

DOI: 10.20174/j. JUSE. 2026. 02. 20

# 基于纳米压痕试验的煤岩力学性能层理效应研究

张超鹏<sup>1</sup>, 陈立超<sup>1, 2</sup>, 马代兵<sup>3</sup>, 李世兵<sup>4</sup>, 刘敬丹<sup>4</sup>

(1. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 煤与煤层气共采全国重点实验室, 山西 晋城 048012; 3. 甘肃煤田地质局一四九队, 兰州 730020; 4. 甘肃科贝德煤与煤层气开发技术有限公司, 兰州 730080)

**摘要:** 为探究层理效应对煤岩力学性能的影响, 基于纳米压痕试验对煤岩不同层理方向的微观力学性能展开研究。通过绘制各组试样的荷载-位移曲线, 获取不同层理方位煤岩的微观力学参数并分析煤岩破坏模式, 进一步探讨煤岩水力压裂裂缝延展规律。研究表明: 煤岩的微观结构致密, 层理结构清晰, 层理间填充有石英等坚硬矿物, 伴随一定量的天然微裂缝和自生孔隙发育; 通过纳米压痕试验, 发现煤岩试样具有明显的各向异性, 垂直层理、平行层理、斜交层理煤岩的弹性模量依次为 5.02 GPa、4.58 GPa、4.92 GPa, 硬度分别为 0.38 GPa、0.35 GPa、0.37 GPa; 煤岩的弹性模量和硬度大小符合其宏观力学规律; 在不同方向上的破坏能量耗散特征方面, 垂直层理煤岩所需的断裂能量最大, 平行层理煤岩断裂能量耗散最小, 断裂韧度依次为 0.25、0.22、0.23 MPa·m<sup>0.5</sup>; 煤岩的脆性系数随着不同方向破坏形式的差异而变化; 基于纳米压痕试验数据, 揭示了不同层理方向下裂缝的扩展特征, 垂直层理方向裂缝沿天然缝隙扩展, 平行层理裂缝主要沿层理弱面发展, 而斜交层理则表现出裂缝在向深部延伸过程中更易产生分支。研究结果可为煤岩的工程应用提供数据支持。

**关键词:** 纳米压痕; 煤岩力学; 层理; 各向异性; 压裂裂缝延展; 窑街矿区

中图分类号: TE37

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0583-09

## Bedding Effect of the Mechanical Properties of Coal Based on Nanoindentation Test

Zhang Chaopeng<sup>1</sup>, Chen Lichao<sup>1, 2</sup>, Ma Daibing<sup>3</sup>, Li Shibing<sup>4</sup>, Liu Jingdan<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China;  
2. National Key Laboratory of Coal and Coalbed Methane Mining, Jincheng, Shanxi 048012, P. R. China;  
3. Team 149th, Gansu Coalfield Geology Bureau, Lanzhou 730020, P. R. China;  
4. Gansu Coalbed Coal and Coalbed Methane Development Technology Co., Ltd., Lanzhou 730080, P. R. China)

**Abstract:** To explore the influence of coal and rock bedding plane effects on mechanical properties, the micro-mechanical properties of coal and rock with different bedding directions are studied based on nanoindentation tests. By plotting the load-displacement curves of each group of samples, the micro-mechanical parameters of coal and rock with different bedding orientations are obtained and the failure modes of coal and rock are analyzed. Furthermore, the propagation laws of hydraulic fracturing fractures in coal and rock are discussed. The

收稿日期: 2025-05-08 (修改稿)

作者简介: 张超鹏 (2000—), 男, 吉林白山人, 硕士, 主要从事储层岩石力学研究。E-mail: 1049298745@qq.com

通讯作者: 陈立超 (1985—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 主要从事非常规油气地质力学研究。

E-mail: chenlichao@163.com

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (23ZYQA319); 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目 (2023YFSH0005); 中央引导地方科技发展资金项目 (2024ZY0008); 内蒙古自治区财政出资地质勘查项目 (25-1-NY01)

research shows that the microstructure of coal and rock is dense, the bedding structure is clear, and the bedding planes are filled with hard minerals such as quartz, accompanied by a certain amount of natural micro-cracks and developed self-generated pores. Through nanoindentation tests, it is found that the coal and rock samples have obvious anisotropy. The elastic modulus of coal and rock perpendicular to the bedding plane, parallel to the bedding plane, and at an oblique angle to the bedding plane are 5.02 GPa, 4.58 GPa, and 4.92 GPa, respectively, and the hardness is 0.38 GPa, 0.35 GPa, and 0.37 GPa, respectively. The elastic modulus and hardness of coal and rock are consistent with their macroscopic mechanical laws. In terms of the energy dissipation characteristics of failure in different directions, the coal and rock perpendicular to the bedding plane require the largest fracture energy, while the coal and rock parallel to the bedding plane have the smallest fracture energy dissipation. In addition, the fracture toughness is 0.25, 0.22, and 0.23  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ , respectively. The brittleness coefficient of coal and rock varies with the differences in failure forms in different directions. Based on the nanoindentation test data, the propagation characteristics of fractures under different bedding directions are revealed. Fractures in the direction perpendicular to the bedding plane extend along natural fissures, fractures parallel to the bedding plane mainly develop along the weak bedding plane, and fractures at an oblique angle to the bedding plane are more prone to branching during the deep extension process. The research results provide scientific data support for the engineering application of coal and rock, offer important references for engineering design, construction, monitoring and optimization, and have the potential to improve the safety and economy of engineering, contributing to sustainable development.

**Keywords:** nanoindentation; coal mechanics; bedding; anisotropy; fracture extension; Yaojie mining area

## 0 引言

煤层气资源开采过程中,准确获取储层煤岩力学参数是制定水力压裂方案的重要考量因素。煤岩内部结构复杂,存在微裂隙、节理、层理等特征。这些裂隙和非均质性特征显著影响煤岩的力学性质及其在压裂过程中的响应。

在煤岩基本力学实验方面,已有学者通过常规的单轴压缩、三轴压缩、剪切、巴西劈裂、SCB 等实验方法<sup>[1-4]</sup>,测试了煤岩的抗压、抗拉、抗剪强度等基本力学性质。然而,煤岩在微观尺度上的力学性能分布仍未得到充分揭示。纳米压痕技术作为一种新兴的岩石材料性能表征手段,具有取样容易便捷、测试周期短、实验效率高的优点。通过研究煤岩在纳米尺度上的关键力学性能及其损伤机理,可以更好地了解煤在复杂应力环境下的强度和损伤<sup>[5]</sup>。

郭靖杰等<sup>[6]</sup>采用纳米压痕技术研究了典型构造煤和原生煤试样结构面的微观强度、变形、加卸载速率敏感性和蠕变特性。蔡益栋等<sup>[7]</sup>以纳米压痕试验为主,低温液氮与原位激光拉曼测试为辅发现煤岩微观力学强度受孔隙及化学结构特征共同控制。刘鹏等<sup>[8]</sup>通过纳米压痕实验发现煤的煤阶、变质程度和外部孔隙发育情况与断裂韧度呈正相关提高。Elena 等<sup>[9]</sup>根据煤循环纳米压痕实验过程的破碎倾向,通过弹性模量和损伤指数  $R_w$  分析了微观力学性能变化。Xie 等<sup>[10]</sup>在微纳米尺度

分析了煤样变质程度等微观结构特征与弹塑性变形等力学性能关系。Meng 等<sup>[11]</sup>通过分子动力学(MD)模拟了纳米压痕过程煤的破坏机理。Borodich 等<sup>[12]</sup>基于纳米压痕技术开发了用于估算非均质材料(包括煤和岩石)弹性模量和显微硬度的程序。Zhang 等<sup>[13]</sup>使用纳米压痕来研究  $\text{CO}_2$  处理对无烟煤的微观结构和纳米级力学性能变化的影响。Fender 等<sup>[14]</sup>以煤和页岩为研究对象利用纳米压痕技术总结了  $\text{CO}_2$  注入对杨氏模量变化的影响规律。Sun 等<sup>[15]</sup>引入纳米压痕法分别测试了页岩、泥岩和煤的硬度、弹性模量、断裂韧性,量化和绘制煤和岩石的非均质特性。Manjunath 等<sup>[16]</sup>采用纳米压痕法分析了纳米和微观尺度垂直于层理平面方向页岩样品的力学性能与裂缝扩展特征。张震等<sup>[17]</sup>通过统计纳米压痕技术表征水灰比对油井水泥石微观结构和微观力学性能的影响。

综上所述,国内外学者已利用纳米压痕技术对各类岩石的力学性能进行了测定,并在岩石材料微观力学领域取得了显著的研究进展。然而,关于层理效应对煤岩微观力学性能影响的研究尚未充分展开。本文旨在基于纳米压痕技术,系统研究煤岩的垂直层理、平行层理及斜交层理下的微观力学性能,绘制不同层理方位下的荷载-位移曲线,获取不同层理方位煤岩的微观力学参数,通过层理效应的影响对煤岩破坏模式进行分析,并结合微观力学性能,探讨煤岩水力压裂裂缝的延展规律,期望为煤岩水力压裂方案的优化设计提供实验数据支持。

## 1 研究区煤岩微观结构特征

煤岩在不同尺度上随机分布有大量不同特性的裂隙、位错等结构缺陷,宏观尺度体现为节理、层理、断层等大尺度结构;细观尺度体现为裂隙、裂纹等;微观尺度体现为分子或原子缺陷、孔洞孔隙等,这些不同尺度的结构在煤岩体内形成纵横交错的网络结构<sup>[18]</sup>。使用偏光显微镜和扫描电子显微镜分别在细观尺度下对煤岩试样进行观察。煤岩镜下微观结构特征如图 1 所示,图 1(a)、(b)、(c)、(d) 为煤岩薄片偏光显微镜镜下照片,观察可知煤岩结构相对致密,其中可以发现少量天然微裂缝发育,长度约 0.6 mm。层理边界清晰规则,层理间填充有石英等浅色矿物。与黏土矿物相比,岩石中石英、斜长石和菱铁矿等脆性矿物含量的变化对岩石的力学性质更敏感<sup>[19]</sup>。

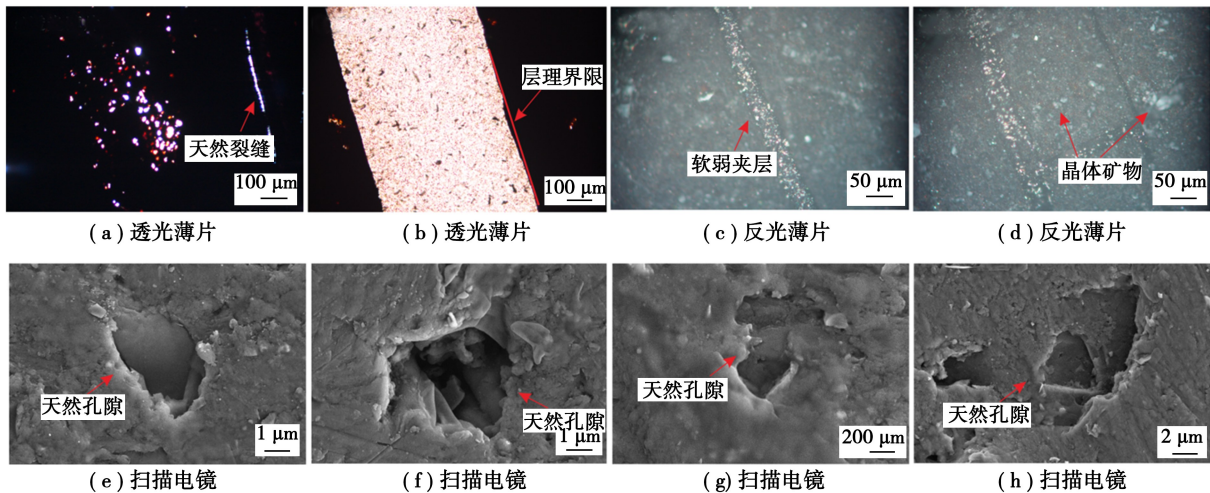


图 1 煤岩微观结构特征

Fig. 1 Microstructure characteristics of coal

## 2 纳米压痕试验

### 2.1 纳米压痕技术

纳米压痕测试技术是一种通过计算机控制,在微纳米尺度上对样品进行加载和卸载,并对整个压痕周期内荷载和压入深度进行连续监测<sup>[20]</sup>。获取试验样品的载荷-位移曲线,依据试验过程中反馈的压入深度等数据,进一步计算出材料的弹性模量、硬度等微观力学性能参数。纳米压痕试验流程是选取待测材料表面光滑区域,将纳米压痕压头压入材料内部,通过内置探针传输实时数据获得所测材料的荷载与位移( $P-h$ )曲线,根据图像数据信息直观反映试样的微观力学性能。纳米压痕试验过程包括加载阶段、持荷阶段和卸载阶段。加载阶段可以看作是弹性变形与塑性变形的结合,持荷阶

段是测量恒定加载力作用下的位移变化,而卸载阶段被认为是纯弹性变形的恢复过程<sup>[21]</sup>。

图 1(e)、(f)、(g)、(h) 为煤岩试样扫描电子显微镜(SEM)微观形貌照片,从微观图像中观察可以发现煤岩存在自生天然孔隙直径从 0.6 ~ 10  $\mu\text{m}$  不等,且孔隙周围延伸微裂纹。天然孔隙的存在将对煤岩的微观力学性能产生影响,表现为力学性能的不均质性。孔隙的存在会导致煤岩的强度降低,孔隙周围通常存在应力集中现象,特别是在加载或变形过程中,应力会集中在孔隙周围,这种应力集中可能导致微裂纹的产生和扩展。由于孔隙分布的不均匀性,这种应力集中效应在不同位置表现不一致,造成煤岩的力学性能呈现出空间的不均质性。

综上,研究区煤岩微观结构致密,层理结构清晰明显,伴生有天然裂隙、孔隙发育。这些特征可能导致煤岩微观尺度的非均质性。下面将深入研究煤岩微观力学性能,表征煤岩断裂力学相关参数。

段是测量恒定加载力作用下的位移变化,而卸载阶段被认为是纯弹性变形的恢复过程<sup>[21]</sup>。

图 2 为纳米压痕试验的典型载荷-位移曲线,整个过程分为加载、保载与卸载 3 个阶段。其中,  $P_{\text{max}}$  为加载过程中压头施加的最大载荷,  $h_1$  为保载过程中压头压入的起始深度位移,  $h_m$  为完成保载阶段的压头压入位移,  $h_f$  为完全卸载后压头回弹的压痕深度位移,  $h_c$  为根据曲线拟合得到的压痕接触深度,  $S$  为斜率,即接触刚度。

#### 2.1.1 弹性模量和硬度

基于赫兹接触理论,假定纳米压痕试验材料表面光滑且无摩擦。由于压头的压入深度远小于材料的几何尺寸,载荷与压入深度之间的关系可通过以下公式描述:

$$P = B(h - h_f)^b \quad (1)$$

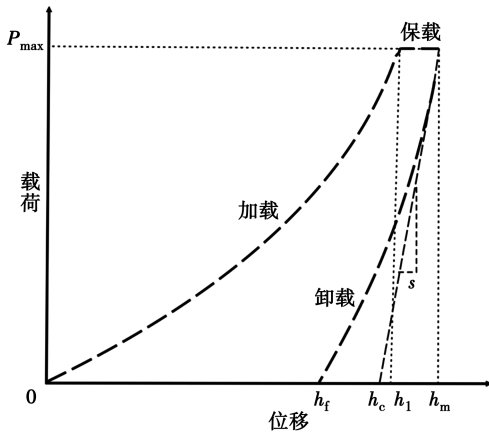


图 2 纳米压痕典型载荷-位移曲线

Fig. 2 Typical load-displacement curves of nanoindentation  
 式中:  $B, b, h_f$  为最小二乘法拟合合参数;  $h$  为接触位移。通过分析卸载曲线的斜率, 计算得到材料的接触刚度  $S$ :

$$S = \frac{dP}{dh} \quad (2)$$

材料的压痕弹性模量  $E_r$  和压痕硬度  $H$ , 根据以下公式进行计算:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta\sqrt{A}} S \quad (3)$$

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (4)$$

式中:  $\beta$  为纳米压痕压头的的矫正系数,  $A$  为试验过程中压头与材料的接触面积, 此数据均可通过纳米压痕试验仪器反馈获得。压痕弹性模量与材料弹性模量的关系如公式(5)所示, 式中  $E$  和  $\nu$  分别为待测材料的弹性模量和泊松比,  $E_0$  和  $\nu_0$  分别为压头的弹性模量和泊松比:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_0^2}{E_0} \quad (5)$$

### 2.1.2 断裂韧度

断裂韧性是指材料在受到外部应力冲击时阻止裂纹扩展的能力<sup>[22-24]</sup>。材料单位面积发生断裂的能量释放率  $G_c$ , 可通过公式(6)求得, 其中  $W_c$  为材料发生断裂所释放的能量,  $A_{fra}$  表示断裂能释放区域的面积, 在纳米压痕试验中体现为最大压入深度时压头的接触面积  $A_{c(h_m)}$ :

$$G_c = \frac{W_c}{A_{fra}} \quad (6)$$

断裂韧性表征材料阻止裂纹扩展的能力, 作为材料本身固有特性是评价材料的韧性的定量指标。常用断裂前物体吸收的能量或外界对物体所作的功表示, 如应力-应变曲线下的面积。通常通过材料在断裂前吸收的能量或外部载荷所做的功来定

量描述断裂韧性, 常见的表示方式为应力-应变曲线下的面积。断裂韧度临界应力强度因子  $K_{IC}$ , 可通过式(7)计算:

$$K_{IC} = \sqrt{G_c \frac{E}{1 - \nu^2}} \quad (7)$$

为求得断裂韧度  $K_{IC}$ , 需要获取纳米压痕试验过程中的断裂能数据。纳米压痕试验过程的能量分配原理如图 3 所示, 材料压头侵入过程中同时经历塑性变形与弹性变形。将纳米压痕试验视为准静态过程并忽略系统误差等因素, 整个纳米压痕试验过程能量关系可表示为:

$$W_c = W_T - W_E - W_P \quad (8)$$

式中:  $W_T$  为压头施加的总能量,  $W_c$  为材料发生破坏的断裂能,  $W_E$  为材料弹性能,  $W_P$  为纯塑性做功的大小。

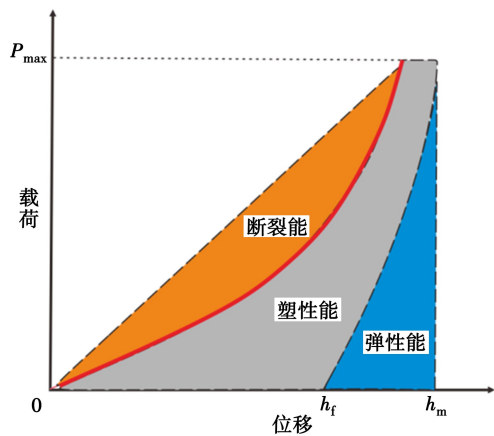


图 3 纳米压痕能量分配及脆性评价原理<sup>[25]</sup>

Fig. 3 Principle of energy distribution and brittleness evaluation of nanoindentation

总能量系数  $V_t$  和弹性能量系数  $V_e$  作为能量模型的基本参数, 表征各能量参数和断裂参数,  $V_t$  为标定加载能量与总能量的比值,  $V_e$  为标定卸载能量与弹性能量的比值<sup>[26]</sup>:

$$V_t = \frac{W_1}{W_2} \quad (9)$$

$$V_e = \frac{W_3}{W_4} \quad (10)$$

式中: 各能量分量作如下定义,  $W_1$  为校准加载能量, 即具有特定几何特征的压头在侵入材料过程中所耗散的标准能量参数,  $W_2$  表示加载阶段体系的总能量耗散;  $W_3$  为标准卸载能量, 反映卸载过程的基准能量需求,  $W_4$  为卸载过程中材料弹性恢复所释放的能量。对于满足上式的弹塑性压痕试验过程, 其总能量可表示为:

$$W_T = \frac{P_m h_1}{2V_t} + P_m (h_m - h_1) \quad (11)$$

卸载过程弹性能  $W_E$  可以表示为:

$$W_E = W_4 = \int_{h_f}^{h_m} P_m \left( \frac{h - h_f}{h_m - h_f} \right)^{2V_c - 1} dh = \frac{P_m}{2V_c} (h_m - h_f) \quad (12)$$

对于纯弹塑性材料,  $W_T$  和  $W_p$  之间存在以下关系<sup>[27]</sup>:

$$\frac{W_p}{W_T} = \frac{W_T - W_E}{W_T} = \frac{1 + \frac{1}{2V_c} - \frac{h_1}{h_m} - \frac{1}{2V_c} \left[ 1 - \frac{h_f}{h_m} \right]}{1 + \frac{1}{2V_c} - \frac{h_1}{h_m}} \quad (13)$$

根据上述理论基础,本研究采用能量法表征压头在不同层理方位煤岩中的侵入过程,计算相关断裂力学参数,探讨层理效应对煤岩破坏特性的影响,揭示其力学响应和破坏机制。

## 2.2 不同层理方向上试样制备

煤岩样品产自甘肃省兰州市海石湾煤矿,试样均是从煤矿井下开采现场获取,选取能够清晰辨别煤岩层理结构的大尺寸煤岩,准确选定方向切割加工小试样进行纳米压痕实验。首先将不规则煤岩样块用金刚石锯片机切割成 1 cm 见方,如图 4 所示,过程中需保证实验面与底面平行且表面平整,以确保后续纳米压头均匀施加荷载。依次使用目数 800、1 000、2 000、3 000 的砂纸进行打磨,使用 3 种金刚石抛光膏依次为 2  $\mu\text{m}$ 、1.25  $\mu\text{m}$ 、0.5  $\mu\text{m}$ ,每段打磨工序不低于 10 min,抛光工序不少于 5 min。样品制备将分别从 3 个方向划分,垂直层理、平行层理,斜交层理,其中斜交层理方向为 45°。每组试件精细打磨一个,每个试件取 3 个试点,通过纳米压头加载方向与层理角度的改变,探究在不同方向上煤岩微观力学性能的差异。

本次纳米压痕实验在内蒙古工业大学力学实

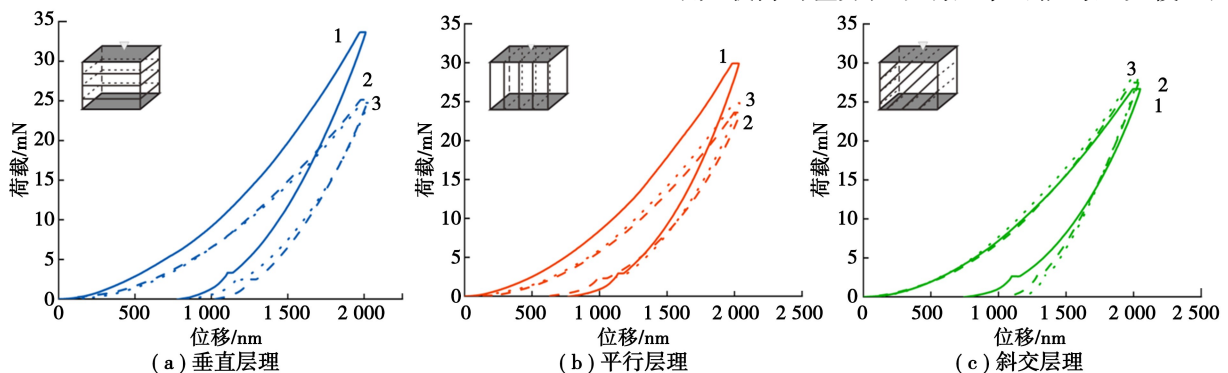


图 5 煤岩纳米压痕加载位移-载荷曲线

Fig. 5 Displacement-load curves of coal under nano-indentation loading

验中心使用安捷伦 G200 型纳米压痕仪进行,该仪器配备 Berkovich 金刚石压头。边长与深度比为 7.53,压头模量 1 100 GPa,泊松比 0.18。实验过程中压头以恒定速率进行加载,压头探针与样品表面接触反馈数据。当载荷到达峰值时,压头维持最大载荷保载一段时间,再以恒定速率完成卸载,期间为防止加卸载惯性影响,加卸载速率以 1 mN/s 维持。每组不同层理方向试样分别选取 3 个测点,测点间距设定大于 50  $\mu\text{m}$ ,以消除测点间相互影响效应。



图 4 纳米压痕试件

Fig. 4 Nano-indentation specimen

## 2.3 纳米压痕试验结果

测试结果如图 5 所示,垂直层理、平行层理、斜交层理 3 组荷载-位移曲线形状走势基本一致,3 组实验数据最大载荷分别为垂直层理 33.42 mN、平行层理 29.51 mN、斜交层理 27.89 mN。曲线反映在垂直层理与平行层理方向上同一试样不同测点的最大载荷差异明显,表明外载作用下煤岩内部损伤不均匀,存在同表面对外载能量吸收效率的差异表现。推断在垂直层理方向可能由于层理表面的非均质性,如表面含有石英等坚硬质矿物,以及部分位置可能发育自生裂隙与微孔隙的,致使各测点的最大载荷数值存在一定差异。平行层理方向上最大载荷的差异性影响因素可能与压头侵入层

理间隙位置关系,以及不同层理面的力学性质硬度差异有关。相对而言,斜交层理组各测点最大载荷数据较为接近,曲线形状及包络面积差异较小,说明压头在侵入斜交层理方向时煤岩发生破坏耗散能量大致相当,力学性能相对均匀。同时保载阶段的最大载荷值说明压头侵入斜交层理方向的所施加载荷相对较小。

上述实验结果有效反映了层理效应对煤岩微观力学性能的影响,接下来将通过纳米压痕实验数据,进一步对煤岩微观力学性能进行量化表征。

### 3 讨论

#### 3.1 不同层理方位上煤岩弹性力学性质差异

煤岩弹性力学性质在储层体积压裂效率和储层压裂甜点定位上具有关键作用,依据公式(1)–(5)计算方法,得到垂直层理、平行层理、斜交层理煤岩的弹性模量依次为 5.02 GPa、4.58 GPa、4.92 GPa;硬度为 0.38 GPa、0.35 GPa、0.37 GPa。如图 6 所示弹性模量和硬度数值大小为垂直层理>斜交层理>平行层理,说明微观力学性能同样符合煤岩的宏观力学规律。从图表中误差棒也不难发现在垂直层理方向硬度差异较明显,平行层理方向次之,斜交层理方向差异最小。垂直层理表面存在石英等坚硬矿物导致测点的硬度差异较大,平行层理的层理弱面差异同样造成了弹性模量和硬度的不同,斜交层理组表面相对力学性能分布更均匀。

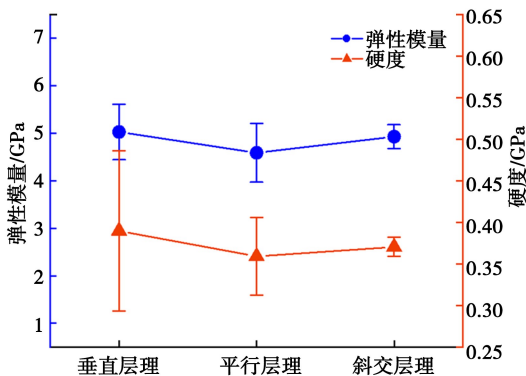


图 6 煤岩弹性模量及硬度特征

Fig. 6 Elastic modulus and hardness characteristics of coal

#### 3.2 不同层理方位上煤岩断裂性质差异

根据能量法中断裂能  $W_c$  计算结果,联立公式(6)、(7)得到煤岩不同层理方位的断裂韧度。垂直层理、平行层理、斜交层理的断裂韧度分别为 0.25、0.22、0.23  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ,如图 7 所示,断裂韧度大小为垂直层理>斜交层理>平行层理。垂直层理的完整结构面增大了试样的断裂韧度,同层理

表面力学性能的不均质性,致使断裂韧度差异明显。平行层理方向上的断裂韧度由于压头在侵入层理结构间过程中发生以塑性变形为主的拉张破坏,断裂韧度更小,平行层理组各测点断裂韧度差异较明显,与层理结构影响密不可分。斜交层理较另外两组数据更平均,说明在  $45^\circ$  切割层理方向上煤岩微观力学性能分布较平均,对于实际压裂作业更具参考价值。

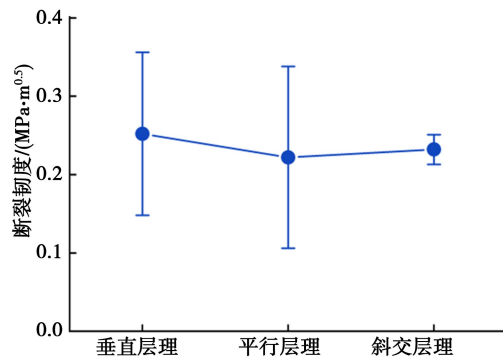


图 7 煤岩断裂韧度特征

Fig. 7 Fracture toughness characteristics of coal

#### 3.3 煤岩不同方位上破坏能量耗散特征

根据公式(8)–(13)得到煤岩压痕破坏耗散能量,如图 8 所示,垂直层理、平行层理、斜交层理煤岩耗散的断裂能  $W_c$  依次为 25.03、23.85、 $24.10 \times 10^{-11} \text{J}$ ,垂直层理所需断裂能最大,平行层理耗散断裂能最小,斜交层理居中。垂直层理压头侵入发生破坏所需克服整体结构面做功,耗散断裂能较大。同时结构面发育微裂缝与孔隙等细微缺陷与夹杂坚硬矿物,使同一试样能量耗散出现明显差异。平行层理方向上由于层理结构,压头侵入破坏能量沿层理薄弱面发展,破坏相对较弱断裂能损耗较小。平行层理断裂能标准偏差最大,推测层理结构间的相对位置是主要影响因素,由于测点位置分布不在同一层理截面,各层理面间力学性能存在

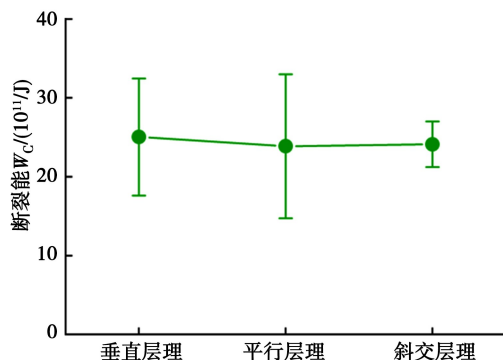


图 8 煤岩耗散断裂能差异特征

Fig. 8 Differential characteristics of dissipative fracture energy of coal

明显差异。斜交层理组断裂能大小居中,且差异较小,说明斜交方向控制试样的力学性能均匀,利用层理效应减弱了结构面的完整性,降低了破坏耗散能量。

### 3.4 不同层理方位煤岩脆性评价

根据煤岩试样的纳米压痕试验结果,弹性能和塑性能与断裂能之和的比值可作为评估煤岩脆性程度的指标,定义为脆性系数  $B$ :

$$B = \frac{W_E}{W_C + W_P} \quad (14)$$

经由公式(14)计算得到垂直层理、平行层理、斜交层理的脆性系数,如图 9 所示,分别为 1.24、1.48、1.04。由脆性系数可知平行层理脆性最大,推测层理结构间胶结力薄弱,层理弱面影响煤岩更容易沿层理结构发生滑移。垂直层理方向整体结构稳固性强,发生脆性破坏相对困难,更多能量以塑性变形方式耗散。斜交层理方向载荷施加过程中既发生剪切破坏又发生拉张破坏,消耗较多的塑性能和断裂能。同时不排除由于沿  $45^\circ$  方向切割对试样稳定性产生扰动。

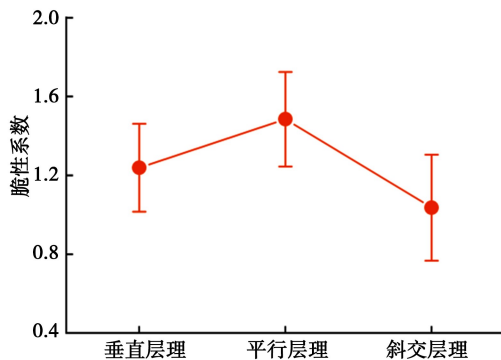


图 9 研究区煤岩脆性各向异性

Fig. 9 Brittle anisotropy of coal in the study area

### 3.5 力学性质及破坏模式对储层压裂的影响

分析不同层理方位对煤岩破坏模式及影响规律如图 10 所示。图 10(a)、(b)、(c) 分别为不同层理方向荷载分布情况,在垂直层理方向上荷载施加主要用于压缩层理面,沿层理方向发生拉张破坏,其间由于单层结构面的非均质性使力学性能分布存在明显差异。沿平行层理方向施加载荷煤岩因横向扩张发生拉张破坏,受煤岩层理弱面力学性质影响,表现出弹性模量硬度及断裂韧度较小,脆性较大的特征。斜交层理方向上在发生张拉破坏的同时,层理面间发生剪切滑移现象,产生一定程度的剪切破坏。

图 10(d)、(e)、(f) 为真三轴物模试验在 3 个

方向上的实际水力压裂效果,从图中不难看出在斜交层理压裂实验组的破坏程度较好,破碎程度较高。垂直层理方向出现明显的横向裂纹扩展, $Z$  轴方向裂纹延伸不明显。平行层理方向压裂裂缝主要沿煤岩层理向内部延伸,此方向观察到的裂缝发育情况不明显。

图 10(g)、(h)、(i) 为不同层理方向裂缝延展规律模型图。压裂荷载沿垂直层理方向,裂缝易通过天然缝隙主要沿层理向四周扩展,难以向深处延伸。平行层理方向裂缝沿层理弱面发育,突破单层理结构面相对困难,故裂纹主要沿最大主应力方向向内部延伸。斜交层理方向由于拉张破坏和剪切破坏的共同作用,受层理效应影响裂缝在向深处延伸的同时更易产生分支缝,进而发育形成复杂缝网,利于实际压裂造缝工作开展。

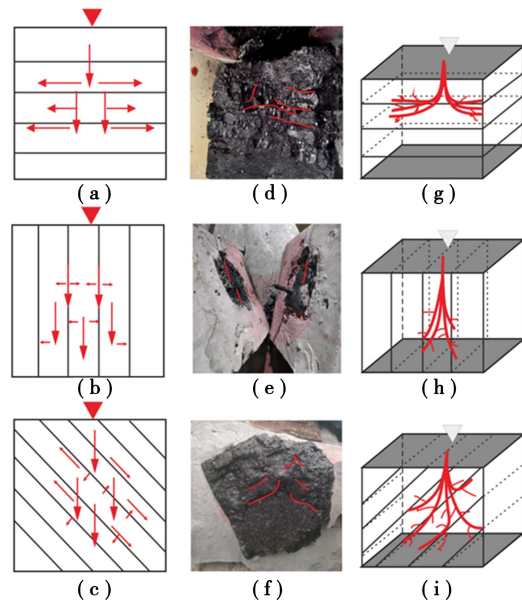


图 10 不同层理方位力学性质与裂缝发育模型

Fig. 10 Mechanical properties of different bedding orientations and the fracture development model

## 4 结论

(1) 研究区煤岩微观结构致密,层理结构边界清晰,层理间填充有石英等坚硬矿物,伴随一定量的天然微裂缝和自生孔隙发育。这些微观特征在煤岩的力学行为中起着重要作用,影响着其整体的力学性能和破坏模式。

(2) 煤岩试样的微观力学性能存在明显的各向异性。垂直层理、平行层理、斜交层理煤岩的弹性模量依次为 5.02 GPa、4.58 GPa、4.92 GPa;硬度为 0.38 GPa、0.35 GPa、0.37 GPa。弹性模量和

硬度大小微观力学性能同样符合煤岩的宏观力学规律。

(3)不同方位上破坏能量耗散特征规律,垂直层理所需断裂能最大,平行层理耗散断裂能最小,斜交层理居中。垂直层理、平行层理、斜交层理的断裂韧度分别为0.25、0.22、0.23 MPa·m<sup>0.5</sup>。脆性系数由于不同方向破坏形式与能量耗散方式影响,平行层理表现为最脆弱,脆性指数最大,易发生滑移和脆性破坏。垂直层理表现为最稳固,脆性指数较小,更多的能量通过塑性变形消耗,难以发生脆性破坏。斜交层理脆性指数适中,既有脆性破坏,又有韧性成分,破坏过程较为复杂。

(4)根据纳米压痕试验数据建立裂缝延展规律模型,压裂荷载沿垂直层理方向,裂缝易通过天然缝隙主要沿层理向四周扩展。平行层理方向裂缝主要沿层理弱面发育,斜交层理方向受层理效应影响裂缝在向深处延伸的同时更易产生分支缝。力学基础试验为工程提供了科学的数据支持,是工程设计、施工、运维、监测和优化的基础。通过这些试验能够深入了解材料和结构在实际工况下的表现,优化设计方案,提高工程安全性和经济性,减少工程风险。

#### 参考文献(References)

- [1] 赵洪宝,李振华,仲淑姮,等.单轴压缩状态下含瓦斯煤岩力学特性试验研究[J].采矿与安全工程学报,2010,27(1):131-134.(Zhao Hongbao, Li Zhenhua, Zhong Shuheng, et al. Experimental study of mechanical properties of coal rock containing gas under uniaxial compression [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 131-134. (in Chinese))
- [2] 段敏克,蒋长宝,郭现伟,等.真三轴循环载荷作用下煤岩力学及损伤特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2021,40(6):1110-1118.(Duan Minke, Jiang Changbao, Guo Xianwei, et al. Experimental study on mechanical and damage characteristics of coal under cyclic true triaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1110-1118. (in Chinese))
- [3] 刘恺德,刘泉声,朱元广,等.考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):308-316.(Liu Kaide, Liu Quansheng, Zhu Yuanguang, et al. Experimental study of coal considering directivity effect of Brazil splitting on the underlying bedding plane Uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 308-316. (in Chinese))
- [4] 武鹏飞,梁卫国,曹孟涛,等.煤体在不同层理方位I型断裂特征试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(增2):538-545.(Wu Pengfei, Liang Weiguo, Cao Mengtao, et al. Experimental investigation on model I fracture characteristics of coal in different stratification orientation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Supp. 2): 538-545. (in Chinese))
- [5] Meng J Q, Cao Z H, Zhang S, et al. Micro-mechanical properties and damage mechanisms of coal under cyclic loading: A nanoindentation experiment and molecular dynamics simulation [J]. Molecular Simulation, 2022, 48(4): 354-365.
- [6] 郭敬杰,李伟,韩祥凯等.基于纳米压痕的构造煤与原生煤结构面力学特性[J].中国矿业大学学报,2024(3):509-523.(Guo Jingjie, Li Wei, Han Xiangkai, et al. Mechanical properties of structural plane of structural coal and primary coal based on nanoindentation [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024(3): 509-523. (in Chinese))
- [7] 蔡益栋,贾丁,邱峰,等.基于纳米压痕的煤岩微观力学特性及其影响因素剖析[J].煤炭学报,2023,48(2):879-890.(Cai Yidong, Jia Ding, Qiu Feng, et al. Micromechanical properties of coal and its influencing factors based on nanoindentation [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 879-890. (in Chinese))
- [8] 刘鹏,赵渝龙,聂百胜,等.煤体微观力学特性的纳米压痕实验研究[J].煤炭学报,2024,49(8):3453-3467.(Liu Peng, Zhao Yulong, Nie Baisheng, et al. Experimental study on micromechanical properties of coal by nanoindentation [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3453-3467. (in Chinese))
- [9] Elena K, Svetlana E, Vera K, et al. Effects of coals microscale structural features on their mechanical properties, propensity to crushing and fine dust formation [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2023, 10(2): 146-158.
- [10] Xie H G, Li X J. Microstructure and nanomechanical characterization of tectonic coal based on SEM, AFM, XRD and DSI [J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 46: 104158
- [11] Meng J Q, Lyu C H, Wang J, et al. Mechanical properties and failure mechanisms of different rank coals at the nanoscale [J]. Fuel, 2023, 345(1): 128209.
- [12] Borodich F, Bull S, Epshtein S A. Nanoindentation in studying mechanical properties of heterogeneous materials [J]. Journal of Mining Science, 2015, 51(3):

- 470-476.
- [13] Zhang G L, Ranjith P, Lyu Q, et al. Direct evidence of CO<sub>2</sub> softening effects on coal using nanoindentation[J]. Energy, 2022, 254: 124221.
- [14] Fender T, Rouainia M, Vander L, et al. Geomechanical properties of coal macerals; measurements applicable to modelling swelling of coal seams during CO<sub>2</sub> sequestration [J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 228: 103528.
- [15] Sun C L, Li G C, Zhang S H, et al. Mechanical and heterogeneous properties of coal and rock quantified and mapped at the microscale[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(1): 342-342.
- [16] Manjunath G, Jha Birendra. Geomechanical characterization of gondwana shale across nano-micro-meso scales [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 119: 35-45.
- [17] 张震, 庞学玉, 马朝阳, 等. 水灰比对油井水泥石微观性能影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 521-532. (Zhang Zhen, Pang Xueyu, Ma Chayang, et al. Experimental research on the impact of water-cement ratio on microscopic properties of oil well cement slurry [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 521-532. (in Chinese))
- [18] 柳先锋. 煤表面微结构特征与电磁辐射机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018. (Liu Xianfeng. Study on microstructural characteristics of coal surface and the mechanism of electromagnetic radiation [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2018. (in Chinese))
- [19] Wu D, Li B, Wu J, et al. Influence of mineral composition on rock mechanics properties and brittleness evaluation of surrounding rocks in soft coal seams[J]. ACS OMEGA, 2023, 9(1): 1375-1388.
- [20] 王耀城, 刘定坤, 刘伟, 等. 纳米压痕测试技术在GFRP材料中的应用综述[J]. 材料导报, 2021, 35(19): 19214-19222. (Wang Yaocheng, Liu Dingkun, Liu Wei, et al. A Review: Application of nanoindentation testing technology in GFRP materials [J]. Materials Reports, 2021, 35(19): 19214-19222. (in Chinese))
- [21] 党发宁, 高天晴, 原诗晶, 等. 化学环境对灰岩力学性能影响的纳米压痕试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增2): 3260-3270. (Dang Fanning, Gao Tianqing, Yuan Shijing, et al. Nanoindentation test study on the influence of chemical environment on the mechanical properties of limestone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Supp. 2): 3260-3270. (in Chinese))
- [22] 冯莹, 彭宇, 徐世焱, 等. 钢纤维砂浆纳米压痕微观断裂性能表征[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(11): 1593-1602. (Feng Ying, Peng Yu, Xu Shilang, et al. Micro fracture characterization of steel fiber reinforced mortar by nanoindentation [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(11): 1593-1602. (in Chinese))
- [23] 董京楠, 金衍, 陈勉, 等. 页岩I型断裂韧性测试及跨尺度裂缝表征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增1): 205-210. (Dong Jingnan, Jin Yan, Chen Miane, et al. Study on shale fracture toughness and micro-characterization of mode I crack using DCB specimen and SEM method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Supp. 1): 205-210. (in Chinese))
- [24] 李晓照, 柴博聪, 戚承志, 等. 高温热处理后的脆性岩石蠕变宏观断裂力学机理[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(5): 1514-1524. (Li Xiaozhao, Chai Bocong, Qi Chengzhi, et al. Macro-meso fracture mechanical mechanisms of creep in brittle rocks after high-temperature heat treatment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21(5): 1514-1524. (in Chinese))
- [25] 何智海, 倪雅倩, 杜时贵, 等. 纳米压痕技术在岩石材料中的应用与研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(10): 2045-2066. (He Zhihai, Nie Yaqian, Du Shigui, et al. Application and research progress of nanoindentation technology in rock materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(10): 2045-2066. (in Chinese))
- [26] Gupta I, Sondergeld C, Rai C. Fracture toughness in shales using nano-indentation [J]. Journal of Petroleum Science And Engineering, 2020, 191: 107222.
- [27] 陈立超, 张典坤, 肖宇航, 等. 页岩微观力学纳米压痕表征及储层可压裂性评价[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1659-1667. (Chen Lichao, Zhang Diankun, Xiao Yuhang, et al. Nanoindentation characterization of shale micromechanics and fracturing ability evaluation of reservoir [J]. China Coal Society, 2025, 50(3): 1659-1667. (in Chinese))