2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2196-2211

地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn

ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

冯浩威,闫传梁,王萍,等.2026.温差与水化耦合作用下页岩能量特征及本构模型研究.地球物理学进展,41(5):2196-2211,doi:10.6038/pg2026JJ0390.

FENG HaoWei, YAN ChuanLiang, WANG Ping, *et al*. 2026. Energy characteristics and constitutive modeling of shale under the coupled effects of temperature difference and hydration. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2196-2211,doi:10.6038/pg2026JJ0390.

温差与水化耦合作用下页岩能量特征及本构模型研究

Energy characteristics and constitutive modeling of shale under the coupled effects of temperature difference and hydration

冯浩威[1],闫传梁[1,2,3*],王萍[4,5],程远方[1,2,3],屈展[4,5],黄海[4,5],韩忠英[1,2,3]

FENG HaoWei[1], YAN ChuanLiang[1,2,3*], WANG Ping[4,5], CHENG YuanFang[1,2,3], QU Zhan[4,5], HUANG Hai[4,5], HAN ZhongYin[1,2,3]

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580
2. 中国石油大学(华东)深层油气全国重点实验室,山东青岛 266580
3. 中国石油大学(华东)非常规油气开发教育部重点实验室,山东青岛 266580
4. 西安石油大学石油工程学院,西安 710065
5. 陕西省油气井及储层渗流与岩石力学重点实验室,西安 710065

1. *School of Petroleum Engineering*, *China University of Petroleum* (*East China*), *Qingdao Shandong* 266580, *China*
2. *State Key Laboratory of Deep Oil and Gas*, *Ministry of Education*, *China University of Petroleum* (*East China*), *Qingdao Shandong* 266580, *China*
3. *Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas Development of Ministry of Education*, *China University of Petroleum* (*East China*), *Qingdao Shandong* 266580, *China*
4. *School of Petroleum Engineering*, *Xi'an Shiyou University*, *Xi'an* 710065, *China*
5. *Key Laboratory of Oil and Gas Well and Reservoir Permeability and Rock Mechanics in Shaanxi Province*, *Xi'an* 710065, *China*

摘 要 温差与水化耦合作用对页岩力学性质及能量特征的影响,关系到其承载能力和结构性破坏.这些特征的演变规律对于深井井壁稳定性评价及深部地热能源开发优化具有重要意义.因此,开展了不同温差、不同水化时间对页岩力学性质和能量特征的影响实验,阐明了在温差与水化耦合作用下页岩能量特征演化规律并提出了从能量角度考虑的损伤本构模型.主要研究结果如下:(1)相同水化时间下,随着温差的升高,页岩的峰值强度、弹性模量、总能量及弹性能量呈下降趋势;耗散能占比则表现出相反趋势,发生热损伤并出现

Abstract The coupled effects of temperature difference and hydration on the mechanical properties and energy characteristics of shale are closely related to its load-bearing capacity and structural failure. The evolution of these characteristics is of great significance for the evaluation of deep wellbore stability and the optimization of deep geothermal energy development. Therefore, experiments were conducted to investigate the effects of different temperature difference and hydration durations on the mechanical properties and energy characteristics of shale. The evolutionary patterns of shale energy characteristics under coupled temperature difference-hydration effects were clarified, and a damage constitutive model was proposed from the perspective of energy. Main findings are as follows: (1) At the same hydration

收稿日期 2026-01-25; **修回日期** 2026-06-21. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 国家科技重大专项(2025ZD1010103)、国家自然科学基金"超深特深层油气钻采流动调控"(52288101)、国家自然科学基金"基于机器学习的井壁岩石多尺度融合损伤失稳预测"(52274007)、陕西省教育厅科研计划项目"基于近场动力学的井壁围岩裂纹扩展机理研究"(22JS028)、山东省自然科学基金项目(ZR2025QB55)、山东省泰山学者计划(tsqn202408102)和山东省高校青年创新团队项目(2022KJ072)联合资助.

第一作者简介 冯浩威,男,1999 年生,博士研究生,从事岩石力学和钻井工程科研工作.E-mail:15595401668@163.com

***通讯作者** 闫传梁,男,1987 年生,教授,博士生导师,从事石油工程岩石力学研究.E-mail:yanchuanliang@163.com

结构性劣化.(2)相同温差下,随着水化时间的增加,页岩的峰值强度、弹性模量、总能量及弹性能量降低,耗散能占比增加.(3)温差对页岩的影响大于水化时间的影响.(4)温差越大或水化时间越短,页岩的脆性特征越明显.(5)提出了温差与水化耦合作用下从能量角度考虑的页岩损伤本构模型,预测精度较高,为深井超深井钻井过程中井壁失稳预防和控制提供了理论参考.

关键词　页岩;温差;水化时间;能量特征;本构模型

中图分类号　P631

文献标识码　A

doi:10.6038/pg2026JJ0390

CSTR:32085.14.pg2026JJ0390

duration, with increasing temperature difference, the peak strength, elastic modulus, total energy, and elastic energy of shale decrease, while the proportion of dissipated energy exhibits the opposite trend, indicating thermal damage and structural deterioration. (2) At the same temperature difference, as the hydration duration increases, the peak strength, elastic modulus, total energy, and elastic energy of shale decrease, whereas the proportion of dissipated energy increases. (3) The influence of temperature difference on shale is greater than that of hydration duration. (4) A larger temperature difference or shorter hydration duration results in more pronounced brittle behavior of shale. (5) An energy-based damage constitutive model of shale under the coupled effects of temperature difference and hydration is proposed, which demonstrates high predictive accuracy and provides theoretical guidance for the prevention and control of wellbore instability during deep and ultra-deep drilling.

Keywords Shale; Temperature difference; Hydration time; Energy characteristics; Constitutive model

0　引　言

随着油气资源勘探程度的不断提高,深层与超深层油气藏的开发日益成为研究热点(鲁铁梅等, 2022; 孙龙德等, 2013; 曾昭发等, 2025).页岩作为一种典型的致密储层,其在深部高温高压环境下的力学响应行为尤为复杂.在钻井过程中,钻井液与高温地层岩石之间形成的温差,以及钻井液长期作用引起的水化过程,均可能显著影响井壁围岩的结构稳定性与力学性能(宋先知等, 2023; 王炳印等, 2006).因此,深入探究温差与水化作用对页岩力学性质及其破坏机制的影响规律,对于深井井壁定性评价及井筒结构优化设计具有重要意义(杨虎等, 2022; 余志清和徐华义, 1997).

已有研究表明,岩石在高温环境下的物理力学性质会发生复杂演化.Zhang 等(2023)采用单轴压缩实验分析不同温度处理后的砂岩样本的宏观力学性质,研究结果表明,砂岩样本的峰值应力和单轴抗压强度从 25 ℃到 1000 ℃的过程中经历了先增加后减小的转变过程,温度阈值为 150 ℃.Zhao 等(2025)通过三轴压缩实验,对深度为 3300 ~ 4300 m 的储层页岩进行了研究,发现富黏土页岩则在加热后表现出力学性能的减弱.Ziheng Wang 等(Wang *et al*., 2025)使用了高温三轴伺服实验机,研究了盐岩在 30 ℃、70 ℃、110 ℃、150 ℃和 300 ℃下的变形、破坏特性.结果发现,150 ℃是温度阈值,超过 150 ℃ 盐岩的单轴抗压强度呈现显著下降趋势.杨圣奇等(杨圣奇等, 2021)通过常规三轴压缩实验与巴西劈裂实验,系统揭示了热损伤花岗岩的力学劣化规律,研究证实当温度递增至临界阈值(400 ℃)时,花岗岩单轴承载能力呈现非线性劣化趋势,其弹性模量发生阶段性衰减.

在复杂工况下,温差与水化作用往往同时发生,形成典型的热-水-力耦合环境.Bikash Kumar Ram 等(Ram and Gupta, 2024)采用了两种不同的冷却技术(即水冷和自然冷却方法),研究了不同加热-冷却处理方法对花岗岩物理性质、微观结构特征和点载荷强度的影响.研究表明,随着温度的升高,热应力和热冲击引发了裂纹密度的增加,产生了额外的微裂纹,水冷条件下点载荷强度下降了 81%.Hongyuan Fu 等(Fu *et al*., 2024)通过一系列实验室测试,确定了粉质泥岩在加热和水冷循环下的物理力学特性及损伤机制.结果表明,加热和水冷处理促使粉质泥岩内部裂纹的产生,明确了粉质泥岩的弹性模量、内聚力和内摩擦角的下降与温度和循环次数的增加有关.Mohua Bu 等(Bu *et al*., 2024)将加热后的花岗岩分别进行了自然冷却、水冷却和液氮冷却(LN2 冷却).结果表明,花岗岩的强度不仅与加热温度相关,还受到冷却速率的影响.在冷却阶段,较快的冷却速率会导致较高的温度梯度,从而产生更大的热应力.王科(邵先宇等, 2025)等研究发现,水化作用显著降低了页岩的峰值应力和弹性模量,且随着水化作用时间的延长,页岩的破坏模式由脆性破坏逐渐过渡至塑性破坏.胡惠华等(胡惠华等, 2025)开展不同饱水时长下的岩石单轴压缩实验,研究结果表明,随着饱水时间的增加,红层软岩单轴抗压强度单调递减,其破坏模式从脆性破坏模式逐渐往延性破坏模式发展.

在石油工程岩石力学研究中,描述岩石力学性质通常采用应力—应变关系.然而,通过岩石力学实

验得到的应力-应变曲线仅仅是岩石在特定时刻力学状态的外部表现.岩石在外部载荷作用下的力学行为本质上是能量分配的结果(Li *et al*., 2024).因此,从能量的角度研究岩石在加载过程中的变化,可以深入理解岩石损伤和破坏的内在机制.Q. Meng等(Meng *et al*., 2019)在单轴压缩条件下对砂岩进行了循环加载和卸载实验,研究了岩石变形和破坏过程中的能量特征.Song等(Song *et al*., 2021)研究了花岗岩在循环加载过程中的能量耗散过程.Liu等(Liu *et al*., 2023)通过考虑高温和循环加载的影响,进行了一系列花岗岩三轴压缩实验,研究了花岗岩在两种影响下的能量特征.

针对热力耦合环境下的岩石力学行为,研究者通过构建岩石损伤本构模型,系统地揭示了其在温度作用下的应力-应变关系.由于受高温热损伤的作用,岩石内部的原生微裂隙和孔洞不断发育扩展,故从经典弹塑性力学理论很难有效地判断强度变化和破坏行为.能量存储与释放的过程从本质上能反映岩石内部损伤程度和裂纹发展的演变规律.因此,基于热力学第一定律的能量法是构建热损伤岩石本构关系和探究岩石破坏行为的有效方法.Liu等(Liu *et al*., 2016)通过单轴循环加卸载实验,引入基于能量耗散的损伤变量,推导出两类典型岩石的损伤演化方程.Gong等(Gong *et al*., 2022)针对单轴压缩下岩石的线性能量耗散定律,提出包含压缩能量耗散系数的岩体损伤表征方法,实现损伤变量的量化计算.该系数结合单轴压缩输入的应变能可直接推导脆性岩体损伤变量.

然而,目前相关研究仍存在以下不足:(1)多数工作聚焦于单一温度处理或循环作用,尚未系统揭示温差本身对岩石力学性质的影响;(2)水化作用的研究多以钻井液循环次数为主,忽略了水化时间这一关键参数;(3)现有能量特征研究多集中在单一高温或循环载荷下,温差与水化共同作用下岩石能量演化规律尚不清晰;(4)已有能量型损伤本构模型未考虑温差与水化耦合作用的影响,缺乏统一表征热-水-力耦合作用下页岩损伤演化的能量本构模型.

为填补上述研究空白,本文将页岩试样经过不同温差和水化时间的处理,进行三轴压缩实验,系统分析了温差和水化时间对页岩力学性质、能量特征及破坏模式的影响,并提出了基于能量耗散与Weibull分布理论的温差、水化和载荷耦合作用下的岩石损伤本构模型.具体而言,本文在以下方面做出了创新:(1)设计了考虑温差与水化耦合作用的实验方案;(2)建立了从能量角度考虑温差与水化作用的岩石损伤本构模型,并通过实验数据验证,证明了模型的准确性.

1 实验概况

1.1 实验设备

(1)加热设备

实验所用加热设备为智能温控箱式炉,其额定功率为3000 W,最大可耐受1000 ℃的工作温度.该设备能够在持续热载荷条件下保持稳定的加热环境,适合模拟页岩在高温环境下的热响应,如图1所示.

(2)三轴压缩实验设备

本实验采用符合ASTM D7012标准的RTR-1000型岩石三轴实验机(美国GCTS公司研发),其系统结构示意图如图1所示,可实现0~100 MPa围压条件下岩石试样的多轴应力路径精准控制.该设备由轴向加载系统、测试控制台和数据采集仪器组成.

(3)水热合成反应釜

页岩温差效应实验在定制化水热合成反应釜(结构详见图1)中实施,样品置于聚四氟乙烯内胆中以确保热场均匀性.该装置耐温上限220 ℃,承压极限3 MPa,配备PID温控系统实现≤5 ℃/min的升降温梯度(精度±0.5 ℃)(王萍等,2025).

1.2 样品制备

测试样品来自川南地区龙马溪组的页岩.根据国际岩石力学学会(ISRM)建议方案,所有页岩圆柱试样均取自同一块龙马溪组页岩块,试样轴线方向垂直于沉积层理面(即沿层理法线方向取样),以避免层理方向差异对力学各向异性的影响.制备为直径50 mm、高度100 mm的圆柱体(图2),以降低页岩各向异性对实验结果的影响.

1.3 X射线衍射分析

对于X射线衍射(XRD)测试,页岩样品被研磨成通过200目筛网的细粉.所有实验的页岩样品表面无可见裂纹.根据XRD测试结果,所选页岩样品的主要矿物成分包括石英、黏土矿物、方解石、白云石、长石和黄铁矿.矿物组成主要成分详见表1.

表1 试样的主要矿物成分

Table 1 Main mineral composition of the sample

矿物成分	石英	方解石	白云石	长石	黏土矿物	黄铁矿
平均含量/%	44	4	17	2	29	3

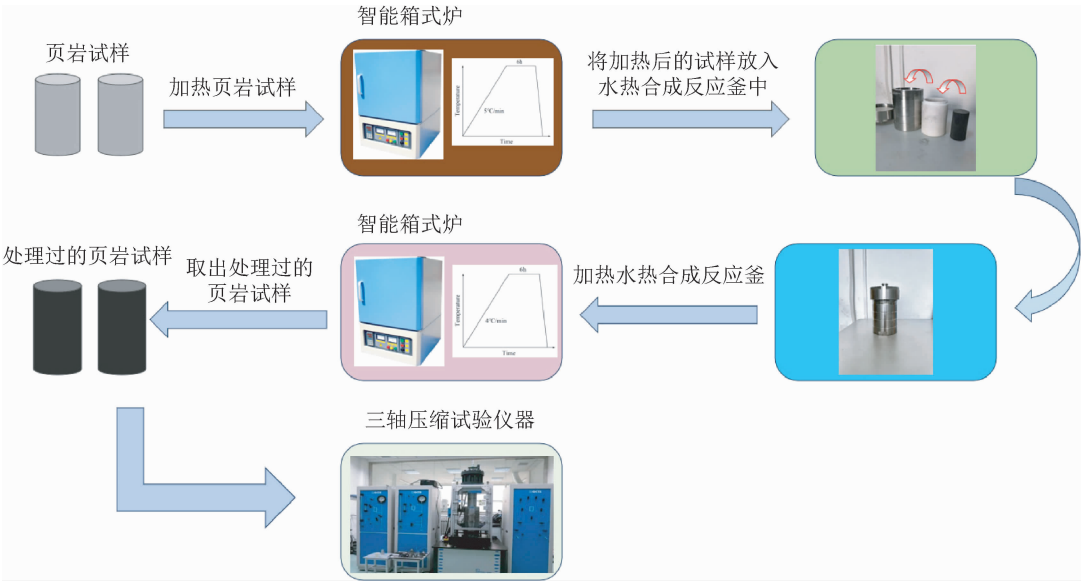


图 1　全部实验设备

Fig. 1　All instruments and equipment

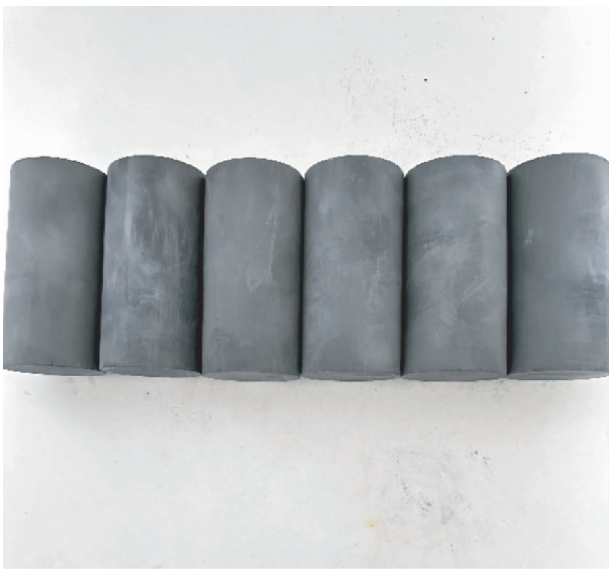


图 2　部分页岩试样

Fig. 2　Partial shale specimen

1.4　样品处理

通过地质工程调查与测井数据分析,超深层油气储层(垂深 7200 ~ 8800 m)呈现典型高温地质特征,原位测温数据显示其原始地层温度介于 160 ~ 209 ℃. 图 3 展示了不同循环时间下环空温度随井深的分布,反映了深井井壁温度场的空间和时间演化特征. 在钻井液首次注入井筒并开始循环后的 1 ~ 5 h 内,随着井深增加,环空钻井液温度逐渐升高,而井壁岩石因与钻井液换热而显著降温;在深层及超深层井段,井壁围岩温度降低可达 50 ~ 80 ℃(卢运虎等, 2020; 张培丰, 2011). 中浅层井段温差主要为 20 ~ 40 ℃,随着循环时间由 5 h 增至 25 h,环空温度整体降低、井壁温差逐步减小(王萍等, 2025).

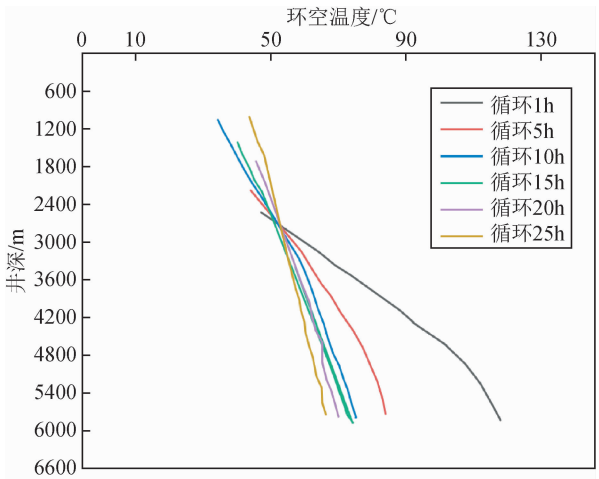


图 3　不同循环时间下深井环空温度分布

Fig. 3　Distribution of annular temperature along well depth under different circulation times in wells

为了更好地模拟实际井下环境,研究在钻井液循环过程中,温差和钻井液循环时间对岩石的影响. 实验设置了 80 ℃(220 ℃ ~ 140 ℃)、65 ℃(190 ℃ ~ 125 ℃)和 20 ℃(120 ℃ ~ 100 ℃)三个不同温差. 固定 20 ℃温差下,水化时间分别设置为 1 h、5 h、10 h、

15 h、20 h 和 25 h. 每组设置 3 个相同岩样,减小实验误差. 根据不同温差和水化时间对样品进行编号,以 1-W1 为例,前面的"1"表示第一组,代表了岩石受到的温差为 80 ℃,W1 表示在水中浸泡了 1 h. 根据现场经验,最初钻井液与井壁岩石温差最大可达 80 ℃,钻井液循环 1 h,温差逐渐降低. 各样品编号如表 2 所示.

表 2 各个样品编号

Table 2 Individual sample number

序号	编号	页岩加热温度/℃	水温/℃	温差/℃	浸泡时间/h
1	1-W1	220	140	80	1
2	2-W1	190	125	65	1
3	2-W5	190	125	65	5
4	2-W10	190	125	65	10
5	3-W1	120	100	20	1
6	3-W5	120	100	20	5
7	3-W10	120	100	20	10
8	3-W15	120	100	20	15
9	3-W20	120	100	20	20
10	3-W25	120	100	20	25

1.5 实验过程

以编号为 1-W1 的样品为例详细描述实验步骤:

(1)将编号为 1-W1 的样品放入智能温控箱式炉中加热,加热速率为 4 ℃/min. 达到目标温度 220 ℃后,样品恒温 4 h.

(2)将 220 ℃的样品浸入装满 100 ℃水的反应釜白色内胆中,把白色内胆放入水热合成反应釜中并将反应釜组装好.

(3)将水热合成反应釜继续放入智能温控箱式炉中加热,加热速率为 4 ℃/min. 达到目标温度 120 ℃后,浸泡 1 h.

(4)恒温结束后,将水热合成反应釜从智能温控箱式炉中取出,并在保温条件下迅速取出样品. 完成温差处理后的页岩试样采用耐高温热缩管进行包覆密封,以减少环境温度对试样的影响.

(5)根据不同的页岩加热温度、水温及水化时间重复步骤(1)~(3).

(6)使用 RTR—1000 岩石力学测试系统对不同温差和水化时间下的页岩样品进行围压为 30 MPa 的三轴压缩实验(王萍等,2025).

2 温差与水化耦合作用下页岩的力学性质

2.1 应力—应变关系

图 4 展示了页岩在不同温差和水化时间下的应力—应变关系. 根据应力-应变曲线的特征,该过程可划分为四个阶段:孔隙-裂隙压实阶段、弹性阶段、屈服阶段以及破坏后阶段. 尽管各应力-应变曲线的总体趋势基本一致,但在不同温差和水化时间下,页岩的应力-应变关系仍表现出明显的阶段性特征差异,具体如下所述.

(1)在孔隙—裂隙压实阶段,无论温差和水化时间如何变化,由于页岩样品内部原有裂隙和孔隙在加载过程中逐渐闭合,应力—应变曲线呈现凹形变化趋势. 然而,受温差和水化时间变化的影响,该阶段页岩的应力—应变曲线形态各异. 首先,随着温差升高,页岩的孔隙—裂隙压实阶段变得更长,并表现出明显的非线性特征. 这主要是因为高温会对页岩造成热损伤,再将高温页岩浸入比其温度低的水中,页岩的温度会发生变化,因此会在页岩内部产生微小的热应变(罗江等, 2023). 相比于温差,该阶段水化时间的影响不太明显.

(2)第二阶段为弹性阶段,对应于应力-应变曲线中的线性部分. 在此阶段,页岩样品内部已闭合的微裂隙之间的接触面存在摩擦力,该摩擦力限制了微裂隙面的相对滑动,从而使弹性阶段具有一定的可逆性. 在不同温差和水化时间下,页岩在弹性阶段表现出不同的力学特征. 随着温差的减小,弹性阶段略有延长,且曲线斜率略有增加. 当温差超过 65 ℃时,弹性阶段逐渐趋于平缓,并呈现出更明显的延展性特征. 相比之下,水化时间在该阶段对应力-应变曲线的影响不明显(Zhu *et al*., 2024).

(3)在屈服阶段,应力-应变曲线开始呈现非线性特征,标志着页岩样品内部塑性变形的开始. 随着温差的升高,该阶段的应力-应变曲线斜率呈现出下降趋势,同时屈服点也随之提前出现. 相比之下,在该阶段水化时间的影响逐步显现,主要体现在微裂隙的起裂和扩展.

(4)在破坏后阶段,页岩内部结构遭受严重破坏,裂隙迅速扩展,同时,页岩的强度也随着应变迅速降低. 图 4 清晰显示,随着温差升高,页岩的峰值应力迅速下降,表现出明显的脆性特征. 同时水化时间的增加也会导致页岩破坏提前发生,峰值应力下降.

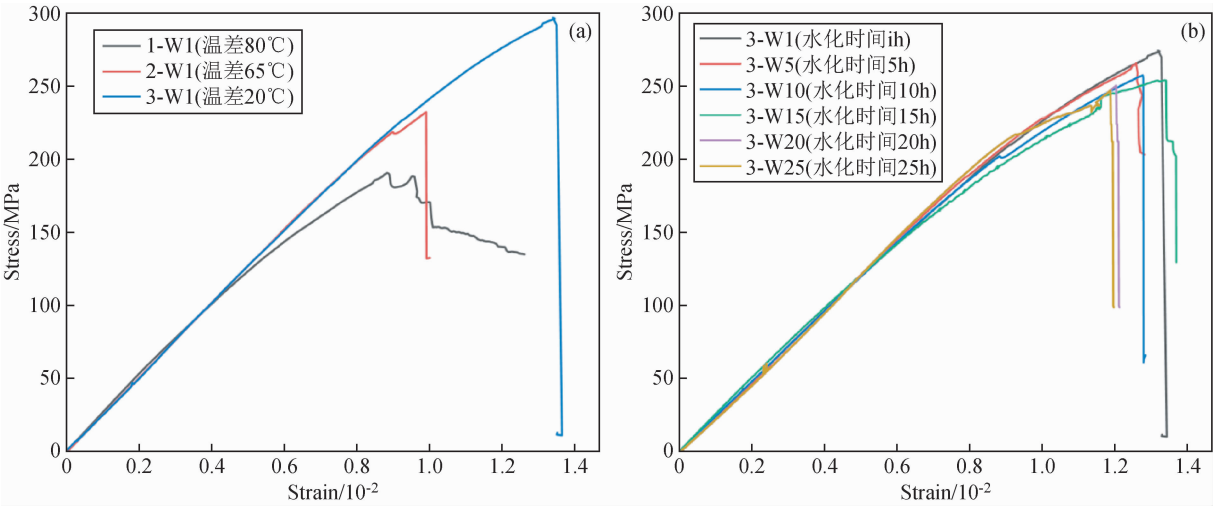


图 4　不同温差和水化时间下的应力应变曲线

(a)水化时间 1 h 不同温差应力-应变曲线;(b)温差 20 ℃不同水化时间应力—应变曲线.

Fig. 4　Stress-strain curves under different temperature differences and hydration times

(a) Stress-strain curves of shale under different temperature differences at a fixed hydration time of 1 h;

(b) Stress-strain curves of shale under different hydration times at a fixed temperature difference of 20 ℃.

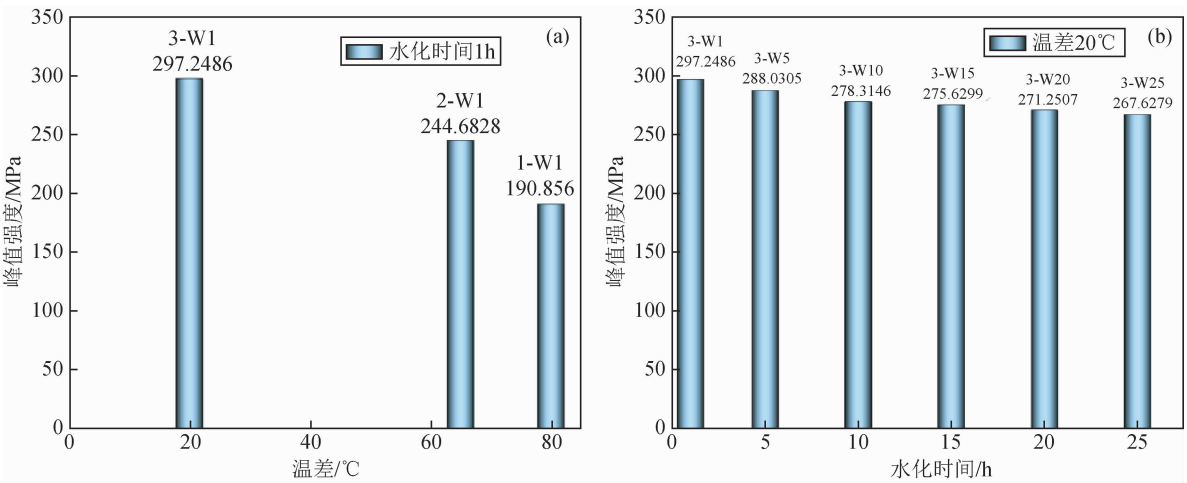


图 5　不同温差和水化时间下页岩的峰值强度

(a)水化时间 1 h 不同温差下的峰值强度;(b)温差 20 ℃不同水化时间下的峰值强度.

Fig. 5　Peak strength of shale under varying temperature differences and hydration durations

(a) Peak strength of shale under different temperature differences at a fixed hydration time of 1 h;

(b) Peak strength of shale under different hydration times at a fixed temperature difference of 20 ℃.

2.2　峰值强度

峰值强度反映了岩石的承载能力,是地质储层稳定性评估及压裂增产效果评价中的关键指标,图 5 展示了其演化趋势. 图 5a 表明,页岩的峰值强度随温差的升高而降低. 这种现象与页岩受热膨胀变形有关(曹文科等, 2024). 随着温度升高,岩石内部矿物颗粒因热膨胀系数差异产生非均匀变形,诱发颗粒间热应力集中. 当热应力超过矿物颗粒间的黏结强度,会导致微裂纹在矿物相晶界处优先萌生. 此外,将高温页岩浸入温度比其低的水中会引发热冲击现象,进一步加剧岩石损伤,增强其塑性特征. 因此,温差的升高会对页岩微观结构造成不可修复的疲劳损伤,导致峰值强度大幅降低(Yang *et al.*, 2026). 图 5b 表明,在相同温差下,页岩的峰值强度随着水化时间的增加而下降. 这一结果表明,水分子通过孔隙或微裂隙侵入页岩后,引发黏土矿物的层

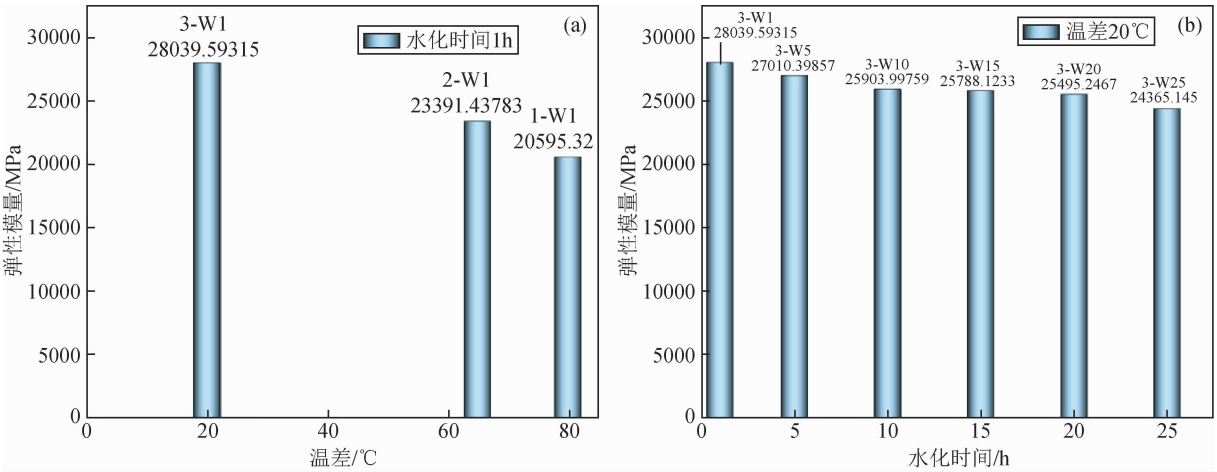


图 6 不同温差和水化时间下页岩的弹性模量

(a)水化时间 1 h 不同温差下的弹性模量;(b)温差 20 ℃不同水化时间下的弹性模量.

Fig. 6 Elastic modulus of shale under varying temperature differentials and hydration periods

(a) Elastic modulus of shale under different temperature differences at a fixed hydration time of 1 h;

(b) Elastic modulus of shale under different hydration times at a fixed temperature difference of 20 ℃.

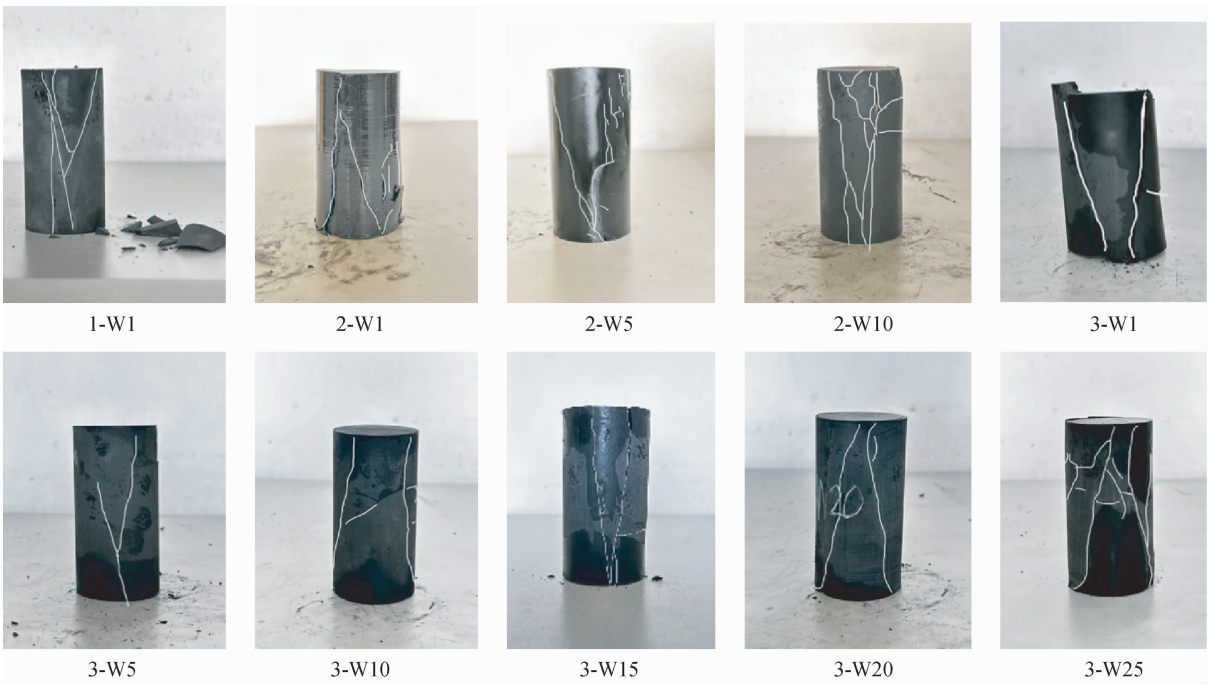


图 7 页岩在温差和水化耦合作用下的破坏模式

Fig. 7 Failure modes of shale under thermo-hydro-mechanical coupling effects of temperature differentials and hydration

间水化膨胀(余致理等, 2022),导致颗粒间胶结力减弱和晶格结构松散,这种物理化学作用显著降低了岩石的整体承载能力.

2.3 弹性模量

弹性模量是岩石力学性质的关键参数之一,代表岩石抵抗变形的能力. 图 6 展示了不同温差和水化时间下页岩样品弹性模量的变化情况. 如图 6a 所示,页岩的弹性模量随着温差的升高而降低. 这是因为在热作用下,页岩试样内部的有机质因热解作用发生分解,由此产生的热力破坏效应显著加剧. 微裂隙的萌生与扩展重构了岩石的微观构造,致使弹性模量随温度升高呈现负向演变趋势(魏超等,

2024). 再将高温页岩与低温水接触,骤冷效应引发的急剧温度梯度会在页岩内部形成显著的热应力集中. 这种热冲击效应促使已有裂隙发生扩展,最终导致岩石结构完整性呈现渐进式劣化. 图 6b 表明,在相同温差下,页岩的弹性模量随着水化时间的增加而下降. 这是因为水化作用会导致页岩中孔隙度的增加,水分进入岩石内部并填充了原本的空隙. 这些额外的孔隙会影响岩石的弹性特性,导致其弹性模量下降.

2.4　失效模式分析

为了说明在不同温差和水化时间下页岩的破坏模式. 从图 7 可以得出以下结论:(1)如图 3-W1,2-W1,1-W1 所示. 在水化时间相同时,页岩试样的裂纹数量随温差的升高而增加,尤其是高温差会导致页岩发生严重的损伤. (2)如图 3-W1,3-W5,3-W10,3-W15,3-W20,3-W25 所示. 在温差相同的情况下,水化时间越长,岩样表面粗糙度显著提升,微裂隙网络持续扩展并形成多尺度损伤特征. 水化过程中黏土矿物膨胀产生的应力集中效应会削弱颗粒间胶结力,导致表面颗粒剥落现象加剧. (3)在温差固定时,水化时间减少会显著加剧页岩的破碎程度,如图 3-W1 所示. 此时岩石脆性特征更为突出,其破坏模式主要呈现为剪切破坏形式. (4)在水化时间恒定的条件下,随着温差的增大,页岩试样破裂后会产生多裂纹扩展现象,如图 1-W1 所示. 这些裂纹贯穿试样形成宏观断裂网络,页岩脆性特征显著增强,破坏模式呈现典型的纵向劈裂型断裂特征.

3　温差与水化耦合作用下页岩的能量特征

3.1　加载过程中能量特征的演化

岩石从外部应力中吸收的总能量可以分为两个部分. 一部分能量作为可逆弹性能量储存在岩石中,可以在卸载时释放出来. 剩余的能量转化为耗散能量,这部分能量是不可逆的,并且在岩石的裂缝扩展和岩石的塑性变形过程中被耗散. 能量特征对于揭示页岩在不同温差和水化时间下的力学性质、变形及破坏机制至关重要. 根据应力-应变曲线和热力学定律,可以使用以下公式来计算总能量、弹性能量和耗散能量:

$$U = U_e + U_d, \tag{1}$$

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon_1 + 2\int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 \mathrm{d}\varepsilon_3, \tag{2}$$

$$U_e = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)], \tag{3}$$

$$U_d = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 \mathrm{d}\varepsilon_1 + 2\int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 \mathrm{d}\varepsilon_3 - \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)], \tag{4}$$

$$\mu = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}, \tag{5}$$

其中:U 表示外部应力输入的总能量;U_e 和 U_d 分别表示弹性能量和耗散能量;μ 是泊松比,E 是弹性模量;σ_1 和 σ_3 分别是轴向应力和围压;ε_1 和 ε_3 分别是轴向应变和径向应变.

由于 U_d 主要用于塑性变形和裂纹扩展,因此 U_d 的比例可以作为加载过程中岩石结构损伤程度的量度. 耗散能占比 n_d 可以通过以下公式计算:

$$n_d = \frac{U_d}{U}. \tag{6}$$

图 8 描述了页岩在加载过程中能量特征的演化情况. 很明显,加载过程中页岩能量特征的变化可分为四个不同阶段.

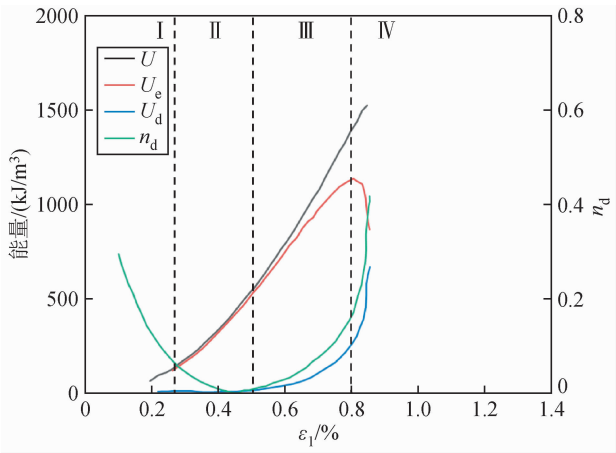


图 8　页岩加载过程中能量参数演化

Fig. 8　Evolution of energy parameters in shale during loading processes

在第一个阶段,U 值相对较低. 在此阶段,n_d 迅速下降,表明外部加载输入的大部分总能量转化为弹性能并储存在页岩内部. 这与页岩在弹性阶段的力学行为一致.

接下来的阶段显示,随着轴向应变的增加,U_d 逐渐增大,这表明微裂纹开始在页岩样品内扩展. 尽管此时 U_d 的增长速率仍然落后于 U 的增长速率,n_d 仍然持续下降. 但值得注意的是,n_d 的下降速率逐渐减缓,并最终达到一个平台期. 这表明页岩样品经历了加速的微裂纹发展和不可逆的塑性变形,导致页岩内部结构损伤的逐渐积累. 在弹性阶段中由可

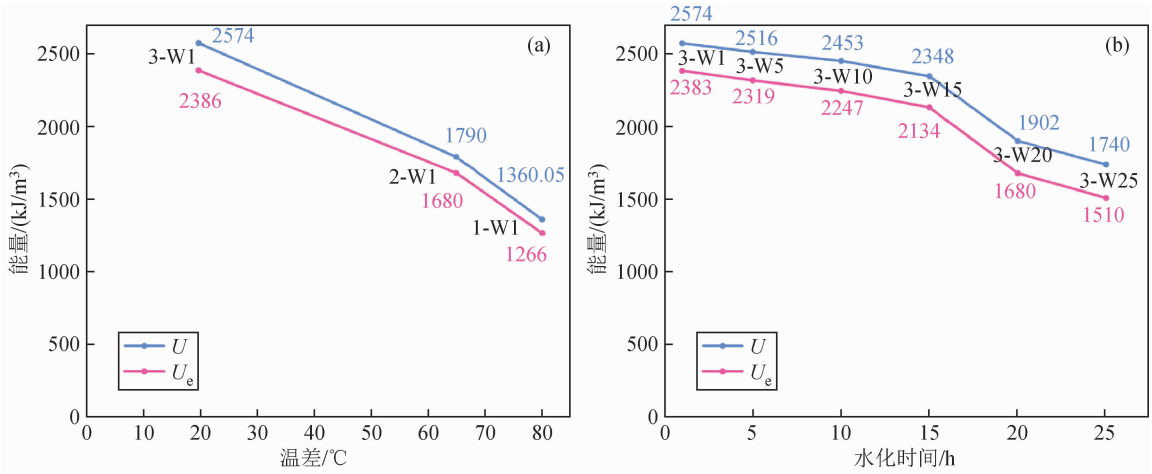


图 9 页岩在不同温差和水化时间下 U 和 U_e 的变化

(a)水化时间 1 h 不同温差下页岩的总能量 U 和弹性能量 U_e;(b)温差 20 ℃不同水化时间下的总能量 U 和弹性能量 U_e.

Fig. 9 Variations of total energy (U) and elastic strain energy (U_e) in shale under different temperature differentials and hydration periods

(a) Total energy (U) and elastic strain energy (U_e) of shale under different temperature differences at a fixed hydration time of 1 h; (b) Total energy (U) and elastic strain energy (U_e) of shale under different hydration times at a fixed temperature difference of 20 ℃.

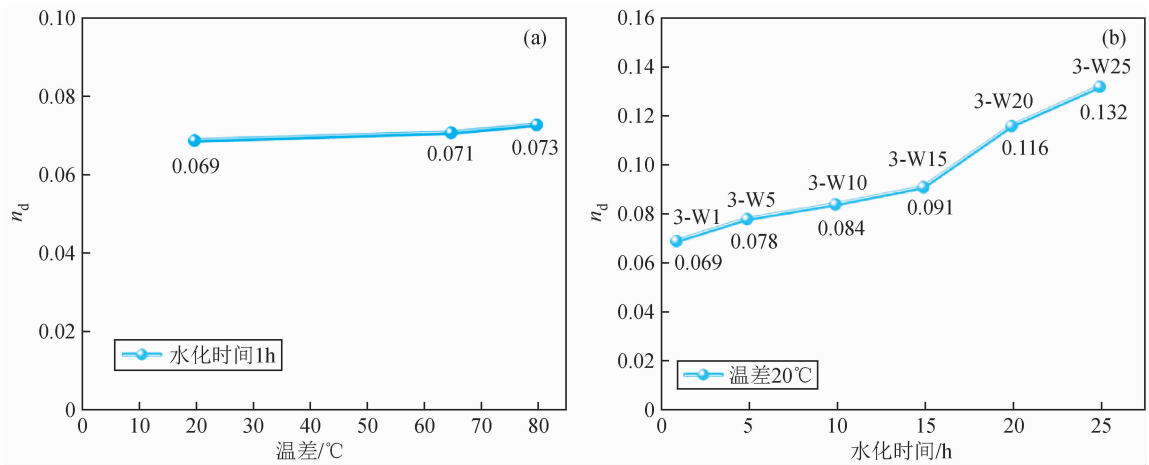


图 10 页岩在不同温差和水化时间下 n_d 的变化

(a)水化时间 1 h 不同温差下的页岩的耗散能占比 n_d;(b)温差 20 ℃不同水化时间下页岩的耗散能占比 n_d.

Fig. 10 Variation of damage variable (n_d) in shale under different temperature differentials and hydration durations

(a) Dissipated energy fraction (n_d) of shale under different temperature differences at a fixed hydration time of 1 h; (b) Dissipated energy fraction (n_d) of shale under different hydration times at a fixed temperature difference of 20 ℃.

逆的 U_e 向此阶段的 U_d 增长过渡.

在第三阶段,随着轴向应变的增加,U_d 的增长速率超过了 U 的增长速率,导致 n_d 开始上升. n_d 增长速率的加快随着轴向应变的增加而增强. 这一趋势表明,在此阶段,页岩样品内产生了大量的裂缝,导致不可逆塑性变形的加速积累.

在第四阶段,随着轴向应变的发展,U_d 急剧上升. 同时,U_e 从上升趋势转为迅速下降,表明内部的弹性能量已经释放完毕. 该阶段与图 4 所示的后破坏阶段相一致,此时轴向载荷超过了页岩的峰值强度,随后轴向应力随轴向应变的增加急剧下降. 在此阶段,宏观裂缝面开始形成. 因此,页岩样品内大部分的总能量,包括储存在样品内的弹性能量,迅速通过微裂纹和宏观裂缝面的广泛网络释放.

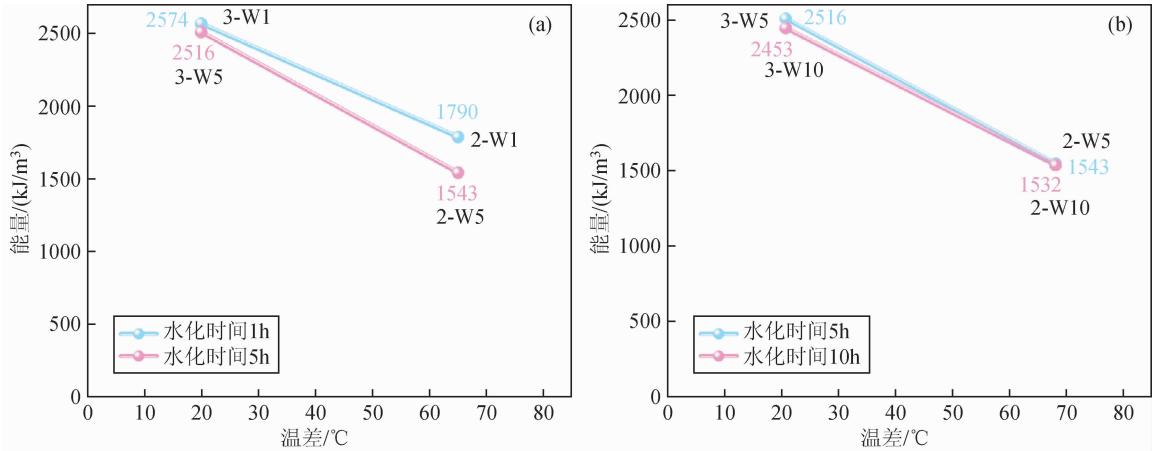


图 11　页岩总能量与温差和水化时间的关系

Fig. 11　Relationship between total energy density of shale and temperature differentials/hydration durations

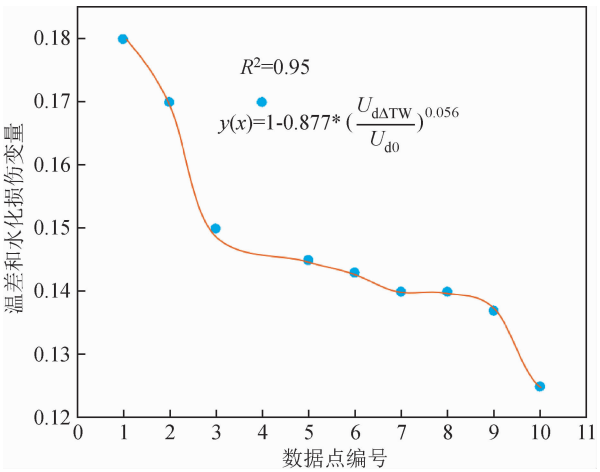


图 12　温差、水化损伤变量拟合曲线图

Fig. 12　Fitted curve plot of temperature difference and hydration damage variable

3.2　总能量和弹性能量

图 9 展示了在不同温差和水化时间下,页岩样品在峰值强度点的 U 和 U_e 的变化规律. 如图 9a 所示,随着温差的升高,U 和 U_e 呈现出下降的趋势. 这是因为:(1)温差升高导致岩石内部矿物颗粒热膨胀不均匀,引发微裂纹扩展和结构损伤,这部分耗散能增加,减少了可用于弹性变形的能量(Gomah *et al.*, 2025). (2)高温差下页岩的弹性模量显著降低,这意味着外部施加的应力在页岩中引起的弹性变形较小,从而导致弹性能量 U_e 降低. (3)随着温差升高,能量输入不仅用于弹性变形,还被用于激发页岩内部的非弹性变形(如塑性变形和破裂). 这些非弹性变形消耗了能量,降低了系统的弹性恢复能力,导致总能量 U 和弹性能量 U_e 的下降.

如图 9b 所示,随着水化时间的增加,U 和 U_e 也呈现出下降的趋势. 这是因为:(1)随着水化反应的进行孔隙结构会发生改变,导致能量更多地转化为塑性变形能,从而减少了弹性能量的储存,导致弹性能量 U_e 的下降. (2)随着水化时间的增加,页岩发生微裂纹扩展消耗了外部施加的应力能量,导致总能量 U 的下降(梁冰等, 2011). (3)水化引起的非弹性变形(如矿物膨胀、胶结破坏)会导致能量 U 和弹性能量 U_e 下降(焦伟杰等, 2022; 余致理等, 2022).

3.3　耗散能占比

图 10 展示了在不同温差和水化时间下,页岩样品在峰值强度点的耗散能占比 n_d 的变化规律. 如图 10a 所示,随着温差的升高,耗散能占比 n_d 呈现出上升的趋势. 这是因为:温差升高导致页岩内部不同区域的热膨胀不均匀,产生热应力. 这种局部的热应力促使岩石内部微裂纹的扩展和塑性变形的增加. 这些非弹性过程消耗了大量的能量,转化为不可逆的耗散能量,导致耗散能占比的增加.

如图 10b 所示,耗散能占比 n_d 随着水化时间的增加也呈现出上升的趋势. 这是因为:(1)随着水化时间的增加,页岩的弹性模量和峰值强度逐渐降低(赵志红等, 2022). 页岩的弹性变形能力减弱,使得在应力作用下,更多的能量转化为塑性变形和微裂纹扩展,这些非弹性变形成为主要的能量耗散途径. 非弹性变形消耗了大量的能量,使得耗散能占比增大. (2)水化过程中,页岩中的矿物成分和孔隙水之间的相互作用会改变颗粒之间的黏结力,导致页岩

内部的非弹性损失增加,增加耗散能量在总能量中的比重.

3.4 总能量与温差、水化时间的关系

如图 11 所示,在温差与水化耦合作用下,从页岩的总能量曲线可以看出,水化作用和温差的改变都会使页岩的总能量呈现下降趋势.但温差对页岩总能量的影响大于水化时间的影响.如图所示,例如页岩 3-W1,温差为 20 ℃,水化时间为 1 h 时,试样的总能量为 2574 kJ/m^3.水化时间增大至 5 h 时,试样的总能量为 2516 kJ/m^3,降低了 2.3%;水化时间不变,温差增大至 65 ℃,试样的总能量为 1790 kJ/m^3,降低了 30.5%.页岩 3-W5,温差为 20 ℃,水化时间为 5 h 时,试样的总能量为 2516 kJ/m^3.水化时间增大至 10 h 时,试样的总能量为 2453 kJ/m^3,降低了 2.5%;水化时间不变,温差增大至 65 ℃,试样的总能量为 1543 kJ/m^3,降低了 38.67%.综上所述,温差对总能量 U 的影响大于水化时间的影响(王萍等, 2025),主要是因为温差引起的热应力和热膨胀作用迅速导致更为剧烈的非弹性变形和能量耗散,而水化过程的影响则较为渐进、缓慢,且通常对页岩的整体能量变化的影响较为温和.

4 页岩损伤本构模型的建立

4.1 能量角度考虑的温差、水化损伤变量

随着温差的升高和水化时间的增加,页岩内部会产生大量的微观裂纹,使得页岩的弹性模量逐渐降低,岩石产生损伤(图 12).故通常采用弹性模量来定义温差、水化损伤变量:

$$D_{\Delta TW}=1-\frac{E_{\Delta TW}}{E_0}\ , \tag{7}$$

式中:$D_{\Delta TW}$为温差、水化损伤变量;E_0 为常温干燥状态下页岩的弹性模量;$E_{\Delta TW}$温差、水化损伤状态下的弹性模量.

考虑到损伤演化实质为耗散能累积过程,因此也可基于峰值耗散能构建能量型损伤变量.基于耗散能演化定义能量型温差、水化损伤变量,考虑幂律演化形式:

$$D_{\Delta TW}=1-A\left(\frac{U_{d\Delta TW}}{U_{d0}}\right)^{B}\ , \tag{8}$$

式中:$D_{\Delta TW}$为温差、水化损伤变量;U_{d0}为常温干燥状态下页岩的峰值耗散能;$U_{d\Delta TW}$为温差、水化作用下页岩的峰值耗散能;A、B 为拟合参数,根据页岩的具体特性进行确定,以确保模型能够精确描述不同温差、水化时间对页岩损伤演化的影响.

通过方程(7)计算得到不同温差和水化时间下的损伤变量 $D_{\Delta TW}$,随后以 $D_{\Delta TW}$为目标值,采用方程(8)进行非线性最小二乘拟合,从而反演得到参数 $A=0.877$,$B=0.056$,其拟合度 $R^2=0.95$.表明方程(8)能够较好表征温差与水化耦合作用下损伤变量的能量演化规律.

4.2 载荷损伤变量

基于连续介质损伤力学理论,页岩的力学损伤演化可表征为微观尺度下结构单元在应力加载过程中的渐进式强度劣化过程.将加载损伤变量 D_{load} 定义为损伤微元数量 N_d 与微元总数 N_t 的比值:

$$D_{load}=\frac{N_d}{N_t}\ . \tag{9}$$

由于页岩属于非均质材料,其内部微元体破坏过程具有显著的空间随机性特征,因此基于统计损伤理论,采用概率分布函数表征加载过程中微元体失效的累积效应更为科学(王亮等, 2025).在任意载荷水平下,累计失效微单元的总数为加载过程中所有随机分布损坏微单元的积分,即:

$$N_d=\int_0^S N_t P(x)\,dx=N_t\int_0^S P(x)\,dx\ , \tag{10}$$

式中:$P(x)$为页岩单元破坏的概率分布函数.

页岩在外部载荷作用下的损伤变量 D_{load}的表达式为:

$$D_{load}=\frac{N_d}{N_t}=\int_0^S P(x)\,dx\ , \tag{11}$$

本文假设页岩微单元的强度破坏概率服从 Weibull 分布函数,表达式如下:

$$P(x)=\begin{cases}\dfrac{m}{S_0}\left(\dfrac{x}{S_0}\right)^{m-1}\exp\left[-\left(\dfrac{x}{S_0}\right)^{m}\right], & x>0\\ 0, & x\leqslant 0\end{cases}\ , \tag{12}$$

其中,m 表示反映微元集中程度大小的 Weibull 参数;S_0 表示反映微元集中强度大小的 Weibull 参数.

将方程(12)代入方程(11)并进行积分得到 D_{load}:

$$D_{load}=1-\exp\left[-\left(\frac{S}{S_0}\right)^{m}\right]\ . \tag{13}$$

4.3 页岩微单元的强度确定

进一步考虑使用能量准则来确定页岩微元强度分布变量 S,以求解 Weibull 分布参数 m 和 S_0.

对于各向同性弹性材料,其单位体积弹性应变能密度表达式为:

$$U^e=\frac{1}{2E_{\Delta TW}}(\sigma_1^2+2\sigma_3^2-2\mu(2\sigma_1\sigma_3+\sigma_3^2))\ , \tag{14}$$

岩石破坏是一种由能量驱动的状态失稳现象,是材料物理过程中的基本属性.公式(14)中,可释放的

弹性应变能被用作岩石的强度参数:

$$S = U^{e} = \frac{1}{2E_{\Delta TW}}(\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)) . \quad (15)$$

4.4　温差、水化和载荷作用下的岩石损伤本构模型

为了描述不同温差、水化时间作用下页岩的损伤本构关系,将温差和水化作用视为页岩的第一损伤状态,受载荷作用视为其第二损伤状态. 根据 Lemaitre 应变等价假说,温差、水化和载荷耦合作用的损伤变量计算公式为:

$$1 - D_{tot} = (1 - D_{\Delta TW})(1 - D_{load}) . \quad (16)$$

将方程(8)和方程(13)代入方程(16)中可得耦合损伤变量为:

$$D_{tot} = 1 - A\left(\frac{U_{d\Delta TW}}{U_{d0}}\right)^{B} \exp\left[-\left(\frac{S}{S_0}\right)^{m} \right] . \quad (17)$$

将方程(15)代入公式(17)中,可得到温差、水化和加载条件下页岩总损伤公式,即:

$$D_{tot} = 1 - A\left(\frac{U_{d\Delta TW}}{U_{d0}}\right)^{B} \exp \left[-\left(\frac{\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\nu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)}{2E_{\Delta TW}S_0}\right)^{m} \right] . \quad (18)$$

基于 Lemaitre 应变等效原理和有效应力概念,可建立岩石损伤本构关系如下:

$$\sigma_i^{*} = \frac{\sigma_i}{1 - D_{tot}}, i = 1,2,3 , \quad (19)$$

基于胡克定律,可得:

$$\varepsilon_i^{*} = \frac{[\sigma_i^{*} - \mu(\sigma_j^{*} + \sigma_k^{*})]}{E_{\Delta TW}} , \quad (20)$$

其中,$E_{\Delta TW}$为温差、水化损伤状态下的弹性模量,ε_i^{*}为有效应变;$i = 1,2,3$;$j = 1,2,3$;$k = 1,2,3$.

基于变形协调条件,有效应变等于实际应变:

$$\varepsilon_i^{*} = \varepsilon_i , \quad (21)$$

由公式(19)~(21)推导得到本构方程:

$$\sigma_1 = E_{\Delta TW}\varepsilon_1(1 - D_{tot}) + 2\mu\sigma_3 . \quad (22)$$

将公式(18)代入公式(22)中,得到方程(23)如下所示:

$$\sigma_1 = E_{\Delta TW}\varepsilon_1 A\left(\frac{U_{d\Delta TW}}{U_{d0}}\right)^{B} \exp \left[-\left(\frac{\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)}{2E_{\Delta TW}S_0}\right)^{m} \right] + 2\mu\sigma_3 . \quad (23)$$

5　模型参数确定与验证

5.1　模型参数确定

Weibull 分布参数 m 和 S_0 可以通过线性回归、突变理论和峰值点法进行确定. 峰值点是应力-应变曲线中最重要的特征点,它可以反映页岩的抗压强度和峰值应变. 通过峰值点法对统计损伤本构模型的参数进行求解,在应力-应变曲线的峰值点存在以下关系.

$$\left.\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1}\right|_{\varepsilon_1 = \varepsilon_p} = 0 , \quad (24)$$

$$\sigma_1|_{\varepsilon_1 = \varepsilon_p} = \sigma_p , \quad (25)$$

其中,σ_p 和 ε_p 分别为峰值轴向应力和峰值轴向应变.

单轴压缩下峰值点的微单元强度分布变量可由式(15)得到:

$$S_p = \frac{\sigma_1^2}{2E_{\Delta TW}} , \quad (26)$$

将公式(26)代入峰值条件的(24)和(25)即可得出:

$$\left.\frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1}\right|_{\varepsilon_1 = \varepsilon_p} = E_{\Delta TW} \exp\left[-\left(\frac{S_p}{S_0}\right)^{m} \right]\left(1 - \frac{mS_p^{m}}{S_0^{m}}\right) = 0 , \quad (27)$$

于是可以得到:

$$S_0 = S_p m^{\frac{1}{m}} , \quad (28)$$

峰值点处的应力-应变关系如下:

$$\sigma_p = E_{\Delta TW}\varepsilon_p \exp\left[-\left(\frac{S_p}{S_0}\right)^{m} \right] . \quad (29)$$

将公式(29)代入公式(27),求得 Weibull 参数 m 的表达式为:

$$m = \frac{1}{\ln(E_{\Delta TW}\varepsilon_p/\sigma_p)} , \quad (30)$$

将公式(30)代入公式(28)即可得到 Weibull 参数 S_0 的表达式为:

$$S_0 = S_p\left[\frac{1}{\ln(E_{\Delta TW}\varepsilon_p/\sigma_p)}\right]^{\ln(E_{\Delta TW}\varepsilon_p/\sigma_p)} , \quad (31)$$

方程(23)通过峰值点法推导出在三轴压缩下在峰值点的 Weibull 参数 m 和 S_0:

$$m = \left(\ln\frac{E_{\Delta TW}\varepsilon_p}{\sigma_p - 2\mu\sigma_3}\right)^{-1} , \quad (32)$$

$$S_0 = S_p m^{\frac{1}{m}} = S_p\left[\left(\ln\frac{E_{\Delta TW}\varepsilon_p}{\sigma_p - 2\mu\sigma_3}\right)^{-1}\right]^{\ln\frac{E_{\Delta TW}\varepsilon_p}{\sigma_p - 2\mu\sigma_3}} . \quad (33)$$

5.2　模型参数识别与独立验证

5.2.1　训练集参数识别与拟合一致性检验

本文将实验数据划分为训练集与验证集. 训练集为图 13 所示的全部工况(ΔT = 80 ℃、65 ℃ 与 20 ℃ 下不同水化时间的三轴压缩实验曲线),用于模型参数识别与参数统计;验证集为新增的 ΔT =

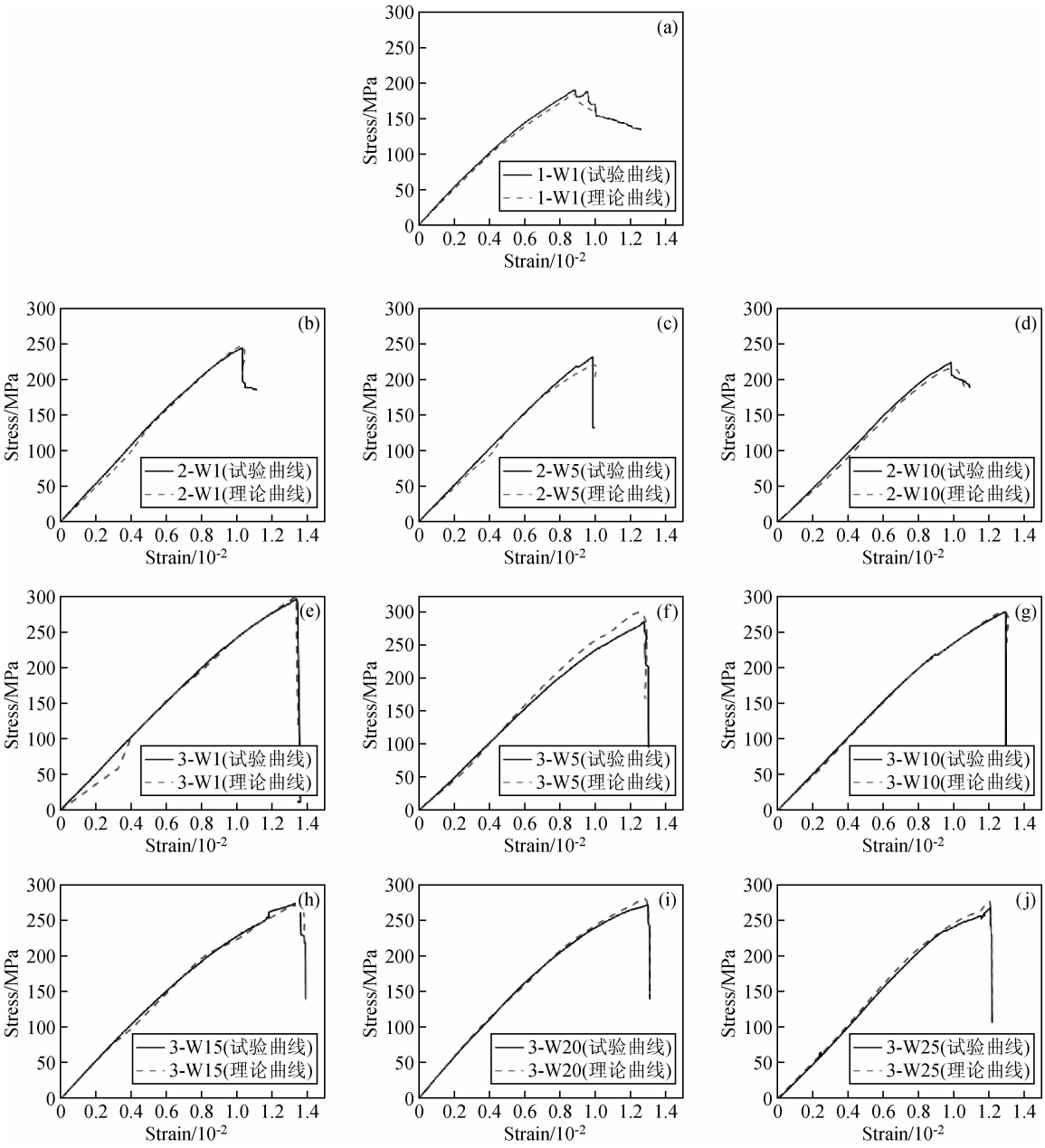


图 13 训练集实验结果与理论曲线对比

Fig. 13 Comparison of training set experimental results with the theoretical curve

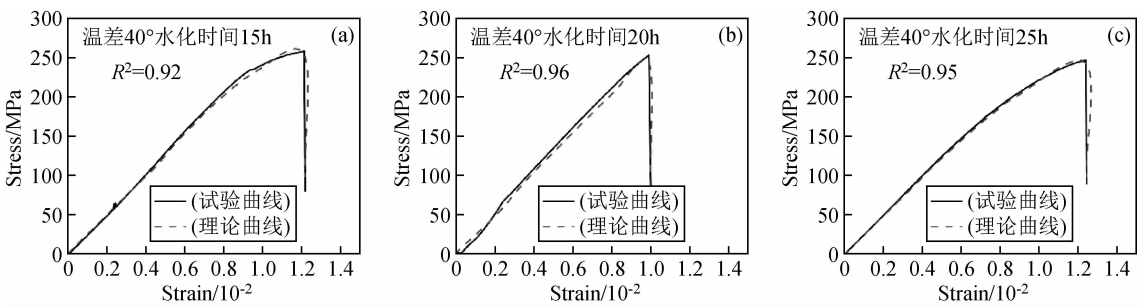


图 14 验证集实验结果与理论曲线对比

Fig. 14 Comparison of validation set experimental results with the theoretical curve

40 ℃、W = 15 h、20 h、25 h 三组实验数据,该数据在参数反演过程中未被使用,仅用于检验模型对未参与标定工况的独立预测能力.

在训练集中,首先确定温差、水化损伤变量,并计算各工况对应的能量指标;随后基于峰值点法对统计损伤参数进行识别,得到 Weibull 参数 m 与 S_0 等(见表 3).将训练集识别得到的参数代入温差、水化和载荷作用下的岩石损伤本构模型,可重构训练集工况下的应力应变关系,其结果如图 13 所示.图 13 表明:模型能够较好描述训练集条件下的弹性段、峰值点及峰后软化段的总体演化特征,说明本构模型在训练集范围内具有良好的拟合一致性.

表 3　模型参数

Table 3　Model parameters

编号	σ_3/MPa	σ_p/MPa	ε_p	E/MPa	μ	$U_{d\Delta TW}$ /(kJ/m^3)	U_{d0} /(kJ/m^3)	m	S_0	σ_1/MPa
1-W1	30	190.856	0.884	20595.32	0.2613	94	300	0.205	8.310	182.1730
2-W1	30	244.6828	1.0316	23391.43783	0.25773	110	300	0.215	11.794	237.1175
2-W5	30	232.1608	0.9909	22853.6049	0.29831	124	300	0.215	10.832	226.8920
2-W10	30	224.0493	0.9869	20120.03077	0.31108	131	300	0.219	11.891	221.380
3-W1	30	297.2486	1.3401	28039.59315	0.24754	188	300	0.204	9.844	297.728
3-W5	30	288.0305	1.2791	27010.39857	0.24831	197	300	0.207	10.823	284.999
3-W10	30	278.3146	1.285	25903.99759	0.24945	206	300	0.207	10.359	279.213
3-W15	30	275.6299	1.3628	25788.1233	0.25854	214	300	0.204	9.183	271.550
3-W20	30	271.2507	1.3022	25495.2467	0.30614	222	300	0.205	9.278	274.083
3-W25	30	267.6279	1.2077	24365.145	0.32883	230	300	0.209	10.504	272.807

5.2.2　新增实验验证

为满足“独立验证”的要求,本文新增 ΔT = 40 ℃、W = 15 h、20 h、25 h 三组实验作为验证集,并严格执行以下预测流程:

(1)验证集不进行任何参数反演或再拟合,仅输入工况条件(ΔT、W、σ_3)及训练阶段已确定的材料/模型参数.

(2)温差、水化损伤由训练阶段建立的损伤关系直接计算.

(3)统计损伤参数采用训练集统计结果.将 m 与 S_0 取训练集均值用于验证集预测.由表 3 统计得到:$\overline{m}$ = 0.209,$\overline{S_0}$ = 10.280.据此对 ΔT = 40 ℃、W = 15 h、20 h、25 h 三种工况进行应力应变曲线预测,其与对应实验曲线的对比结果如图 14 所示.在 ΔT = 40 ℃工况下仍可较好再现实验曲线的整体形态与峰值位置,验证了模型的独立预测能力.

6　结　论

为了深入探讨页岩在不同温差和水化时间下的力学性质和能量特征变化,本研究采用了不同温差和水化时间下的岩石力学实验.主要研究结果总结如下:

(1)相同水化时间下,随着温差的升高,页岩的峰值强度和弹性模量呈下降趋势.同时页岩的总能量、弹性能量也呈现下降趋势,耗散能占比则增加.相同温差下,随着水化时间的增加,页岩的峰值强度、弹性模量、总能量和弹性能量降低,而耗散能占比上升.

(2)温差对总能量的影响要大于水化时间的影响.

(3)温差越大或水化时间越短,页岩的脆性特征越明显.

(4)从能量角度考虑页岩的温差与水化损伤变量,基于 Lemaitre 应变等价性假说、Weibull 分布函数和能量准则建立温差与水化耦合作用下页岩的损伤本构模型并与实验值进行对比,拟合效果良好.将该本构模型与井壁力学平衡方程及相应边界条件(地应力、孔隙压力、井内压力与温度载荷等)耦合后,可计算井周应力分布,为井壁稳定性判别与钻井液密度窗口优化提供理论依据.

(5)上述结果对深井钻井具有重要指导意义.在钻井液循环初期,巨大的温差是导致井壁岩石损伤和能量承载能力骤降的主要原因,应优先考虑采用保温等措施控制温差;而在钻进周期较长的井段,

则需重点关注钻井液与页岩的长时间水化作用所带来的强度劣化问题.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Bu M H, Zhang P, Guo P Y, *et al*. 2024. Deterioration of equivalent thermal conductivity of granite subjected to heating-cooling treatment. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 16(10): 4229-4246.

Cao W K, Xing X S, Zhou C S, *et al*. 2024. Fluid-solid-thermal-chemical coupling model for wellbore instability of directional wells in central Bohai sea and its application. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition) (in Chinese), 39(5): 71-77, 84.

Fu H Y, Yu X W, Zeng L, *et al*. 2024. Mechanical properties and damage constitutive model of silty mudstone under heating and water-cooling cycles. Acta Geotech., 19(8): 5031-5050, doi: 10.1007/s11440-023-02225-4.

Gomah M E, Wang E Y, Omar A A, *et al*. 2025. Damage mechanism and permeability evolution of high-temperature granodiorite subjected to liquid nitrogen cooling shock. Rock Mech. Rock Eng., 58(8): 8753-8772, doi: 10.1007/s00603-025-04520-w.

Gong F Q, Zhang P L, Xu L. 2022. Damage constitutive model of brittle rock under uniaxial compression based on linear energy dissipation law. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 160: 105273, doi: 10.1016/j.ijrmms.2022.105273.

Hu H H, Li J W, Fan W T, *et al*. 2025. Damage and deterioration characteristics and constitutive model of red layer soft rock under the influence of water-rock interaction. Rock and Soil Mechanics (in Chinese), 46(3): 685-694, doi: 10.16285/j.rsm.2024.1102.

Jiao W J, Gao Z D, Lan Y L, *et al*. 2022. Study on the Sensitivity Mechanism of Water-Rock Interaction to the Damage of Organic-rich Shale. Contemporary Chemical Industry (in Chinese), 51(9): 2203-2206, doi: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2022.09.051.

Li M Y, Wu Z J, Weng L, *et al*. 2024. Modelling Thermo-hydro-mechanical (THM) effect on the hydro-mechanical properties of granite in disposal system using an improved meso-structure-based DEM model. Rock Mechanics and Rock Engineering, 57(7): 5129-5154, doi: 10.1007/s00603-024-03779-9.

Liang B, Lan B, Wang J G. 2011. Tri-axial compression test study on mechanical characteristics of oil shale under the water. Journal of Shandong University (Engineering Science) (in Chinese), 41(5): 82-85, 102.

Liu X S, Ning J G, Tan Y L, *et al*. 2016. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 85: 27-32.

Liu Z B, Wang H Y, Li Y P, *et al*. 2023. Triaxial compressive strength, failure, and rockburst potential of granite under high-stress and ground-temperature coupled conditions. Rock Mechanics and Rock Engineering, 56(2): 911-932, doi: 10.1007/s00603-022-03066-5.

Lu T M, Ye C, Lu X M, *et al*. 2022. Wellbore instability mechanism and countermeasures of high-temperature organic-matter-rich reservoirs in the southern margin of Junggar Basin. Xinjiang Oil & Gas (in Chinese), 18(1): 26-31.

Lu Y H, Xiao X H, Zhao L, *et al*. 2020. The effect of temperature on stability of borehole wall in ultra-deep fractured formation. Drilling Fluid & Completion Fluid (in Chinese), 37(2): 160-167, doi: 10.3969/j.issn.1001-5620.2020.02.005.

Luo J, Xiong J, Zhu M Y, *et al*. 2023. Experimental study on the influence of temperature on rock physical properties: taking sandstone of Xujiahe formation and shale of Longmaxi formation in Sichuan basin as examples. Progress in Geophysics (in Chinese), 38(5): 2080-2093, doi: 10.6038/pg2023GG0376.

Meng T, Liu R C, Meng X X, *et al*. 2019. Evolution of the permeability and pore structure of transversely isotropic calcareous sediments subjected to triaxial pressure and high temperature. Engineering Geology, 253: 27-35.

Ram B K, Gupta V. 2024. Physico-mechanical characterization of Higher Himalayan granite under the thermal treatments of different heating-cooling conditions. Acta Geotech., 19(5): 2841-2854, doi: 10.1007/s11440-023-02224-5.

Song X Z, Guo Y, Xiang D M, *et al*. 2023. Multi-field coupling analysis of wellbore instability in Hutubi anticline while using water-based drilling fluid. Xinjiang Oil & Gas (in Chinese), 19(4): 1-9.

Song Z Y, Wu Y F, Yang Z, *et al*. 2021. Mechanical responses of a deeply buried granite exposed to multilevel uniaxial and triaxial cyclic stresses: Insights into deformation behavior, energy dissipation, and hysteresis. Advances in Materials Science and Engineering, 2021: 3160968, doi: 10.1155/2021/3160968.

Sun L D, Zou C N, Zhu R K, *et al*. 2013. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China. Petroleum Exploration and Development (in Chinese), 40(6): 641-649, doi: 10.11698/ped.2013.06.01.

Wang B Y, Deng J G, Song N Y. 2006. Effects of temperature, chemical and percolation on wellbore instability in shale. Drilling & Production Technology (in Chinese), 29(6): 1-4.

Wang P, Feng H W, Huang H, *et al*. 2025. Experimental study on the effects of temperature difference and hydration on the mechanical properties of shale in deep well formations. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(3): 1125-1141, doi: 10.6038/pg2025II0256.

Wang Z H, Chen F, Li H R, *et al*. 2025. Experimental research on the thermo-mechanical damage mechanisms of salt rock. Rock Mech. Rock Eng., 58(3): 4001-4021, doi: 10.1007/s00603-024-04370-y.

Wei C, Zhao C, Zhao C F, *et al*. 2024. Statistical damage constitutive model for rocks considering temperature effects and its validation. Journal of Central South University (Science and Technology) (in Chinese), 55(3): 1056-1067.

Yang H, Chen H, Li Y L, *et al*. 2022. Optimization and application of strength criterion for wellbore mechanical instability evaluation in drilling. Xinjiang Oil & Gas (in Chinese), 18(3): 1-5.

Yang S Q, Tian W L, Dong J P. 2021. Experimental study on failure mechanical properties of granite with two grain sizes after thermal treatment. Chinese Journal of Geotechnical Engineering (in Chinese), 43(2): 281-289, doi: 10.11779/CJGE202102008.

Yang Y, Wang Q, Yang F J, *et al*. 2026. Thermo-mechanical analysis of wellbore stability in ultra-deep formations. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 18(3): 2015-2032.

Yu Z L, Guo G F, Yu H, *et al*. 2022. Damage of Hydration Effect to Micropore Structure of Shale. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition) (in Chinese), 37(1): 44-50, 100.

Yu Z Q, Xu H Y. 1997. Thermal stress analyses for sidewall surrounding rock. Petroleum Drilling Techniques (in Chinese), (4): 13-15, 60.

Zeng Z F, Zhou S, Li J. 2025. Progress in geophysical exploration of supercritical geothermal resources. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(1): 318-327, doi: 10.6038/pg2025GG0023.

Zhang P F. 2011. Effect of the formation temperature on the hole-wall stability in ultra-deep scientific drilling. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) (in Chinese), 38(10): 1-5.

Zhang Z B, Wang E Y, Li N, *et al*. 2023. Research on macroscopic mechanical properties and microscopic evolution characteristic of sandstone in thermal environment. Construction and Building Materials, 366: 130152, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130152.

Zhao G K, Guo Y T, Yang C H, *et al*. 2025. Effect of temperature and pressure on mechanical behavior of reservoir shales at different depths: Implications for deep shale gas extraction. Rock Mech. Rock Eng., 58(6): 6169-6194, doi: 10.1007/s00603-025-

04470-3.

Zhao Z H, Jin H Z, Guo J C, *et al*. 2022. Study on softening constitutive model of deep shale under hydration. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 41(S2): 3189-3197, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1221.

Zhu D M, Li Y N, Huang W C, *et al*. 2024. Experimental study on physico-mechanical responses and energy characteristics of granite under high temperature and hydro-mechanical coupling. Case Studies in Thermal Engineering, 63: 105245, doi: 10.1016/j.csite.2024.105245.

附中文参考文献

曹文科, 幸雪松, 周长所, 等. 2024. 渤中井壁坍塌失稳流固热化耦合模型及应用. 西安石油大学学报(自然科学版), 39(5): 71-77, 84.

胡惠华, 李军伟, 范文韬, 等. 2025. 水岩作用下红层软岩损伤劣化特征及本构模型研究. 岩土力学, 46(3): 685-694, doi: 10.16285/j.rsm.2024.1102.

焦伟杰, 高振东, 兰延陵, 等. 2022. 水-岩作用对富有机质页岩损伤敏感性机理研究. 当代化工, 51(9): 2203-2206, doi: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2022.09.051.

梁冰, 兰波, 王俊光. 2011. 水影响下油页岩三轴压缩力学特性试验研究. 山东大学学报(工学版), 41(5): 82-85, 102.

鲁铁梅, 叶成, 鲁雪梅, 等. 2022. 准噶尔盆地南缘高温有机质储层井壁失稳机理及对策. 新疆石油天然气, 18(1): 26-31.

卢运虎, 肖先恒, 赵琳, 等. 2020. 温度对超深裂缝性地层井壁稳定性的影响. 钻井液与完井液, 37(2): 160-167, doi: 10.3969/j.issn.1001-5620.2020.02.005.

罗江, 熊健, 朱梦渊, 等. 2023. 温度作用对岩石物理性质影响的实验研究: 以四川盆地须家河组砂岩、龙马溪组页岩为例. 地球物理学进展, 38(5): 2080-2093, doi: 10.6038/pg2023GG0376.

邵先宇, 王科, 王志强, 等. 2025. 水化作用下页岩力学强度的劣化行为研究. 特种油气藏, 1-16.

宋先知, 郭勇, 向冬梅, 等. 2023. 呼图壁背斜水基钻井液井壁失稳机理多场耦合分析. 新疆石油天然气, 19(4): 1-9.

孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等. 2013. 中国深层油气形成、分布与潜力分析. 石油勘探与开发, 40(6): 641-649, doi: 10.11698/ped.2013.06.01.

王炳印, 邓金根, 宋念友. 2006. 力学温度和化学耦合作用下泥页岩地层井壁失稳研究. 钻采工艺, 29(6): 1-4.

王亮, 冯浩威, 闫传梁, 等. 2025. 温差作用下深井地层页岩力学性质及损伤本构模型研究. 地球物理学进展, 1-17.

王萍, 冯浩威, 黄海, 等. 2025. 温差和水化作用对深井地层页岩力学性质影响的实验研究. 地球物理学进展, 40(3): 1125-1141, doi: 10.6038/pg2025II0256.

魏超, 赵程, 赵春风, 等. 2024. 考虑温度作用的岩石统计损伤本构模型及验证. 中南大学学报(自然科学版), 55(3): 1056-1067.

杨虎, 陈昊, 李宜霖, 等. 2022. 钻井井壁力学失稳评价的强度准则优选与应用. 新疆石油天然气, 18(3): 1-5.

杨圣奇, 田文岭, 董晋鹏. 2021. 高温后两种晶粒花岗岩破坏力学特性试验研究. 岩土工程学报, 43(2): 281-289.

余致理, 郭高峰, 余恒, 等. 2022. 水化作用下页岩微观孔隙结构伤害特征. 西安石油大学学报(自然科学版), 37(1): 44-50, 100.

余志清, 徐华义. 1997. 井壁围岩热应力分析. 石油钻探技术, (4): 13-15, 60.

曾昭发, 周帅, 李静. 2025. 超临界地热资源地球物理勘探研究进展. 地球物理学进展, 40(1): 318-327, doi: 10.6038/pg2025GG0023.

张培丰. 2011. 地层温度对科学超深井井壁稳定的影响. 探矿工程(岩土钻掘工程), 38(10): 1-5.

赵志红, 金浩增, 郭建春, 等. 2022. 水化作用下深层页岩软化本构模型研究. 岩石力学与工程学报, 41(S2): 3189-3197, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.1221.