

非常规油气储层孔隙结构研究方法 及评价参数综述

王化尧^{1,2*}, 王帅栋^{1,2}, 席思达^{1,2}, 寻兴建^{1,2}

¹中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京

²中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京

收稿日期: 2022年3月31日; 录用日期: 2022年4月20日; 发布日期: 2022年4月29日

摘要

如何开采利用非常规油气储层中的油气资源是目前国际社会关注的热点问题, 准确地表征非常规油气储层中岩层的孔隙结构对其开采具有重要的指导意义。本文通过大量文献的汇总分析, 综述了目前可用于非常规油气储层微观孔隙表征的几种技术, 并对不同技术后期数据、图像的分析处理进行了汇总说明。同时以分形维数、可动流体饱和度、渗透率为例, 介绍了用于评价储层的参数, 并对评价方法进行了简述。

关键词

非常规油气储层, 孔隙结构, 孔隙表征, 储层评价参数, 分形维数

A Review of Research Methods and Evaluation Parameters for Pore Structure of Unconventional Oil and Gas Reservoirs

Huayao Wang^{1,2*}, Shuaidong Wang^{1,2}, Sida Xi^{1,2}, Xingjian Xun^{1,2}

¹School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing

²State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing

Received: Mar. 31st, 2022; accepted: Apr. 20th, 2022; published: Apr. 29th, 2022

Abstract

How to exploit and utilize the oil and gas resources in unconventional oil and gas reservoirs is a hot

*通讯作者。

文章引用: 王化尧, 王帅栋, 席思达, 寻兴建. 非常规油气储层孔隙结构研究方法及评价参数综述[J]. 土木工程, 2022, 11(4): 644-663. DOI: 10.12677/hjce.2022.114070

issue currently concerned by the international community. The accurate characterization of the pore structure of the unconventional oil and gas reservoirs has important guiding significance for its exploitation. This article summarizes and analyzes a lot of literature, summarizes several technologies that can be used to characterize micro-pores of unconventional oil and gas reservoirs, and summarizes the analysis and processing of data and images of different technologies. At the same time, taking fractal dimension, movable fluid saturation, and permeability as examples, the parameters used to evaluate the reservoir are introduced, and the evaluation method is briefly described.

Keywords

Unconventional Oil and Gas Reservoirs, Pore Structure, Pore Characterization, Reservoir Evaluation Parameter, Fractal Dimension

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

伴随世界经济的飞速发展，石油与天然气的需求量日益增加，常规油气储层中的储量已难以满足持续增长的社会需求，这使得科研工作者将目光转移至非常规油气储层。据统计，世界非常规油气的资源量约为常规油气的 4.56 倍 [1]，而每年非常规油气储层中开采油气已达到全球总产量的 10% 以上。中国可用的非常规油气资源约为 $890 \times 10^8 \sim 1260 \times 10^8$ t，为常规储层的三倍 [2]，而这其中低渗油约为 550 亿吨，占总资源量的 50%。大量的非常规油气亟待开采，但非常规油气储层的岩性及储集空间相比常规储层更为复杂，储层中的岩石往往展现出连通性差、渗透率低、其内部孔隙尺寸多为微纳米级，并且非均质性强的特性，因此表征岩石孔隙结构是开采非常规油气储层的前提。本文汇总了目前微观孔隙表征的方法和部分用于评价非常规油气储层物性的重要参量，并对其进行了介绍分析及评价，以助于更加科学合理地非常规油气储层进行开发利用。

2. 非常规油气储层开采

非常规油气储层，是指用传统的开采方式难以开发或者开发效率极低的致密储油气层。其主要表现出三个方面的非常规性：岩性非常规、储集空间类型非常规、电性特征非常规。相比起常规均质孔隙性砂岩储层，非常规油气储层更多的由碳酸盐，变质岩、泥岩、页岩、致密砂岩构成，并且其内部可能存在非均质的孔隙和裂缝。非常规油气储层物性较差，一般孔隙度小于 10%，渗透率小于 0.1 mD，孔喉直径一般小于 1 μm ，主体孔隙为微纳米孔，孔喉结构复杂 [3]。这类储集层岩性复杂，非均质性强，低阻气层与高阻水层并存，其复杂性组合表现出在评价孔隙度、渗透率、流体饱和度方面的困难 [4]。同时，在聚集单元、运移方式、渗透机理等多个方面也有别于常规的油气储层 [5]，这也相应的为其开采提出了较高的技术要求。

2.1. 开采方法

如今欧美国家主要通过水压致裂和水平钻井的方法开采非常规油气储层。水压致裂法利用水和细泥砂所掺杂的化学试剂，在外力所产生的高压催动下，将试剂注入地下几百米深的含气层，逐步压裂岩层及其中的多孔岩石并产生缝隙，试剂中的细泥砂和部分化学溶剂起到支撑裂缝防止其闭合的作用，从而为石油和天然气的输出开辟渠道，并将其释放。近些年来，欧美的科研工作者对于采用水压致裂的方法开采非常规油气进

行了较为深入的研究, Antonin Settari [6]设计了具有更高计算效率和真实性的水力压裂综合 3D 仿真模型, 可以更加精确的评估压裂过程中应力的变化情况; Kevin England 等[7]发明了一种通过将交替阶段的压裂液依次注入井眼中来提高水压致裂过程中裂缝导流能力的装置; AR Jennings Jr.等[8]利用热固性可凝胶混合物受热发泡膨胀的特性, 改进了水压致裂过程中的添加剂, 使得由于水压而形成的裂缝尺寸更大、更稳定, 并且持续开放。陈绍杰等[9]通过数值模拟, 揭示了煤层注水驱替瓦斯两相渗流机理, 建立了煤层注水与瓦斯抽采单相渗流的数学模型。数据表示, 水压致裂技术目前仅在美国便已经使用超过一百万次, 约 60%的新石油和天然气采集平台采取水压致裂的方法进行钻孔[10]。但该方法中使用的化学试剂以及挥发性的烃类气体会对地下水层造成极大的污染, 并且在压裂过程中存在油气井泄露的风险, 造成周围土壤与河流中有毒有害物质的堆积, 因此具有较大的安全隐患, 导致其废水处理及后续工作尤为重要。据美国杂志《Energy Policy》统计, 美国社会与环境保护相关联的人士大都反对利用水压致裂的方法开采非常规油气储层, 他们认为该法对环境和周边居民健康的影响巨大, 并且短期内难以消除[11]。水平钻井法是利用特殊的井底动力工具与随钻测量仪器, 钻成大于 85° 的井斜角并钻进一定长度的定向钻井技术。目前世界建成并投入应用的水平井已达到 45,000 口[12]。水平钻井技术可以增加油层的裸露面积, 并且提高所开采石油的质量[13]。欧美的水平钻井技术起源于 20 世纪 30 年代[14], 发展于 80 年代, 在近 10 年来技术已经趋于完善。其多使用大扭矩、低转速的多级马达, 利用连续的油管来钻探水平井, 这样可以提高油气的采收率, 减少下钻的次数, 缩短开采周期。Livingstone [15]提出可利用新型同心连续油管钻柱, 以便更精准和方便的操作钻探装置; M Sorgun 等[16]利用 CFD 模型, 更加精准的预测了水平钻井过程中非牛顿流体的摩擦压力损失, 提高了水平钻井的采收率。我国的水平钻井技术起源于 20 世纪 60 年代中期, 如今已在胜利油田和塔里木油田得到了充分的应用, 每年钻探的各类水平井接近 200 余口。杨国彬等[17]优化了井身结构和井眼轨迹, 通过三维井眼轨迹控制的技术, 完成了 7 口浅层大位移三维水平井的先导性试验。刘人铜等[18]新研发的环保型水基钻井液具有更好的抑制性、润滑性和封堵性, 使应用井机械钻速提高 11.5%, 钻机月速提高 14.2%, 并未发生井下复杂情况。除以上两种主要开采方式外, 降解吸法也是页岩气开采的一种主要方法[19], 但由于非常规油气储层中页岩气具有强吸附性, 致使该法解吸和开采的效率极低, 资金消耗量大。王海柱等[20]曾在 2011 年提出利用超临界 CO_2 来开采页岩气的方法, 也称 CO_2 置换法, 该法主要通过 CO_2 来置换吸附在致密页岩孔隙中的天然气, 其主要利用了 CO_2 吸附能力比 CH_4 强, 从而驱替 CH_4 分子的原理[21]。实验表明, CO_2 置换法不仅绿色环保, 并且可以有效提高页岩气的采收率, 是目前国内学者重点研究的非常规油气储层开采方法之一。

2.2. 开采难度

非常规油气储层的特点是孔隙结构复杂, 孔喉情况难以表征。其内部孔隙的密集细微程度远高于常规油气储层, 且衍生及发育情况复杂, 孔隙度、渗透率也相对较低。渗透率是岩石物理学家和石油工程师最重视的参数之一, 它直接反映了岩石内部输送油气或碳氢化合物的能力。而在非常规油气储层中, 岩石的渗透率与孔隙度相关性差, 存在孔隙度大的岩石由于孔隙互不连通而导致渗透率低的情况。在评价这类储集层时, 传统的孔隙度无法直观的反映岩石内部孔喉的几何形状与连通情况[22], 因此科学的表征储层岩石的孔隙结构十分必要。

3. 非常规油气储层孔隙表征技术

非常规油气储层的表征技术要能适应各种复杂的致密油藏, 为了量化储层的孔隙度、油气运移方式及通透性, 需要基于二维平面图像观察扫描和三维空间储层孔隙结构重构模拟两个方面, 来进行对孔隙、孔喉通道的清晰表征。因此, 准确的定量分析是非常规油气储层产能评估的基础。

目前主要的表征技术包括 CT 扫描、扫描电镜、核磁共振、 N_2 吸附以及压汞技术。国内学者对不同的方

法进行了大量的研究,李易霖[23]对 CT 扫描技术进行了总结,并应用数字岩心分析技术、Maps 成像表征技术确定致密砂岩中块状层理含油性最好,并且有利于致密油的聚集;贾宁洪等[24]将微纳米 CT 扫描技术与微图像拼接技术相结合,识别出岩芯干酪根内微纳米尺度的孔隙并计算其平均孔隙度,通过对微纳米 CT 图像宏观总孔隙度的修正,使得其测量结果更加精准,孔隙度误差小于 10%;范二平等[25]对湘西北下古生界黑色页岩进行了扫描电镜试验,发现页岩中主要存在矿物基质孔、有机质孔和微裂缝三类孔隙,并且其孔隙结构受原始沉积环境和成岩过程的影响;刘标等[26]通过对煤、页岩、致密砂岩的对比研究,揭示了核磁共振技术在表征非常规油气储层时具有方便迅速、不破坏岩样、所测孔径范围大的特点;李昊远[27]通过 N_2 吸附实验,发现致密砂岩比表面积与孔隙度呈一般负相关,而与渗透率呈较强负相关,微孔($<10\text{ nm}$)和中孔($10\sim 50\text{ nm}$)对比表面积和孔隙体积贡献约占 82%,这表明致密砂岩中孔隙类型复杂,以微孔和中孔为主并且其分布范围广,连通性差;慕月[28]通过恒速压汞实验表征了大庆油田不同区块岩心的孔隙结构,结果表明,若储层渗透率在 2 mD 以下,则表现出喉道细小、孔喉比大的特性,需考虑储层可开发利用的可行性;当储层渗透率大于 5 mD 时,孔喉相对粗大,孔喉比小,可开发利用的同时也降低了开发过程中注水的难度。

通过学者研究发现,微观表征技术可以直观、精准地反映岩石内部孔隙的孔隙结构,通常可以表征从纳米到微米级的孔喉尺寸、分布及几何形状,并且大都具有不破坏式样可多次重复试验的优点。由于微观孔隙的几何形状控制着储层的产量、石油与天然气的运移等方面,与宏观的评价参数相比,能更细致合理地描述对储层岩石的微观孔隙进行定量描述,为提取其中的石油与天然气提供更加科学的理论依据。

3.1. CT 扫描技术

3.1.1. 原理

CT 扫描最早应用于医学,随后被引入岩土工程领域。利用 X 射线对岩心进行扫描,由于 X 射线穿过物体时会发生散射和被吸收致使其衰减,仪器将所得衰减数据进行处理,得到岩心复合 X 射线衰减系数的二维切片。通过计算机可将相应衰减数据转换为 CT 值,利用绘制技术根据 CT 值赋予每个灰度值不同的透明度和颜色,进而将 CT 值导出为灰度值,根据灰度图像反映岩心内部的孔隙结构。目前该方法在岩土工程领域被广泛使用,图 1 为近 10 年来应用 CT 扫描表征岩石孔隙结构的论文数,可见 2019 年及 2020 年发表的论文数最多。

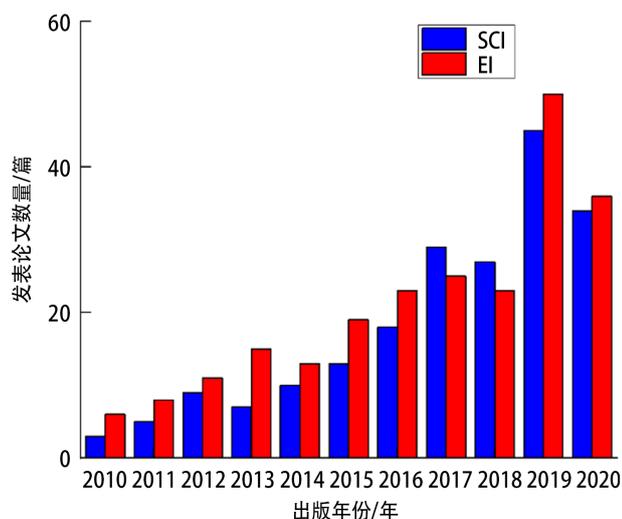


Figure 1. Number of papers on CT study of pore structure of rocks from 2010 to 2020

图 1. 2010~2020 年应用 CT 研究岩石孔隙结构的论文数

3.1.2. 孔隙结构表征

1、CT 灰度直方图

CT 灰度直方图是对岩芯采用 CT 扫描后所获得的断面密度分布图，其反映了岩芯 CT 图像中灰度的统计信息。图像中的每一个像素灰度值代表的是岩芯每个单元体积线性衰减系数的平均值[29]。在岩芯的灰度直方图中，高灰度值代表的是岩芯中密度高的区域，即岩石的骨架颗粒；而低灰度值代表的是岩芯中的孔隙和裂缝[30]。在对岩芯进行水化损伤试验的过程中，可清晰的观测到灰度直方图由单峰向双峰演变的过程。试验前灰度值较大的单峰代表岩芯的骨架颗粒，而试验后出现的灰度值较小的另一个峰则代表水化损伤过程中岩芯内部新出现的孔隙和裂缝。并且伴随着试验时间的增长，代表孔隙和裂缝的低灰度峰在灰度直方图纵坐标上展现出像素数增加的趋势，这代表着在水化过程中岩芯内部形成的新微纳米孔数目在逐渐增加。因此，CT 灰度直方图可以动态的反映岩芯在水化过程中内部的损伤演化过程，并且具有直观、区分度高的特点。

2、CT 图像分割

图像分割的目的是将岩心的孔隙和裂缝从 CT 图像中分离提取出来，使岩体颗粒和孔隙裂缝的区分度更高[31]。图像分割一般采用阈值法，阈值选取的方法有最大类间方差法(Otsu)、双峰法、P 参数法等[32]，经过分割后的图像为二值图像，展现出白色(灰度值 1)和黑色(灰度值 0)两种色调，如图 2。



Figure 2. Shale binary image segmented by threshold method

图 2. 阈值法分割后的页岩二值图像



Figure 3. CT image of a core with cracks

图 3. 带有裂缝的页岩 CT 图像

由于岩石骨架颗粒具有较高的密度，因而具有较高的 CT 数，在二值图像中反映为白色。而其中零散分

布的斑点及线条代表页岩中的孔隙和裂缝，在二值图像中反映为黑色。对比图 2 和图 3，阈值法分割后的图像可以观测到三条裂缝贯穿岩心断面，更直观地显示了岩心的孔网络，并且相比原始 CT 图，可以观察到大量纳米级孔隙及其分布情况。图像切割的技术在利用 CT 表征岩石及煤的孔隙结构和渗流特征时不可或缺。

3.2. 扫描电镜技术

3.2.1. 原理

扫描电镜是以加速电子充当新光源制备的高分辨率电子显微镜。它通过检测电子束与式样相互作用所产生的二次电子、背散射电子、特征 X 射线等信号来对式样的结构进行观测。岩心的扫描电镜(SEM)图像是了解其微观孔隙结构特征的重要依据，二维的 SEM 图像中蕴含着有关岩心孔隙排布、孔喉分布等大量的三维信息。该法在岩土工程领域长期被广泛使用，图 4 为近 10 年来利用扫描电镜表征岩石孔隙结构的论文数。

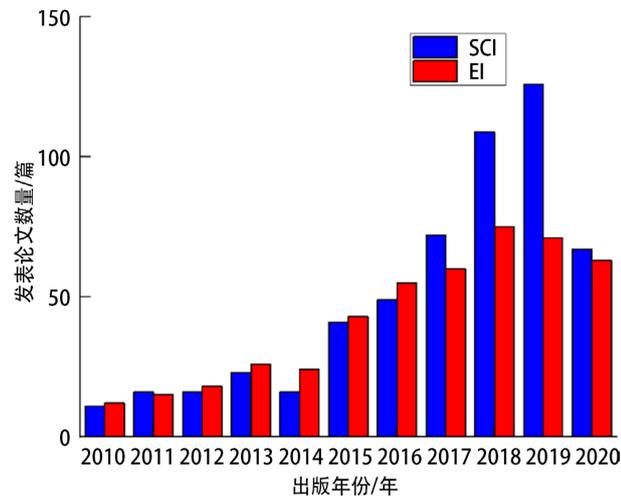


Figure 4. Number of papers on SEM study of pore structure of rocks from 2010 to 2020

图 4. 2010~2020 年应用 SEM 研究岩石孔隙结构的论文数

3.2.2. 孔隙结构表征

1、图像的处理

由扫描电镜所获得的数字图像，可由二维函数来定义。二维函数 $f(x, y)$ 中一组 (x, y) 所代表的坐标

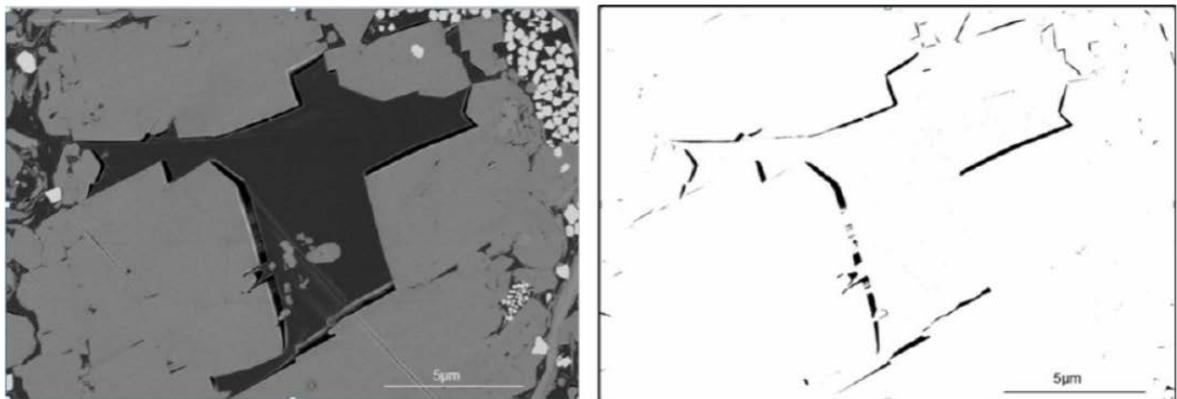


Figure 5. SEM image after binarization processing

图 5. 二值化处理后的 SEM 图像

作为一个像素点，而函数 f 作为任意坐标点 (x, y) 处的强度，称之为该点的灰度。数字图像中代表像素的坐标 (x, y) 和灰度 f 都是有限元离散值[33]。在进行图像处理时，可根据图像的颜色及灰度的不同，将图像分为二值图像、灰阶图像和彩色图像。二值图像的处理与 CT 图像的处理相同。灰阶图像不同于二值图像，其灰度的改变是由黑色到白色的渐变过程，函数的取值范围为 0~255，并且只能取整数，“0”代表黑色，“255”代表白色，阈值分割后效果如图 5 所示。彩色图像每个像素点有三个整数值分别代表红色、绿色和蓝色[34]，红绿蓝三色各有 256 阶亮度，可区分岩心中岩石骨架颗粒与孔隙裂缝，如图 6。



Figure 6. Color image after binarization processing
图 6. 二值化处理后的彩色图像

3.2.3. 图像处理阈值的选取

上文所述阈值选取的方法同样也适用于 CT 扫描和扫描电镜图像的处理。最大类间方差法(Otsu)假定一个界限灰度值 T 将整幅图像的灰度分为两组，分别为 T_1 和 T_2 ， T_1 和 T_2 对应的灰度分别为 $[0, 1, 2, \dots, T-1]$ 和 $[T, T+1, T+2, \dots, 255]$ [35]，当 T_1 和 T_2 两组的灰度值类间方差 σ 最大时， T_1 和 T_2 的区分度最高，二值化效果最好。类间方差的计算公式如下：

$$f(t) = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2$$

式中： ω_0 为 T_1 像素的个数在整体图像中所占的百分比； ω_1 为 T_2 像素的个数在整体图像中所占的百分比； μ_0 为 T_1 的平均灰度值； μ_1 为 T_2 的平均灰度值。

最佳阈值 $T = \arg \max (f(t))$ ，为使得类间方差最大时所对应的 t 值。

双峰法适用于灰度分布具有规律性的简单图像，图像与背景在灰度图中展现出双峰状态，其各具有一个波峰，而中间波谷处所对应的灰度值即为阈值 T ，如图 7。

P 参数法是判定背景占总图像面积的比例为 P ，此时选取一个阈值 T ，使得分割后的二值图像中背景像素总数在整幅图像像素中所占的比例也为 P [35]，则选取的 T 即为阈值。 P 参数法适用于目标与背景的波峰与波谷区分度较低的情况，并且适用于固定分辨率下，目标或背景的面积所占整个图像比例已知的情况。

扫描电镜技术在研究微孔隙、微裂缝较多的非常规油气储层时得到广泛应用，具有简单易行的特点。其视野宽广，景深大于透射电镜、远大于光学显微镜[36]，最大分辨率可达到 1 nm，并且倍率在 14~100,000 倍之间连续可调。同时，利用扫描电镜观测岩心时，可将岩心进行移动、倾斜、旋转，进而从多个角度对岩心内部孔隙结构进行观测，也具有对岩心式样无损的优点。

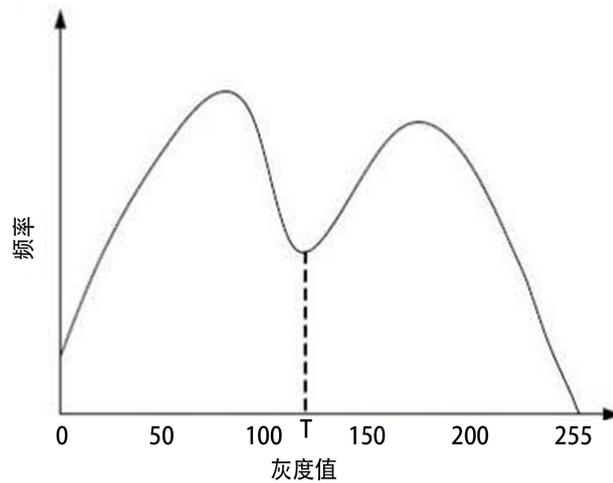


Figure 7. Selection of the threshold T of the bimodal method
图7. 双峰法阈值 T 的选取

3.3. 核磁共振技术

3.3.1. 原理

核磁共振技术(NMR)是目前表征岩石孔隙结构的最常用方法之一,其依据流体中 H 原子核与外加磁场的相互作用来表征岩石孔隙中流体的弛豫特征。H 原子核可以简化为磁棒模型(图 8),当期在外加磁场的作用下吸收一定频率的射频脉冲而发生磁化,发生共振吸收能量,并展现出一定的规律性(图 9)。当射频脉冲终止后, H 原子核将所吸收的能量释放,释放过程会被岩心外部的线圈所检测。由于 H 原子核在磁化后能量的释放速度与其数量成正比,因此根据这种信号的差别可得到孔隙流体的横向弛豫时间 T_2 分布。

岩石孔隙内流体的弛豫时间与固体表面对流体分子的作用力有关,影响这种作用力强弱的因素包括岩样内部孔隙大小、孔隙流体性质及固体表面性质。将数据经过处理绘制得到 T_2 谱分布曲线,进而分析岩石微观孔隙结构的演化过程。NMR 近些年来受到了学者们广泛的研究及应用。图 10 为 2010 年至 2020 年应用 NMR 研究岩心孔隙结构的论文发表数汇总,可以看出,随着核磁共振技术的不断发展,国际上每年发表的论文数呈显著增长趋势,近三年发表的论文数最多。

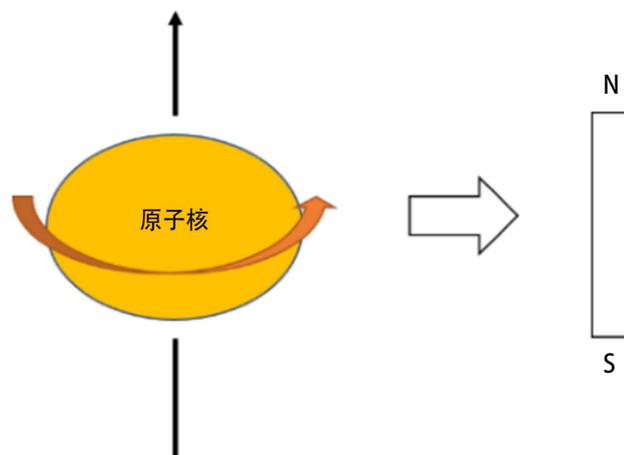


Figure 8. Magnetic rod simplified model of the nucleus
图8. 原子核的磁棒简化模型

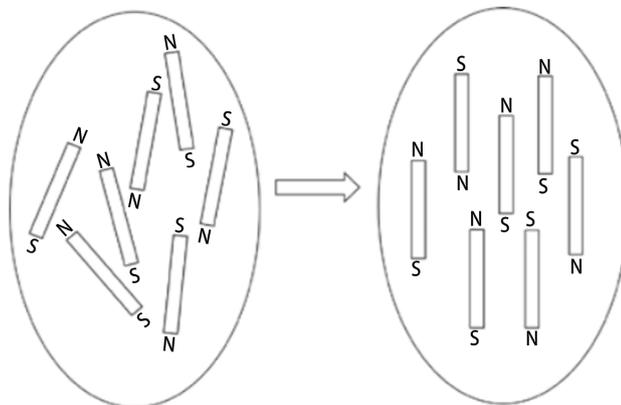


Figure 9. The change of spin nuclei in the presence of an external magnetic field

图 9. 自旋原子核在外加磁场作用下的变化

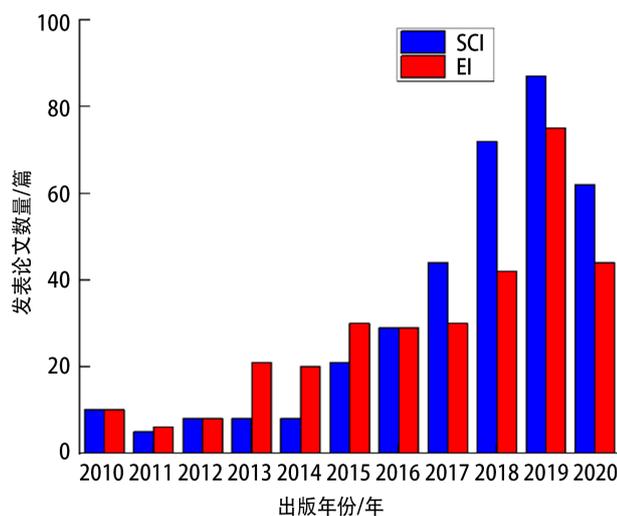


Figure 10. Number of papers on NMR study of pore structure of rocks from 2010 to 2020

图 10. 2010~2020 年应用 NMR 研究岩石孔隙结构的论文数

3.3.2. 孔隙结构表征

1、核磁共振 T_2 谱

核磁共振测量中，H 质子的弛豫时间分为两种，分别为 T_1 (纵向)弛豫时间和 T_2 (横向)弛豫时间。由于横向弛豫时间测量速度较快，因此在实验室中的采用率更高。 T_2 弛豫是三种弛豫机制的结合，分别为：整体流体过程、内部场梯度的扩散和表面相互作用：

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

式中： T_2 为流体横向弛豫时间； T_{2B} 为流体自由弛豫时间； T_{2D} 为体积弛豫时间； T_{2S} 为表面弛豫时间。

由于 T_{2B} 流体自由弛豫时间通常在 2~3 秒， $1/T_{2D}$ 通常 $< 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，二者相比 $1/T_{2S}$ 均可忽略不计，因此岩心中流体的横向弛豫时间 T_2 可表示为：

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2S}} = \rho \frac{S}{V} \tag{1}$$

式中： T_2 为流体横向弛豫时间； T_{2s} 为表面弛豫时间； ρ 为岩心横向表面弛豫率； S 为孔隙表面积； V 为孔隙体积。

S/V 为岩石的比表面积，其与岩石的形状因子和孔隙半径有关：

$$\frac{S}{V} = \frac{F_s}{R}$$

式中： F_s 为形状因子， R 为孔隙半径。

进而(1)式化简为：

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{F_s}{R}$$

可以看出，在核磁共振 T_2 谱中横向弛豫时间与孔隙半径具有正比关系。横向弛豫时间通常以 0.01~10,000 ms 的对数关系绘制，对于特定的 T_2 值对应的孔径，信号幅度越大，与孔径对应的孔体积越大。 T_2 谱根据岩心类型分为单峰和多峰，这意味着不同类型的岩心中微孔或大孔均可能占主导地位。绘制不同时间点的 T_2 谱，对比 T_2 谱峰值及横向弛豫时间的变化，实质是研究岩心孔隙结构衍变的过程。张娜等[37]对比未浸泡泥岩和在 NaCl 溶液中浸泡 15 天后的泥岩 T_2 谱，证实了泥岩水化损伤的实质是小孔隙被侵蚀贯通为大孔。此外， T_2 谱所围成的面积代表岩心中孔隙的总体积，根据不同学者对冻融循环后的不同岩心进行 NMR 测试，发现 T_2 谱曲线积分面积随冻融循环次数的增加而增大，说明岩心的损伤程度和岩心中孔隙数目随冻融过程而增加。由此可见，绘制 T_2 谱是核磁共振技术的核心。

2、核磁共振参数

由 T_2 谱得到的 T_2 截止值($T_{2cutoff}$)、BVI 值、FFI 值、 T_2 峰值(T_{2peak})、 T_2 几何均值(T_{2gm})是反映孔隙结构的重要参数，同时也是 NMR 表征微观孔隙的优势所在。 $T_{2cutoff}$ 可精确的区分与小孔有关的毛细管水及结合水(BVI)和与大孔有关的自由流动水(FFI)，从而进一步确定岩心的可动流体及束缚流体体积。岩芯中可动流体体积是评价储层物性的重要参数，它对应着储层的渗流能力。目前国内外通常使用饱和离心法计算 $T_{2cutoff}$ [38]，通常情况下，BVI 对应岩心束缚水孔隙度累加曲线的最大值，而 FFI 可通过 NMR 孔隙度的累积总振幅减去 BVI 的值得到，利用 $T_{2cutoff}$ 计算 BVI 与 FFI 的效果如图 11。

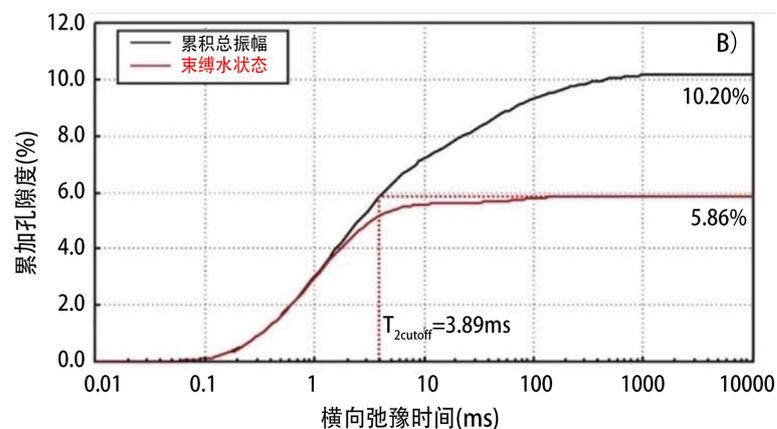


Figure 11. $T_{2cutoff}$ value determination method

图 11. T_2 截止值确定方法

根据国内多位学者对长庆油田延长组、克拉玛依油田八区下乌尔禾组及鄂尔多斯盆地延长组岩样 $T_{2cutoff}$ 的计算[39] [40]，发现由于不同地区的地层和流体性质不同，导致 $T_{2cutoff}$ 具有区域变异性，而这

种巨大变化反映了孔喉分布的复杂性以及不同岩心之间孔喉分布的巨大差异。 T_{2peak} 对应 T_2 谱上峰值最高处的 T_2 值,它代表岩芯中主要的孔径。 T_{2gm} 通过 T_2 谱中不同孔隙度分量与之对应弛豫时间乘积的 ϕ_{NMR} 次方根求得,其反应了岩心微观孔隙结构参数。部分学者认为 T_{2gm} 与渗透率的相关性差,但与可动流体百分数成半对数关系(图 12)。试验证明, T_{2gm} 与驱替效率和总驱油效率呈正比,而与渗吸效率呈反比(图 13)。

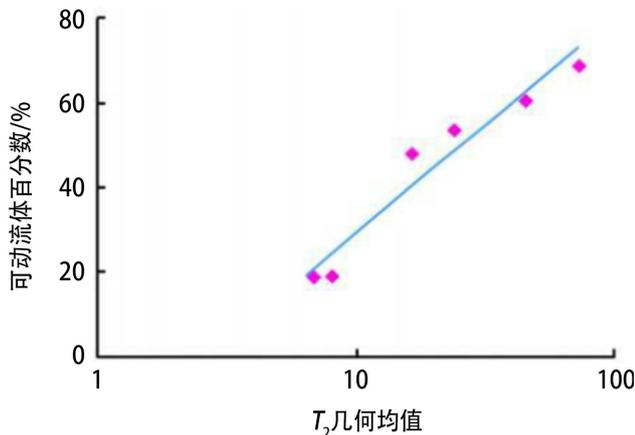


Figure 12. Correspondence between T_{2gm} and the percentage of movable fluid

图 12. T_{2gm} 与可动流体百分数对应关系

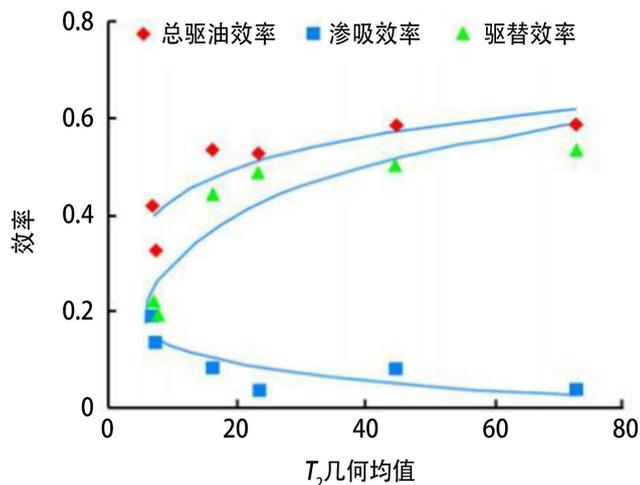


Figure 13. Correspondence between T_{2gm} and total oil displacement efficiency, imbibition efficiency, and displacement efficiency

图 13. T_{2gm} 与总驱油效率、渗吸效率、驱替效率对应关系

核磁共振技术基于流体弛豫特征,可以检测岩石的孔隙度、渗透率、流体饱和度等物性参数,有效区分岩心中的流体和岩石骨架颗粒,其表征速度快,具有内在分辨率高,对岩心无损等优点,目前在岩土工程领域被广泛使用。

3.4. N_2 吸附技术

3.4.1. 原理

N_2 吸附技术广泛用于测量页岩或致密砂岩的微观孔隙结构。利用气体与固体表面的吸附关系,在

一定的压力和温度下,当 N_2 与岩心接触时,部分气体分子进入岩心中的微纳米孔隙,并被固体表面所捕获从而冷凝吸附,此时通过测定平衡吸附量,利用理论模型来计算得到岩心的比表面积,进而通过比表面积、吸附-脱附曲线类型、孔体积、孔径类型来细致刻画岩心的微观孔隙结构。 N_2 吸附法起源较晚,但近几年在岩土工程领域备受重视,图 14 为近十年以来利用 N_2 吸附技术研究岩石孔隙结构的论文数目。

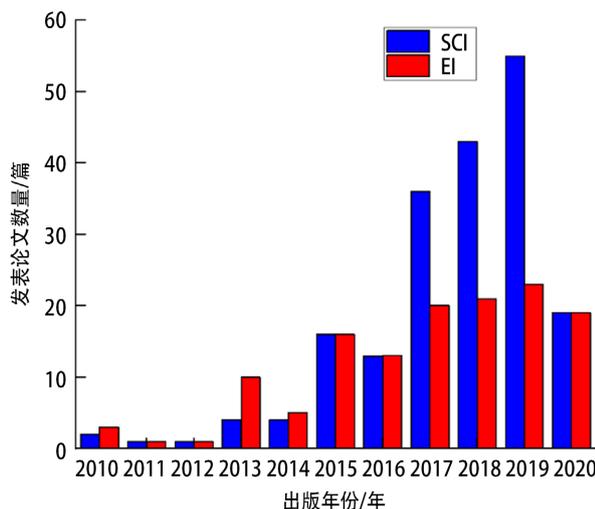


Figure 14. Number of papers applying N_2 adsorption method to study rock pore structure from 2010 to 2020

图 14. 2010~2020 年应用 N_2 吸附法研究岩石孔隙结构的论文数

3.4.2. 孔隙结构表征

1、吸附 - 脱附曲线

在温度不变的情况下,以相对压力 P/P_0 为横坐标, N_2 的吸附体积为纵坐标,可以绘制出 N_2 的吸附-脱附曲线,其中 P 为系统的气体蒸汽压力, P_0 为试验温度下的冷凝压力。在进行 N_2 吸附试验时, N_2 随着相对压力的升高逐渐吸附在毛细管中,当达到最大测量孔隙半径时,吸附和凝聚过程终止。之后伴随相对压力的降低,吸附在毛细管上的 N_2 开始解吸,当压力减小到与某一半径相对应时,毛细孔中的 N_2 开始蒸发。若凝聚与蒸发的相对压力 P/P_0 值相同,则吸附与脱附曲线重合;若不同,则吸附与脱附曲线之间会形成滞后环[41]。通常情况下,滞后环的产生是由于开放型孔的存在,具体可分为四类:两端开放的圆筒形毛细孔(图 15(a))、细颈和广体孔或墨水瓶孔(图 15(b))、两端开口的楔形孔(图 15(c))、微孔(图 15(d))。封闭孔不能产生滞后环。

图 15(a)滞后环较窄,吸、脱附曲线在一定相对压力范围内变化极快,相互平行且均垂直于 x 轴,这反映岩心内孔径分布范围较窄,且分布相对均匀;图 15(b)滞后环较宽,脱附曲线相比吸附曲线更陡,反映岩心孔型较多,孔径分布较宽;图 15(c)滞后环较窄,吸附-脱附曲线较陡,最终未达到吸附饱和,表明岩心内孔隙结构不均匀,形成了似片状颗粒组成的槽状孔。图 15(d)滞后环较窄,吸附-脱附曲线随相对压力的升高变化较为平缓,最终达到吸附饱和,代表岩心内孔隙多为微孔(狭缝孔)。由此,根据滞后环的形状可以确定孔的形状,进而利用不同的孔模型来计算孔径分布与比表面积[42]。

2、孔的结构参数

通过 N_2 吸附试验可以确定孔半径、孔隙容积、孔径分布及比表面积,进而判断岩心孔隙度及渗透率。

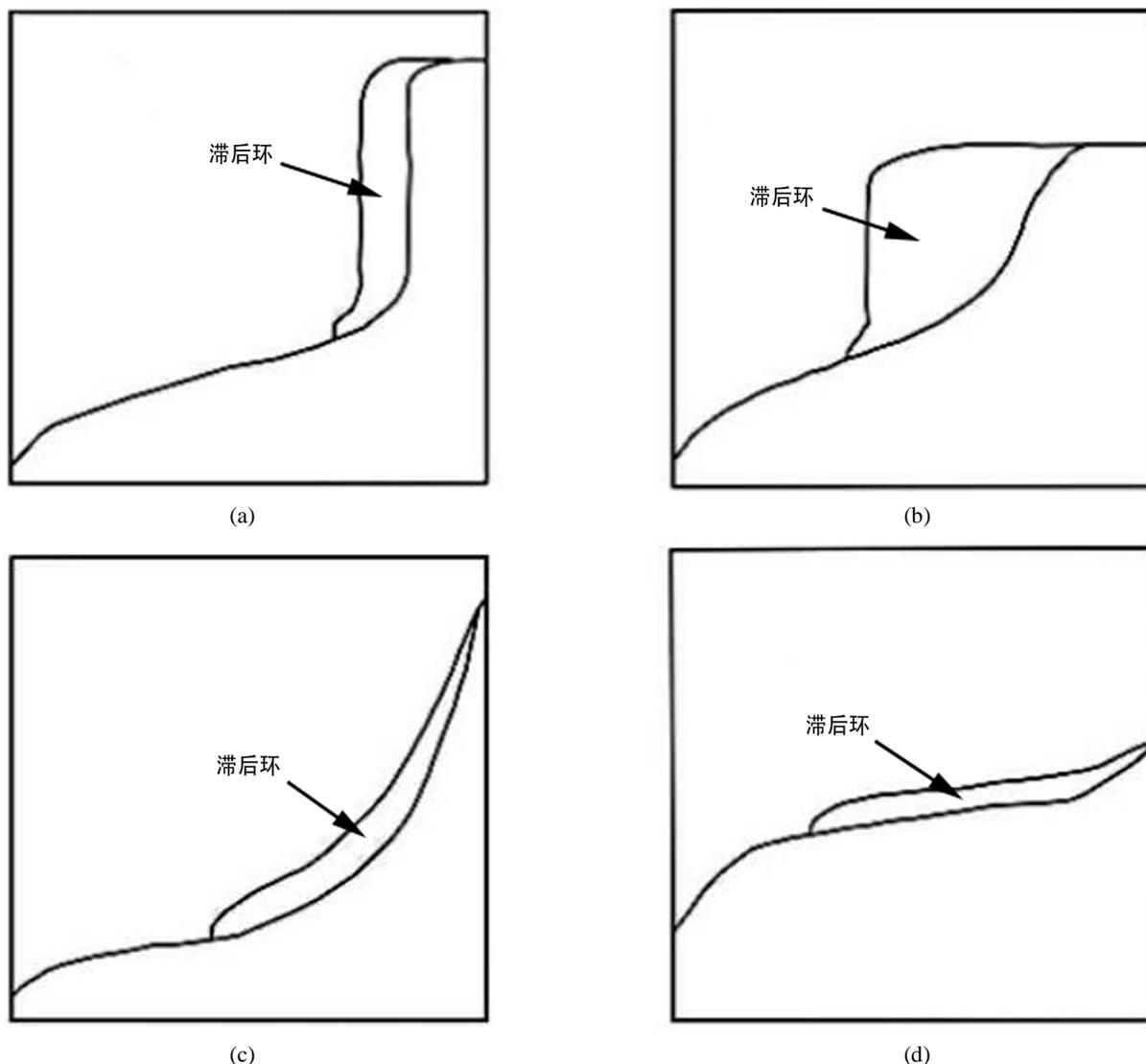


Figure 15. Four types of hysteresis loop
图 15. 四种类型的滞后环

通过吸附-脱附曲线，可以利用 Kelvin 公式来计算孔半径，Kelvin 公式假设岩心中的孔隙均为圆柱状，计算公式如下：

$$r_k = -\frac{2\gamma V_m}{RT \ln(P/P_0)}$$

式中： r_k 为孔的 Kelvin 半径； γ 为在 N_2 沸点时的表面张力； V_m 为液态 N_2 时的摩尔体积； R 为气体常数； T 为 N_2 的沸点(77K)； P/P_0 为相对压力。

根据孔平均半径可将孔分为三类：孔径 ≤ 2 nm 为微孔，孔径在 2~50 nm 为中孔，孔径 ≥ 50 nm 为大孔。通常，高相对压力的区域对应于大孔径，当相对压力 P/P_0 在 0.05~0.35 之间时， N_2 在孔隙表面发生吸附，可以利用 BET 方程计算岩心比表面积；当相对压力 $P/P_0 > 0.4$ 后，孔隙中开始发生毛细凝聚现象，此时采用 BJH 法测量孔隙尺寸[43]，BJH 法只适用于孔径 > 5 nm 的中孔，而大孔则通常采用压汞技术测量。

基于 N_2 吸附比表面积计算的 BET 方程如下：

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{(V_m C)P_0}$$

式中：\$V\$ 为总吸附量；\$P\$ 为平衡吸附气压力；\$P_0\$ 为吸附温度下的吸附质饱和蒸气压；\$V_m\$ 为单分子层饱和吸附量；\$C\$ 为 BET 方程常数。

由 \$V_m\$ 可求得固体表面铺满单分子层时所需的分子数，通过下式可得到岩心比表面积：

$$S = A_m \times N_A \times \frac{V_m}{22400 W} \times 10^{-18}$$

式中：\$S\$ 为比表面积；\$A_m\$ 为 \$N_2\$ 吸附分子的平均截面积，\$0.162 \text{ nm}^2\$；\$N_A\$ 为阿伏伽德罗常数；\$V_m\$ 为单分子层饱和吸附量，\$W\$ 为岩心的重量。

孔径分布是指不同孔径的孔容积随孔径尺寸的变化率，BJH 法是在相对压力 \$P/P_0 > 0.4\$ 时，基于 Kelvin 毛细凝聚理论来计算孔容积，进而确定孔径分布的一种方法，其公式如下：

$$r_m = \frac{2\gamma V_m}{RT \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) + t}$$

式中：\$r_m\$ 为发生毛细凝聚时的孔半径；\$\gamma\$ 为吸附质的表面张力；\$V_m\$ 为吸附质的分子体积；\$R\$ 为气体常数；\$T\$ 为 \$N_2\$ 的沸点 (\$77 \text{ K}\$)；\$P/P_0\$ 为发生毛细凝聚时相对压力。

对于非常规油气储层，通常 BJH 平均孔径、BJH 总孔体积、BET 比表面积与岩心孔隙度、渗透率均具有正相关性，是评价储层物性特征的重要参数。而利用 \$N_2\$ 吸附技术获得岩心的比表面积、孔径分布等参数的操作相对简便，可以表征 \$1\sim 200 \text{ nm}\$ 范围的微观孔隙结构，并且对致密岩样无破坏。但该法的试验时间较长，对选取的理论模型有很大的依赖性，选用不同模型可能会导致结果偏差较大，因此在工程的实际使用中会遇到诸多难题，无法保证表征结果的绝对精确。

3.5. 压汞技术

3.5.1. 原理

压汞技术可分为高压压汞和恒速压汞两种，多用于储层孔喉特征和渗流能力的表征。将汞在一定压

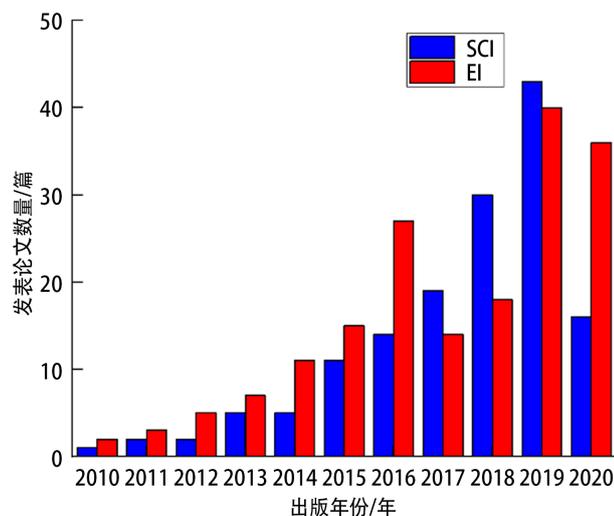


Figure 16. Number of papers applying mercury injection technology to study rock pore structure from 2010 to 2020

图 16. 2010~2020 年应用压汞技术研究岩石孔隙结构的论文数

力下压入岩心内部孔喉，使岩心中微纳米孔隙被依次填满。当突破压力趋于稳定时，代表液态汞基本充满岩心的内部吼道，此时的毛细管半径即为孔喉的通道半径，进入孔喉中的汞体积即为吼道所连通的孔隙体积。图 16 为近 10 年利用压汞技术表征岩石孔隙结构的论文数，可见压汞技术在岩土工程领域的应用趋于快速增加。

3.5.2. 孔的结构参数

利用压汞技术可以定量描述与孔喉结构分布有关的毛细管参数。以排驱压力、最大孔喉半径、饱和度中值压力、分选系数为例，排驱压力是汞开始进入岩心时的压力；最大孔喉半径是指压力为排驱压力时所对应的孔半径，是用于描述岩心渗透率好坏的重要参数；饱和度中值压力是指岩心内汞饱和度为 50% 时对应的毛细管压力，其值越小代表岩心内孔喉半径越大，岩心渗透率越好，储层的产能越高；分选系数反映了孔喉大小分布的均匀程度[44]，其值越接近 1，代表孔喉大小分布越均匀，储层的均匀性越高。

基于压汞技术，Swanson 引入了与渗透率有关的 Swanson 因子，定义为 S_{Hg}/P_c 曲线上的顶点(图 17)[45]，该点所对应的孔喉半径被 Pittman 称为 R_{apex} [46]，被视为连通性较好的大孔隙与连通性较差的小孔隙之间的分界点[47]，基于此，Pittman 提出了与压汞技术有关的 Pittman 渗透率模型。

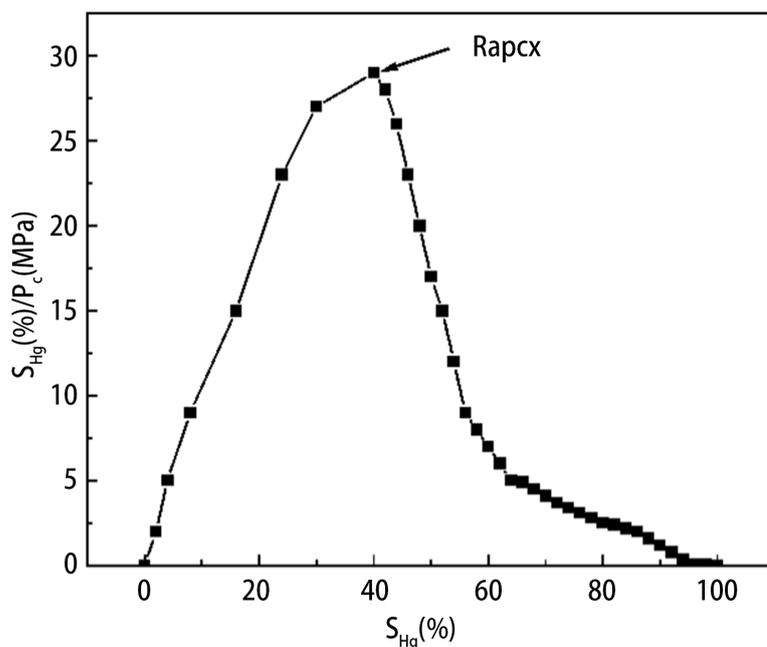


Figure 17. The R_{apex} on S_{Hg}/P_c curve

图 17. S_{Hg}/P_c 曲线上的 R_{apex}

压汞技术通过对压汞过程中压力涨落的监测和计算获得孔喉的大小及数量[48]，进而有效的区分非常规油气储层岩心中的孔隙和吼道，但其缺点诸多：① 高压下将液态汞会对致密孔喉产生无法恢复的破坏，致使孔喉半径扩大，导致测量结果偏大；② 压汞技术不能反映非连通孔隙的体积③液态汞是剧毒物质，试验中存在安全隐患。

综上所述，通过目前几种常用于表征非常规油气储层孔隙结构技术的简述，笔者汇总建立了如下表格(表 1)，展现几种方法的优缺点，并利用图表展示几种表征技术所适用的孔径范围(图 18)，望对试验时方法的选取有所帮助。

Table 1. Comparison of pore characterization techniques
表 1. 孔隙表征技术对比

表征方法	优点	缺点	孔径范围
CT 扫描	① 反映直观 ② 易于获取岩心骨架信息 ③ 对岩心无损	① 三维重构时间长 ② 大尺度岩心 X 射线透过率低 ③ 岩心内存在流体时，难以区分流体与多孔介质骨架	>50 nm
扫描电镜	① 成像清晰明确 ② 可从多个角度对岩心孔隙结构进行观测 ③ 对岩心无损	① 精度不足 ② 扫描时间长	微米~毫米级
核磁共振	① 表征迅速，分辨率高 ② 岩心内存在流体时，可以很好的区分流体与多孔介质骨架 ③ 对岩心无损	① 岩心中含顺磁性物质时，易对测量结果造成影响	纳米级~80 μm
N_2 吸附	① 可同时获得多种孔的结构参数 ② 对岩心无损	① 受选取模型的影响大 ② 试验时间长	0.35~200 nm
压汞技术	① 可有效区分孔隙和吼道 ② 可测孔隙半径范围大	① 易破坏岩心孔隙结构 ② 试验安全问题	100 nm~950 μm

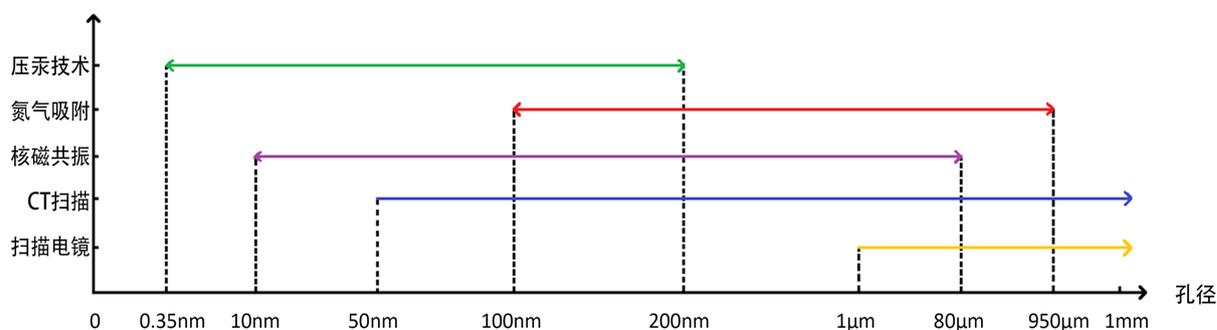


Figure 18. Comparison of application scope of different characterization techniques
图 18. 不同表征技术适用范围对比

4. 非常规油气储层评价参数

非常规油气储层的评价是在明确了岩层孔隙结构的基础上进行的，一般而言，储层的评价方法分为综合分类储层评价、综合定量储层评价、随钻评价[49]。综合分类、综合定量法均是通过筛选储层重要的评价参数并根据其权重比来评价储层。针对不同评价参数，学者们进行了诸多研究，王帅等[50]利用守恒方程得出了储层渗透率越大，物性越差的结论；王钟远[51]通过压汞试验得到储层微观孔隙的分形维数，发现分形维数越大，储层孔喉分选性越好，孔喉尺寸分布越均匀；庞振宇等[52]研究甘谷驿油田特低渗储层后发现，可动流体饱和度的高低是孔隙大小、形态及矿物成分等因素的综合反映，利用可动流体饱和度可以确定储层可采量的上限；王继平等[53]利用核磁共振技术研究了低渗致密砂岩储层的孔隙结构，认为储层的束缚水饱和度与渗透率有一定的负相关关系，储层束缚水饱和度越高，孔喉发育程度越差，渗透率越高，物性越差。综合学者的研究发现，评价储层的参数繁多，不同参数代表着储层不同方面的特性。本文以可动流体饱和度、分形维数及渗透率为例，对储层评价参数做出简要叙述。

4.1. 分形维数

非常规油气储层中的岩层孔隙结构复杂并且不规则，使其通常具有良好的自相似性。分形几何学的原理是对于拥有自相似性的微观孔隙结构，直径大于 r 的孔隙数量 $N(r)$ 与 r 具有 $N(r) \propto r^{-D_f}$ 的函数关系，其中 D 为分形维数。

分形维数和储层物性的关系在于可以利用分形维数来评价储层中岩石微观孔隙的分布情况。分形维数越大，孔隙的结构越复杂，分布越不均匀，其表面越粗糙，从而表现出储层连通性和渗透性差，储层物性差的情况。当储层拥有较小的分形维数时，其微观非均质性弱，孔隙分布均匀表面光滑，储层连通性强易于油气在其中流动，表现出储层物性好的特点。由此可见，分形维数可以直观地评价非常规油气储层的物性特征，进而根据不同的孔隙情况对储层加以分类，对非常规油气的开采具有重要意义。

4.2. 可动流体饱和度

非常规油气储层中的油、气、水三相呈现出束缚流体和自由流体两种[54]。由于部分束缚流体吸附在孔隙壁表面，导致储层中本就致密的孔隙进一步细微，甚至发生堵塞，从而限制自由流体的流通渠道，使储层的渗流性能变差。可动流体饱和度是评价非常规油气储层渗流性能的重要参数，其代表岩石中可动流体占整个岩石中流体的百分比。根据可动流体饱和度可将非常规油气储层分为表 2 中的五类：

Table 2. Reservoir seepage performance
表 2. 储层渗流性能

储层渗流性能	可动流体饱和度(M)
极好	$M > 65\%$
较好	$65\% > M > 50\%$
中等	$50\% > M > 35\%$
较差	$35\% > M > 20\%$
极差	$M < 20\%$

可动流体饱和度是反映储层渗流特性的直观参数，并且可用来评价储层的开发潜力。其同时也受多种因素的控制，如孔喉平均半径，吼道连通性，渗透率，储层的粘土类型等，因此利用 NMR 获得储层岩石的孔隙结构是计算可动流体饱和度的前提。相关学者研究发现，渗透率对可动流体饱和度有明显的正相关关系，其影响系数达到 0.834，并且随着渗透率的增大，可动流体饱和度的增大速率逐渐减小，当渗透率为 $0.62 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时，可动流体饱和度为最小。同时，可动流体饱和度与孔喉平均半径、孔喉连通性，孔喉总体积均表现出正相关，综合展现为孔喉越多连通性越好，可动流体饱和度越大，储层越容易开采且潜力越大的特性。

4.3. 渗透率及模型

渗透率是评价储层渗流特征的重要参数之一，其代表储层岩石允许流体通过的能力[55]。渗透率无法利用孔隙表征技术直接获取，往往通过经验公式或渗透率物理模型求得。基于 NMR 的 T_2 截止值计算可动流体和束缚流体的体积，进而利用 Coates 模型或 SDR 模型计算渗透率。Coates 模型适用于含有水或碳氢化合物的地层，其根据可动流体(FFI)与束缚水(BVI)的比值计算渗透率：

$$K = \left(\frac{\varnothing}{C}\right)^4 \left(\frac{FFI}{BVI}\right)^2$$

式中： ϕ 为核磁共振孔隙率分数； C 为常数； FVI 为可动流体体积； BVI 为束缚水体积。

SDR 模型由 Kenyon 等人[56]提出，其适用于仅含水的地层，通常用于砂岩渗透率的计算，计算公式如下：

$$K = C\phi^4 T_{2gm}^2$$

式中： C 为常数； ϕ 为核磁共振孔隙率分数； T_{2gm} 为 T_2 分布的几何平均值。

一般认为，基于核磁共振的两种渗透率模型可以提供与孔隙大小相关的更准确渗透率信息，但由于两种模型中的常数 C 具有地区差异性，其值根据地区或储层岩性的不同具有很大的变化。因此为了求取更加精准的渗透率数值，需要对地区相应储层进行岩性物理试验，结合地区经验参数，从而选取更为合理的计算公式。

5. 结论

1) 非常规油气是我国油气的重要来源，储层中岩石存在微纳米孔，结构致密复杂，物性差，非均质性强。渗透率是反映岩石内部输送油气或碳氢化合物能力的重要参数，非常规油气储层的渗透率与孔隙度相关性差，孔隙的贯通情况相比孔隙数目和总体积更能反映储层富集油气的潜力。

2) 目前常用的微观孔隙表征技术有 CT 扫描、扫描电镜、核磁共振、 N_2 吸附以及压汞技术。任何单一表征技术在量化储层微观孔隙时都是不全面的，因此鼓励将多种技术相结合，通过技术互补，以全面地表征储层的孔隙结构。

3) 仅凭孔隙度、渗透率无法全面评价非常规油气储层的物性特征，可借助分形维数、可动流体饱和度等参数来进行孔隙结构的定量描述。工程中应结合多种评价参数，通过求取合理权重系数来获得综合评价指标，进而利用综合评价指标对储层进行分类评价。

参考文献

- [1] 张鹏飞, 闫东, 卞德存. 基于水压致裂的煤层气开采研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(10): 56-58.
- [2] 赵御庭, 李霏, 陈铭谦, 殷存敏, 张凯. 非常规油气储层的微观孔喉结构特征综述[J]. 地下水, 2019, 41(6): 106-108.
- [3] 汪贺, 师永民, 徐大卫, 陈旋, 李拉毛才旦. 非常规油气储层孔隙结构表征技术及进展[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 21-30.
- [4] 程希, 许杰, 马宇含, 王骏, 周虎. 非常规油气储层骨架与岩性识别方法[J]. 石油管材与仪器, 2016, 2(2): 10-14.
- [5] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 崔景伟, 苏玲, 李婷婷. 非常规油气致密储层微观孔喉结构表征新技术及意义[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(3): 78-86.
- [6] Settari, A. and Cleary, M.P. (1984) Three-Dimensional Simulation of Hydraulic Fracturing. *Journal of Petroleum Technology*, **36**, 1177-1190. <https://doi.org/10.2118/10504-PA>
- [7] England, K. (2004) Hydraulic Fracturing Method. Patent No. US6776235B1.
- [8] Jennings Jr., A.R. and Sprunt, E.S. (1995) Unique Method of Hydraulic Fracturing. Patent No. US5402846A.
- [9] 陈绍杰. 低渗透煤层高压注水驱替瓦斯机理及应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [10] 苑坤. 水力压裂从地球深处获取天然气[N]. 中国矿业报, 2019-10-23(007).
- [11] Boudet, H., Clarke, C., Bugden, D., Maibach, E., Roser-Renouf, C. and Leiserowitz, A. (2014) "Fracking" Controversy and Communication: Using National Survey Data to Understand Public Perceptions of Hydraulic Fracturing. *Energy Policy*, **65**, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.017>
- [12] 赵荣奎, 郑新军, 周成, 范小伟, 范亚锋. 油田水平井钻井技术现状与发展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 34(12): 94.
- [13] 梁中杰. 油田水平井钻井技术现状与发展趋势探究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(21): 185-186.
- [14] 王忠伟. 国内外水平井钻井技术及发展方向[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(10): 237.

- [15] Livingstone, J.I. (2006) Reverse Circulation Directional and Horizontal Drilling Using Concentric Coil Tubing. U.S. Patent No. 7066283.
- [16] Sorgun, M. and Ozbayoglu, M.E. (2011) Predicting Frictional Pressure Loss during Horizontal Drilling for Non-Newtonian Fluids. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **33**, 631-640. <https://doi.org/10.1080/15567030903226264>
- [17] 杨国彬, 杨华, 吴萌, 陈雷, 张洪良. 浅层大位移三维水平井钻井技术在超重稠油油田的应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(1): 26-29+7.
- [18] 刘人铜. 致密油水平井环保钻井液体系研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [19] 潘继平. 页岩气开发现状及发展前景——关于促进我国页岩气资源开发的思考[J]. 国际石油经济, 2009, 17(11): 12-15.
- [20] 王海柱, 李根生, 郑永, Sepehmoori, K., 沈忠厚, 杨兵, 石鲁杰. 超临界 CO₂ 压裂技术现状与展望[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 116-126.
- [21] 张广东, 周文, 吉尚策, 刘建仪, 张键, 杨火海. CO₂ 分子置换法开采页岩气实验[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(3): 366-371.
- [22] 黄家国, 许开明, 郭少斌, 郭合伟. 基于 SEM、NMR 和 X-CT 的页岩储层孔隙结构综合研究[J]. 现代地质, 2015, 29(1): 198-205.
- [23] 李易霖. 致密砂岩储层微观孔喉结构精细表征[D]: [博士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- [24] 贾宁洪, 吕伟峰, 常天全, 李彤, 杨济如, 马德胜, 程林松, 刘庆杰, 杨胜建. 高效无损岩心孔隙度精确测量新方法[J]. 石油学报, 2018, 39(7): 824-828+844.
- [25] 范二平, 唐书恒, 张成龙, 姜文. 湘西北下古生界黑色页岩扫描电镜孔隙特征[J]. 古地理学报, 2014, 16(1): 133-142.
- [26] 刘标, 姚素平, 胡文瑄, 曹剑, 解德录. 核磁共振冻融法表征非常规油气储层孔隙的适用性[J]. 石油学报, 2017, 38(12): 1401-1410.
- [27] 李昊远. 氮气吸附法的致密砂岩孔隙结构分析[J]. 云南化工, 2019, 46(12): 87-90+94.
- [28] 慕月. 恒速压汞法研究低渗透储层微观孔隙结构特征——以大庆油田为例[J]. 石油知识, 2019(6): 52-53.
- [29] 毛灵涛, 毕玉洁, 左建民, 郝丽娜, 王欢. 基于 CT 图像分析建立岩土材料数值模型的方法研究[J]. CT 理论与应用研究, 2010, 19(4): 27-34.
- [30] 毛灵涛, 安里千, 王志刚, 石鹏, 商雅楠. 煤样力学特性与内部裂隙演化关系 CT 实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 408-411.
- [31] 杨更社, 刘慧. 基于 CT 图像处理技术的岩石损伤特性研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5): 463-468.
- [32] 贾利春, 张超平, 周井红. 结合 CT 技术的页岩水化损伤规律研究[J]. 断块油气田, 2017, 24(2): 214-217
- [33] 王佳部. 基于数字图像技术的陆相页岩微观结构特征研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- [34] 陈沙, 岳中琦, 谭国焕. 基于数字图像的非均质岩土工程材料的数值分析方法[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 956-964.
- [35] 张增康, 马卫红. 基于双峰法的纱线图像阈值分割研究[J]. 化纤与纺织技术, 2018, 47(3): 34-38.
- [36] 余凌竹, 鲁建. 扫描电镜的基本原理及应用[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(5): 85-93.
- [37] 张娜, 赵方方, 王水兵, 李家斌, 孙冻炎. 岩石孔隙结构与渗流特征核磁共振研究综述[J]. 水利水电技术, 2018, 49(7): 28-36.
- [38] Zheng, K., Xu, H., Chen, J., *et al.* (2013) Movable Fluid Study of Low Permeability Reservoir with Nuclear Magnetic Resonance Technology. *Geoscience*, **27**, 710-718.
- [39] 闫子旺, 张红玲, 周晓峰, 罗超, 宋广宇, 辛一男. 鄂尔多斯盆地西南部长 8 超低渗透砂岩核磁共振 T₂ 截止值研究[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(5): 128-131.
- [40] Wang, W.-M., Guo, H.-K. and Ye, Z.-H. (2001) The Evaluation of Development Potential in Low Permeability Oil-field by the Aid of NMR Movable Fluid Detecting Technology. *Acta PetroleiSinica*, **22**, 40-44.
- [41] 张大智. 利用氮气吸附实验分析致密砂岩储层微观孔隙结构特征——以松辽盆地徐家围子断陷沙河子组为例[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(6): 898-908.
- [42] 谢晓永, 唐洪明, 王春华, 白蓉, 王自力. 氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比[J]. 天然气工业, 2006(12): 100-102.

- [43] 李建超. 泥页岩储层微观孔隙结构模型及吸附能力研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- [44] Aliakbardoost, E. and Rahimpour-Bonab, H. (2013) Effects of Pore Geometry and Rock Properties on Water Saturation of a Carbonate Reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **112**, 296-309. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.11.018>
- [45] Swanson, B.F. (1981) A Simple Correlation between Permeabilities and Mercury Capillary Pressures. *Journal of Petroleum Technology*, **33**, 2498-2504. <https://doi.org/10.2118/8234-PA>
- [46] Pittman, E.D. (1992) Relationship of Porosity and Permeability to Various Parameters Derived from Mercury Injection-Capillary Pressure Curves for Sandstone. *AAPG bulletin*, **76**, 191-198. <https://doi.org/10.1306/BDF87A4-1718-11D7-8645000102C1865D>
- [47] 程辉, 王付勇, 宰芸, 周树勋. 基于高压压汞和核磁共振的致密砂岩渗透率预测[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(3): 122-132.
- [48] 安建桥. 恒速压汞技术在储层孔隙结构研究中的特点及应用[J]. 石化技术, 2017, 24(3): 160.
- [49] 董福奇. 石油地质勘探与储层评价方法研究[J]. 电子制作, 2015(5): 237.
- [50] 王帅, 梁海峰, 芦文浩, 孙敏, 赵彤彤, 张凯. 储层渗透率对水合物降压联合注热分解的影响[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(5): 74-78.
- [51] 王钟远. 分形维数在储层微观孔隙结构研究中的应用[J]. 石化技术, 2017, 24(3): 111.
- [52] 庞振宇, 李艳, 赵习森, 党海龙, 李剑, 段景杰. 特低渗储层可动流体饱和度研究——以甘谷驿油田长 6 储层为例[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 702-708.
- [53] 王继平. 基于可动水饱和度的致密砂岩储层分类评价[C]//西安石油大学、西南石油大学、陕西省石油学会. 2017 油气田勘探与开发国际会议(IFEDC 2017)论文集. 西安: 西安华线网络信息服务有限公司, 2017: 2244-2255.
- [54] 杨正明, 苗盛, 刘先贵, 黄冬梅, 祁晨琛. 特低渗透油藏可动流体百分数参数及其应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007(2): 96-99+178-179.
- [55] 邹良志, 刘清华. 核磁共振测井渗透率模型分析[J]. 国外测井技术, 2011, 31(3): 27-31.
- [56] Kenyon, W.E., Day, P.I., Straley, C. and Willemsen, J.F. (1988) A Three-Part Study of NMR Longitudinal Relaxation Properties of Water-Saturated Sandstones. *SPE Formation Evaluation*, **3**, 622-636. <https://doi.org/10.2118/15643-PA>