Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(4), 1114-1127
Published Online July 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.144110

Hans汉斯

层状岩体力学特性及PFC模拟研究进展

赵宇杰[1]，王鑫尧[1]，张博文[1]，王　英[1]，李　源[2]

[1]辽宁工业大学土木建筑工程学院，辽宁　锦州
[2]山西冶金岩土工程勘察有限公司，山西　太原

收稿日期：2026年6月15日；录用日期：2026年7月18日；发布日期：2026年7月30日

摘　要

非常规油气资源的高效开发依赖水力压裂形成复杂裂缝网络，然而层状岩体的强各向异性导致裂缝扩展行为复杂、井壁失稳频发。文章首先系统综述了岩石断裂韧性理论、层状岩体力学特性及PFC数值模拟的研究进展。回顾了经典断裂准则(最大周向应力/应变准则、能量类准则)及I型断裂韧性测试方法，指出现有准则主要面向均质材料，对层理各向异性考虑不足。其次，总结了层状岩体强度、变形与破坏模式的倾角依赖性，分析了岩层厚度比、围压、界面性质等关键影响因素及各向异性强度准则。再次，阐述了PFC离散元方法在岩石宏细观力学行为模拟中的应用优势与局限性，对比了不同接触模型的适用性。最后，指出当前研究在层状岩体各向异性断裂准则、方向性断裂韧性测试、细观穿层机理等方面存在的不足，并展望了建立考虑层理真实形态的数值模型、闭环研究流程的未来方向。

关键词

层状岩体，断裂韧性，各向异性，PFC数值模拟

Advances in the Study of Mechanical Properties and PFC Simulation of Layered Rock Masses

Yujie Zhao[1], Xinyao Wang[1], Bowen Zhang[1], Ying Wang[1], Yuan Li[2]

[1]School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning
[2]Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Investigation Co., Ltd., Taiyuan Shanxi

Received: June 15, 2026; accepted: July 18, 2026; published: July 30, 2026

Abstract

The efficient development of unconventional oil and gas resources relies on hydraulic fracturing to create complex fracture networks. However, the strong anisotropy of layered rock masses leads to

文章引用: 赵宇杰, 王鑫尧, 张博文, 王英, 李源. 层状岩体力学特性及 PFC 模拟研究进展[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 1114-1127. DOI: 10.12677/me.2026.144110

complex fracture propagation behavior and frequent borehole instability. This paper first systematically reviews the research progress on rock fracture toughness theory, the mechanical properties of layered rock masses, and PFC numerical simulation. Classical fracture criteria (maximum tangential stress/strain criteria, energy-based criteria) and mode I fracture toughness testing methods are reviewed. It is pointed out that existing criteria are mainly oriented to homogeneous materials and insufficiently consider bedding anisotropy. Secondly, the dip-angle dependence of strength, deformation, and failure modes of layered rock masses is summarized, and key influencing factors such as rock layer thickness ratio, confining pressure, interface properties, as well as anisotropic strength criteria are analyzed. Thirdly, the application advantages and limitations of the PFC discrete element method in simulating macro- and micro-mechanical behaviors of rocks are elaborated, and the applicability of different contact models is compared. Finally, the deficiencies in current research regarding anisotropic fracture criteria for layered rock masses, directional fracture toughness testing, and meso-scale cross-layer mechanisms are identified, and future directions are proposed, including the establishment of numerical models considering the true morphology of bedding and closed-loop research workflows.

Keywords

Layered Rock Mass, Fracture Toughness, Anisotropy, PFC Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

能源安全作为关乎国家经济社会发展全局与战略布局的核心议题，对国家繁荣进步、民生福祉提升及社会长治久安具有十分重要的意义[1]-[5]。非常规油气资源作为中国能源体系的战略接替资源之一[6]，目前正处于开发的高速发展阶段。自 20 世纪 70 年代以来，中国开始了以致密气、煤层气为代表的非常规油气地质研究和勘探实践等工作，经过四十多年的创新发展，发现了苏里格、大牛地、川西、天府等多个大中型致密砂岩气田，神木、大吉及沁水等煤层气田，涪陵、长宁、威远、太阳、南川等页岩气田，以及长庆庆城、新疆吉木萨尔、大庆古龙、胜利济阳等页岩油田[7]。全球非常规油气剩余技术可采资源总量约 8605 × 10^8 t 油当量，约占整个油气资源总量的 58%，是常规油气资源量的 1.38 倍，其中非常规油资源量 5554 × 10^8 t，非常规气资源量 383 × 10^{12} m^3 (图 1) [8]。

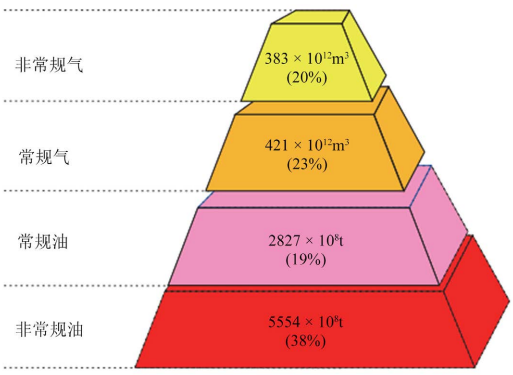


Figure 1. World oil and gas resource types and remaining technically recoverable resources [8]
图 1. 世界油气资源类型及剩余技术可采资源量图[8]

然而，非常规油气储层普遍具有低孔低渗特征，必须依靠水力压裂形成复杂人工裂缝网络方可实现经济开发，其中裂缝的起裂方向、扩展路径及其穿层能力直接决定了储层改造体积与单井产能。在工程实践中长期面临两大突出挑战：一是水力压裂形成的人工裂缝形态异常复杂，常呈现阶梯状、鱼骨状乃至网状等非平面扩展模式[9]；二是在钻井过程中，井壁极易沿层理面发生失稳垮塌，严重制约安全高效作业[10]。岩相组合定义了垂向上不同岩性(如页岩、砂岩、灰岩)的序列、厚度及接触关系，它从根本上控制了岩石力学层的空间分布与界面属性[11]。不同岩相具有差异显著的弹性模量、抗拉强度及断裂韧性，它们之间的界面(如页岩－砂岩界面)便成为裂纹扩展屏障或优先通道。

岩石断裂韧性是表征材料抵抗裂纹失稳扩展的核心参数，因此准确认识储层岩石的断裂韧性及其控制机理对优化压裂设计具有重要意义。我国非常规储层多为层状沉积岩体，页岩、致密砂岩常与泥岩互层产出，层理等弱面导致力学行为呈强横观各向异性，断裂韧性也表现出明显方向依赖性。水力裂缝垂向扩展时常遇岩性界面，界面强度、地应力差及岩层厚度比等因素共同决定裂缝是穿层、沿界面滑移还是分叉转向。因此，深入揭示层状岩体的各向异性强度、破坏模式与断裂韧性层理效应，已成为研究前沿与难点。岩石断裂的本质是内部微裂纹萌生、聚集与贯通，室内实验难以连续透明地捕捉这一细观过程。颗粒流程序(PFC)作为一种离散元方法，通过颗粒间接触与黏结断裂直接再现裂纹动态演化，近年来被广泛用于层状复合岩体模拟。但专门针对互层岩体断裂韧性(如 SCB 试验模拟、人字形切槽试样)的 PFC 模拟仍极为有限，这正是当前的重要发展方向。

本文系统综述了岩石断裂韧性、层状岩体力学特性及 PFC 数值模拟的研究进展，分析了当前研究中尚存的不足，并对未来研究方向进行展望。

2. 岩石断裂韧性研究现状

岩石断裂力学是研究岩石中裂纹起裂、扩展及断裂规律的理论基础。天然岩体中普遍存在各种尺度的裂隙，这些裂隙在应力作用下会萌生、扩展乃至贯通，最终影响岩体工程的稳定性与安全性[12]。根据裂纹面相对位移的不同，断裂力学将断裂模式划分为三种基本类型：I 型(张开型，受拉应力作用)、II 型(滑移型，受面内剪切应力作用)与 III 型(撕开型，受面外剪切应力作用)，如图 2 所示。

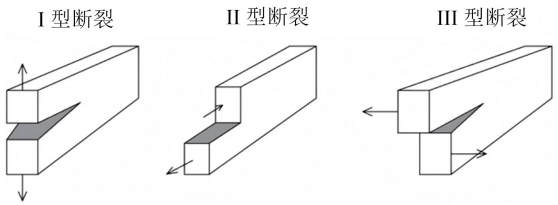


Figure 2. Schematic diagram of fault types [13]
图 2. 断裂类型示意图[13]

2.1. 断裂准则

断裂准则旨在从理论上预测裂纹起裂的方向与临界载荷。自 Griffith 提出能量平衡理论[14]以来，研究者从应力、应变和能量等角度发展了一系列准则。

最大周向应力准则由 Erdogan 与 Sih 提出[15]。该准则假定裂纹沿周向应力达到最大的方向扩展，且当该方向上的周向应力达到材料的临界值时发生断裂。传统的 MTS 准则仅考虑了 Williams 级数展开中的奇异项，忽略了非奇异项(即 T 应力)的影响。T 应力平行于裂纹方向，不影响裂尖奇异性但影响塑性区形态与断裂起始角。Smith 等人[16]率先将 T 应力引入 MTS 准则，提出了广义 MTS 准则，能够更准确地预测断裂起始角与断裂韧性包络线。

最大周向应变准则基于胡克弹性理论，将断裂判据由应力转换为应变。Chang [17]提出了适用于平面应力状态的二维 MTSN 准则。该准则在处理某些材料的复合型断裂问题时表现出优于 MTS 准则的精度，因为它间接反映了泊松比的影响。

能量类准则是另一大类重要的断裂理论。Sih [18]提出的最小应变能密度因子准则认为，裂纹沿应变能密度因子最小的方向扩展，当该因子达到临界值时发生断裂。该准则统一处理了三种断裂模式，但物理意义较为抽象。而 Koo 和 Choy [19]提出的最大周向应变能密度因子准则，则聚焦于周向方向的应变能密度，将能量判据与方向性结合。Moghaddam [20]的平均应变能密度准则通过在裂纹尖端塑性或损伤区内积分平均应变能密度来建立断裂判据，避免了极值点奇异性的困扰。Nuismer [21]的最大能量释放率准则基于断裂过程中的能量平衡，认为裂纹沿能量释放率最大的方向扩展，但该准则在分支裂纹方向的数学处理上较为复杂。

实际岩体中的裂纹扩展本质上是三维问题。在三维情况下，裂纹不再仅发生面内偏转，还可能发生面外扭转。针对 I/III 复合型断裂，Liu 等人[22]将二维 MTS 准则扩展至三维。

上述准则主要面向均质各向同性材料。对于层状岩体，层理面作为弱面会显著改变裂尖应力场。目前，仅有少数研究尝试对各向异性断裂准则进行拓展，例如：基于 MTS 准则引入层理面方向函数修正项，或在能量准则中考虑弱面定向的应变能分配。然而，这些修正多针对单一弱面且未经过系统的复合型断裂实验验证，对于互层岩体(两种以上材料交替)的适用性更差。表 1 对比了典型断裂准则在层状岩体中的适用性。

Table 1. Typical fracture criteria and their applicability evaluation for layered rock masses
表 1. 典型断裂准则及其对层状岩体的适用性评价

准则名称	是否考虑 T 应力	是否扩展至各向异性	在层状岩体中的局限
MTS	否	极少	无法预测层理面诱导的裂纹偏转
广义 MTS	是	极少	T 应力修正仍基于均质假设
MTSN	否	否	未见各向异性版本
最小应变能密度因子	是	可扩展	参数物理意义抽象，标定困难
最大能量释放率	是	理论可扩展	分支裂纹数学处理复杂

2.2. I 型断裂韧性

由于岩石类材料抗拉强度通常远低于其抗剪强度，岩石的破坏主要受垂直于裂纹面的应力破坏为主，即 I 型断裂为主，因此大多数岩石断裂韧度的测试工作主要着眼于 I 型断裂韧性 K_{IC} [23]。岩石 I 型断裂韧性的测试方法众多，国际岩石力学学会(ISRM)推荐了四类方法：CB 法(Chevron Bend)、SR 法(Short Rod)、SCB 法(Semi-Circular Bend)和 CCNBD 法(Cracked Chevron Notched Brazilian Disc)。此外，学者们还发展了其他多种实用方法。为便于对比，下面对各类方法的试件形式及断裂韧性计算公式进行详细说明。

CB 法[24] (人字形切槽三点弯曲圆棒)以完整岩芯制成圆柱形试样，沿圆棒轴向垂直切割一个人字形 V 形切槽(如图 3(a)所示)，采用三点弯曲加载方式，使裂纹在加载过程中自切槽尖端向试样内部稳定扩展直至失稳断裂。该方法试样制备相对简便，无需复杂的疲劳预裂工序。三点弯曲加载条件下，断裂韧性按下式计算：

$$K_{\mathrm{IC}} = Y' \frac{P_{\max}}{D^{1.5}}, Y' = \left[1.835 + 7.15\alpha_0 / D + 9.85\left(\alpha_0 / D\right)^2\right] \frac{S}{D}$$

式中，$P_{\max}$ 为试验测得的最大载荷，D 为试样的直径，Y' 为临界无量纲应力强度因子，S 为支点跨距。

该方法用于层状岩体时层理方向需平行或垂直于切槽面，否则结果离散大。

SR 法[24] (人字形切槽短棒)采用由岩芯直接加工而成的圆柱形试样，沿轴向切割人字形 V 形切槽后，通过拉伸加载使试样沿轴向发生纵向劈裂破坏(如图 3(b)所示)。其所采用的人字形切槽设计可使应力强度因子在裂纹扩展过程中达到最小值，从而确保断裂发生在稳定的载荷条件下，测得的最大载荷可代入公式计算断裂韧度。计算公式如下：

$$K_{\mathrm{IC}}=\begin{cases}24.0\dfrac{P_{\max}}{D^{1.5}}, 0.99<C_K<1.01\\ C_K\,24.0\dfrac{P_{\max}}{D^{1.5}}\end{cases}$$

$$C_K=1-0.6\Delta_w/D+1.4\Delta_{\alpha_0}/D-0.01\Delta_\theta$$

式中，$P_{\max}$ 为试验测得的最大载荷，D 为试样的直径，C_K 为尺寸修正因子，Δ_w 为试样实际高度与标准高度(1.45D)的差值，Δ_{α_0} 为切槽顶点初始位置 α_0 与标准位置(0.48 D)的差值，Δ_θ 切槽角 θ 与标准角(54.6°)的差值。

该方法用于层状岩体时试样加工精度要求高，层理方向难控制。

SCB 法[25]其试样采用半圆盘几何构型，在试样平直边的中心预制直通切槽，通过三点弯曲加载方式使裂纹沿切槽尖端稳定扩展直至发生 I 型张拉断裂(如图 3(c)所示)。该方法的最大优势在于试样制备简便、无需复杂的人字形切槽加工，加载夹具简单，可在通用力学试验机上直接进行，因此易于推广应用。计算公式如下：

$$K_{\mathrm{IC}}=Y'\frac{P_{\max}}{D^{1.5}}$$

$$Y'=-1.297+9.516\frac{S}{D}-\left(0.47+16.457\frac{S}{D}\right)\alpha+\left(1.071+34.401\frac{S}{D}\right)\alpha^2$$

式中，α 为半圆盘试样底部中心预制直通切槽的长度。

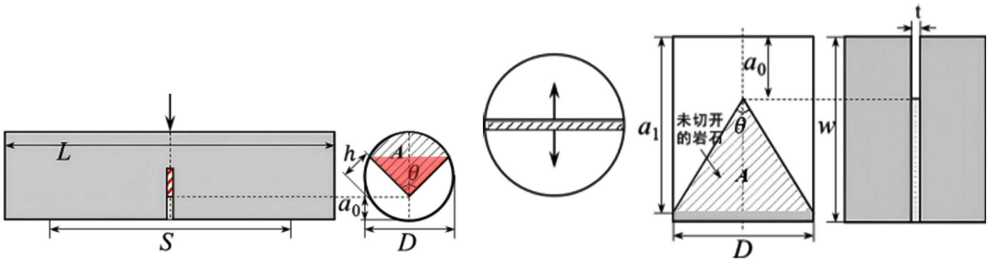
该方法最适合层状岩体，可方便改变层理倾角。

CCNBD 法[26] (人字形切槽巴西圆盘)以完整的巴西圆盘岩芯试样为基础，沿其中心穿孔并加工出对称的人字形 V 形切槽，通过径向加载使裂纹自切槽尖端稳定扩展直至发生 I 型张拉断裂(如图 3(d)所示)。该方法的主要优势在于试样体积小、加工简便、能承受较大临界载荷，且可同时用于 I 型和 II 型断裂韧度的测试。计算公式如下：

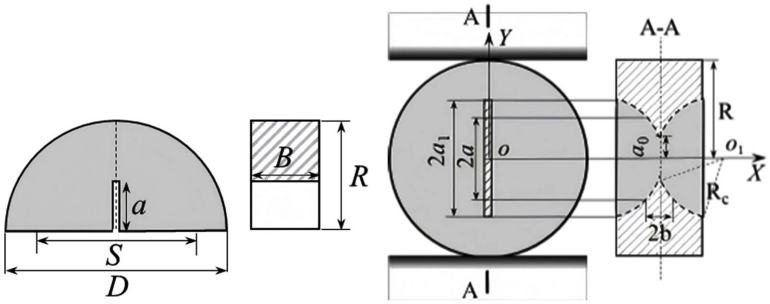
$$K_{\mathrm{IC}}=Y'\frac{P_{\max}}{B\sqrt{D}}$$

$$Y'=\begin{cases}3.427-10.129\alpha+10.353\alpha^2, \alpha_0<\alpha<\alpha_m\\ 2.850-7.505\alpha+7.420\alpha^2, \alpha_m<\alpha<1\end{cases}$$

该方法用于层状岩体时人字形切槽与层理面相对方位复杂，分析困难。



(a) CB　　(b) SR



(c) SCB (d) CCNBD

Figure 3. Schematic diagram of fracture toughness testing methods [27]
图 3. 断裂韧性测试方法示意图[27]

现有断裂准则和测试方法大多源于均质材料假设。对于层状岩体，层理面的存在使得裂尖应力场不再具有对称性，裂纹起裂方向可能偏离最大周向应力方向而沿弱面扩展。因此，亟需发展考虑层理面力学效应的各向异性断裂准则，并建立能够系统测试不同层理倾角下 I/II 复合型断裂韧度的实验方法体系。

3. 层状岩体力学特性研究现状

层状岩体(如图 4 所示)作为自然界中广泛分布的一类地质体，其力学特性因层理、片理等弱面的存在而呈现出强烈的横观各向异性和结构控制性。准确认识其力学行为是确保矿山、隧道、边坡、水利水电及能源地下储库等重大工程安全稳定设计与施工的关键[28]。值得注意的是，在众多层状岩体中，互层岩体是指由两种或多种力学性质差异显著的薄岩层(如砂岩与泥岩、灰岩与页岩)交替叠置形成的特殊岩体结构，是沉积岩地区广泛分布的一类复杂地质体(如图 5 所示)。由于其固有的非均质性、各向异性和层间弱面，互层岩体的力学行为远比均质岩体复杂。它不仅是层状岩体的一种特殊表现形式，更是研究岩体在层理、片理等弱面影响下力学行为的天然理想模型。近年来，随着国家重大工程向地质条件复杂区域延伸，国内外学者对互层岩体力学特性的研究不断深入。目前针对互层岩体，国内外学者们主要采用常规力学实验(单轴压缩实验、三轴压缩实验和巴西劈裂实验等)和数值模拟研究其力学性质和断裂破坏形式。

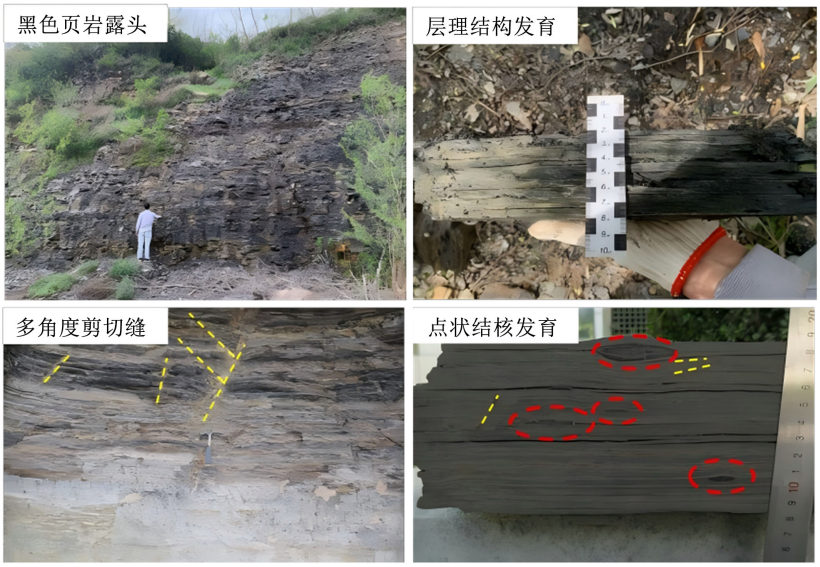


Figure 4. Zhangjiatan black shale in the Chang 7 Member, Ordos Basin [29]
图 4. 鄂尔多斯盆地长 7 段张家滩黑色页岩[29]

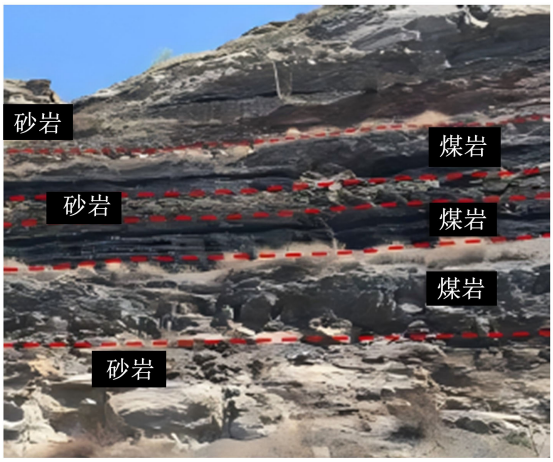


Figure 5. Sandstone-coal interbedded outcrop section [30]
图 5. 砂煤互层露头剖面[30]

3.1. 各向异性特征及其表征

层状岩体的各向异性是其最显著的力学特征。研究表明，其力学参数(如强度、弹性模量、峰值应变)随层理面与加载方向夹角(倾角 θ)的变化呈现规律性变化。

多数研究证实，单轴或低围压下，层状岩体的峰值强度随倾角 θ 的变化通常呈“U”型或“勺”型(“Spoon-Shaped”)分布。例如，Nie 等[31]指出，当 θ 从 0˚增至 90˚时，强度先降低后升高，在中等倾角(约 30˚~60˚)范围内出现最小值(如图 6 所示)。郭腾飞[32]研究发现多岩性组合的强度随倾角可能呈现先增后减再增的复杂波动趋势，这反映了不同岩层和界面在不同倾角下对承载贡献的复杂交互作用。

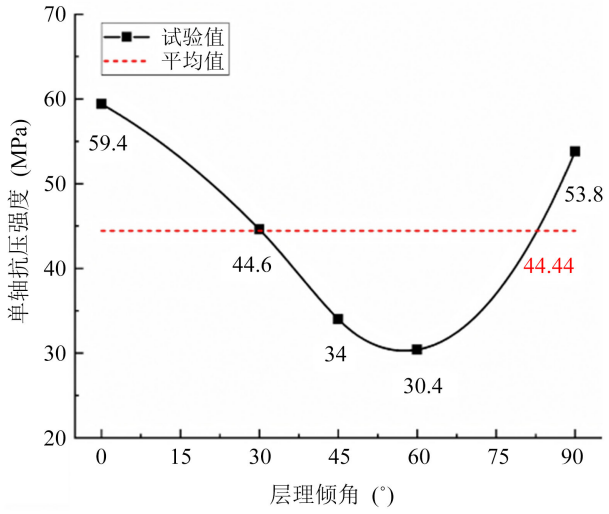


Figure 6. Uniaxial compressive strength of specimens with different bedding dip angles [33]
图 6. 不同层理倾角试样的单轴抗压强度[33]

弹性模量与变形模量同样表现出对倾角的敏感性。研究表明，弹性模量随层面倾角的变化可能呈现“M 型”、“W 型”等复杂趋势。例如，岳小磊等[34]对软硬互层透明试样的研究显示，其弹性模量在 θ = 45˚时最小，在 θ = 60˚时最大。这种非单调变化与不同倾角下软岩层和硬岩层在荷载方向上的应变协调关系及内部微裂纹的发育模式密切相关。

3.2. 强度与变形特性影响因素

层面倾角(θ)：是控制力学行为的最关键因素。它决定了荷载在岩体基质和软弱界面之间的分配方式。Shen 等[35]制备了横向各向同性互层试样，研究了界面倾角的影响，发现互层在不同倾角下的破坏模式可归纳为八种，分别为层理面上的拉伸破坏(倾角 0˚~30˚)、沿层理面的拉伸破坏(倾角 90˚)、跨层理面的拉伸阶梯破坏(倾角 30˚)、沿层理面的部分拉伸破坏(倾角 90˚)、沿层理面的剪切破坏(倾角 30˚~60˚)、跨层理面的剪切破坏(倾角 30˚~45˚)、沿层理面的剪切阶梯破坏(倾角 45˚~60˚)和跨层理面的拉剪联合破坏(倾角 0˚)。

岩层厚度比与夹层数量：软岩层(或软弱夹层)的相对厚度和数量显著影响整体力学性能。崔华龙等[36]指出，增加软岩层的厚度比会显著降低试样的整体强度。李昂等[37]还发现，软弱夹层数量对“U”形强度规律影响不显著，但会影响强度最低值对应的倾角位置。丁恩理等[38]的研究表明，不同厚度比但倾角相同的试样强度可能接近，破坏形式相同。

围压：围压对抑制层状岩体的各向异性有重要作用。Zheng 等[39]指出，围压增加能显著提高峰值强度、峰值应变、残余强度和弹性模量，并削弱夹层或界面对破坏模式的控制作用。在高围压下，破坏更多表现为剪切或张剪复合破坏，而非沿层面的单一滑移。Yang 等[40]也强调了围压(或地应力)对实现裂缝穿层扩展的重要性。

岩性组合与界面性质：硬岩与软岩的强度对比、界面胶结强度、摩擦特性是内在控制因素。万宇等[41]通过数值模拟发现，当层理面强度与岩石基质相当时，岩石表现为各向同性；当层理面强度较弱时，劈裂强度呈“U”形分布。Zhang 等[42]强调了界面胶结性质对水力裂缝能否穿层的决定性作用。

3.3. 破坏模式

Ju 等[43]根据倾角不同，破坏模式可系统归纳为三类：1) 跨越层面的张拉劈裂破坏：裂纹穿透不同岩层，以轴向劈裂为主；2) 沿层面的剪切滑移破坏：破坏主要沿软弱界面发生；3) 平行层面的张拉－劈裂破坏：裂纹沿层面扩展。

先进观测技术揭示了破坏前的损伤演化过程。Cheng [44]利用 3D-DIC 发现，最大主应变场中的应变局部化区域位置随倾角变化：小倾角时出现在平行加载方向的岩体基质中；中等及以上倾角时则出现在硬岩与软岩的界面处。刘蓓等[45]结合 PIV 技术和透明相似材料，直观展示了不同倾角下主次裂隙的萌生、扩展及连通过程，以及对应的损伤区域演化。

研究正从宏观向微观深入。Zheng 等[39]通过扫描电镜(SEM)发现，不同的宏观破坏模式对应着不同的微观裂纹扩展方式和矿物晶体破坏形貌。万宇等[41]则利用矩张量理论分析了声发射事件，揭示了拉伸破裂是微观破裂的主要类型，且 b 值(是声发射技术中一个核心的统计分析参数)与层理面强度相关。唐欣薇等[46]基于离散元从细观角度模拟了片理构造对板岩巴西劈裂各向异性行为的影响。

3.4. 强度准则与理论模型

针对层状岩体的各向异性强度预测，研究者评估和改进了多种准则。Jaeger [47]针对分层较少的横观各向同性岩体提出的“单弱面理论”用摩尔－库伦准则来判定岩块和结构面的破坏；Duveau [48]修改了单弱面理论并提出了“不连续弱面理论”；Li 等[49]比较了 Mohr-Coulomb 准则和 Rocker 准则对不同厚度夹层砂岩的适用性，发现夹层较薄时 Rocker 准则偏差小，而 Mohr-Coulomb 准则对单轴抗压强度的预测更好。近年来，发展的各向异性强度准则包括：Pariseau 准则(基于最大功率耗散原理)、Lee 和 Pietruszczak 准则(引入结构张量描述弱面定向)等。总体来看，现有准则多针对单一弱面(横观各向同性)，对于两种材料交替的互层岩体，其强度包络线往往是非线性和非对称的，尚缺乏公认的理论模型。

层状岩体的强度、变形和破坏模式具有强烈的倾角依赖性，且受到围压、厚度比、界面性质的耦合控制。然而，现有研究多集中在单轴/三轴压缩等常规力学行为，专门针对断裂韧性的方向性研究仍然薄弱。互层岩体在不同倾角下的起裂韧性、扩展韧性及断裂模式演化规律，是当前知识体系中的明显空白。

4. PFC 在层状岩体研究中的应用与流固耦合模拟进展

颗粒流程序(PFC)作为离散元法(DEM)的核心代表软件，由 ITASCA 咨询集团开发，通过模拟刚性颗粒集合体的运动与相互作用，从微观机制出发揭示岩土体的宏观力学行为。与传统连续介质软件不同，材料的强度、变形及破坏特征完全由颗粒的几何排列、接触刚度、摩擦系数及粘结键的强度等微观参数决定，从而能天然地模拟岩石内部裂纹的萌生、扩展、贯通全过程。PFC 的计算循环遵循“力－位移定律→运动定律”的显式动态求解框架，这种基于微观相互作用的模拟方法使其在处理大变形、非连续和动态破坏问题上具有独特优势。

4.1. 层状岩体 PFC 模型的界面表征方法

层状岩体数值模拟的核心难点在于如何真实地表征层理面/界面的力学行为。目前研究者主要发展了以下三类方法：

光滑节理模型(SJM)法。该方法在颗粒流模型中沿着层理面走向设置一组光滑节理接触，颗粒与颗粒之间通过 SJM 接触传递力，该接触不产生弯矩，允许颗粒沿节理面自由滑移。殷鹏飞等[50]在 PFC2D 平台中分别采用删除颗粒黏结(BRM)和光滑节理模型(SJM)两种方式处理层状复合岩石的节理面。研究发现：SJM 模型能更好地反映物理试验的应力－应变曲线形态，而 BRM 模型在岩层倾角较大时会产生较大塑性变形、无法反映脆性破坏特征；SJM 模型能更好地反映单轴压缩强度和弹性模量的各向异性特征，且能单独统计 SJM 拉伸裂纹和剪切裂纹的数目与分布区域，有助于分析层状复合岩石破坏的细观机理。该方法计算效率较高，适合模拟大规模层状岩体，但对层理面的粗糙度表征仍有不足。

平节理模型(FJM)法。在层理面位置设置扁平状接触面，通过赋予较低的粘结强度和摩擦系数来表征弱面。该方法能更真实地反映界面的剪切滑移和剪胀行为，能有效模拟节理岩体在不同围压下的破坏模式转变，但微观参数标定较为复杂，且计算效率低于 SJM 法。

接触强度折减法。不单独设置界面接触模型，而是将层理面位置颗粒间的接触强度(粘结强度、摩擦系数)按一定比例折减，以体现界面的弱化效应。该方法通过分层建模并弱化层间颗粒黏结参数构建层理弱面，实现简便，适合快速参数敏感性分析，但难以独立控制界面的切向和法向行为，对界面厚度的表征也较为粗略。

上述方法各有优劣。SJM 适合模拟单一、平直的结构面，且具备独立的裂纹统计功能；FJM 适合模拟具有一定厚度和粗糙度的层理带，能更真实地反映剪切特性；接触强度折减法适合快速参数敏感性分析。对于互层岩体(两种以上岩性交替)，还需要在颗粒层面区分不同岩性的颗粒团簇，并分别赋予不同的微观参数，这是当前模型构建的主要挑战之一。

4.2. 基于 PFC 的层状岩体细观机理研究

PFC 能够实时记录模型中每个粘结的断裂(视为微裂纹)，直观展示裂纹从萌生、扩展至贯通的动态过程，这是揭示层状岩体各向异性破坏细观机理的有力工具。

Zou 等[51]利用 PFC3D 建立了多个层理倾角的横观各向同性数值模型，经细观参数标定后开展了多围压三轴压缩模拟。结果表明：峰值强度和弹性模量随层理倾角呈“U”形分布(以 60˚为分界)，相同围压下

最大差异分别达 42.2%和 26.6%；破坏特征随倾角显著变化，表现为轴向劈裂(0°)、沿层理面剪切滑移(30°~60°)和张剪复合破坏(90°)；声发射事件数和能量的突变可作为岩石破坏的可靠前兆；提出的能量竞争因子 β(滑移能与粘结能之比)可有效表征岩石破坏演化过程；CT 观测表明围压抑制了微裂纹的萌生与扩展。

针对层理泥岩，有学者采用室内试验与离散元数值模拟相结合的方法，研究了不同层理倾角下的破裂响应特征[52]。研究表明：层理泥岩的单轴压缩峰值应力、峰值应变及弹性模量随倾角增大呈“U”形变化；受载破坏时，层理弱面率先萌生微裂纹，层理“预切割”效应显著，贯穿裂隙的扩展方向受层理倾角控制；微裂纹演化可分为平静期、缓慢增长期和快速增长期三个阶段。

软硬互层岩体的力学特性受倾角、层厚比和围压的耦合控制。有学者采用 PFC2D 模拟了软硬互层岩体的渐进破裂过程[53]，系统研究了倾角、软硬层厚比和围压对其力学及变形特性的影响。结果表明：软硬互层岩体抗压强度、黏聚力、内摩擦角和弹性模量随岩层倾角的增加先减小后增大，随围压的增加逐渐增大，随软层厚度的增加逐渐减小；不同倾角下的破坏模式可分为穿越层理的劈裂破坏、沿层理面的剪切滑移破坏和二者的复合破坏三种类型。

对于含缺陷的层状复合岩层，有学者采用 PFC2D 建立了离散元模型，研究分析了平行双裂隙复合岩层的岩桥倾角与层理倾角对力学特性与破坏模式的影响[54]。研究得出了双裂隙复合岩层的 5 类典型破坏模式：岩桥贯通张拉破坏、岩桥贯通剪切破坏、岩桥贯通张剪复合破坏、裂隙与层理面贯通破坏以及沿层理面的滑移破坏。裂隙与层理面的相对方位决定了裂纹贯通路径的选择，而岩桥倾角则控制了贯通面的倾角。

力链网络与能量演化分析是 PFC 独有的分析视角。通过追踪颗粒间接触力的传递路径(力链)，可以揭示层状岩体在不同加载阶段的内部荷载传递机制。Zou 等[51]通过追踪力链网络的演化发现，层状岩体在峰前阶段力链分布较为均匀且主要通过硬岩层传递荷载，峰后阶段力链在破坏面附近高度集中，力链网络发生明显重定向。能量竞争因子 β(滑移能与粘结能之比)的演化规律表明，能量在层理面和岩石基质之间的分配方式随倾角变化而变化，这正是各向异性强度的能量学本质。

上述研究表明，PFC 能够在颗粒尺度上揭示层状岩体各向异性破坏的细观力学本质。然而，现有研究多集中在单轴/三轴压缩和巴西劈裂等常规力学工况，专门针对层状岩体断裂韧性(如 SCB 试验、CCNBD 试验)的 PFC 模拟极为有限。如何在 PFC 中准确表征预制裂纹尖端应力场、如何标定微观参数使模拟的 K_{IC} 与实验值定量吻合，是亟待解决的技术难题。

4.3. PFC 流固耦合模拟的现状与挑战

水力压裂本质上是一个流固耦合过程——压裂液在裂隙中流动、对裂隙壁施加压力、驱动岩石破裂扩展。PFC 通过内置的流体模块(PFC2D 中的流体逻辑或 PFC3D 中的 DFN 流体模型)可实现流固耦合模拟，这是 PFC 在非常规油气开发领域最具工程应用价值的方向之一。

目前的 PFC 流固耦合模拟主要采用域内流体压力法或管流法。在域内流体压力法中，将模型划分为若干流体域，每个域内的流体压力作用于周围颗粒上，当颗粒间的粘结断裂时，相邻流体域连通，流体压力分布随之更新。在管流法中，通过连接各流体域之间的“管道”模拟流体流动，管道的开闭取决于颗粒间的接触状态。

针对经典 PFC 流固耦合算法中因接触破坏导致流动管道失效的局限性，有学者提出了改进方法：使用几何图形替换接触定义流体流动管道[55]。该方法有效解决了接触破坏后流体通道中断的问题，使水力裂缝扩展过程中的流体压力分布更加真实。基于该改进方法，研究人员建立了页岩储层水力压裂的 DEM 模型，系统研究了影响水力裂缝扩展特性的关键因素[56]。

在层状储层水力压裂模拟方面，有学者通过 PFC2D 数值模拟系统分析了层理倾角、天然裂隙与水力

裂缝之间的互馈机理[57]，发现层理倾角对水力裂缝形态的控制存在临界角度(约 45˚~60˚)：低于该角度时裂缝易于穿层形成较长的主裂缝；高于该角度时裂缝倾向于沿层理面偏转，形成复杂的网状裂缝。天然裂隙的存在会进一步增加裂缝网络的复杂性，但同时也可能造成压裂液的过度滤失。

当前 PFC 流固耦合模拟仍面临诸多挑战：1) 现有方法多采用显式松耦合(流体计算与力学计算交替进行)，忽略了流体–固体之间的实时交互效应，在高压快速注入条件下可能失真。2) 管流模型基于平行板假设，无法准确模拟复杂裂隙网络中的三维流动，特别是裂隙交叉点和粗糙裂隙中的非线性流动。3) 流固耦合引入了渗透率、流体压缩性等额外参数，其标定往往缺乏实验约束。4) 三维流固耦合 PFC 模拟的计算量极大，限制了模型规模和模拟时长的可行性。

5. 总结与展望：构建“理论–实验–模拟”三位一体研究框架

本文系统梳理了岩石断裂韧性理论、层状岩体力学特性及 PFC 数值模拟三个方面的国内外研究进展。在断裂韧性方面，经典断裂准则主要面向均质各向同性材料，对层状岩体各向异性断裂行为考虑不足；I 型断裂韧度测试方法虽已多样化，但大多难以直接揭示层理方向对断裂韧度的控制规律。在层状岩体力学特性方面，大量研究证实了强度、变形和破坏模式对层面倾角的强烈依赖性，并建立了基于单弱面理论的各向异性强度准则，但针对层状岩体断裂韧性方向性的系统研究尚处于起步阶段。在 PFC 数值模拟方面，离散元方法已广泛用于层状岩体宏观力学行为的微观机理解释，发展了 SJM、FJM 和接触强度折减法等多种界面表征策略，并初步开展了流固耦合模拟，但在真实界面高保真表征、断裂韧性定量模拟和高效流固耦合算法等方面仍有明显不足。

当前研究可归纳为“理论模型–实验测试–数值模拟–工程应用”四层架构，各环节均存在亟待突破的薄弱之处：

理论模型方面亟待建立适用于层状岩体的各向异性断裂准则。未来应以 MTS 准则为基础，引入层理面方向函数 $f(\theta)$和界面强度折减因子 η，建立能够预测不同层理倾角下裂纹起裂方向与临界载荷的理论判据，并通过系统的复合型断裂实验进行校验。

实验测试方面亟需建立方向性断裂韧性测试方法体系。应系统开展不同层理方向、厚度比和岩性组合下的 I/II 复合型断裂韧度实验，重点发展 SCB 试样的多倾角测试方案，构建层状岩体的方向性断裂韧性数据库，为理论标定和数值验证提供基础参数。

数值模拟方面需发展高保真 PFC 模型并突破流固耦合瓶颈。在模型构建上，应基于 CT 扫描重构互层岩体真实结构，实现从“理想化界面”到“真实形态界面”的跨越；在断裂模拟上，应建立 SCB 或 CCNBD 试样的 PFC 模型，使模拟的 K_{IC} 与实验值定量一致；在流固耦合上，需考虑层理面渗透性各向异性和界面张开/闭合对流体通道的动态影响，发展更精细的流体域划分算法。

工程应用方面应推动多环节协同闭环。理论模型指导实验设计，实验数据标定数值模型，数值模拟揭示细观机理并反馈修正理论，最终将这一闭环体系应用于工程尺度的裂缝网络预测。同时，应建立微观 PFC 参数与宏观断裂韧性之间的定量关联，确保理论预测、实验数据与数值模拟在物理上自洽。

综上，层状岩体断裂力学研究正从宏观现象描述走向理论建模、精细化实验和高保真数值模拟协同发展的新阶段。最紧迫的任务是填补各向异性断裂准则、方向性断裂韧性数据库和高保真 PFC 断裂模拟三个核心空白。未来应推动深度学习与离散元模拟的结合，实现从“认识规律”到“预测控制”的跨越，为我国非常规油气高效开发提供理论支撑。

基金项目

辽宁省科技计划联合计划(自然科学基金–博士科研启动项目)，编号：2024-BSLH-113。

参考文献

[1] 贾承造, 姜林, 赵文. 页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题[J]. 石油科学通报, 2023, 8(6): 695-706.

[2] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574.

[3] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗? [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451-458.

[4] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.

[5] 赵文智, 王大锐, 赵霞. 中国陆相页岩油革命[J]. 石油知识, 2021(4): 14-15.

[6] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 1-11.

[7] 何希鹏, 张培先, 高玉巧, 等. 中国非常规油气资源效益开发面临的挑战与对策[J]. 中国石油勘探, 2025, 30(1): 28-43.

[8] IEA (2023) World Energy Outlook 2023. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

[9] 宁文祥, 何柏, 李凤霞, 等. 陆相页岩油储层水力压裂裂缝形态的试验[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7505-7512.

[10] 衣方宇, 王琦, 杨杰, 等. 苏里格气田多层理泥岩井壁坍塌机理分析[J]. 能源与环保, 2024, 46(5): 97-104.

[11] 曹东升, 曾联波, 黄诚, 等. 多尺度岩石力学层对断层和裂缝发育的控制作用[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2535-2556.

[12] Zhao, Y., Zheng, K. and Wang, C.L. (2024) Rock Fracture Mechanics and Fracture Criteria. Springer.

[13] 郑坤. 页岩断裂力学特性与断裂准则研究[D]: [博士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2023.

[14] Griffith A.A. (1921) The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, **221**, 163-198.

[15] Erdogan, F. and Sih, G.C. (1963) On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear. *Journal of Basic Engineering*, **85**, 519-525. https://doi.org/10.1115/1.3656897

[16] Smith, D.J., Ayatollahi, M.R. and Pavier, M.J. (2001) The Role of *t*-Stress in Brittle Fracture for Linear Elastic Materials under Mixed-Mode Loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **24**, 137-150. https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2001.00377.x

[17] Chang, K.J. (1981) On the Maximum Strain Criterion—A New Approach to the Angled Crack Problem. *Engineering Fracture Mechanics*, **14**, 107-124. https://doi.org/10.1016/0013-7944(81)90021-7

[18] Sih, G.C. (1974) Strain-Energy-Density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems. *International Journal of Fracture*, **10**, 305-321. https://doi.org/10.1007/bf00035493

[19] Koo, J.M. and Choy, Y.S. (1991) A New Mixed Mode Fracture Criterion: Maximum Tangential Strain Energy Density Criterion. *Engineering Fracture Mechanics*, **39**, 443-449. https://doi.org/10.1016/0013-7944(91)90057-8

[20] Moghaddam, R.M., Ayatollahi, M. and Berto, F. (2017) Mixed Mode Fracture Analysis Using Generalized Averaged Strain Energy Density Criterion for Linear Elastic Materials. *International Journal of Solids and Structures*, **120**, 137-145.

[21] Nuismer, R.J. (1975) An Energy Release Rate Criterion for Mixed Mode Fracture. *International Journal of Fracture*, **11**, 245-250. https://doi.org/10.1007/bf00038891

[22] Liu, S., Chao, Y.J. and Zhu, X. (2004) Tensile-Shear Transition in Mixed Mode I/III Fracture. *International Journal of Solids and Structures*, **41**, 6147-6172. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.04.044

[23] 张盛, 李小军, 李大伟. 岩石I型断裂韧度测试技术和理论研究综述[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2009, 28(1): 33-38.

[24] ISRM (1988) Suggested Methods for Determining Fracture Toughness of Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **25**, 71-96.

[25] Kuruppu, M.D., Obara, Y., Ayatollahi, M.R., Chong, K.P. and Funatsu, T. (2014) ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **47**, 267-274. https://doi.org/10.1007/s00603-013-0422-7

[26] Fowell, R.J. (1995) Suggested Method for Determining Mode I Fracture Toughness Using Cracked Chevron Notched Brazilian Disc (CCNBD) Specimens. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **32**, 57-64. https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)00015-u

[27] 潘睿. 薄互层岩石断裂特性研究及在水力压裂中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.

[28] 潘俊锋, 鲁俊. 层状板岩拉伸行为及爆破非均匀损伤特征研究[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(4): 1-12.

[29] 王燚钊. 陆相页岩油储层垂向穿层压裂机制与工程应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.

[30] 谭鹏. 多岩性组合层状储层水力裂缝垂向扩展的力学行为研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.

[31] Nie, X., Yin, Q., He, M., Wang, Q., Jing, H., Zheng, B., *et al*. (2024) Shear Mechanical Properties and Fracturing Responses of Layered Rough Jointed Rock-Like Materials. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **31**, 2417-2434. https://doi.org/10.1007/s12613-024-2893-9

[32] 郭腾飞. 层状介质界面裂纹巴西劈裂条件下的扩展特性[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2020.

[33] 王鑫尧. 陆相页岩水力裂缝沟通扩展及激活结构面机理研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.

[34] 岳小磊, 岳中文, 马文彪, 等. 基于数字钻进的层状岩体界面及岩石强度识别试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(2): 440-451.

[35] Shen, P., Tang, H., Zhang, B., Ning, Y. and He, C. (2021) Investigation on the Fracture and Mechanical Behaviors of Simulated Transversely Isotropic Rock Made of Two Interbedded Materials. *Engineering Geology*, **286**, Article ID: 106058. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106058

[36] 崔华龙. 层厚比对砂泥岩互层岩体力学特性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

[37] 李昂, 邵国建, 苏静波, 等. 软硬互层状岩体的室内单轴压缩试验及数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 533-538.

[38] 丁恩理, 刘越, 吴继敏, 等. 软硬互层状类岩石试样力学特性的三轴试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1): 39-46.

[39] Zheng, L., He, H., Zuo, Y., Liu, H., Liu, X. and Qiu, Q. (2022) Research on Macro-Micro Failure Mechanism of Interbedded Sandstone in the Deep of Lannigou Gold Mine. *Lithosphere*, **2022**, Article ID: 2998830. https://doi.org/10.2113/2022/2998830

[40] Yang, L., Sheng, X., Zhang, B., Yu, H., Wang, X., Wang, P., *et al*. (2023) Propagation Behavior of Hydraulic Fractures in Shale under Triaxial Compression Considering the Influence of Sandstone Layers. *Gas Science and Engineering*, **110**, Article ID: 204895. https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.204895

[41] 万宇, 林宇, 丁尧, 等. 层状岩体巴西劈裂声发射特性研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 714-722.

[42] Zhang, J., Li, Y., Pan, Y., Wang, X., Yan, M., Shi, X., *et al*. (2020) Experiments and Analysis on the Influence of Multiple Closed Cemented Natural Fractures on Hydraulic Fracture Propagation in a Tight Sandstone Reservoir. *Engineering Geology*, **281**, Article ID: 105981. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105981

[43] Ju, M.H., Li, X.F., Li, X. and Zhang, G.L. (2022) A Review of the Effects of Weak Interfaces on Crack Propagation in Rock: From Phenomenon to Mechanism. *Engineering Fracture Mechanics*, **263**, Article ID: 108297. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108297

[44] Cheng, J., Yang, S., Chen, K., Ma, D., Li, F. and Wang, L. (2017) Uniaxial Experimental Study of the Acoustic Emission and Deformation Behavior of Composite Rock Based on 3D Digital Image Correlation (DIC). *Acta Mechanica Sinica*, **33**, 999-1021. https://doi.org/10.1007/s10409-017-0706-3

[45] 刘蓓. 软硬互层透明相似岩体制备及力学特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.

[46] 唐欣薇, 黄文敏, 周元德, 等. 层状岩石细观构造表征及劈拉受载各向异性行为研究[J]. 工程力学, 2018, 35(9): 153-160.

[47] Jaeger, J.C. (1960) Shear Failure of Anistropic Rocks. *Geological Magazine*, **97**, 65-72. https://doi.org/10.1017/s0016756800061100

[48] Duveau, G. and Shao, J.F. (1998) A Modified Single Plane of Weakness Theory for the Failure of Highly Stratified Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **35**, 807-813. https://doi.org/10.1016/s0148-9062(98)00013-8

[49] Li, H., Wang, J., Li, H., Wei, S. and Li, X. (2022) Experimental Study on Deformation and Strength Characteristics of Interbedded Sandstone with Different Interlayer Thickness under Uniaxial and Triaxial Compression. *Processes*, **10**, Article No. 285. https://doi.org/10.3390/pr10020285

[50] 殷鹏飞, 杨圣奇, 高峰, 等. 不同节理模型在层状复合岩石离散元模拟中的应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(1): 164-173+183.

[51] Zou, M., Zhang, Y., Li, S., Li, T., Zhu, G. and Zhang, Y. (2026) Fracture Evolution and Anisotropic Mechanical Properties of Layered Rock Based on Discrete Element Modeling and Experimental Study. *Alexandria Engineering Journal*, **137**, 443-467. https://doi.org/10.1016/j.aej.2026.01.042

[52] 任建超, 张虎, 马英辉, 等. 层理倾角对泥岩单轴压缩破裂响应特征的影响研究[J]. 煤炭工程, 2025, 57(12): 153-161.

[53] 黄锋, 周洋, 郑艾辰, 等. 软硬互层岩体力学及变形特性的离散元模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(4): 1146-1156.

[54] 李恒, 杨圣奇, 孙博文, 等. 双裂隙复合岩层单轴压缩力学性质及损伤机理离散元模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(10): 4000-4014.

[55] 刘先珊, 曾南豆, 张立君, 等. 改进的 PFC 流固耦合模型及其储层页岩渗透破坏模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(2): 467-482.

[56] Yin, P., Yang, S., Gao, F., Tian, W. and Zeng, W. (2023) Numerical Investigation on Hydraulic Fracture Propagation and Multi-Perforation Fracturing for Horizontal Well in Longmaxi Shale Reservoir. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **125**, Article ID: 103921. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.103921

[57] 杜昌昂. 煤层水力压裂裂缝扩展及损伤渗流耦合作用机制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2024.