇,等.延长致密气储层微观孔隙结构及流体分布特征[J].断块油气田,2020,27(2):182-187.  
WEI Hexin, LAI Fengpeng, JIANG Zhiyu, et al. Micropore structure and fluid distribution characteristics of Yanchang tight gas reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(2): 182-187.
- [5] 巨明霜,王秀宇,余文帅,等.基于核磁共振技术的致密储集

- 层静态渗吸规律[J].新疆石油地质,2019,40(3):334-339.  
JU Mingshuang, WANG Xiuyu, YU Wenshuai, et al. Spontaneous imbibition of tight oil reservoirs based on NMR technology [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(3): 334-339.
- [6] 马海洋,夏遵义,温庆志,等.渤海湾盆地沾化凹陷页岩微观孔隙特征实验研究[J].石油实验地质,2019,41(1):149-156.  
MA Haiyang, XIA Zunyi, WEN Qingzhi, et al. Micro-pore characteristics of shale in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 149-156.
- [7] 雷浩,何建华,胡振国.潜江凹陷页岩油藏渗流特征物理模拟及影响因素分析[J].特种油气藏,2019,26(3):94-98.  
LEI Hao, HE Jianhua, HU Zhenguo. Physical simulation and influencing factor analysis of the flow characteristics in the shale oil reservoir of Qianjiang Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 94-98.
- [8] MORRIS C, ROSSINI D, STRALEY C, et al. Core analysis by low-field NMR [J]. The Log Analyst, 1997, 38(2): 84-94.
- [9] 王振华,陈刚,李书恒,等.核磁共振岩心实验分析在低孔渗储层评价中的应用[J].石油实验地质,2014,36(6):773-779.  
WANG Zhenhua, CHEN Gang, LI Shuheng, et al. Application of NMR core experimental analysis in evaluation of low-porosity and low-permeability sandstone reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 773-779.
- [10] 国家能源局. SY/T 6490—2014: 岩样核磁共振参数实验室测量规范[S].北京:石油工业出版社,2015.  
National Energy Administration. Specification for core NMR parameter's measurement in laboratory [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [11] 范卓颖,侯加根,邢东辉,等.低渗透储层核磁共振实验与测井应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(1):53-59.  
FAN Zhuoying, HOU Jiagen, XING Donghui, et al. Core NMR experiments for low permeability reservoir and its field application [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(1): 53-59.
- [12] 王为民,郭和坤,叶朝辉.利用核磁共振可动流体评价低渗透油田开发潜力[J].石油学报,2001,22(6):40-44.  
WANG Weimin, GUO Hekun, YE Chaohui. The evaluation of development potential in low permeability oilfield by the aid of NMR movable fluid detecting technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 40-44.
- [13] 姜鹏,郭和坤,李海波,等.低渗透率砂岩可动流体  $T_2$  截止值实验研究[J].测井技术,2010,34(4):327-330.  
JIANG Peng, GUO Hekun, LI Haibo, et al. Experimental study on  $T_2$  cutoff in low permeability sandstones [J]. Well Logging Technology, 2010, 34(4): 327-330.
- [14] 葛新民,范宜仁,邓少贵.基于实验分析的泥质砂岩  $T_2$  截止值确定方法研究[J].测井技术,2011,35(4):308-313.  
GE Xinmin, FAN Yiren, DENG Shaogui. Research on  $T_2$  cutoff-value determination method for shaly sand based on experiments [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(4): 308-313.
- [15] 白松涛,程道解,万金彬,等.砂岩岩石核磁共振  $T_2$  谱定量表征[J].石油学报,2016,37(3):382-391.  
BAI Songtao, CHENG Daojie, WAN Jinbin, et al. Quantitative charac-

- terization of sandstone NMR  $T_2$  spectrum[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 382-391.
- [16] 周尚文, 刘洪林, 闫刚, 等. 中国南方海相页岩储层可动流体及  $T_2$  截止值核磁共振研究[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 612-616.
- ZHOU Shangwen, LIU Honglin, YAN gang, et al. NMR research of movable fluid and  $T_2$  cutoff of marine shale in South China[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 612-616.
- [17] 万文胜, 杜军社, 佟国彰, 等. 用毛细管压力曲线确定储集层孔隙喉道半径下限[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(1): 104-106.
- WAN Wensheng, DU Junshe, TONG Guozhang, et al. Application of capillary pressure to determination of cut-off pore-throat radius in reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(1): 104-106.
- [18] 李天降, 李子丰, 赵彦超, 等. 核磁共振与压汞法的孔隙结构一致性研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(10): 57-59.
- LI Tianjiang, LI Zifeng, ZHAO Yanchao, et al. Consistency of pore structures between NMR and mercury intrusion method[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(10): 57-59.
- [19] 肖佃师, 卢双舫, 陆正元, 等. 联合核磁共振和恒速压汞方法测定致密砂岩孔隙结构[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 961-970.
- XIAO Dianshi, LU Shuangfang, LU Zhengyuan, et al. Combining nuclear magnetic resonance and rate-controlled porosimetry to probe the pore-throat structure of tight sandstones [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 961-970.
- [20] 张诗青, 戴诗华, 张晓亮, 等. 核磁共振与半渗透隔板结合确定毛细管压力实验[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(6): 647-648.
- ZHANG Shiqing, DAI Shihua, ZHANG Xiaoliang, et al. Experiment on capillary pressure determination with MNR and semi-permeable plate [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(6): 647-648.
- [21] 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 Haibo, ZHU Juyi, GUO Hekun. Methods for calculating pore radius distribution in rock from NMR  $T_2$  spectra [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2008, 25(2): 273-280.
- [22] 彭川, 何宗斌, 张宫. 核磁共振  $T_2$  弛豫仿真软件研发及在岩心核磁实验中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(3): 282-286.
- PENG Chuan, HE Zongbin, ZHANG Gong. Development of NMR  $T_2$  relaxation simulation software and its application in core NMR experiment [J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(3): 282-286.
- [23] 李鹏举, 葛成, 孙国平, 等. 基于奇异值分解的核磁共振测井  $T_2$  谱反演方法的改进[J]. 测井技术, 2010, 34(3): 215-218.
- LI Pengju, GE Cheng, SUN Guoping, et al. Improvement of  $T_2$  spectrum inversion method with singular value decomposition from NMR data [J]. Well Logging Technology, 2010, 34(3): 215-218.
- [24] STRALEY C, MORRISS C E, KENYON W E. NMR in partially saturated rocks: laboratory insights on free fluid index and comparison with borehole logs [C]// Paper CC Presented at SPWLA 32nd Annual Logging Symposium. [S.l.]: Society of Petrophysicists and Well-log Analysts, 1991: 25.

(编辑 韩 戎)

(上接第 523 页)

- [48] LI Jie, JIANG Xiaoying, Xu Jifeng, et al. Determination of platinum-group elements and Re-Os isotopes using ID-ICP-MS and N-TIMS from a single digestion after two-stage column separation [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2014, 38(1): 37-50.
- [49] 李超, 裴浩翔, 王登红, 等. 山东孔辛头铜铅矿成矿时代及物质来源: 来自黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素证据[J]. 地质学报, 2016, 90(2): 240-249.
- LI Chao, PEI Haoxiang, WANG Denghong, et al. Age and source constraints for Kongxintou Copper-Molybdenum deposit Shandong from Re-Os isotope in Molybdenite and Chalcopyrite [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(2): 240-249.
- [50] YIN Lu, LI Jie, TIAN Hui, et al. Rhenium-osmium and molybdenum isotope systematics of black shales from the Lower Cambrian Niutitang Formation, SW China: evidence of a well oxygenated ocean at ca. 520 Ma [J]. Chemical Geology, 2018, 499: 26-42.
- [51] BARROTE V, TESSALINA S, McNAUGHTON N, et al. 4D history of the nimbus VHMS ore deposit in the Yilgarn Craton, western Australia [J]. Precambrian Research, 2020, 337.
- [52] YANG Gang, ZIMMERMAN A, STEIN H, et al. Pretreatment of nitric acid with hydrogen peroxide reduces total procedural Os blank to femtogram levels [J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(14): 7017-7021.
- [53] MEISEL T, REISBERG L, MOSER J, et al. Re-Os systematics of UB-N, a serpentinized peridotite reference material [J]. Chemical Geology, 2003, 201(1/2): 161-179.
- [54] HURTIG N C, GEORGIEV S V, ZIMMERMAN A, et al. Re-Os geochronology for the NIST RM 8505 crude oil: the importance of analytical protocol and uncertainty [J]. Chemical Geology, 2020, 539.
- [55] DIMARZIO J M, GEORGIEV S V, STEIN H J, et al. Residency of rhenium and osmium in a heavy crude oil [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 220: 180-200.

(编辑 徐文明)