页岩微观力学纳米压痕表征及储层可压裂性评价

陈立超[1,2]，张典坤[2]，肖宇航[3]，王生维[4]，吕帅锋[4]

(1. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 内蒙古 呼和浩特　010051; 2. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城　048204; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京　110083; 4. 中国地质大学 (武汉) 资源学院, 湖北 武汉　430074)

摘　要: 页岩微观力学性质是页岩油气储层可压性评价、压裂工程甜点优选的关键依据。以四川盆地龙马溪组海相页岩，内蒙古石拐盆地长汉沟组、新疆塔里木盆地杨叶组陆相页岩为对象，采用纳米压痕试验获取不同沉积相页岩弹性力学性质、硬度、断裂韧度参数信息，提出一种基于加–卸载全程能耗比的页岩脆性评价方法，并结合不同沉积相页岩微观力学性质构建了弹脆性、弹塑性、塑性页岩微观断裂机理及储层压裂裂缝延展形式，最后提出页岩储层工程力学品质评价指标体系，结果表明：四川盆地、内蒙古石拐盆地、新疆塔里木盆地页岩加–卸载曲线滞回环依次增大，表明上述地区页岩塑性形变能占比随之增高，对外部能量吸收效率增强，指示岩石脆性减弱。试验显示四川、石拐、塔里木盆地页岩弹性模量分别为 60.27、34.84、23.40 GPa，硬度分别为 3.05、1.21、0.57 Gpa，断裂韧度分别为 1.56、0.75、0.28 MPa·$m^{0.5}$，不同沉积相页岩刚度韧性差异很大，其中四川盆地海相页岩断裂韧度高于石拐、塔里木盆地陆相页岩，能够形成高的裂缝净压力助推裂缝转向，利于营造复杂缝网；而陆相页岩断裂韧度较低不利于裂缝流体憋压，很难达到高的裂缝流体净压力，裂缝转向困难不利于形成复杂压裂缝网；笔者提出利用压痕实验全程弹性能与塑性能与断裂能和的比 (脆性系数) 评价页岩脆性，其中四川页岩脆性系数为 0.89，属于弹脆性页岩，外载下裂缝沿矿物晶界开裂形成窄缝；石拐页岩脆性系数为 0.27，属于弹塑性页岩，储层非均质性强，裂缝遇到坚硬矿物绕行形成曲折裂缝裂缝；塔里木盆地页岩脆性系数 0.04，为塑性页岩，易形成宽缝；笔者综合岩石弹性模量、硬度、断裂性能、脆性指数、黏土矿物含量、矿物接触方式等 7 类指标综合提出一种页岩工程力学品质的分类评价方法，以期为页岩储层压裂品质评价及压裂工程甜点优选提供定量化科学依据。

关键词: 页岩; 弹性力学参数; 断裂韧度; 脆性; 纳米压痕; 储层工程力学; 压裂品质

中图分类号: TE32; TD45　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253−9993(2025)03−1659−09

Nanoindentation characterization of shale micromechanics and fracturing ability evaluation of reservoir

CHEN Lichao[1,2], ZHANG Diankun[2], XIAO Yuhang[3], WANG Shengwei[4], LYU Shuaifeng[4]

(1. *School of Resources and Environmental Engineering*, *Inner Mongolia University of Technology*, *Hohhot*　010051, *China*; 2. *State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining*, *Jincheng*　048012, *China*; 3. *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development*, *Beijing*　100083, *China*; 4. *School of Earth Resources*, *China University of Geosciences*, *Wuhan*　430074, *China*)

Abstract: The micromechanical properties of shale are the key basis for shale reservoir compressibility evaluation. In this

收稿日期: 2024−01−09　　**策划编辑:** 韩晋平　　**责任编辑:** 李雅楠　　**DOI:** 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0044

基金项目: 中央引导地方科技发展资金资助项目 (23ZYQA319, 2024ZY0008); 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划资助项目 (2023YFSH0005)

作者简介: 陈立超 (1985—), 男, 内蒙古赤峰人, 副教授, 博士。E-mail: chenlichaogas@163.com

引用格式: 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]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1659−1667.

移动阅读

paper, the Marine shales of Longmaxi Formation in Sichuan Basin, Changhanguou Formation in Shiguai Basin in Inner Mongolia and Yangye Formation continental shales in Tarim Basin are selected as objects. The elastic mechanical properties, hardness, and fracture toughness parameters of shales are obtained by nano-indentation test. A method for evaluating shale brittleness is proposed. The fracture extension forms of reservoir fracturing are constructed. Finally, the evaluation index system of shale reservoir engineering mechanical quality is proposed. The results show that: The hysteretic loops of shale loading and unloading curves in Sichuan Basin, Shiguai Basin in Inner Mongolia and southwestern Tarim Basin increase, indicating that the proportion of plastic deformation energy of shale increases, indicating that rock brittleness is weakened. The test results show that the shale elastic modulus of Sichuan, Shiguai and Tarim basins are 60.27 GPa, 34.87 GPa and 23.40 GPa,the shale hardness of Sichuan, Shiguai and Tarim basins are 3.05 GPa, 1.21 GPa and 0.57 GPa, and the fracture toughness is 1.56, 0.75 and 0.28 MPa·$m^{0.5}$, respectively. The stiffness and toughness of these shale rocks vary greatly. The fracture toughness of southern Sichuan shales is higher than that of Shiguai and southwest Tarim continental shales, which can form high net fracture pressure to form fracture turning and facilitate the construction of complex fracture network. However, the low fracture toughness of continental shale is not conducive to the pressure holding of fracture fluid, and it is difficult to reach the high net fracture fluid pressure, and the difficulty of fracture steering is not conducive to the formation of complex pressure fracture network. In this paper, the ratio of elastic energy, plastic energy and fracture energy during the indentation process (brittleness coefficient) is proposed to evaluate the brittleness of shale. The brittleness coefficient of Sichuan shale is 0.89, which belongs to elastic-brittleness shale, and the fractures under external load crack along mineral grain boundaries to form narrow cracks. The brittleness coefficient of crutchy shale is 0.27, which belongs to elastoplastic shale. The reservoir is highly heterogeneous, and the fractures form tortuous fractures when they encounter hard minerals. The brittleness coefficient of shale in Tarim Basin is 0.04, which is plastic shale and easy to form wide fractures. In this paper, a quantitative classification evaluation method for shale engineering mechanical quality is proposed based on seven indexes, including rock elastic modulus, hardness, fracture property, brittleness index, clay mineral content and mineral contact mode, in order to provide a quantitative scientific basis for shale reservoir fracturing quality evaluation and optimal selection of fracturing engineering desserts.

Key words: shale; elastic mechanics parameters; fracture toughness; brittleness; nanoindentation test; reservoir engineering mechanics; fracturing quality

0 引 言

页岩油气是我国未来能源自主供给的兜底资源，在国家能源格局居于核心地位。页岩油气勘探开发已成为世界油气开发的趋势[1-2]。借鉴北美开发经验，长水平井体积压裂作为页岩油气效益开发的核心利器，保障了国内页岩油气增储上产[3-4]。由于页岩储层极其致密，渗透率低，一般无自然产能，需要通过体积压裂致裂岩石或形成压裂缝网，提升油气运移效率，扩大资源波及体积。鉴于页岩的强非均质性，准确识别页岩储层压裂工程甜点、实现页岩可压裂性的精确评价对于提升储层压裂效率有实际意义，是行业关注的关键问题。

页岩微观力学性质在储层体积压裂改造和储层压裂甜点定位上有关键性影响，长期以来，页岩脆性定量化评价方法、页岩微观力学性质及对于页岩油气储层体积压裂意义成为非常规油气地质力学领域研究的热点，诸多学者围绕页岩油气地质力学评价[5-7]、页岩压裂岩石力学试验[8-10]、页岩脆性评价方法及试验技术[11-13]、煤岩脆性纳米压痕试验评价方法及力学试验[14-16]开展了大量研究，但对不同沉积相页岩微观力学性质比较研究较少，制约了不同沉积相页岩储层地质力学的横向对比。

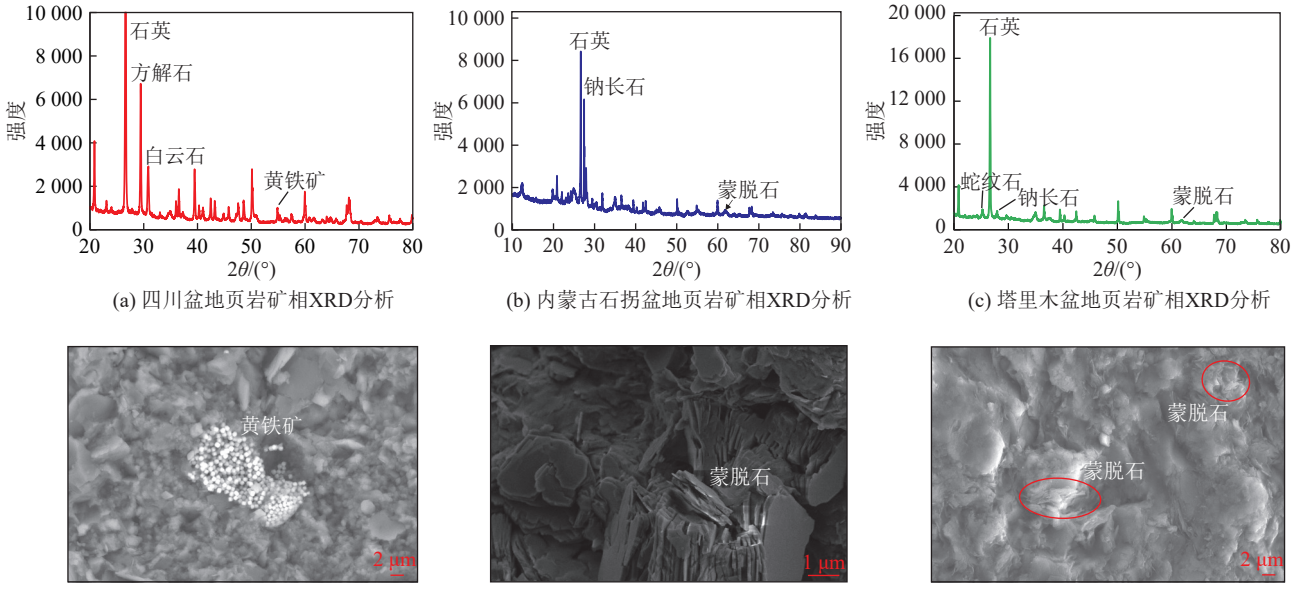
由于页岩岩石结构致密、组构明显，实现页岩基质部位微观力学表征和脆性定量化分析成为急需解决的技术问题，亟待构建简便、适用现场取样条件、测试简便且精度较高的页岩弹塑性、蠕变及脆性等力学指标的评价手段，实现对页岩基质脆性特征的定量化评价，为深层、超深层页岩油气储层地质力学评价、储层工程品质评价提供可靠地质力学依据。

鉴于此，笔者以四川盆地下志留统龙马溪组海相页岩，内蒙古石拐盆地中侏罗统长汉沟组、新疆塔里木盆地侏罗统杨叶组陆相页岩为对象，利用纳米压痕实验获取不同沉积相页岩加-卸载位移-载荷曲线形态规律，得到不同沉积相页岩弹性模量/硬度、断裂韧度参数，提出一种基于样品加-卸载全程能耗比的页

岩脆性评价方法, 并结合不同沉积相页岩微观力学性质构建了弹脆性、弹塑性、塑性页岩微观断裂机理及储层压裂裂缝延展形式, 最后提出页岩储层工程力学品质评价指标体系, 以期为页岩脆性评价及储层压裂工程甜点优选提供新的思路。

1　页岩岩石学特征

实验样品取自四川盆地下志留统龙马溪组、内蒙古石拐盆地中侏罗统长汉沟组、新疆塔里木盆地侏罗统杨叶组, 四川盆地页岩为南方典型海相页岩, 石拐盆地、塔里木盆地页岩均为陆相页岩。从 3 地页岩矿物组成看, 四川盆地龙马溪组页岩主要由石英、方解石、白云石和黄铁矿组成 (图 1a), 自生矿物比例高, 形成于深水还原环境, 属于典型海相沉积。石拐盆地长汉沟组页岩主要由石英、高岭石、蒙脱石、钠长石等组成 (图 1b), 属于陆源碎屑矿物沉积, 为山间湖盆沉积相[17-18]。塔里木盆地杨叶组页岩主要由石英、钠长石、蛇纹石及蒙脱石组成 (图 1c), 属于陆相湖盆斜坡带或中浅湖相沉积。四川盆地龙马溪组页岩具有脆性矿物含量高, 基质致密、矿物解理面紧密接触特征 (图 1d); 石拐盆地和塔里木盆地陆相页岩含大量黏土矿物, 矿物颗粒呈鳞片状、板状分布, 发育矿物粒间孔隙 (图 1e、图 1f)。



(a) 四川盆地页岩矿相XRD分析　(b) 内蒙古石拐盆地页岩矿相XRD分析　(c) 塔里木盆地页岩矿相XRD分析

(d) 四川盆地页岩微观结构SEM分析　(e) 内蒙古石拐盆地页岩微观结构SEM分析　(f) 塔里木盆地页岩微观结构SEM分析

图 1　不同研究区页岩矿物组成与微观结构特征

Fig.1　Shale mineral composition and microstructure characteristics in different study areas

2　纳米压痕实验原理与方法

2.1　纳米压痕实验原理

2.1.1　弹性模量和硬度

纳米压痕的基本原理是将一个已知硬度、弹性模量等材料参数的尖端压头压入未知参数的被测材料内部, 以得到荷载−位移曲线 (p−h 曲线), 并通过对 p−h 曲线的科学分析得到被测材料的力学参数。图 2 为典型的纳米压痕加载和卸载曲线示意。其中 p_m 为最大荷载, h_1 为刚达到最大荷载时的压痕深度, 即持荷平台段的起始压痕深度, h_m 为最大压痕深度, h_f 为完全卸载后的残余压痕深度, h_c 为压痕接触深度, S 为卸载曲线顶部斜率, 即接触刚度, $S=p_m/(h_m-h_c)$。利用上述参数, 使用 Oliver-Pharr 弹性参数计算方法可得到实验材料的弹性模量和硬度[19-21]。

其中压痕硬度可通过下式计算:

$$H=\frac{p_{max}}{A_c} \tag{1}$$

式中: 接触面积 A_c 与压痕接触深度 h_c 有关, $A_c \approx ah$, m^2;

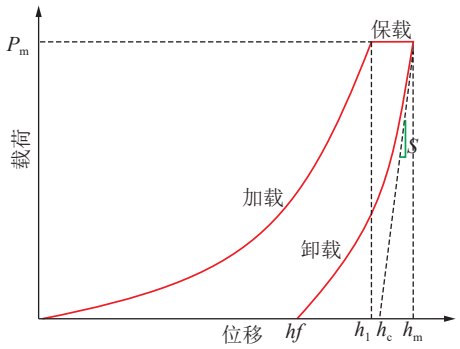


图 2　纳米压痕实验原理

Fig.2　Principle of nanoindentation test

a 为与压头形状有关的参数，对于 Berkovich 压头，a=24.5。

弹性模量计算方法：

$$E_r = \frac{1}{\beta}\frac{\sqrt{\pi}}{2}\frac{S}{\sqrt{A_c}} \tag{2}$$

式中：A_c 是压头与被测材料的接触面积，m^2；β 为压头形状系数，对于 Berkovich 压头和 Vickers 压头，β 分别取 1.034 和 1.012。

被测材料的真实弹性模量 E 与折减模量 E_r 存在以下关系：

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-v_i^2}{E_i} + \frac{1-v^2}{E} \tag{3}$$

式中：E 为被测材料的弹性模量；v为被测材料的 Poisson 比；E_i 为压头的弹性模量；v_i为压头的 Poisson 比，GPa；金刚石压头的弹性模量和 Poisson 比分别为 1 141 GPa 和 0.07。

2.1.2 断裂韧度

根据经典线弹性断裂力学理论[19]，临界状态下的能量释放率 G_c 定义为裂缝扩展单位面积所耗散的能量：

$$G_c = \frac{W_c}{A_{fra}} \tag{4}$$

式中：W_c 为断裂能，J；A_{fra} 为断裂能释放区域的面积，即最大压入深度时的接触面积 A_c，m^2。

临界应力强度因子 K_{IC}，即断裂韧度，可通过公式 (5) 计算得出。因此，只要表征出断裂能 W_c，即可通过能量方法得到断裂韧度值。

$$K_{IC} = \sqrt{G_c\frac{E}{1-v^2}} \tag{5}$$

由能量守恒关系可知，压痕实验全过程所施加的总能量 W_T 和断裂能 W_C 的关系可表示为[22-23]：

$$W_C = W_T - W_E - W_P \tag{6}$$

式中：W_E 为测量过程中材料弹性能，J；W_P 为纯塑性功，J。W_T 和 W_E 可通过压痕试验的 p-h 曲线直接得到，而 W_P 需要通过模型计算得到。对于纯弹塑性材料，W_T 和 W_P 之间存在以下关系：

$$\frac{W_P}{W_T} = \frac{W_T - W_E}{W_T} = \frac{1+\frac{1}{2V_t}-\frac{h_1}{h_m}-\frac{1}{2V_e}\left[1-\frac{h_f}{h_m}\right]}{1+\frac{1}{2V_t}-\frac{h_1}{h_m}} \tag{7}$$

式中：V_t 为总能量系数；Ve 为弹性能量系数。二参数可由压痕加卸载曲线包络面积关系求得。通过式 (4)、式 (6)、式 (7)，即可求得断裂能 W_C，进而得到页岩断裂韧度。

2.2 实验样品及测试流程

2.2.1 样品制备

野外采取页岩岩块用金刚石切割锯切割成 1 cm 见方小块，后期进行打磨和抛光处理，使用的打磨砂纸目数依次为 1 500、2 000、2 500 和 3 000 目，每道工序打磨时间不少于 15 min。使用抛光悬浮液细度依次为 3 μm 和 1 μm，每道抛光工序时间不少于 5 min。样品满足试验要求。

2.2.2 试验测试流程

纳米压痕实验使用内蒙古工业大学力学实验中心安捷伦 G200 型纳米压痕仪完成，仪器采用的 Berkovich 金刚石压头各面间夹角分别为 130.60°和 154.10°，压头曲率 20 nm。实验中压头快速逼近样品表面，探测到样品表面时载荷逐渐增大至峰值载荷，单次加载时间设定为 10 s。为减少测试中加卸载惯性对结果影响，卸载速率、加载速率均设定为 1 mN/s。为避免测试时压痕间相互影响，设定测点间距为 50 μm。本次试验每个页岩试样开展 3 个压点测试。

3 试验结果分析

3.1 页岩加卸载位移–载荷关系特征

页岩纳米压痕实验过程包括 4 个阶段。① 表面接近阶段：采用连续刚度测量方法，10 nm/s 下降速度使压针缓慢靠近试样表面，当接触刚度突然增大时，表明压针已接触到试样表面；② 加载阶段：采用载荷控制加载方式使压针压入试样直到预定最大载荷，此时在材料内部形成压痕损伤。从图 3 发现，四川盆地龙马溪组海相页岩、内蒙古石拐盆地长汉沟组、新疆塔西南杨叶组陆相页岩的最大载荷差异较大，分别为 292、159、56 mN；③ 保载阶段：当压入载荷达到最大荷载后保载一段时间，从图 3 中看出不同页岩保载中对应的位移不同，推测与不同沉积相页岩的蠕变程度差异有关；④ 卸载阶段：把载荷从最大荷载卸载到 0。加载阶段，随着压头下行位移增大载荷随之增大，当达到最大侵入深度后压头卸载，压头上行位移减小载荷逐渐降低。由图 3 可知，四川盆地龙马溪组海相页岩、内蒙古石拐盆地长汉沟组、新疆塔西南杨叶组陆相试样加卸载滞回环依次减小，表明外载作用下三地页岩内部损伤程度加剧，压头侵入中页岩对外来能量吸收效率增强。上述特征和规律能够间接指示不同沉积相页岩脆性强弱，页岩力学性质上显著差异决定了不同类型页岩储层压裂造缝机制及策略不同。

3.2 页岩弹性模量与硬度特征

页岩弹性模量、硬度在储层可压性评价和压裂工

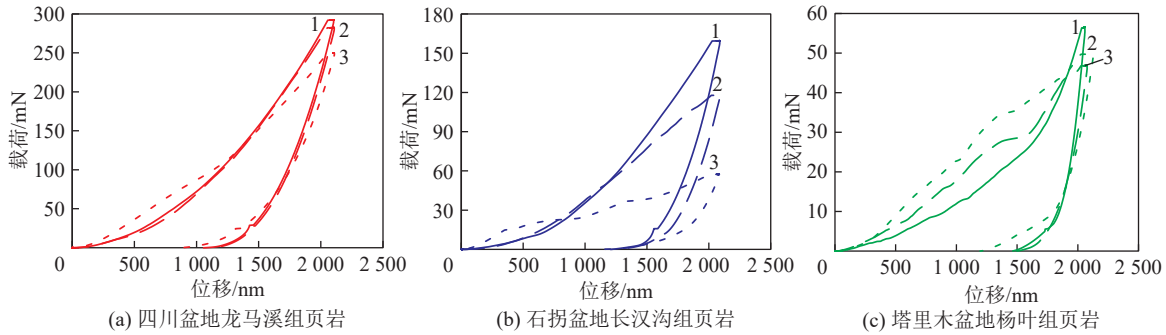


图 3　不同研究区页岩纳米压痕加载位移–载荷曲线

Fig.3　Displacement-load curves of shale nanoindentation loading in different study areas

程甜点定位上有关键作用，依据式 (1)—式 (3) 计算方法，得到四川盆地龙马溪组海相页岩、内蒙古石拐盆地长汉沟组、新疆塔西南杨叶组陆相页岩弹性模量/硬度分别为 60.27/3.05 GPa、34.87/1.21 GPa、23.40/0.57 GPa。如图 4 所示，海相页岩硬度和弹性模量显著高于其他地区，说明海相页岩致密，储层渗透性低，不利于页岩油气由基质孔隙、微裂隙进入压裂裂缝。

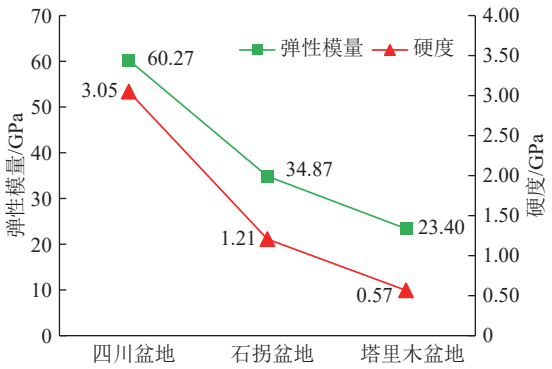


图 4　不同研究区页岩弹性模量、硬度特征

Fig.4　Elastic modulus and hardness characteristics of shale

四川盆地海相页岩刚度越大，对外来能量吸收效率越低。在钻完井、压裂、排采期间可能因应力突然释放造成井眼空间破坏 (类似于地下岩爆)[24-25]。此外页岩储层压裂裂缝后期闭合倾向更强，不利于维护压裂裂缝长期导流能力。而内蒙古石拐盆地、新疆塔里木盆地陆相页岩中黏土矿物含量高，岩石相对较软，力学响应呈塑性特征。由于陆相页岩刚度较低，外载下产生蠕变效应，会对页岩储层水平井井眼稳定性以及压裂裂缝内支撑剂充填效果构成干扰。

3.3　页岩断裂韧度特征

依据式 (4)—式 (7) 计算方法，得到四川盆地龙马溪组海相页岩、内蒙古石拐盆地长汉沟组、新疆塔西南杨叶组陆相页岩断裂韧性分别为 1.56、0.75、0.28 MPa · $m^{0.5}$。如图 5 所示，海相页岩断裂韧性远高于陆相页岩，岩石阻裂能力强，储层压裂裂缝延展难度大，造缝过程能耗高，压裂裂缝延展速率慢，裂缝内流体有充足时间形成憋压效应，利于造宽缝。当裂缝净压力超过水平应力差时，裂缝发生转向，利于形成复杂缝网[26-28]。反观内蒙古石拐盆地、新疆塔里木盆地陆相页岩断裂韧性低，裂缝延展速率快，裂缝内流体净压力不足，很难突破应力差的约束，往往形成单一裂缝形式。

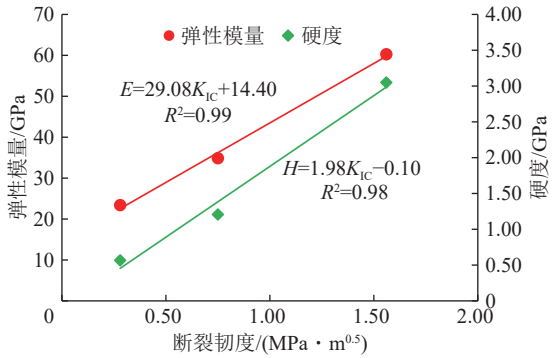


图 5　页岩断裂韧度与弹性模量及硬度间的关系

Fig.5　Relationship between fracture toughness and elastic modulus and hardness of shale

3.4　页岩脆性特征能量法评价

脆性系指材料破坏之前基本无明显的应变变形阶段，而直接发生破坏的力学特征[23]。显然，材料脆性越显著，其破坏过程越迅速且越易形成体积破碎，越有利于提升材料整体破坏效率。同理对于非常规致密油气储层而言，储层岩石脆性越强，其在外载下破碎效率越高，能形成岩石体积破碎状态，产生大量辐射状裂缝，对于扩大储层体油气资源波及体积，构建多尺度导流通道非常有利。

由图 6 可知，纳米压痕全过程所消耗的总能量 W_T 由断裂能 W_C、塑性能 W_P、弹性能 W_E 3 部分构成[19-21]：

$$W_T = W_C + W_E + W_P \tag{8}$$

笔者提出利用页岩纳米压痕全程耗散的弹性能与塑性能与断裂能之和的比作为评价页岩脆性程度的指标，称之为脆性系数，无量纲。

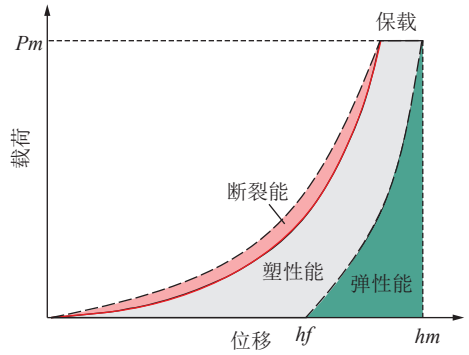


图 6 页岩纳米压痕过程能量耗散与脆性评价原理

Fig.6 Energy distribution and brittleness evaluation principle of shale based on nanoindentation

$$B = \frac{W_E}{W_C + W_P} \tag{9}$$

由式 (9) 可知，材料脆性越强，压痕测试中加卸载曲线趋于重合，弹性能占比高，如玻璃、陶瓷等材料其脆性系数越趋近于 1；材料脆性越弱，弹性能比例小，则脆性系数趋近于 0。

利用上述方法计算四川盆地龙马溪组海相页岩、内蒙古石拐盆地厂汉沟组陆相页岩、新疆塔里木盆地杨叶组陆相页岩的脆性系数分别为 0.89、0.27、0.04，海相页岩脆性系数是内蒙古石拐盆地、新疆塔里木陆相页岩的 3～4 倍、15～17 倍，脆性显著，岩石破裂后裂缝延展阻力小，裂缝扩展耗能低，同时能形成辐射裂缝[29-30]。页岩脆性指数与弹性模量及硬度有正相关性 (图 7)，岩石硬度越大越致密，脆性越强，越有利于储层实现体积压裂改造。

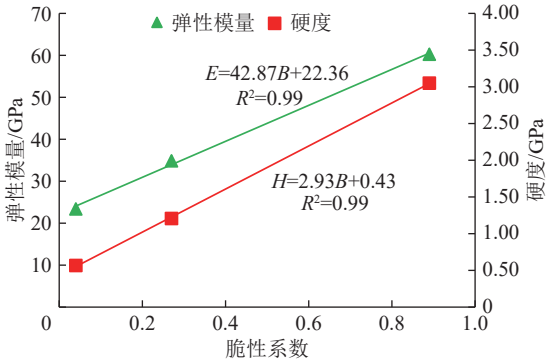


图 7 页岩脆性系数与弹性模量、硬度间关系

Fig.7 Relationship between brittleness, elastic modulus and hardness of shale

通常，岩石断裂韧度受其自身弹性模量和硬度的制约，同时岩石脆性也与弹性模量及硬度存在强相关性，简单构建页岩断裂韧度与脆性间的相关性不合理，会误导页岩储层力学的预测结果。

笔者提出首先应对岩石断裂韧度进行折算，通过扣除因评价对象自身弹性模量 (E) 和硬度 (H) 形成的阻裂性能干扰，可得到页岩韧性系数 T。

三者关系为：

$$T = \frac{K_{IC}}{EH} \tag{10}$$

笔者对四川盆地龙马溪组海相页岩、内蒙古石拐盆地厂汉沟组陆相页岩、新疆塔里木盆地杨叶组陆相页岩纳米压痕数据进行拟合分析，得到结果如图 8 所示，页岩的脆性系数与其韧性系数呈负相关关系，反映出页岩脆性越强，其韧性系数越小，但不代表其绝对断裂韧度就低。

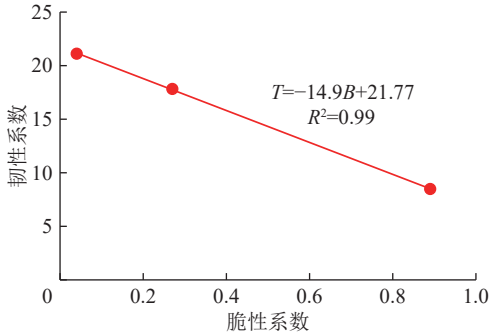


图 8 页岩脆性系数与韧性系数的关系

Fig.8 Relationship between brittleness and toughness of shale

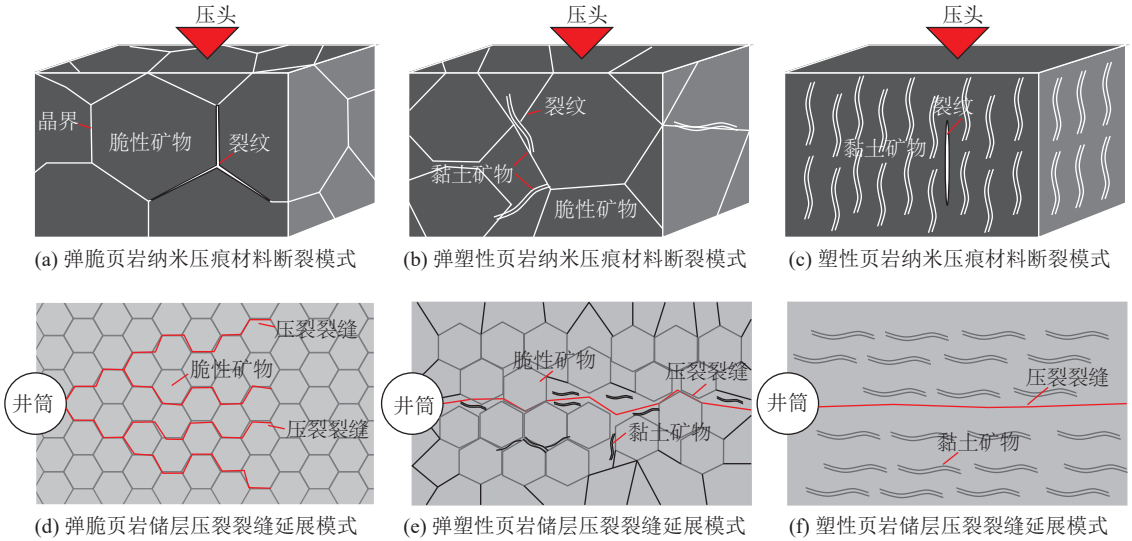
4 讨 论

4.1 页岩脆性、断裂性能对压裂造缝的影响

四川盆地龙马溪组海相页岩 (弹脆性页岩)、内蒙古石拐盆地长汉沟组 (弹塑性页岩)、新疆塔西南杨叶组陆相页岩 (塑性页岩)，由于页岩脆性强弱、对外载响应方式的不同，外载作用下页岩断裂方式及储层压裂裂缝延展形态、裂缝充填模式差异很大。具体表现在：

1) 弹脆性页岩：该类页岩硬度大，弹性模量高，断裂韧度高，硬脆性显著呈弹脆性。如图 9a 所示，压痕测试中压头下部试样内产生应力集中效应，当应力强度因子超过长英质脆性矿物界面结合强度时，页岩开裂并以沿晶断裂形式扩展；如图 9d 所示，弹脆性页岩油气储层压裂中裂缝主要沿造岩矿物晶界扩展，裂缝分叉合并频繁，断裂形态复杂易形成复杂裂缝缝网，但裂缝延展总体趋势依然受应力控制，对提升页岩储层体积压裂造缝效率有利。由于弹脆性页岩绝对韧度高、相对韧性系数小，页岩的实际阻裂能力有限，导致裂缝流体净压力反而不高，页岩储层压裂裂缝宽度有限，裂缝后期充填支撑难度较大。

2) 弹塑性页岩：该类页岩具有弹性模量、硬度相对中等，断裂韧度中等，适中的脆性系数和韧性系数等指标特征，是介于硬脆性和塑性页岩之间的页岩类



(a) 弹脆页岩纳米压痕材料断裂模式　(b) 弹塑性页岩纳米压痕材料断裂模式　(c) 塑性页岩纳米压痕材料断裂模式

(d) 弹脆页岩储层压裂裂缝延展模式　(e) 弹塑性页岩储层压裂裂缝延展模式　(f) 塑性页岩储层压裂裂缝延展模式

图 9　不同沉积相页岩微观断裂机理及储层压裂裂缝延展模式

Fig.9　Microfracture mechanism of shale with different sedimentary facies and fracture extension mode of reservoir

型。XRD 结果显示, 该页岩由石英、长石等脆性矿物和黏土等塑性矿物混合组成, 其中黏土矿物在长英质坚硬矿物间发挥了缓冲和润滑作用, 降低了长英质脆性矿物颗粒间的滑移难度。外载下页岩由软矿物开裂, 裂缝延展遇长英质坚硬矿物等高阻体后绕行, 后期裂缝平行主压应力延展 (图 9b); 储层压裂中, 压裂裂缝通常避开坚硬矿物发展, 形成曲折度较高的复杂裂缝 (图 9e)。

3) 塑性页岩: 该类页岩硬度低、韧性低、脆性弱, 岩石较软。然而页岩的相对韧性系数却不低, 因而具备一定的阻裂性能, 这对于储层改造尤为关键。页岩主要由黏土矿物组成, 成分、结构均一。页岩对外载具有优异的卸荷及能量吸收效果, 压痕测试中易形成简单张性裂纹 (图 9c); 该类页岩储层压裂裂缝在应力约束下形成单一平直裂缝 (图 9f), 由于岩石韧性系数较高, 储层裂缝延展阻力相对大, 裂缝流体净压力较高, 有利于形成宽缝, 利于后期裂缝充填支撑。

4.2　页岩储层工程力学品质评价指标体系

页岩油气储层力学非均质性强, 储层工程力学品质对油气开发影响关键, 笔者提出一种页岩储层工程力学品质评价方案 (表 1)。评价指标包括弹性模量、硬度、断裂韧度、脆性系数、硬脆性 (岩石硬度与脆性系数的乘积)、韧性系数、黏土矿物含量以及矿物颗粒接触方式等, 其中弹性模量和硬度特征主要决定页岩密实程度, 密实程度同样会影响岩石的断裂性能; 断裂韧度、韧性系数主要决定页岩的抗裂性能, 断裂韧度越高断裂难度越大, 裂缝延展能耗越高, 同时还会影响裂缝延展的复杂程度以及缝宽; 脆性系数及硬脆性主要约束页岩破坏失效方式, 尤其是外载下页岩破坏有无辐射区, 并最终决定了页岩储层体积压裂改造效率和储层压裂甜点的准确定位; 页岩中黏土矿物含量和矿物接触方式主要控制页岩微观组构特征, 矿物边界接触形式尤其是制约页岩在外载作用下变形方式和对外部能量的吸收耗散效率, 从而决定岩石的断裂方式[31-32]; 页岩中黏土矿物含量越低则脆性矿物含量越高, 岩石中脆性矿物以晶体界面间的紧密接触为主, 属于刚性接触状态, 外力下页岩对能量吸收效率低, 力学响应过程呈现脆性显著的特征, 岩石沿矿物晶界 (解理面) 脆断; 黏土矿物含量越高, 矿物间存在类似金属材料的位错结构, 岩石协调变形能力强, 外力下以大变形而非断裂吸收外部能量, 岩石致裂造缝效率低下。结合上述指标可对页岩储层工程力学品质、可压裂性进行定量化评价。

表 1　页岩储层工程力学品质评价指标体系

Table 1　Evaluation index system of shale reservoir engineering mechanics quality

等级	弹性模量/GPa	硬度/GPa	断裂韧度/(MPa · $m^{0.5}$)	脆性系数	硬脆性/GPa	韧性系数	黏土含量/%	矿物接触方式
优	60	3	1.2	0.8	2.4	10	15	刚性接触
中	25～60	1～3	0.5～1.2	0.2～0.8	0.2～2.4	10～20	15～30	混合接触
劣	25	1	0.5	0.2	0.2	20	30	柔性接触

5 结 论

1) 四川盆地龙马溪组海相页岩、内蒙古石拐盆地长汉沟组、新疆塔西南杨叶组陆相页岩的弹性模量分别为 60.27、34.87、23.40 GPa，硬度分别为 3.05、1.21、0.57 GPa。加卸载曲线显示，上述研究区页岩滞回环依次减小，表明外载下页岩内部损伤程度逐渐增强，压头侵入中不同页岩对外来加载能量的吸收效率增强。

2) 四川盆地龙马溪组海相页岩、内蒙古石拐盆地长汉沟组、新疆塔里木盆地西南杨叶组陆相页岩的断裂韧性分别为 1.56、0.75、0.28 MPa·$m^{0.5}$，海相页岩断裂韧性高，储层压裂改造中裂缝延展难度大，但相对陆相页岩，裂缝流体净压力高，更易形成复杂缝网。

3) 四川盆地龙马溪组海相页岩脆性系数是内蒙古石拐盆地长汉沟组、新疆塔里木盆地西南杨叶组陆相页岩的 3～4 倍和 16 倍，海相页岩岩石破裂后裂缝延展耗能低，易形成复杂裂缝缝网。

4) 弹脆性页岩裂缝主要沿矿物晶体界面扩展，由于页岩绝对韧度高但相对韧性系数较小，裂缝流体净压力不高，裂缝开度较小，后期充填支撑难度大；弹塑性页岩裂缝遇坚硬矿物绕行，裂缝曲折度高；纯塑性页岩压裂中形成平直缝，岩石韧度高，裂缝流体压力高，缝宽大，利于颗粒充填。

5) 提出了一种综合岩石弹性模量、硬度、断裂韧度、脆性系数、硬脆性、韧性系数、黏土矿物含量及矿物接触方式等指标的页岩储层工程品质评价方案，以期为页岩储层可压裂性评价、压裂工程甜点优选提供工程力学依据。

参考文献(References):

[1] 金之钧，王冠平，刘光祥，等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报，2021，42(7)：821−835.
JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 821−835.

[2] 周立宏，赵贤正，柴公权，等. 陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践：以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例[J]. 石油勘探与开发，2020，47(5)：1059−1066.
ZHOU Lihong, ZHAO Xianzheng, CHAI Gongquan, et al. Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil: A case study of Member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1059−1066.

[3] 雷群，杨立峰，段瑶瑶，等. 非常规油气“缝控储量”改造优化设计技术[J]. 石油勘探与开发，2018，45(4)：719−726.
LEI Qun, YANG Lifeng, DUAN Yaoyao, et al. The “fracture-controlled reserves” based stimulation technology for unconventional oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 719−726.

[4] 蒋廷学，卞晓冰，孙川翔，等. 深层页岩气地质工程一体化体积压裂关键技术及应用[J]. 地球科学，2023，48(1)：1−13.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, SUN Chuanxiang, et al. Key technologies in geology-engineering integration volumetric fracturing for deep shale gas wells[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 1−13.

[5] KRAMAROV V, PARRIKAR P N, MOKHTARI M. Evaluation of Fracture Toughness of Sandstone and Shale Using Digital Image Correlation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering

[6] JIN Z F, LI W X, JIN C R, et al. Anisotropic elastic, strength, and fracture properties of Marcellus shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 109: 124−137.

[7] 班宇鑫，傅翔，谢强，等. 页岩巴西劈裂裂缝形态评价及功率谱特征分析[J]. 岩土工程学报，2019，41(12)：2307−2315.
BAN Yuxin, FU Xiang, XIE Qiang, et al. Evaluation of fracture morphology of shale in Brazilian tests and analysis of power spectral characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12): 2307−2315.

[8] 侯振坤，杨春和，孙书伟，等. 板状页岩单轴压缩实验及断裂力学分析[J]. 煤炭学报，2017，42(5)：1251−1257.
HOU Zhenkun, YANG Chunhe, SUN Shuwei, et al. Experimental study and fracture mechanics analysis of plate shale under uniaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1251−1257.

[9] 李庆辉，陈勉，金衍，等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(8)：1680−1685.
LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680−1685.

[10] LI N, ZOU Y S, ZHANG S C, et al. Rock brittleness evaluation based on energy dissipation under triaxial compression[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 183: 106349.

[11] 侯振坤，杨春和，魏翔，等. 龙马溪组页岩脆性特征试验研究[J]. 煤炭学报，2016，41(5)：1188−1196.
HOU Zhenkun, YANG Chunhe, WEI Xiang, et al. Experimental study on the brittle characteristics of Longmaxi Formation shale[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1188−1196.

[12] JAGIELSKI J, AUBERT P, MACIEJAK O, et al. Nanohardness and brittleness of irradiated spinel ceramics[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2012, 286: 196−199.

[13] YU H Y, ZHANG Y H, LEBEDEV M, et al. Nanoscale geomechanical properties of western Australian coal[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 162: 736−746.

[14] 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.

[15] 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. Study on nanomechanical behavior of coal using nanoindentation tests[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8): 3453−3467.

[16] 陈立超, 王生维, 张典坤. 煤岩脆性特征压痕法评价及储层改造意义[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 955−964.
CHEN Lichao, WANG Shengwei, ZHANG Diankun. Evaluation of brittle characteristics of coal and rock by indentation method and its significance in reservoir reconstruction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 955−964.

[17] 陈立超, 张典坤, 吕帅锋, 等. 海/陆相页岩微观力学性质压痕测试研究[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(6): 31−38.
CHEN Lichao, ZHANG Diankun, LÜ Shuaifeng, et al. Micromechanical characteristics of marine/continental shale based on indentation test[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(6): 31−38.

[18] 陈立超, 张典坤, 吕帅锋. 层理方位对页岩断裂性能与裂缝延展模式的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(6): 1878−1886.
CHEN Lichao, ZHANG Diankun, LÜ Shuaifeng. Influence of bedding orientation on fracture properties and fracture propagation modes of shale[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(6): 1878−1886.

[19] 包亦望. 陶瓷及玻璃力学性能评价的一些非常规技术[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(S1): 117−124.
BAO Yiwang. Some unconventional techniques for evaluating mechanical properties of ceramics and glasses[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(S1): 117−124.

[20] LIU X Y, XU D P, LI S J, et al. An insight into the mechanical and fracture characterization of minerals and mineral interfaces in granite using nanoindentation and micro X-ray computed tomography[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(5): 3359−3375.

[21] LIU K Q, OSTADHASSAN M, BUBACH B. Applications of nanoindentation methods to estimate nanoscale mechanical properties of shale reservoir rocks[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 35: 1310−1319.

[22] 冯莹, 彭宇, 徐世烺, 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.

[23] MANJUNATH G L, JHA B. Nanoscale fracture mechanics of Gondwana coal[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 204: 102−112.

[24] 冯夏庭, 陈炳瑞, 张传庆, 等. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[25] 王双明, 寇海波, 申艳军, 等. 含煤岩系 CO_2 突出对浅层 CO_2 地质封存的启示[J]. 绿色矿山, 2023(1): 33−47.
WANG Shuangming, KOU Haibo, SHEN Yanjun, et al. Implications of CO_2 outburst from coal-bearing rock series for the CO_2 geological sequestration under shallow layers[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 33−47.

[26] 蒋廷学, 卞晓冰, 王海涛, 等. 深层页岩气水平井体积压裂技术[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 90−96.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, WANG Haitao, et al. Volume fracturing of deep shale gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 90−96.

[27] 陈立超, 王生维, 张典坤. 褐煤断裂特征半圆弯曲试验研究: 以内蒙古胜利煤田为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 63−71.
CHEN Lichao, WANG Shengwei, ZHANG Diankun. Experimental investigation on fracture behavior of lignite and its fracturing significance: Taking Shengli Coalfield as an example[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 63−71.

[28] 陈立超, 王生维, 孙钦平, 等. 内蒙古自治区东部低阶煤层气地质力学特征与勘探开发技术[J]. 天然气工业, 2024, 44(10): 159−169.
CHEN Lichao, WANG Shengwei, SUN Qinping, et al. Geomechanical characteristics and exploration and development technologies of low-rank coalbed methane in eastern Inner Mongolia[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 159−169.

[29] 张典坤, 陈立超, 王生维. 压痕法评价煤层气井固井水泥石断裂力学性质[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 115−122.
ZHANG Diankun, CHEN Lichao, WANG Shengwei. Evaluation of fracture mechanical properties of set cement in CBM wells by the indentation method[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 115−122.

[30] 马代兵, 陈立超. 煤层气直井压裂效果及其对产能影响−以窑街矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 130−136.
MA Daibing, CHEN Lichao. Hydraulic fracturing effect of CBM vertical well and its impact on productivity: A case study of Yaojie Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 130−136.

[31] 宫凤强, 闫景一, 李夕兵. 基于线性储能规律和剩余弹性能指数的岩爆倾向性判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 1993−2014.
GONG Fengqiang, YAN Jingyi, LI Xibing. A new criterion of rock burst proneness based on the linear energy storage law and the residual elastic energy index[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 1993−2014.

[32] 陈昀, 金衍, 陈勉. 基于能量耗散的岩石脆性评价方法[J]. 力学学报, 2015, 47(6): 984−993.
CHEN Yun, JIN Yan, CHEN Mian. A rock brittleness evaluation method based on energy dissipation[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6): 984−993.