

考虑围压约束的深煤岩峰前-峰后能量脆性综合评价方法

时贤^{1,2}, 张博涛^{1,2}, 蒋恕³, 琚宜文⁴, 翟成⁵, 陈峥嵘⁶, 杨江浩⁷

1. 深层油气全国重点实验室(中国石油大学(华东)), 青岛 266580

2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580

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

4. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

5. 中国矿业大学安全工程学院, 徐州 221116

6. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

7. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452

摘要: 深部煤岩储层压裂开发中, 脆性评价的准确性直接影响压裂效果, 但现有方法多针对页岩设计, 难以适用于煤岩复杂的原生裂隙和围压敏感特性。为此, 本文通过三轴压缩试验获取煤岩应力-应变曲线, 引入损伤变量量化峰前裂纹演化对能量分配的非线性影响, 构建损伤-能量双参数峰前脆性指标 B_{pre} ; 结合围压动态约束效应, 建立应力降速率-围压耦合的峰后脆性指数 B_{post} , 并采用调和平均法得到了基于峰前-峰后能量特征与围压约束的煤岩脆性指数 B_{coal} 。试验结果表明, B_{coal} 能有效区分不同围压下煤岩的脆性差异, 在 5~20 MPa 围压下评价结果可靠, 且相较于传统方法具有更高的敏感性和可靠性。该研究提升了煤岩脆性评价准确性, 为煤层气压裂优化提供重要理论支撑。

关键词: 深煤岩气; 脆性评价; 峰前-峰后能量特征; 围压约束; 三轴压缩试验。

中图分类号: TU45

收稿日期: 2025-08-14

A Comprehensive Brittleness Evaluation Method for Deep Coal Reservoirs Based on Pre- and Post-Peak Energy Characteristics Under Confining Pressure Constraints

Shi Xian^{1,2}, Zhang Botao^{1,2}, Jiang Shu³, Ju Yiwen⁴, Zhai Cheng⁵, Chen Zhengrong⁶, Yang Jianghao⁷

1. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China.

2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China.

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

4. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.

基金项目: 国家自然科学基金资助 (52374027、51925404).

作者简介: 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.

5. College of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China.

6. CNOOC Research Institute Co., Ltd, Beijing 100028, China.

7. Ener Tech-Drilling and Production Co., Ltd., CNOOC, Tianjin 300452, China

Abstract: The accuracy of brittleness evaluation critically influences the effectiveness of hydraulic fracturing in deep coal reservoirs; however, conventional methods, largely developed for shale, are inadequate for coal rocks owing to their complex cleat systems and pronounced sensitivity to confining pressure. To address this, triaxial compression tests were conducted to obtain the stress-strain curves of coal rocks. A damage variable was introduced to quantify the nonlinear impact of pre-peak crack evolution on energy distribution, formulating a dual-parameter pre-peak brittleness index, B_{pre} , based on damage and energy. Incorporating the dynamic constraint effect of confining pressure, a post-peak brittleness index, B_{post} , was established by coupling the stress drop rate with confining pressure. Subsequently, a comprehensive coal brittleness index, B_{coal} , was derived by employing the harmonic mean method, integrating both pre- and post-peak energy characteristics and confining pressure constraints. Experimental results demonstrate that B_{coal} effectively differentiates the brittleness of coal rocks across varying confining pressures, demonstrating reliable evaluation within the confining pressure range of 5 to 20 MPa, and exhibits superior sensitivity and reliability over traditional methods. This study enhances the accuracy of coal brittleness evaluation, thereby providing crucial theoretical support for the optimization of coalbed methane fracturing strategies.

Keywords: Deep coalbed methane; Brittleness evaluation; Pre-peak and post-peak energy characteristics; Confining pressure effect; Triaxial compression test.

0 引言

随着煤层气勘探开发技术的不断发展，埋深超过 2000m 以上的深煤岩气已经成为下一步天然气上产的重要目标(郭旭升, 2022)。深部煤层气储层高效压裂开发的关键挑战之一在于准确评估储层条件下煤岩破裂特性，进而有效实施压裂改造进行储层高效增产。其中，脆性指数是指导储层压裂的关键参数之一，可以表征储层压裂品质，并对压裂难易程度及裂缝网络形态进行判断，以提高储层改造的针对性(白雪峰等, 2024)。脆性评价

在页岩油气等非常规储层中已得到广泛应用，并为这类油气藏的高效压裂改造提供了重要参考。相比之下，脆性指数评价在煤岩气领域的研究则相对较少，较中浅层煤岩而言，深煤岩在煤割理、围压等多重因素下变形特征更加复杂(吴海波等, 2021)。早期 Medhurst (1998) 曾揭示了煤岩强度随围压升高的非线性变化规律，但其研究未明确的量化围压对脆性演化的影响；Tarasov (2011)针对硬岩提出过“超脆性”理论，发现高围压下硬岩峰后应力降速率会急剧增大，但煤岩因有机质含量高、强度低，其围压影响下的

脆性响应与硬岩存在本质差异,该理论无法直接套用。鉴于煤岩与页岩在结构和力学特性上存在显著差异,现有针对页岩的脆性评价方法难以直接适用于煤岩。因此,发展适用于煤岩特性的脆性评价方法,对于完善煤层气储层评价体系、实现煤岩气的精准压裂与高效开发具有重要的理论价值和迫切工程需求。基于不同评价角度,国内外学者综合考虑多种影响因素,建立了多种脆性指标,见表1。可以看出,当前岩石的脆性评价方法主要聚焦于以下四个方向:

一是基于应力-应变曲线特征的评价方法,该类方法多从岩石宏观力学响应出发,分析全应力-应变曲线中的关键特征参数。如杨景祥等(2022)揭示了花岗岩侧向变形特征在脆性评价中的显著稳定性,提出聚焦峰后侧向变形,并基于侧向峰后应力-应变曲线关键参数定义了脆性指数 B_1 。宋昊等(2023)基于峰前能量转化效率、起裂应变水平及峰后应力-侧向应变曲线跌落速率等控制参数建立了脆性评价指标 B_2 。匡智浩等(2022)整合峰前应力上升速率、峰后应力跌落速率及峰值应变,构建了更具连续性的脆性指数 B_3 。陈国庆等(2018)与高美奔等(2022)均强调需贯通峰前峰后全过程;前者综合峰后应力跌落速率及峰前应力增长速率建立了评价方法 B_4 ,后者则结合峰前起裂特征与峰后应力跌落特征建立了评价方法 B_5 。Xia et al. (2017) 基于 I 类

曲线特性,提出整合峰后应力降率与破坏弹性能/总储能比的新脆性指数 B_6 。Meng et al. (2015) 则提出了综合峰后应力降大小及速率的脆性指数 B_7 ,有效表征了围压效应。

二是基于能量演化机制的评价方法,此类方法从能量守恒与转换的本质视角揭示岩石脆性破坏机理。Aubertin et al. (1997)将损伤变量与能量耗散耦合,指出损伤演化会非线性调控峰前弹性能与耗散能的分配比例,该理论为煤岩峰前脆性评价提供了核心框架。张军等(2017)指出岩石脆性断裂的本质取决于峰前耗散能与峰后断裂能,并据此建立了能量演化脆性指数 B_8 ,弥补了孤立考虑峰前或峰后能量特性的不足。刘俊新等(2022)基于能量守恒法则,分析了岩石内部弹性能转化率及轴向应变特征,从能量守恒角度阐释了脆性指标 B_9 在高温高压条件下的适用性。任岚等(2023)针对超深层高温页岩,融合矿物组分权重与能量演化参数,发展了能量-矿物耦合评价模型 B_{10} 。Tarasov et al. (2013) 基于峰后能量平衡提出了内在脆性指数 B_{11} 和 B_{12} ,其评价结果覆盖了从绝对脆性到延性的全范围力学行为。侯鹏等(2016)阐述了声发射试验中声发射参数与岩石裂纹损伤之间的关系,并据此提出了脆性指标 B_{13} 。温韬等(2021)以峰前及峰后岩石内部能量的转变及演化特征为切入点,研究了粉砂质板岩在不同围压下的脆性变化规律,提出了反映岩石脆延转

换规律的脆性评价指标 B_{14} 。

三是基于矿物组分与弹性参数的评价方法,此方向侧重岩石固有属性与工程实用便捷性,矿物组分方法需要确定脆性矿物组分,而由于弹性指数可以和测井数据建立直接关系,所以广泛应用于油气储层评价。Rickman et al. (2008)提出的经典方法,通过归一化处理后的杨氏模量和泊松比的平均值计算页岩脆性指数 B_{15} ,奠定了脆性评价的基础。Lai et al. (2009)和郭京哲等(2023)强调岩石脆性受控于力学参数、矿物组分及元素成分等多因素,进一步利用矿物组分与常规测井参数,构建了基于多矿物模型的脆性指数 B_{16} 和 B_{17} 。Guo et al. (2013)系统分析了基于弹性参数的多种脆性指数定义及其与微观结构的关联性。

四是基于强度参数与破坏特征的评价方法,该方法利用易获取的强度指标或破坏特征进行间接评价,具有简洁高效的特点。Yarali et al. (2011)采用单轴抗压强度与巴西抗拉强度的比值作为通用脆性指数 B_{18} 。Yagiz (2009)通过冲头穿透试验,直接基于最大作用力与穿透深度计算脆性指数 B_{19} ;或利用单轴抗压强度、巴西抗拉强度及岩石密度间接预测脆性指数 B_{20} 。冯涛等^[31]基于单轴抗压强度、抗拉强度及峰前、后应变定义了脆性系数 B_{21} 。Hucka et al. (1974)阐释了岩石脆性与单轴抗压强度、抗拉强度之间的关系,并提出了基于抗压-抗拉强度比的岩石脆性评价指标 B_{22}

和 B_{23} 。Lawn et al. (1979)利用压痕法获取的维氏硬度与断裂韧度表征脆性指数 B_{24} ,揭示了该指数控制压裂裂缝形态与能量耗散的机制。Quinn et al. (1997)基于变形能与断裂能的比值,并结合硬度、杨氏模量与断裂韧性建立了脆性指数 B_{25} 。

综上所述,现有研究在岩石脆性评价的多维表征方面虽然取得了显著进展,涵盖了宏观力学响应、能量转换本质、矿物力学属性、强度破坏特征及跨尺度创新模型,形成了初步的岩石脆性评价方法体系。其中,基于宏观力学响应和能量转换本质的方法被绝大多数学者所认可,主要在于此类方法涵盖了岩石从加载变形、裂缝贯穿汇聚再到完全破裂的全过程,并且包括了峰前力学以及峰后力学特征。然而,现有方法在煤岩脆性评价中仍存在一定局限:一方面,传统峰前(指从加载开始至煤岩达到峰值应力的阶段,主要发生原生孔隙/裂隙闭合、弹性储能及微裂纹萌生)评价方法忽略了煤岩原生裂隙及损伤演化对能量分配(弹性能积累与耗散能)的非线性调控作用;另一方面,现有峰后(指从峰值应力出现至煤岩失去承载能力的阶段,核心特征为微裂纹迅速扩展贯通、宏观裂缝形成,承载能力显著下降并伴随应力跌落)方法未量化围压对峰后应力降速率的动态约束效应(指深部煤岩所处围压随埋深、地层条件变化,进而对煤岩力学行为产生的

动态调控作用), 导致不同围压条件下的脆性评价结果缺乏可比性, 这就造成在深部地层条件下脆性评估偏差较大。此外, 煤岩与页岩在结构和力学特性上存在根本性差异(李熹微等, 2025), 进一步限制了现有页岩脆性评价方法在煤岩中的适用性。主要体现在: (1) 结构上: 煤岩作为有机成因的多孔介质, 发育有极其丰富的原生裂隙, 非均质性强; 而页岩的层理结构相对规则, 各向异性更显著; (2) 组成上: 煤岩富含脆性较低的有机质, 且矿物基质强度通常低于页岩中高含量的脆性矿物, 类似于石英等脆性矿物占比不高, 所以难以进行脆性矿物的确定; (3) 力学响应上:

煤岩强度低、模量低, 其力学行为对围压的变化更为敏感。在高围压下, 煤岩原生裂隙易闭合, 促使破坏模式从低围压的张性劈裂向剪切过渡, 峰后应力降行为复杂; 而页岩的力学特性相对更“脆”, 但因为本身强度较高, 所以受围压影响的变化程度以及规律都有所不同。鉴于此, 针对煤岩特有的复杂裂隙系统和围压敏感特性, 结合煤岩自身特性, 构建兼顾峰前损伤-能量耦合特征与峰后围压-应力降动态关系的综合评价模型, 以提升煤岩脆性评价科学性和准确性, 指导深部煤岩气储层实现高效开发突破。

表 1 已有岩石脆性评价方法

Table 1 Rock Brittleness Evaluation Methodologies

类别	公式	公式说明
基于应力-应变曲线特征	$B_1 = \frac{(\sigma_p - \sigma_r) / \sigma_p}{ (\varepsilon_{cr} - \varepsilon_{cp}) / \varepsilon_{cp} }$ 杨景祥等(2022)	
	$B_2 = \frac{S}{S + S_w} \cdot e^{\frac{ \varepsilon_{cr} - \varepsilon_{cp} }{\sigma_p - \sigma_r}}$ 宋昊等(2023)	
	$B_3 = \frac{1}{\varepsilon_p} \cdot \frac{\sigma_p - \sigma_{ci}}{\varepsilon_p - \varepsilon_{ci}} \cdot e^{\frac{10(\varepsilon_p - \varepsilon_r)}{\sigma_p - \sigma_r}}$ 匡智浩等(2022)	
	$B_4 = \frac{\varepsilon_p(\sigma_p - \sigma_i)}{\sigma_p(\varepsilon_p - \varepsilon_i)} + \frac{\varepsilon_p(\sigma_p - \sigma_r)}{\sigma_p(\varepsilon_r - \varepsilon_p)}$ 陈国庆等(2018)	
	$B_5 = (S \times \varepsilon_{ci}) / (\Delta S \times (\varepsilon_p - \varepsilon_{ci}))$ 高美奔等(2022)	
	$B_6 = \frac{(\sigma_p - \sigma_r)}{(\varepsilon_r - \varepsilon_p)} + \frac{(\sigma_p - \sigma_r)(\varepsilon_r - \varepsilon_p)}{\sigma_p \varepsilon_p}$ Xia et al. (2017)	
基于能量演化机制	$B_7 = (\sigma_p - \sigma_r) \lg \frac{k_{ac(AC)}}{10}$ Meng (2015)	ε_{cp} 为侧向峰值应变; ε_{cr} 为侧向残余应变; σ_p 为峰值应力; σ_r 为残余应力; $k_{ac(AC)}$ 从屈服起始点到残余起始点的连线的斜率; σ_{ci} 为起裂应力; ε_{ci} 为起裂应变; ε_p 为峰值应变; ΔS 为峰后特定区域面积
	$B_8 = \frac{dW_d^*}{dW_{e(B)} - dW_{e(A)}} \cdot \frac{dW_f}{dW_{e(B)} - dW_{e(C)}}$ 张军等(2017)	
	$B_9 = \frac{dW_f}{dW(\varepsilon_{ar}, \varepsilon_{\pi})} \times \frac{dW_f}{dW_e(\varepsilon_{ap}, \varepsilon_{\pi})} + \frac{dW_d}{dW_e(\varepsilon_{ap}, \varepsilon_{\pi})}$ 刘俊新等(2022)	
	$B_{10} = 2 / \left(1 / \frac{c_{bit} W_{pre}^{ce}}{c_{bit} W_{pre}^{ce} + c_{inbit} W_{pre}^{out}} + 1 / \frac{c_{bit} (W_{pre}^{ce} - W_{post}^{re})}{c_{bit} (W_{pre}^{ce} - W_{post}^{re}) + c_{inbit} W_{post}^{in}} \right)$ 任岚等(2023)	dW_d^* 为塑性屈服阶段的能量增量; $dW_{e(i)}$ 为岩石内部积累的弹性能增量; dW_d 为峰前耗散能; dW_f 为破坏所需的断裂能; dW_r 为发生宏观断裂的断裂能; W_{pre}^{ce} 、 W_{post}^{re} 为
	$B_{11} = (M - E) / M$ Tarasov et al. (2013)	
	$B_{12} = E / M$ Tarasov et al. (2013)	

$$B_{13} = \frac{E_2 - E_1}{E_2} \lg \frac{E_2 - E_1}{t_2 - t_1} \text{ 侯鹏等(2016)}$$

$$B_{14} = \frac{W_{d2} - W_{d1} + W_{e2} - W_{e1}}{W_{e2} - W_{e1}} \times \frac{W_{e2} - W_{e3}}{W_{e2} - W_{e3} + W_1 - W_2} \text{ 温韬等(2021)}$$

$$B_{15} = \frac{E + \mu}{2} \text{ Rickman et al. (2008)}$$

$$B_{16} = \frac{qz + car}{qz + fels + car + clay} \times 100 \text{ Lai et al. (2009)}$$

$$B_{17} = 50 \left(\frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + \frac{\mu - \mu_{\max}}{\mu_{\min} - \mu_{\max}} \right) \text{ 郭京哲等(2023)}$$

$$B_{18} = (\sigma_c \cdot \sigma_t) / 2 \text{ Yarali et al. (2011)}$$

$$B_{19} = F_{\max} / P \text{ Yagiz (2009)}$$

$$B_{20} = 0.198\sigma_c - 2.174\sigma_t + 0.913\rho - 3.807 \text{ Yagiz (2009)}$$

$$B_{21} = (\alpha \cdot \sigma_c \cdot \varepsilon_f) / \sigma_t \varepsilon_b \text{ 冯涛等(2000)}$$

$$B_{22} = \sigma_c / \sigma_t \text{ Hucka et al. (1974)}$$

$$B_{23} = (\sigma_c - \sigma_t) / (\sigma_c + \sigma_t) \text{ Hucka et al. (1974)}$$

$$B_{24} = H / K_{IC} \text{ Lawn et al. (1979)}$$

$$B_{25} = (H \cdot E) / K_{IC}^2 \text{ Quinn et al. (1997)}$$

峰前积聚的弹性能密度、岩样内部的残余弹性能; M 为峰后模量; E_1 、 E_2 、 t_1 、 t_2 分别为屈服前累积能量、破坏后残余能量、裂纹损伤及最终破坏时间

qz 为石英含量; car 为碳酸盐矿物含量; $fels$ 为长石含量; $clay$ 为黏土含量; dol 为白云石含量; lm 为方解石含量; TOC 为总有机碳含量; ω 为粒径小于 0.6 mm 的岩屑颗粒含量

σ_c 、 σ_t 分别为岩石的单轴抗压强度和抗拉强度; $F_{\max}$ 在岩石样品上的最大施加力; P 为最大力对应的穿透深度; ρ 为岩石密度; ε_f 、 ε_b 为峰前、后应变; H 为硬度; K_{IC} 为断裂韧性

基于矿物
组分与弹
性参数

基于强度
参数与破
坏特征

1 煤岩脆性评价指标的改进与综合模型构建

1.1 基于损伤-能量双参数的峰前脆性指标改进

传统峰前脆性指标往往只关注弹性阶段的能量积累,忽略了裂纹萌生至峰值应力阶段的能量耗散与损伤演化的非线性关系,导致对煤岩脆性本质特征的刻画存在局限性。此外,煤岩作为含原生裂隙的多孔介质,峰前阶段不仅存在能量的积累与耗散,还伴随着裂纹的萌生、扩展等损伤演化过程,而损伤程度直接影响能量的分配。例如,高损伤煤岩的原生裂隙会消耗更多能量用于闭合而非弹性储能,低损伤煤岩则能在相同加载条

件下积累更多弹性能。现有方法因未量化这种损伤对能量演化的影响,可能将高损伤煤岩的“低弹性能”误判为低脆性,或将低损伤煤岩的“高弹性能”简单归为高脆性,难以准确反映煤岩脆性的本质特征。图 1 通过对比具有相同宏观脆性表现(如相似的峰值应变、峰后应力下降率和残余强度水平)但损伤程度显著不同的两条假设煤岩应力-应变曲线,直观地揭示了这一矛盾:高损伤煤岩(煤岩 B)因原生裂隙消耗能量导致峰前弹性能积累(S_B)较低,而低损伤煤岩(煤岩 A)在相同加载下能积累更高弹性能($S_A > S_B$)。若仅基于单一能量参数判断,可能误判煤岩 B 脆性低、煤岩 A 脆性高,忽略了损伤状态的根本差异。

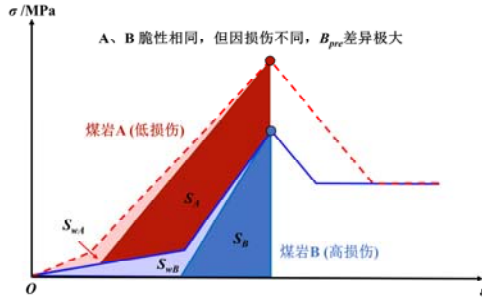


图 1 同脆性异损伤煤岩应力-应变对比图

Fig.1. Comparative analysis of stress-strain curves for coal-rock specimens with identical brittleness but varying damage levels

针对上述不足，本节对宋昊等(2023)中式(1)进行改进，提出基于损伤-能量双参数的峰前脆性计算方法 B_{pre} 。该方法核心在于引入损伤变量量化峰前裂纹演化程度，将其与能量耗散特征耦合，以修正单一能量参数的偏差。通过峰前应力-应变曲线的压密阶段与弹性阶段斜率比值定义损伤变量，直观反映原生裂隙及新生裂纹对煤岩结构的损伤程度；同时基于应力-应变曲线计算峰前弹性能与耗散能的比值，表征能量分配特征。将两者归一化后耦合构建峰前脆性指数计算方法，既能通过损伤变量区分“损伤导致的低弹性能”与“本身低脆性的低弹性能”，又能结合能量参数反映脆性潜力，从而更精准地刻画煤岩峰前脆性特征。

$$B_{pre} = \frac{S}{S + S_w} \times \left(\frac{k_{elastic}}{k_{comp}} \right) \quad (1)$$

$$S = \frac{\sigma_p(\varepsilon_p - \varepsilon_{ci})}{2} \quad (2)$$

$$S_w = \int \sigma d\varepsilon - S \quad (3)$$

式中： S 表示峰前弹性能， S_w 表示峰前耗散能。 K_{comp} 表示压密阶段斜率， $K_{elastic}$ 表示弹性阶段斜率， σ_p 表示峰值应力， ε_p 表示峰值应变， ε_{ci} 表示起裂应变。

1.2 应力降速率-围压耦合的峰后脆性指数

传统峰后评价方法多基于单一应力降参数或静态能量指标，例如通过应力-应变曲线峰后应力跌落面积或残余强度比值进行脆性量化，但这类方法未能有效揭示围压条件下应力降速率的非线性演化规律。以脆性指标 B_7 为例，假设岩石 A 与岩石 B 具有相同的峰值应力和相同的残余应力，根据 B_7 计算，二者脆性指数相同。然而，岩石 A 在显著更小的轴向应变下即达到峰值强度，表明其破坏过程更迅速、更突然，脆性程度更高；而岩石 B 则需要经历更大的轴向变形才达到峰值，表现出相对更强的延性或韧性。显然，岩石 A 的实际脆性高于岩石 B ，但传统 B_7 指标无法捕捉这种因达到峰值应力的应变差异所反映的本质区别。图 2 展示了 B_7 （以及类似原理的 B_8 ）在此类情况下的评价盲区。此外，脆性指标 B_3 、 B_4 、 B_5 中所使用的起裂应力及起裂应变获取难度较大，误差不易控制，因此计算结果的可靠度不高。传统方法多基于单一应力降参数或静态能量指标，未能有效揭示围压条件下应力降速率的非线性演化规律。

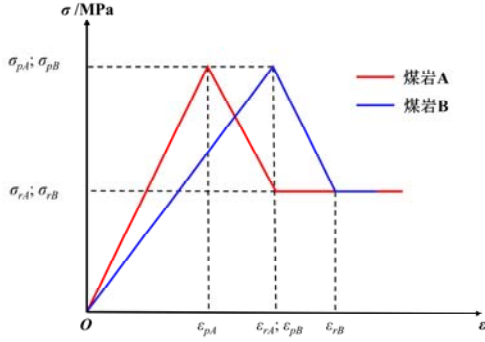


图2 脆性指标 B_7 、 B_8 未能反映的情况

Fig. 2. Limitations of brittleness indices B_7 and B_8

针对上述局限性，本文提出一种应力降速率-围压耦合的峰后脆性指数计算方法 B_{post} ，其核心思想是通过量化应力降速率与围压的动态响应关系，实现对煤岩峰后脆性的精细化评价。

$$B_{post} = 0.2543 \ln \left(1 + \frac{\dot{\sigma}_{max}}{R_{ref}} \right) \times e^{-0.12P_c} \quad (4)$$

$$\dot{\sigma}_{max} = \max \left(\left| \frac{\Delta \sigma_{init}}{\Delta \varepsilon_{init}} \right| \right) \quad (5)$$

$$R_{ref} = R_0 \cdot e^{-k_r P_c} \quad (6)$$

式中： $\dot{\sigma}_{max}$ 为峰后初始阶段应力随轴向应变下降的最大速率（MPa / 应变）； R_{ref} 为基于围压的参考应力降速率； P_c 为围压，MPa； $\Delta \sigma_{init}$ 为峰后前 1/3 数据段中相邻点的应力差（ $\sigma_{i+1} - \sigma_i$ ）； $\Delta \varepsilon_{init}$ 为峰后前 1/3 数据段中相邻点的轴向应变差（ $\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i$ ）； R_0 为零围压基准值，MPa/应变，取 500； k_r 为围压衰减系数（基于围压 5~20 MPa 与峰后应力降速率的非线性拟合结果）， MPa^{-1} ，取 0.05。

1.3 煤岩综合脆性评价模型

为综合考虑峰前损伤-能量耦合特征与峰后应力降-围压动态响应对煤岩脆性的协同影响，采用调和平均方法，将峰前脆性指标 B_{pre} 与峰后脆性指数 B_{post} 进行耦合，得到最终的煤岩脆性指数 B_{coal} ，其计算公式如下：

$$B_{coal} = \frac{2}{1/B_{pre} + 1/B_{post}} \quad (7)$$

本研究采用调和平均法耦合峰前与峰后脆性指标，主要基于其数学特性与煤岩脆性破坏的物理机制高度契合。调和平均对序列中的较小值更为敏感(王汉青等, 2016)。煤岩的整体脆性破坏是一个协同过程，若峰前弹性性能积累不足，则缺乏破裂驱动力；若峰后能量释放受围压抑制而缓慢，则破坏过程呈现延性特征。调和平均恰好强制要求 B_{pre} 与 B_{post} 均需具有较高值，才能使综合指数 B_{coal} 保持高位。任一指标的显著降低都会对 B_{coal} 产生显著的惩罚性效应，这更符合“能量积累-释放”协同机制下脆性评价的物理实际。

2 煤岩三轴压缩试验

2.1 试验样品制备及方案

为验证第 1 章所建立的峰前脆性指标 B_{pre} 、峰后脆性指标 B_{post} 及综合脆性评价模型 B_{coal} 的有效性，尤其是其对围压变化响应的敏感性，本章设计并开展了一系列煤岩常规三轴压缩试验。

本研究以鄂尔多斯盆地东缘临兴、神府地区埋深约 2022 m 的 8+9 号煤层的煤岩样品为研究对象。该层位煤体结构以原生结构煤和碎裂煤为主，宏观煤岩类型以亮煤和半亮煤为主导。显微组分中镜质组含量较高，约为 60%~90%，平均镜质体反射率约 1.1%~1.5%，属中高阶烟煤（安琦等，2024）；结合扫描电镜观察显示，镜质体多沿层理方向分布，内部发育气孔带，部分气孔破裂连通形成微孔隙，进一步印证中高阶烟煤的有机组分特征。同时煤岩割理系统发育，宏观面割理密度约 5~8 条/5cm，端割理密度约 3~5 条/5cm；微观尺度可见非贯穿性微裂隙，部分裂隙内局部充填方解石或高岭石，无宏观贯穿性裂隙（如图 3）。

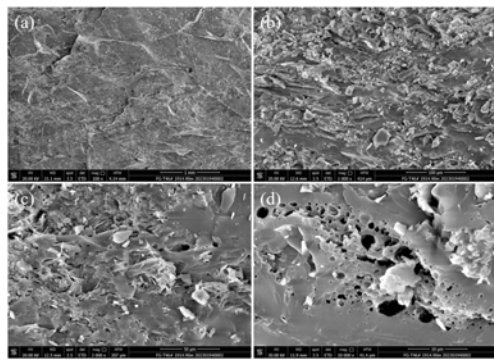


图 3 煤岩微观结构扫描电镜图: (a) 放大 100 倍 (b) 放大 1000 倍 (c) 放大 2000 倍 (d) 放大 10000 倍
Fig. 3. Scanning Electron Microscope Images of Coal-Rock Microstructure: (a) Magnification $\times 100$ (b) Magnification $\times 1000$ (c) Magnification $\times 2000$ (d) Magnification $\times 10000$

所有试样均垂直于煤层层理方向钻取，以聚焦煤岩基质本身的力学特性并便于与现有岩石力学研究成果对比。该深度下产层有

效围压可达约 25.5 MPa（李皋等，2025），样品本身具备典型深部煤岩的地质与力学属性。本研究主要为了系统揭示围压变化对煤岩脆性评价指标影响的基本规律与内在机制，设定了 5 - 20 MPa 的围压三轴压缩试验范围，以有效捕捉煤岩脆性特征随围压变化的敏感响应区间和演化趋势。为控制样品均一性、减小先存裂缝带来的离散性，首先，通过密度测量和纵波波速测试筛选物性参数集中的岩心；其次，结合肉眼观察和 CT 扫描，排除含有宏观、贯穿性先存裂缝的样品；最终，通过对比初期的力学响应，确保入选样品在宏观力学行为上具有高度可比性。需说明的是，深部煤岩作为非均质性极强的多孔介质，其内部发育微裂隙、割理及取芯应力释放诱发的微损伤是客观工程现实，因此本研究未简单剔除含局部先存微裂隙的样品，而是通过上述筛选流程保障所有样品的宏观力学属性处于可比水平。按《岩石力学试验方法标准》（GB/T 50266—2013）初步制备直径 25 mm、高度 46.71~49.46 mm 的圆柱样 26 块，经后续实验与数据质量检查，剔除 4 块因原生裂隙导致破坏或数据缺失的岩心，最终确定 22 块有效岩心用于分析。通过表 2 制定的实验方案研究围压对煤岩力学行为及脆性指标的影响，试样平均尺寸及物性参数如表 2 所示，样品试验前照片如图 4 所示。由表 2 可知，有效岩样物性基本一致，进一步

保证了试验结果的可比性。

表 2 试样的物性参数

Table 2 Physical properties of the tested specimens

编号	围压(MPa)	平均高度 (mm)	平均直径 (mm)	平均密度 (g/cm ³)	平均质量 (g)	实验组数
1	5	46.80	25.23	1.36	31.03	9
2	10	47.76	25.25	1.35	32.34	9
3	15	46.71	25.26	1.39	32.55	2
4	20	49.46	25.24	1.43	35.30	2



图 4 试验所用标准岩心柱样品

Fig.4. Representative standard core plug samples utilized in the testing

2.2 试验设备及系统

本试验采用深层油气全国重点实验室的 GCTS-2000 伺服控制岩石力学三轴实验系统，如图 5 所示，系统可模拟地层温度、压力条件下多类型岩石力学实验，其技术指标为：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 0~210MPa，温度加载范围为 0~200℃。采用位移控制对样品连续加载，以速率为 0.002 mm/s 一次加载至破坏,计算机全程记录破坏过程中的载荷、变形随时间的变化。



图 5 GCTS-2000 三轴应力实验机

Fig. 5. GCTS-2000 triaxial stress testing apparatus

2.3 试验步骤

加载过程分为两个主要阶段：首先以 0.05 MPa/s 的恒定速率同步施加围压与轴向应力，直至达到预设的 5、10、15、20 MPa 围压值。这一阶段通过应力控制模式确保围压与轴向应力的协同加载，使岩样在三维应力状态下均匀受压。待围压和轴向应力稳定后，即通过压力传感器监测确认应力波动幅度小

于 1%且持续 5 分钟以上后切换至位移控制模式，以 0.002 mm/s 的速率对岩样进行连续匀速加载直至发生劈裂破坏。该阶段通过高精度伺服控制系统实现位移控制精度误差小于 0.5%，确保加载过程的稳定性与数据可靠性。

3 不同围压条件下煤岩的力学特性分析

3.1 试样破坏形态分析

为研究不同围压条件下常规三轴压缩煤岩的破坏差异，采集了所有试样破坏后的高清图像进行形态学分析。观察发现，煤岩破坏模式随围压升高呈现显著规律性变化（如图 6 所示）：低围压下试样以劈裂破坏为主，至高围压时，试样普遍沿清晰滑移面发生剪切破坏。



图 6 不同围压条件下煤岩压缩试验破坏特征

Fig. 6. Failure characteristics of coal-rock under triaxial compression at varying confining pressures

上述围压效应导致的破坏模式转变规律，在单个岩心经历不同围压试验时表现尤为清晰。图 7 和图 8 分别展示了岩心 F-T33-4D 和 S-72-9D 在不同围压等级（5、10、15、20 MPa）下的破坏形态演变过程。由图可见，煤岩破坏模式随围压升高呈现显著差异：低围压下试样以劈裂破坏为主，破裂面粗糙且伴有端部碎片剥落；随围压增大，破坏形态向单一剪切面转化，断面趋于平整，碎片减少；

至高围压时，试样普遍沿清晰滑移面发生剪切破坏（图 7d、图 8d）。其机理在于：三向应力作用下，轴向应力超越弹性极限后，微观裂纹沿最大剪应力面定向扩展；高围压抑制次级裂纹发育，促使主剪切带集中贯通。一旦主剪切面形成，摩擦阻力因法向应力增大而骤降，引发应力崩溃式跌落，最终表现为脆性主导的剪切破坏。

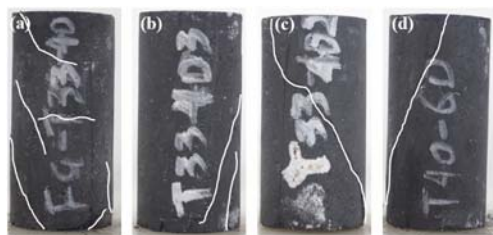


图 7 F-T33-4D 岩心在不同围压下的破坏形态: (a) 5MPa (b) 10MPa (c) 15MPa (d) 20MPa

Fig. 7. Failure morphology of core F-T33-4D under varying confining pressures: (a) 5MPa (b) 10MPa (c) 15MPa (d) 20MPa

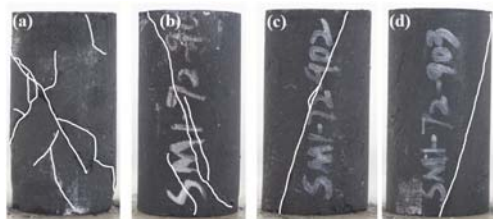


图 8 S-72-9D 岩心在不同围压下的破坏形态:

(a) 5MPa (b) 10MPa (c) 15MPa (d) 20MPa

Fig. 8. Failure morphology of core S-72-9D under varying confining pressures: (a) 5MPa (b) 10MPa (c) 15MPa (d) 20MPa

3.2 应力-应变曲线分析

煤岩在三轴压缩下的变形破坏过程呈现典型的四阶段特征（如图 9 所示）：初始压密阶段（OA 段），内部孔隙与原生裂隙逐渐闭合，体积应变增大并伴随初始塑性变形；弹性变形阶段（AB 段），应力-应变呈线性关系，主要表现为可恢复的弹性变形（其弹性模量随围压增大而提高），塑性变形趋于稳定；稳定破裂发展阶段（BC 段），次生与原生缺陷相互贯通形成破坏裂缝，变形由弹性主导转向塑性主导，损伤加剧，体积由压缩转为膨胀，塑性应变非线性加速增长直至峰值强度；峰值及峰后破坏阶段（CD 段），微裂纹迅速

扩展并贯通形成宏观裂缝，导致煤岩发生脆性破坏，承载能力显著下降并伴随应力跌落现象。煤岩的破裂过程虽遵循上述经典四阶段规律，但其力学响应与砂岩、花岗岩等典型脆性岩石存在显著差异。首先，煤岩的峰值强度显著偏低，本研究试样在 10 MPa 围压下的峰值强度范围约为 56.91 MPa，远低于同等围压下中红砂岩（约为 132.85MPa）、花岗岩（约为 196.35MPa）和页岩（约为 146.45MPa）的强度水平（龚诚鑫等，2022；赵珠宇等，2025）。这主要源于煤岩作为有机多孔介质，其内部发育大量随机分布的微裂隙、割理及低强度的有机质组分，极大地削弱了其整体承载能力有关。此外，煤岩对围压的敏感性更高，其力学参数随围压增大的增幅更为显著，表明围压对煤岩原生裂隙的闭合效应及结构整体性的提升作用远比致密岩石强烈。高围压不仅提升煤岩强度，更会显著改变其破坏模式和峰后行为，体现为从低围压的分散式劈裂破坏向高围压的集中式剪切破坏转变，脆性随之减弱。因此，煤岩破裂过程的“典型性”在于其遵循宏观规律，而“特殊性”则源于其自身弱面结构导致的强度低、变形大、围压效应极敏感等内在属性，本研究提出的脆性评价模型正是为了精准捕捉这些特殊性而构建。

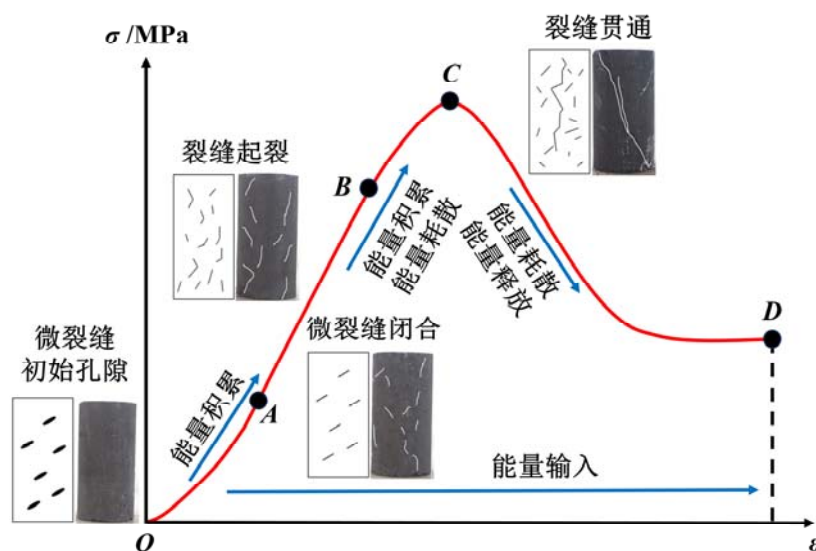


图 9 岩石应力—应变曲线及能量转化示意图

Fig. 9. Schematic of rock stress-strain behavior and associated energy conversion

为直观揭示围压对煤岩变形破坏全过程的影响规律，图 10 展示了不同区块典型岩样（临兴、神府区块等）在不同围压下的完整应力-应变曲线对比。从图中可以观察到，围压对曲线形态的影响具有显著规律性：随着围压从 5 MPa 增至 10 MPa，所有岩样的峰值应力点均向高应力-高应变方向移动，且弹性阶段的线性段斜率（对应弹性模量）明显增

大；同时，峰后应力跌落的陡峭程度逐渐增加，低围压下峰后应力下降较为平缓，而高围压下曲线峰后段近乎垂直跌落。这些现象表明，围压不仅提升了煤岩的承载能力，还改变了其破坏模式的脆性特征——这与上一章节中破坏形态随围压的转变规律（劈裂破坏向剪切破坏过渡）高度吻合。



图 10 不同围压下应力应变曲线: (a) L-90-3D; (b) L-102; (c) L-112; (d) L-69-1D; (e) L-55-7D; (f) S-37-1D; (g) S-85-6D; (h) F-T33-4D; (i) S-72-9D

Fig. 10. Stress-strain curves under varying confining pressures: (a) L-90-3D; (b) L-102; (c) L-112; (d) L-69-1D; (e) L-55-7D; (f) S-37-1D; (g) S-85-6D; (h) F-T33-4D; (i) S-72-9D

结合图 9 的能量转化逻辑分析, 实验结果揭示了围压对煤岩破坏行为的复杂调控作用。由于煤岩原生裂隙发育显著, 在低围压下, 加载初期时部分输入能量被消耗于裂隙的闭合与摩擦滑移, 导致有效弹性储能效率较低(弹性模量低, 弹性段斜率小)。峰后阶段, 由于裂隙网络的分散性, 微裂纹扩展和贯通路径相对复杂, 能量释放过程相对平缓, 宏观表现为应力跌落速率较低, 残余强度相对明显, 整体脆性特征较弱。随着围压逐渐

升高, 围压有效促进了原生裂隙的闭合, 显著提升了煤岩结构的整体性和致密性。这导致弹性模量增大, 岩石在破坏前能够积累更高密度的弹性能。峰后阶段, 致密化的结构使得裂纹一旦起裂便倾向于沿优势面(如最大剪应力面)快速贯通, 引发能量的集中、快速释放, 宏观表现为峰后应力降速率急剧增大, 脆性破坏特征显著增强。

3.3 围压对力学参数的定量影响分析

为定量揭示围压对煤岩力学参数的调控规律，进一步提取应力-应变曲线中的关键力学参数，以定量揭示围压与煤岩力学特性的

关联规律。表 3 汇总了 22 组有效试样的峰值强度、弹性模量（弹性阶段线性段斜率计算值）及泊松比（侧向应变与轴向应变比值）等参数。

表 3 三轴压缩试验结果

Table 3 Triaxial compression test results

岩心号	围压 (MPa)	偏应力 (MPa)	弹性模量 (GPa)	泊松比
L-90-3D-2	5	50.15	5.29	0.402
L-90-3D	10	66.15	5.48	0.399
L-102-2	5	43.68	4.66	0.385
L-102	10	58.99	4.85	0.383
L-112-2	5	36.76	3.85	0.419
L-112	10	50.23	4.11	0.426
L-69-1D-2	5	23.92	2.52	0.383
L-69-1D	10	40.20	4.73	0.380
L-55-7D-2	5	33.14	4.02	0.370
L-55-7D	10	52.47	4.83	0.396
S-37-1D-2	5	42.69	5.22	0.402
S-37-1D	10	58.93	5.29	0.390
S-85-6D-2	5	37.82	3.67	0.398
S-85-6D	10	67.79	4.99	0.389
F-T33-4D	5	39.14	4.59	0.385
F-T33-4D-3	10	60.79	5.65	0.372
F-T33-4D-2	15	63.85	5.69	0.383
F-T33-6D	20	72.11	7.16	0.387
S-72-9D-4	5	37.41	4.28	0.377
S-72-9D	10	56.60	5.32	0.386
S-72-9D-2	15	63.57	5.53	0.394
S-72-9D-3	20	76.45	5.72	0.408

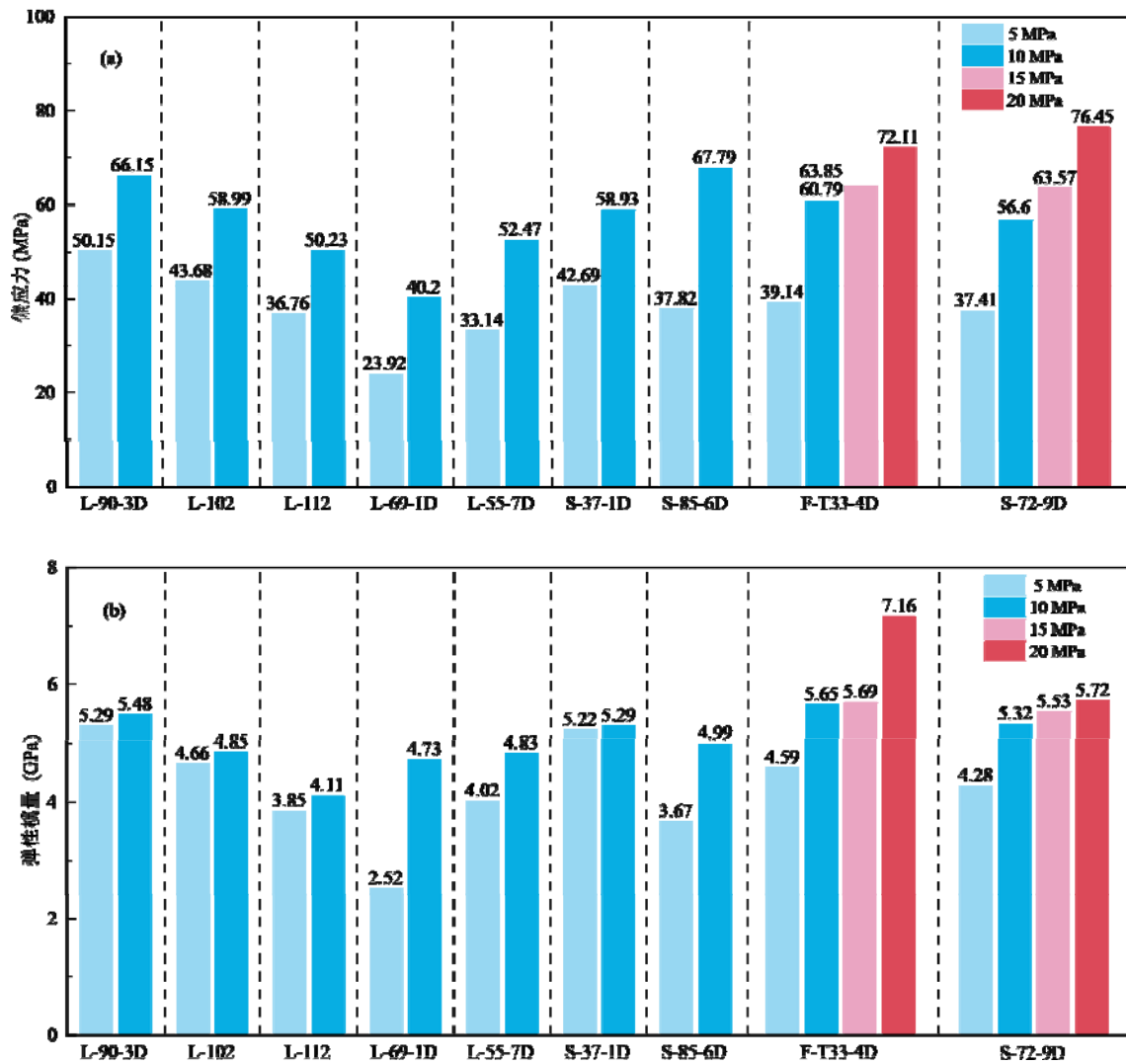


图 11 不同围压下煤岩力学参数: (a) 偏应力; (b) 弹性模量

Fig. 11. Mechanical Parameters of Coal and Rock Under Different Confining Pressures: (a) Deviatoric Stress; (b) Elastic Modulus

由表 3 及图 11 数据可知, 围压对煤岩力学参数的影响呈现显著规律性, 在 5~20 MPa 围压范围内, 所有岩样的峰值强度随围压增大而递增, 如 L-90-3D 岩样在围压 5 MPa 时抗压强度为 50.15 MPa, 围压增至 10 MPa 时提升至 66.15 MPa, 增幅达 31.9%; 弹性模量同样表现出随围压增大而增长的趋势, S-72-9D 岩样在围压 5 MPa 时弹性模量为 4.28 GPa, 20 MPa 围压下增至 5.72 GPa, 增幅 33.6%。这一趋势进一步验证了围压的核心作

用: 通过闭合原生裂隙提升煤岩致密性, 同时增强内部结构整体性, 从而提高承载能力与刚度。然而, 在高围压下, 尽管强度与模量持续提升, 但结合图 7d、8d 中清晰的单一剪切面的破坏形态及图 10 中峰后应力跌落速率趋缓的应力-应变曲线特征, 表明围压的约束效应已显著抑制裂纹的失稳扩展, 促使破坏过程包含更多塑性变形成分, 导致宏观脆性程度较低围压时降低。这种脆性变化规律, 对煤层气压裂施工中优化围压窗口具有重要

指导意义。

4 基于三轴试验下的煤岩脆性评价指标合理性验证

4.1 不同脆性评价方法的对比分析

本文将表 1 中基于应力-应变曲线特征的 7 种脆性评价方法 (B_1 、 B_3 等) 与本文提出的脆性指标 B_{coal} 进行对比验证。选取依据如下: 首先, 所选方法均基于应力-应变曲线, 与 B_{coal} 的评价机理一致, 可避免因评价维度不同 (如矿物组分、强度参数) 而引入的对比偏差; 其次, 这 7 种方法在现有研究中应用广泛且认可度高, 涵盖了峰前、峰后及全过程等不同评价视角, 具有良好的代表性。如图 12 所示, 基于 B_1 和 B_9 计算的脆性特征曲线呈现先增大后减小的趋势, 其评价结果与实际情况存在偏差, 难以有效区分不同围压下煤岩的脆性程度。采用 B_3 、 B_7 、 B_8 计算的脆性特征曲线变化趋势较为平缓, 不同围压条件下的脆性指标差异较小, 因此同样难以准确反映脆性特征。基于 B_4 计算的脆性特征曲线数值普遍偏高, 超出常规煤岩的脆性范围, 且计算所得脆性指标表现出增大、减小又增大的变化特点, 表明其评价结果与围压未呈现显著相关性。相比之下, 采用 B_6 和 B_{coal} 评价的脆性特征表明, 随着围压增加, 岩样脆性程度下降, 揭示了围压对岩石脆性特征的抑制

作用。综上, 本文提出的脆性指标 B_{coal} 能够对不同围压下煤岩脆性进行合理有效的评定。基于峰前-峰后能量特征及围压约束建立的煤岩脆性评价指标 B_{coal} 具有较强适用性。在 5~20 MPa 围压范围内, 该指标合理揭示了煤岩脆性随围压增大而减小的规律, 能够有效评价较低围压条件下的煤岩脆性程度。

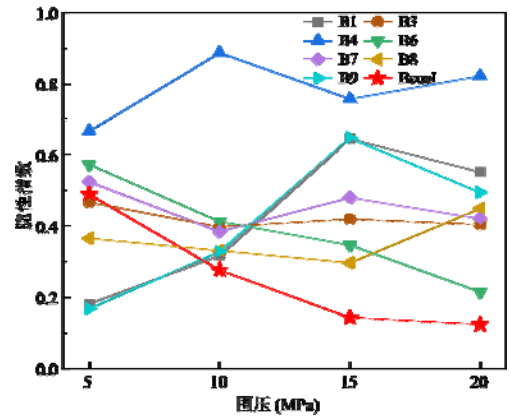


图 12 不同围压条件下煤岩的脆性指标评价结果
Fig. 12. Evaluation of coal-rock brittleness indices under varying confining pressures

4.2 基于 B_{coal} 的煤岩脆性围压效应验证

为验证 B_{coal} 指标对围压效应的敏感性及其评价结果的可靠性, 本节基于三轴压缩试验结果, 重点分析不同围压下 B_{coal} 值的变化规律。通过两组典型岩心的全围压序列及多组岩心的双围压对比, 系统揭示煤岩脆性随围压升高的衰减特征。



图 13 不同围压下两组煤岩的脆性指数对比

Fig. 13. Comparison of brittleness indices between two coal-rock groups under varying confining pressures

如图 13 所示, S-72-9D 与 F-T33-4D 两组岩心在围压由 5 MPa 增至 20 MPa 过程中, 其 B_{coal} 值均呈现显著的单调递减趋势。以 S-72-9D 为例, 其 B_{coal} 值从围压 5 MPa 时的 0.48967 下降至 20 MPa 时的 0.12378, 降幅达

74.7%。F-T33-4D 岩心亦表现出相似规律。这一结果直观且定量地证实了围压对煤岩脆性行为的强约束作用。随着围压增大, 煤岩峰前原生裂隙闭合程度提高、新生裂纹扩展受限, 同时峰后应力降速率受围压抑制效应(体现在 B_{post} 计算中)显著减缓, 共同导致其宏观破坏行为由低围压下的剧烈脆性破坏向高围压下的相对延性化转变, B_{coal} 值随之降低。

为进一步验证 B_{coal} 评价围压效应的普适性, 图 14 展示了临兴(LX)与神府(SM)区块共七组有效岩心在 5 MPa 和 10 MPa 围压下的 B_{coal} 值对比结果。

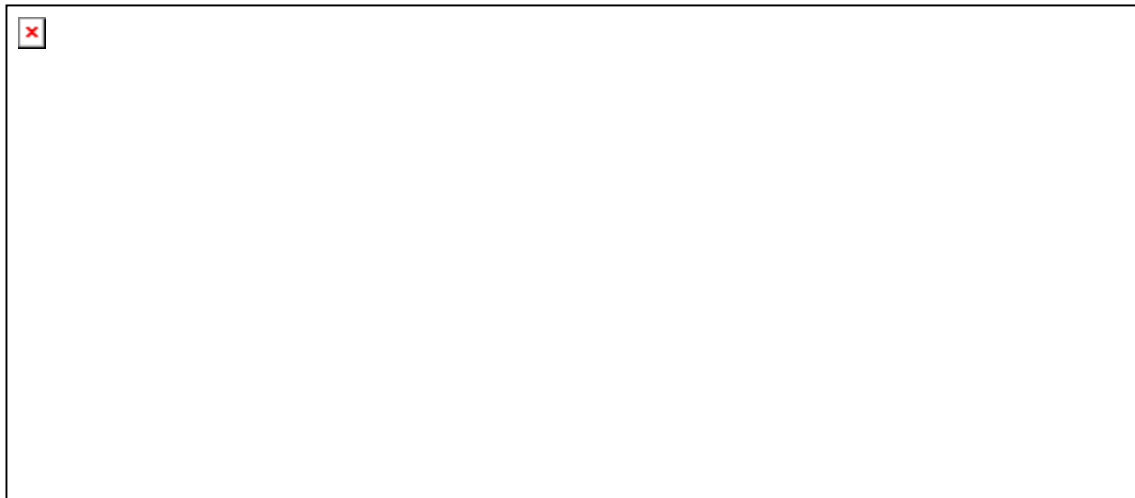


图 14 不同围压下七组煤岩的脆性指数

Fig. 14. Brittleness indices for seven coal-rock groups under varying confining pressures

结果显示, 所有岩心在 10 MPa 围压下的 B_{coal} 值均低于 5 MPa, 这与图 11 的规律一致, 证实了 B_{coal} 对不同区块煤岩的适用性。

5 结论

本研究针对现有深部煤岩脆性评价方法

在量化峰前损伤-能量耦合机制及峰后围压动态约束效应方面的不足, 提出并验证了一种基于峰前-峰后能量特征与围压约束的综合脆性评价方法 B_{coal} 。核心研究结论如下:

(1) 通过引入损伤变量并与峰前弹性能/耗散能比值耦合, 建立了损伤-能量双参数峰

前脆性指标 B_{pre} 。该方法有效区分了“损伤导致的低弹性能”与“本质低脆性的低弹性能”，显著克服了传统单一能量指标在评价含原生裂隙煤岩时存在的误判风险。

(2) 提出并量化了应力降速率与围压的动态耦合关系，构建了应力降速率-围压耦合的峰后脆性指数 B_{post} 。模型精细量化了围压对峰后应力降速率的动态约束效应，解决了传统基于无法有效反映不同围压下煤岩脆性真实差异以及起裂参数获取困难的问题。

(3) 采用调和平均法整合改进的峰前指标和峰后指标，建立了煤岩综合脆性评价模型 B_{coal} 。实现了对煤岩峰前损伤-能量非线性分配和峰后围压-应力降速率动态约束机制的综合描述，能够同时反映岩石内部能量演化特征及其所受外部围压条件的综合影响。

(4) 通过系统的煤岩三轴压缩试验验证了 B_{coal} 的合理性与有效性。结果表明， B_{coal} 不仅能够合理揭示煤岩脆性随围压升高而显著降低的客观规律，其评价结果相较于多种现有方法具有更好的敏感性、可靠性和对围压效应的解释能力。

本研究基于实际地层压力背景设定了围压条件，成功揭示了围压对煤岩脆性的独立影响规律。尽管未考虑温度耦合效应，但所提出的评价方法为深部煤岩脆性研究提供了重要基础。未来工作将引入温度变量，开展温-压耦合条件下的脆性评价研究，以完善模

型并更全面地表征深部地质环境下的煤岩力学行为。

符号	物理意义	单位
ε_{cp}	侧向峰值应变	无量纲
ε_{cr}	侧向残余应变	无量纲
σ_p	峰值应力	MPa
σ_r	残余应力	MPa
$k_{ac(AC)}$	屈服起始点到残余起始点的连线的斜率	无量纲
σ_{ci}	起裂应力	MPa
ε_{ci}	起裂应变	无量纲
ε_p	峰值应变	无量纲
ΔS	峰后特定区域面积	无量纲
$dW_{\cdot d}$	塑性屈服阶段的能量增量	$J \cdot mm^{-3}$
$dW_{e(i)}$	在 i 时刻积累的弹性能增量	$J \cdot mm^{-3}$
dW_d	发生宏观断裂的断裂能	$10^5 J$
dW_f	破坏所需的断裂能	$10^5 J$
dW_r	发生宏观断裂的断裂能	$10^5 J$
W_{pre}^{xe}	峰前积聚的弹性能密度	MPa
W_{post}^{re}	岩样内部的残余弹性能	MPa
M	峰后模量	MPa
E_1	屈服前累积能量	MPa
E_2	破坏后残余能量	MPa
t_1	裂纹损伤时间	s
t_2	最终破坏时间	s
qz	石英含量	无量纲
car	碳酸盐矿物含量	无量纲
$fels$	长石含量	无量纲
$clay$	黏土含量	无量纲
dol	白云石含量	无量纲
lm	方解石含量	无量纲
TOC	总有机碳含量	无量纲
ω	粒径小于 0.6 mm 的岩屑颗粒含量	无量纲
σ_c	岩石的单轴抗压强度	MPa
σ_t	岩石的抗拉强度	MPa
F_{max}	岩石样品上的最大施加力	kN
P	最大力对应的穿透深度	mm
ρ	岩石密度	KN/m^3
ε_f	峰前应变	无量纲
ε_b	峰后应变	无量纲

H	岩石硬度	$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$
K_{IC}	岩石断裂韧性	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$
S	峰前弹性能	$\text{MPa} \cdot \text{应变}$
S_w	峰前耗散能	$\text{MPa} \cdot \text{应变}$
K_{comp}	压密阶段斜率	$\text{MPa}/\text{应变}$
$K_{elastic}$	弹性阶段斜率	$\text{MPa}/\text{应变}$
σ_{max}	峰后初始阶段应力随轴向应变下降的最大速率	$\text{MPa}/\text{应变}$
R_{ref}	基于围压的参考应力降速率	$\text{MPa}/\text{应变}$
P_c	围压	MPa
$\Delta\sigma_{init}$	峰后前 1/3 数据段中相邻点的应力差	MPa
$\Delta\varepsilon_{init}$	峰后前 1/3 数据段中相邻点的轴向应变差	无量纲
R_0	零围压基准值	$\text{MPa}/\text{应变}$
k_r	围压衰减系数	MPa^{-1}
B_{pre}	峰前脆性指标	无量纲
B_{post}	峰后脆性指数	无量纲
B_{coal}	煤岩脆性指数	无量纲

References

- Guo, X. S., 2022. Discussion and Research Direction of Future Onshore Oil and Gas Exploration in China. *Earth Science*, 47(10): 3511-3523, (in Chinese with English abstract).
- Bai, X. F., Wang, M., Wang, X., et al., 2024. Evaluation of Shale Oil Sweet Spot and Rich Area in Jurassic Lianggaoshan Formation, Northeast Sichuan Basin. *Earth Science*, 49(12): 4483-4500, (in Chinese with English abstract).
- Wu, H. B., Dong, S. H., Zhang, P. S., et al., 2021. Brittleness index calculation and analysis for coal samples based on ultrasonic test data. *Progress in Geophysics*, 36(03): 1138-1144, (in Chinese with English abstract).
- Medhurst, T.P., Brown, E.T., et al., 1998. A Study of the Mechanical Behaviour of Coal for Pillar Design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(8): 1087-1105. doi: [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(98\)00168-5](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00168-5).
- Tarasov, B.G., Randolph, M.F., et al., 2011. Superbrittleness of Rocks and Earthquake Activity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(6): 888-898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.06.013>.
- Yang, J. X., Feng, T., Zeng, Y. W., et al., 2022. A new method to evaluate the brittleness of granite based on lateral deformation. *Engineering Journal of Wuhan University*, 55(08): 786-792, (in Chinese with English abstract).
- Song, H., Xia, M., Ren, G. M., 2023. Rock brittleness evaluation method based on pre peak energy evolution and post peak lateral deformation characteristics. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 50(06): 723-733, (in Chinese with English abstract).
- Kuang, Z. H., Li, S. J., Du, C. X., et al., 2022. Evaluation index of rock brittleness considering stress change rate. *Rock and Soil Mechanics*, 43(S1): 293-300, (in Chinese with English abstract).
- Chen, G. Q., Zhao, C., Wei, T., 2018. Evaluation method of brittle characteristics of rock based on full stress-strain curve and crack initiation stress. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(01): 51-59, (in Chinese with English abstract).
- Gao, M. B., Li, T. B., Chen, G. Q., 2022. Brittleness evaluation method based on pre-peak crack initiation and post-peak characteristics of rock. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 44(04): 762-768, (in Chinese with English abstract).
- Xia, Y. J., Li, L. C., Tang, C. A., et al., 2017. A New Method to Evaluate Rock Mass Brittleness Based on Stress - Strain Curves of Class I. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 1123-1139. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1174-6>.
- Meng, F., Zhou, H., Zhang, C., et al., 2015. Evaluation Methodology of Brittleness of Rock Based on Post-Peak Stress - Strain Curves. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 1787-1805.

<https://doi.org/10.1007/s00603-014-0694-6>.

- Aubertin, M., Simon, R., et al., 1997. A Damage Initiation Criterion for Low Porosity Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3–4): 17.e1-17.e15. doi: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00145-7](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00145-7).
- Zhang, J., Ai, C., Li, Y. W., et al., 2017. Brittleness evaluation index based on energy variation in the whole process of rock failure. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(06): 1326-1340, (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. X., Li, J. R., Yin B. R., et al., 2022. New brittleness index based on energy balance and analysis of failure mechanism of shale. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(04): 734-747, (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Tarasov, B., Potvin, Y., 2013. Universal Criteria for Rock Brittleness Estimation under Triaxial Compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 59: 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.011>.
- Hou, P., Gao, F., Zhang, Z. Z., et al., 2016. Evaluation method of rock brittleness based on acoustic emission and energy evolution. *Journal of China University of Mining & Technology*, 45(04): 702-708, (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(09): 3385-3396, (in Chinese with English abstract).
- Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., et al., 2008. A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Colorado. doi: <https://doi.org/10.2118/115258-MS>.
- Lai, J., Wang, J. W., Huang, L. X., et al., 2015. Brittleness index estimation in a tight shaly sandstone reservoir using well logs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27(03): 1536-1545. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.10.020>.
- Guo, J. Z., Guo, X. J., Zhao, M., et al., 2023. Conventional logging evaluation method of brittleness index of tight sandstone based on multi-mineral model: a case study of Chang7 member in Tongchuan area, Ordos basin. *Progress in Geophysics*, 38(04): 1590-1602, (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. Q., Li, X. Y., Liu, C., et al., 2013. A shale rock physics model for analysis of brittleness index, mineralogy and porosity in the Barnett Shale. *Journal of Geophysics and Engineering*, 10(02): 025006. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/10/2/025006>.
- Yarali, O., Kahraman, S., 2011. The drillability assessment of rocks using the different brittleness values. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(02): 406-414. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.11.013>.
- Yagiz, S., 2009. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(01): 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.04.002>.
- Feng, T., Xie, X. B., Wang, W. X., et al., 2000. Brittleness of Rocks and Brittleness Indexes for Describing Rockburst Proneness. *Mining and Metallurgical Engineering*, 20(04): 18-19, (in Chinese with English abstract).
- Hucka, V., Das, B., 1974. Brittleness Determination of Rocks by Different Methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11(10): 389-392. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)91109-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)91109-7).
- Lawn, B. R. and Marshall, D. B., 1979. Hardness,

Toughness, and Brittleness: An Indentation Analysis. *Journal of the American Ceramic Society*, 62(07): 347-350. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1979.tb19075.x>.

- Quinn, J. B., Quinn, G. D., 1997. Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach. *Journal of Materials Science*, 32: 4331-4346. <https://doi.org/10.1023/A:1018671823059>.
- Li, X. W., Liu, H. T., Ning C. B., et al., 2025. The Hydrocarbon Generation Characteristics of the Upper Paleozoic Coaly Bearing Source Rocks and Its Main Controlling Factors in the North of the Jizhong Depression. *Earth Science*, 50(05): 1917-1932, (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Q., Chen, J. B., Zhang, J., et al., 2016. A New Method of Fracability Evaluation of Shale Gas Reservoir Based on Weight Allocation. *Petroleum Drilling Techniques*, 44(03): 88-94, (in Chinese with English abstract).
- An, Q., Yang, F., Yang, R. Y., et al., 2024. Practice and understanding of deep coalbed methane massive hydraulic fracturing in Shenfu Block, Ordos Basin. *Journal of China Coal Society*, 49(5): 2376-2393, (in Chinese with English abstract).
- Li, G., Feng, J. X., Yang, X., et al. 2025. Research on the Microstructure and Mechanical Damage and Failure Characteristics of Coal Rock in Benxi Formation, Ordos Basin. *Drilling and Production Technology*, 48(3): 204-210, (in Chinese with English abstract).
- Gong, C. X., Zhang, L. Y., Ma, C., et al., 2022. Analysis of Brittleness Index Based on Fracture Energy Ratio of Rock Mass. *Mining Research and Development*, 42(02): 82-89, (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. Y., Yan, C. L., Xue, J. C., et al. 2025. Study on the rock mechanical properties and anisotropy of Paleocene Huxiang reservoirs: a case study of the Shahejie Formation in the southeastern Bohai Bay Basin. *Progress in Geophysics*, 40(02): 0806-0816, (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郭旭升, 2022. 我国陆上未来油气勘探领域探讨与攻关方向. *地球科学*, 47(10): 3511-3523.
- 白雪峰, 王民, 王鑫, 等, 2024. 四川盆地东北部侏罗系凉高山组页岩油甜点与富集区评价. *地球科学*, 49(12): 4483-4500.
- 吴海波, 董守华, 张平松, 等, 2021. 基于超声波测试的煤样脆性指数计算与分析. *地球物理学进展*, 36(03): 1138-1144.
- 杨景祥, 冯韬, 曾亚武, 等., 2022. 基于侧向变形的花岗岩脆性特征评价新方法. *武汉大学学报(工学版)*, 55(08): 786-792.
- 宋昊, 夏敏, 任光明., 2023. 基于峰前能量演化及峰后侧向变形特征的岩石脆性评价方法. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 50(06): 723-733.
- 匡智浩, 李邵军, 杜灿勋, 等., 2022. 考虑应力变化速率的岩石脆性评价指标. *岩土力学*, 43(S1): 293-300.
- 陈国庆, 赵聪, 魏涛, 等., 2018. 基于全应力 - 应变曲线及起裂应力的岩石脆性特征评价方法. *岩石力学与工程学报*, 37(01): 51-59.
- 高美奔, 李天斌, 陈国庆, 等., 2022. 基于岩石峰前起裂及峰后特征的脆性评价方法. *岩土工程学报*, 44(04): 762-768.
- 张军, 艾池, 李玉伟, 等., 2017. 基于岩石破坏全过程能量演化的脆性评价指数. *岩石力学与工程学报*, 36(06): 1326-1340.
- 刘俊新, 李军润, 尹彬瑞, 等., 2022. 基于能量平衡的新脆性指标与页岩失效机制分析. *岩石力学与工程学报*, 41(04): 734-747.
- 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.
- 侯鹏, 高峰, 张志镇, 等., 2016. 基于声发射和能量演化规律评价岩石脆性的方法. *中国矿业大学学报*, 45(04): 702-708.
- 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(09): 3385-3396.
- 郭京哲, 郭小军, 赵明, 等., 2023. 基于多矿物模型的致密砂岩脆性指数常规测井评价方法——以鄂

鄂尔多斯盆地桐川地区长 7 段为例.地球物理学进展, 38(04): 1590-1602.

冯涛,谢学斌,王文星,等., 2000. 岩石脆性及描述岩爆倾向的脆性系数. 矿冶工程, 20(04): 18-19.

李熹微,刘海涛,宁才倍,等., 2025. 冀中坳陷北部上古生界煤系烃源岩生烃特征及发育的主控因素. 地球科学, 50(05): 1917-1932.

王汉青,陈军斌,张杰,等, 2016. 基于权重分配的页岩气储层可压性评价新方法. 石油钻探技术, 44(03): 88-94.

安琦,杨帆,杨睿月,等. 2024. 鄂尔多斯盆地神府区块深部煤层气体积压裂实践与认识. 煤炭学报, 49(5): 2376-2393.

李皋,冯佳歆,杨旭,等. 2025. 鄂尔多斯盆地本溪组煤岩微组构及力学损伤破坏特征研究. 钻采工艺, 48(3): 204-210.

龚诚鑫,张连英,马超,等. 2022. 基于岩体断裂能比值的脆性指标分析. 矿业研究与开发, 42(02): 82-89.

赵珠宇,闫传梁,薛锦春,等. 2025. 古近系湖相储层岩石力学特性及各向异性研究—以渤海湾盆地东南部沙河街组为例. 地球物理学进展, 40(02): 0806-0816.