

基于NMR的煤孔隙结构与渗流特征研究进展

李姝佳, 刘恺德, 郑涵, 姚凯文

西京学院陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2022年5月9日; 录用日期: 2022年6月8日; 发布日期: 2022年6月15日

摘要

煤孔隙结构及渗流特性方面的研究对煤矿瓦斯灾害防治具有重要意义。文中介绍了低场核磁共振技术(NMR)的基本原理, 综述了孔隙结构与渗流特性方面的研究成果。结果表明: 核磁共振技术是由于煤孔隙内含氢原子核受到射频磁场的作用发生偏转产生共振现象, 由于纵向弛豫时间受分子扩散的影响测量时间较长, 因此选用横向弛豫时间更能精确反映煤储层孔隙度; 相对于其他研究方法, 通过核磁共振弛豫谱可以快速、准确地得到孔径分布、孔隙度、流体分布及渗透率等物性参数, 反映其微观孔隙结构信息; 且在获取弛豫信号的基础上, 结合一些辅助方法即可实现对煤渗流情况的实时观测。但是核磁共振弛豫谱分布图与其相对渗透率的具体关系还未可知。因此, 今后的研究应致力于建立弛豫谱与相对渗透率两者之间的函数关系。

关键词

核磁共振, 煤, 孔隙结构, 流体分布, 渗流特性

A Review of Pore Structure and Seepage Characteristics of Coal Samples Based on NMR

Shujia Li, Kaide Liu, Han Zheng, Kaiwen Yao

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: May 9th, 2022; accepted: Jun. 8th, 2022; published: Jun. 15th, 2022

Abstract

The research on coal pore structure and seepage characteristics is of great significance to the prevention and control of coal mine gas disasters. This paper introduces the basic principle of

low-field nuclear magnetic resonance (NMR) technology, and summarizes the research results of pore structure and seepage characteristics. The results show that the nuclear magnetic resonance technology is due to the deflection of the hydrogen-containing atomic nucleus in the coal pore caused by the radio frequency magnetic field, and the longitudinal relaxation time is affected by the molecular diffusion. The measurement time is longer, so the transverse relaxation time can accurately reflect the porosity of the coal reservoir. Compared with other research methods, the physical parameters such as pore size distribution, porosity, fluid distribution and permeability can be quickly and accurately obtained by NMR relaxation spectrum, reflecting the microscopic pore structure information. On the basis of obtaining relaxation signals, combined with some auxiliary methods, real-time observation of coal seepage can be realized. However, the specific relationship between the NMR relaxation spectrum distribution and its relative permeability is still unknown. Therefore, future research should focus on establishing the functional relationship between relaxation spectrum and relative permeability.

Keywords

Nuclear Magnetic Resonance, Coal Sample, Pore Structure, Fluid Distribution, The Seepage Characteristics

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

煤基质是一种含有大量微孔隙和裂隙的天然孔隙-裂隙双重介质, 基质表面和内部微孔是瓦斯的主要储存空间, 而割理则为瓦斯的主要流动通道[1] [2]。瓦斯在煤层中的富集与渗流, 和煤基质的孔隙结构密切相关。近年来, 由于我国浅部煤炭资源的日渐枯竭, 深部开采难度不断加大, 且煤储层普遍具有低压、低渗、低饱和度和非均质性等特点, 因此研究和掌握煤体孔隙结构和渗流特征对于制定煤矿瓦斯灾害防治、抽采利用及煤炭资源高效开采方案有着重要的指导作用和实践意义。

采用核磁共振技术能有效评价煤储层的孔径和流体分布等特征。姚艳斌等[3]应用低场核磁共振(NMR)和微焦点 CT 扫描, 对煤和致密砂岩的孔隙结构进行了精确表征。李海波[4]等将 T2 谱曲线图换算成孔隙半径分布图, 对煤岩的微观结构进行了分析。徐国盛[5]等利用稳态法对储层岩心进行水驱气相对渗透率实验, 并对水在孔隙中的流动性进行表征, 研究了不同含水条件下水对储层孔隙内气体渗流的影响。王学武[6]等利用核磁共振技术, 揭示了油水两相渗流规律。

笔者首先较详细介绍了低场核磁共振原理, 然后通过对国内外大量文献的梳理, 概述了基于 NMR 下的煤孔隙结构和渗流特性的研究进展及目前研究中存在的问题。

2. 核磁共振原理

2.1. 原子核的自旋、磁化和共振条件

核磁共振技术的主要原理是指原子核在外加磁场作用下, 在能级之间共振跃迁的现象[7]。然而, 只有当原子核的质子和中子有一项或两项为质数时, 才具备产生核磁共振的条件。原子核绕着自身发生自转运动称为自旋运动。由自旋运动产生微观磁场, 磁矩的南北极即磁偶极子。若原子核在磁偶极子和外加恒定磁场 B_1 的作用下围绕磁场方向的进动即为拉莫尔进动, 如图 1 所示[8]。

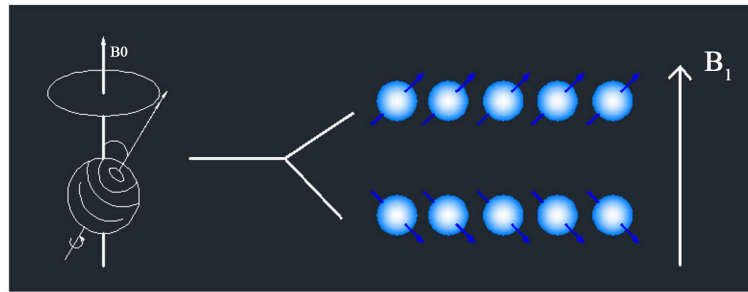


Figure 1. Changes in atomic nuclei after applying B_1
图 1. 原子核在施加 B_1 后的变化[8]

由于在该过程中, 产生一种可测信号, 因此进动的频率可由拉莫尔公式表示[9]:

$$\omega = \gamma B_1 \quad (1)$$

式中: ω 为自旋核的角频率; B_1 为磁场强度; γ 为旋磁比, 为定值, 用来衡量原子核磁性的大小, H 质子的旋磁比为 46.2 Hz。

根据公式(1)可得, 质子的进动频率与所处的静磁场 B_1 成正比。因此射入射频电磁波的频率必须与拉莫尔频率相同, 才能使自旋系统发生共振现象。

磁偶极子南北极的取向在外界磁场的作用下逐渐被量化, 即赛曼分裂。不同取向对应不同的质子能级, 可表示为[9]:

$$E = -\mu B_1 \quad (2)$$

$$\mu = \gamma h m \quad (3)$$

式中: E 为磁矩具有的磁场能量; μ 为原子核的自旋磁矩, 是核磁矩在磁场方向的分量; h 为朗德因子; m 为磁量子数, 表示能级的特征, 它决定了自旋角动量在外磁场方向上的分量(对于氢核 ${}^1\text{H}$, $m = \pm 1/2$)。当质子的进动轴与磁场方向相同时, m 为 1/2; 质子处于低能级。当质子进动轴与磁场方向相反时, $m = -1/2$, 质子处于高能级; 处于低能级的质子数比高能级的质子数较多。

由于自旋质子在外加磁场的作用下能够保持较长时间, 因此沿磁场方向进动核数目会达到一个热平衡值 M , M 的方向与外磁场的方向一致[9]。若与该外磁场方向垂直入射一个电磁场(B_2 方向), 且频率与之相同, 宏观的磁化矢量则会以 B_2 为轴做圆周运动, 如图 2 所示[8]。在脉冲傅里叶变化核磁共振中, 施加的射频脉冲使得磁化矢量偏移 Z 轴方向一个角度[9]:

$$\theta = \gamma B_2 \tau \quad (4)$$

式中: θ 为傅里叶变化核磁共振中, 脉冲后的磁化矢量的偏转角; γ 为旋磁比; B_2 为磁场强度; τ 为 90° 与 180° 或 180° 到 90° 所消耗的时间。

2.2. 核磁共振弛豫机制

根据核磁共振的原理, 煤内有三种弛豫机制, 分别为自由弛豫、表面弛豫及扩散机制。对于 T_2 弛豫, 自由弛豫和表面弛豫对 T_1 和 T_2 弛豫均有影响, 而扩散弛豫(只存在于有梯度磁场的情况下), 仅对 T_2 弛豫有影响。因此, T_2 弛豫又可以表示为自由弛豫, 表面弛豫和扩散弛豫的总和[9]。其中, 自由弛豫和扩散弛豫相对与表面弛豫较小, 可忽略不计。因此对于煤, T_2 弛豫可近似表示为表面弛豫, 即:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2\text{自由}}} + \frac{1}{T_{2\text{表面}}} + \frac{1}{T_{2\text{扩散}}} \approx \frac{1}{T_{2\text{表面}}} \quad (5)$$

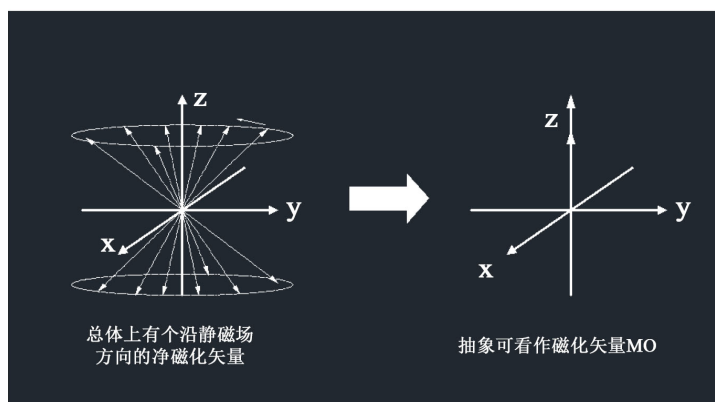


Figure 2. Magnetization vector
图 2. 磁化矢量[8]

2.3. 弛豫过程和弛豫时间

弛豫过程指的是原子核在射频脉冲磁场中产生共振现象吸收能量，通过不产生电磁辐射的方式释放能量，由高能级返回到低能级，最终返回到热平衡的过程。弛豫时间包括横向弛豫时间(T_2)和纵向弛豫时间(T_1)。

1) 纵向弛豫

纵向弛豫过程的结束是以磁化强度分量 M_z 的恢复为标志，纵向磁化矢量从零恢复到最大值的 67% ($1 - 1/e$) 时所需要的时间称为纵向弛豫时间[9]。

纵向弛豫过程又称为其本质是纵向磁化强度由 M_z 恢复至热平衡 M 的过程。根据该性质可得，弛豫时间的长短与质子的分子有关，即分子越大，能量释放的过程越慢，导致弛豫时间越长。

弛豫时间的大小与原子核和周围分子之间相互作用有关。弛豫是指原子核把吸收的能量通过原子传递给周围的物质。

2) 横向弛豫

横向弛豫过程中的横向磁化矢量(M_{xy})由最大值减少到最大值的 37% ($1/e$) 处占用的时间，即横向弛豫时间(T_2)。

横向弛豫时间又称为自旋-自旋弛豫，其本质是指质子进动方向逐渐往恢复原相的过程进动[8]。而恢复原相与质子周边的分子结构性有关，分子结构越均匀，恢复相位效果越差，横向弛豫时间越长[9]。时间的长短，影响水分的自由度。射频场关闭后，质子群恢复原相时或者说失去同相性时，质子间的进动将不再相同时，磁化矢量开始减小，测量横向磁化矢量的接收圈内会接收到一个衰减的信号，衰减信号呈指数型，称为自由感应衰减 FID [9]。探测出的第一个峰值表示曲线的一个面积分布，包含的面积为煤中的含水量。

由于在进行核磁共振弛豫过程时，纵向弛豫还受到流体扩散弛豫的影响，即受分子扩散的影响，自旋回波串的衰减速率加快，导致测量时间较长。因此，通常利用横向弛豫时间对煤储层孔隙度进行检测。

3. 煤的结构表征

测量煤岩孔隙结构的基本方法主要包括：毛管压力曲线法(半渗透隔板法、压汞法、离心机法等)、图像分析法(铸体薄片法、扫描电镜法、CT 扫描法)和测井法(NMR 测井、电阻率测井、声波测井)等[10]。不同方法从不同的方面来反映煤岩的孔隙结构特征。其中，毛管压力曲线法是在抵制毛管压力曲线的基础上，将非湿相流体驱替湿相流体，并绘制出毛管压力曲线的过程，试验过程相对较长[10] [11] [12]。

图像分析法则利用设备采集反映煤岩内大小孔吼及连通性等参数的信号[13] [14] [15]。该方法试验过程需要对煤岩进行加工, 影响了煤岩的孔隙结构特征。而核磁共振技术突破了室内试验对煤岩样品的限制, 通过测量煤岩内的含氢量, 从微观层面对煤储层孔隙结构进行精确分析。因此, 核磁共振技术被广泛应用于测量煤岩内的孔径分布、孔隙率、渗透率等参数。

煤孔隙结构特征是指煤的内部所具有的孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及其相互连通关系, 用来表征煤孔隙结构的物性指标有孔隙率、孔径分布、渗透率等[10]。

3.1. 孔径分布研究

饱水煤孔隙中的水分随着孔隙结构的变化而变化, 具体表现为所测得的弛豫信号发生改变, 经过复杂的数学拟合得到核磁共振 T_2 谱。

根据核磁共振弛豫机制可知, 煤内流体的横向弛豫时间可以表示为[10]:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2b}} + \rho \frac{S}{V} \quad (3)$$

式中, T_{2b} 为流体的自由弛豫时间(ms); ρ 为岩石横向表面弛豫率; S 为孔隙表面积; V 为孔隙体积。通常情况下, T_{2b} 远远大于横向弛豫时间 T_2 , 因此 $1/T_{2b}$ 可以忽略不计, 上式可简化为[10]:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V} \quad (3)$$

式中, S/V 为岩石的比表面积, 而比表面积与岩石的形状因子和孔隙半径有关, 即:

$$\frac{S}{V} = \frac{F_s}{r} \quad (4)$$

式中, F_s 为孔隙形状因子; r 为孔隙半径。由式(3)、式(4)可得:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{F_s}{r} \quad (5)$$

简化为:

$$r = CT_2 \quad (6)$$

式中, C 为转换系数。从式(6)可以看出, 孔隙直径尺寸的大小与 T_2 谱的弛豫时间成正比。

对于 C 值的选取, 姚艳斌等[16] [17] [18]对饱和、离心煤样进行 T_2 谱测试, 进而获得煤样的全孔径和束缚水孔径分布图, 通过二者对比得到该状况下的 T_2 截止值, 根据 T_2 截止值与离心半径的对应关系求取 C ; 最后, 将系数 C 代入式(6)得到煤样的孔径分布。研究表明, 检测出的煤样 T_2 谱内, 将煤样的孔隙按照弛豫时间划分为 0.5~2.5 ms, 20~50 ms 和大于 100 ms 三个范围, 分别对应于煤样中的微小孔、中大孔和裂隙。信号幅度越大, 则该类的孔隙数量越多[19]。

3.2. 孔隙率研究

由于弛豫谱内的信号与样品内的氢核信号成正比, 因此弛豫谱峰面积的变化与煤样内孔隙率的变化成正比。计算过程如下: 首先, 对标样的核磁信号与孔隙率关系进行标定, 然后采用 CPMG 脉冲序列开展饱和含水煤样的核磁共振试验; 最后, 将样品的所得峰面积代入可获取其核磁孔隙率[10]。

近年来, NMR 已成为表征多孔材料性质的一项重要技术, 特别是对孔隙空间的统计特性进行了大量的测量。王波等[20] [21]通过对煤样进行核磁共振测量, 利用上述方法求得煤样孔隙率, 结果表明孔隙率的变化与 T_2 谱峰面积的成正相关。如表 1 所示, 刘亚鹏[8]对采自焦作矿区的九里山矿(JLS)、赵固一矿

(ZG1)、赵固二矿(ZG2)和山西矿区的王台铺矿(WTP)的高阶煤样按照上述方法进行处理, 绘制其孔隙率及渗透率测试结果。

Table 1. Test results of porosity or permeability of coal samples

表 1. 煤样的孔隙度即渗透率测试结果[8]

煤样编号	孔隙率	渗透率	可动流体饱和度	束缚流体饱和度
JLS	5.525	0.212	1.486	98.514
ZG1	6.564	2.705	3.677	96.323
ZG2	6.962	107.871	6.962	82.354
WTP	7.118	506.296	30.753	69.247

3.3. 渗透率研究

渗透率作为评价煤样渗透性能的重要指标, 国内外已经产生大量的求解渗透率的方法[22] [23] [24]。目前, 基于核磁共振技术计算岩石渗透率的模型主要有经典的 Coates 模型和 SDR 模型, 以及基于两者的扩展模型, 扩展模型表达式为[25]:

Coates 扩展模型:

$$K_N = \left(\frac{\varphi_N}{C_1} \right)^{m_1} \left(\frac{S_m}{S_{wi}} \right)^{m_2} \quad (7)$$

SDR 扩展模型:

$$K_N = C_2 (\varphi_N)^{n_1} (T_{2g})^{n_2} \quad (8)$$

式中, K_N 为核磁渗透率; φ_N 为核磁总孔隙度; S_m 和 S_{wi} 分别为可动流体饱和度和束缚流体饱和度; T_{2g} 为 T_2 几何平均值; C_1 , C_2 , m_1 , m_2 , n_1 , n_2 均为模型待定常数。这两种模型与传统模型相比, 所考虑的因素更加全面, 能够更加准确的表达渗透率大小。

采用 Coates 扩展模型计算样品渗透率的过程是: 先用 T_2 截止值对煤样中的水分划分为束缚流体和可动流体; 然后, 结合总孔隙度的数值计算出束缚水饱和度和可动水饱和度; 最后利用式(7)求取渗透率。而采用 SDR 扩展模型, 只需要将得出核磁总孔隙度及几何平均值(T_{2g})代入式(8)中即可获得。周尚文等[26]通过对四川盆地龙马溪组页岩的样品进行研究, 结果发现用 SDR 扩展模型计算渗透率时, 所得误差最小。YAO 等[27]通过研究煤样发现, 煤样中孔隙流体的赋存状态可用于计算渗透率。于是, 他们获得了煤样中水分自然散失过程的系列 T_2 谱, 模拟了水在煤样的 3 级扩散过程, 并进一步提出了一种基于饱和流体和束缚流体的双 T_2 几何平均值的 SDR 渗透率模型, 即:

$$K_N = a (T_{2ga})^b (T_{2gb})^c \quad (9)$$

式中, T_{2ga} 和 T_{2gb} 分别为饱和水状态和束缚水状态下的 T_2 几何平均值; a , b , c 为待定系数。该模型的建立是将 Coates 扩展模型和 SDR 扩展模型综合考虑, 表达了煤样的孔径分布和不同情况下水的赋存状态。因此, 该模型对于煤样具有一定的适普性。

4. 煤的渗流特性表征

准确评价煤岩的渗流特性有助于油气资源的开采, 目前对煤岩内流体分布可视化的研究方法主要包括平面微观驱替模型、CT 扫描技术以及核磁共振技术[10]。其中, 平面微观驱替模型所采用的为二维模

型,不能较好的反映煤岩内流体的真实状态[28] [29] [30]。CT扫描技术能较为精确地获取煤岩的骨架信息,但是对煤岩的尺寸有要求,较大的煤岩会影响X射线的透过率,使扫描效果变差[31] [32] [33]。而核磁共振技术通过 T_2 弛豫谱一方面不限制煤岩的尺寸,另一方面能将煤岩骨架与流体信息分开,准确反映不同时刻的流体分布信息。因此,目前很好地应用核磁共振技术在石油开采领域中[10]。

对煤渗流特征的研究需要结合流体力学、岩石力学等学科的知识。渗流特征的研究包括渗透率、流量等参数以及整个动态渗流过程。一方面,可通过可动流体饱和度、孔隙度及渗透率之间的回归关系来判断岩芯的渗流能力,另一方面,可通过核磁共振等试验方法来实时观测煤样内流体的渗流状况[10]。

4.1. 流体划分研究

核磁共振弛豫谱实际上反映的是煤样内的孔隙半径分布情况。当煤样孔隙小于一定数值时,孔隙中的流体受到束缚而无法流出,这个数值对应于 T_2 谱上的某个临界值。当弛豫时间小于临界值时,孔隙内的流体被视为束缚流体,反之为可动流体,这一临界值叫做可动流体 T_2 截止值(T_2 cut off) [34]。由离心累计孔隙度曲线的最大值处做横轴的平行线,作其与饱和累计孔隙度曲线的交点处作垂线,与横轴的焦点为该烟煤此状态下的 T_2 截止值。

T_2 截止值将煤样孔隙内的流体划分为可动流体和束缚流体,并建立可动流体饱和度、孔隙度与渗透率之间的回归方程,可判断储层的渗流能力。刘曰强等[35] [36]通过核磁共振试验建立了三者之间的回归方程,试验结果表明,微观孔隙结构反映了渗流能力的强弱。

4.2. 气水相渗研究

煤在进行驱替的过程中,随着外加压力不断增加,煤样孔隙内的气或水被驱出。利用核磁共振等试验手段可以直接观察煤样内的渗流情况。胡勇[37]等利用核磁共振技术、CT成像、恒速压汞等试验技术,研究大庆火山岩岩石的气水渗流特征,结果表明:研究区样品的残余水饱和度较高,气水渗流显著特征是裂缝型岩样两相渗流区间小,残余水下气相相对渗透率较高,具有较好储渗能力。唐巨鹏等[38]利用核磁共振的成像技术,对饱和水煤样进行气驱水、水驱气NMRI试验。根据试验过程中,对不同时间段的煤样进行剖面成像表明,在水渗流过程中,水顺着煤样内的一条斜向裂隙和一条横向裂隙流动,说明随着煤储层深度的增加,煤样内的裂隙逐渐成为水渗流的主要通道,即煤储层的裂隙是影响煤样渗透率的关键因素。王文举等[39]采用核磁共振技术,对高温高压下的气驱进行稳态试验、水驱进行非稳态试验,再通过试验过程中计量水、气的采量,计算不同时刻的含水量,对煤样的气水相渗特征进行表征。试验结果表明,煤样的水相相对渗透率随着温度的增大而升高,气相逐渐降低;随着围压的变化与之相反。

针对煤样内流体动态渗流特征的核磁共振研究表明核磁共振技术能清晰、准确的反映渗流过程中流体的具体分布情况,且保证了煤样的完整性。然而,利用核磁共振技术进行该阶段的研究仍需要增加辅助措施,仍未建立起通过信号测量得出的 T_2 谱图像中的流体分布信息与水相、气相的相对渗透率之间的定量函数关系。

5. 结论

1) 核磁共振是指当恒定磁场下煤孔隙内含氢原子核受到射频磁场的作用时,磁化矢量发生偏转,若此时撤掉磁场,自旋原子核释放能量,磁化矢量逐渐恢复到平衡状态。此过程中,由于分子扩散,导致纵向弛豫测量时间较长。因此选用横向弛豫时间更能准确反映煤储层孔隙度。

2) 相对于其他测量方法,通过核磁共振技术所测得的孔隙弛豫谱内信号与孔隙尺寸的大小成正比,更能准确实现对煤孔径分布、孔隙率等孔隙结构参数的定量表征。

3) 对煤渗流特性的研究主要体现在可动流体分布和渗流特性方面。核磁共振技术能保证在不损坏煤岩的前提下, 准确描述不同时刻的流体分布。然而对于渗流特性的研究, 还需要借助其他的技术才能反映整个渗流过程。因此, 在以后的研究中, 应该直接将核磁共振技术所测得的核磁共振弛豫谱与相对渗透率建立函数关系, 减小测量结果的误差。

参考文献

- [1] Zhang, H., Liu, J. and Elsworth, D. (2008) How Sorption-Induced Matrix Deformation Affects Gas Flow in Coal Seams: A New FE Model. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **45**, 1226-1236. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.11.007>
- [2] Wu, Y., Liu, J., Elsworth, D., *et al.* (2010) Dual Poroelastic Response of a Coal Seam to CO₂ Injection. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **4**, 668-678. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2010.02.004>
- [3] 姚艳斌, 刘大猛, 蔡益栋, 等. 基于 NMR 和 X-CT 的煤的孔裂隙精细定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(11): 1598-1607.
- [4] 李海波, 朱巨义, 郭和坤. 核磁共振 T₂ 谱换算孔隙半径分布方法研究[J]. 波谱学杂志, 2008(2): 273-280.
- [5] 徐国盛, 赵莉莉, 徐发, 等. 西湖凹陷某构造花港组致密砂岩储层的渗流特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(2): 113-121.
- [6] 王学武, 杨正明, 时宇, 等. 核磁共振研究低渗透砂岩油水两相渗流规律[J]. 科技导报, 2009, 27(15): 56-58.
- [7] 史全水. 核磁共振技术及其应用[J]. 洛阳师范学院学报, 2006(2): 82-84.
- [8] 刘亚鹏. 高阶煤孔裂隙特征及其影响因素的低场核磁共振实验研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
- [9] 杨钧岩, 吴畏, 钱慧良. 核磁共振在岩土工程方面的应用综述[J]. 工程建设, 2019, 51(3): 26-31.
- [10] 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.
- [11] 唐晓敏. 骨架导电低阻油层人造岩样实验及导电规律与导电模型研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2019.
- [12] 王瑞. 储层孔隙结构研究方法综述[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(12): 143-144.
- [13] 米悦, 陈朝兵, 王江涛. 致密砂岩储层微观孔喉结构表征方法综述[J]. 地下水, 2021, 43(6): 203-204+216.
- [14] 张晓祎. 页岩油气储层孔隙结构表征新方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院渗流流体力学研究所), 2021.
- [15] 张攀攀. 微生物厌氧降解对煤孔隙特征影响的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [16] Yao, Y.B., Liu, D.M., Che, Y., *et al.* (2009) Petrophysical Characterization of Coals by Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (NMR). *Fuel*, **89**, 1371-1380. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.11.005>
- [17] Yao, Y.B. and Liu, D.M. (2012) Comparison of Low-Field NMR and Mercury Intrusion Porosimetry in Characterizing Pore Size Distributions of Coals. *Fuel*, **95**, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.039>
- [18] Yao, Y.B., Liu, D.M., Cai, Y.D. and Li, J.Q. (2010) Advanced Characterization of Pores and Fractures in Coals by Nuclear Magnetic Resonance and X-Ray Computed Tomography. *Science China Earth Sciences*, **53**, 854-862. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-0057-4>
- [19] 姚艳斌, 刘大猛. 基于核磁共振弛豫谱的煤储层岩石物理与流体表征[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 14-22.
- [20] 王波, 陆长亮, 刘重阳, 胡仕宇, 黄子康. 流变扰动效应引起岩石微观损伤演化试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 247-254.
- [21] 李杰林. 基于核磁共振技术的寒区岩石冻融损伤机理试验研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [22] Yuan, X.T., Peng, S.M., Lin, C.Y., *et al.* (2005) An Interpretation Method for Permeability Based on Flow Units and Its Applicability. *Acta Petrolei Sinica*, **26**, 78-81.
- [23] Zhang, J.C. and Song, K.P. (2007) Eigen Curve of Relative Permeability and Its Application. *Acta Petrolei Sinica*, **28**, 104-107.
- [24] Zhao, J. Hui, Y.A., Wang, P., *et al.* (2007) Permeability Synthesis Method for Heterogeneous Reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, **28**, 102-104.

- [25] 姚艳斌, 刘大锰. 基于核磁共振弛豫谱技术的页岩储层物性与流体特征研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 181-189.
- [26] 周尚文, 薛华庆, 郭伟, 李晓波. 川南龙马溪组页岩核磁渗透率新模型研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(1): 56-61.
- [27] Yao, Y.B., Liu, D.M., Liu, J.G. and Xie, S.B. (2015) Assessing the Water Migration and Permeability of Large Intact Bituminous and Anthracite Coals Using NMR Relaxation Spectrometry. *Transport in Porous Media*, **107**, 527-542. <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0452-y>
- [28] 杨山. 基于驱替实验及数字岩心的微观剩余油研究[D]: [硕士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2015.
- [29] 苏玉亮, 李新雨, 李蕾, 庄新宇, 王程伟, 付金刚, 李东升. 基于核磁共振可视化试验的致密气藏气水两相渗流机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 104-112.
- [30] 程毅翀. 基于低场核磁共振成像技术的岩心内流体分布可视化研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2014.
- [31] 昌伦杰, 龙威, 伍轶鸣, 陈飞飞, 刘志良, 王冠群. 缝洞型碳酸盐岩凝析气藏压力衰竭过程中凝析油微观赋存状态[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(26): 11136-11143.
- [32] 范楠. 煤孔隙结构多尺度表征及其对瓦斯运移特性影响的实验研究[D]: [博士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- [33] 曹安, 龙威, 杜虹宝, 陈飞飞, 赵红, 王冠群, 袁萍. 基于微米CT技术的沥青质识别对岩石物性参数的影响研究[J]. 当代化工, 2021, 50(12): 2869-2872+2876.
- [34] 王琨, 周航宇, 赖杰, 王坤杰, 刘音. 核磁共振技术在岩石物理与孔隙结构表征中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 101-114.
- [35] 刘曰强, 乔向阳, 魏尚武, 袁昭. 应用核磁共振技术研究吐哈盆地低渗透储层渗流能力[J]. 特种油气藏, 2005(2): 96-99+110.
- [36] Loskutov, V. and Zhakov, S. (2016) Dependence of the Liquid Transverse Relaxation Time [Formula Omitted] in Porous Media on Fluid Flow Velocity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **101**, 692-698. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.057>
- [37] 胡勇, 朱华银, 万玉金, 韩永新, 王玉凤. 大庆火山岩孔隙结构及气水渗流特征[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 63-65+89+200.
- [38] 唐巨鹏. 煤层气赋存运移的核磁共振成像理论和实验研究[D]: [博士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- [39] 王文举. 致密砂岩气藏气水两相渗流特征实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2017.