

深层高温页岩统计损伤本构模型及脆性评价方法

龚武镇¹, 时 贤¹, 黄维安¹, 赵福豪¹, 蒋 恕², 翟 成³, 黄贤斌¹, Ahmad Ramezanzadeh⁴

1. 中国石油大学（华东）石油工程学院, 山东 青岛 266580

2. 中国地质大学（武汉）构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074

3. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116

4. 沙赫鲁德理工大学 采矿石油与地球物理工程学院, 伊朗 沙赫鲁德

摘要: 深层高温页岩统计损伤本构模型及脆性评价是推动深层页岩油气高效勘探开发的关键研究课题。以川南五峰组页岩为研究对象, 通过 XRD、SEM 及高温三轴压缩实验, 系统研究温度-围压耦合作用下其微观组构、力学特性、损伤演化规律及脆性特征。结合应力-应变过程引入热损伤变量, 首次建立基于幂函数分布与 Mogi-Coulomb 准则的统计损伤本构模型, 给出模型参数计算解析式, 并基于损伤演化率提出一种能够描述温度-围压作用下新的脆性评价方法。结果表明: 川南五峰组页岩石英平均含量为 68.49%, 属于典型硬脆性页岩; 温度升高会诱发热裂纹并劣化力学性能; 岩样峰值强度与弹性模量均与围压呈正相关性, 与温度呈负相关性; 围压增加, 岩样复合型裂纹破坏特征逐步向以单一剪切裂纹为主的破坏模式转变, 且整体倾向于剪切破坏; 所提出本构模型能够较准确地模拟不同温度-围压下试样各阶段应力-应变曲线, 且精准描述试样峰值强度与峰值应变; 损伤演化率与围压呈负相关性, 即该模型能准确刻画围压升高对试样损伤发展的抑制过程; 新的脆性指数在室温和高温条件下均随围压增加而降低, 且相同围压下温度升高岩石脆性指数减小, 验证了该指标的合理性, 研究结果丰富了岩石脆性评价方法。

关键词: 损伤演化; 本构模型; 脆性; 深层页岩; 力学特性; 高温

中图分类号: TU45

收稿日期: 2025-12-27

Statistical damage constitutive model and brittleness evaluation method for deep high-temperature shale

GONG Wuzhen¹, SHI Xian¹, HUANG Weian¹, ZHAO Fuhao¹, JIANG Shu², ZHAI Cheng³, HUANG Xianbin¹, Ahmad Ramezanzadeh⁴

1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China

3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

4. Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract: The statistical damage constitutive model and brittleness evaluation for deep high-temperature shales represent key research topics for advancing efficient exploration and development of deep shale oil and gas. Taking

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52374026, 52374027); 山东省自然科学基金项目 (ZR2024ME125); 国家科技重大专项 (2025ZD1404101)

作者简介: 龚武镇 (1998—), 男, 在读博士, 从事岩土工程、井壁稳定、压裂等方面的研究. E-mail: gwz13409692063@163.com, ORCID: 0009-0005-3554-8679.

***通信作者:** 时贤 (1984—), 男, 教授, 博士, 从事多尺度岩石力学表征、地质力学建模、非常规地质工程一体化压裂设计、井壁失稳、大数据石油工程应用等方面的研究. E-mail: xianshiupc@126.com, ORCID: 0000-0002-6109-0594.

the Wufeng Formation shales in southern Sichuan as the study subject, this research systematically investigates their microstructure, mechanical properties, damage evolution patterns, and brittleness characteristics under coupled temperature-confining pressure effects through XRD, SEM, and high-temperature triaxial compression experiments. Integrating thermal damage variables into the stress-strain process, this study establishes the first statistical damage constitutive model based on power distribution and the Mogi-Coulomb criterion. Analytical expressions for model parameters are derived, and a novel brittleness evaluation method describing damage evolution rates under temperature-confining pressure interaction is proposed. Results indicate: The average quartz content in Wufeng Formation shale from southern Sichuan is 68.49%, classifying it as typical hard brittle shale; temperature increase induces thermal cracking and degrades mechanical properties; both peak strength and elastic modulus of rock specimens show positive correlation with confining pressure and negative correlation with temperature; As confining pressure increases, the composite crack failure characteristics of rock specimens gradually shift toward a failure mode dominated by single shear cracks, with an overall tendency toward shear failure. The proposed constitutive model accurately simulates the stress-strain curves of specimens at different temperature-confining pressure stages and precisely describes the peak strength and peak strain of specimens. The damage evolution rate exhibits a negative correlation with confining pressure, indicating that the model accurately captures the suppression of specimen damage progression by increasing confining pressure. The new brittleness index decreases with increasing confining pressure at both room and elevated temperatures. Furthermore, at the same confining pressure, the brittleness index decreases with increasing temperature, validating the rationality of this indicator. These findings enrich the methods for evaluating rock brittleness.

Key words: damage evolution; constitutive model; brittleness; deep shale; mechanical property; high temperature

0 引言

在能源安全和“双碳”目标的推动下,我国页岩气等非常规天然气藏开发极为迫切(胥勇等, 2025)。其中, 深层(埋深>3500 m)页岩气占总资源量 65%以上, 是未来勘探开发重点攻关对象。受益于水平井压裂技术的进步, 浅层(埋深<3500 m)页岩气已实现商业化生产(任岚等, 2023; Suo et al., 2024)。相比于浅层页岩, 深层页岩具有埋深大、应力强、温度高等特点, 使得压裂开发效果尚未达到预期(Suo et al., 2024; Lei, et al., 2024)。以四川盆地川东南某深层页岩气井为例, 该井最大钻探垂深达 6600 m, 地层最小水平主应力为 132 MPa, 地层温度高达 180°C(任岚等, 2023)。在此类高温高压地质条件下, 岩石塑性特征显著增强, 且高温作用会引发岩石力学性质劣化, 进而降低其承载能力与脆性特征。因此, 深层页岩的岩石力学表征必须充分考虑地层高温高压环境。通过系统揭示深层页岩高温力学响应及脆性演化规律, 可为钻井工程与体积压裂改造方案优化提供关键支撑, 具有重要的科学理论价值与工程应用意义。

目前, 大量学者从微观-宏观角度研究了不同温度-载荷作用下岩石在外部环境影响下的力学特征。

Kranz(1983)指出花岗岩中矿物的热膨胀导致加热过程中产生热应力, 诱导微热裂纹的形成。张志镇等(2010)从矿物角度分析高温对岩石微观结构影响, 研究表明岩石经高温处理后矿物边界率先产生晶界裂纹, 随着温度不断增加诱导矿物颗粒的穿晶裂纹。Mosaddegh et al.(2025)使用 XRD、XRF、SEM 和 CT 扫描方法检测和量化不同温度下岩石裂纹、分析裂纹区域并测量样品每个颗粒的应变。Huang et al. (2024)研究了高温高地应力条件下花岗岩破坏特征, 发现当温度达到 200°C 临界值时, 热效应会显著改变岩石破坏特征。Wang et al.(2022)研究不同温度下砂岩力学性质, 研究表明温度升高会加剧砂岩力学损伤。由上述分析可知, 不同温度与围压条件下的岩石宏观三轴力学试验结果具有显著的复杂性与离散性, 单纯依靠试验数据难以直接指导现场工程实践。通过建立贴合岩石破坏机制与应力响应特征的本构关系, 可精准刻画与定量描述岩石应力-应变演化规律, 搭建室内试验研究与现场工程应用之间的核心桥梁, 为压裂参数优化、井壁稳定性评价等工程决策提供可靠的理论依据与数据支撑。其中, 统计损伤本构模型能够直观精准刻画岩石损伤演化阶段中节理、构造面、微观-宏观裂隙等不连续面的发展规律, 且能有效表征岩石损伤过程中的力学作用机制(Liu et al., 2025)。李天斌等(2017)、蒋浩鹏等

(2021)和 Xu et al.(2018)分别假定岩石服从 Drucker-Prager、Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 准则,建立了岩石强度服从 Weibull 分布的热损伤统计本构模型。Chen 等(2024)基于连续介质损伤力学和 Mohr-Coulomb 准则,构建了不同损伤耦合特征的统计损伤本构模型。微元体强度准则的合理选取是构建岩石损伤本构模型的核心环节。当前常用准则主要包括 Mohr-Coulomb、Hoek-Brown 及 Drucker-Prager 准则,但其应用均存在明显局限:高应力条件下, Mohr-Coulomb 与 Hoek-Brown 准则对岩石破坏强度的预测精度显著降低,且未考虑中间主应力效应; Drucker-Prager 准则虽引入中间主应力项,但其屈服面与真实岩石变形特征存在偏差,理论预测偏于保守,降低了微元体强度表征的合理性(王洪涛等, 2022)。Mogi-Coulomb 准则可有效弥补上述缺陷,其参数与 Mohr-Coulomb 准则具有直接继承性,更适用于岩石统计损伤本构模型的建立(蒋邦友等, 2019)。高温环境下页岩内部颗粒分布不均,并发育大量微裂纹与裂隙,致使其强度呈现随机分布特征(温韬等, 2019; 蒋浩鹏等, 2021)。研究中常采用正态分布、幂函数分布及 Weibull 分布等统计函数描述其强度演化规律(魏超等, 2024)。其中,幂函数分布具备积分简便、参数数量少、均值与取值范围均大于零等优势,能够较好地契合页岩受压破坏的统计特性。

脆性作为刻画岩石破坏特征的关键参数,在甜点区优选、水力压裂裂缝起裂扩展研究中受到广泛关注(Guo et al., 2021; Zhang et al., 2025)。目前,岩石脆性方法主要可划分为:(1)矿物组分析法(冯少柯等, 2025);(2)力学参数法(Wang et al., 2015; 王团等, 2024);(3)强度参数法(Mohammadi et al., 2015; 胡清波等, 2020);(4)应力-应变曲线及能量演化法(周辉等, 2014; 温韬等, 2021; 丁然等, 2024)。矿物组分析法的脆性指标存在两方面局限:一是难以有效捕捉应力环境对该指标的动态影响,二是忽略了成岩作用的影响。力学参数法的脆性评价指标主要基于北美页岩的统计数据构建,未充分考虑区域差异性,导致该方法存在显著的地域适用性限制。强度参数法的脆性评价指标对脆性表征不敏感,常常随围压变化与实际相悖。应力-应变曲线能量法脆性评价指标可以有效揭示岩石在脆性破坏阶段的能量演变特征,被视作评估岩石脆性特性最为可靠的方法之一,但该方法应力-应变曲线下每一部分能量物理意义还存在诸多争议,对于各部分能量定义也各不相同。现有脆性评价指标虽种类繁多,但普遍存在

局限性。此外,当前虽然在岩石高温力学行为、损伤本构模型与脆性评价方面已取得大量成果,但多将损伤演化与脆性特征割裂研究,缺乏有机结合的系统工作,一定程度上制约了模型的工程应用价值。因此,基于损伤本构模型构建脆性评价方法,不仅对完善岩石脆性评价理论体系,同时对现场应用也具有重要价值。

为此,本文以川南五峰组页岩试样为研究对象,通过 XRD、SEM 及不同温度与围压条件下的三轴压缩试验,系统分析其矿物组分、微观结构、破坏形态及力学响应特征;同时,基于应变等效原理引入热损伤变量,假定岩石强度服从幂函数分布并采用 Mogi-Coulomb 强度准则,构建可表征深层高温页岩的统计损伤本构模型。在此基础上,结合岩体损伤演化全过程引入损伤演化率,提出一种新型深层页岩脆性指数计算方法,并依托试验结果对所建本构模型与脆性评价方法的合理性进行验证。

1 微观组构分析

川南地区上奥陶统五峰组与下伏临湘组平行不整合、上覆龙马溪组整合接触,厚度多在 4~6 m 之间。其中,岩性以黑色硅质页岩为主,顶部观音桥段发育灰质泥岩或介壳灰岩。沉积环境为深水陆棚还原环境,受赫南特冰期海平面变化控制明显。页岩有机质丰度高, TOC 普遍 2.0%~4.0%,处于高成熟—过成熟阶段,是川南页岩气重要产层。页岩微观组构岩样均取自川南五峰组,取心深度为 4120.12~4121.36 m,该区构造挤压背景强烈,且埋深大,整个区域地应力与地层温度较高,地层温度为 147.2~152.7℃,地层最小水平主应力为 96.39~106.53 MPa。

1.1 矿物组分分析

采用射线衍射法对取自川南五峰组岩心进行矿物组分分析测试,结果如图 1 所示。页岩以石英矿物为主,平均含量为 68.49%,发育少量粘土矿物,平均含量为 11.34%。其中,脆性矿物(石英、钾长石和斜长石)含量为 76.39%。通常,当岩石脆性矿物含量较高时,在外力作用下,外力功转化为耗散能效率较低,岩石在达到峰值强度时内部弹性能存储率越高,能为岩石的峰后破裂行为提供更多能量,提高峰后自主断裂能力和裂纹扩张能力,进而表现出更高的脆性水平;而粘土矿物属于塑性矿物,含量越高会加大页岩破坏时的能量损耗,降低岩石脆性水平。因此,矿物组分分析表明试样具有较强脆

性特征。

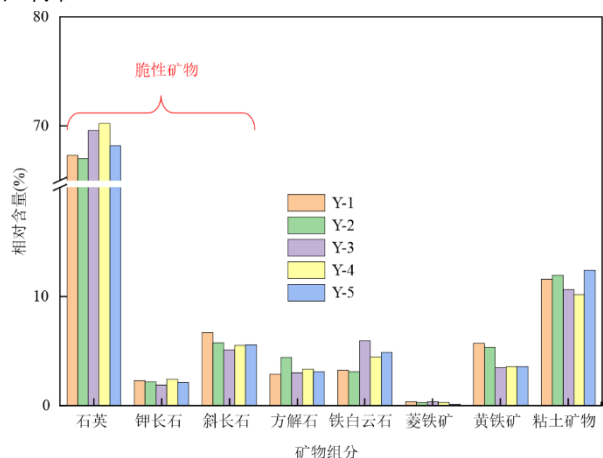


图 1 XRD 全岩矿物组分

Fig. 1 XRD whole rock mineral composition

1.2 微观结构分析

将制备试样采用高温箱式电阻炉进行高温处理，室温 25℃，加热温度设置为储层温度 150℃，开启

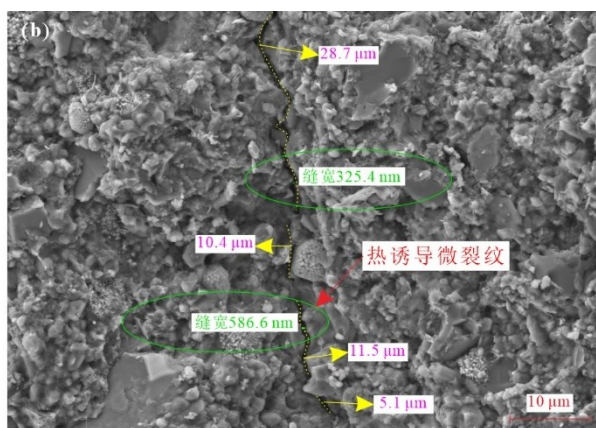
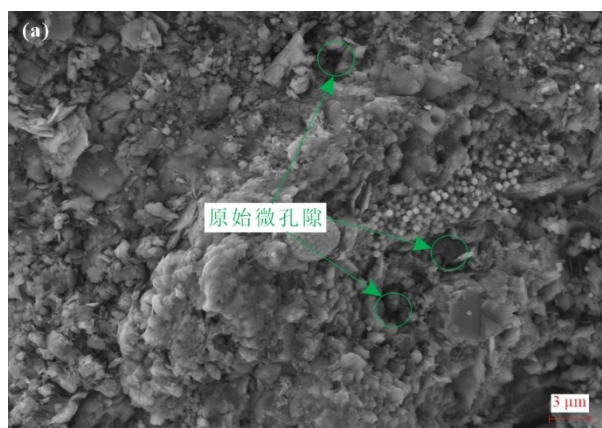


图 2 不同温度处理后岩样 SEM 图像 (a) 室温下 SEM 图像, (b) 高温(150℃)SEM 图像

Fig. 2 SEM image under different temperature (a) SEM image at room temperature, (b) SEM image at high temperature (150℃)

2 高温页岩力学特性分析

高温页岩力学特性试验与微观组构分析所用试样均取自同一岩心柱，采用线切割工艺沿垂直层理方向加工为直径 25 mm、高度 50 mm 的标准圆柱体岩样，加工误差控制在 0.5 mm 以内；同时对岩样两端面进行精细磨平处理，确保两端面不平行度小于 0.05 mm，端面与轴线夹角偏差小于 0.25°。采用中国石油大学（华东）深层油气全国重点实验室的 GCTS RTR-2000 高温三轴压缩仪（见图 3）开展岩石力学试验。GCTS RTR-2000 高温三轴压缩仪主要技术参数如下：轴向压力范围为 0~2000 kN，轴向加载频率为 10 Hz，加载架刚度为 10000 kN/mm，围压加载范围为 0~210 MPa，温度加载范围为

电源开始升到设置温度后再恒温 16 h，在炉内自然冷却至室温。为了直观观察岩样在高温作用前后的微观结构变化，本文采用扫描电子显微镜（SEM）对试样表面形貌进行测试。原始试样（如图 2a 所示）中可见大量微孔隙和少量裂隙，几乎没有微裂纹；内部矿物呈相对圆滑状态，颗粒之间连接紧密，未出现崩裂或破碎的迹象。岩样经高温处理后，由于不同矿物的热膨胀系数存在差异，岩石作为连续体必须在颗粒间形成约束。该约束在矿物交界处产生显著的结构热应力。与此同时，矿物内部原子具有更小的扩散能力，容易形成大量位错和空位(王刚等, 2024)，这些晶格缺陷使得颗粒交界处的黏结强度下降，原有的孔裂隙进一步发育、扩展，并在相邻孔隙的连通处形成热诱导裂纹。由图 2b 可知，150℃高温处理后，可见宽度为 325.4~566.6 nm，长度为 5.1~28.7 μm 的热诱导裂纹。因此，高温引起的热损伤削弱了岩石的完整性，导致其力学特征劣化。

0~200℃。目标温度为室温 25℃和高温 150℃（利用外置加热片，以 0.5℃/min 的加热速率对液压油进行加热，加热至目标试验温度 180℃时，为保证岩样受热均匀，恒温保持 2 h），以 0.001 mm/s 位移控制法连续加载直至试样破坏，记录应力-应变全过程。



图 3 GCTS RTR-2000 高温三轴压缩仪

Fig. 3 Triaxial compression experiment (GCTS RTR-2000)

2.1 试样破坏形态分析

图 4 和图 5 分别为不同围压常温和高温(150°C)条件下试样破坏形态。单轴压缩 ($\sigma_3=0$ MPa) 时, 轴向应力达到峰值后, 试样承载能力骤降, 且图 4 和图 5 结果显示试样呈拉伸型与剪切型破坏面同步形成。且单轴压缩试验中, 随着温度的升高, 试样张拉破坏占比增加。低围压条件下, 试样更易出现

较多的拉伸裂纹, 破坏形态更复杂, 裂纹分布广泛且不规则, 呈现多裂纹复合型破坏特征。随着围压升高, 破裂形态由复合型裂纹向单一剪切裂纹为主的模式转换, 岩石更倾向于发生剪切破坏。高温三轴作用下, 温度升高, 岩石破坏角增大, 破坏面由平滑状态逐渐趋于粗糙不平, 表明试样塑性特征增强。综上, 从试样破坏形态可得出, 单轴压缩岩石脆性更高, 围压和温度有效降低岩石脆性。

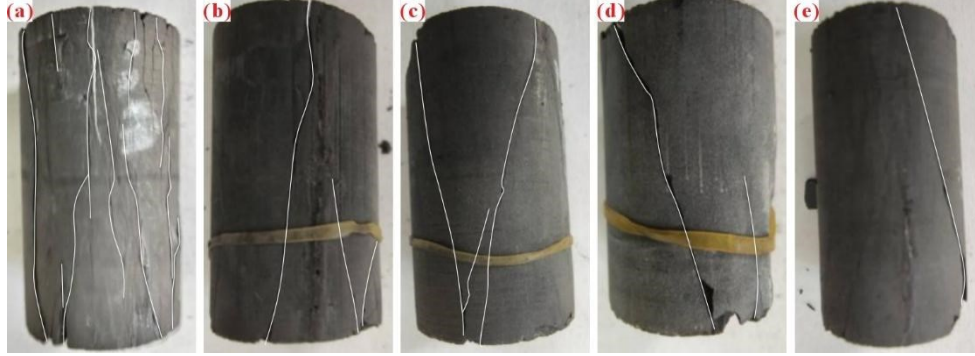


图 4 25°C不同围压试样破坏形态 (a)Y-1 $\sigma_3=0$ MPa, (b)Y-2 $\sigma_3=40$ MPa, (c)Y-3 $\sigma_3=60$ MPa, (d)Y-4 $\sigma_3=80$ MPa, (e)Y-5 $\sigma_3=100$ MPa

Fig.4 Failure types of rock samples for different confining pressure under 25°C (a)Y-1 $\sigma_3=0$ MPa, (b)Y-2 $\sigma_3=40$ MPa, (c)Y-3 $\sigma_3=60$ MPa, (d)Y-4 $\sigma_3=80$ MPa, (e)Y-5 $\sigma_3=100$ MPa



图 5 150°C不同围压试样破坏形态 (a)Y-6 $\sigma_3=0$ MPa, (b)Y-7 $\sigma_3=40$ MPa, (c)Y-8 $\sigma_3=60$ MPa, (d)Y-9 $\sigma_3=80$ MPa, (e)Y-10 $\sigma_3=100$ MPa

Fig.5 Failure types of rock samples for different confining pressure under 150°C (a)Y-6 $\sigma_3=0$ MPa, (b)Y-7 $\sigma_3=40$ MPa, (c)Y-8 $\sigma_3=60$ MPa, (d)Y-9 $\sigma_3=80$ MPa, (e)Y-10 $\sigma_3=100$ MPa

2.2 试样变形特征分析

图 6 为试样在常温及 150°C高温条件下应力-应变曲线, 不同温度/围压条件下, 应力-应变曲线可划分为四个主要阶段: 压密、线弹性、屈服以及残余变形。(1) 压密阶段, 其主要特征为试样内部微裂纹逐渐闭合。单轴压缩 ($\sigma_3=0$ MPa) 试样由 0°C增加到 150°C时, 试样压密阶段表现得更为显著, 这主要归因于温度升高导致岩石内部微裂纹密度增加。然而, 随着围压增大, 常温及 150°C高温条件下几乎观察不到试样压密阶段, 这主要是由于在围压作

用下, 尚未施加轴向应力, 试样内部的微裂纹已基本完成闭合过程。值得注意的是, 轴向应力-应变曲线相较于径向应力-应变曲线, 对内部裂隙引发的曲线形态变化具有更显著的响应特性, 能够更敏感地反映出因裂隙扩展导致的下凹特征。(2) 线弹性阶段, 应力-应变关系呈现显著的线性特征, 本文通过分析该阶段的应力-应变曲线数据, 测定了试样的弹性模量和泊松比。(3) 屈服阶段, 应力-应变曲线呈现出显著的下凹形态, 此时应变速率随着轴向应力增加而逐步加快, 反映了试样内部微裂纹在屈服阶

段的非稳态扩展过程，试样内部微裂纹持续萌生、扩展、交汇贯通且裂纹间摩擦作用显著增强，导致试样产生不可逆的塑性变形。（4）残余变形阶段，轴向应力逐渐达到试样残余强度，试样内部形成宏观断裂面。从图 6 还可以看出，高温三轴压缩岩样峰后应力跌落速率低于常温三轴压缩实验，表明温度增加，岩样延性增加，侧面反映了温度升高岩石脆性减弱。

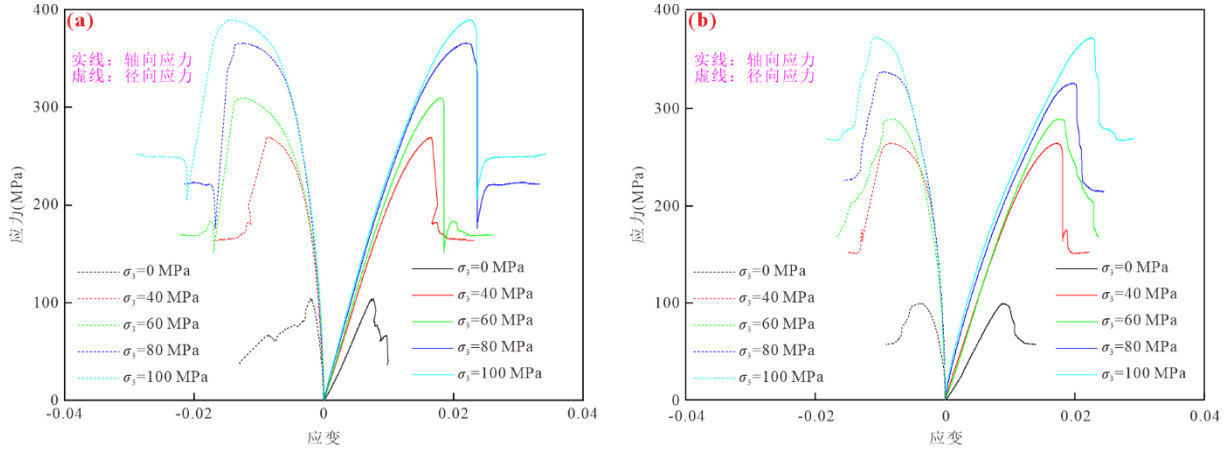


图 6 不同温度-围压下应力-应变曲线 (a)25°C试样应力-应变曲线, (b)150°C试样应力-应变曲线

Fig. 6 Curve of stress-strain under different temperature and confining pressure (a) Stress-strain curve of the specimen at 25°C, (b) Stress-strain curve of the specimen at 150°C

2.3 力学参数分析

通过观察发现在峰值强度为 35%~60%范围内数据点能保证试样处于应力-应变为直线段，弹性模量 E 和泊松比 μ 计算公式如下：

$$E = \frac{\sigma_{60\%} - \sigma_{35\%}}{\varepsilon_{a60\%} - \varepsilon_{a35\%}} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{r60\%} - \varepsilon_{r35\%}}{\varepsilon_{a60\%} - \varepsilon_{a35\%}} \quad (2)$$

式中： $\sigma_{60\%}$ 和 $\sigma_{35\%}$ 分别为 60%和 35%的峰值强度，MPa； $\varepsilon_{a60\%}$ 和 $\varepsilon_{a35\%}$ 分别为 60%和 35%峰值强度对应的轴向应变，无量纲； $\varepsilon_{r60\%}$ 和 $\varepsilon_{r35\%}$ 分别为 60%和 35%峰值强度对应的径向应变，无量纲。

图 7 和表 1 为不同温度-围压下力学参数结果。由图 7a 可知，围压 0、40、60、80 和 100 MPa 时，室温下峰值强度分别为 104.04、269.49、309.68、362.66 和 389.81 MPa；150°C 下峰值强度分别为 98.99、264.20、289.21、326.39 和 373.27 MPa。相对于围压为零，围压 40、60、80 和 100 MPa 时，室温下峰值强度分别增加了 1.59 倍（165.46 MPa）、1.98 倍（205.65 MPa）、2.51 倍（261.63 MPa）和 2.75 倍（285.77 MPa），150°C 下峰值强度分别增加

了 1.67 倍（165.21 MPa）、1.92 倍（190.22 MPa）、2.30 倍（227.40 MPa）和 2.77 倍（274.28 MPa）。在相同温度作用下，岩样的峰值强度与围压呈正相关性，围压越大，峰值强度越大，但峰值变化幅度逐渐减小，表明岩石逐渐从脆性向塑性过渡。围压 0、40、60、80 和 100 MPa 时，150°C 下峰值强度相对室温下峰值强度分别减小了 4.8%、1.96%、6.61%、10.7%和 4.24%，这表明高温条件下热损伤作用对岩石强度具有劣化效应。从图 7b 可知，试样弹性模量总体上随围压呈递增趋势，表明试样内部存在较多空隙，在围压作用下，空隙趋于闭合，试样整体刚度及弹性模量增大。同时，围压 0、40、60、80 和 100 MPa 时，150°C 下弹性模量相对室温下弹性模量分别减小了 10.7%、2.44%、4.67%、4.40%和 4.54%，这表明高温条件下热损伤作用诱导岩石产生新裂隙，降低岩石刚度，使得岩石弹性模量减小。从图 7c 可知，试样泊松比随温度/围压变化离散性较强。通过分析上述试验数据，试样峰值强度、弹性模量和泊松比等力学参数与围压及温度存在明确的量化关系，可为后续数值模拟提供重要的数据及理论支撑。

表 1 不同温度围压下试验数据

Table 1 Experiment data under different temperature and confining pressure

试样编号	温度/°C	围压/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	峰值强度/MPa	内摩擦角/°	粘聚力/MPa
Y-1	25	0	15639	0.25	104.04	38.34	25.19

Y-2	25	40	20398	0.32	269.50		
Y-3	25	60	22418	0.24	309.68		
Y-4	25	80	23647	0.26	365.66		
Y-5	25	100	23817	0.26	389.81		
Y-6	150	0	13965	0.36	98.99		
Y-7	150	40	20897	0.19	264.20		
Y-8	150	60	21371	0.21	289.21	40.88	23.17
Y-9	150	80	22608	0.22	326.39		
Y-10	150	100	22735	0.25	373.27		

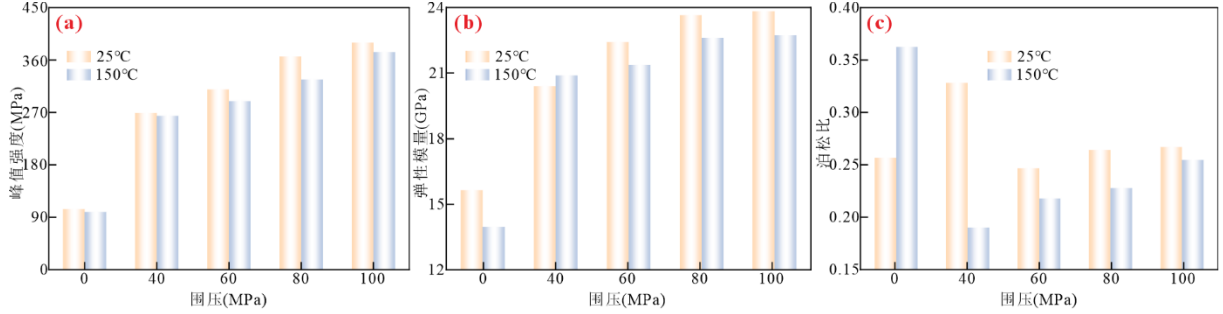


图 7 不同温度下平均力学参数 (a)峰值强度, (b)弹性模量, (c)泊松比

Fig. 7 Average mechanical parameters under different temperature (a) Peak strength, (b) Elastic modulus, (c) Poisson's ratio

3 深层高温页岩统计损伤本构模型

3.1 损伤变量及分布函数

深层页岩在高温长期作用下会持续劣化, 导致岩石损伤不断累积。这种热损伤主要是通过改变页岩内部结构来影响其力学参数。根据岩石宏观损伤力学理论, 热损伤可利用弹性模量法进行量化表征, 可表示为(蒋浩鹏等, 2021; Lv et al., 2025; 廖安杰等, 2025):

$$D_T = 1 - \frac{E_T}{E_0} \quad (3)$$

式中: D_T 为热损伤变量, 无量纲; E_0 为常温下(25°C)页岩弹性模量, GPa; E_T 为温度 T 作用下页岩弹性模量, GPa。

幂函数概率密度函数 $f(x)$ 表示为(游强和王军保, 2011; 魏超等, 2024):

$$f(x) = \frac{m(T)}{K(T)} \left(\frac{x}{K(T)} \right)^{m(T)-1} \quad (4)$$

幂函数 $f(x)$ 的分布函数 $F(x)$ 为:

$$F(x) = \left(\frac{x}{K(T)} \right)^{m(T)} \quad (5)$$

式中, $m(T)$ 和 $K(T)$ 为幂函数的分布参数, 无量纲; 两者会影响页岩微元体的形状和尺寸。考虑到温度对这两个参数的影响, 本文假定 $m(T)$ 和 $K(T)$ 的表达式分别为:

$$\begin{cases} m(T) = m_0 (1 - D_T) \\ K(T) = K_0 (1 - D_T) \end{cases} \quad (6)$$

式中, m_0 和 K_0 为常温下幂函数分布参数, 无量纲。

深层页岩试样本身赋存大量天然缺陷, 在三轴压缩荷载作用下, 缺陷裂隙将持续萌生、扩展、交汇并贯通, 最终引发试样整体失稳破坏, 此类损伤演化过程通常可采用统计损伤理论进行表征与描述(魏超等, 2024; 张亮等, 2025)。采用微元体表征受载荷损伤变量 D_M :

$$D_M = \frac{N_F}{N} \quad (7)$$

式中, N_F 和 N 分别为已破坏微元体数目和受荷作用前总微元体数目, 无量纲。

在细观尺度下, 页岩由非均匀随机分布的微观单元体构成。当单元体的强度值 $f(\sigma)$ 达到或超过特定临界阈值时, 这些微单元将相继发生破坏。此时, 破坏的微元体数量 N_F 可表示为:

$$N_F = \int_0^{f(\sigma)} N \cdot f(\sigma) d\sigma = N \int_0^{f(\sigma)} f(\sigma) d\sigma \quad (8)$$

式中：\$f(\sigma)\$为页岩应力值，MPa。

联立式(4)~(8)可得：

$$D_M = \left(\frac{f(\sigma)}{K(T)} \right)^{m(T)} \quad (9)$$

总损伤变量 \$D\$ 与 \$D_T\$ 和 \$D_M\$ 之间存在如下关系 (魏超等, 2024)：

$$D = D_T + D_M - D_T D_M = 1 - (1 - D_T)(1 - D_M) \quad (10)$$

联立式(7)和(8)，\$D\$ 可表示为：

$$D = 1 - (1 - D_T) \left(1 - \left(\frac{f(\sigma)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right) \quad (11)$$

3.2 损伤演化方程

基于 Lemaitre 应变等价理论和有效应力原理，建立主应力、损伤变量和有效主应力之间的关系式为(蒋浩鹏等, 2021)：

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i}{1 - D} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (12)$$

式中，\$\sigma_i^*\$为温度作用下页岩有效主应力，MPa；\$\sigma_i\$

为温度作用下页岩名义应力，MPa。

由广义胡克定律可得(魏超等, 2024)：

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E_T} [\sigma_i^* - \mu(\sigma_j^* + \sigma_k^*)], (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (13)$$

式中：\$\varepsilon_i\$为应变值，无量纲；\$\mu\$为泊松比，无量纲。

将式(12)代入式(13)，可得：

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E_T(1 - D)} [\sigma_i - \mu(\sigma_j + \sigma_k)] \quad (14)$$

将式(11)代入式(14)，可得：

$$\varepsilon_i = \frac{[\sigma_i - \mu(\sigma_j + \sigma_k)]}{E_T \left((1 - D_T) \left(1 - \left(\frac{f(\sigma)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right) \right)} \quad (15)$$

经整理，得：

$$\sigma_i = \varepsilon_i E_T \left((1 - D_T) \left(1 - \left(\frac{f(\sigma)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right) \right) + \mu(\sigma_j + \sigma_k) \quad (16)$$

将式(3)代入式(16)，深层高温页岩损伤演化方

$$f(\sigma) = \frac{\varepsilon_i E_0 (1 - D_T)}{[\sigma_i - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]} \left(\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} - \frac{b}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \right) \quad (24)$$

3.4 统计损伤本构模型

试样变形特征分析表明，高温-载荷作用下，试

程为：

$$\sigma_i = \varepsilon_i E_0 (1 - D_T) \left((1 - D_T) \left(1 - \left(\frac{f(\sigma)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right) \right) + \mu(\sigma_j + \sigma_k) \quad (17)$$

3.3 微元体强度

本文以 Mogi-Coulomb 准则表征岩石微元强度，可表示为(Al-ajmi and Zimmerman, 2005; Zhang et al., 2010)：

$$\tau_{oct}^* = f(\sigma_{m,2}^*) \quad (18)$$

式中：\$\tau_{oct}^*\$，\$\sigma_{m,2}^*\$ 分别为八面体剪应力和中间主应力，

MPa，其表达式分别为：

$$\tau_{oct}^* = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2} \quad (19)$$

$$\sigma_{m,2}^* = \frac{(\sigma_1^* + \sigma_3^*)}{2} \quad (20)$$

Mogi. K 对大量试验数据分析发现，\$f(\sigma_{m,2})\$为线性函数时，拟合效果最佳。因此，式(18)可进一步表示为：

$$\tau_{oct}^* = a + \frac{b}{2} (\sigma_1^* + \sigma_3^*) \quad (21)$$

式中，\$a\$、\$b\$ 均为岩石材料参数。

考虑温度作用下页岩材料参数 \$a\$、\$b\$ 与 Mohr-Coulomb 强度准则参数之间的关系为(Al-ajmi and Zimmerman, 2005)：

$$\begin{cases} a = \frac{2\sqrt{2}}{3} c_T \cos \varphi_T \\ b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi_T \end{cases} \quad (22)$$

式中：\$c_T\$为不同温度页岩粘聚力，MPa；\$\varphi_T\$为不同温度页岩内摩擦角，°。

基于 Mogi-Coulomb 描述岩石微元强度为：

$$f(\sigma) = \tau_{oct}^* - \frac{b}{2} (\sigma_1^* + \sigma_3^*) \quad (23)$$

联立式(11)、(12)和(23)可得：

样存在压密阶段，为描述该阶段本构关系，可采用二次函数拟合，考虑到应力-应变曲线经过原点，故

函数可设为:

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^2 + B\varepsilon_i \quad (25)$$

式中: A 和 B 均为拟合系数, MPa。

结合式(17)、(24)和(25)可得深层高温页岩统计损伤本构模型:

$$\sigma_i = \begin{cases} A\varepsilon_i^2 + B\varepsilon_i & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_c \\ \varepsilon_i E_0 (1 - D_T)^2 \left(1 - \left(\frac{f(\sigma)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right) + \mu(\sigma_j + \sigma_k) & \varepsilon > \varepsilon_c \end{cases} \quad (26)$$

式中, σ_c 为应力-应变压密终止处岩石强度, MPa;

ε_c 应力-应变压密终止处岩石应变, 无量纲。

3.5 模型参数确定

3.5.1 参数 $m(T)$ 和 $K(T)$

在应力-应变峰值点满足如下条件:

式中, σ_p 为峰值强度, MPa; ε_p 为峰值应变, 无量纲。

将式(27)代入式(26)可得:

$$\begin{cases} \sigma_p = \varepsilon_p E_0 (1 - D_T)^2 - \varepsilon_p E_0 (1 - D_T)^2 \left(\frac{\varepsilon_p E_0 (1 - D_T) \left(\frac{1}{3} \sqrt{2(\sigma_p - \sigma_3)^2} - \frac{b}{2} (\sigma_p + \sigma_3) \right)}{[\sigma_p - 2\mu\sigma_3] K(T)} \right)^{m(T)} + 2\mu\sigma_3 \\ \left. \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right|_{\substack{\sigma=\sigma_p \\ \varepsilon=\varepsilon_p}} = E_0 (1 - D_T)^2 - E_0 (1 - D_T)^2 \left(\frac{\varepsilon_p E_0 (1 - D_T) \left(\frac{1}{3} \sqrt{2(\sigma_p - \sigma_3)^2} - \frac{b}{2} (\sigma_p + \sigma_3) \right)}{[\sigma_p - 2\mu\sigma_3] K(T)} \right)^{m(T)} (1 + m(T)) = 0 \end{cases} \quad (28)$$

求解(28), 参数 $m(T)$ 和 $K(T)$ 可表示为:

$$\begin{cases} m(T) = -1 - \frac{\varepsilon_p E_0 (1 - D_T)^2}{\sigma_p - 2\mu\sigma_3 - \varepsilon_p E_0 (1 - D_T)^2} \\ K(T) = \frac{\varepsilon_p E_0 (1 - D_T) \left(\frac{1}{3} \sqrt{2(\sigma_p - \sigma_3)^2} - \frac{b}{2} (\sigma_p + \sigma_3) \right)}{[\sigma_p - 2\mu\sigma_3]} \left(-\frac{\sigma_p - 2\mu\sigma_3 - \varepsilon_p E_0 (1 - D_T)^2}{\varepsilon_p E_0 (1 - D_T)^2} \right)^{\frac{1}{m(T)}} \end{cases} \quad (29)$$

3.5.2 参数 A 和 B

应力-应变压密终止处, 满足:

将式(30)代入式(26)可得:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_c, & \varepsilon_1 = \varepsilon_c \\ \left. \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right|_{\substack{\sigma=\sigma_c \\ \varepsilon=\varepsilon_c}} = 2A\varepsilon_c + B \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} A\varepsilon_c^2 + B\varepsilon_c = \varepsilon_c E_0 (1-D_T)^2 - \varepsilon_c E_0 (1-D_T)^2 \left(\frac{\varepsilon_c E_0 (1-D_T) \left(\frac{1}{3} \sqrt{2(\sigma_c - \sigma_3)^2} - \frac{b}{2} (\sigma_c + \sigma_3) \right)}{[\sigma_c - 2\mu\sigma_3] K(T)} \right)^{m(T)} + 2\mu\sigma_3 \\ 2A\varepsilon_c + B = E_0 (1-D_T)^2 - E_0 (1-D_T)^2 \left(\frac{\varepsilon_c E_0 (1-D_T) \left(\frac{1}{3} \sqrt{2(\sigma_c - \sigma_3)^2} - \frac{b}{2} (\sigma_c + \sigma_3) \right)}{[\sigma_c - 2\mu\sigma_3] K(T)} \right)^{m(T)} (1+m(T)) \end{cases} \quad (31)$$

求解式(31)，参数 A 和 B 可表示为：

$$\begin{cases} A = -\frac{E_0 (1-D_T)^2}{\varepsilon_c} \left(\frac{\varepsilon_c E_0 (1-D_T) \left(\frac{1}{3} \sqrt{2(\sigma_c - \sigma_3)^2} - \frac{b}{2} (\sigma_c + \sigma_3) \right)}{[\sigma_c - 2\mu\sigma_3] K(T)} \right)^{m(T)} m(T) - \frac{2\mu\sigma_3}{\varepsilon_c^2} \\ B = E_0 (1-D_T)^2 + E_0 (1-D_T)^2 \left(\frac{\varepsilon_c E_0 (1-D_T) \left(\frac{1}{3} \sqrt{2(\sigma_c - \sigma_3)^2} - \frac{b}{2} (\sigma_c + \sigma_3) \right)}{[\sigma_c - 2\mu\sigma_3] K(T)} \right)^{m(T)} (m(T)-1) + \frac{4\mu\sigma_3}{\varepsilon_c} \end{cases} \quad (32)$$

3.6 模型对比验证

通过对比文献(蒋浩鹏等, 2021; 贾宝新等, 2022; Zhu et al., 2021; Chen et al., 2024)模型和试验结果，以验证本文构建的超深层高温页岩统计损伤

本构模型的合理性，为方便验证工作，本文构建模型参数与验证文献模型参数均保持一致。

文献(蒋浩鹏等, 2021)统计损伤模型如式(33)所示：

$$\sigma_1 = \begin{cases} A\varepsilon_1^2 + B\varepsilon_1, 0 \leq \leq \\ E_0 (1-D_T) \varepsilon_1 \left\{ 1 - \eta + \eta \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_1 E_0 (1-D_T)}{(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) K(T)} (\sigma_1 - \sigma_3 - \sin \varphi_T (\sigma_1 + \sigma_3)) \right)^{m(T)} \right] \right\} + 2\mu\sigma_3, \varepsilon > \varepsilon_c \end{cases} \quad (33)$$

为方便与文献(蒋浩鹏等, 2021)统计损伤模型结果对比，考虑到文献(蒋浩鹏等, 2021)在推导过程中并未给出 $m(T)$ 、 $K(T)$ 、 A 和 B 的表达式，本文对

文献(蒋浩鹏等, 2021)进一步展开推导工作，得出 $m(T)$ 、 $K(T)$ 、 A 和 B 表达式为：

$$\begin{cases} m(T) = \frac{\frac{(E_0 \eta (1-D_T) - E_0 (1-D_T)) \varepsilon_p}{\sigma_p - E_0 (1-D_T) \varepsilon_p + E_0 \eta (1-D_T) \varepsilon_p - 2\mu\sigma_3} - 1}{\ln \left(\frac{\sigma_p - E_0 (1-D_T) \varepsilon_p + E_0 \eta (1-D_T) \varepsilon_p - 2\mu\sigma_3}{E_0 \eta (1-D_T) \varepsilon_p} \right)} \\ K(T) = \frac{\varepsilon_p E_0 (1-D_T)}{\left(\ln \left(\frac{E_0 \eta (1-D_T) \varepsilon_p}{\sigma_p - E_0 (1-D_T) \varepsilon_p + E_0 \eta (1-D_T) \varepsilon_p - 2\mu\sigma_3} \right) \right)^{\frac{1}{m(T)}}} \frac{(\sigma_p - \sigma_3 - \sin \varphi_T (\sigma_p + \sigma_3))}{(\sigma_p - 2\mu\sigma_3)} \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases}
A = \left[-\frac{E_0\eta(1-D_T)}{\varepsilon_c} \exp \left[-\left(\frac{\varepsilon_c E_0(1-D_T)}{(\sigma_c - 2\mu\sigma_3)K(T)} (\sigma_c - \sigma_3 - \sin\varphi_T(\sigma_c + \sigma_3)) \right)^{m(T)} \right] \right] \times \left[-\frac{2\mu\sigma_3}{\varepsilon_c^2} \right. \\
\left. m(T) \left(\frac{\varepsilon_c E_0(1-D_T)}{(\sigma_c - 2\mu\sigma_3)K(T)} (\sigma_c - \sigma_3 - \sin\varphi_T(\sigma_c + \sigma_3)) \right)^{m(T)} \right] \\
B = \left[\begin{aligned} & E_0(1-D_T) - E_0\eta(1-D_T) + E_0\eta(1-D_T) \times \\ & \exp \left[-\left(\frac{\varepsilon_c E_0(1-D_T)}{(\sigma_c - 2\mu\sigma_3)K(T)} (\sigma_c - \sigma_3 - \sin\varphi_T(\sigma_c + \sigma_3)) \right)^{m(T)} \right] \times \left[\frac{4\mu\sigma_3}{\varepsilon_c} \right. \\ & \left. \left(1 + m(T) \left(\frac{\varepsilon_c E_0(1-D_T)}{(\sigma_c - 2\mu\sigma_3)K(T)} (\sigma_c - \sigma_3 - \sin\varphi_T(\sigma_c + \sigma_3)) \right)^{m(T)} \right) \right] \end{aligned} \right]
\end{cases} \quad (35)$$

文献(贾宝新等, 2022)统计损伤模型如式(36)所

示:

$$\sigma_1 = \begin{cases} A\varepsilon_1^2 + B\varepsilon_1, & 0 \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_c \\ E_T\varepsilon_1 \left\{ 1 - \eta + \eta \exp \left[-\left(\frac{f(\sigma)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right] \right\} + 2\mu\sigma_3, & \varepsilon_1 > \varepsilon_c \end{cases} \quad (36)$$

其中,

$$f(\sigma) = \frac{n\sigma_p E_T \varepsilon_1 \left[\sigma_1 + 2\sigma_3 + \sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \left(\cos\varphi_T + \frac{1}{3} \sin\varphi_T \right) \right]}{3(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} + \cos^2\varphi_T \quad (37)$$

$$\begin{cases} m(T) = \frac{1}{\ln \left(\frac{\eta E_T \varepsilon_p}{\sigma_p - 2\mu\sigma_3 + (\eta - 1)E_T \varepsilon_p} \right)} \\ K(T) = f(\sigma = \sigma_p) m(T)^{\frac{1}{m(T)}} \end{cases} \quad (38)$$

$$\begin{cases} A = \eta E_T \left[\exp \left(-\left(\frac{f(\sigma = \sigma_c)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right) \right] \left[-\left(\frac{m(T)f(\sigma = \sigma_p)}{K(T)^{m(T)}} \right) \right] \left[\frac{n\sigma_c E_T \left[\sigma_c + 2\sigma_3 + \sqrt{3}(\sigma_c - \sigma_3) \left(\cos\varphi_T + \frac{1}{3} \sin\varphi_T \right) \right]}{6(\sigma_c - 2\mu\sigma_3)} \right] \\ B = E_T \left[(1 - \eta) + \eta \exp \left(-\left(\frac{f(\sigma = \sigma_c)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right) \right] \end{cases} \quad (39)$$

文献(Zhu et al., 2021)统计损伤模型如式(40)所

示:

$$\sigma_1 = E_T \varepsilon_1 \left\{ \exp \left[-\left(\frac{f(\sigma)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right] \right\} + 2\mu\sigma_3 \quad (40)$$

其中,

$$f(\sigma) = \frac{E_T \varepsilon_1 [\sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin\varphi_T]}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3} \quad (41)$$

$$\begin{cases} m(T) = -\frac{B_p f(\sigma = \sigma_p)}{(1 - D_p) \ln(1 - D_p)} \\ K(T) = \frac{f(\sigma = \sigma_p)}{[-\ln(1 - D_p)]^{1/m(T)}} \end{cases} \quad (42)$$

$$\begin{cases} D_p = 1 - \frac{\sigma_p - 2\mu\sigma_3}{E_T \varepsilon_p} \\ B_p = \frac{[\sigma_p - 2\mu\sigma_3]^2}{(\sigma_p - \sigma_3 - \sigma_p \sin\varphi_T - \sigma_3 \sin\varphi_T) E_T^2 \varepsilon_p^2} \\ f(\sigma = \sigma_p) = \frac{E_T \varepsilon_p (\sigma_p - \sigma_3 - \sigma_p \sin\varphi_T - \sigma_3 \sin\varphi_T)}{\sigma_p - 2\mu\sigma_3} \end{cases} \quad (43)$$

文献(Chen et al., 2024)统计损伤模型如式(44)所

示:

$$\sigma_1 = E_T \varepsilon_1 \exp \left[-\left(\frac{f(\sigma)}{K(T)} \right)^{m(T)} \right] (1 - D_T) + 2\mu\sigma_3 \quad (44)$$

其中,

$$f(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{E_T \varepsilon_1 (\sigma_1 + \sigma_3) + (\sigma_1 - 2\mu\sigma_3) 2c_T \cot \varphi_T}{E_T \varepsilon_1 (\sigma_1 - \sigma_3)} \right]^2 - 1}} \quad (45)$$

$$\begin{cases} m(T) = \frac{2E_T \varepsilon_p \sigma_p + (\sigma_p - 2\mu\sigma_3) 2c_T \cot \varphi_T}{\left[E_T \varepsilon_p (\sigma_p + \sigma_3) + (\sigma_p - 2\mu\sigma_3) 2c_T \cot \varphi_T \right] (\sigma_p - 2\mu\sigma_3) 2c_T \cot \varphi_T} \times \frac{2E_T \varepsilon_p \sigma_3 + (\sigma_p - 2\mu\sigma_3) 2c_T \cot \varphi_T}{\ln \left(\frac{E_T \varepsilon_p (1 - D_T)}{(\sigma_p - 2\mu\sigma_3)} \right)} \\ K(T) = \frac{1}{\sqrt[m]{\ln \left(\frac{E_T \varepsilon_p (1 - D_T)}{\sigma_p - 2\mu\sigma_3} \right)} \sqrt{\left[\frac{E_T \varepsilon_p (\sigma_p + \sigma_3) + (\sigma_p - 2\mu\sigma_3) 2c_T \cot \varphi_T}{E_T \varepsilon_p (\sigma_p - \sigma_3)} \right]^2 - 1}} \end{cases} \quad (46)$$

为进一步量化损伤模型拟合优度，采用评价指标为损伤模型预测值与试验值之间的平均绝对偏差和平均绝对误差，具体表达式为：

$$ad = \frac{\sum_{i=1}^N |\sigma_i^{for} - \sigma_i^{test}|}{N} \quad (47)$$

$$ae = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_i^{for} - \sigma_i^{test}}{\sigma_i^{test}} \right|}{N} \times 10000 \quad (48)$$

式中， ad 为平均绝对偏差，MPa； ae 为平均绝对误差，无量纲； σ^{for} 为损伤模型预测值，MPa； N 为应力-应变采样点数。

根据表 1 数据，本文模型及文献(蒋浩鹏等，2021；贾宝新等，2022；Zhu et al., 2021；Chen et al., 2024)模型在不同温度和围压下的 m 、 K 、 A 、 B 、 ad 和 ae 计算结果如表 2~表 5 所示。

表 2 本文模型参数计算值

Table 2 Calculation values of model parameter in this study

试样编号	温度/°C	围压/MPa	m	K	A	B	ad	ae
Y-1	25	0	7.41	28.17	-7562	15659	9.1324	1.41
Y-2	25	40	4.02	90.05	-29957	20514	17.8535	0.39
Y-3	25	60	3.32	112.05	-64908	22674	25.3281	0.68
Y-4	25	80	2.43	153.63	-125110	24097	24.4634	0.32
Y-5	25	100	2.64	157.03	-95553	24193	28.6580	0.30
Y-6	150	0	9.90	25.31	-485	12473	6.2180	1.28
Y-7	150	40	3.59	86.75	-39459	19799	17.3370	0.49
Y-8	150	60	4.58	87.67	-17904	20450	6.4177	0.11
Y-9	150	80	3.33	112.23	-53493	21840	20.3200	0.32
Y-10	150	100	3.23	130.31	-33313	21832	23.0658	0.24

表 3 模型参数计算值(文献(蒋浩鹏等，2021))

Table 3 Calculation values of model parameter (Reference (Jiang et al., 2021))

试样编号	温度/°C	围压/MPa	m	K	A	B	ad	ae
Y-1	25	0	7.92	58.07	-5607	15653	9.2602	1.68
Y-2	25	40	4.51	177.50	-21204	20482	19.6965	0.53
Y-3	25	60	3.81	215.84	-47975	22618	30.1486	0.85
Y-4	25	80	2.91	280.37	-95400	24029	29.4414	0.49
Y-5	25	100	3.12	291.38	-71197	24123	30.7799	0.49

Y-6	150	0	4.79	58.19	-55660	14123	7.3699	1.30
Y-7	150	40	3.63	170.43	-49724	20450	17.7270	0.62
Y-8	150	60	4.08	179.14	-39689	21540	12.4734	0.45
Y-9	150	80	3.27	218.46	-78763	22936	20.9276	0.45
Y-10	150	100	3.18	252.32	-49536	22926	24.7606	0.37

表 4 模型参数计算值(文献(贾宝新等, 2022))

Table 4 Calculation values of model parameter (Reference (Jia et al., 2022))

试样编号	温度/°C	围压/MPa	m	K	A	B	ad	ae
Y-1	25	0	7.74	107814	-1274	1564	9.4060	1.72
Y-2	25	40	4.40	855758	-4704	20369	20.44	0.54
Y-3	25	60	3.72	1196707	-10483	22338	30.85	0.87
Y-4	25	80	2.83	1837642	-20591	23423	30.90	0.51
Y-5	25	100	3.04	2035293	-15388	23655	32.32	0.51
Y-6	150	0	4.67	112016	-12061	13918	8.29	0.79
Y-7	150	40	3.53	876797	-10811	20186	18.06	0.62
Y-8	150	60	3.98	1008264	-8680	21308	12.88	0.46
Y-9	150	80	3.18	1389039	-19148	22447	21.23	0.48
Y-10	150	100	3.09	1835007	-10867	22636	25.09	0.37

表 5 模型参数计算值(文献(Zhu et al., 2021; Chen et al., 2024))

Table 5 Calculation values of model parameter (Reference (Zhu et al., 2021; Chen et al., 2024))

试样编号	温度/°C	围压/MPa	文献(Zhu et al., 2021)				文献(Chen et al., 2024)			
			m	K	ad	ae	m	K	ad	ae
Y-1	25	0	7.90	58.25	9.24	1.67	13.04	1.00	9.33	1.70
Y-2	25	40	4.50	178.55	19.56	0.52	8.29	1.86	19.82	0.53
Y-3	25	60	3.80	217.40	29.98	0.84	7.08	2.07	30.37	0.86
Y-4	25	80	2.90	283.18	29.22	0.49	5.47	2.37	29.69	0.50
Y-5	25	100	3.11	294.05	30.54	0.49	5.89	2.42	31.01	0.50
Y-6	150	0	4.78	58.51	8.54	0.66	17.61	1.10	14.31	1.46
Y-7	150	40	3.62	171.74	17.71	0.62	7.60	2.09	18.33	0.55
Y-8	150	60	4.07	180.33	12.37	0.44	9.48	2.13	7.34	0.28
Y-9	150	80	3.25	220.36	20.94	0.45	7.21	2.38	21.28	0.36
Y-10	150	100	3.16	254.59	24.73	0.37	7.07	2.57	24.83	0.29

图 8 为本文理论模型与文献(蒋浩鹏等, 2021; 贾宝新等, 2022; Zhu et al., 2021; Chen et al., 2024)模型及试验曲线对比结果。本文所构建的统计损伤模型能够较准确的描述试样的应力-应变关系及其破坏过程, 并能有效模拟试样压缩破坏损伤的全过程, 尤其在试样达到峰值强度之前, 理论曲线与试验曲线具有很高的吻合度。但本文模型与文献(蒋浩鹏等, 2021; 贾宝新等, 2022; Zhu et al., 2021; Chen et al., 2024)模型对于峰值强度之后曲线拟合效果均较差, 其主要原因有: (1) 本次试验采用的岩心脆性较强, 峰值强度后岩石强度迅速跌落, 而损伤模

型反映的是岩石逐步损伤的过程, 因此对于脆性较强的岩心峰值后应力-应变曲线迅速跌落拟合效果较差; (2) 其次, 我们在求解 $m(T)$ 和 $K(T)$ 是均假设在峰值强度处应力-应变曲线左导数和右导数为零, 其实对于脆性较强的岩石在该点右导数并不为零。此外, 该模型不仅能充分反映岩石强度随温度和围压的变化特征, 而且与文献(蒋浩鹏等, 2021; 贾宝新等, 2022; Zhu et al., 2021; Chen et al., 2024)模型相比, 其结果与试验数据更为吻合。由表 2~表 5 和图 8(f)可知本文所构建模型的 ad (均值为 17.88) 和 ae (均值为 0.55) 均小于文献(蒋浩鹏等, 2021;

贾宝新等, 2022; Zhu et al., 2021; Chen et al., 2024)模型的 ad (均值分别为20.26、20.95、20.28和20.63)和 ae (均值分别为0.72、0.69、0.66和0.70),进一步表明本文构建的损伤模型预测结果与试验数据更为吻合。相较于文献(蒋浩鹏等, 2021; 贾宝新等,

2022; Zhu et al., 2021; Chen et al., 2024)采用 Mohr-Coulomb 准则和 Hoek-Brown 准则表示微元体强度、本文引入的 Mogi-Coulomb 较适当的考虑中主应力的影响, 较准确的表达了岩石强度。这也验证了本文模型是合理和可行的。

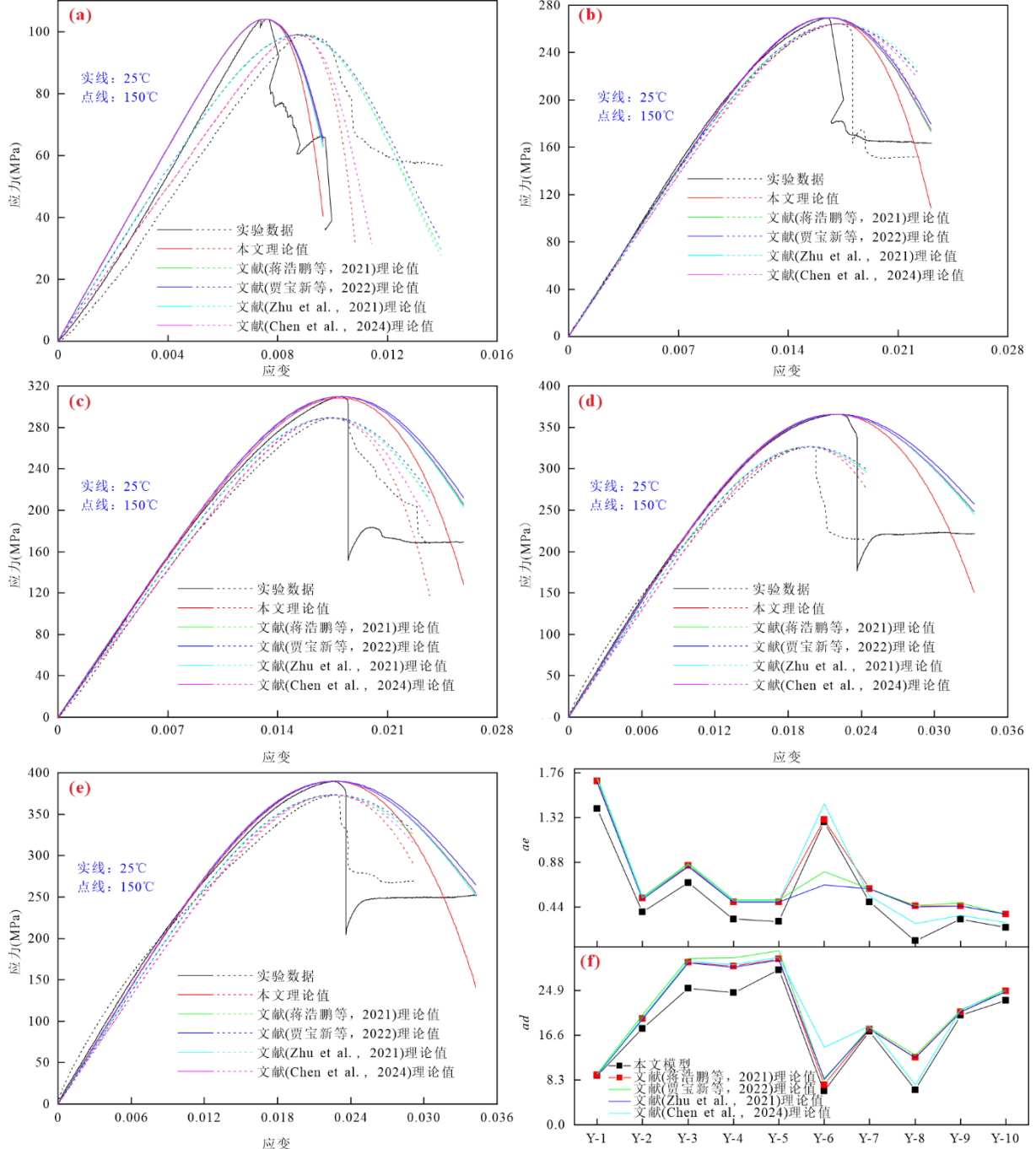


图8 本文理论模型与文献理论模型及试验曲线对比图 (a)围压 0MPa, (b)围压 40MPa, (c)围压 60MPa, (d)围压 80MPa, (e)围压 100MPa, (f)拟合优度对比

Fig.8 Comparison between theoretical and experimental curves of constitutive relationship under different temperatures and confining pressure (a) Confining pressure 0 MPa, (b) Confining pressure 40 MPa, (c) Confining pressure 60 MPa, (d) Confining pressure 80 MPa, (e) Confining pressure 100 MPa, (f) Comparison of goodness of fit

4 脆性指标研究

统计损伤本构模型在模拟岩石全应力-应变曲线与刻画损伤演化规律方面具有显著优势。据此，本文依托所建立的统计损伤本构模型，综合考虑岩石损伤演化全过程，构建基于统计损伤本构关系的岩石脆性评价指标如下：

$$B_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (dD_i / \varepsilon_{li})}{\bar{\varepsilon}_1}} \quad (49)$$

式中， n 为三轴压缩实验采集点数； dD_i 为第 i 个三轴压缩实验数据采集点处损伤演化率，无量纲； ε_{li} 为第 i 个三轴压缩实验数据采集点处轴向应变； $\bar{\varepsilon}_1$ 为平均轴向应变，无量纲。 dD_i 可表示为：

$$dD_i = \frac{\partial D_i}{\partial \varepsilon_{li}} d\varepsilon_{li} + \frac{\partial D_i}{\partial \sigma_{li}} d\sigma_{li} \quad (50)$$

式中： σ_{li} 为第 i 个三轴压缩实验数据采集点处轴向应力，MPa。

损伤演化是根据岩石统计损伤本构模型得到，其不仅包括应力-应变曲线的峰值前后全过程，过程中还考虑了弹性模量 E 、泊松比 μ 、峰值强度 σ_p 、峰值应变 ε_p 、围压 σ_3 、温度 T 、粘聚力 c_T 和内摩擦角 φ_T ，因此，考虑岩石本构关系下的损伤演化全过程来建立岩石脆性评价标准是有意义的。

除上述分析以外，为进一步验证本文构建的脆性评价指标的正确性，本文对比了 5 种具有代表性的脆性评价指标，见表 6(胡清波等, 2020; Meng et al., 2021; 陈国庆等, 2020; Zhang et al., 2025)。

表 6 5 种具有代表脆性评价指标

Table 6 5 representative brittle evaluation indicators

分类依据	公式含义及说明
基于归一化弹性模量和泊松比计算方法	$B_1 = \frac{1}{2} E_{brit} + \frac{1}{2} \mu_{brit},$ $\begin{cases} E_{brit} = \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}}, \\ \mu_{brit} = \frac{\mu_{max} - \mu}{\mu_{max} - \mu_{min}} \end{cases},$ 式中，E_{brit} 和 μ_{brit} 分别为归一化弹性模量和泊松比。
基于峰值强度和参与残余计算方法	$B_2 = \frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p},$

式中： σ_p 和 σ_r 分别为峰值强度和残余强度。

基于峰值应变和残余应变计算方法

$$B_3 = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_r}{\varepsilon_p},$$

式中： ε_p 和 ε_r 分别为峰值应变和残余应变。

基于应力-应变曲线峰后应力降速率

$$B_4 = \frac{B'_4}{B''_4}, \quad \begin{cases} B'_4 = \frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p}, \\ B''_4 = \frac{\ln(|K_{ac}|)}{10} \end{cases},$$

式中： K_{ac} 为岩石峰后应力降速率。

$$B_5 = \frac{B_5^{pre} + B_5^{post}}{2},$$

$$B_5^{pre} = \frac{S_2}{S_1 + S_2}, \quad S_2 = \frac{\sigma_p^2}{2E},$$

基于应力-应变曲线和能量关系的计算方法

$$B_5^{post} = \frac{S_2 - S_4}{S_2 + S_3 - S_4}, \quad S_4 = \frac{\sigma_r^2}{2E},$$

式中： B_5^{pre} 和 B_5^{post} 分别为岩石峰前和

峰后脆性指标； S_1 为峰前耗散能； S_2 为峰前弹性能； S_3 为峰后机械能； S_4 为残留的弹性能。

图 9 和图 10 分别为不同温度与围压条件下岩石的损伤变量及损伤演化率结果。由图可见，随着围压的增大，损伤变量及损伤演化率随应变的变化趋势均趋于平缓。这是由于岩石损伤演化本质上对应于变形破裂过程中的能量耗散机制，且该规律与岩石的脆性特征密切相关。低围压条件下，岩石侧向约束较弱，脆性特征显著，三轴压缩下多表现为突发性剪切破坏，能量耗散与损伤演化在短时间内集中完成，对应较高的损伤演化速率。与之相反，高围压下岩石由脆性向塑性转变，破坏模式呈现渐进式损伤特征，内部微裂纹得以充分萌生、扩展与贯通，能量耗散表现出明显的阶段性累积效应，损伤演化速率随围压升高显著降低。同时，由图 9 和图 10 可以看出，温度升高会使损伤变量与损伤演化率均有所降低。其主要原因在于，岩石受热膨胀产生的热应力能够有效抑制变形发展与裂纹扩展，提升岩石塑性，使其破坏所需的外界做功显著增加。综合上述分析表明，基于岩石损伤演化过程构建脆性评价指标具有良好的理论依据与可行性。

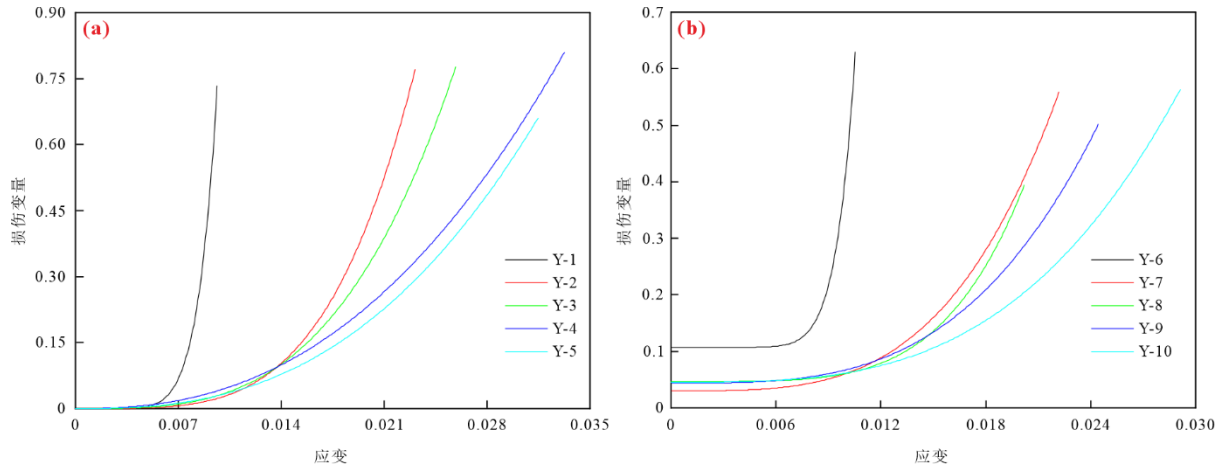


图9 不同温度-围压下岩石损伤变量 (a)室温, (b) 150°C

Fig. 9 Damage variables of rock samples under different temperatures and confining pressure (a) room temperature, (b) 150°C

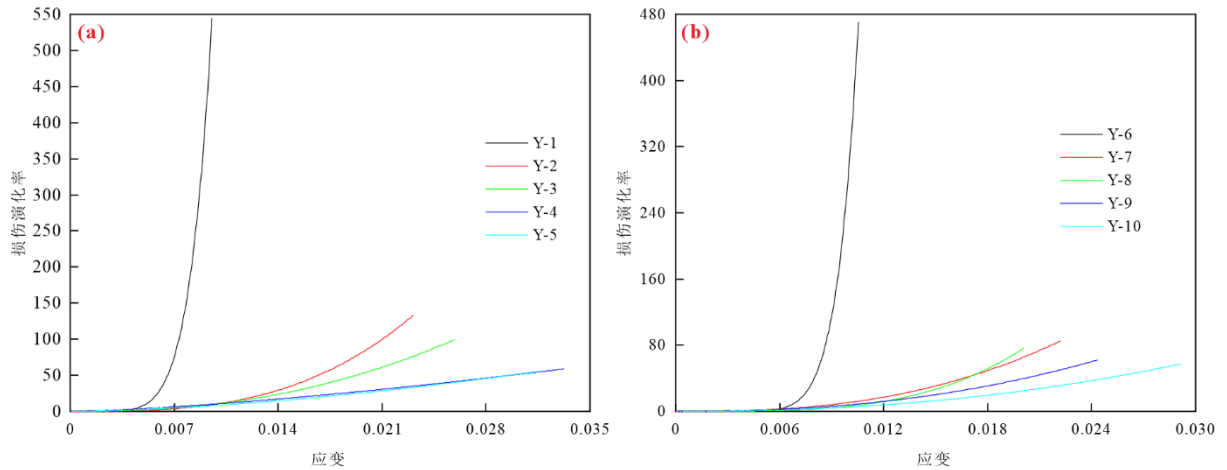


图10 不同温度-围压下岩石损伤演化率 (a)室温, (b) 150°C

Fig. 10 Damage evaluation rate of rock samples under different temperatures and confining pressure (a) room temperature, (b) 150°C

从图 11 可知,新提出的脆性指数,脆性指数在室温和高温 (150°C) 条件下均随围压的增加而降低,且相同围压下温度升高岩石脆性指数减小,满足岩石随围压和温度增大其塑性增加的一般认识,验证了本文构建的脆性评价指标的适用性。 B_1 脆性指数在室温条件下,岩石脆性指数随围压呈先减小后增大趋势;而高温 (150°C) 条件小,岩石脆性指数随围压呈先增大后减小趋势,不同温度下呈现显著的不同现象,与常规对岩石脆性研究结果相悖论;且该方法在衡量岩体脆性时,仅限于考虑弹性模量和泊松比,而未将残余强度系数 (即残余强度与峰值强度之比) 等对岩体脆性特征变化具有重要影响的其他参数纳入考量。 B_2 、 B_3 、 B_4 和 B_5 整体上脆性评价指标满足在相同温度条件下,脆性指数随围压呈递减趋势;其中 B_5 在高围压高温条件下,岩石脆性指数反而高于室温结果,不满足一般研究结果; B_2

和 B_3 仅考虑岩石峰值破坏时应力应变特征,忽略了岩石整个破坏演化过程;虽然 B_4 引入残余强度,考虑了应力-应变曲线峰后强度特征,但仍然忽略了岩石整个破坏演化过程; B_5 基于应力-应变曲线和能量关系的计算方法,考虑了岩石应力-应变曲线全过程,但该方法没有考虑岩石破坏时粘聚力 c_T 和内摩擦角 φ_T 对脆性指数的影响。综合分析表明,本文构建的脆性指数,既考虑岩石应力-应变曲线的峰值前后全过程,又考虑外在因素 (围压、温度 T),还考虑岩石弹性参数 (弹性模量 E 、泊松比 μ) 和强度参数 (峰值强度 σ_p 、峰值应变 ε_p) 以及岩石强度准则参数 (粘聚力 c_T 和内摩擦角 φ_T),并且满足岩石随围压和温度增大其脆性减小的一般认识,验证了本文构建的脆性评价指标的可靠性。

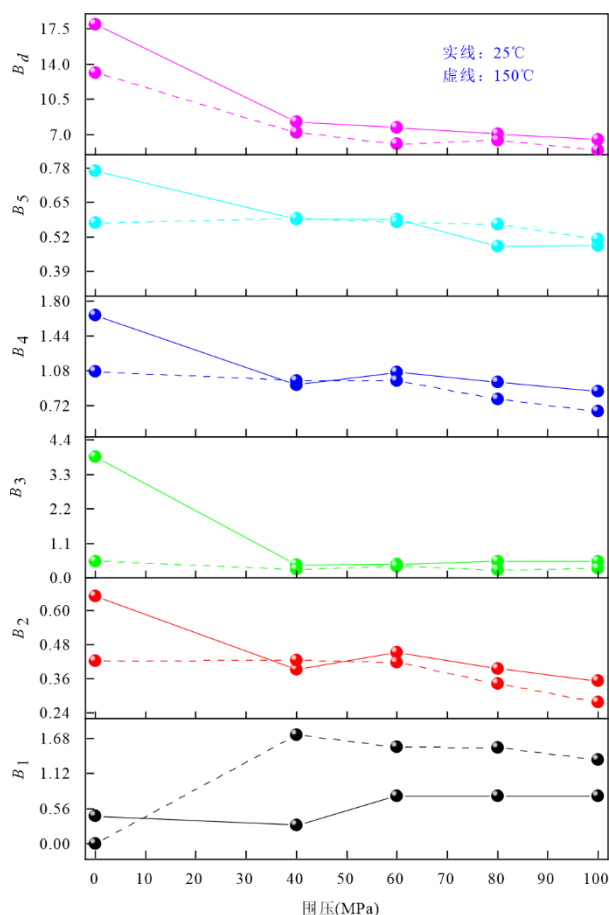


图 11 不同围压温度下岩石脆性指数对比

Fig. 11 Comparison of rock brittleness index under different confining pressures and temperatures

5 结论

1) 以川南地区五峰组页岩进行力学性质研究, 实验结果证实温度上升会诱导页岩内部原生孔隙、裂隙进一步发育扩展出现微裂纹, 大幅削弱岩石整体完整性, 进而劣化其宏观力学性能。其中, 岩样峰值强度与弹性模量均和围压呈正相关关系, 与温度呈负相关关系; 泊松比随温度及围压的变化表现出较强的离散性, 无明显单一变化规律。随着围压逐步升高, 岩样破坏模式逐步由复合型裂纹破坏向单一剪切裂纹为主导的模式转变, 整体更趋近于剪切破坏; 温度升高, 岩石破坏面形态由平滑逐渐转为粗糙不平, 试样塑性变形特征显著增强。

2) 充分考虑温度对岩石微元体强度的调控作用, 假设微元体满足受温度影响的 Mogi-Coulomb 强度准则, 以此为基础构建了考虑温度耦合作用的岩石统计损伤本构模型, 并明确了模型中各项参数的定量确定方法。该模型优势显著, 所含参数均为常规岩石力学可测参数, 物理意义明确, 实际应用与参

数求解便捷高效。

3) 依托构建统计损伤本构模型, 建立了适配温度-围压耦合工况的脆性指数评价方法。温度升高岩石热膨胀产生热应力抵抗变形和阻止裂纹扩展, 增强试样抗变形能力, 岩石损伤变量和损伤演化率减小。对比室温和高温环境下, 岩石脆性指数均随围压的升高而逐渐降低; 且在同一围压条件下, 温度升高会导致岩石脆性指数逐步减小, 符合岩石随围压与温度升高、塑性特征逐步增强的认知, 验证了评价方法的合理性与可靠性。

References

- Al-ajmi, A., Zimmerman, R. W., 2005. Relation between the Mogi and the Coulomb Failure Criteria. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(3): 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.11.004>.
- Chen, G. Q., Wu, J. C., Jiang, W. Z., et al., 2020. An Evaluation Method of Rock Brittleness Based on the Whole Process of Elastic Energy Evolution. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(05): 901-911. (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. L., Tang, X. L., Xu, L. T., et al., 2024. Comparative Study of Multiple Statistical Damage Mechanics Models for Rock Behaviors under High Temperature. *Construction and Building Materials*, 447: 138049. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138049>.
- Ding, R., Zhang, F., Wang, Y., et al., 2024. Brittleness of Deep Sandstone in Central Junggar Basin and its Influence on Fracture Modes of Rocks. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 31(3): 54-62. (in Chinese with English abstract).
- Feng, S. K., Xiong, L., Yin, S., et al., 2025. Quantitative Evaluation of Brittleness of Deep Shale Gas Reservoirs of Wufeng-Longmaxi Formations in Lintanchang Area, Southeastern Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 47(04): 742-753. (in Chinese with English abstract).
- Guo, T. K., Tang, S. J., Liu, S., et al., 2021. Physical Simulation of Hydraulic Fracturing of Large-

- Sized Tight Sandstone Outcrops. *SPE J*, 26(01): 372-393. <https://doi.org/10.2118/204210-PA>.
- Hu, Q. B., Liang, H. A., Yang, T., et al., 2020. A New Method for Rock Brittleness Evaluation Based on Statistical Damage Constitutive Relation. *Journal Of Harbin Institute Of Technology*, 52(11): 147-156. (in Chinese with English abstract).
- Huang, L. Q., Liu, M. L., Wang, W. W., et al., 2024. Temperature Effects on the Failure of Deep Circular Tunnel under True-triaxial Compression. *Journal of Central South University*, 31(9): 3119-3141. <https://doi.org/10.1007/s11771-024-5753-x>.
- Jia, B. X., Chen, G. D., Liu, F. P., 2022. Damage Constitutive Model of Rock under High Temperature and its Verification. 43(S2): 63-73. (in Chinese with English abstract).
- Jiang, B. Y., Tan, Y. L., Wang, L. G., et al., 2019. Development and Numerical Implementation of Elastoplastic Damage Constitutive Model for Rock Based on Mogi-Coulomb Criterion. *Journal of China University of Mining & Technology*, 48(4): 784-792. (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H. P., Jiang, A. N., Yang, X. R., 2021. Statistical Damage Constitutive Model of High Temperature Rock Based on Weibull Distribution and its Verification. *Rock and Soil Mechanics*, 42(07): 1894-1902. (in Chinese with English abstract).
- Kranz, R. L., 1983. Microcracks in Rocks: A Review. *Tectonophysics*, 100(1-3): 449-480. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90198-1](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90198-1).
- Lei, M., Sun J. S., Zhu, H. Y., et al., 2024. Synthesis and Characterization of Natural Rosin-modified Silica Nanocomposite and its Green Multifunctional Applications for Drilling Fluid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 702: 134994. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134994>.
- Li, T. B., Gao, M. B., Chen, G. Q., et al., 2017. A Thermal-mechanical-damage Constitutive Model for Hard Brittle Rocks and its Preliminary Application. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 39(08): 1477-1484. (in Chinese with English abstract).
- Liao, A. J., Zhang, Y., Wang, F., et al., 2025. Thermal Damage and Energy Characteristics of Sandstone under Real Time High Temperatures. *Earth Science*, 50(1): 286-298. (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Yin, S. X., Thanh, H. V., et al., 2025. Advancements and Development Trend in Statistical Damage Constitutive Models for Rock: A Comprehensive Review. *Natural Hazards*, 121(4): 3703-3744. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06967-6>.
- Lv, K. H., Zhang, H., Wu, B. K., et al., 2025. Damage Constitutive Model and Experimental Study of Deep Coal Rock under Thermal-hydro-Mechanical Coupling. *Scientific Reports*, 15: 29337. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10728-1>.
- Meng, F. Z., Wong, L. N. Y., Zhou, H., 2021. Rock Brittleness Indices and their Applications to Different Fields of Rock Engineering: A Review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(1): 221-247. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.008>.
- Mohammadi, S. D., Torabi-Kaveh, M., Bayati, M., 2015. Prediction of TBM Penetration Rate Using Intact and Mass Rock Properties (Case Study: Zagros Long Tunnel, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6): 3893-3904. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1465-0>.
- Mosaddegh, A., Fahimifar, A., Najafipour, P., 2025. Influence of Thermal and Cooling Cycles on the Mechanical Properties of Building Stones with Carbonate Texture. *Geothermics*, 130: 103330. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103330>.
- Ren, L., Jiang, H., Zhao J. Z., et al., 2023. An Evaluation Method of Rock Brittleness for the Ultra-Deep and High-Temperature Shale Based on Energy Evolution. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 19(01): 148-156. (in Chinese with English abstract).
- Suo, Y., Zhao, Y. J., Fu, X. F., et al., 2024. Study on Fracture Propagation Behavior of Deep High-temperature Shale Gas Based on the Modified MERR Criterion. *Theoretical and Applied*

- Fracture Mechanics*, 131: 104352.
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104352>.
- Wang, D. B., Ge, H. K., Wang, X. Q., et al., 2015. A Novel Experimental Approach for Fracability Evaluation in Tight-gas Reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 23: 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.01.039>.
- Wang, G., Zheng, J. Y., Liu, Y. X., et al., 2024. Experimental Study on the Microstructure Change and Evolution Law of Sandstone under Different Temperatures. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 43(03): 600-610. (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. T., Liu, L. Y., Zhang, J. G., et al., 2022. Prediction of Anchor Cable Supporting Force for Roadways with Top Coal Based on Hoek-Brown Strength Parameters and its Application. *Journal of China University of Mining & Technology*, 51(2): 244-256. (in Chinese with English abstract)
- Wang, T., Zhao, H. B., Zheng, J. D., et al., 2024. Improvement of Shale Brittleness Evaluation Methods Based on Calibration of Elastic Parameters by Rock Core Mechanics Experiments. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 39(5): 35-42. (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. P., Wang, L. H., Zhao, B. Y., et al., 2022. Experimental Study on Mechanical Properties of Gas Storage Sandstone and Its Damage Under Temperature and Pressure. *Frontiers in Earth Science*, 10: 905642.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.905642>.
- 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)*, 55(3): 1056-1067. (in Chinese with English abstract).
- Wen, T., Tang, H. M., Ma, J. W., et al., 2019. Deformation Simulation for Rock in Consideration of Initial Damage and Residual Strength. *Earth Science*, 44(2): 652-663. (in Chinese with English abstract).
- Wen, T., Zhang, X., Sun, J. S., et al., 2021. Brittle Evaluation Based on Energy Evolution at Pre-Peak and Post-Peak Stage. *Earth Science*, 46(9): 3385-3396. (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. L., Gao, F., Zhang, Z. Z., 2018. Thermo-mechanical Coupling Damage Constitutive Model of Rock Based on the Hoek–Brown Strength Criterion. *International Journal of Damage Mechanics*, 27(8): 1213-1230.
<https://doi.org/10.1177/1056789517726838>.
- Xu, Y., Wang, Y. Q., Pan Y., et al., 2025. Prediction of China's Remaining Proved Technologically Recoverable Reserves of Shale Gas Based on the Combination of Gray Waveform and Gray Multi-dimension Model. *Natural Gas Industry*, 45(5): 180-187. (in Chinese with English abstract).
- You, Q., Wang, J. B., 2011. Constitutive Model of Statistical Damage in the Process of Rock Failure. *Journal of Guilin University of Technology*, 31(02): 225-228. (in Chinese with English abstract)
- Zhang, K., Wang, W., Gao, Y. J., et al., 2025. Experimental Investigations of the Rock Brittleness Evaluation Under Different Loading Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58: 1473-1502.
<https://doi.org/10.1007/s00603-024-04265-y>.
- Zhang, L. Y., Cao, P., Radha, K. C., et al., 2010. Evaluation of Rock Strength Criteria for Wellbore Stability Analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(8): 1304-1316.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.09.001>.
- Zhang, L., Wang, G. L., Ren, J. X., et al., 2025. Damage Failure Energy Evolution Mechanism of Jointed Sandstone Treated with Dry-Wet Cycling Action under Triaxial Compression. *Earth Science*, 50(01): 269-285. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Z., Gao, F., Liu, Z. J., 2010. Research on Rockburst Proneness and its Microcosmic Mechanism of Granite Considering Temperature Effect. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(08): 1591-1602. (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Meng, F. Z., Zhang, C. Q., et al., 2014.

Quantitative Evaluation of Rock Brittleness Based on Stress-Strain Curve[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(06): 1114-1122. (in Chinese with English abstract).

Zhu, Z. N., Tian, H., Wang, R., et al., 2021. Statistical Thermal Damage Constitutive Model of Rocks Based on Weibull Distribution. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(6): 495.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-06730-2>.

附中文参考文献

陈国庆, 吴家尘, 蒋万增, 等, 2020. 基于弹性能演化全过程的岩石脆性评价方法. *岩石力学与工程学报*, 39(05): 901-911.

丁然, 张峰, 王勇, 等, 2024. 准中深层砂岩脆性及其对岩石破裂模式的影响规律. *油气地质与采收率*, 31(03): 54-62.

冯少柯, 熊亮, 尹帅, 等, 2025. 川东南林滩场五峰组—龙马溪组深层页岩气储层脆性定量评价. *石油实验地质*, 47(04): 742-753.

胡清波, 梁海安, 杨婷, 等, 2020. 一种基于统计损伤本构关系的岩石脆性评价新方法. *哈尔滨工业大学学报*, 52(11): 147-156.

贾宝新, 陈国栋, 刘丰溥, 2022. 高温下岩石损伤本构模型及其验证. *岩土力学*, 43(S2): 63-73.

蒋邦友, 谭云亮, 王连国, 等, 2019. 基于 Mogi-Coulomb 准则的弹塑性损伤本构模型及其数值实现. *中国矿业大学学报*, 48(04): 784-792.

蒋浩鹏, 姜谔男, 杨秀荣, 2021. 基于 Weibull 分布的高温岩石统计损伤本构模型及其验证. *岩土力学*, 42(07): 1894-1902.

李天斌, 高美奔, 陈国庆, 等, 2017. 硬脆性岩石热-力-损伤本构模型及其初步运用. *岩土工程学报*, 39(08): 1477-1484.

廖安杰, 张岩, 王飞, 等, 2025. 实时高温作用下砂岩的热损伤与能量特征. *地球科学*, 50(1): 286-298.

任岚, 蒋豪, 赵金洲, 等, 2023. 基于能量演化的超深层高温页岩脆性评价方法. *地下空间与工程学报*, 19(01): 148-156.

王刚, 郑金叶, 刘义鑫, 等, 2024. 不同温度作用下砂岩微观结构变化与演化规律实验研究. *岩石力学与工程学报*, 43(03): 600-610.

王洪涛, 刘璐瑶, 张建国, 等, 2022. 基于 Hoek-

Brown 强度参数的含顶煤巷道锚索支护力预测及应用. *中国矿业大学学报*, 51(02): 244-256.

王团, 赵海波, 郑建东, 等, 2024. 岩石力学实验刻度弹性参数的页岩脆性评价方法改进. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 39(05): 35-42.

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(03): 1056-1067.

温韬, 唐辉明, 马俊伟, 等, 2019. 考虑初始损伤和残余强度的岩石变形过程模拟. *地球科学*, 44(2): 652-663.

温韬, 张馨, 孙金山, 等, 2021. 基于峰前和峰后能量演化特征的岩石脆性评价. *地球科学*, 46(9): 3385-3396.

胥勇, 王艳秋, 潘艳, 等, 2025. 中国页岩气剩余探明技术可采储量预测: 灰色波形与灰色多维度模型结合. *天然气工业*, 45(05): 180-187.

游强, 王军保, 2011. 岩石破坏过程中的损伤统计本构模型. *桂林理工大学学报*, 31(02): 225-228.

张亮, 王桂林, 任建喜, 等, 2025. 干湿循环下节理砂岩三轴压缩损伤破坏能量演化机制. *地球科学*, 50(01): 269-285.

张志镇, 高峰, 刘治军, 2010. 温度影响下花岗岩冲击倾向及其微细观机制研究. *岩石力学与工程学报*, 29(08): 1591-1602.

周辉, 孟凡震, 张传庆, 等, 2014. 基于应力-应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法. *岩石力学与工程学报*, 33(06): 1114-1122.