

水化-温度协同作用对龙马溪组深层页岩声波传播特性及力学强度影响实验研究

任建飞¹, 雷刚^{1*}, 刘向君², 卢春华¹, 熊健², 梁利喜²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500)

摘要: 深层页岩具有高水敏性及高温特性, 水化-温度协同效应对泥页岩物理及力学性质存在较大影响。以四川盆地龙马溪组深层页岩为研究对象, 基于XRD衍射、扫描电镜、水化-温度协同浸泡、超声波及室内力学压缩等实验获取了页岩在不同温度条件下浸泡后的裂缝参数、声波参数和力学参数。研究结果显示: 在常温(24℃)及高温(120℃)环境下, 随浸泡时间增加, 声波能量产生衰减, 高温环境下纵、横速度下降幅度分别是常温环境下的1.41倍和1.71倍; 水化作用导致岩样裂缝参数产生变化并具有阶段性, 声波衰减系数及水化结构损伤系数在水化初期、中期、末期, 分别呈现快速增加、缓慢增加和趋于稳定的趋势, 高温环境下声波衰减系数及水化损伤系数分别是在常温环境下的1.72和2.98倍; 浸泡后页岩力学参数出现劣化, 岩样抗压强度、弹性模量、内摩擦角及粘聚力呈阶段式下降, 高温环境下页岩力学参数降幅分别是常温环境下对应力学参数降幅的1.24、1.42、2.06和1.39倍。研究结论可为优化深层页岩水平井钻井地质设计及调整钻井液密度提供一定理论依据。

关键词: 深层页岩; 水化-温度协同作用; 声波参数; 损伤特性; 力学参数; 龙马溪组

中图分类号: P634.1; TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)01-0068-10

Experimental study on the effect of hydration and temperature synergism on acoustic wave propagation and mechanical strength of Longmaxi deep shales

REN Jianfei¹, LEI Gang^{1*}, LIU Xiangjun², LU Chunhua¹, XIONG Jian², LIANG Lixi²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei 430074, China; 2. State Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: Deep shale exhibits high water sensitivity and high-temperature characteristics, and the coupled effects of hydration and temperature have a significant impact on the physical and mechanical properties of shale. Using deep shale samples from the Longmaxi Formation in the Sichuan Basin as the research subject, fracture parameters, ultrasonic parameters, and mechanical parameters of the shale after immersion under different temperature conditions were obtained through experiments involving X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), hydration-temperature coupled immersion tests, ultrasonic testing, and laboratory mechanical compression. The experimental results reveal that, the energy of ultrasonic waves decayed with increasing immersion time under both

收稿日期: 2024-08-14; 修回日期: 2024-10-19 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.01.010

基金项目: 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放基金“水化-高温耦合效应对页岩渗透率及力学性质演化规律研究”(编号: 202406)

第一作者: 任建飞, 男, 汉族, 1998年生, 博士研究生, 地质工程专业, 主要研究方向为多场耦合作用下岩石物理力学, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, 483174706@qq.com。

通信作者: 雷刚, 男, 汉族, 1987年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 主要研究方向为非常规油气资源开发数值模拟, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, leigang@cug.edu.cn。

引用格式: 任建飞, 雷刚, 刘向君, 等. 水化-温度协同作用对龙马溪组深层页岩声波传播特性及力学强度影响实验研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 68-77.

REN Jianfei, LEI Gang, LIU Xiangjun, et al. Experimental study on the effect of hydration and temperature synergism on acoustic wave propagation and mechanical strength of Longmaxi deep shales[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 68-77.

ambient temperature (24°C) and high-temperature (120°C) conditions. The reduction in longitudinal and transverse wave velocities in the high-temperature environment was 1.41 and 1.71 times greater, respectively, than that under ambient conditions. Hydration caused changes in the fracture parameters of the shale, showing a phased behavior. The ultrasonic attenuation coefficient and hydration-induced structural damage coefficient increased rapidly in the early stages of hydration, increased gradually in the middle stages, and tended to stabilize in the late stages. The ultrasonic attenuation coefficient and hydration damage coefficient at high temperatures were 1.72 and 2.98 times higher, respectively, than that under ambient conditions. Additionally, the mechanical properties of the shale deteriorated after immersion, with compressive strength, elastic modulus, internal friction angle, and cohesion showing a staged decline. Under high-temperature conditions, the reduction in these mechanical parameters was 1.24, 1.42, 2.06, and 1.39 times greater, respectively, than that under ambient conditions. The findings of this study provide a theoretical basis for optimizing geological designs for horizontal drilling in deep shale formations and for adjusting drilling fluid densities.

Key words: deep shale; hydration-temperature synergistic effect; acoustic parameters; damage characteristics; mechanical parameters; Longmaxi Formation

0 引言

我国页岩气资源量巨大,据国家能源局统计,2023年非常规油气产量达到了 $960 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气产量为 $250 \times 10^8 \text{ m}^3$,占比26.41%^[1]。水平井及储层压裂改造技术是获取页岩气工业气流的主要手段。深层页岩储层具有高水敏性、高温特性、水平主应力差异系数大及纵向非均质性强等特点^[2],水化-温度协同效应对泥页岩物理及力学性质存在较大影响,影响页岩气安全高效开采。

页岩主要由石英、长石、粘土和碳酸盐岩等矿物所组成^[3],层理和微裂缝发育,为水相介质进入其内部孔隙提供了有效通道^[4]。在钻井及压裂过程中,钻井液和压裂液与储层直接接触,与页岩发生水岩作用。对经去离子水浸泡后的页岩进行SEM观测发现,经浸泡后岩样裂缝发生扩展,并滋生微裂隙^[5];页岩表面发育与层理面相平行的裂缝,并随着流体浸泡时间增加,岩样表面发生剥落,整体性遭到破坏^[6];通过室内孔隙度-渗透率和超声波实验发现水化可导致页岩孔隙度、渗透率、声波时差增大^[7-8]。页岩地层井壁坍塌较为严重,这是由于页岩地层具有较强的水敏性导致力学性质劣化所致,基于室内剪切实验发现页岩浸泡后剪切强度随浸泡时间增加而降低^[9];水化作用使页岩力学性质劣化,使坍塌压力在钻井初期迅速升高。在同种性质钻井液流体浸泡下页岩水化膨胀能力高于砂岩、碳酸盐岩等,更易发生水化结构损伤^[10];页岩发育层理等弱结构面,在浸泡作用下弱面弱化影响高于对岩石基质强度的影响^[11]。阻滞页岩水化采取物理封堵及化学抑制相结合的方式^[11],无机盐溶液抑制水化反应具有良好效果,孔隙度及矿物含量对于同种

水活度盐溶液渗流规律存在显著影响^[12]。

在高温环境下,由温度产生的热应力会诱发岩石热破裂,有学者指出热劣化是导致岩石断裂韧性发生下降的主要原因^[13]。高温导致页岩中的水分子散失,粘土矿物改性,造成抗压强度及弹性模量小幅度增长后迅速降低^[14]。页岩力学性质及表观特征随着温度不断增加呈现出动态变化,在120°C时,脆性及峰值强度达到最高值,在200°C时出现宏观裂纹^[15]。有研究显示在高温环境下,页岩的孔隙度、渗透率随着温度增加而增大,声波速度降低,声波频域信号逐渐由高频向低频转换^[16-21]。上述研究对在水化和温度作用后的页岩物理性质及力学性质的影响已取得了一定认识。随着页岩气开采作业深度逐渐增加,深部页岩物理及力学性质受到越来越多专家关注。但由于深部页岩具有强水敏性及高温特性,目前水化-温度协同效应对深部泥页岩物理及力学性质的影响规律不明确。因此,明确水化-温度协同作用对深部页岩的物理及力学性质影响具有实际工程和科学意义。

基于此,笔者以四川盆地龙马溪组页岩为研究对象。开展岩样水化-温度协同浸泡实验、超声波实验、矿物组分测试、扫描电镜观测和三轴压缩实验,分别获取岩样的声波参数、矿物组分和力学弹性参数。研究流体-温度协同作用后页岩声波及力学弹性参数的变化规律,为优化页岩地层钻井地质设计及调整钻井液密度窗口提供一定理论依据。

1 实验样品与实验方法

1.1 实验样品

本文以四川盆地龙马溪组深层页岩为研究对

象,共钻取同一层理角度(90°)页岩柱塞岩样10块。图1为页岩实验样品,岩样外观呈现灰黑色、层理发育且无明显宏观裂缝。

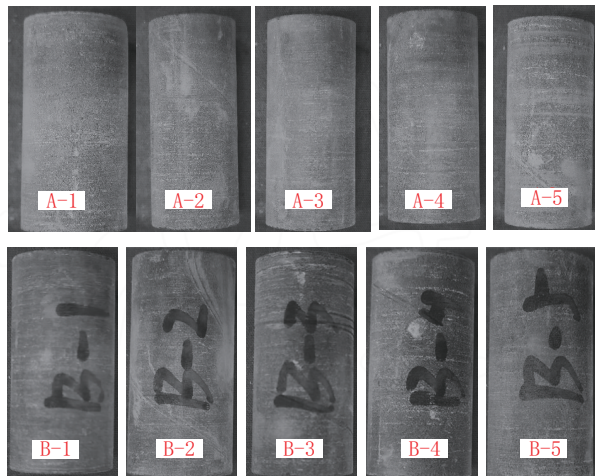


图1 页岩实验样品及分组

Fig.1 Shale experimental sample and grouping

设置恒温烘干箱温度为40℃,将岩样放置在烘干箱内24h^[22-23],烘干后取出,并测量其质量、孔隙度以及渗透率,之后将岩样存放在干燥密闭的岩样盒中,表1为原状岩样基础物性参数。

表1 岩样基础物性

Table 1 Basic physical properties of rock samples

岩样 编号	质量/ g	密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙 度/%	渗透率/ mD	声波速度/(m·s ⁻¹)	
					纵波	横波
A-1	64.23	2.57	1.307	0.00570	3073.12	2023.39
A-2	64.02	2.57	1.315	0.00530	2989.25	2009.73
A-3	63.82	2.58	1.375	0.00510	2983.79	2042.82
A-4	61.88	2.59	1.373	0.00550	2906.74	1992.86
A-5	64.04	2.58	1.425	0.00540	2910.41	1975.59
B-1	63.83	2.58	1.341	0.00580	2857.63	2037.62
B-2	62.38	2.59	1.774	0.00550	2835.40	2019.18
B-3	64.45	2.59	1.537	0.00516	2877.31	2037.62
B-4	63.95	2.57	1.535	0.00527	2853.41	2025.31
B-5	64.02	2.58	1.447	0.00505	2886.90	2038.76

每种矿物都具有特定的X射线衍射图谱,其含量与衍射峰的强度呈现正相关性。将加工成标准柱塞样岩心多余的样品碎块放置于烘箱中,在40℃的温度条件下烘干12h,再将其研磨为粒径<100目的粉末,随后进行全岩矿物分析,在实验过程中

严格按照行业标准《沉积岩总黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法》(SY/T5163—2018)进行实验和分析。结果显示样品主要矿物组分包含石英、方解石、粘土矿物、菱铁矿、斜长石和其他矿物,各矿物平均含量依次为48.19%、16.35%、16.87%、3.67%、6.29%、13.63%,组成占比情况如表2所示。

表2 岩样矿物组成及占比情况

Table 2 Mineral composition and proportion of rock samples %

岩样编号	石英	方解石	粘土矿物	菱铁矿	斜长石	其他矿物
A-1	49.80	15.38	16.24	4.57	7.93	14.58
A-2	48.60	15.16	17.34	3.67	7.30	12.49
A-3	48.58	17.11	17.26	4.34	6.94	13.39
A-4	48.21	15.09	17.29	3.03	7.87	13.76
A-5	48.15	16.76	15.77	3.02	5.93	14.32
B-1	49.02	17.50	17.12	3.61	5.76	14.05
B-2	48.22	15.63	16.98	3.32	6.11	13.16
B-3	48.50	17.13	15.93	3.45	5.09	13.12
B-4	49.45	16.31	17.66	4.31	6.55	14.70
B-5	43.37	17.43	17.10	3.37	3.42	12.72
平均	48.19	16.35	16.87	3.67	6.29	13.63

表3为岩样粘土矿物组成图,其中粘土矿物由伊利石、高岭石、伊/蒙间层及绿泥石构成,平均占比分别为60.72%、3.85%、15.76%、19.67%。

表3 粘土矿物相对含量

Table 3 Relative content of clay mineral %

岩石编号	伊利石	高岭石	伊/蒙间混层	绿泥石
A-1	61.99	4.42	16.48	18.44
A-2	59.71	2.18	14.63	18.23
A-3	61.22	2.81	16.12	20.09
A-4	60.55	5.49	14.97	18.05
A-5	59.94	2.02	15.19	20.53
B-1	61.67	5.47	16.05	19.89
B-2	61.61	4.55	14.97	20.74
B-3	60.66	2.01	16.99	18.26
B-4	59.84	3.63	16.45	20.80
B-5	59.99	5.92	15.74	21.66
平均	60.72	3.85	15.76	19.67

1.2 实验方法

为获取水化-温度协同作用后页岩声波及力学参数,选用西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室岩石力学与井壁稳定性团队研发的高温滚子加热炉对岩样进行预处理。图2为高温滚子加热炉装置,该设备主要由温控系统、滚子系统、散热系统以及定时系统等部分组成。实验共设计两组方案:①岩样A组在常温(24℃)条件下进行岩样浸泡实验,浸泡时间分别设定为0、24、48、72、96 h;②岩样B组在高温(温度设定为120℃)环境下进行岩样浸泡实验,浸泡时间与A组保持一致,两种实验方案中岩样浸泡介质均为去离子水,同时向高压釜内注入3 MPa压力,分别用于模拟钻井过程中页岩与水基钻井液接触及井筒压差。



(a) 高温滚子加热箱



(b) 承压老化罐

图2 高温滚子加热炉设备

Fig.2 High temperature roller heating urnance equipment

岩样经流体、流体-温度协同预处理完成后,随即测量岩样基础物性参数和力学参数。声波参数对于岩样内部结构变化具有较高的敏感性,具体反映在声波速度、声波时域初至时间、声波频域主频等参数的变化^[9]。鉴于此,采用多频超声波测试系统获取岩样声波参数,该系统由超声波发射-接收

探头、示波器、压力耦合装置、岩样装置台、搭载Ultra Socpe 信号采集软件的计算机等组成。超声波探头选择发射频率为400 kHz,岩样两端耦合压力设置为0.1 MPa,且每块测试样品耦合压力保持一致,在进行测试之前,需对每块岩样进行波形校正,超声波实验装置如图3所示。

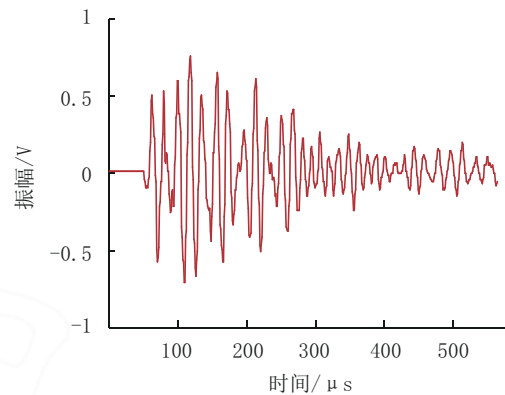


图3 超声波测试系统

Fig.3 Ultrasonic testing system

声波参数蕴含大量岩样内部结构信息,通过采集的纵波、横波初至时间,可计算在不同浸泡时间和温度下的声波速度,计算公式为:

$$V_p = \frac{L}{t - t_0} \quad (1)$$

式中: V_p ——声波速度,m/s; t_0 ——对接时首波的初至时间,s; t ——夹持岩样时的首波初至时间,s; L ——岩样的长度,m。

岩样时域信号可借助超声波采集设备直接获取,除时域信号外,频域信号同样包含大量信息,根据傅里叶变换可将信号进行分解,并按频域展开,可成频域函数。其计算公式如下:

$$\begin{cases} x(i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m (a_k \cos \frac{2\pi k_i}{N} + b_k \sin \frac{2\pi k_i}{N}) \\ a_0 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \\ a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cos \frac{2\pi k_i}{N} \\ b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \sin \frac{2\pi k_i}{N} \end{cases} \quad (2)$$

式中： x_i ——信号的离散形式的傅里叶变换； a_0 、 a_k 、 b_k ——傅里叶系数； i 、 k ——计数； N ——变换区间的长度； m ——取样点数。

流体及温度协同处理后势必导致岩样内部结构产生变化。声波衰减系数和水化损伤因子对结构变化具有较高敏感性。因此，采用声波衰减系数以及水化损伤系数^[23]定量表征岩样损伤程度，其计算公式分别为：

$$\alpha = \frac{\ln A_0 - \ln A}{L} \quad (3)$$

$$D_h = \frac{(M_a - M_c)(F_a - F_b)}{M_a F_a} \quad (4)$$

式中： α ——声波衰减系数； A_0 ——原状岩样时声波振幅； A ——处理后岩样声波振幅； L ——岩样长度； D_h ——水化损伤系数； M_a ——原状岩样声波主频； M_c ——岩样处理后声波主频； F_a ——原状岩样声波主频对应幅值； F_b ——处理后岩样声波主频对应幅值。

2 实验结果

2.1 声波速度特征

图4为岩样经流体浸泡和流体-温度协同处理后的声波参数。可知当浸泡时间分别为0、24、48、72、96 h时，在常温条件下，岩样纵波速度与横波速度随浸泡时间增加而逐渐降低，平均降幅分别为13.78%、9.46%，该实验结果与龙马溪组页岩水化得到的结论具有一致性^[24]。这是由于去离子水在页岩自吸和压差作用下通过裂缝及层理等通道进入页岩内部与粘土矿物发生物理、化学及物理化学反应，造成页岩内部孔径增大、裂缝扩展，从而增大了声波在页岩中传播的路径；并且由于层理作为弱结构面，具有疏松多孔特点，该结构会直接造成声波传播距离增大，从而使声波速度降低。

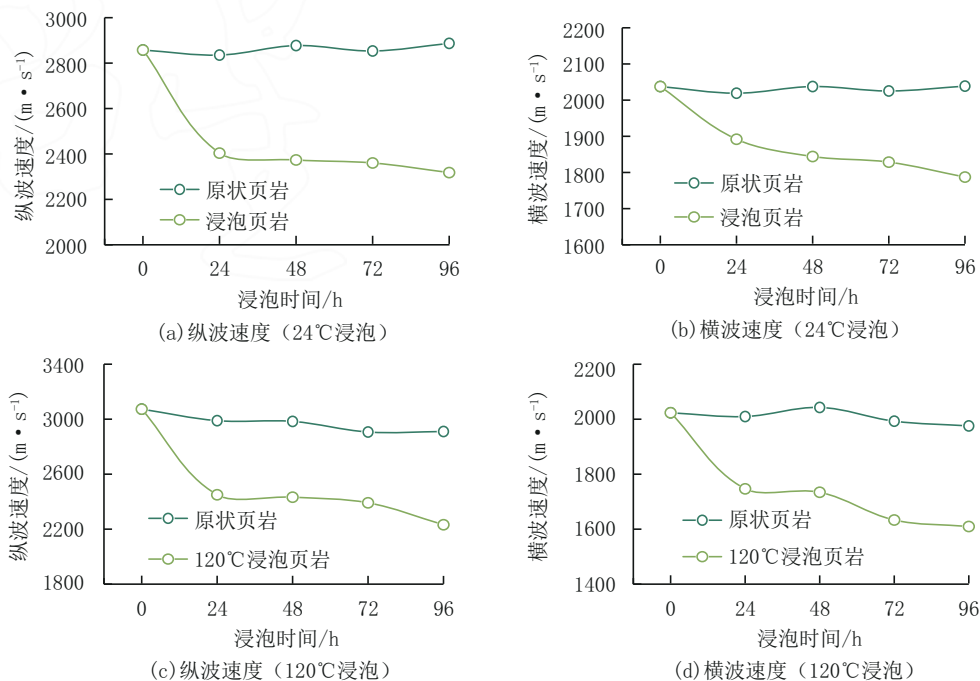


图4 声波速度

Fig.4 Acoustic velocity

在温度为120℃的高温条件下，岩样声波速度变化趋势与在常温条件下具有一定的相似性，均与

浸泡时间呈现负相关，声波速度下降幅度分别为19.38%、16.18%，纵波速度与横波速度降幅分别是

常温条件下声波速度降幅的1.41、1.71倍。两种温度环境下声波速度变化幅度存在差异。一方面,随温度增加,水分运动速率及扩散率增加,导致水分子迁移能力增强,使其更易于进入粘土矿物的晶格结构中,粘土矿物(伊利石)吸水膨胀型粘土在高温环境中,将吸附到更多的水分子,从而增强其水化膨胀效应;另一方面,温度产生的热应力作用,使岩样内部结构产生变化,例如孔径增大、裂缝发生扩展,使得水分子与粘土矿物接触的有效路径增加,导致水分子与粘土矿物之间水化面积增加,促进水岩反应。因此,页岩在相同性质流体浸泡时间下,高温环境中声波能量衰减幅度更大。

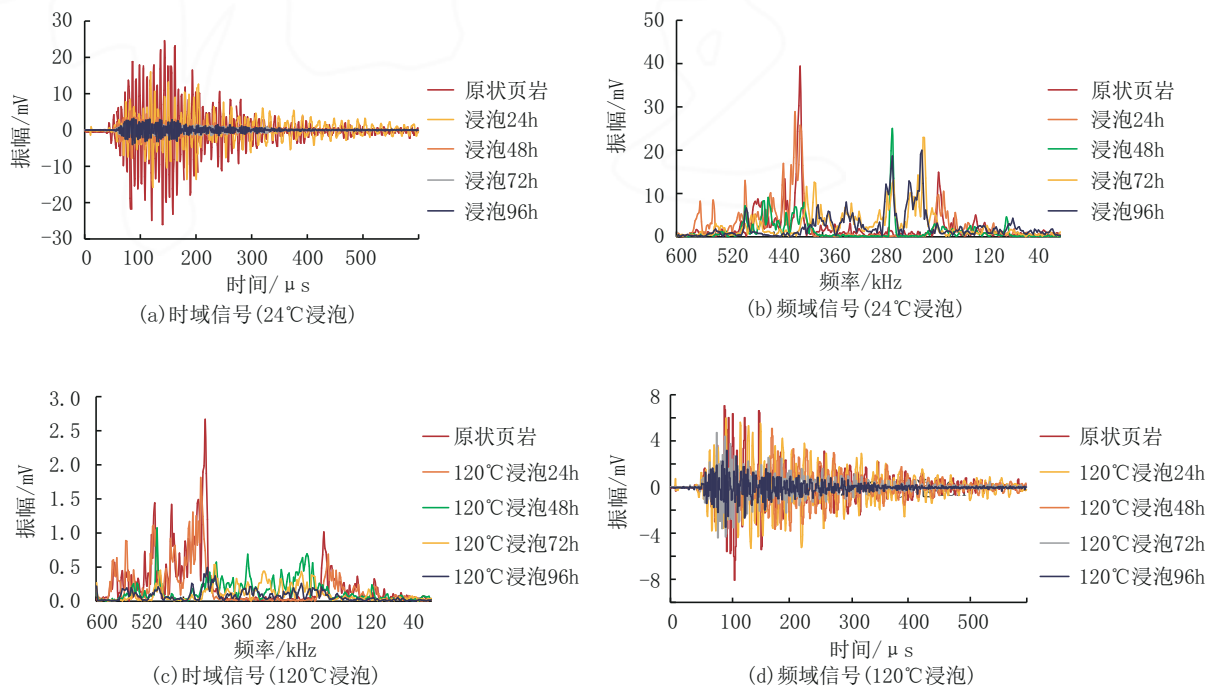


图5 声波时域-频域信号

Fig.5 Acoustic time-domain frequency-domain signal

声波频域信号蕴含大量岩样内部结构信息,页岩经浸泡后主频呈现多峰分布。其中,主频谱峰较高且尖锐、带宽较窄,该结论与基于超声波得到认识具有一致性^[25]。流体浸泡时间范围为0~96 h,在常温条件下,随浸泡时间增加,谱峰所对应的频宽范围为200~400 kHz;在高温条件下,主频变换区间为120~400 kHz。二者主频均逐渐向低频转换,这表明页岩声波能量集中区域逐渐向低频部分偏移,这由于岩样经流体浸泡作用后,内部裂缝扩展、孔径及渗透性增大等变化加剧了对高频信号的阻碍效

2.2 频谱特征

图5为页岩经流体浸泡后的声波时域及频域信号。在常温与在高温(120℃)条件下流体浸泡后岩样的时域和频域信号均发生了不同程度畸变与相变。两种温度环境下,随浸泡时间增加,时域内峰值振幅逐渐降低,平均降幅分别为37.81%、72.89%。浸泡后岩样时域信号内峰值振幅较低,尾波较为发育,说明声波在传播过程中发生反射、折射和衍射次数增加,使声波能量在时间域上分布较广,初至时间及峰值振幅下降预示着声波所携带的能量衰减,造成声波速度降低,该现象在高温环境下更为明显。

应;另外,在高温环境下,页岩水化反应更为剧烈,非线性效应更为显著,具体表现为频谱中的谐波成分增大、频谱展宽,导致频谱失真。同时,温度效应所产生的热损伤导致孔隙及裂隙进一步扩展,加快了声波高频能量的衰减,从而导致页岩在高温条件下主频变换区间高于常温。

2.3 损伤特征

图6和图7分别为页岩声波衰减及水化损伤系数演化规律和扫描电镜图。本质上,水化作用会造成页岩结构产生变化,从而影响声波传播特性,导

致声波频域峰值振幅及主频改变。因此,通过提取不同浸泡时间下声波频域内峰值振幅及主频,计算声波衰减系数及水化损伤系数,可量化表征水化损伤程度^[26-27]。由图6可知,在常温及高温环境下,随流体浸泡时间增加,声波衰减系数及水化损伤系数两者均表现为增大,声波衰减系数平均增幅分别为117.69%、202.92%,水化损伤系数平均增幅分别为249.46%、312.56%,在高温环境下声波衰减系数及水化损伤系数分别是在常温环境下的1.72和2.98倍,并呈现出阶段性。这主要与各阶段水化机制不同所致。有学者认为水化可分为表面水化、离子水化和渗透水化^[28]。水化初期(0~24 h),由粘土矿物表面水分子所引起,有研究显示此阶段层间距增长幅度约为110.53%,该阶段水岩反应最剧烈,由于水化膨胀应力增大,使裂缝尖端应力强度因子增大,造成裂缝扩展,并滋生微裂缝;水化中期(24~72 h),水化离子与水分子争夺粘土晶面联结位置,促进裂缝扩展,但由于水分子与粘土矿物接触面积下降,因此,声波衰减系数与水化损伤系数增长缓慢或趋于稳定;水化末期(72~96 h),由于裂缝扩展以及微裂缝的影响,页岩表观上可出现沿层理面发育的贯穿式裂缝,岩样的整体性破坏,所以衰减系数及损伤系数增大。相较于常温条件下,高温促使页岩内部孔隙及裂缝进一步扩展,结构损伤更为明显,因此,声波衰减及水化损伤系数增幅更大。

通过对流体及流体-温度协同处理后的页岩进行扫描电镜观测(图7)可知,常温条件下水化裂缝长度平均增幅为148.07%,流体-温度协同作用条件下,裂缝长度平均增幅为179.24%。从裂缝参数变化情况可知,裂缝扩展规律与声波参数及损伤系数

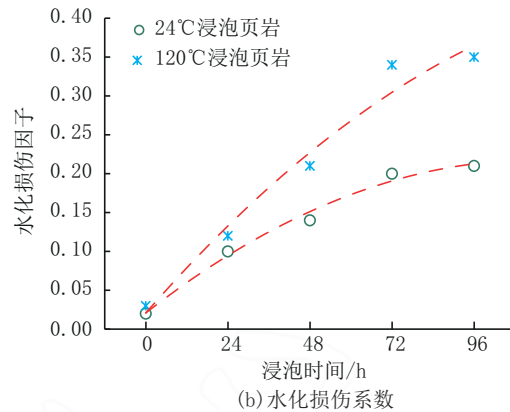
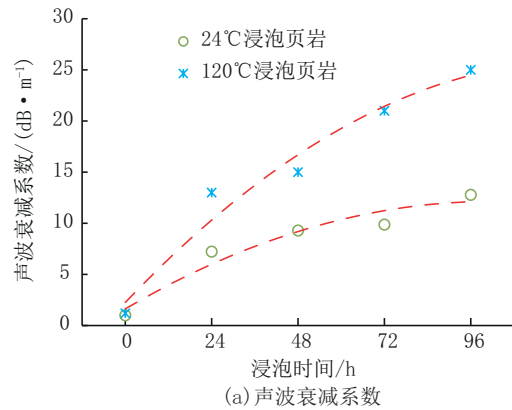


图6 页岩声波衰减系数及水化损伤系数

Fig.6 Shale acoustic attenuation coefficient and structural damage factor

之间存在一致性,这也说明了声波能量衰减主要是由于水化导致页岩结构损伤所致。另外,协同作用后裂缝扩展长度增加幅度和在水化末期微裂缝滋生数量都高于流体作用。这是由于当岩样受到热激励时,由于矿物间热膨胀量不同导致岩样发生热破裂,同时由于热应力作用于裂缝尖端,导致应力强度因子增大,造成在相同的浸泡时间下,协同作

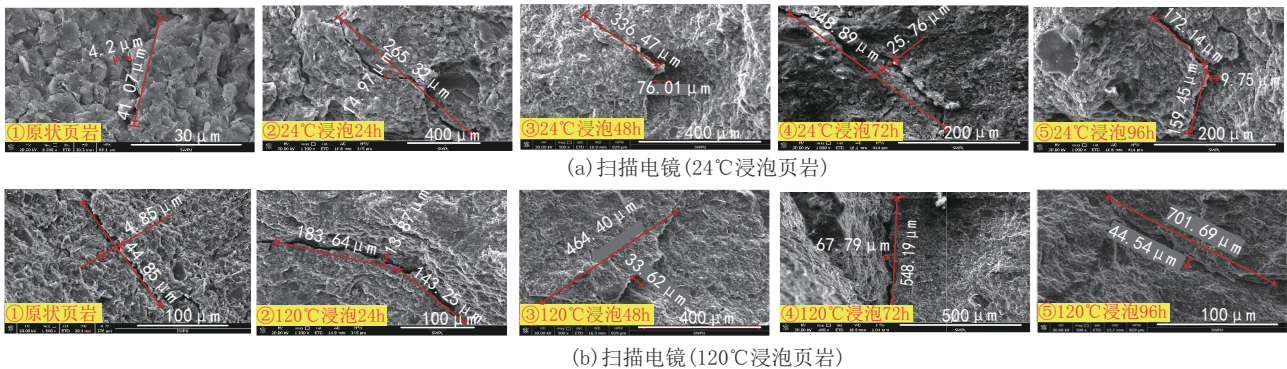


图7 页岩扫描电镜图

Fig. 7 Scanning electron microscopy image of shale after immersion

用损伤程度高于流体作用。

2.4 力学强度特征

图8为经浸泡处理后岩样的力学强度参数。可见,岩样在高压釜中经去离子水24~96 h浸泡后,在常温(24℃)条件下,页岩力学性质损伤。岩样抗压强度范围为154~189 MPa,平均降幅为11.91%;弹性模量范围为31~36 GPa,平均降幅为14.91%;内摩擦角范围为22.09°~26.18°,降幅为8.69%;粘聚力介于14.25~19.67 MPa之间,降幅为16.22%。在温度为120℃条件下,岩样经过24~96 h流体浸泡后,岩样抗压强度范围为146~195 MPa,平均降幅为14.82%;弹性模量为27~37 GPa,平均降幅为21.23%;内摩擦角范围为19.47°~26.79°,降幅为17.9%;粘聚力介于13.53~19.34 MPa之间,降幅为22.58%。其力学性质劣化,岩样抗压强度、弹性模量、内摩擦角度及粘聚力随浸泡时间增加而降低。

主要是因为实验所选的页岩粘土含量在13.25~17.67%之间,页岩具有强水敏性,当浸泡介质(去离子水)通过孔隙、裂缝及层理等结构通道与岩样表面、内部粘土矿物接触时,导致粘土矿物水化膨胀以及岩样水化分散使矿物颗粒间粘结力降低并且水分子会降低矿物颗粒之间的摩擦性。因此,岩样粘聚力及内摩擦角下降,岩样抗微裂隙增生及抗裂缝扩展能力降低。当粘土矿物吸水膨胀至与水分子直径相当时,其晶体结构因水化膨胀力增大而发生变化,膨胀阶段层间离子发生交换,水化膨胀使得粘土层间距离超过一定范围时,层间粘接剂将无法维持其稳定性。宏观上流体浸泡后岩样表面出现多条与层理平行的裂缝,并随着浸泡时间增加,裂缝相互交错形成复杂的裂缝网络,使岩样力学稳定性降低。

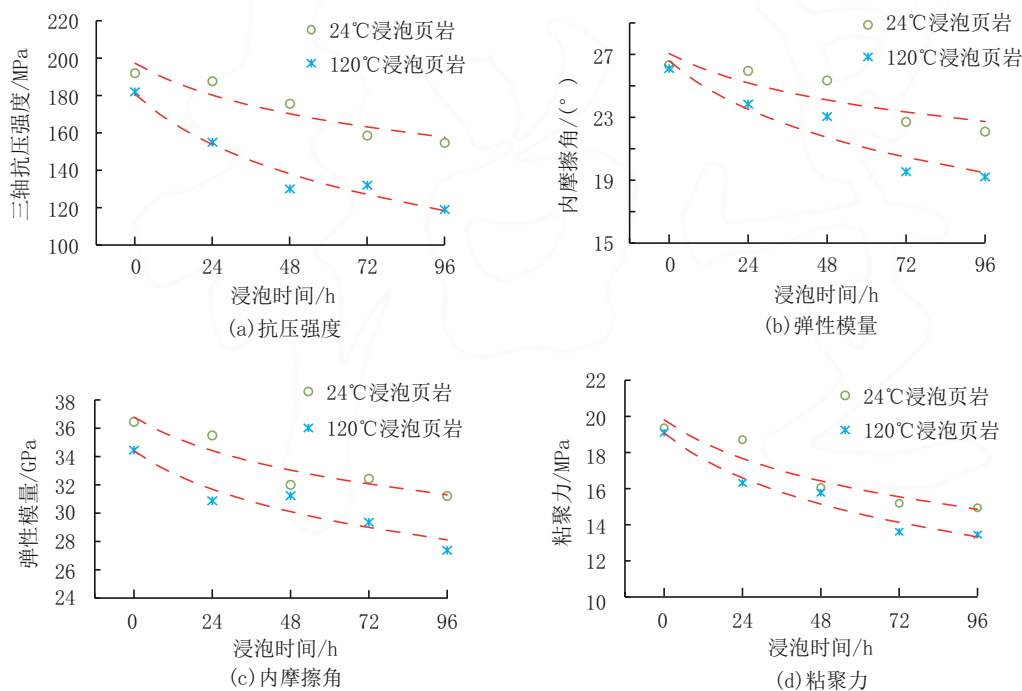


图8 浸泡后页岩力学参数

Fig.8 Shale mechanical parameters

岩样在两种不同温度下力学劣化程度存在差异。页岩是由硬物质与软物质相互嵌混沉积而成,相较于常温,在高温(120℃)环境下,水的化学活性增加,导致可溶性矿物溶解速率增加,膨胀型粘土矿物膨胀量相较于常温更大,其在压力及渗吸作用下进入页岩内部与粘土矿物接触,水相介入致使矿

物颗粒间的摩擦系数降低,从而加剧力学参数下降;同时,各矿物的热膨胀系数不同,颗粒间产生差异性膨胀,导致应力集中,从而更进一步促进诱发裂缝扩展及微裂隙增生,降低岩样的整体性,导致力学性质下降。因此,岩样在流体-温度协同作用下产生的损伤程度高于流体作用。

3 结论

(1)在常温(24℃)及高温(120℃)环境下,页岩经去离子水浸泡作用后,声波能量产生衰减,表现为随浸泡时间增加,声波速度减小、声波时域初至时间延迟、声波频域主频由高频向低频转换。以本次实验样品为例,高温环境下纵、横速度下降幅度分别是常温环境下的1.41倍和1.71倍。

(2)水化作用具有阶段性,声波衰减系数及水化结构损伤系数在水化初期、中期、末期,分别呈现为快速增加、缓慢增加和趋于稳定的趋势。以本次实验样品为例,高温环境下声波衰减系数及水化损伤系数分别是在常温环境下的1.72和2.98倍。

(3)随浸泡时间增加,岩样抗压强度、弹性模量、内摩擦角及粘聚力呈现阶段式下降。以本次实验样品为例,高温环境下浸泡后页岩力学参数降幅分别是常温环境下对应参数降幅的1.24、1.42、2.06和1.39倍。

参考文献(References):

- [1] 邹才能,董大忠,熊伟,等.中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策[J].石油与天然气地质,2024,45(2):309-326.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, XIONG Wei, et al. Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2):309-326.
- [2] 李龙,陈显举,彭安钰,等.贵州正安地区常压页岩气压裂关键技术[J].钻探工程,2022,49(5):189-193.
LI Long, CHEN Xianju, PENG Anyu, et al. Key technologies for hydraulic fracturing of normal pressure shale gas in the Zheng'an area of Guizhou[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5):189-193.
- [3] Liang L X, Luo D X, Liu X J, et al. Experimental study on the wettability and adsorption characteristics of Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33:1107-1118.
- [4] 刘向君,熊健,梁利喜.龙马溪组硬脆性页岩水化实验研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2016,38(3):178-186.
LIU Xiangjun, XIONG Jian, LIANG Lixi. Hydration experiment of hard brittle shale of the Longmaxi formation[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2016, 38(3):178-186.
- [5] 邱正松.不同阴离子钾盐抑制页岩水化作用的实验研究[J].石油钻探技术,1999(2):25-27.
QIU Zhengsong. Lab study on shale hydration inhibition of different anionic Potassium Muds[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1999(2):25-27.
- [6] 曾凡辉,张蕾,陈斯瑜,等.水化作用下页岩微观孔隙结构的动态表征——以四川盆地长宁地区龙马溪组页岩为例[J].天然气工业,2020,40(10):66-75.
ZENG Fanhui, ZHANG Qiang, CHEN Siyu, et al. Dynamic characterization of microscopic pore structures of shale under the effect of hydration: a case study of Longmaxi Formation shale in the Changning area of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(10):66-75.
- [7] 梁利喜,熊健,刘向君.水化作用和润湿性对页岩地层裂纹扩展的影响[J].石油实验地质,2014,36(6):780-786.
LIANG Lixi, XIONG Jian, LIU Xiangjun. Effects of hydration swelling and wettability on propagation mechanism of shale formation crack[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(6):780-786.
- [8] 任建飞,刘向君,熊健,等.水岩作用对层理性页岩声波传播特性实验研究[J].地球物理学进展,2023,38(5):2094-2104.
REN Jianfei, LIU Xiangjun, XIONG Jian, et al. Experimental study on acoustic propagation characteristics of stratified shale by water-rock action[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(5):2094-2104.
- [9] 熊健,李羽康,刘向君,等.水岩作用对页岩岩石物理性质的影响——以四川盆地下志留统龙马溪组页岩为例[J].天然气工业,2022,42(8):190-201.
XIONG Jian, LI Yukang, LIU Xiangjun, et al. Influences of water-rock interaction on the physical and mechanical properties of shales: a case study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8):190-201.
- [10] Gu K M, Ning Z F. Fractal dimension changes of shale pore structure and influence on mechanical properties, relative permeability under different hydration degree [J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(7):189.
- [11] 杨现禹,蔡记华,蒋国盛,等.维持页岩井壁稳定的物理封堵模拟和化学抑制实验研究[J].钻探工程,2021,48(4):37-46.
YANG Xianyu, CAI Jihua, JIANG Guosheng, et al. Physical plugging simulation and chemical inhibition experiment for wellbore stability in shale [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4):37-46.
- [12] 杨现禹,蔡记华,蒋国盛,等.钻井液水活度对页岩井壁稳定性影响的实验研究——以秀山龙马溪组页岩为例[J].钻探工程,2022,49(3):1-12.
YANG Xianyu, CAI Jihua, JIANG Guosheng, et al. Experimental study on the effect of water activity of drilling fluid on shale wellbore stability: Taking Xiushan Longmaxi shale as an example [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3):1-12.
- [13] 袁和义,陈平.基于直剪试验的页岩水化作用的强度弱化规律[J].天然气工业,2015,35(11):71-77.
YUAN Heyi, CHEN Ping. Strength weakening rules of shale hydration based on direct shear tests [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(11):71-77.
- [14] 刘向君,曾韦,梁利喜,等.龙马溪组页岩地层井壁坍塌周期预测[J].特种油气藏,2016,23(5):130-133.
LIU Xiangjun, ZENG Wei, LIANG Lixi, et al. Prediction of wellbore collapse cycle in Longmaxi formation shale formation [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2016, 23(5):130-133.
- [15] 万有维,刘向君,袁芳,等.塔里木盆地巴西改组岩石理化性能及力学特性研究[J].油气藏评价与开发,2021,11(5):753-

- 759,771.
WAN Youwei, LIU Xiangjun, YUAN Fang, et al. Physico-chemical and mechanical properties of rocks in Baxigai Formation, Tarim Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021,11(5):753-759,771.
- [16] 贾利春,连太炜,李忠飞.页岩强度弱化规律及对水平井井壁稳定的影响[J].钻采工艺,2017,40(3):19-22,8.
JIA Lichun, LIAN Taiwei, LI Zhongfei. The weakening law of shale strength and its impact on the stability of horizontal wellbore[J]. Drilling & Production Technology, 2017,40(3):19-22,8.
- [17] Ding Y, Liu X J, Liang L X, et al. Wellbore stability model in shale formation under the synergistic effect of stress unloading-hydration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023,50(6):1478-1486.
- [18] 毕井龙,梁卫国,耿毅德,等.温度和层理对油页岩断裂韧度影响的试验研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(4):1007-1015.
BI Jinglong, LIANG Weiguo, GENG Yide, et al. Experimental study on the effect of temperature and bedding planes on the fracture toughness of oil shale[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018,14(4):1007-1015.
- [19] 王宇,翟成,余旭,等.高温作用下五峰组-龙马溪组页岩动力学特征及损伤演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(5):1110-1123.
WANG Yu, ZHAI Cheng, YU Xu, et al. Dynamic characteristics and damage evolution law of Wufeng formation-Longmaxi formation shale under high temperature effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023,42(5):1110-1123.
- [20] 孟祥瑞,邹忠虎.高温条件下页岩力学特性试验及数值模拟研究[J].土工基础,2024,38(1):157-162.
MENG Xiangrui, ZOU Zhonghu. Experimental and numerical simulations of the mechanical properties of shale under high temperature[J]. Soil Engineering and Foundation, 2024,38(1):157-162.
- [21] 熊健,朱梦渊,李文苗,等.高温作用下不同岩性岩石物理特性的演化规律[J].天然气工业,2023,43(12):14-24.
XIONG Jian, ZHU Mengyuan, LI Wenmiao, et al. Evolution law of physical properties of rocks with different lithologies under high temperature[J]. Natural Gas Industry, 2023,43(12):14-24.
- [22] 张红鸽,赵阳升,杨栋,等.温度对油页岩热解-力学-渗流特性的影响研究[J].太原理工大学学报,2021,52(6):945-952.
ZHANG Hongge, ZHAO Yangsheng, YANG Dong, et al. Study on the effect of temperature on the Pyrolysis-Mechanics-Seepage characteristics of oil shale[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021,52(6):945-952.
- [23] 王文东,任慈,孙庆豪,等.高温高压页岩渗吸实验系统设计[J].实验技术与管理,2023,40(9):91-94,101.
WANG Wendong, REN Ci, SUN Qinghao, et al. High temperature and high pressure shale imbibition experimental system design[J]. Experimental Technology and Management, 2023,40(9):91-94,101.
- [24] Ren J F, Liu X J, Xiong J, et al. Experimental study on the acoustic wave propagation characteristics of bedding shales under changes in temperature and pressure[J]. Natural Gas Industry B, 2023,10(5):407-418.
- [25] 吴小林,刘向君.泥页岩水化过程中声波时差变化规律研究[J].西南石油大学学报,2007(S2):57-60,172.
WU Xiaolin, LIU Xiangjun. The process and microscopic mechanism of shale hydration[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007(S2):57-60,172.
- [26] 李奇,高树生,刘华勋,等.高温高压非常规储层渗透率脉冲法测量及分析[J].煤炭学报,2022,47(S1):184-195.
LI Qi, GAO Shusheng, LIU Huaxun, et al. Analysis of measurement error of permeability pulse method for high temperature and high pressure unconditional reservoirs[J]. Journal of China Coal Society, 2022,47(S1):184-195.
- [27] 丁乙,刘向君,曹雯,等.页岩渗吸过程中的水化损伤演化特征研究[J].工程地质学报,2024,32(4):1262-1272.
DING Yi, LIU Xiangjun, CAO Wen, et al. Research on characteristics of hydration damage evolution of shale during spontaneous imbibition[J]. Journal of Engineering Geology, 2024,32(4):1262-1272.
- [28] 王光兵,刘向君,梁利喜.硬脆性页岩水化的超声波透射实验研究[J].科学技术与工程,2017,17(36):60-66.
WANG Guangbing, LIU Xiangjun, LIANG Lixi. Experimental study on ultrasonic transmission for hydration of hard and brittle shale[J]. Science, Technology and Engineering, 201717(36):60-66.

(编辑 王文)