

灯影组白云岩高温后单轴力学特性及本构模型研究

周忠鸣^{1,2}, 陈军海^{1,2}, 李丹丹^{1,2}, 孙倩倩^{1,2}, 贾延军³, 江嘉俊⁴

(1. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 2. 中石化超深井钻井工程技术重点实验室, 北京 102206;
3. 德州联合石油科技股份有限公司, 山东 德州 253073; 4. 中原油田分公司天然气产销厂, 河南 濮阳 457000)

摘要:四川灯影组已成为中石化在四川盆地天然气增储上产、提升国家能源安全保障力度的重要层系。由于对超深层高温灯影组白云岩力学特性认识尚不清楚,常导致白云岩井壁失稳问题。通过开展25(室温)、100、150、180、200和220℃条件下白云岩的单轴抗压强度实验,揭示了白云岩单轴力学强度特征和变形特征。灯影组白云岩在一定温度范围内(100~220℃)将随着温度升高而表现出明显的脆性增强,认为这是灯影组白云岩峰值强度随温度升高而降低的原因。基于应变等效原理,建立了高温后灯影组白云岩损伤变形本构模型。对比研究表明:由本构模型绘出的应力-应变曲线与实验实测曲线对比,模型结果与实际情况吻合较好,模型能够充分反映不同温度下的灯影组白云岩损伤过程;该模型能够很准确地表征白云岩在不同温度下其强度参数和变形参数,可以为井筒稳定性分析提供更科学、更严格的模型,提高了重点区域超深一特深复杂地层地质认识及钻完井复杂故障防控能力。

关键词:灯影组;白云岩;超深层高温地层;单轴力学特性;本构模型

中图分类号:TE21;P634.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)06-0059-08

Study on uniaxial mechanical properties and constitutive model of Dengying Formation dolomite after high temperature

ZHOU Zhongming^{1,2}, CHEN Junhai^{1,2}, LI Dandan^{1,2}, SUN Qianqian^{1,2}, JIA Yanjun³, JIANG Jiajun⁴

(1. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing 102206, China;

2. SINOPEC Key Laboratory of Ultra Deep Well Drilling Engineering Technology, Beijing 102206, China;

3. Dezhou United Petroleum Technology Corp., Dezhou Shandong 253073, China;

4. The Natural Gas Production and Sales Plant of Zhongyuan Oilfield Company, Puyang Henan 457000, China)

Abstract: Dengying Formation stratum has become an important stratum for Sinopec to increase natural gas storage and production in Sichuan Basin and improve national energy security. Due to unclear understanding of the mechanical properties of dolomite in the ultra-deep high-temperature Dengying Formation, it often leads to instability of the dolomite wellbore. By conducting uniaxial compressive strength experiments of dolomite at 25°C (room temperature), 100°C, 150°C, 180°C, 200°C, and 220°C, the uniaxial mechanical strength and deformation characteristics of dolomite were revealed. The dolomite in the Dengying Formation will exhibit significant brittleness enhancement with increasing temperature within a certain temperature range (100~220°C), which is believed to be the reason why the peak strength of the dolomite in the Dengying Formation decreases with increasing temperature. Based on the strain Equivalence principle, the damage deformation constitutive model of dolomite in Dengying Formation after high temperature is established. The comparative study shows that: (1) The stress-strain curve drawn by the constitutive model is in good agreement with the experimental curve, and the model can fully reflect the damage process of dolomite in Dengying Formation at different temperatures; (2) This model can accurately characterize the strength and deformation

收稿日期:2024-02-23; 修回日期:2024-06-05 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.06.007

基金项目:中石化科技部基础前瞻项目“超高温高压碳酸盐岩地层岩石力学特性表征方法”(编号:P23038)

第一作者:周忠鸣,男,汉族,1990年生,助理研究员,地质工程专业,博士,主要从事石油工程岩石力学相关研究工作,北京市昌平区沙河镇百沙路197号,zhouzhm62054.sripe@sinopec.com。

引用格式:周忠鸣,陈军海,李丹丹,等.灯影组白云岩高温后单轴力学特性及本构模型研究[J].钻探工程,2024,51(6):59-66.

ZHOU Zhongming, CHEN Junhai, LI Dandan, et al. Study on uniaxial mechanical properties and constitutive model of Dengying Formation dolomite after high temperature[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 59-66.

parameters of dolomite at different temperatures, providing a more scientific and rigorous model for wellbore stability analysis, and improving the geological understanding of ultra-deep to ultra-deep complex formations in key areas and the ability to prevent and control complex faults during drilling and completion.

Key words: Dengying Formation; dolomite; ultra-deep high-temperature stratum; uniaxial mechanical properties; constitutive model

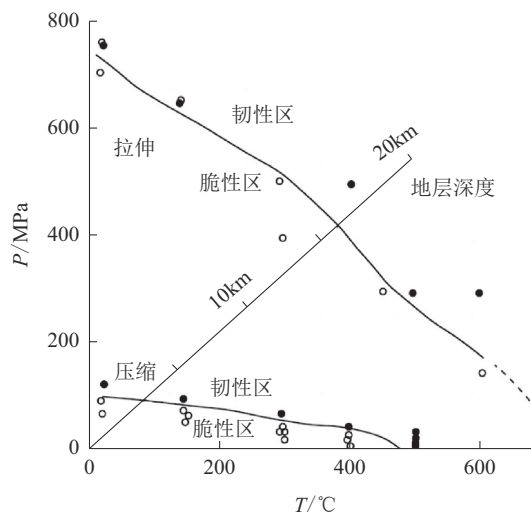
0 引言

四川盆地超深层油气资源丰富,是中国石化油气勘探开发的重点区域。多年来,中国石化通过对四川盆地超深层油气持续勘探评价,对震旦系灯影组地层有了新发现,在普光、元坝和川西等地先后发现深层海相碳酸盐岩大气田。目前,该地区已成为中石化增加天然气产量、增强国家能源安全的重要一环。四川盆地震旦系灯影组地层主要由硬脆性白云岩组成,其埋藏深,地质条件复杂,温度超过 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。在早期的勘探和钻井实践中,井壁失稳问题突出^[2-3]。川深1井在8400 m处钻遇灯影组地层,井径扩大率约 $15\%\sim 18\%$,发生埋钻后进行了侧钻。枫1井在钻至7725 m灯影组地层时,井下掉块增多,井径扩大率约为 $20\%\sim 30\%$,部分井段甚至达到 57.85% ,形成“大肚子”井眼,并造成多次憋钻。由于处理井壁垮塌引起的卡钻和埋眼需要较多时间,明显增大了钻井周期。同时,恶劣的井壁垮塌也可导致被迫提前完钻,严重威胁钻井工程安全。经统计分析,钻遇灯影组地层时,井壁垮塌造成的井下事故占非生产时效的 50% 以上^[4]。超深硬脆性白云岩井壁失稳是引起超深层油气钻探过程频繁卡钻的关键难题^[5]。

岩石的强度特性直接决定井壁的承载力,岩石的应力状态是研究井壁稳定性的基础^[6]。截至2022年底,普光气田中深度超6000 m的井有45口,元坝气田深度超7000 m井有58口,川西气田深度超6000 m井有18口。岩石物理力学特性受到超深地层所带来的超高温高应力作用产生了显著变化,这是判断超深层地层、井周稳定性的重要依据^[7-8]。超深层油气储层受到高应力场和变化的温度场的共同影响^[9-10]。温度场既可以影响岩石的物理力学性质,温差又可以引起热应力问题。此外,超深层储层中地应力使岩石硬度增加,塑性增强^[11]。在超深层钻进过程中,钻遇的岩石在上覆地层压力、液柱压力和构造应力三者合力下,表现出岩石的硬度增加和塑性增大,岩石从脆性破坏转变为塑性

破坏^[12-13]。

Heard^[14]研究了在拉伸和压缩试验中灰岩脆韧性过渡与温度及围压的关系(图1)。从图1中可以看出,随着岩石处于深层和超深层地层中,岩石的主要破坏形式出现由脆性破裂向韧性流动的转变现象。



(据文献[14]修改。其中,地热梯度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,上覆地层压力梯度为 $24\text{ MPa}/\text{km}$,应变速率为 $2\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$)

图1 灰岩在拉伸和压缩实验中随温度及围压变化下的脆韧性过渡图

Fig.1 Brittle toughness transition diagram of limestone under temperature and confining pressure changes in tensile and compression experiments

国内外大量研究表明^[15-17],高温提高了岩石矿物晶间的活化性能,促进了岩石矿物晶体的塑性,从而导致岩石强度降低。受限于室内实验条件限制,实时高温高压岩石力学实验较难实现,大量学者通过观测高温后岩石的力学参数和微观结构以评价高温后岩石物理力学特性^[18-22]。通过上述方式,花岗岩、砂岩、大理岩、灰岩等不同类型岩石随不同高温条件下的岩石微观组构、力学参数和变形参数变化得到了较为充分的研究^[23]。当热处理温

度高于某一温度值后(一般高于 300 °C),岩石的力学特性发生急剧变化:宏观上,主要表现在峰值强度和杨氏模量大幅降低,峰值应变增加^[24-26];微观上,岩石内部孔隙及裂隙萌生沟通,渗透率提升,甚至矿物组分也会相应变化^[27-29]。

目前鲜有学者开展高温后四川震旦系灯影组白云岩力学特性研究,对超深层高温高应力灯影组白云岩力学特性认识尚不清楚。特别是前人普遍认为高温后岩石强度峰值应变是增加的,这与超深层白云岩井壁发生脆性失稳现象相悖。以上制约着四川盆地超深层油气勘探开发进程,不利于钻井工程提速增效。本文通过对不同高温处理后的白云岩进行常规单轴压缩试验,研究灯影组白云岩应力-应变曲线,白云岩强度参数和变形参数随温度的变化规律;岩石本构模型是岩石力学研究的重要组成部分,采用Lemaitre提出的应变等价性原理,建立白云岩在单轴压缩条件下具有明确的物理意义的损伤本构模型,为井筒稳定性分析提供更科学、更严格的模型,提高重点区域超深—特深复杂地层地质认识及钻完井复杂故障防控能力。

1 实验方法及设备

1.1 实验设备

本次实验加热设备采用LH-9245A型电热恒温干燥箱,温度测量精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,加热速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,最高加热温度为 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本次单轴压缩实验采用TerraTek岩石力学三轴应力测试系统(图2),该设备最大承载能力 2700 kN ,最高模拟温度 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高围压 140 MPa ,最大模拟孔隙压力 100 MPa ,最高模拟井深 10000 m ,可以开展单轴、围压条件下的抗压测试、蠕变实验、DSA测试、残余强度测试、岩石渗透率测试等。

1.2 取样与试样准备

本次实验所用岩心取自四川省广元市的灯影组白云岩露头。图3为灯影组白云岩露头取样现场。在实验室完成岩心制备($\text{O}25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$)。经X射线衍射仪(XRD)扫描得知,白云岩露头中 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 的含量达到了99.9%以上。岩样的密度范围为 $2.70\sim 2.84\text{ g}/\text{cm}^3$,均值为 $2.76\text{ g}/\text{cm}^3$;岩样的P波波速范围为 $5105\sim 6832\text{ m}/\text{s}$,均值为 $6141\text{ m}/\text{s}$ 。岩心整体均质性较好,可以忽略岩样缝洞、胶结物对岩石力学参数测试的影响。为排除岩样含水对



图2 TerraTek岩石力学三轴应力测试系统
Fig.2 TerraTek rock mechanics triaxial stress testing system

实验结果造成的影响,将加工制备好的岩样放置在恒温干燥箱中,在 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境进行 48 h 烘干处理。



图3 灯影组白云岩露头取样现场
Fig.3 Sampling site of Dengying Formation dolomite outcrop

针对超深层温度环境,采用LH-9245A型电热恒温干燥箱对白云岩进行高温处理,温度分别设为 25 (室温)、 100 、 150 、 180 、 200 和 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率设为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。前人研究指出岩心在预设温度保温超过 2 h 便使岩样内部温度和其表面温度接近^[30],因此,炉内温度达到目标温度需恒温 2 h ,然后关闭电源直至试样在炉内自然冷却至室温。冷却后的岩心分别按照《单轴抗压强度测定及软化系数计算方法》(GB/T 23561.7—2009)进行白云岩单轴力学特性测试,每个温度点测试样品不少于2组。

2 实验结果分析

2.1 白云岩单轴力学强度特征分析

通过TerraTek岩石力学三轴应力测试系统分别得到 25 (室温)、 100 、 150 、 180 、 200 和 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下白云岩的单轴抗压峰值强度,取各个温度点所对应峰值强度的平均值后绘制白云岩单轴抗压峰值

强度随温度的变化关系图(图4)。由图4可知,白云岩单轴抗压峰值强度随温度的升高逐步弱化,二者之间满足一元三次方程关系($R^2=0.8515$):

$$\sigma_c = 2 \times 10^{-5} T^3 - 0.0086 T^2 + 0.5056 T + 216.58 \quad (1)$$

式中: σ_c ——白云岩的单轴抗压峰值强度,MPa; T ——温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

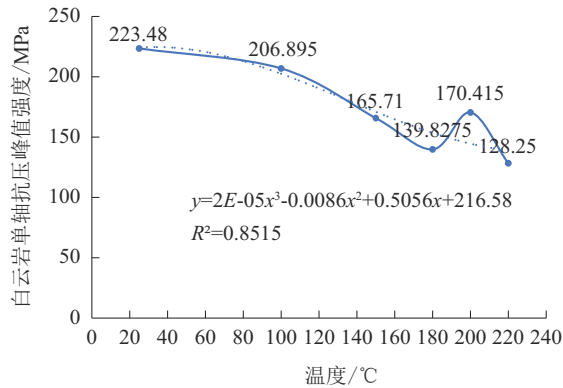


图4 灯影组单轴抗压峰值强度随温度的变化关系

Fig.4 Relationship between the peak uniaxial compressive strength of the Dengying Formation and temperature variation

白云岩在一定温度范围内(25~220 $^{\circ}\text{C}$)单轴抗压峰值强度随温度的升高逐步弱化,该岩石类型的峰值强度特征与前人所做花岗岩、大理岩、砂岩等岩石的强度变化特征明显不同,其原因值得探究。

2.2 白云岩单轴变形特征分析

为了研究 25(室温)、100、150、180、200 和 220 $^{\circ}\text{C}$ 条件下白云岩的单轴抗压峰值应变随温度的变化关系,取各个温度点所对应峰值应变的平均值后绘制白云岩单轴抗压峰值应变随温度的变化关系图(图5)。由图5可知,白云岩单轴抗压峰值应变在温度 $>100^{\circ}\text{C}$ 后,随温度的升高而降低,二者之间满足一元三次方程关系($R^2=0.7826$):

$$\varepsilon_c = 2 \times 10^{-10} T^3 - 10^{-7} T^2 + 10^{-5} T + 0.0032 \quad (2)$$

式中: ε_c ——白云岩的单轴抗压峰值应变; T ——温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

此外,为了后续建立高温后白云岩损伤变形本构模型,灯影组单轴抗压初始弹性模量随温度的变化关系图也得到了绘制(图6)。白云岩初始弹性模量 E_0 随温度 T 的响应关系为:

$$E_0 = 0.0051 T^3 - 1.7992 T^2 + 132.34 T + 27293 \quad (3)$$

式中: E_0 ——白云岩初始弹性模量; T ——温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

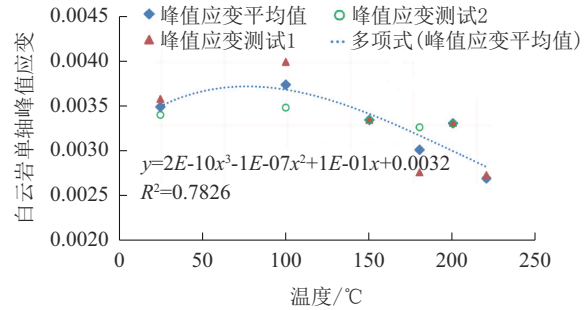


图5 灯影组单轴抗压峰值应变随温度的变化关系

Fig.5 Relationship between uniaxial compressive peak strain and temperature in the Dengying Formation

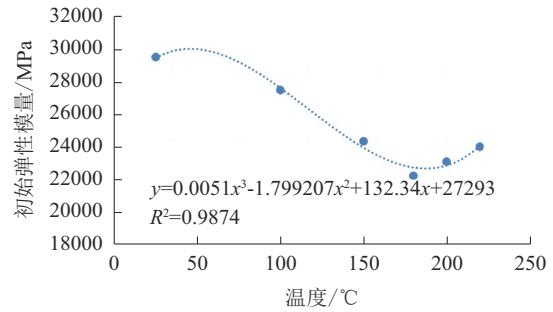


图6 灯影组单轴抗压初始弹性模量随温度的变化关系

Fig.6 Relationship between the initial elastic modulus of uniaxial compression and temperature in the Dengying Formation

从实验结果可以得知,当温度超过100 $^{\circ}\text{C}$ 时,白云岩单轴抗压峰值应变随温度升高而降低,即白云岩在一定温度范围内(100~220 $^{\circ}\text{C}$)将随着温度升高而表现出明显的脆性增强。正是由于白云岩高温后峰值变形减小的特征增加了井壁瞬时崩塌风险。

3 高温后白云岩损伤变形本构模型

通过统计平均法建立岩石细观损伤规律与宏观损伤规律之间的关系,可以反映岩石的宏观力学性质。细观统计损伤力学建立了细观损伤和宏观损伤之间的联系,统计理论在其中起到纽带作用。统计损伤中的“损伤”是指岩石中含有具有直观的几何形状的各种孔洞和微裂纹,由于损伤的存在降低了材料承受载荷的能力,从而弱化了岩石的力学性能。

1971年,Lemaitre提出了应变等效原理(图7),该原理不仅考虑了岩石的损伤因素,而且所建立的

本构关系并不太复杂。这一原理避免了对每个缺陷和损伤机制进行微观分析。Lemaitre 等效原理是指有效应力在无缺陷材料上产生的应变与名义应力在有缺陷材料上形成的应变相同^[31-32],即:

$$\epsilon^* = \epsilon \quad (4)$$

式中: ϵ^* ——无缺陷材料产生的应变; ϵ ——含缺陷材料产生的应变。

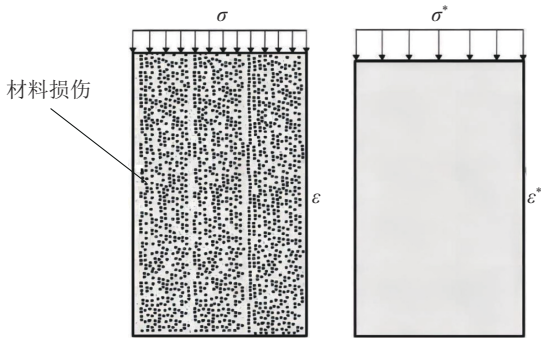


图7 Lemaitre应变等价性原理示意

Fig.7 Schematic diagram of Lemaitre strain equivalence principle

作用在含缺陷材料和理想无缺陷材料上的所受的载荷 F 是一样的。无缺陷材料的有效应力为:

$$\sigma^* = F / [S(1 - D)] \quad (5)$$

式中: S ——材料的横截面积。

作用在缺陷材料上的名义应力为:

$$\sigma = F / S \quad (6)$$

联立式(5)和式(6)得:

$$\sigma = \sigma^*(1 - D) \quad (7)$$

弹脆性损伤材料的本构关系可表示为:

$$\sigma = E(1 - D)\epsilon \quad (8)$$

式中: σ ——材料加载时的轴向应力; D ——损伤变量; E ——材料弹性模量常数。

假设白云岩损伤变量与轴向应变的演化方程形式可表述为一元二次方程:

$$D = a\epsilon^2 + b\epsilon + c \quad (9)$$

式中: a, b, c ——拟合常数。

$$\sigma = \left[\frac{-2.368 \times 10^{-5} T^3 + 0.01144256 T^2 - 0.587712 T - 345.8224}{(2 \times 10^{-10} T^3 - 10^{-7} T^2 + 10^{-5} T + 0.0032)^3} \right] \epsilon^3 + \left[\frac{2.736 \times 10^{-5} T^3 - 0.01428512 T^2 + 0.669824 T + 475.0648}{(2 \times 10^{-10} T^3 - 10^{-7} T^2 + 10^{-5} T + 0.0032)^2} \right] \epsilon^2 + (0.0051 T^3 - 1.7992 T^2 + 132.34 T + 272.93) \epsilon \quad (16)$$

将式(9)代入式(8)并化简,可得损伤本构模型表达式为:

$$\sigma = A\epsilon^3 + B\epsilon^2 + C\epsilon \quad (10)$$

式中: A, B, C ——待定常数。

对式(10)中的 ϵ 进行微分,可得白云岩加载过程中的切线模量:

$$E(\epsilon) = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = 3A\epsilon^2 + 2B\epsilon + C \quad (11)$$

当 $\epsilon = 0$ 时,通过式(11),可获得白云岩的初始切线模量:

$$E_0 = C \quad (12)$$

当加载应力达到峰值强度点时,应力和应变分别为 σ_c 和 ϵ_c ,此时应力-应变曲线达到极限点,切线模量为0,分别由式(10)和式(11)可得:

$$\begin{cases} \sigma_c = A\epsilon_c^3 + B\epsilon_c^2 + C\epsilon_c \\ E(\epsilon_c) = 3A\epsilon_c^2 + 2B\epsilon_c + C = 0 \end{cases} \quad (13)$$

联立式(12)和式(13)可以得出待定参数 A, B, C 的表示式:

$$\begin{cases} A = \frac{E_0}{\epsilon_c^2} - \frac{2\sigma_c}{\epsilon_c^3} \\ B = \frac{3\sigma_c}{\epsilon_c^2} - \frac{2E_0}{\epsilon_c} \\ C = E_0 \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可见,损伤本构模型中的待定参数具有明确的物理意义,基于此,式(9)可改写为:

$$\sigma = \left(\frac{E_0}{\epsilon_c^2} - \frac{2\sigma_c}{\epsilon_c^3} \right) \epsilon^3 + \left(\frac{3\sigma_c}{\epsilon_c^2} - \frac{2E_0}{\epsilon_c} \right) \epsilon^2 + E_0 \epsilon \quad (15)$$

上式(15)即为白云岩在单轴压缩条件下的损伤本构模型,待定物理量分别为初始切线模量 E_0 、峰值强度 σ_c 和峰值应变 ϵ_c 。

将白云岩单轴峰值强度 σ_c 随温度 T 的响应关系式(1)、白云岩单轴峰值应变 ϵ_c 随温度 T 的响应关系式(2)以及白云岩初始弹性模量 E_0 随温度 T 的响应关系式(3)代入式(15),整理可得高温后灯影组白云岩损伤变形本构模型:

为了验证本文提出的高温后灯影组白云岩损伤变形本构模型的准确性,对比室内白云岩单轴压缩实验实测的变形曲线进行分析。首先,根据实验数据,计算获取各岩样的初始切线模量;其次,分别统计各试样的峰值强度和峰值应变;最后,代入式(16)高温后灯影组白云岩损伤变形本构模型获得计算曲线,比较实验测试曲线和模型计算曲线(图8)。

由图8可知,模型计算结果和实验实测结果吻

合较好,表明高温后灯影组白云岩损伤变形本构模型可较好地描述灯影组白云岩岩样在单轴压缩条件下的压密阶段、弹塑性变形阶段和峰后破坏阶段,可以很准确地表征白云岩在不同温度下其强度参数和变形参数。高温后灯影组白云岩损伤变形本构模型的提出可以为井筒稳定性分析提供更科学、更严格的模型,提高了重点区域超深—特深复杂地层地质认识及钻完井复杂故障防控能力。

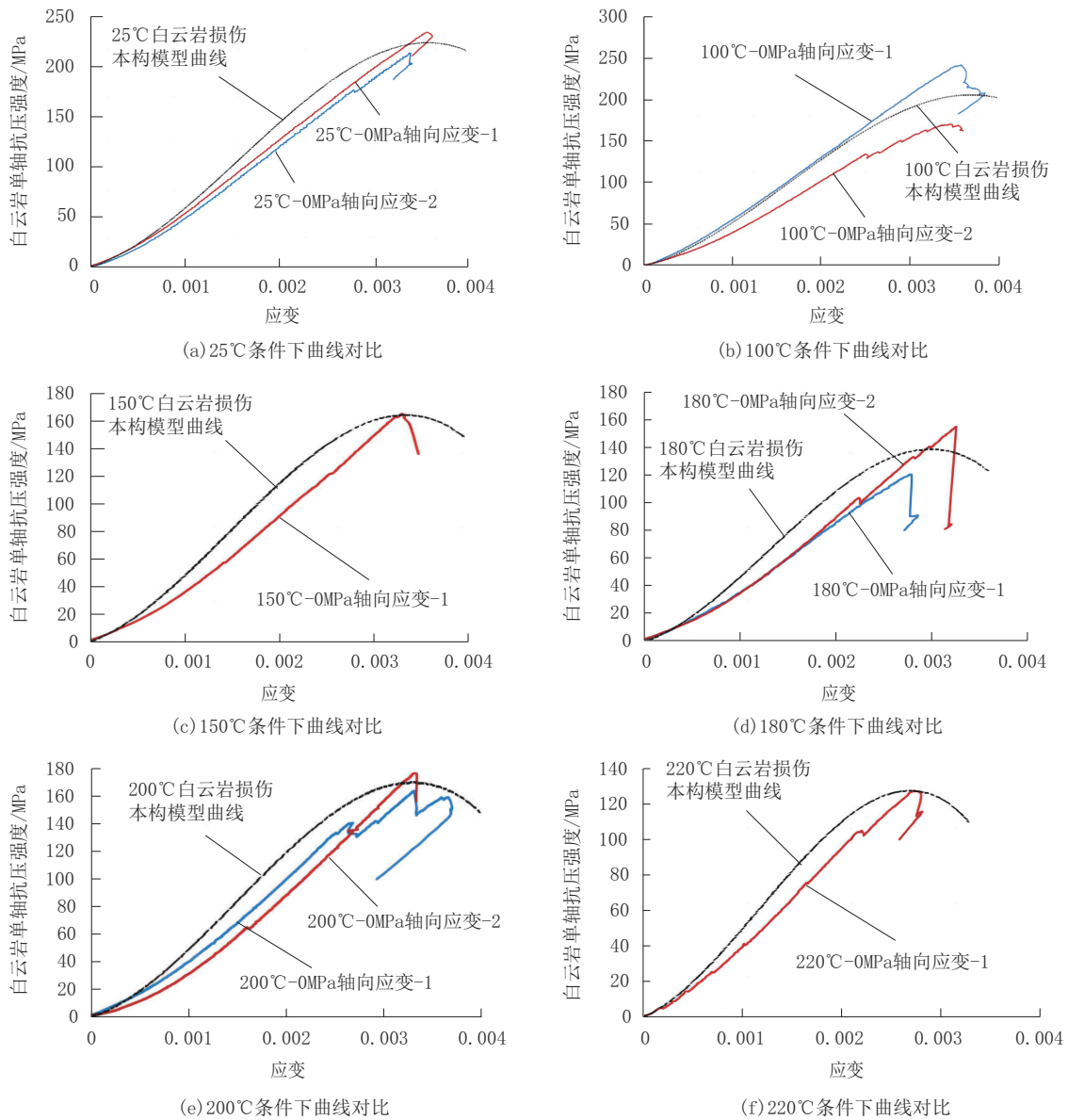


图8 不同温度条件下灯影组白云岩单轴抗压实验测试曲线和模型计算曲线对比

Fig.8 Comparison of uniaxial compressive test curves and model calculation curves of Dengying Formation dolomite under different temperature conditions

4 结论

(1)灯影组白云岩在一定温度范围内(25~220℃)单轴抗压峰值强度随温度的升高逐步弱化,其满足一元三次方程关系: $\sigma_c = 2 \times 10^{-5} T^3 - 0.0086 T^2 + 0.5056 T + 216.58$ 。

(2)单轴压缩条件下,灯影组白云岩在一定温度范围内(100~220℃)将随着温度升高而表现出明显的脆性增强,二者之间满足一元三次方程关系: $\epsilon_c = 2 \times 10^{-10} T^3 - 10^{-7} T^2 + 10^{-5} T + 0.0032$,这解释了灯影组白云岩的峰值强度弱化的原因。正是白云岩高温后峰值变形降低的特征增加了井壁瞬时崩塌风险。

(3)基于应变等效原理,建立了高温后白云岩损伤变形本构模型。该模型能够很准确地表征灯影组白云岩在不同温度下其强度参数和变形参数,可以为井筒稳定性分析提供更科学、更严格的模型,提高了重点区域超深—特深复杂地层地质认识及钻完井复杂故障防控能力。

参考文献(References):

- [1] 王江珊.川中地区深层古压力演化及温压耦合关系分析[D].北京:中国石油大学(北京),2019.
WANG Jiangshan. Analysis of deep paleopressure evolution and temperature pressure coupling relationship in the Central Sichuan Region[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [2] 郭旭升,胡东风,黄仁春,等.四川盆地深层—超深层天然气勘探进展与展望[J].天然气工业,2020,40(5):1-14.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Renchun, et al. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5): 1-14.
- [3] 曾义金.中国石化深层超深层油气井固井技术新进展与发展建议[J].石油钻探技术,2023,51(4):66-73.
ZENG Yijin. Novel Advancements and development suggestions of cementing technologies for deep and ultra-deep wells of Sinopec [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 66-73.
- [4] 陈思齐.川中震旦系灯影组地层井壁稳定技术研究[D].成都:西南石油大学,2019.
CHEN Siqi. Study on the wellbore stability technology of Sinian Dengying Fm in Chuanshan area[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [5] 叶金龙,沈建文,吴玉君,等.川深1井超深井钻井提速关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(3):121-126.
YE Jinlong, SHEN Jianwen, WU Yujun, et al. Key techniques of drilling penetration rate improvement in ultra-deep Well Chuanshen-1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 121-126.

- [6] 郭印同,陈军海,杨春和,等.川东北深井剖面碳酸盐岩力学参数分布特征研究[J].岩土力学,2012(S1):161-169.
GUO Yintong, CHEN Junhai, YANG Chunhe, et al. Distribution characteristics of rock mechanical parameters for deep drilling sections of carbonate rock in Northeast Sichuan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012(S1):161-169.
- [7] 李杰,马超,王金焕,等.水作用下页岩物理力学性质实验研究进展[J].工程地质学报,2019,27(S1):439-445.
LI Jie, MA Chao, WANG Jinhuan, et al. Experimental studies on physical and mechanical properties of shale affected by water: a review [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(S1): 439-445.
- [8] 席境阳.基于有限元法的井底应力场随井底压差变化规律研究[J].钻探工程,2021,48(5):60-68.
XI Jingyang. Study on the variation law of bottom hole stress field with bottom hole pressure difference based on finite element method [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 60-68.
- [9] 王大勋,刘洪,韩松,等.深部岩石力学与深井钻井技术研究[J].钻采工艺,2006(3):6-10.
WANG Daxun, LIU Hong, HAN Song, et al. Deep rock mechanics and deep or ultra-deep well drilling technology [J]. Drilling & Production Technology, 2006(3):6-10.
- [10] 郑君,樊涛,窦斌,等.二氧化碳爆破储层改造近炮孔处岩石性质变化及温度分布规律研究[J].钻探工程,2022,49(3):13-22.
ZHENG Jun, FAN Tao, DOU Bin, et al. Rock property change and temperature distribution near blasting holes in carbon dioxide blasting reservoir treatment [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 13-22.
- [11] 谭锐锋,张强,战启帅,等.干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究[J].钻探工程,2023,50(4):110-117.
TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, et al. Study on Rock Mechanical Properties of hot-dry Rock Reservoirs under high temperature [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 110-117.
- [12] 田云英.川西地区钻井地质特征的测井研究[D].成都:西南石油大学,2007.
TIAN Yunying. Logging study on drilling geological characteristics in the western Sichuan region [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2007.
- [13] 宋晓东.大庆深井岩石性质和可钻性研究[D].大庆:大庆石油学院,2008.
SONG Xiaodong. Research on deep rock mechanics and rock drillability of daqing [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008.
- [14] Heard H C. Chapter 7: Transition from Brittle Fracture to Ductile Flow in Solenhofen Limestone as a function of temperature, confining pressure, and interstitial fluid pressure [J]. Mem. Geol. Soc. Amer, 1960, 79: 193-226. DOI: 10.1130/MEM79-p193.
- [15] Shimada M. Lithosphere strength inferred from fracture strength of rocks at high confining pressures and temperatures [J]. Tectonophysics, 1993.
- [16] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):91-99.

- ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in research on mechanics behavior of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. *Advances in Mechanics*, 2005,35(1):91-99.
- [17] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. *煤炭学报*, 2019,44(5):1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019,44(5):1283-1305.
- [18] 徐小丽, 高峰, 高亚楠, 等. 高温后花岗岩力学性质变化及结构效应研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2008,37(3):402-406.
XU Xiaoli, GAO Feng, GAO Yanan, et al. Effect of high temperatures on the mechanical characteristics and crystal structure of granite[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008,37(3):402-406.
- [19] Ding Q L, Ju F, Mao X B, et al. Experimental investigation of the mechanical behavior in unloading conditions of sandstone after high-temperature treatment[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016,49(7):2641-2653.
- [20] Liu S, Xu J. Study on dynamic characteristics of marble under impact loading and high temperature[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013,62:51-8.
- [21] Wei S J, Yang Y H, Su C D, et al. Experimental study of the effect of high temperature on the mechanical properties of coarse sandstone[J]. *Applied Sciences*, 2019,9(12):2424.
- [22] Róžański A, Róžańska A, Sobótka M, et al. Identification of changes in mechanical properties of sandstone subjected to high temperature: meso- and micro-scale testing and analysis[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021,21(1):28.
- [23] 谢晋勇, 陈占清, 吴疆宇. 循环高温-快速冷却处理后的花岗岩力学特性及声发射响应特征[J]. *工程地质学报*, 2021,29(2):508-515.
XIE Jinyong, CHEN Zhanqing, WU Jiangyu. Mechanical properties and acoustic emission response of granite after treatment of cyclic high temperature and rapid cooling[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021,29(2):508-515.
- [24] Sirdesai, Ninad Nikhil, Trilok Nath Singh, et al. Thermal alterations in the poro-mechanical characteristic of an Indian sandstone—A comparative study[J]. *Engineering Geology*, 2017,226:208-220.
- [25] 于鑫, 李皋, 陈泽, 等. 川西须家河组致密砂岩高温后的物理力学特征参数试验研究[J]. *地质力学学报*, 2021,27(1):1-9.
YU Xin, LI Gao, CHEN Ze, et al. Experimental study on physical and mechanical characteristics of tight sandstones in the Xujiahe Formation in western Sichuan after high-temperature exposure[J]. *Journal of Geomechanics*, 2021,27(1):1-9.
- [26] Deng L Ch, Li X Z, Wang Y C, et al. Effect of temperature on macroscopic and microscopic properties of sandstone from Qidong coal mine[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022,55(1):71-90.
- [27] 郑达, 巨能攀. 千枚岩岩石微观破裂机理与断裂特征研究[J]. *工程地质学报*, 2011,19(3):317-322.
ZHENG Da, JU Nengpan. Scanning electronic microscope tests for rock micro-fracture mechanism and fracture characteristic of phyllite[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011,19(3):317-322.
- [28] Xu T, Zhou G L, Heap M J, et al. The influence of temperature on time-dependent deformation and failure in granite: a mesoscale modeling approach[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017,50:2345-2364.
- [29] 李邵军, 匡智浩, 邱士利, 等. 岩石脆性评价方法研究进展及适应性探讨[J]. *工程地质学报*, 2022,30(1):59-70.
LI Shaojun, KUANG Zhihao, QIU Shili, et al. Review of rock brittleness evaluation methods and discussion on their adaptabilities[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022,30(1):59-70.
- [30] 马阳升. 实时高温作用下岩石力学特性实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
MA Yangsheng. Experimental study on rocks mechanical properties under real-time hightemperature [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [31] 李育. 考虑宏细观缺陷的页岩损伤本构模型研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
LI Yu. Study on damage constitutive model of shale considering macroscopic and mesoscopic defects[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [32] Duan Y T, Li X, Zheng B, et al. Cracking evolution and failure characteristics of Longmaxi shale under uniaxial compression using real-time computed tomography scanning[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019,52:3003-3015.

(编辑 荐华)