

文章编号:1673-2677(2026)02-0001-09

DOI: 10.12388/j.issn.1673-2677.2026.02.001

引用:李军,张小军,连威,等.温压耦合作用对水泥石力学性能的影响规律[J].新疆石油天然气,2026,22(2):1-9.

Cite:LI Jun,ZHANG Xiaojun,LIAN Wei,et al. The influence law of temperature-pressure coupling effect on the mechanical properties of cement stone[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2026, 22(2): 1-9.

# 温压耦合作用对水泥石力学性能的影响规律

李军<sup>1,2</sup>, 张小军<sup>1</sup>, 连威<sup>2</sup>, 周生栋<sup>2</sup>, 吴彦先<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京昌平 102249; 2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区, 新疆克拉玛依 834000; 3. 中国石油新疆油田分公司采油工艺研究院, 新疆克拉玛依 834000)

**摘要:**针对深层油气井固井水泥石在复杂温压环境下的力学响应机制不明确的问题,系统研究了养护温度与压力、实验温度与围压对G级油井水泥石力学性能的耦合影响。通过设置不同养护温度(25~140℃)与压力(常压与21.7 MPa)制度制备试样,结合不同实验温度(25~140℃)与围压条件(0~20 MPa)开展三轴压缩实验,分析了应力-应变曲线、峰值应力、弹性模量的演化规律。结果表明:养护温度的升高会降低水泥石的峰值应力与弹性模量;高压养护能显著抑制孔隙发育,提升结构致密性;实验温度的升高有助于提升水泥石在其养护温度附近的力学性能;围压的增加则增强水泥石的塑性与残余强度,且不同耦合条件下水泥石表现出阶段性演化特征。研究结果为深部地层固井水泥浆体系统设计及水泥环完整性评估提供了理论依据与实验支撑。

**关键词:**固井水泥石;温压耦合;力学性能;破坏模式;井完整性;深层页岩油

中图分类号:TE256

文献标识码:A

## The Influence Law of Temperature-Pressure Coupling Effect on the Mechanical Properties of Cement Stone

LI Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaojun<sup>1</sup>, LIAN Wei<sup>2</sup>, ZHOU Shengdong<sup>2</sup>, WU Yanxian<sup>3</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Changping District 102249, Beijing, China; 2. Karamay Campus, China University of Petroleum(Beijing), Karamay 834000, Xinjiang, China; 3. Oil Production Technology Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, Xinjiang, China)

**Abstract:** To address the unclear mechanical response mechanisms of the cement sheath in deep oil and gas well cementing under complex temperature-pressure conditions, this study systematically investigated the coupled effects of curing temperature, curing pressure, testing temperature, and confining pressure on the mechanical properties of Class G oil-well cement. Specimens were prepared at different curing temperatures ranging from 25°C to 140°C and curing pressures of the atmospheric pressure and 21.7 MPa. Triaxial compression tests were then conducted at different testing temperatures from 25°C to 140°C and confining pressures from 0 to 20 MPa to analyze the evolution of stress-strain curves, peak stresses, and elastic moduli. The results show that increasing curing temperature reduces the peak stress and elastic modulus of the set cement, while high-pressure curing significantly inhibits pore development and improves structural compactness. Increasing testing temperature helps enhance the mechanical performance of cement at the testing temperature close to its curing temperature. Increasing confining pressure improves the plasticity and residual strength of cement, and the cement exhibits staged evolutionary characteristics under different coupled conditions. The findings of this study provide

**基金项目:**国家自然科学基金联合基金集成项目“复杂环境下水泥环全生命周期密封理论与控制方法”(U22B6003)。

**作者简介:**李军(1971—),2005年毕业于中国石油大学(北京)油气井工程专业,博士,教授,现从事井筒完整性、井筒压力控制方面的研究。(E-mail)lijun446x@vip.163.com

a theoretical basis and experimental support for the design of cement slurry systems and the integrity evaluation of cement sheaths in deep formations.

**Key words:** hardened well cement; temperature–pressure coupling; mechanical properties; failure modes; wellbore integrity; deep shale oil

固井作业是油气井建井过程中的关键环节,其核心目标是在套管与地层之间形成完整的水泥环,以实现层间有效封隔、支撑和保护套管,并为后续的钻井、完井及生产作业提供井筒完整性保障<sup>[1-3]</sup>。水泥石作为固井工程的主体材料,其力学性能直接决定了水泥环的长期密封能力与井筒的使用寿命。随着油气勘探开发向深层、超深层以及非常规领域不断拓展,固井水泥石所面临的服役环境日趋苛刻,高温、高压已成为其必须应对的常态工况<sup>[4]</sup>。在此背景下,系统研究温压耦合作用下水泥石的力学响应规律,对于指导固井水泥浆体系优化设计、保障复杂工况下油气井的安全生产具有重要的理论意义与工程价值<sup>[5]</sup>。

关于温度与压力对水泥石力学性能的影响,国内外学者已开展了大量研究工作。杨健<sup>[6]</sup>研究了固井水泥石的力学特征和水化放热特性,揭示了温度对固井水泥石性能的影响;刘霖松等<sup>[7]</sup>研究了早强剂在大温差下对水泥浆性能的调控规律;李扬等<sup>[8]</sup>研究了低温预固化温度与时间对加砂固井水泥物理力学性能的影响规律;初永涛等<sup>[9]</sup>明确了高温环境下水泥石力学性能的变化规律;庞学玉等<sup>[10-11]</sup>探究了温度环境、测试压力以及含水状态对水泥石力学行为的影响规律;丁建新等<sup>[12]</sup>研究了水泥石在高温及超高温下的力学特性和孔渗特征变化规律;杨威等<sup>[13]</sup>针对水泥石力学测试中影响水泥石性能测定的加载速率和养护时间问题对水泥石的变形和强度开展了力学实验研究;Li等<sup>[14]</sup>揭示了超高温环境中铝酸盐水泥石性能与微观结构的演化规律;Zhang等<sup>[15]</sup>揭示了养护温度、循环压力及井眼条件对水泥石力学性能与密封失效的影响机制;Neves等<sup>[16]</sup>揭示了围压与酸性介质共同作用下水泥石的变形与强度劣化规律;Zhang等<sup>[17]</sup>研究了高温与超高温环境下油井水泥石的碳化规律;Zhou等<sup>[18]</sup>研究了变温条件下水泥环的力学性能损伤规律与作用机理;马疆等<sup>[19]</sup>针对新疆油田南缘深井超深井地质特点,研发了超高温超高密度水泥浆体系;王典等<sup>[20]</sup>基于吉木萨尔地区水泥浆体系,开展了单三轴压缩、循环加载与胶结强度实验,揭示了水力压裂下水泥石本体与胶结面的损伤破坏规律;刘书杰等<sup>[21]</sup>建立了深水深井高温高压水泥石固化养护与制备方法,系统研究了温压条件对水泥石力学性能的影响;武治强等<sup>[22-23]</sup>揭示了超高温高压工况下水泥石力学性能的强度衰退规律。

综上所述,现有研究已从不同侧面揭示了温度、压力对水泥石力学性能的影响规律,但大多将养护条件与实验条件作为独立因素分别考察,对二者耦合作用下水泥石力学响应特征的系统研究尚显不足。为此,本文以吉木萨尔深层页岩油井水泥段水泥浆为基础配方,设置两组养护制度(常压养护与21.7 MPa高压养护)和四级养护温度(25 °C、80 °C、110 °C、140 °C),制备标准水泥石试样;采用MTS815.03型岩石力学实验机,开展不同实验温度(25~140 °C)与围压条件(0~20 MPa)下的三轴压缩实验。通过系统分析养护温度、实验温度及围压三者耦合作用下水泥石的应力–应变曲线、强度特性、弹性模量及破坏模式演化规律,揭示温压耦合条件对水泥石力学性能的影响机制,以期为深部地层固井水泥浆体系设计及水泥环力学完整性评估提供实验依据与理论支撑。

## 1 样品养护与试验方法

### 1.1 样品制备

为系统研究温压耦合作用对油井水泥石力学性能的影响规律,制备了不同养护条件下的水泥石试样。实验所用试样按以下方法制备:首先,将拌和均匀的水泥浆体注入内部尺寸为 $\Phi 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱形模具中浇筑成型;然后,参照国家标准GB/T 10238—2015《油井水泥》进行试样养护。设置两组水浴养护制度:第一组为高温高压养护,养护温度分别设定为25 °C、80 °C、110 °C、140 °C,养护压力恒定为21.7 MPa;第二组为常压养护,养护温度分别为25 °C、80 °C,养护压力为常压。所有试样均水浴养护3 d。其中,高温高压养护条件用于模拟地层深部环境下水泥水化、凝结与硬化的真实温压工况。需要说明的是,3 d养护并不意味着水泥水化反应已达到完全终态,水泥石的孔隙结构和水化产物仍可能随龄期延长继续演化。本文实验结果主要反映该配方水泥石早期硬化阶段在温压条件下的力学响应,可为深层井固井后早期水泥环完整性评价提供依据。

养护结束后,对试样进行脱模、切割和端面磨平处理。加工精度严格控制为:试样两端面不平行度 $\leq 0.05\text{ mm}$ ,沿高度方向直径误差 $\leq 0.3\text{ mm}$ ,端面与轴线垂直度偏差 $\leq 0.25^\circ$ 。经加工后制得符合规范要求的标准岩心试样并完成编号,制备完成的水泥石试样如图1所示。



图1 水泥石试样图  
Fig. 1 Photo of cement specimens

1.2 实验方案与装置

本实验旨在系统探究温压耦合作用下不同实验条件对固井水泥石力学性能的影响,核心考察养护温度、实验温度及实验围压三大关键影响因素。实验所用水泥石配方如下:G级+5%WG+3%超细水泥+35%SiO<sub>2</sub>+6%JTS-2+4%ST900L+0.8%CF40S+0.5%ST400S+0.8%ST200R+0.5%ST500L+44%H<sub>2</sub>O。该配方为吉木萨尔地区深层页岩油井固井用专用水泥浆体系,并非单一G级油井水泥体系。其中, WG、超细水泥和SiO<sub>2</sub>等组分会通过填充孔隙、改善颗粒级配以及参与高温条件下的二次水化反应,影响水泥石的致密化程度、孔隙结构和高温力学性能;JTS-2、ST900L、CF40S、ST400S、ST200R和ST500L等外加剂则主要通过调节浆体流变性、失水性能、凝结过程以及界面结构,进一步改变硬化后水泥石的力学性能。因此,本文所获得的峰值应力、弹性模量以及破坏模式演化规律,首先适用于所采用的吉木萨尔地区专用G级油井水泥石配方及相近的高硅、复合外加剂水泥浆体系;对于普通G级水泥或其他地区不同外加剂体系,其温压响应趋势可作为机理参考。

实验装置为MTS815.03型岩石力学试验机,实验方案思路如图2所示。实验操作遵循以下规范:先对标准岩心试样进行加温处理,待温度升至设定值并恒温30 min后,施加预定围压。针对三轴压缩实验:围压达到指定值后,先采用载荷控制模式,以1.0 kN/s的加载速率施加轴向载荷,待载荷稳定增长后,切换为位移控制模式,以0.003 mm/s 的轴向位移速率持续加载,直至试样发生破坏。当载荷达到试样峰值强度

后,实验系统继续施加压力,同步记录峰后阶段的应力-变形数据,最终获取试样的三轴压缩全应力-应变曲线。

2 实验结果与分析

2.1 养护温度

2.1.1 养护温度对水泥石微观结构的影响

在常压养护体系中,25℃与80℃养护试样的内部均存在大量离散分布的孔隙,相比较之下,80℃养护试样的孔隙体积显著增大、数量明显增多,且孔隙形貌更不规则、空间分布更为密集。这表明,在无压力约束的条件下,温度升高可有效促进孔隙的扩展、融合与连通,加剧试样内部结构缺陷发育,同时使试样表面轮廓趋于粗糙。加压养护体系则表现出截然相反的特征:在21.7 MPa养护压力下,25℃养护试样的孔隙数量已大幅减少;当养护温度提升至80℃时,试样内部几乎观测不到明显的大尺寸孔隙,孔隙边界更为光滑,整体微观结构呈现出高度致密化与均质化的特征。不同养护条件下水泥石的CT扫描结果如图3所示。该结果直观揭示了不同养护制度下水泥石内部孔隙结构的显著差异。

这一结果表明,温压条件可显著调控孔隙数量及其形貌特征:常压高温条件有利于孔隙数量的扩展,而高压高温环境则抑制孔隙生成,并提升水泥石结构致密性与完整性。

2.1.2 养护温度对水泥石力学特性的影响

图4为不同三轴围压条件下固井水泥石的应力-应变曲线。以图4(a)为例,该曲线表征了0 MPa围压下,不同养护温度所制备固井水泥石的应力-应变演化规律。结果表明,固井水泥石受压过程中的应力-应变曲线与岩石受压变形特征基本一致,可划分为四个典型变形阶段:初始裂隙压密阶段、弹性变形阶段、屈服变形阶段以及峰后破坏阶段。其中,25℃养护条件下的水泥石,其应力-应变曲线的上升段与下降段均更为陡峭,试样表现为突发性失稳破坏;随着养护温度的升高,曲线峰后段逐渐平缓,峰值应力逐步降低,试样失稳模式由脆性突发失稳向塑性变形过渡,这表明养护温度的提升促使固井水泥石的力学特性由脆性向塑性转变。图4(b)、图4(c)分别为10 MPa和20 MPa围压下固井水泥石的应力-应变曲线,不同养护温度试样的破坏形式及曲线演化趋势与0 MPa围压条件下基本一致。受围压强化作用影响,相较于0 MPa实验结果,在10 MPa、20 MPa围压下,同一养护温度的水泥石峰值应力随围压增大逐渐升高,塑性变

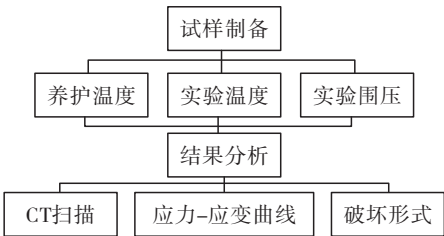


图2 实验方案思路图  
Fig. 2 Test workflow diagram

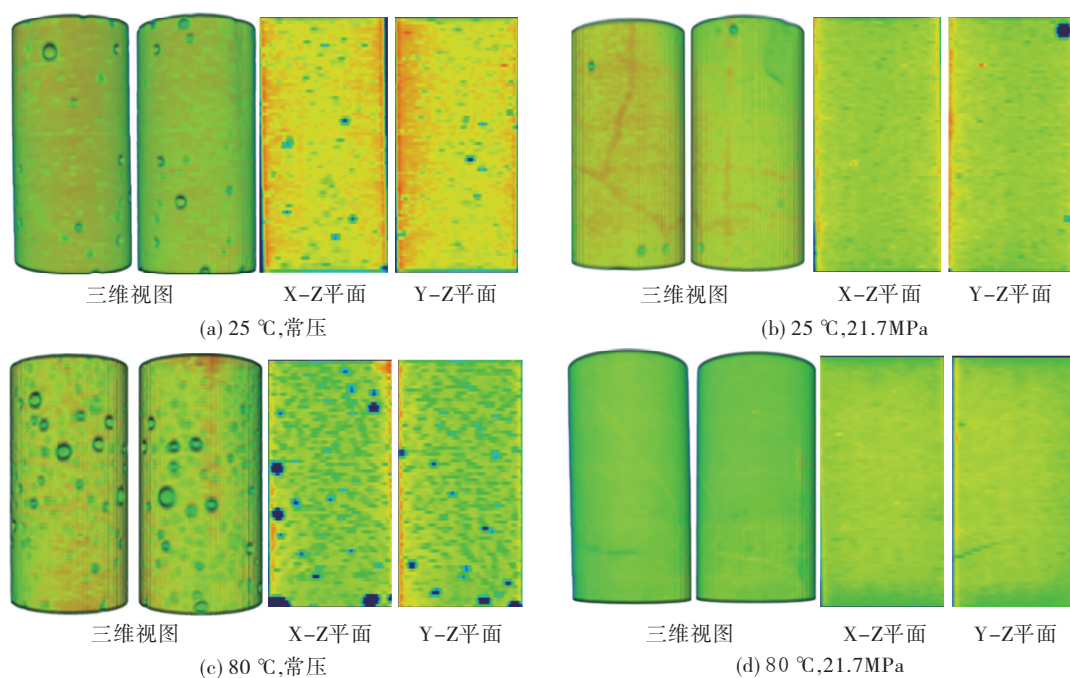


图3 不同温压养护条件下水泥石CT扫描三维视图及其X-Z、Y-Z平面

Fig. 3 Three-dimensional CT scans of cement set under different temperature-pressure curing conditions, along with their X-Z and Y-Z plane views

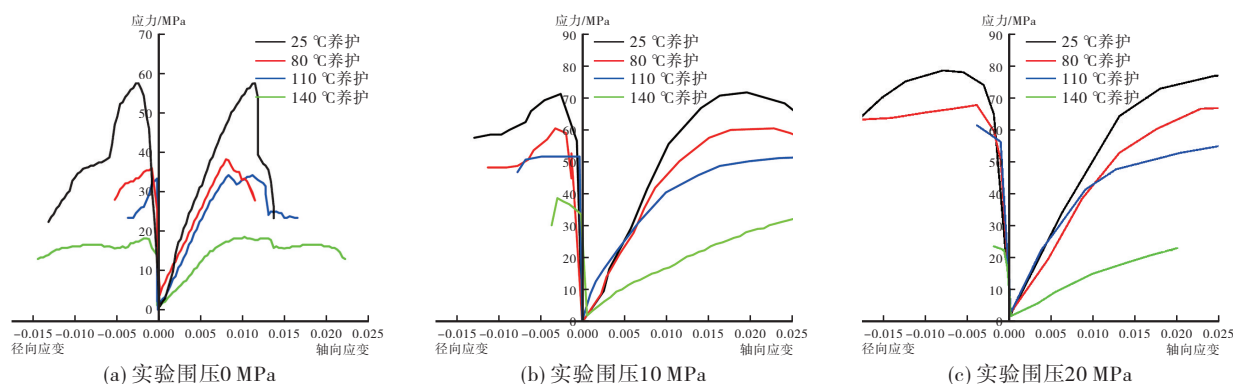


图4 不同养护温度下固井水泥石应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of cement set at various curing temperatures

形特征亦逐步增强。

图5揭示了不同养护温度下,三种实验围压条件对固井水泥石峰值应力的演化规律。结果表明:各实验围压下试样的峰值应力均随养护温度的升高呈下降趋势,且该下降过程可划分为两个特征阶段:110 °C之前下降趋势较为平缓,110 °C之后下降速率显著加剧。当养护温度由25 °C升至110 °C时,0 MPa、10 MPa及20 MPa围压下试样峰值应力分别降低22.54 MPa、20.11 MPa和15.61 MPa,对应的性能劣化速率依次为0.26 MPa/°C、0.24 MPa/°C和0.18 MPa/°C,可见常压下峰值应力的下降速率更快,围压的约束作用可有效减缓固井水泥石的力学性能劣化速度;当养护温度由110 °C进一步升至140 °C时,0 MPa、10 MPa、20 MPa围压下试样峰值应力分别下降16.31 MPa、11.85 MPa和

32.24 MPa,下降速率分别达到0.56 MPa/°C、0.54 MPa/°C和0.84 MPa/°C,这表明110 °C为关键临界温度,各实验条件下110 °C后的峰值应力下降速率均远高于110 °C之前,且下降速率达到前期的两倍以上。

弹性模量用于表征材料在弹性范围内的变形特性。结合水泥石在三轴压缩作用下的力学变形特征,本实验采用两点法计算水泥石的弹性模量,具体选取应力-应变曲线中弹性直线段进行求解。初始点取峰值应力40%对应的应力-应变数据,终点取峰值应力60%对应的应力-应变数据,以此计算水泥石在弹性限度内的弹性模量。不同养护温度下水泥石弹性模量的变化规律如图6所示。总体来看,弹性模量随养护温度的升高呈下降趋势,其演化规律与峰值应力基本一致,且下降速率随养护温度升高逐步加快。

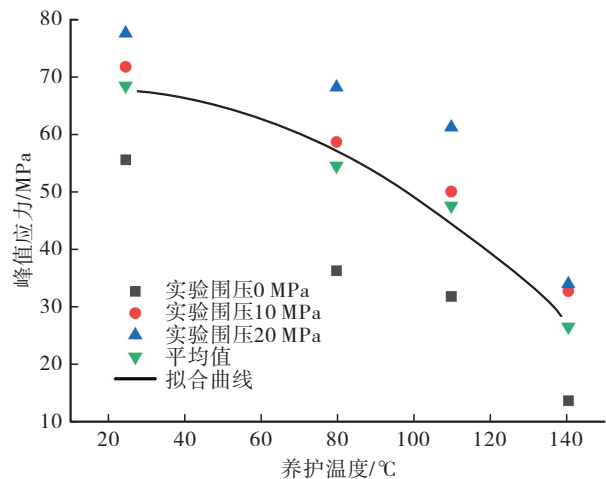


图5 养护温度对固井水泥石峰值应力的影响  
Fig. 5 Effects of curing temperature on the peak stress of well cement

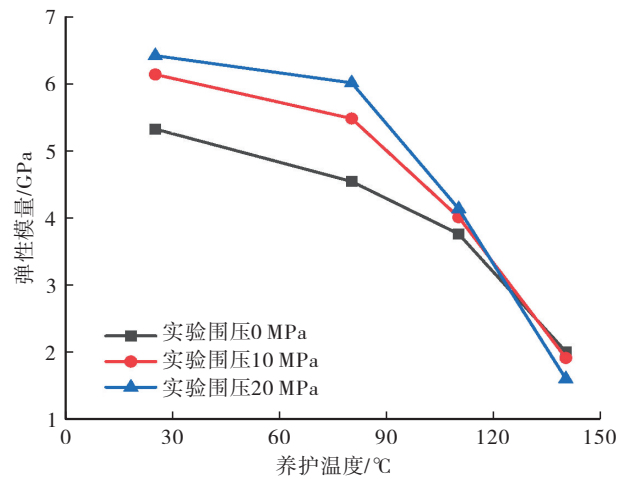


图6 养护温度对固井水泥石弹性模量的影响  
Fig. 6 Effects of curing temperature on the elastic modulus of well cement

2.2 实验温度

图7为不同实验温度下的应力-应变曲线。以图7(a)、7(c)为例剖析实验结果。

图7(a)为110 °C养护、0 MPa围压、25 °C和80 °C实

验时的应力-应变曲线,从25 °C应力-应变曲线可以看出:加载阶段出现压实阶段,随后快速增加进入弹性变形阶段;随后逐渐弯曲,偏离直线段,到达峰值点;峰值阶段后曲线逐渐下降,并趋于一个值后稳定,

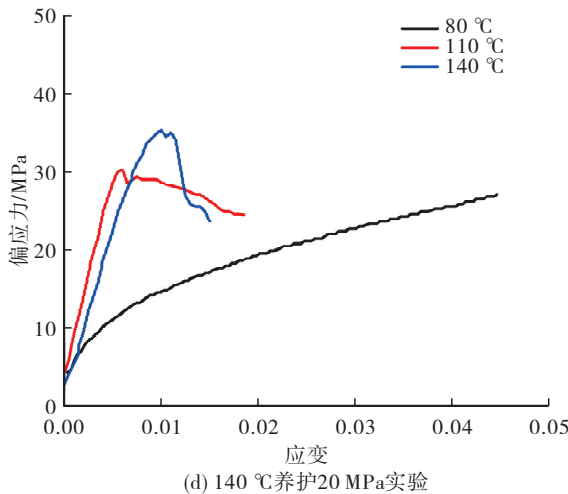
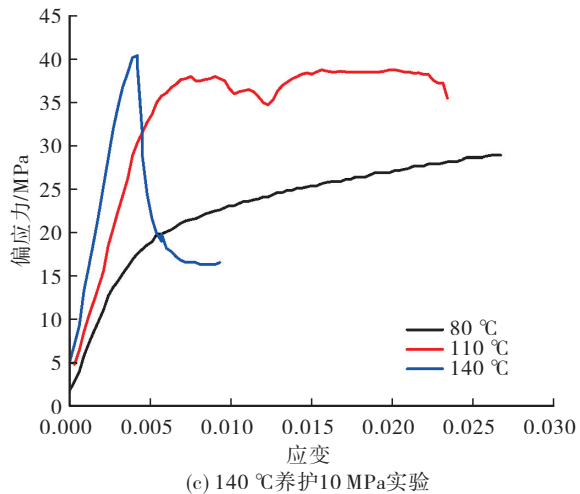
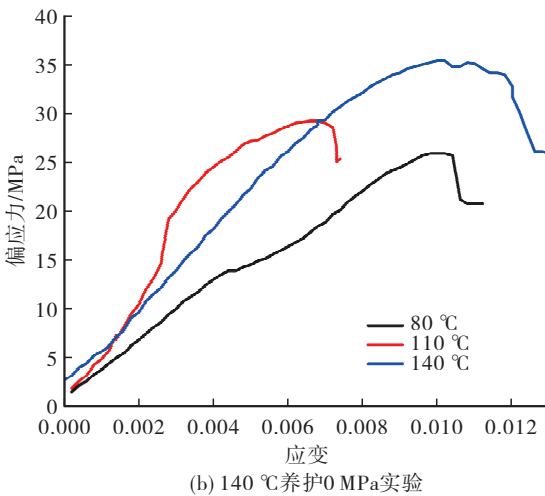
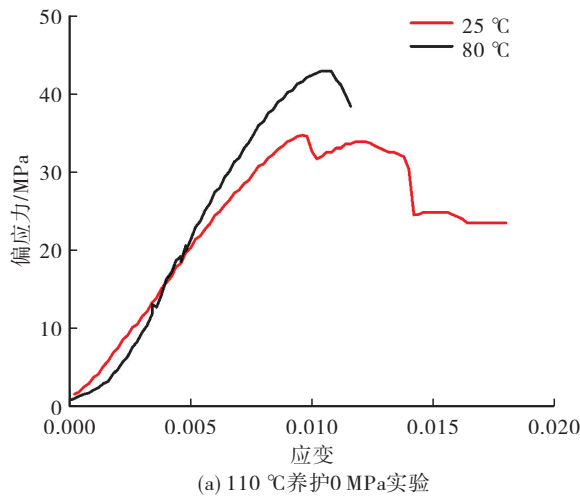


图7 不同试验温度下固井水泥石应力-应变曲线  
Fig. 7 Stress-strain curves of set cement at different testing temperatures

试样存在残余强度。试样应力-应变曲线为准突发失稳形式,试样破裂形式为脆性单面剪切破坏,整个过程表现出较强的脆性特征。80℃实验时,可以看出压实阶段相较于25℃实验而言,压实阶段更明显,弹性阶段弹性模量要明显大于25℃实验时,且到达峰值后下降过程更快速。实验破坏模式为突发式失稳,试样破裂形式也为脆性单面剪切,且破坏是伴随着低沉的破裂声,整个过程脆性特征表现得更为明显。

图7(c)为140℃养护条件下,10 MPa时的应力-应变曲线图。可以看出,140℃养护的试样,在80℃实验时,应力-应变曲线表现为:经过小段弹性增长阶段后逐渐弯曲进入屈服阶段,曲线表现为明显的渐进式破坏形式,水泥石塑性特征明显。110℃实验时,相较于80℃实验而言,曲线上升阶段更陡峭,峰值应力更高,到达应力峰值以后,曲线趋于平缓,曲线表现为渐进失稳,破裂形式为单面剪切破坏,试样仍表现出较强的塑性。140℃实验时,相较于110℃而言,曲线上升更陡峭,峰值应力更高,到达峰值以后,曲线快速下降,曲线失稳模式为突发失稳,破裂形式为剪切破坏和劈裂破坏结合形式。

图8为0 MPa、10 MPa、20 MPa围压条件下固井水泥石峰值应力随实验温度变化的分布曲线。由图8可见,养护温度和围压条件下试样峰值应力的变化趋势存在一定差异,但总体上,实验温度升高有利于提高固井水泥石的承载能力,且当实验温度接近其养护温度时,水泥石峰值应力通常表现较好。在0 MPa围压下,25℃实验时,80℃、110℃、140℃养护试样的峰值应力分别为39.10 MPa、34.81 MPa和18.06 MPa;80℃实验时,三类试样峰值应力分别为44.77 MPa、43.29 MPa和25.94 MPa;110℃实验时,110℃和140℃

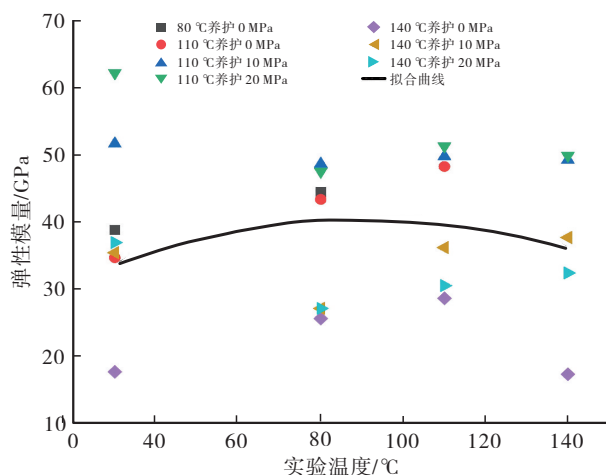


图8 实验温度对固井水泥石峰值应力的影响

Fig. 8 Effects of testing temperature on the peak stress of well cement

养护试样峰值应力分别为48.45 MPa和29.03 MPa;140℃实验时,140℃养护试样峰值应力为37.62 MPa。10 MPa和20 MPa围压下,峰值应力随实验温度变化呈现一定的非单调特征,部分试样表现为先减小后增大,说明实验温度对水泥石强度的影响受养护温度和围压共同调控。

图9为0 MPa、10 MPa、20 MPa下不同养护温度下固井水泥石弹性模量随实验温度变化趋势图。由图9可见,在不同实验温度下,固井水泥石弹性模量的变化趋势与峰值应力变化趋势基本一致。以图中140℃养护10 MPa围压试样为例,弹性模量随实验温度升高整体呈增大趋势:25℃实验时约为1.5 GPa,80℃实验时增至约3.3 GPa,110℃实验时约为3.8 GPa,140℃实验时进一步增至约4.9 GPa。这表明在该养护制度下,较高实验温度有助于提高水泥石抵抗弹性变形的能力。上述现象与试样养护温度和实验温度之间的热应力匹配有关。水泥石在特定养护温度下形成的骨架、孔隙结构及初始缺陷与其养护温度密切相关;当实验温度接近养护温度时,试样内部热变形不协调程度较低,微裂隙扩展受到一定抑制,水泥石骨架的传力条件相对较好,因此峰值应力和弹性模量较高。当实验温度与养护温度差异较大时,不同组分间的热膨胀差异引起局部应力集中,促进微裂隙扩展,从而降低承载能力。

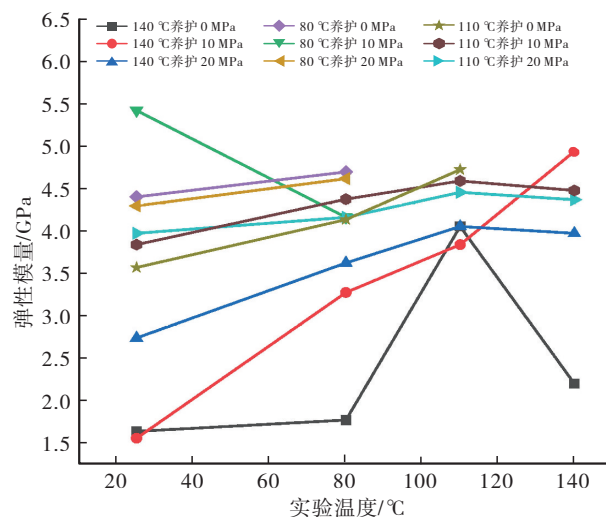


图9 实验温度对固井水泥石弹性模量的影响

Fig. 9 Effects of testing temperature on the elastic modulus of well cement

## 2.3 实验围压

图10为不同围压、养护温度及实验温度耦合条件下固井水泥石的应力-应变曲线。其中,图10(a)、(b)分别对应140℃养护条件下,实验温度为110℃和140℃时的两组试样,两组曲线的演化趋势具有一致

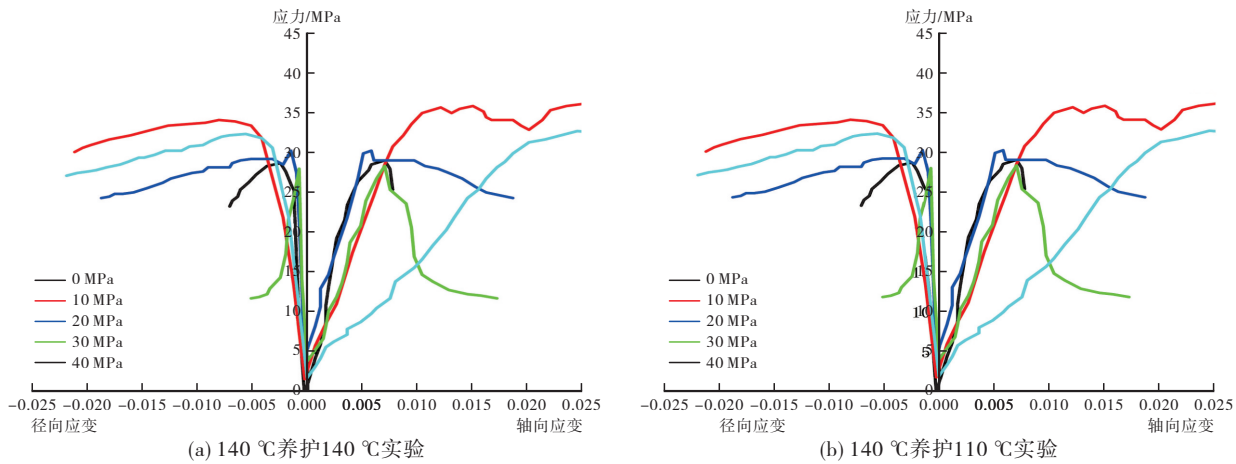


图10 不同实验条件下不同养护温度试样应力应变曲线图

Fig. 10 Stress-strain curves of cement set at different curing temperatures under different testing conditions

性。以140 °C养护、140 °C实验的实样为例[图10(b)],试样在围压作用下,峰值应力呈现先增大再缓慢增大再急剧增大的三阶段变化趋势。在第一阶段峰值应力增大过程中,试样的弹性模量显著提升,峰值应变变化幅度较小,应力-应变曲线仍保持突发失稳特征,破坏形式则由单缝剪切破坏转变为剪切-劈裂复合破坏模式。

图11为不同养护温度与实验温度耦合条件下,固井水泥石弹性模量随围压的演化分布。由图11可以看出,实验围压对不同养护制度下固井水泥石弹性模量的影响规律存在明显差异。以140 °C养护、140 °C实验条件为例,在低围压区间内,水泥石弹性模量保持较高水平,该变化规律与峰值应力演化的第一阶段相对应,表明此阶段水泥石抵抗弹性变形的能力较强,仍表现出显著的脆性特征。随着围压进一步增大,弹性模量均出现不同程度的降低,试样抗弹性变

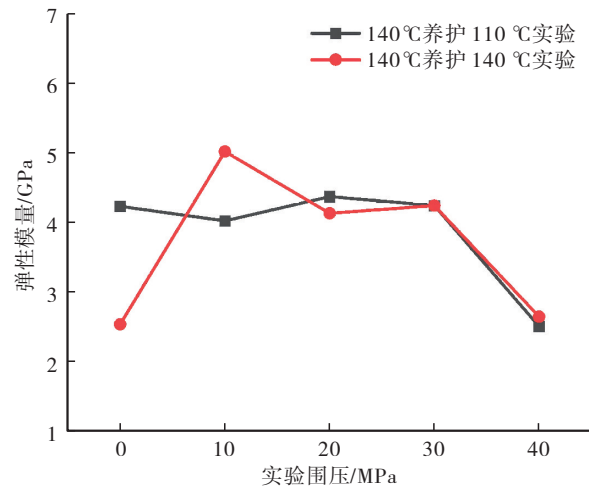


图11 实验围压对固井水泥石弹性模量的影响

Fig. 11 Effects of testing confining pressure on the elastic modulus of well cement

形能力随之减弱,说明围压作用可促使固井水泥石的力学特性由脆性向塑性逐步转变。

图12展示了不同养护温度、不同围压条件下固井水泥石的峰值应力演化规律。结果表明,围压作用对各养护温度下固井水泥石峰值应力的影响趋势基本一致,整体可划分为三个特征阶段:围压升高初期,峰值应力以较快速率显著增大;围压进一步提升,峰值应力的增长速率明显减缓;围压持续增大,峰值应力继续上升,且该阶段的增长速率介于第一阶段与第二阶段之间。

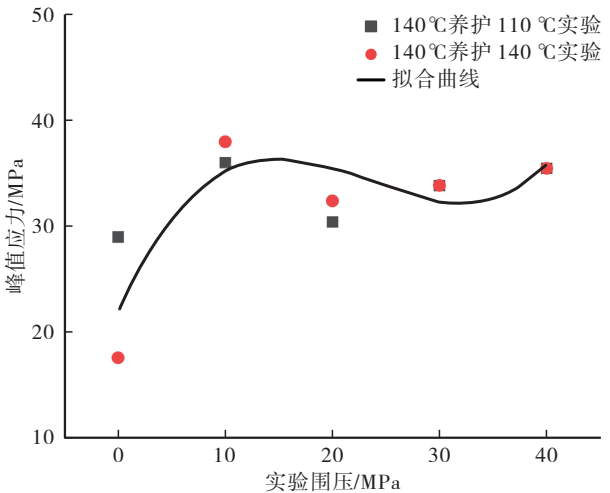


图12 实验围压对固井水泥石峰值应力的影响

Fig. 12 Effects of testing confining pressure on the peak stress of well cement

## 2.4 温压耦合作用分析

综合峰值应力、弹性模量和破坏模式的变化规律可知,温压条件对水泥石力学性能的影响具有明显交互性。养护温度和养护压力主要控制试样初始孔隙结构及骨架,实验温度改变加载过程中的热应力状态,围压则通过限制径向变形和裂隙张开影响峰后承

载行为。

在养护阶段,常压升温易导致孔隙扩展和连通,而21.7 MPa压力约束可抑制孔隙发育并提高结构致密性,说明压力条件会改变温度对微观结构的作用效果。该结果与CT观察结果一致,即高温常压试样孔隙缺陷更发育,而高温高压试样整体结构更致密。在加载阶段,养护温度与实验温度的匹配关系对强度和刚度具有重要影响。当实验温度接近养护温度时,试样所处热状态与其形成环境接近,热变形不协调程度降低,微裂隙张开受到抑制,因而峰值应力和弹性模量表现较优。温差增大时,水化产物、未水化颗粒及孔隙结构之间的热变形差异更易引起局部应力集中,力学性能相应降低。

围压进一步调节温度作用下的破坏响应。低围压条件下,温度变化引起的微裂隙扩展更容易反映到抗压强度和弹性模量变化中;高围压条件下,裂隙闭合作用和径向约束增强,试样峰后承载能力提高,破坏模式逐渐由劈裂或剪切型脆性破坏向剪切-塑性复合破坏转变。因此,本文所称温压耦合作用并非单因素效应的简单叠加,而是养护结构、热状态和围压约束共同作用的结果。

### 3 结论

1)养护温度对水泥石力学性能具有显著影响。随着养护温度升高,水泥石峰值应力与弹性模量呈下降趋势,110℃为性能劣化的关键转折点。

2)养护压力对水泥石微观结构与力学性能具有调控作用。高压养护可显著减少内部孔隙数量,提升结构致密性与均质性,增强水泥石的力学稳定性。

3)实验温度对水泥石力学响应具有双重影响。在本文实验范围内,水泥石在其养护温度附近实验时,峰值应力和弹性模量相对较高,该现象与试样形成温度和加载温度之间的热应力匹配有关。实验温度的升高总体有助于提升弹性模量与强度,但其作用效果受养护温度和围压条件共同影响。

4)围压对水泥石力学性能具有强化作用。随着围压增加,水泥石峰值应力呈三阶段增长趋势,弹性模量先升后降,破坏模式由脆性向塑性转变,体现出围压对水泥石韧性的提升作用。温度与围压共同影响裂隙闭合、扩展及峰后承载行为,表现出一定的温压耦合效应。

### 参考文献

[1]于永金,夏修建,王治国,等.深井、超深井固井关键技术进展及实践[J].新疆石油天然气,2023,19(2):24-33.

YU Yongjin, XIA Xiujian, WANG Zhiguo, et al. Progress and application of the key technologies of deep and ultra-deep well cementing[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023, 19(2): 24-33.

[2]陈亮,刘灵,戴勇,等.准噶尔盆地吉木萨尔致密油水平井固井技术探讨[J].新疆石油天然气,2015,11(2):40-43.

CHEN Liang, LIU Ling, DAI Yong, et al. Research on well cementing technology for horizontal well of Jimusaer tight oil field in Junggar Basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015, 11(2): 40-43.

[3]BRANKO L, VESNA K, DUŠAN D. Casing cementing in difficult geological conditions[J]. Podzemni Radovi, 2015, 2015(27):65-74.

[4]丁士东,陆沛青,郭印同,等.复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性研究进展与展望[J].石油钻探技术,2023,51(4):104-113.

DING Shidong, LU Peiqing, GUO Yintong, et al. Progress and prospect on the study of full life cycle sealing integrity of cement sheath in complex environments[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 104-113.

[5]周仕明,陆沛青.井筒密封完整性监测与智能感知技术进展与展望[J].石油钻探技术,2024,52(5):35-41.

ZHOU Shiming, LU Peiqing. Advancements and prospects of monitoring and intelligent perception technology for wellbore sealing integrity[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5): 35-41.

[6]杨健.固井水泥石力学特征及水泥水化放热特性研究[J].中国新技术新产品,2026,(3):94-96.

YANG Jian. Study on mechanical characteristics of well cement and heat release characteristics of cement hydration[J]. New Technologies & New Products of China, 2026, (3): 94-96.

[7]刘霖松,屈刚,汪瑶,等.大温差固井用温度响应型早强剂的研制与应用[J].天然气工业,2025,45(11):168-177.

LIU Linsong, QU Gang, WANG Yao, et al. Temperature-responsive early strength agents for well cementing with large temperature differences: development and application[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(11): 168-177.

[8]李扬,庞学玉,郭胜来,等.预固化条件对加砂固井水泥高温性能演变规律研究[J/OL].石油与天然气化工,(2025-11-11)[2026-03-13].<https://link.cnki.net/wrlid/51.1210.te.20251111.1333.002>.

LI Yang, PANG Xueyu, GUO Shenglai, et al. Study on the influence of pre-curing conditions on the high-temperature performance evolution of silica-enriched cement[J/OL]. Chemical Engineering of Oil & Gas, (2025-11-11)[2026-03-13]. <https://link.cnki.net/wrlid/51.1210.te.20251111.1333.002>.

[9]初永涛,刘奎,蒋新立,等.循环载荷对高温环境水泥石微观结构及力学性能的影响[J].石油钻探技术,2025,53(4):55-64.

CHU Yongtao, LIU Kui, JIANG Xinli, et al. Effect of cyclic

- loading on mechanical properties and microstructure of cement stone in high-temperature environments [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2025, 53(4): 55-64.
- [10] 庞学玉,李海龙,黄贤斌,等. 高温高压下固井水泥石力学行为及其关键影响因素[J]. *材料导报*, 2025, 39(12): 83-89.
- PANG Xueyu, LI Hailong, HUANG Xianbin, et al. Mechanical behaviors of well cement under high temperature and high pressure conditions and the crucial influencing factors [J]. *Materials Reports*, 2025, 39(12): 83-89.
- [11] 庞学玉,秦建鲲,王治国,等. 深层超高温水泥浆体配方及其强度衰退机理[J]. *天然气工业*, 2023, 43(7): 90-100.
- PANG Xueyu, QIN Jiankun, WANG Zhiguo, et al. Formula of cementing slurry system for ultra-high temperature conditions of deep wells and its strength retrogression mechanism [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(7): 90-100.
- [12] 丁建新,席岩,蒋记伟,等. 高温及超高温下水泥石力学及孔渗特性变化规律[J]. *钻井液与完井液*, 2022, 39(6): 754-760.
- DING Jianxin, XI Yan, JIANG Jiwei, et al. Changes of mechanics and characteristics of porosity and permeability of set cement at high and ultra-high temperatures [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2022, 39(6): 754-760.
- [13] 杨威,丁嘉迪,山永林. 油井水泥石力学性能随加载速率和时间变化的试验研究[J]. *当代化工研究*, 2022, (7): 34-36.
- YANG Wei, DING Jiadi, SHAN Yonglin. Experimental study on the mechanical properties' relation of oil well cement with loading rate and curing time [J]. *Modern Chemical Research*, 2022, (7): 34-36.
- [14] LI X, WANG Y, XIAO J, et al. Research on the characteristics of aluminate cement stone under ultra-high temperature environment [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, 3048(1): 012156.
- [15] ZHANG X, LI J, LIAN W, et al. Study on the sealing integrity of cement sheath under cyclic internal pressure considering temperature effects [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, 249: 213761.
- [16] NEVES V A, LIMA N V, LIMA N I, et al. The influence of  $H_2S$  and  $CO_2$  on the triaxial behavior of Class G cement paste under elevated temperature and pressure [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 240: 213084.
- [17] ZHANG Y, XU M, SONG J, et al. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with  $CO_2$  corrosion in ultra-high-temperature acid gas wells [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 323: 125879.
- [18] ZHOU N, DENG K, LIN Y, et al. Damage behavior and constitutive model of cement sheath under alternating temperature [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, 252: 213945.
- [19] 马疆,苏洪生,徐新纽,等. 准噶尔盆地南缘深井、超深井超高温超高密度水泥浆体系研究及应用[J]. *新疆石油天然气*, 2021, 17(3): 18-24.
- MA Jiang, SU Hongsheng, XU Xinniu, et al. Study and application of ultra-high temperature and ultra-high density cement slurry system in deep and ultra-deep wells at southern margin of Junggar Basin [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2021, 17(3): 18-24.
- [20] 王典,李军,张伟,等. 吉木萨尔页岩油井水泥环性能评价[J]. *新疆石油天然气*, 2023, 19(4): 49-55.
- WANG Dian, LI Jun, ZHANG Wei, et al. Performance evaluation of the cement sheath in Jimsar shale oil wells [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2023, 19(4): 49-55.
- [21] 刘书杰,武治强,吴怡,等. 深水深井高温高压水泥石固养护及制备方法研究[J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(3): 291-296.
- LIU Shujie, WU Zhiqiang, WU Yi, et al. Research on solidification conservation and preparation method of high-temperature and high-pressure set cement for deep wells in deep water [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(3): 291-296.
- [22] 武治强,吴怡,岳家平,等. 超高温条件下热稳定剂对水泥环完整性影响研究[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2021, 23(5): 48-52.
- WU Zhiqiang, WU Yi, YUE Jiaping, et al. Study on the effect of heat stabilizer on the integrity of cement sheath under ultra-high temperature [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2021, 23(5): 48-52.
- [23] 武治强,岳家平,吴怡,等. 超高温高压井固井水泥石养护方法及力学性能研究[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2021, 23(4): 71-76.
- WU Zhiqiang, YUE Jiaping, WU Yi, et al. Study on curing method and mechanical properties of cement stone for ultra high temperature and high pressure well cementing [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 2021, 23(4): 71-76.

(修改回稿日期:2026-05-17 编辑:张国红)