https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.241

煤储层原生吸附水与压裂侵入水赋存差异及其对水锁伤害的控制机理

党 正[1],田永净[1*],秦晨烊[2,3],张泽华[1],陈文文[4],王小明[2,3]

1. 中联煤层气有限责任公司,勘探开发研究院,北京 100011
2. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074
3. 中国地质大学(武汉)内蒙古研究院,内蒙古自治区鄂尔多斯 017000
4. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉),湖北武汉 430074

摘 要: 煤层气开发过程中,煤中孔隙水赋存状态是诱发水锁伤害、制约煤层气高效产出的核心因素.目前研究多关注人工压裂液侵入造成的水锁伤害,而对储层原始湿度环境下形成的原生吸附水及其锁水效应认识不足.为厘清原始储层地质条件与人工压裂条件下煤中水赋存的微观差异,揭示差异化水锁伤害机理,以沁水盆地东峰煤矿3#煤层煤样为研究对象,分别开展平衡水吸附实验(模拟原始储层湿度环境)与加压饱水实验(模拟压裂液侵入环境),利用低场核磁共振(LF-NMR)技术表征两种条件下煤岩孔隙水赋存分布特征,结合梯度离心实验定量评价孔隙水可动性,系统对比两种条件下水的赋存差异及其对水锁伤害的控制机制.实验结果表明,平衡水吸附条件下,煤储层中水主要赋存于微孔与过渡孔,环境湿度越高,吸附平衡后水分赋存的孔隙孔径越大、含水率越高;加压饱水条件下,煤储层中水以过渡孔赋存为主,饱水压力增大可拓宽水分赋存孔径,同时改造煤岩孔隙结构、提升孔隙连通性.相较于加压饱水煤样,平衡水吸附煤样整体含水率更低,但水分以水蒸气形式渗入煤中,可赋存于微米级微小孔隙及孤立孔隙,孔隙水可动性显著更弱、排水难度更大.研究证实,低湿度储层原生吸附水引发的水锁伤害显著高于高压压裂液侵入造成的水锁伤害,弥补了当前研究重人工注水伤害、轻原生湿度水锁伤害的认知短板.研究成果可为煤储层水锁伤害精准评价、高效解锁工艺优化提供微观理论支撑.

关键词: 煤储层;煤层气;水赋存特征;平衡水吸附;加压饱水;水可动性;水锁伤害.

中图分类号: TE121 **文章编号:** 1000-2383(2026)07-2499-15 **收稿日期:** 2026-06-29

Water Occurrence Differences between Primary Adsorbed Water and Artificial Fracturing-Invaded Water in Coal Reservoirs and Their Control Mechanisms on Water-Blocking Damage

Dang Zheng[1], Tian Yongjin[1*], Qin Chenyang[2,3], Zhang Zehua[1], Chen Wenwen[4], Wang Xiaoming[2,3]

1. *China United Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing* 100011, *China*
2. *Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan* 430074, *China*

基金项目: 山西省科技重大专项(No. 202501080301004);青年科技创新专项(No.KJQN-2026-2207).

作者简介: 党正(1995-),男,博士,工程师,主要从事煤层气开发地质研究. ORCID: 0009-0009-5181-4120. E-mail: dangzheng@cnooc.com.cn

* **通讯作者:** 田永净,ORCID: 0009-0006-6999-7250. E-mail: tianyj10@cnooc.com.cn

引用格式: 党正,田永净,秦晨烊,张泽华,陈文文,王小明,2026.煤储层原生吸附水与压裂侵入水赋存差异及其对水锁伤害的控制机理.地球科学,51(7):2499-2513.

Citation: Dang Zheng, Tian Yongjin, Qin Chenyang, Zhang Zehua, Chen Wenwen, Wang Xiaoming, 2026. Water Occurrence Differences between Primary Adsorbed Water and Artificial Fracturing-Invaded Water in Coal Reservoirs and Their Control Mechanisms on Water-Blocking Damage. *Earth Science*, 51(7): 2499-2513.

3. *Inner Mongolia Research Institute*, *China University of Geosciences* (*Wuhan*), *Ordos* 017000, *China*
4. *Three Gorges Geotechnical Engineering Co. Ltd.* (*Wuhan*), *Wuhan* 430074, *China*

Abstract: Water occurrence in coal pores is a key factor inducing water-blocking damage and restricting efficient coalbed methane (CBM) production. Current studies mainly focus on the damage caused by artificial fracturing fluid invasion, while the primary adsorbed water formed under the original reservoir humidity environment and its water-blocking effect remain insufficiently understood. Coal samples from the No.3 coal seam of Dongfeng Coal Mine in the Qinshui Basin were selected for this study. Controlled experiments of equilibrium water vapor adsorption (simulating the original reservoir humidity) and pressurized water saturation (simulating fracturing fluid invasion) were carried out. Low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) was used to characterize the distribution of pore water under the two occurrence conditions, and gradient centrifugation experiments were employed to quantitatively evaluate water mobility. The differences in water occurrence and their control mechanisms on water-blocking damage were systematically compared. The results show that under equilibrium water vapor adsorption, water mainly occurs in micropores and transition pores; higher environmental humidity leads to larger occupied pore sizes and higher water contents at adsorption equilibrium. Under pressurized water saturation, water predominantly occupies transition pores; increasing saturation pressure broadens the range of water-occupied pore sizes, while transforming pore structure and enhancing pore connectivity. Compared with pressurized water-saturated samples, equilibrium water-adsorbed samples have a lower overall water content. However, water vapor can penetrate into micro- and nano-scale pores and even isolated pores, resulting in significantly weaker water mobility and greater difficulty in drainage. The water-blocking damage caused by primary adsorbed water in low-humidity reservoirs is far higher than that caused by high-pressure fracturing fluid invasion. This finding remedies the cognitive deficiency of overemphasizing artificial water injection damage while neglecting primary humidity-related water-blocking. The results can provide microscopic theoretical support for accurate evaluation of water-blocking damage and the optimization of efficient damage removal technologies for coal reservoirs.

Key words: coal reservoir; coalbed methane; water occurrence characteristics; equilibrium water vapor adsorption; pressurized water saturation; water mobility; water-blocking damage.

0 引言

我国煤层气资源储量丰厚，2 000 m以浅的浅层煤层气资源量达29.82×10^{12} m^3（郑民等，2019），2 000 m以深的深部煤层气资源量为18.47×10^{12}～40.71×10^{12} m^3（霍超等，2025），具备规模化开发潜力.煤中水是影响煤层气解吸、扩散与渗流的关键介质，兼具双重效应：一方面可通过水分置换作用促进煤层气解吸运移（陈向军等，2014），另一方面易在孔隙喉道形成水膜、产生毛细管阻力，诱发水锁伤害，抑制煤层气产出（张国华等，2012），且高含水储层中水锁负面效应远强于水分置换正向效应（林传兵，2019）.因此，揭示不同条件下煤中水赋存规律，阐明水锁伤害微观机理，是破解煤层气低产难题、提升储层开发效果的核心前提.

低场核磁共振技术目前是表征煤储层孔隙结构与流体赋存特征的核心手段，通过核磁共振（NMR）T_2测试获取的T_2谱分布可分析水赋存特征和孔隙结构特征（杨正明等，2017；Liu *et al.*，2021），当前已形成“加压饱水-NMR T_2谱测试水赋存分布-差速离心NMR分析水可动性到水锁测试”的完整方法（毛港涛等，2018）.现阶段利用NMR研究煤储层中液相滞留效应以获取束缚水饱和度，从水的相态变化阐述伤害机理（刘谦等，2020），以及利用梯度离心后的束缚水饱和度差异分析潜在的水锁伤害（倪冠华等，2018）；模拟场景均为煤储层埋藏后的静水压力条件与钻井、固井以及压裂工序中的液体侵入煤储层孔隙，水以加压为动力进入煤储层孔隙中.但煤作为一种特殊的烃源岩，在成煤演化、后期储层保存过程中，长期受环境湿度控制，可通过水蒸气吸附方式实现孔隙赋水，形成原生吸附水（张时音等，2008），其对应的平衡水条件吸附后的煤储层水赋存测试（单国鑫等，2022）及水的可动性研究缺乏，尚未明确原生吸附水与人工加压注水的水赋存、运移及伤害差异，导致煤储层水锁伤害机理认知不全面，难以精准指导储层保护与解锁改造.

基于此，本文以沁水盆地东峰煤矿3#煤层为研究对象，设置梯度湿度平衡水吸附实验与梯度压力加压饱水实验，分别模拟煤储层原始地质赋存环境与人工压裂流体侵入环境，利用低场核磁共振技术

动态监测两种条件下煤储层中孔隙水赋存演化特征,通过梯度离心实验对比分析孔隙水可动性差异,揭示不同赋水条件下的水锁伤害微观成因,完善煤储层水锁伤害理论体系,为煤层气储层高效开发、水锁伤害精准治理提供理论依据与技术参考.

1　样品与实验

1.1　样品制备与煤岩煤质特征

实验选取沁水盆地东峰煤矿 3#煤层开展不同条件下的水赋存测试,其煤岩煤质特征如表 1 所示.将采集的块状煤样加工为 10 个标准圆柱煤柱(长度 5 cm,直径 2.5 cm),编号 DF-1 至 DF-10,其中 DF-1、DF-2 用于测定煤岩核磁共振 T_2 截止值(T_{2C}),DF-3～DF-6 用于开展不同湿度平衡水吸附实验,DF-7～DF-10 用于开展不同压力加压饱水实验,处理后进行 NMR T_2 谱测试.

1.2　实验设备与参数

实验采用纽迈 MesoMR12-060H-I 低场核磁共振仪开展孔隙水赋存测试,配套 CSC-12S 岩心高速离心机完成梯度离心实验,评价孔隙水可动性.核磁共振测试参数设置:主频 12 MHz,采样频率 125 kHz,射频延迟 0.1 ms,模拟增益 40,数字增益 7,90°脉宽 7 μs,180°脉宽 11.04 μs,回波个数 50,等待时间 200 ms,累加次数 128,频率偏置 235 701 Hz,波峰偏移 0.008 ms.

测试前利用 DF-1、DF-2 煤饱水样与 1 000 r/min 离心样 T_2 谱差异开展 T_{2C} 计算(Yao *et al.*, 2010),饱水样与离心样核磁共振 T_2 谱分布对应的 T_{2C} 分别为 1.163 ms 与 1.588 ms,平均值为 1.375 ms,其对应的孔径计算结果为 43.25 nm(图 1),以此区分煤储层中可动水与束缚水,界定微孔、过渡孔、中孔及大孔的水分赋存区间.

1.3　实验方案设计

1.3.1　梯度湿度平衡水吸附煤储层中水赋存特征实验　不同湿度条件下平衡水测试按照美国测试材料学会推荐的煤岩样品水吸附实验的标准方法(ASTM D1412-07)开展,具体实验方法为:①将 DF-3～DF-6 样在 110 ℃的真空烘箱中干燥除去煤样的内水,称取干燥煤柱质量;②将 KOH、K_2CO_3、KI 与 K_2SO_4 饱和盐溶液置于 4 个蒸发皿内,分别构建 8%、43%、69% 与 97% 四组梯度相对湿度环境;③将 DF-3～DF-6 样品分别置于 4 个湿度条件下的真空蒸发皿中,蒸发皿边缘涂抹凡士林维持真空条件,每隔一定时间进行吸水样品的质量测试,根据样品吸水后质量变化率计算含水率,并对样品进行 NMR 测试,获取煤样水吸附过程中的水赋存特征.

1.3.2　梯度压力加压饱水条件下煤储层中水赋存

表 1　东峰煤样煤岩煤质特征

Table 1　Coal-quality and petrographic characteristics of the Dongfeng coal sample

样品	工业分析			显微组分						反射率
	M_{ad}(%)	A_d(%)	V_{daf}(%)	镜质组(%)	惰质组(%)	黏土类(%)	氧化类(%)	碳酸类(%)	硫化类(%)	$R_{o,max}$(%)
DF	0.69	14.92	10.60	65.82	22.56	9.32	0.69	1.20	0.41	3.12

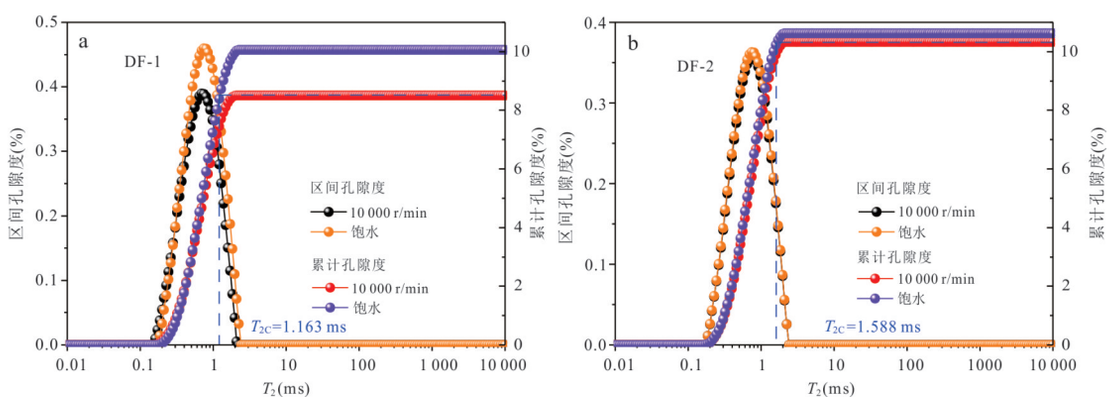

图 1　DF-1(a)、DF-2(b)煤样饱水样与离心样核磁共振 T_2 谱分布以及离心法 T_2 截止值

Fig.1　NMR T_2 spectra of coal samples DF-1 (a) and DF-2 (b) under water-saturated and centrifuged conditions, and the T_2 cutoff values determined by centrifugation

特征实验　加压饱水实验测试过程如下：①将DF-7～DF-10样在110 ℃的真空烘箱中干燥，除去煤样中的内水，称取干燥煤柱质量；②样品饱水：利用岩心饱水装置对4个煤柱进行饱水，饱水前使用保鲜膜包裹防止煤样破裂，为保证注水后煤样的完整性，根据煤矿附近柿庄南区块3#煤破裂压力数据，最大饱水压力选取15 MPa，饱水压力分别设置为5 MPa、7 MPa、10 MPa、13 MPa和15 MPa，饱水时间设置为1 d；③饱水煤样的水赋存特征测试：饱水结束后取出煤样，取下包裹煤柱的保鲜膜并擦干煤样表面的水分，称取煤样吸水后的质量，根据吸水后煤柱的质量变化率计算含水率，然后对煤样进行NMR测试，测试后干燥煤样，增大饱水压力继续对煤样进行饱水，称重后测试煤样NMR T_2谱分布，循环此过程，对比不同饱水压力条件下的水赋存差异.

1.3.3　孔隙水可动性评价实验　含水煤样中孔隙水可动性评价使用梯度离心后的NMR测试表征，其中离心转速设置为4 000 r/min、6 000 r/min与10 000 r/min.

2　实验结果

2.1　平衡水吸附条件下煤储层水赋存特征

煤样不同湿度条件下的平衡水吸附实验共168 d，获取的水吸附特征曲线表明不同湿度条件下煤样平衡水吸附过程呈现“快速吸水-缓慢递增-动态平衡”的阶段性规律(图2).吸附初期(1～30 d)，煤岩孔隙吸附位点充足、水分子浓度差大，含水率快速上升；随着吸附位点逐渐饱和，吸水速率持续放缓，最终达到吸附平衡(图2a).8%、43%、69%、97%湿度环境下，煤样吸附平衡时间分别为68 d、100 d、100 d、158 d，平衡含水率依次为1.046 3%、1.757 5%、3.688 9%、5.553 2%，环境湿度越高，吸附平衡周期越长、最终含水率越高，水分吸附效应越显著(图2b).

不同湿度条件下煤样平衡水吸附NMR的T_2谱分布特征差异显著(图3).吸附初期(吸附时间2 d)，低湿度(8%、43%)环境下煤样NMR的T_2谱分别呈双峰以及四峰分布(图3a、3b)，高湿度(69%、97%)环境下煤样NMR的T_2谱均呈单峰分布(图3c、3d)，湿度由低到高主峰范围分别为0.01～0.13 ms、0.01～0.15 ms、0.01～0.396 ms与0.345～0.85 ms，仍处于吸附孔范围内.

对煤样水吸附过程中NMR的T_2谱分布弛豫峰特征进行统计，其分布范围即代表水赋存孔径的范围，基于T_{2C}计算对应孔径范围，主峰与次峰代表的水主要赋存孔隙范围与次要赋存孔隙范围结果如图4所示.弛豫峰及其对应的单位质量信号量如图5所示，信号量可表征孔隙内水赋存量的差异.吸附初期(吸附时间2d)，各湿度环境下煤样水主要赋存均属于微孔与过渡孔(即吸附孔)范围内，随吸附时间的增加，水主要赋存的孔隙范围增大，表明孔隙内水在增加的同时向更大的吸附孔内迁移，更大的湿度条件(69%与97%)下，水的迁移更明显.水次要赋存孔隙范围在不同湿度的差异更明显，低湿度(8%与43%)条件下，水次要赋存孔隙范围分别为15.35～5 610.45 nm与24.94～14 828.87 nm，高湿度(69%与97%)条件下水次要赋存孔隙范围分别为0.31～3.83 nm与1.03～4.08 nm，信号量总体上呈下降趋势，低湿度条件下部分水倾向于向中孔与大孔

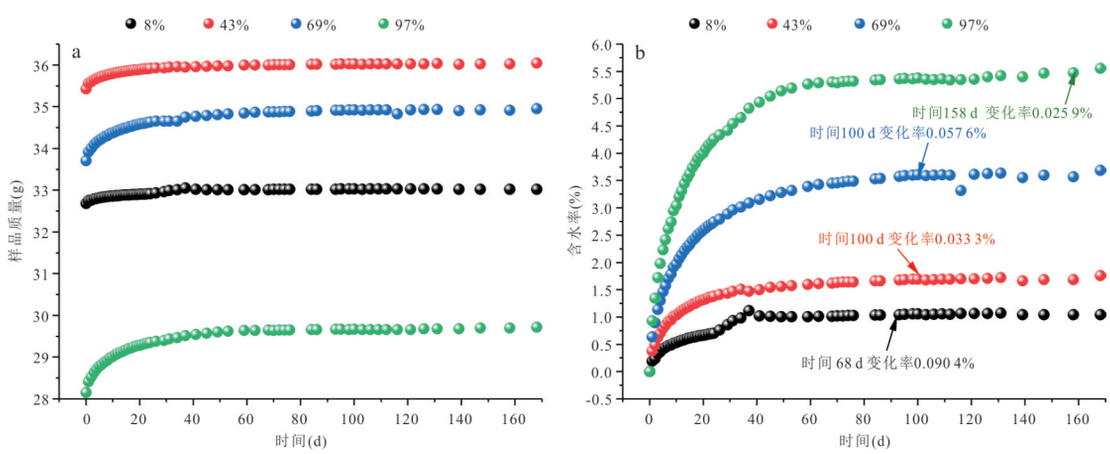

图2　煤样平衡水吸附特征

Fig.2　Equilibrium water vapor adsorption characteristics of coal samples

a.吸水质量随时间变化；b.吸水率(质量百分比)随时间变化

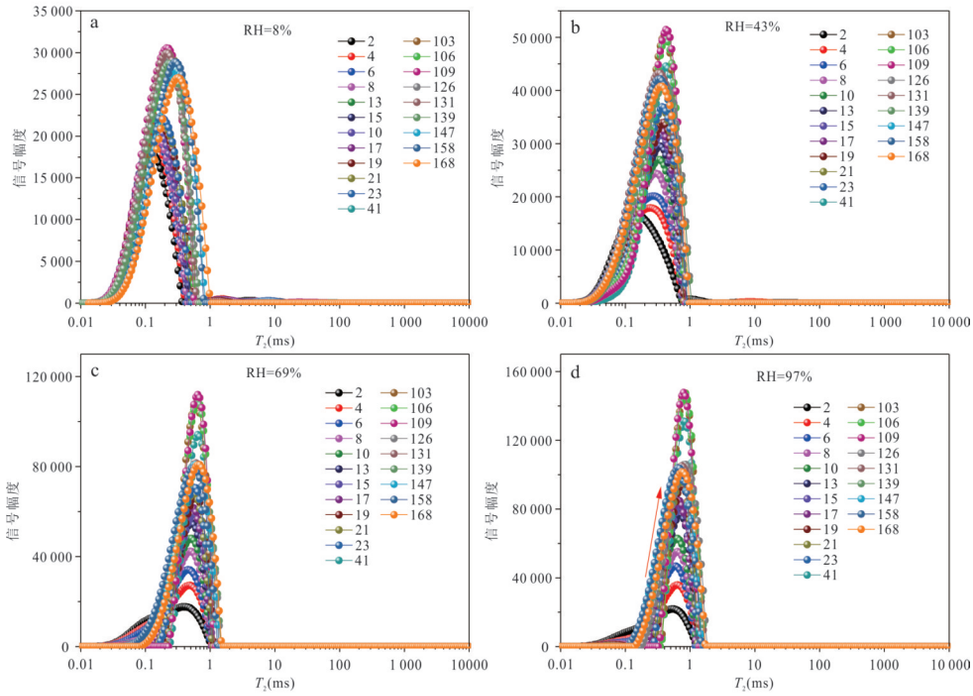

图 3　煤样在相对湿度条件 8%(a)、43%(b)、69%(c)与 97%(d)下平衡水吸附核磁共振 T_2 谱分布

Fig.3　NMR T_2 spectra of coal samples during equilibrium water vapor adsorption at relative humidities of (a) 8%, (b) 43%, (c) 69%, and (d) 97%

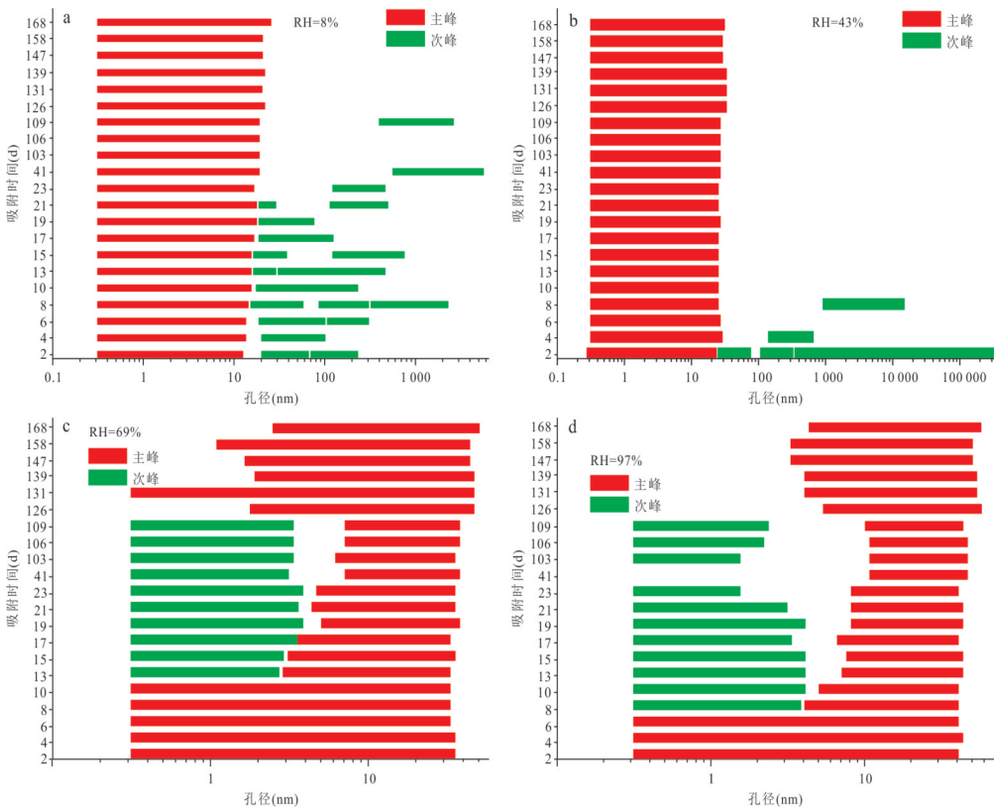

图 4　煤样在相对湿度条件 8%(a)、43%(b)、69%(c)与 97%(d)下平衡水吸附条件下水赋存孔隙分布演化特征

Fig.4　Evolution of pore-size distributions for water occurrence in coal samples during equilibrium water vapor adsorption at relative humidities of (a) 8%, (b) 43%, (c) 69%, and (d) 97%

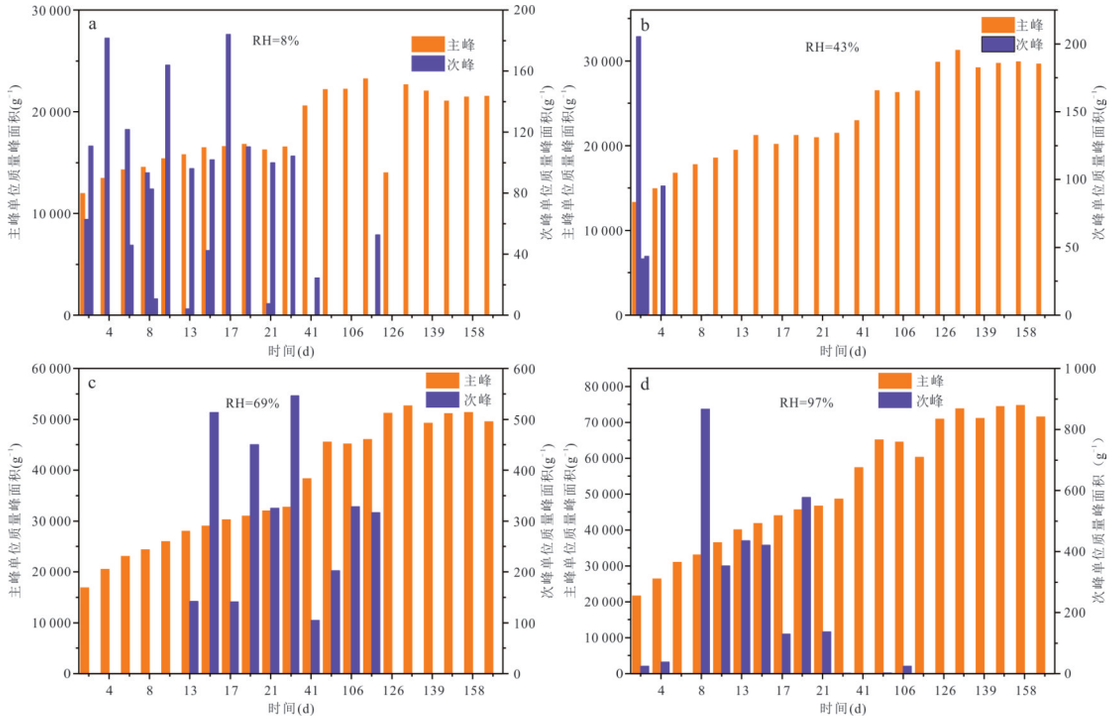

图 5　煤样在相对湿度条件 8%(a)、43%(b)、69%(c)与 97%(d)下平衡水吸附的核磁共振 T_2 谱峰信号幅度变化

Fig.5　Variation in NMR T_2 peak signal amplitude of coal samples during equilibrium water vapor adsorption at relative humidities of (a) 8%, (b) 43%, (c) 69%, and (d) 97%

运移.达到吸附平衡后,不同湿度条件下煤样 NMR 的 T_2 谱分布弛豫次峰信号均消失,中孔至裂隙内水分减少可能与吸附孔对其他孔隙内水的吸收有关(Meng *et al.*, 2015),环境湿度由低到高煤样中水赋存范围分别为 0.31~24.94 nm、0.31~30.73 nm、2.51~49.98 nm 与 4.4~57.41 nm,低湿度(8% 与 43%)条件下,水赋存于更小的孔隙中.

为综合评价不同湿度条件下煤样平衡水吸附过程中流体在煤样孔隙内的运移趋势,计算 T_2 的几何平均值 T_{2g}(T_2 的加权平均).T_{2g} 的变化可描述孔隙内的流体流动与润湿性差异(Li *et al.*, 2023),T_{2g} 越大,表明孔隙内的流体倾向于在更大的孔隙内赋存或处于游离态,T_{2g} 的降低表示流体进入较小的孔隙.T_{2g} 可用下式计算:

$$T_{2g}=\exp\left[\sum\frac{\ln(T_{2i})A_i}{A_{\text{total}}}\right], \tag{1}$$

式中:T_{2i} 为弛豫时间,A_i 为 T_{2i} 处对应的信号幅度,无量纲,A_{total} 代表该样品煤样 NMR 的 T_2 谱分布总信号幅度,即峰信号幅度.

不同湿度条件下煤样平衡水吸附过程中 NMR 的 T_{2g} 演化特征表明:在相同时间范围内,湿度越高,T_{2g} 越大,高湿度条件下水向更大孔隙内迁移的趋势更明显.随吸附时间增大,不同湿度条件下的煤样 T_{2g} 先增大后下降,反映了煤样孔隙内水先向大孔隙迁移,后转变为向小孔隙运移.更小的吸附孔中水运移需要克服更大的毛管阻力,不利于微孔隙内水有效排出,加剧煤储层的水锁伤害(图 6).

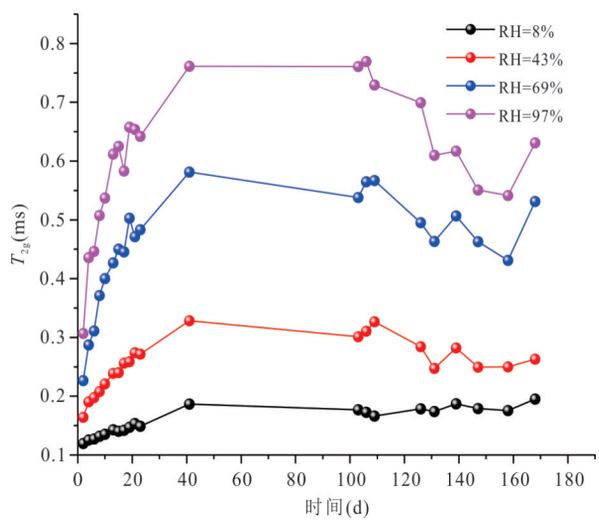

图 6　煤样平衡水吸附条件下核磁共振 T_{2g} 演化特征

Fig.6　Evolution of NMR T_{2g} of coal samples during equilibrium water vapor adsorption at different relative humidities

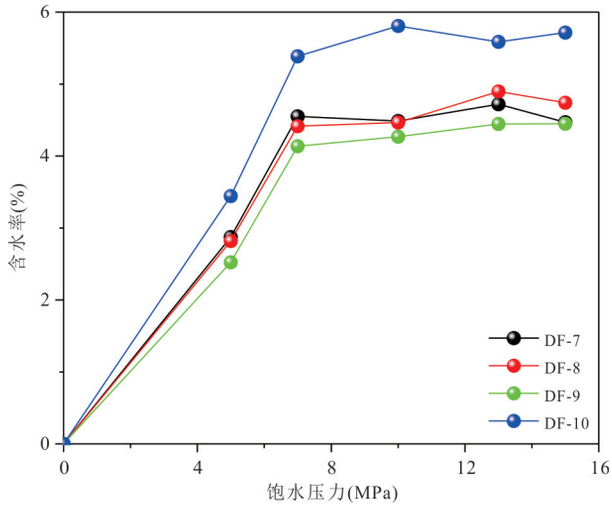

图 7　加压饱水条件下煤样饱水含水率特征

Fig.7　Variation in water content of coal samples under pressurized water saturation

2.2　加压饱水条件下煤储层中水赋存特征

加压饱水条件下,煤样含水率随饱水压力提升呈现“快速增长-缓慢趋稳”的变化规律(图 7).压力低于 7 MPa 时,煤孔隙快速张开、流体大量渗入,含水率大幅提升;压力超过 7 MPa 后,孔隙扩容趋于平缓,含水率增速放缓;15 MPa 时含水率达到峰值,介于 4.44%～5.71%,平均含水率 4.84%.整体来看,加压饱水含水率整体高于常规湿度平衡吸附含水率,高湿度环境下二者差距逐步缩小.

不同饱水压力下 NMR 的 T_2 谱分布如图 8 所示,煤样饱水后的 T_2 谱谱峰主要在 0.24～0.74 ms,除 5 MPa 低饱水压力条件下煤样 T_2 谱分布为单峰外,继续加压后 T_2 谱呈双峰分布,次峰主要在 0.01～0.061 ms.

对不同饱水压力 T_2 谱内的峰值分布以及峰信号幅度进行统计,其中峰分布用公式换算为孔径分布,结果如图 9 所示,主峰与次峰对应的单位质量信号幅度如图 10 所示.除 DF-10 外饱水后水主要赋存于 10～50 nm(过渡孔)孔隙范围(图 9),随饱水压力增大,10～50 nm 孔隙范围的峰信号幅度增大,赋存水逐渐增加,推断与饱水压力增大过程中孔隙结构长期受高压和饱和水环境破坏导致的孔体积与孔连通性增加有关(Li *et al.*,2022).水主要赋存孔隙孔径范围右移,表明水分在加压过程中倾向于向更大孔径孔隙迁移(杨赫等,2020)(图 10).DF-10 煤样在加压过程中,中孔与大孔内水在加压过程中不断减少,表明加压除了增强孔隙连通性促使小孔隙内不可动流体转化为可动流体外,也会使渗流孔内水迁移至吸附孔内(Zhang *et al.*,2020).部分主峰信号

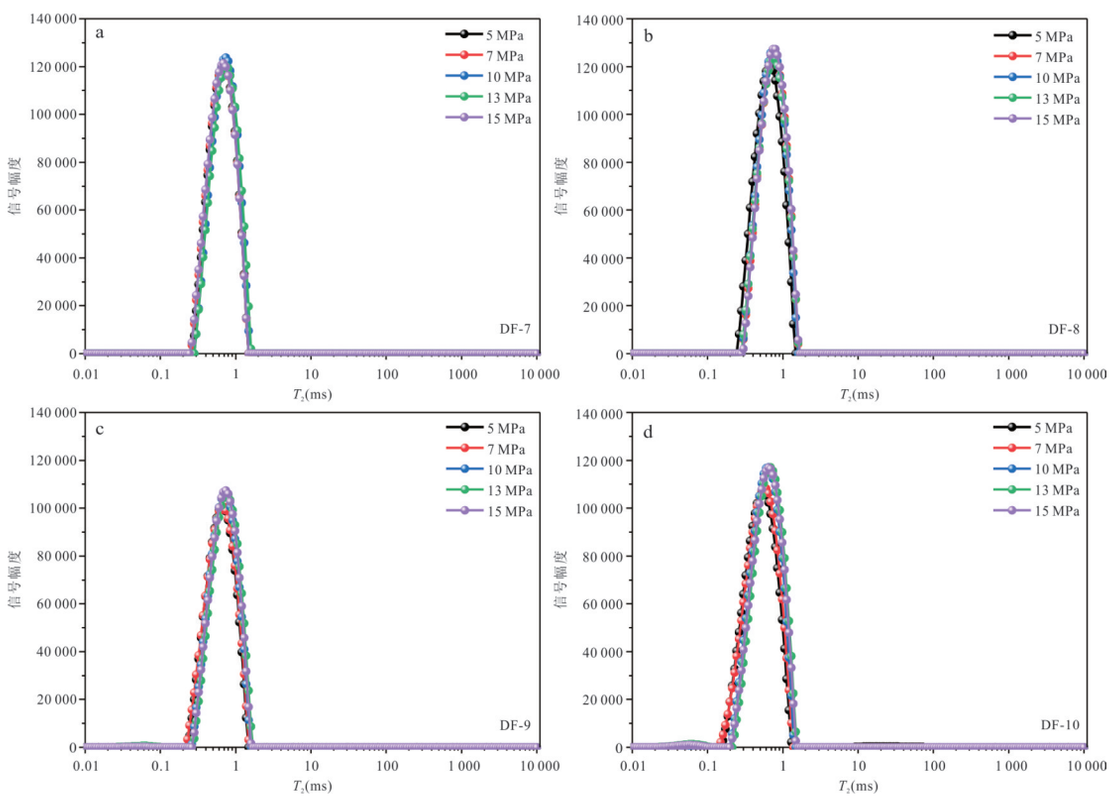

图 8　不同饱水压力条件下煤样 DF-7(a)、DF-8(b)、DF-9(c)与 DF-10(d)核磁共振 T_2 谱分布

Fig.8　NMR T_2 spectra of coal samples (a) DF-7, (b) DF-8, (c) DF-9, and (d) DF-10 at different water-saturation pressures

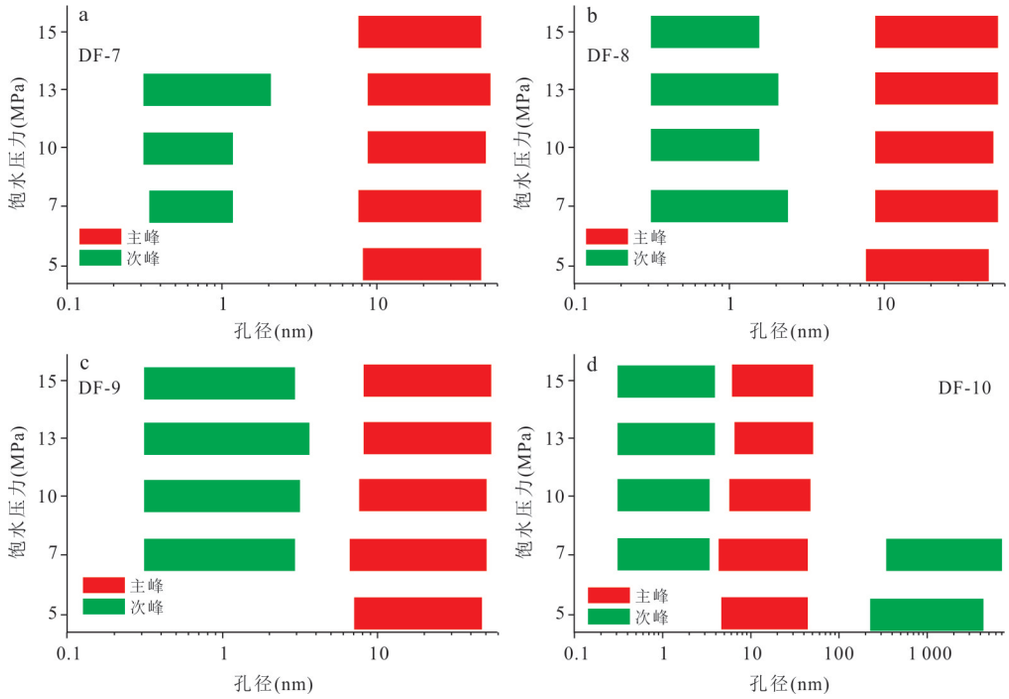

图 9　不同饱水压力条件下煤样 DF-7(a)、DF-8(b)、DF-9(c)与 DF-10(d)水赋存孔隙分布演化特征

Fig.9　Evolution of pore-size distributions for water occurrence in coal samples (a) DF-7, (b) DF-8, (c) DF-9, and (d) DF-10 at different water-saturation pressures

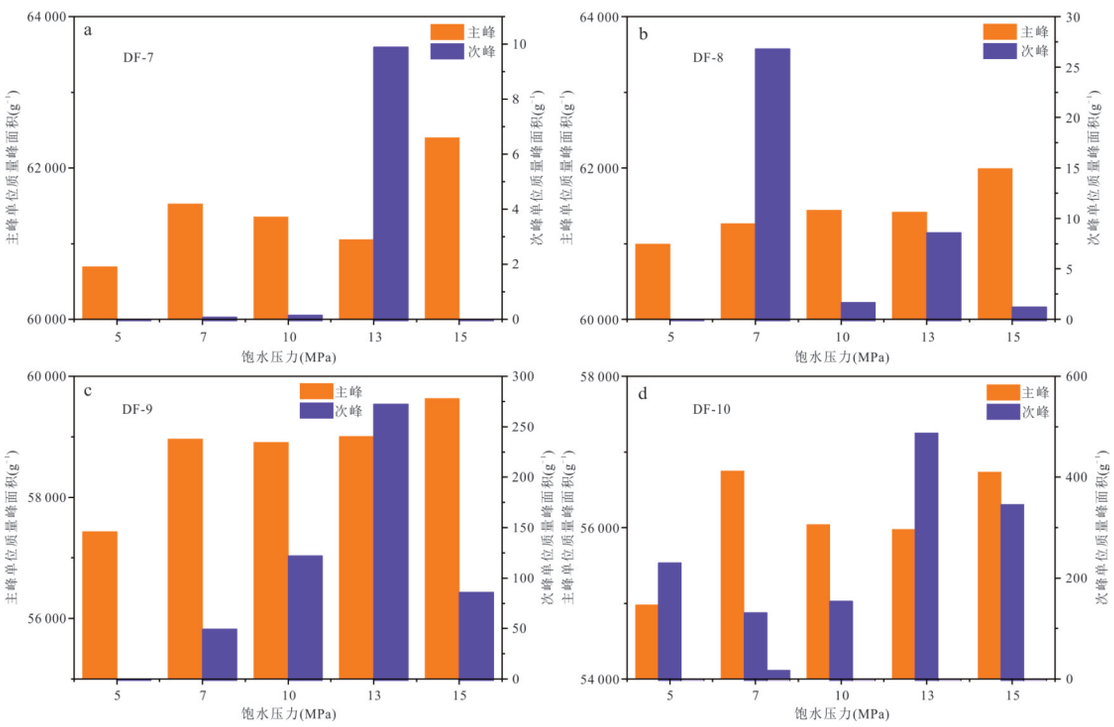

图 10　不同饱水压力条件下煤样 DF-7(a)、DF-8(b)、DF-9(c)与 DF-10(d)核磁共振 T_2 谱谱峰信号幅度变化

Fig.10　Variation in NMR T_2 peak signal amplitude of coal samples (a) DF-7, (b) DF-8, (c) DF-9, and (d) DF-10 at different water-saturation pressures

幅度在加压过程中出现下降，如 DF-7(图 10a)、DF-9(图 10c)与 DF-10(图 10d)中饱水压力从 7 MPa 增加至 10 MPa，与含水率随饱水压力上升而异常下降相对应，可能是由于增大饱水压力不足以使孔隙膨

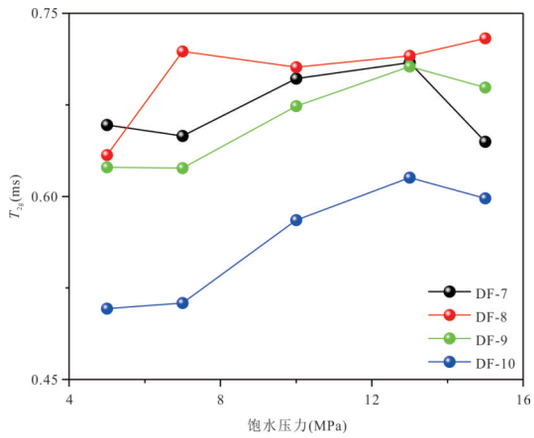

图 11　不同饱水压力条件下煤样核磁共振 T_{2g}演化特征

Fig.11　Evolution of NMR T_{2g} of coal samples at different water-saturation pressures

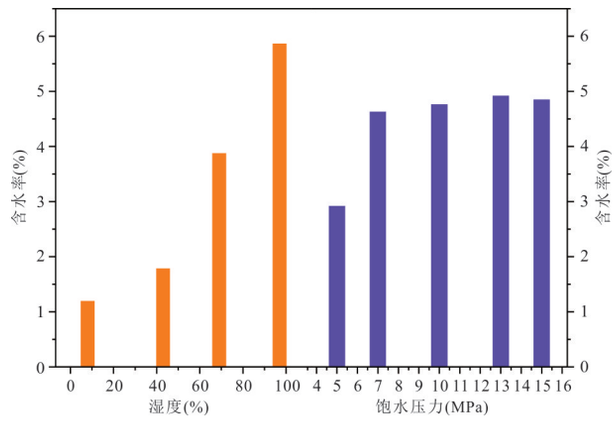

图 12　平衡水吸附与加压饱水煤样含水率对比

Fig.12　Comparison of water content between equilibrium water-adsorbed and pressurized water-saturated coal

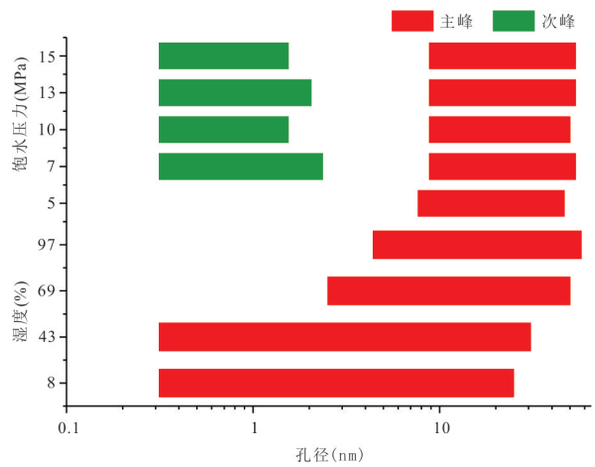

图 13　平衡水吸附与加压饱水煤样水赋存孔径范围对比

Fig.13　Comparison of pore-size ranges for water occurrence between equilibrium water-adsorbed and pressurized water-saturated coal samples

胀连通,但煤样受到的压实作用增强,毛管阻力增大,优势渗流通道减少,含水量下降(杨赫等,2020).

煤样不同饱水压力条件下 NMR 的 T_{2g} 的结果如图 11 所示,随饱水压力增加,T_{2g} 均有增大趋势,反映了在加压饱和水的作用下孔隙裂缝开始膨胀和连接,加压条件下水总体上向大孔隙运移.在 13 MPa 处 T_{2g} 有明显下降,反映了高压条件下部分大孔隙内水进一步突破毛管阻力进入更小的吸附孔,在孔隙结构改造效果较差的条件下微孔排水极难进行,不利于缓解水锁伤害.

3　煤储层原生吸附水与压裂侵入水赋存差异与水锁伤害机理

3.1　水赋存特征差异性分析

不同湿度条件下的水吸附样品吸附平衡后水赋存与不同压力加压饱水条件下(以 DF-8 为例)的含水率及其水赋存孔隙范围对比分别如图 12、图 13 所示.在含水率方面,不同湿度条件下的煤样水吸附后含水率普遍低于煤样加压饱水后的含水率,湿度达到 97% 后,煤样水吸附后的含水率明显高于加压饱水后煤样含水率.在水赋存孔径方面,水吸附煤样的水赋存范围主要集中于微孔至过渡孔,尤其在低湿度条件下水赋存孔隙更小.加压饱水煤样只有少部分水赋存于微孔,大部分均赋存于过渡孔.两种来源的水赋存差异表明,水吸附条件下水可进入更小的孔隙,而加压饱水条件下水倾向于进入更大的孔隙,这种差异可能与加压饱水条件下的孔隙结构改造有关.

3.2　孔隙水可动性差异分析

以不同湿度下的平衡水吸附煤样以及加压饱水煤样进行离心前后 NMR T_2谱差异测试实验对比不同来源水的运移差异.不同离心力条件下的水吸附煤样与加压饱水煤样含水饱和度如图 14 所示,随离心力增加,水吸附煤样与加压饱水煤样含水饱和度均下降,加压饱水煤样中的含水饱和度下降更明显.

水吸附煤样与加压饱水煤样不同离心条件下的 NMR 曲线分别如图 15 与 16 所示,水吸附煤样与加压饱水煤样在离心前后均呈单峰分布,湿度环境由低到高水吸附煤样饱水状态下主峰范围分别为 0.01～0.793 ms、0.01～0.977 ms、0.08～1.589 ms 与 0.14～1.825 ms,饱水压力由低到高加压饱水煤样饱水状态下主峰范围分别为 0.14～2.583 ms、0.099～

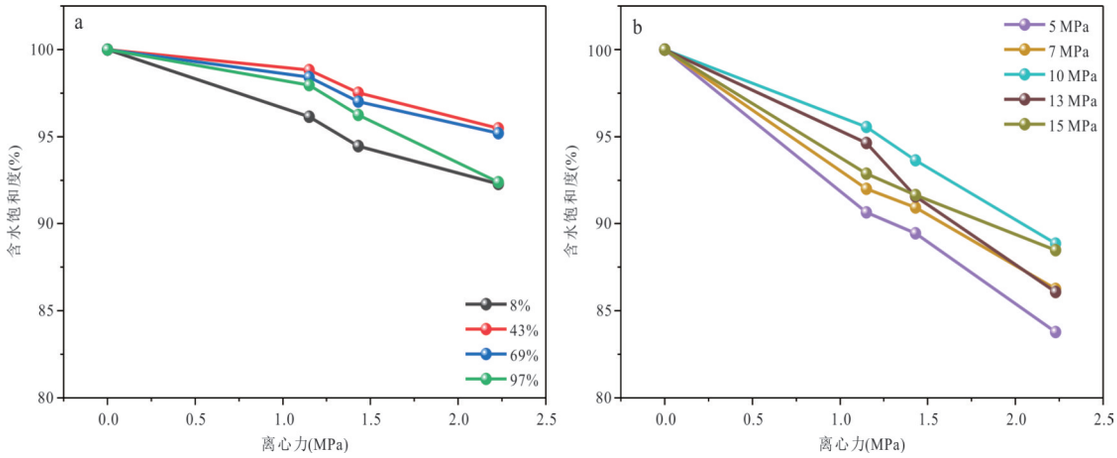

图 14　不同离心力条件下的平衡水吸附煤样(a)与加压饱水煤样(b)含水饱和度

Fig.14　Water saturation of (a) equilibrium water-adsorbed and (b) pressurized water-saturated coal samples under different centrifugal conditions

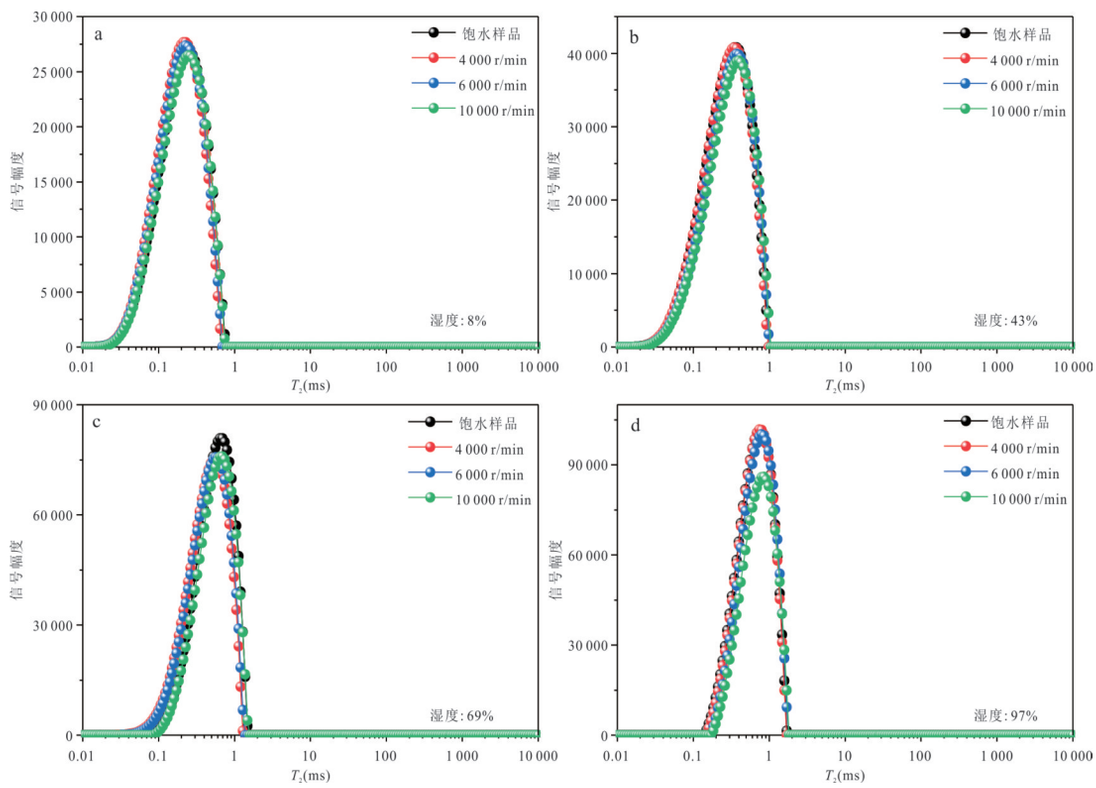

图 15　不同离心力条件下的平衡水吸附煤样核磁共振 T_2 谱分布

Fig.15　NMR T_2 spectra of equilibrium water-adsorbed coal samples under different centrifugal conditions

2.248 ms、0.14～3.181 ms、0.07～2.409 ms 与 0.08～2.583 ms.

不同离心力条件下的平衡水吸附煤样和加压饱水煤样 NMR 弛豫峰单位面积信号幅度及其伴随离心力增大的变化率分别如图 17 与 18 所示，随离心力的增加，水吸附煤样中最大水可动性伴随平衡湿度的增加而增大，主要与水赋存孔径有关，低湿度条件下的水吸附煤样水可赋存于更小的孔隙．加压饱水煤样最大水可动性随饱水压力增大先下降后增加，主要与增大饱水压力的孔隙改造与孔隙注水的双重作用有关，相较于加压饱水煤样，尽管水吸附煤样总体上水赋存较少，但可动性较差，尤其在低湿度条件下的水可动性最差．

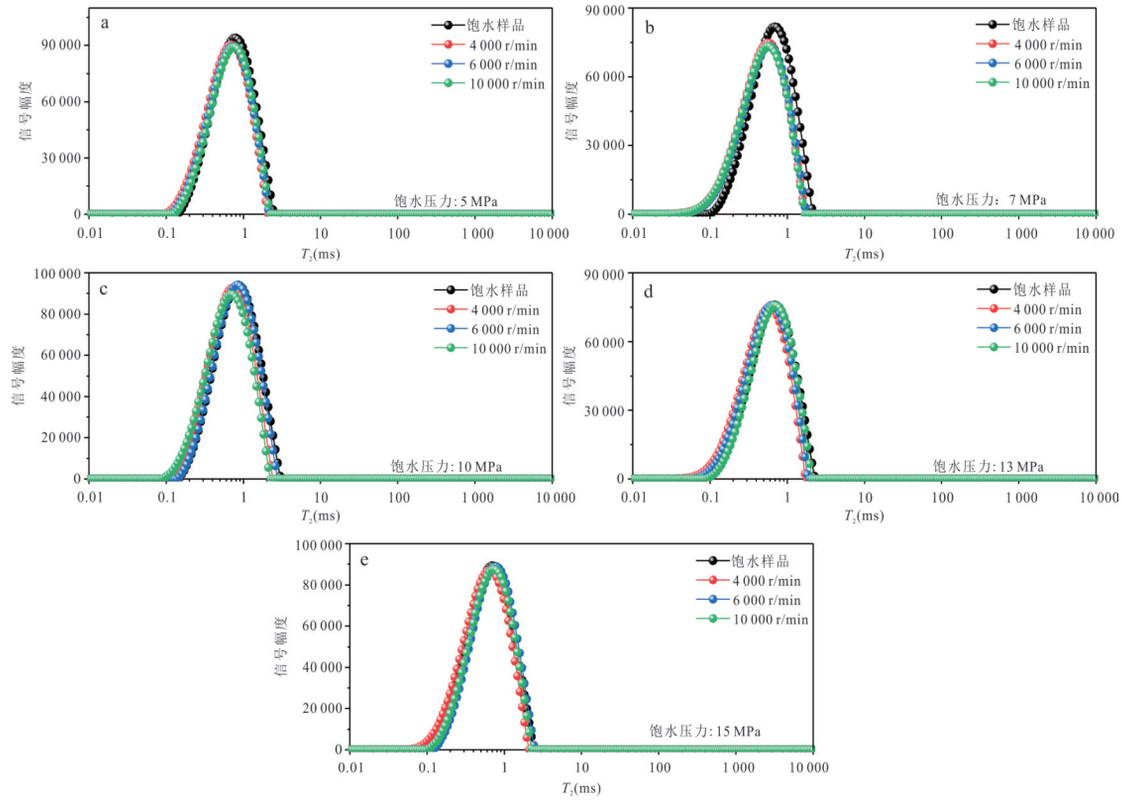

图 16　不同离心力条件下的加压饱水煤样核磁共振 T_2 谱分布

Fig.16　NMR T_2 spectra of pressurized water-saturated coal samples under different centrifugal conditions

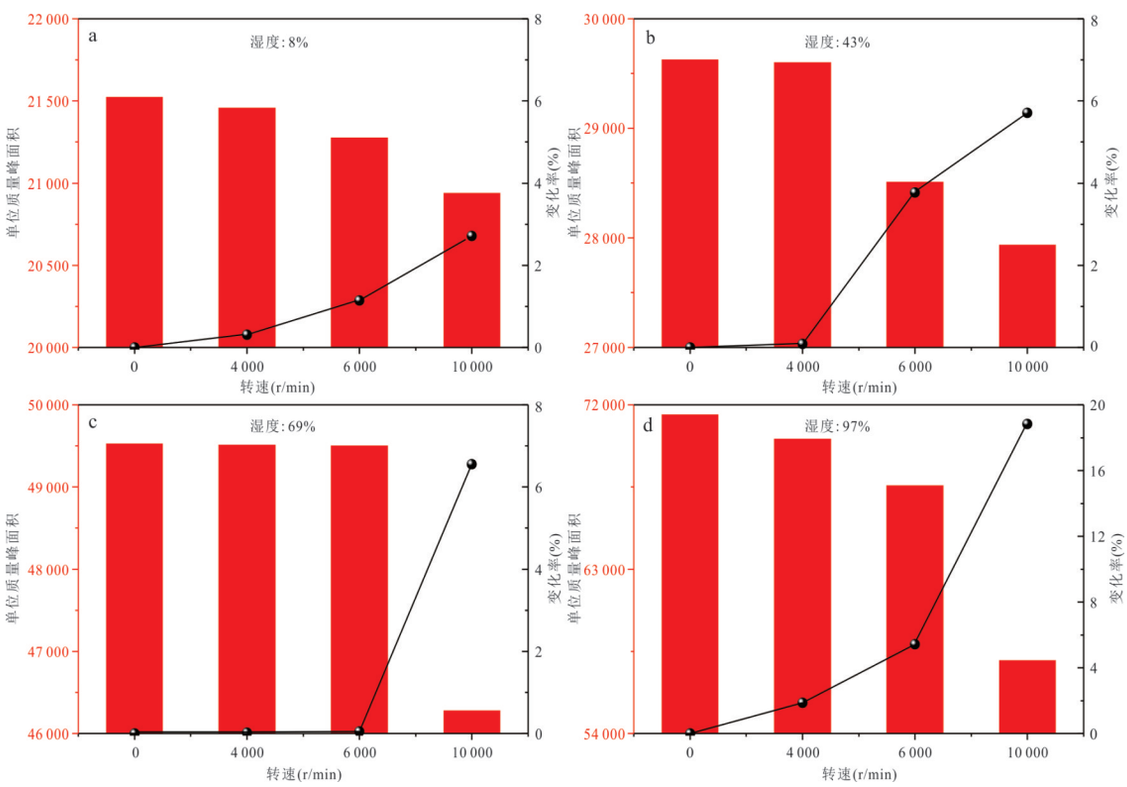

图 17　不同离心力条件下的水吸附煤样核磁共振 T_2 谱弛豫峰面积及其变化率

Fig.17　NMR T_2 peak areas and their rates of change for equilibrium water-adsorbed coal samples under different centrifugal conditions

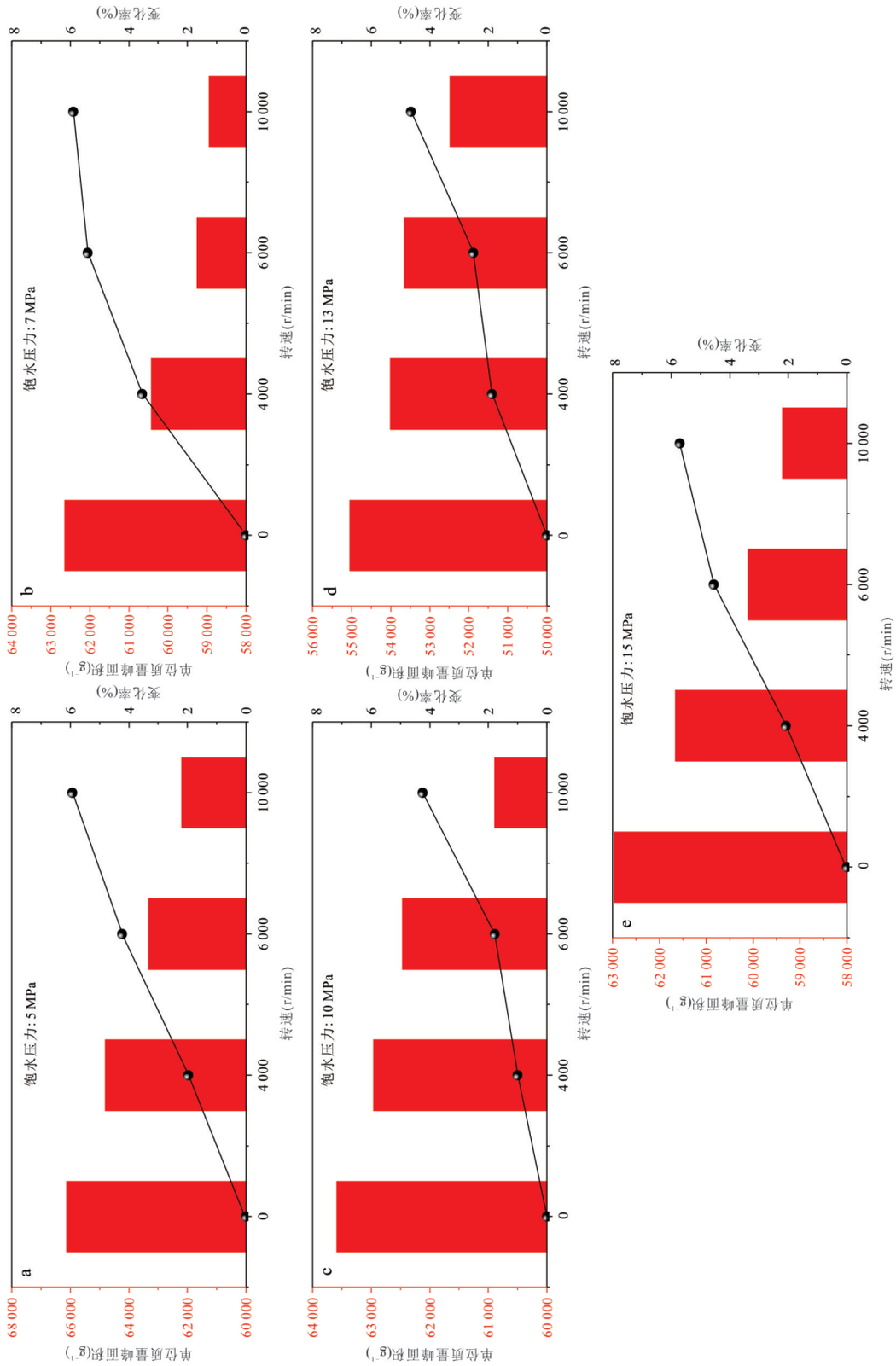

图18 不同离心力条件下的加压饱水煤样核磁共振T_2谱峰面积及其变化率

Fig.18 NMR T_2 peak areas and their rates of change for pressurized water-saturated coal samples under different centrifugal conditions

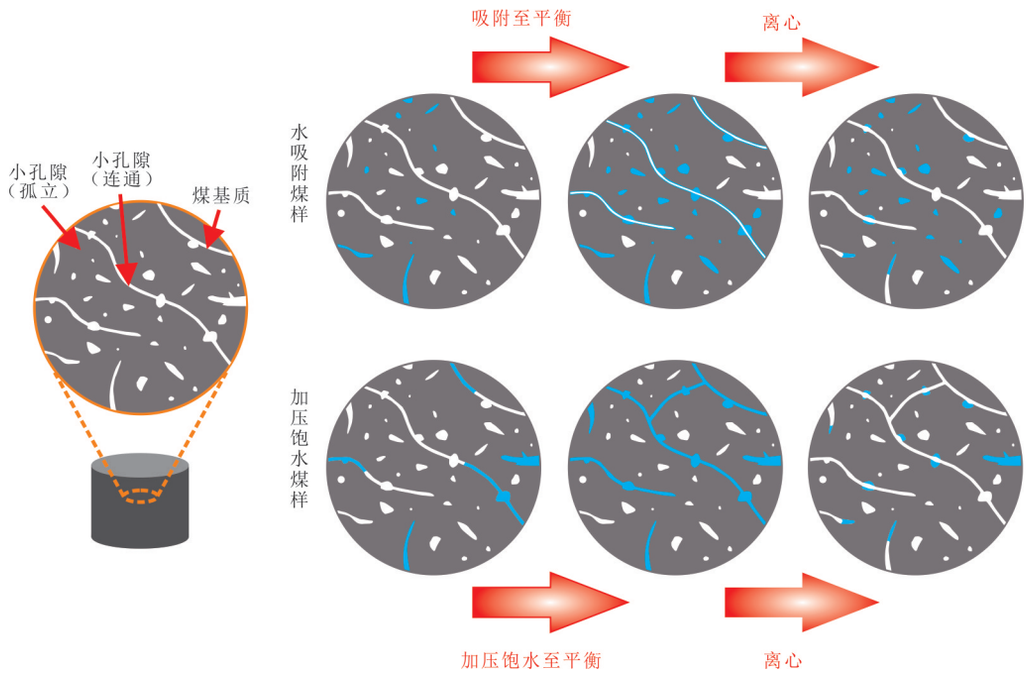

图 19　水吸附煤样与加压饱水煤样水可动性差异机理

Fig. 19　Schematic mechanism of the difference in water mobility between equilibrium water-adsorbed and pressurized water-saturated coal samples

水吸附煤样与加压饱水煤样水可动性差异如图 19 所示，相比于加压饱水煤样，水吸附煤样由于在一定的湿度环境下以水蒸气形式进入孔隙，水蒸气相比于液态水具有更大的分子动能和更大的分子间距离，可进入更小的孔隙甚至是孤立孔隙，其运移需要克服更大的毛管阻力，表现出水赋存少但难运移的特点．加压饱水可改造煤基质孔隙，孔隙连通性增强，尽管水赋存量增加但其水可动性强于水吸附煤样，表现出水赋存多易运移的特点．由于较差的水可动性，水吸附后的煤样会表现出较强的水锁伤害潜力．

3.3　水锁伤害机制与工程启示

综合实验结果可知，煤储层水锁伤害强度并非与含水率呈正相关，而是主要取决于水分赋存孔径与水可动性．加压饱水条件下煤岩含水率高，但水分多赋存于连通性好的过渡孔，可动性强、易排出，水锁伤害以暂时性、可逆性伤害为主；平衡水吸附条件下煤岩含水率低，但水分大量富集于微小孔隙与孤立孔隙，毛管阻力极大、难以脱除，形成永久性束缚水，诱发的水锁伤害更顽固、伤害程度更严重，这一认识修正了“高含水即高伤害”的固有观点．

工程开发中，现阶段普遍重点防控压裂液、钻井液侵入造成的人工水锁伤害，却忽视了储层原生湿度吸附水的潜在伤害．实际开发过程中，低湿度煤储层原生微孔吸附水形成的顽固水锁，往往是导致煤层气长期低产、稳产难度大的重要诱因．因此，储层保护与改造需兼顾原生吸附水锁与人工注水伤害，针对低湿度储层重点开展微孔解锁改造，提升微小孔隙水分运移能力；针对高压压裂储层，优化施工压力参数，规避高压微孔滞水效应，实现水锁伤害精准防控．

4　结论

本文通过梯度湿度平衡水吸附与梯度压力加压饱水对照实验，结合低场核磁共振与梯度离心测试，系统研究了煤储层原生吸附水与压裂侵入水的赋存差异及水锁伤害机理，主要得出以下结论：

(1)平衡水吸附条件下，煤储层中水主要赋存于微孔与过渡孔，吸附过程呈现“先向大孔隙迁移、后向小孔隙富集”的演化规律．环境湿度越高，煤样吸附平衡周期越长、含水率越高，水分平衡赋存孔径越大；低湿度环境下水分集中赋存于纳米级微小孔隙，孔隙水束缚效应显著．

(2)加压饱水条件下，煤储层中水以过渡孔赋存为核心，饱水压力对孔隙结构与水分赋存具有双

重调控作用.中低压条件下,压力可扩容孔隙、提升孔隙连通性,促使水分向大尺度孔隙迁移、增强水可动性;超高压条件下,部分水分突破毛管阻力渗入微孔,增加束缚水占比,小幅提升水锁风险.

(3)煤储层原生吸附与压裂侵入水造成的水锁伤害差异显著,原生吸附水锁伤害远强于人工加压注水伤害.平衡吸附煤样含水率更低,但气态水分子可渗入微小孤立孔隙,水分可动性极差、难以脱除,形成顽固性水锁伤害;加压饱水煤样含水率更高,但孔隙连通性好、水分可动性强,水锁伤害可逆性更强.

(4)煤储层水锁防控需打破"高含水高伤害"的固有认知,充分重视低湿度储层原生微孔吸附水锁伤害,针对性优化解锁工艺、改善微孔水分运移条件,同时优化压裂施工压力制度,规避高压滞水效应,为煤层气高效开发提供保障.

References

Chen, X. J., Cheng, Y. P., 2014. Experiment Study on Water Injection Affected to Desorption of Coal Adsorption Gas. *Coal Science and Technology*, 42(6): 96−99 (in Chinese with English abstract).

Huo, C., Guo, H. X., Wang, L., et al., 2025. Research Progress of Deep Coalbed Methane Exploration and Development in China under the Dual Carbon Background. *Science Technology and Engineering*, 25(14): 5705−5720 (in Chinese with English abstract).

Li, J., Zhang, J. J., Huang, K. B., et al., 2022. Dynamic Variation on Water Micro-Occurrence in Low-Rank Coals by a Low-Field Nuclear Magnetic Resonance Experiment: A Case Study of the No. 7 Coal Seam in Kongzhuang Coal Mine. *Energy & Fuels*, 36(16): 9066−9079. https://doi. org/10.1021/acs. energyfuels.2c01583

Li, Y. J., Zhai, C., Sun, Y., et al., 2023. Characterizing Water Vapor Adsorption on Coal by Nuclear Magnetic Resonance: Influence of Coal Pore Structure and Surface Properties. *Energy*, 282: 128−420. https://doi. org/10.1016/j.energy.2023.128420.

Lin, C. B., 2019. Experimental Research on Coal Seam Pulsating Water Injection in Infiltration and Gas Desorption. *Coal Engineering*, 51(10): 108−112 (in Chinese with English abstract).

Liu, Q., Huang, J. B., Ni, G. H., et al., 2020. Water Blocking Effect of Coal Seam Based on Low Field Nuclear Magnetic Resonance. *Journal of China Coal Society*, 45(3): 1108−1115 (in Chinese with English abstract).

Liu, W., Wang, G., Han, D. Y., et al., 2021. Accurate Characterization of Coal Pore and Fissure Structure Based on CT 3D Reconstruction and NMR. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 96: 104−242. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104242

Mao, G.T., Lai, F.P., Mukatts, A., 2018. Study on the Influencing Factors of Water Blocking Damage of Coalbed Methane Reservoir in Zhaozhuang Mine, Qinshui Basin, *Natural Gas Geoscience*, 29(11):1647−1655 (in Chinese with English abstract).

Meng, M. M., Ge, H. K., Ji, W. M., et al., 2015. Monitor the Process of Shale Spontaneous Imbibition in Co-Current and Counter-Current Displacing Gas by Using Low Field Nuclear Magnetic Resonance Method. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27: 336−345. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.069

Ni, G. H., Li, Z., Xie, H. C., 2018. Experimental Research on the Methods to Remove Water Blocking Effect Based on Nuclear Magnetic Resonance Testing. *Journal of China Coal Society*, 43(8): 2280−2287 (in Chinese with English abstract).

Shan, G. X., Cheng, P., Xiao, X. M., et al., 2022. Water-Bearing Characteristics in Overmature Shales from Coal Measure Strata Based on Equilibrium Water Vapor Adsorption and Its Geological Significances. *Natural Gas Geoscience*, 33(4): 666−676 (in Chinese with English abstract).

Yang, H., Cheng, W. M., Liu, Z., et al., 2020. Fractal Characteristics of Effective Seepage Channel Structure of Water Infusion Coal Based on NMR Experiment. *Rock and Soil Mechanics*, 41(4): 1279−1286 (in Chinese with English abstract).

Yang, Z. M., Zhang, Y. P., Li, H. B., et al., 2017. Application Basis of Nuclear Magnetic Resonance Technology in the Unconventional Reservoirs. *Earth Science*, 42(8): 1333−1339 (in Chinese with English abstract).

Yao, Y. B., Liu, D. M., Che, Y., et al., 2010. Petrophysical Characterization of Coals by Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (NMR). *Fuel*, 89(7): 1371−1380. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.11.005

Zhang, G. H., Liang, B., Bi, Y. W., 2012. Impact of Water Lock on Gas Desorption of Coal with Gas. *Journal of China Coal Society*, 37(2): 253−258 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J. J., Wei, C. T., Ju, W., et al., 2020. Microscopic Distribution and Dynamic Variation of Water under Stress in Middle and High Rank Coal Samples. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 79: 103−369.

https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103369

Zhang, S. Y., Sang, S. X., 2008. Influence Mechanism of Liquid Water on Methane Absorption of Coals with Different Ranks. *Acta Geologica Sinica*, 82(10): 1350－1354 (in Chinese with English abstract).

Zheng, M., Li, J. Z., Wu, X. Z., et al., 2019. Potential of Oil and Natural Gas Resources of Main Hydrocarbon-Bearing Basins and Key Exploration Fields in China. *Earth Science*, 44(3): 833－847 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈向军, 程远平, 2014. 注水对煤层吸附瓦斯解吸影响的试验研究. 煤炭科学技术, 42(6): 96－99.

霍超, 郭海晓, 王蕾, 等, 2025. 双碳背景下中国深部煤层气勘探开发研究进展. 科学技术与工程, 25(14): 5705－5720.

林传兵, 2019. 煤层脉动注水渗透与瓦斯解吸实验研究. 煤炭工程, 51(10): 108－112.

刘谦, 黄建滨, 倪冠华, 等, 2020. 不同煤级煤液相侵入效应低场核磁共振实验研究. 煤炭学报, 45(3): 1108－1115.

毛港涛, 赖枫鹏, 木卡旦斯·阿克木江, 等, 2018. 沁水盆地赵庄井田煤层气储层水锁伤害影响因素. 天然气地球科学, 29(11): 1647－1655.

倪冠华, 李钊, 解宏超, 2018. 基于核磁共振测试的煤层水锁效应解除方法. 煤炭学报, 43(8): 2280－2287.

单国鑫, 程鹏, 肖贤明, 等, 2022. 过成熟煤系页岩平衡水吸附特征及其地质意义. 天然气地球科学, 33(4): 666－676.

杨赫, 程卫民, 刘震, 等, 2020. 注水煤体有效渗流通道结构分形特征核磁共振试验研究. 岩土力学, 41(4): 1279－1286.

杨正明, 张亚蒲, 李海波, 等, 2017. 核磁共振技术在非常规油气藏的应用基础. 地球科学, 42(8): 1333－1339.

张国华, 梁冰, 毕业武, 2012. 水锁对含瓦斯煤体的瓦斯解吸的影响. 煤炭学报, 37(2): 253－258.

张时音, 桑树勋, 2008. 液态水影响不同煤级煤吸附甲烷的差异及其机理. 地质学报, 82(10): 1350－1354.

郑民, 李建忠, 吴晓智, 等, 2019. 我国主要含油气盆地油气资源潜力及未来重点勘探领域. 地球科学, 44(3): 833－847.