

龙马溪页岩各向异性特征及其强度准则适用性评价

张远法¹, 杨九俸¹, 雷勇鸿¹, 黄天意¹, 吴彬¹, 刘强², 尹强²

¹重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

²中国石油川庆钻探工程有限公司川东钻探公司, 重庆

收稿日期: 2026年3月20日; 录用日期: 2026年4月18日; 发布日期: 2026年5月26日

摘要

页岩的层理结构导致其力学参数和强度呈现显著各向异性特征, 准确评价该特征并优选适用的强度准则对页岩气安全高效开发至关重要。本文以我国龙马溪组页岩为研究对象, 通过系统调研国内外文献, 收集整理了不同层理角度($0^{\circ}\sim 90^{\circ}$)下的单轴/三轴压缩及巴西劈裂实验数据, 明确了页岩抗压强度、抗拉强度、杨氏模量及泊松比的各向异性变化规律及比值范围。基于整理的实验数据, 采用网格搜索法确定了SWP、WPP及ML-G等抗压强度准则和Barron、SPW、N-Z、L-P、L-A等抗拉强度准则的材料参数, 并计算了不同角度下的理论强度值。通过均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)、相对误差(MRE)及最大误差(MaxError)等多维度评价指标体系, 对各强度准则的适用性进行了定量评价。结果表明: 龙马溪页岩抗压强度各向异性比值范围为0.81~1.70 (横向/纵向), 抗拉强度为0.81~3.10, 杨氏模量为0.79~2.47, 泊松比为0.84~1.72; Barron准则在抗拉强度预测中表现最优(RMSE = 0.60218, $R^2 = 0.92770$), ML-G准则在抗压强度预测中精度最高(RMSE = 24.19507, $R^2 = 0.90698$)。研究结果对于正确认识页岩各向异性特征和页岩气钻井井壁稳定性分析具有重要意义。

关键词

页岩, 各向异性, 强度准则, 龙马溪组

Anisotropic Characteristics of the Longmaxi Shale and Evaluation of the Applicability of Strength Criteria

Yuanfa Zhang¹, Jiufeng Yang¹, Yonghong Lei¹, Tianyi Huang¹, Bin Wu¹, Qiang Liu², Qiang Yin²

¹School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²East Sichuan Drilling Company, China National Petroleum Corporation Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Chongqing

文章引用: 张远法, 杨九俸, 雷勇鸿, 黄天意, 吴彬, 刘强, 尹强. 龙马溪页岩各向异性特征及其强度准则适用性评价[J]. 矿山工程, 2026, 14(3): 648-663. DOI: 10.12677/me.2026.143066

Abstract

The bedding structure of shale results in significant anisotropy in its mechanical properties and strength; accurately assessing this characteristic and selecting appropriate strength criteria are crucial for the safe and efficient development of shale gas. This study focuses on the Longmaxi Formation shale in China. Through a systematic review of domestic and international literature, experimental data from uniaxial/triaxial compression and Brazilian split tests at different bedding angles ($0^{\circ}\sim 90^{\circ}$) were collected and organized. The study clarified the anisotropic variation patterns and ratio ranges of the shale's compressive strength, tensile strength, Young's modulus, and Poisson's ratio. Based on the compiled experimental data, the grid search method was employed to determine the material parameters for compressive strength criteria such as SWP, WPP, and ML-G, as well as tensile strength criteria including Barron, SPW, N-Z, L-P, and L-A, and to calculate the theoretical strength values at different angles. A multi-dimensional evaluation system comprising root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2), relative error (MRE), and maximum error (MaxError) was used to quantitatively assess the applicability of each strength criterion. The results indicate that the anisotropy ratios for compressive strength in Longmaxi Shale range from 0.81 to 1.70 (transverse/longitudinal), tensile strength ranges from 0.81 to 3.10, Young's modulus ranges from 0.79 to 2.47, and Poisson's ratio ranges from 0.84 to 1.72; The Barron criterion performed best in tensile strength prediction (RMSE = 0.60218, R^2 = 0.92770), while the ML-G criterion demonstrated the highest accuracy in compressive strength prediction (RMSE = 24.19507, R^2 = 0.90698). These findings are of great significance for accurately understanding the anisotropic characteristics of shale and for analyzing wellbore stability during shale gas drilling.

Keywords

Shale, Anisotropy, Strength Criteria, Longmaxi Formation

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

随着常规油气资源的枯竭，页岩气开采对于日益增长的能源需求至关重要。据估计，全球页岩气资源总量预计为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，占非常规天然气资源的 50%左右[1] [2]。中国拥有丰富的页岩气资源，可采储量可达 $12.85 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，安全高效开发页岩气对于保障我国能源安全具有重要意义。页岩是一种具有薄页状或薄片层状节理的沉积岩[3]。因为页岩具有薄页状或薄片层状节理，页岩表现出了很强的各向异性特征，包括杨氏模量、泊松比、抗压强度、抗剪强度和抗拉强度等。页岩力学参数和强度是页岩气钻井和后期增产改造的关键参数，目前，国内外学者针对页岩的各向异性特征开展了大量研究，并提出了多种各向异性强度准则。然而，由于页岩的复杂性和多样性，现有的强度准则在实际应用中存在一定的局限性，使得其适用性和准确性仍需进一步验证。

国内外对页岩的弹性各向异性特征及其破裂模式进行了大量研究，即研究杨氏模量、泊松比等相关参数来分析页岩的弹性各向异性。卢文欣等[4]借助一系列有机地化实验、岩石物理实验研究了长宁地区

页岩储层特征、速度特征、弹性各向异性特征, 得出页岩样品表现出一定程度各向异性, 各向异性参数变化范围大以及有机质含量与各向异性参数相关性较差。曹文科等[5]基于横观各向同性本构关系, 运用弹性理论分析页岩井眼应力分布, 发现井周应力对弹性模量各向异性的敏感性高于泊松比各向异性; 相同各向异性比下应力分布形态相似, 但弹性模量与泊松比各向异性比的增减对井周应力变化的影响相反。2012年, 王倩等[6]为了测量动静态弹性模量和动静态泊松比, 做了不同层理倾角页岩岩样的单轴压缩实验和超声波实验, 研究发现静态的弹性参数各向异性度小于动态的各向异性度。2013年, 徐敬宾等[7]主要研究含气页岩固有的各向异性及其强度、变形、破裂特征, 沿与页岩原生层理面呈不同夹角方向取芯, 进行纵波波速测试、单轴压缩试验、三轴压缩试验。

在页岩强度各向异性特征及其变化规律方面, 国内外学者做了大量研究。杨志鹏等[8]基于巴西劈裂试验对页岩强度和破坏模式各向异性进行了研究, 对不同层理方向下的页岩展开巴西劈裂和并声发射试验, 对页岩的抗拉强度及破坏形态随层理倾角的变化做了仔细研究, 并分析了页岩声发射空间演化分布规律和分形维数特征与层理方向的关系。2012年, Jung-Woo 等[9]为了研究不同取样角度下的页岩的前度各向异性, 利用了单轴压缩和巴西劈裂试验。2015年, 侯振坤等[10]以龙马溪层状页岩为研究对象, 进行了电镜扫描和单轴压缩试验, 发现微裂隙发育和独特的破坏类型是造成各向异性的主要原因。2015年, 衡帅等[11]为研究彭水页岩气区块储层的各向异性特征, 开展了龙马溪组页岩的单轴和三轴压缩试验, 分析了其力学特性、强度特征和破裂模式的各向异性, 并揭示了其破坏机制的各向异性。2016年, Geng 等[12]通过不同取样角度下的龙马溪组页岩样品的脆性, 研究了页岩脆性各向异性。2017年, 贾利春等[13]利用了页岩巴西劈裂试验和单轴、三轴压缩试验, 分析了页岩的抗拉强度和抗压强度, 研究了层状页岩各向异性力学特性, 可针对钻井井壁的稳定性和地应力及水力压裂等石油工程提供技术参考。

在强度准则研究方面, 国内外已取得显著进展。1900年, Mohr-Coulomb 提出了 Mohr-Coulomb 强度理论[14]。1992年, Hoek-Brown 在大量试验数据的基础上, 针对 Mohr-Coulomb 准则仅适用于岩体剪切破坏的缺陷, 提出的 Hoek-Brown 经验强度准则[15]。1979年, Jaeger [16]提出的单一弱面强度准则。1993年, Ramamurthy 等人提出的一个非线性强度准则[17]除了抗压强度准则外, 一些学者还建立了各向异性抗拉强度准则, 例如, Barron 准则、SPW 准则、N-Z 准则、L-P 准则、L-A 准则等。由于页岩的复杂性和多样性, 现有准则在实际应用中仍存在一定的局限性。

本文以我国龙马溪组页岩为研究对象, 系统开展页岩各向异性特征及其强度准则适用性评价研究。首先通过文献调研收集龙马溪页岩力学实验数据, 分析其抗压强度、抗拉强度、杨氏模量及泊松比等参数随层理夹角的变化规律, 明确各向异性比值范围; 其次梳理现有各向异性抗压强度和抗张强度准则, 采用网格搜索法确定各准则的材料参数; 最后构建均方根误差、决定系数、相对误差及最大误差等多维度评价指标体系, 定量对比分析各强度准则的预测精度, 研究成果可为页岩气钻井井壁稳定性分析、地应力场反演及水力压裂优化设计提供理论支撑。

2. 龙马溪页岩各向异性特征分析

通过系统调研收集龙马溪组页岩力学实验数据, 包括单轴压缩、三轴压缩和巴西劈裂实验, 提取不同层理角度($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$)下的关键力学参数, 分析其各向异性特征。具体如表 1 所示。为了明确层理面影响下页岩的各向异性特征参数, 定义不同角度为岩心受力与页岩层理面法向的夹角, 在页岩抗压强度测试和抗拉强度测试时, 不同角度示意图分别如图 1 和图 2 所示。龙马溪页岩力学参数的各向异性本质源于其微观组构的定向分布特征, 其层理面由黏土矿物纹层、有机质条带与刚性矿物颗粒相间排列构成(如图 3), 矿物定向性与层理发育程度直接控制宏观力学响应规律, 下文将结合微观组构特

征对各参数变化规律展开分析。

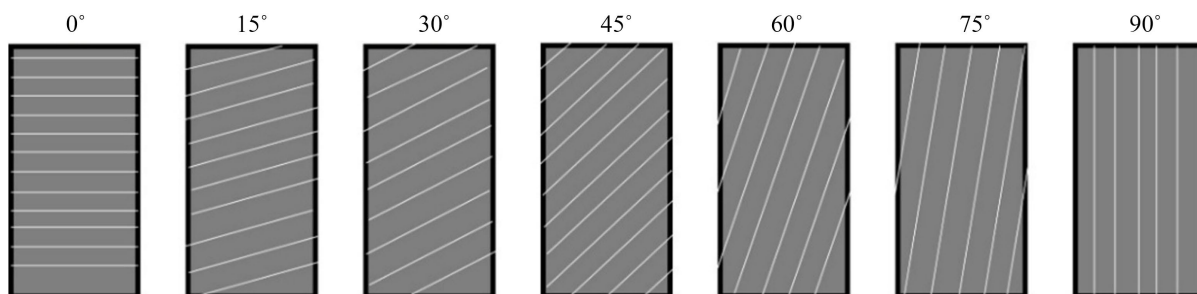


Figure 1. Schematic diagram of a core sample used for compressive strength testing at different bedding angles

图 1. 不同层理夹角下抗压强度测试岩心示意图

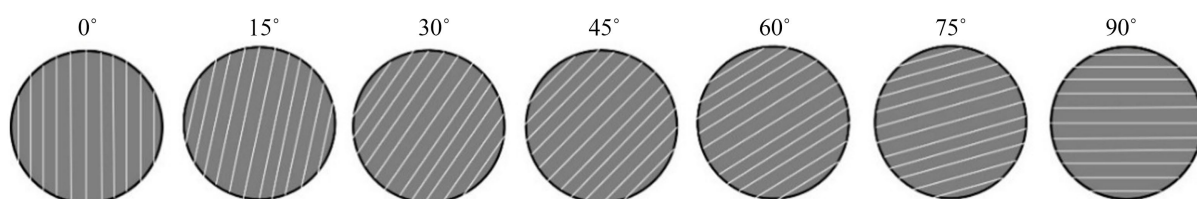
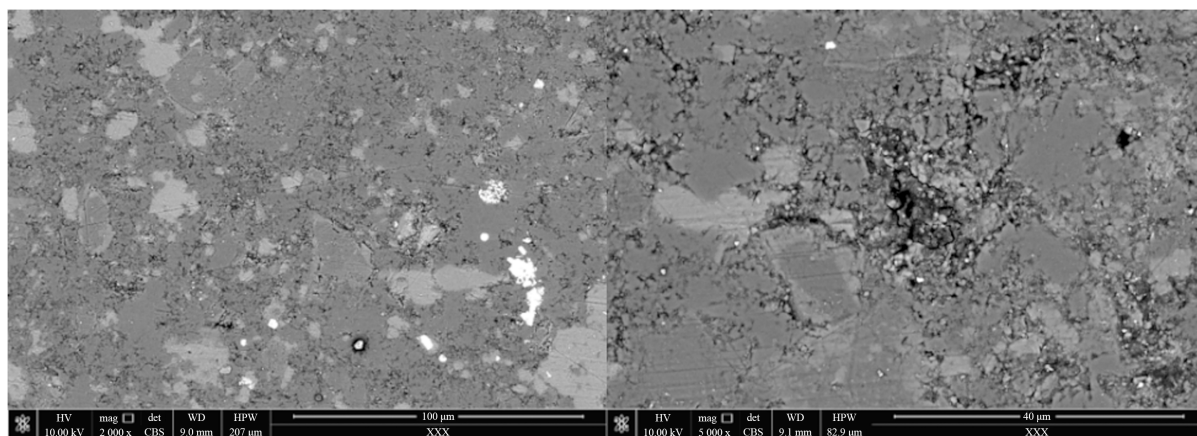


Figure 2. Schematic diagram of a core sample used for tensile strength testing at different bedding angles

图 2. 不同层理夹角下抗拉强度测试岩心示意图



(a) 放大倍数 2000 倍

(b) 放大倍数 5000 倍

Figure 3. Schematic diagram of the microstructure of the Longmaxi Shale [18]

图 3. 龙马溪页岩微观组构示意图[18]

基于表 1 总结的实验数据, 利用其平均值绘制了抗压强度、泊松比、杨氏模量以及抗拉强度随不同层理夹角的变化规律, 分别如图 4 至图 7 所示。由图 3 可知, 在单轴压缩条件下, 页岩抗压强度整体处于最低水平, 且随层理夹角的变化呈现显著的各向异性特征。随着围压的增大, 各角度下的抗压强度均呈上升趋势。从变化形态来看, 不同围压下的抗压强度 - 层理夹角曲线均呈现典型的“U 型”或“先降后升”的分布模式: 在 0° ~ 60° 区间, 抗压强度随层理夹角增大而逐渐降低, 60° 附近达到极小值; 随后随夹角继续增大至 90° , 强度值回升。这一现象揭示了页岩在斜交层理方向(60° 左右)存在力学薄弱面, 其微观本质为龙马溪页岩层理面由黏土矿物纹层与有机质条带相间构成, 该取向下次生裂纹易沿层理面滑移扩展, 导致强度减小。

Table 1. Variation of rock parameters with angle
表 1. 岩石各参数随角度变化的大小

力学参数	角度							参考文献	
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°		
抗压强度/MPa	102.50	/	/	19.90	/	/	104.90	[19]	
	118.43	/	105.92	/	54.21	/	118.07	[11]	
	121.64	/	96.81	/	22.98	/	124.26		
	112.81	/	108.76	/	60.68	/	118.48	[20]	
	120.83	/	112.19	/	46.71	/	112.01		
	围压 0 MPa	109.35	/	95.71	/	47.79	/	177.92	[21]
		142.51	106.79	87.95	70.41	39.23	80.16	117.83	[22]
		125.95	/	107.30	89.94	78.06	/	118.68	[23]
		122.87	/	105.65	92.33	76.51	/	123.59	
	64.30	60.20	58.60	23.60	18.20	24.00	65.20	[24]	
	118.45	144.80	126.05	116.51	85.62	116.83	127.17	[25]	
	118.93	136.07	125.56	109.72	80.77	102.28	116.51		
	围压 20 MPa	174.03	/	149.13	/	110.84	/	211.59	[11]
		161.95	/	137.79	/	113.25	/	190.78	[21]
		201.62	204.87	196.43	89.90	132.12	184.09	249.69	[22]
		156.70	152.00	143.20	98.20	80.10	110.20	160.30	[24]
	围压 40 MPa	291.26	280.87	239.95	178.24	209.42	273.08	323.74	[22]
		255.40	248.70	238.80	170.50	144.60	175.40	265.4	[24]
	围压 60 MPa	324.39	339.98	290.61	261.38	286.07	352.32	333.49	[22]
		290.63	274.79	261.37	249.40	245.20	266.22	292.57	[25]
276.57		275.76	250.70	247.46	240.35	266.22	287.24		
抗拉强度/MPa	5.24	6.28	7.62	9.61	10.56	11.89	11.83		
	5.25	5.51	6.15	7.42	9.31	11.12	11.83		
	5.27	5.51	6.37	8.03	10.40	11.56	11.85	[26]	
	5.26	5.53	6.58	8.67	11.31	11.78	11.84		
	5.25	5.56	6.66	9.08	11.68	11.81	11.85		
	5.25	5.58	6.75	9.37	11.81	11.86	11.86		
	3.47	3.26	2.75	6.99	8.01	9.47	10.30		
	3.92	3.04	2.95	6.63	9.03	9.30	9.29	[27]	
	3.05	3.39	3.20	5.54	8.75	9.13	9.12		
	5.10	/	6.48	6.92	7.09	/	5.92		
	4.69	/	5.84	6.49	6.70	/	5.80	[28]	
	4.28	/	5.46	6.02	6.24	/	5.45		
5.92	/	7.08	6.92	6.49	/	5.09			

续表

杨氏模量/GPa	14.20	/	/	21.31	/	/	22.90	[19]
	22.91	/	24.61	/	28.85	/	42.94	
	14.09	/	16.68	/	21.72	/	24.91	[11]
	22.77	/	24.67	/	32.42	/	52.51	
	24.04	/	26.29	/	37.88	/	56.45	
	14.06	/	16.38	/	21.10	/	24.98	[20]
	14.52	/	15.73	/	19.75	/	23.19	
	19.61	/	25.13	/	35.66	/	46.42	[21]
	17.46	/	22.97	/	27.28	/	35.38	
	18.82	/	24.27	/	31.58	/	43.40	
泊松比/无量纲	0.28	/	/	0.21	/	/	0.36	[19]
	0.37	/	0.30	/	0.24	/	0.32	
	0.33	/	0.28	/	0.35	/	0.38	[11]
	0.26	/	0.27	/	0.32	/	0.42	
	0.26	/	0.27	/	0.35	/	0.42	
	0.37	/	0.33	/	0.27	/	0.32	[20]
	0.16	0.19	0.16	0.17	0.20	0.23	0.26	[26]
	0.19	0.26	0.19	0.24	0.20	0.14	0.21	[29]
	0.22	0.30	0.12	0.14	0.15	0.15	0.38	
	0.21	0.32	0.36	0.40	0.33	0.29	0.25	
	0.40	0.42	0.43	0.49	0.45	0.42	0.41	[22]
	0.37	0.39	0.42	0.46	0.43	0.40	0.38	
	0.27	0.35	0.40	0.43	0.36	0.33	0.30	

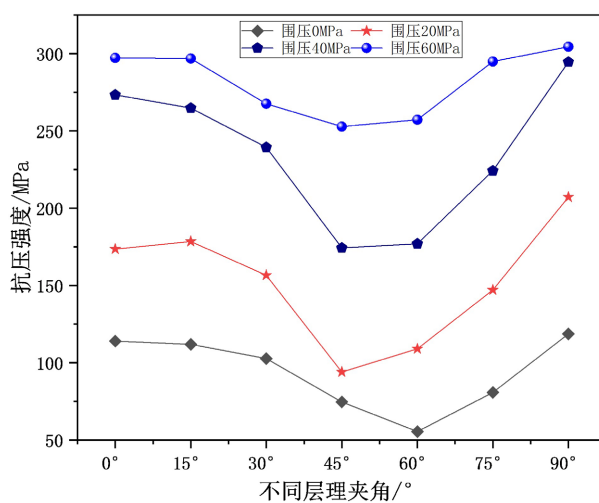


Figure 4. Variation of compressive strength with respect to the angle of bedding

图 4. 抗压强度随不同层理夹角变化规律

由图 5 可知,泊松比随层理夹角增大呈非单调波动特征,在 15°、45°及 90°处形成峰值(平均值分别约为 0.319、0.318 及 0.340),于 75°处降至最小值(约 0.281)。该规律与龙马溪页岩微观组构的受力变形特征直接相关:当加载方向与层理面法向夹角为 15°、45°及 90°时,层理弱面在应力作用下发生滑移或分离,降低了对岩石横向变形的约束作用,且有机质纹层的塑性变形进一步放大了横向应变,因此泊松比升高;其中 90°时层理面内滑移效应占主导,横向变形能力最强,泊松比达到最大值。而在 0°、30°及 75°时,层间咬合效应增强,对横向变形约束显著,且该角度下微孔隙的扩展受到抑制,横向应变减小,因此泊松比局部降低,75°时约束效应最强,泊松比达到最小值。

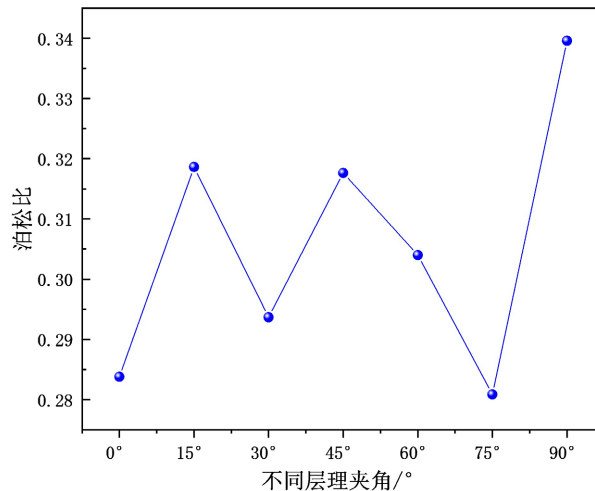


Figure 5. Variation of the Poisson's ratio with respect to different bedding angles

图 5. 泊松比随不同层理夹角变化规律

由图 6 可知,杨氏模量随层理夹角增大呈增大趋势,在 90°达到最大值 37.308 GPa,较 0°最小值 18.248 GPa 提升约 104.4%。基于平均值计算,平行层理与垂直层理杨氏模量各向异性比值为 2.05。上述表明:龙马溪页岩的弹性变形行为具有典型的各向异性特征,其刚度响应大小依赖于加载方向与层理面法向的夹角关系。

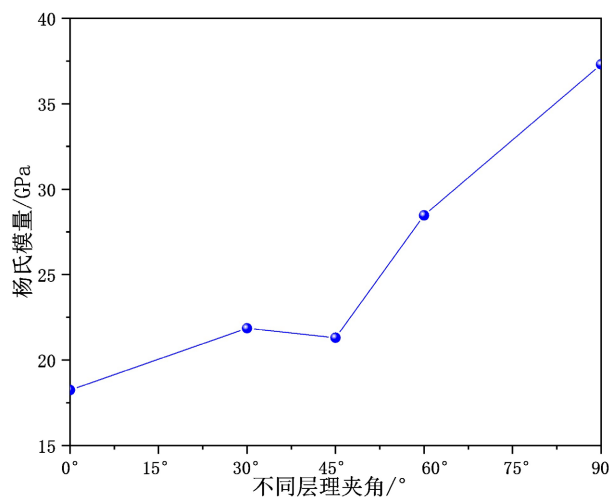


Figure 6. Variation of Young's modulus with respect to different stratification angles

图 6. 杨氏模量随不同层理夹角变化规律

由图 7 可知, 抗拉强度随层理夹角增大呈现“先增后降”的非单调变化特征。在 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 区间, 抗拉强度随夹角增大而逐渐增大, 于 75° 附近达到峰值; 随后在 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 区间出现明显下降。该变化规律可从裂纹扩展机制与层理面受力状态两方面阐释: 1) 巴西劈裂试验中, 圆盘中心产生垂直于加载方向的拉应力。当层理夹角较小时($0^{\circ}\sim 30^{\circ}$), 层理面近乎垂直于拉应力方向, 层间弱面处于直接受拉状态, 界面黏结强度低, 易于发生张开型破坏, 故抗拉强度较低。随着夹角增大至 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$, 层理面与拉应力方向斜交, 层间咬合效应增强, 抗拉强度随之提升, 于 75° 时达到最大值。2) 当夹角超过 75° 接近 90° 时, 层理面趋于平行于加载方向, 此时拉应力近乎垂直作用于层理面。该状态下, 由于页岩层间黏结较弱, 裂纹易沿层理面发生剥离扩展, 表现为强度的局部劣化。

为了明确页岩杨氏模量、泊松比、抗张强度、抗压强度等参数各向异性程度, 提取同批岩心在不同角度下的最大值与最小值, 以及垂直层理面和平行层理面时的实验结果, 运用比值法定义各向异性程度标准, 探究龙马溪页岩弹性参数和强度的各向异性特征。图 8 展示了龙马溪组页岩平行层理面与垂直层

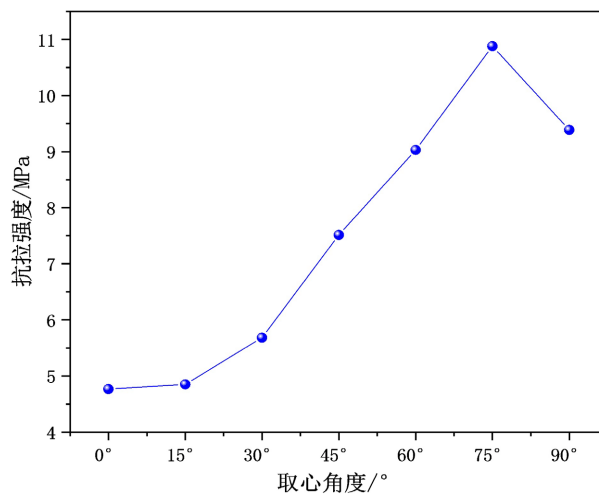


Figure 7. Variation of tensile strength with respect to the angle of the strata

图 7. 抗拉强度随不同层理夹角变化规律

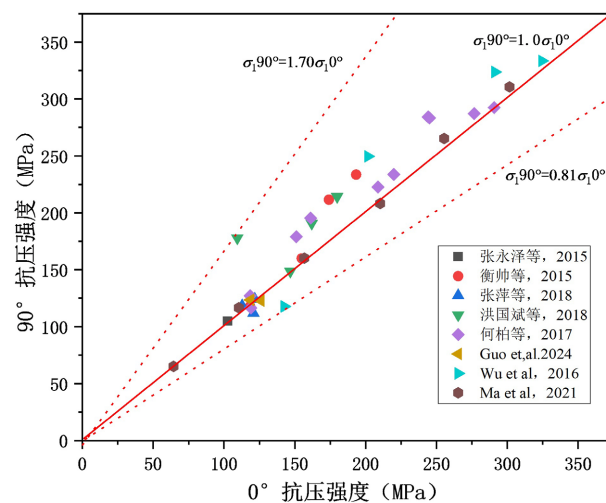


Figure 8. Ratio of horizontal to vertical bedding planes in compressive strength and the range of this ratio

图 8. 抗压强度水平层理与垂直层理的比值及比值范围

理面的比值及其分布范围。基于系统收集的实验数据统计分析，龙马溪页岩抗压强度的平行层理与垂直层理比值介于 0.81~1.70 之间，表明其不同层理取向下的抗压性能存在显著差异。既反映了研究区域不同围压条件对强度的调控作用，也与龙马溪页岩样品微观结构的非均质性相关，如黏土矿物含量、有机质赋存状态及微裂隙发育程度的差异，均会导致层理面黏结强度与刚性骨架刚度的变化。

图 9 呈现了龙马溪页岩平行层理面与垂直层理面的抗拉强度比值及其分布范围。根据如图 9 可知，抗拉强度平行层理面与垂直层理面比值范围为 0.81~3.10，最大比值高至 3.10，大部分数据点比值大于 1 (水平层理强度高于纵向层理)，揭示层理弱面在拉应力作用下极易成为优先破裂路径。抗拉强度对层理方向的高度敏感性证明了层理弱面是控制页岩拉伸破坏的主导因素。

图 10 呈现了龙马溪页岩平行层理面与垂直层理面的泊松比比值及其分布范围。根据如图 10 可知，泊松比各向异性比值分布于 0.84~1.72 区间，大部分数据点比值大于 1 (水平层理强度高于垂直层理)。说明页岩在水平方向的横向变形(横向膨胀或收缩)比垂直方向更显著。

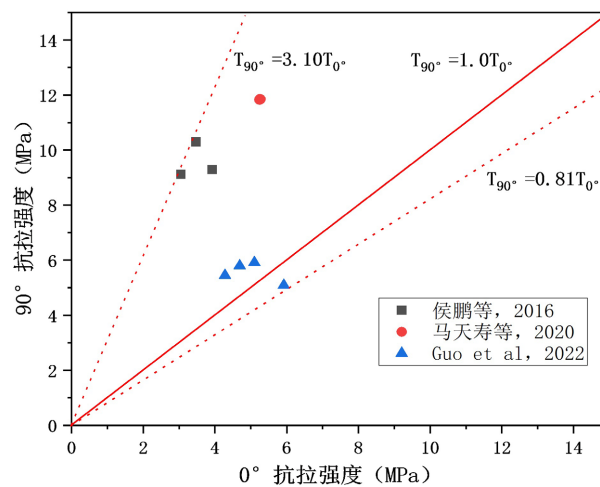


Figure 9. Ratio of tensile strength between horizontal and vertical strata, and the range of this ratio

图 9. 抗拉强度水平层理与垂直层理的比值及比值范围

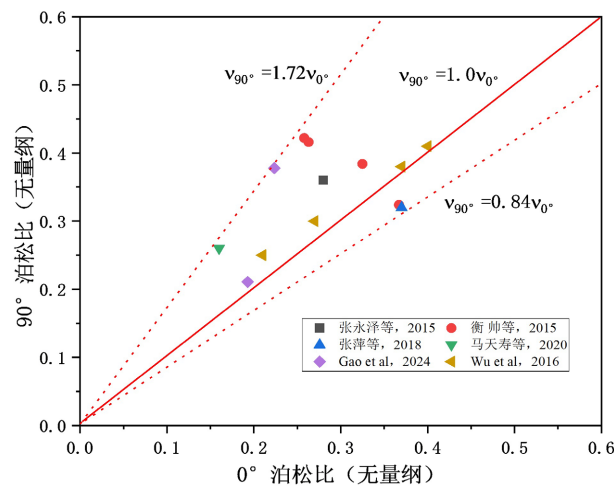


Figure 10. Ratio of Poisson's ratio between horizontal and vertical bedding planes, and the range of this ratio

图 10. 泊松比水平层理与垂直层理的比值及比值范围

图 11 呈现了龙马溪页岩平行层理面与垂直层理面的杨氏模量比值及其分布范围。根据如图 11 可知，杨氏模量比值范围为 0.79~2.47，同样呈现大部分数据点比值大于 1 (水平层理强度高于垂直层理)。该比值分布揭示了杨氏模量在夹角 90° (平行层理加载) 时通常表现出更高的刚度响应。

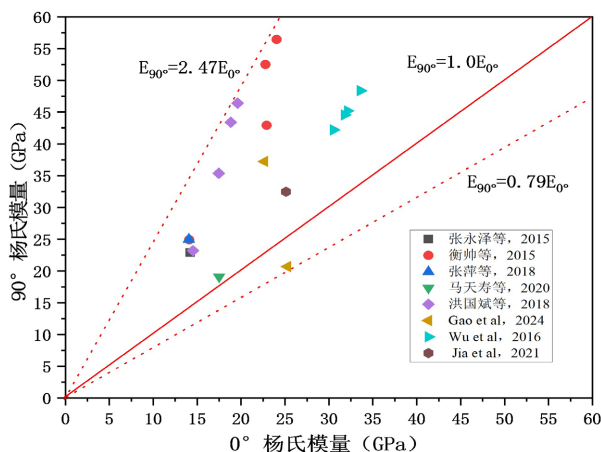


Figure 11. Ratio of Young's modulus between horizontal and vertical strata, and the range of this ratio

图 11. 杨氏模量水平层理与垂直层理的比值及比值范围

3. 页岩各向异性强度准则适用性评价

3.1. 各向异性强度准则理论

3.1.1. 抗拉强度准则

页岩的层理结构导致其在不同加载方向下表现出显著的抗拉强度各向异性特征。为准确描述这一特性，国内外学者基于连续介质力学、损伤力学及断裂力学理论，提出了多种各向异性抗拉强度准则。Barron [30] 准则基于最大拉应力理论，假设岩石抗拉强度随层理面取向呈余弦函数变化，适用于描述具有单一组层理面的沉积岩强度各向异性；SPW 准则由 Jaeger [31] 提出，将岩石视为含有一组弱面的各向同性基体，通过比较沿弱面破坏与穿切基体破坏的临界应力确定强度，是描述层状岩石各向异性的经典理论；N-Z [32] 准则引入双参数描述弱面法向与切向的耦合效应，能够更好地反映片岩等强各向异性岩石的拉伸破坏行为；L-P [33] 准则基于横观各向同性假设，通过张量形式构建破坏函数，适用于描述复杂应力状态下页岩的拉伸强度演化；L-A [34] 准则则考虑层理面粗糙度与咬合效应，引入非线性修正项以描述弱面的渐进损伤过程。上述准则分别从不同的物理机制出发，建立了层理取向与抗拉强度之间的定量关系。我们仅选取五种典型的各向异性抗拉强度准则评估其在龙马溪页岩中的适用性，各准则的具体表达式如表 2 所示：

Table 2. Tensile strength guidelines

表 2. 抗拉强度准则

准则	公式
Barron 准则	$T(\beta_b) = \frac{4T_b}{1 + \cos 2\beta_b + \sqrt{2(1 + \cos 2\beta_b)}}, 0^\circ \leq \beta_b \leq \beta_b^*$ $\cos \beta_b^* (1 + \cos \beta_b^*) = \frac{2T_b}{T_m}$
SPW 准则	$T(\beta_b) = \begin{cases} \frac{T_b}{\cos^2 \beta_b} & 0^\circ \leq \beta_b \leq \beta_b^* \\ T_m & \beta_b^* \leq \beta_b \leq 90^\circ \end{cases} \quad \beta_b^* = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{T_b}{T_m}} \right)$

续表

N-Z 准则	$T(\beta_b) = \frac{T_m T_b}{T_b \sin^2 \beta_b + T_m \cos^2 \beta_b}$
L-P 准则	$T(\beta_b) = \frac{T_m + T_b}{2} - \frac{T_m - T_b}{2} \cos 2\beta_b$
L-A 准则	$T(\beta_b) = T_b + (T_m - T_b) \sin^n \beta \quad n = \frac{T_m}{T_b}$

3.1.2. 抗压强度准则

与抗拉强度准则类似，页岩在压应力作用下的破坏行为同样受层理面取向显著影响。本文选取三类代表性抗压强度准则：SWP 准则、WPP 准则及 ML-G 准则。SWP 准则由 Jaeger [31] 提出，将岩石视为含一组连续弱面的各向同性基体，通过比较沿弱面剪切滑动与岩石本体剪切破坏的临界应力确定强度；WPP 准则由 Fjær [35] 等修正 SWP 准则发展而来，引入弱面块概念及斑块参数表征弱面不连续性的损伤效应；ML-G 准则则由 McLamore 和 Gray [36] 基于可变内聚力理论提出，采用分段函数描述内聚力与内摩擦角随加载方向的连续变化。本文采用网格搜索法确定各准则最优材料参数，并基于多维度评价指标体系，评估其对龙马溪页岩不同层理角度及围压条件下抗压强度实验数据的拟合精度。各准则的具体表达式如表 3 所示：

Table 3. Compressive strength guidelines

表 3. 抗压强度准则

准则	公式
SWP 准则	$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_w + \sigma_3 + \tan \varphi_w)}{(1 - \tan \varphi_w \cot \beta) \sin 2\beta}, \beta_1 \leq \beta \leq \beta_2$ $\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_0 + \sigma_3 + \tan \varphi_0)}{(1 - \tan \varphi_0 \cot \beta_0) \sin 2\beta_0}, \beta < \beta_1 \text{ or } \beta > \beta_2$ $\beta_1 = \frac{\varphi_w}{2} + 0.5 \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \varphi_w) \sin \varphi_w}{\sigma_1 - \sigma_3} \right]$ $\beta_2 = \frac{\pi}{4} + \varphi_w - \beta_1$
WPP 准则	$\sigma_1 = \sigma_3 + (1 - \eta \sin^2 2\beta) \cdot \frac{c_w \cos \varphi_w + \sigma_3 \sin \varphi_w}{\sin 2\beta \cos \varphi_w - (\cos 2\beta + 1) \sin \varphi_w}$ $\sigma_1 = \sigma_3 + (1 - \eta \sin^2 2\beta) \cdot \frac{c_w \cos \varphi_0 + \sigma_3 \sin \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0}$ $\eta = \eta_0 e^{-\sigma_3/\sigma_1}$
ML-G 准则	$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0} + \frac{2c_0 \cdot \cos \varphi_0}{1 - \sin \varphi_0}$ <p>For: $0^\circ \leq \beta \leq \alpha_1$:</p> $c_0 = A_1 - B_1 \cos(2\alpha_1 - 2\beta)^n$ <p>For: $\alpha_1 \leq \beta \leq 90^\circ$:</p> $c_0 = A_2 - B_2 \cos(2\alpha_1 - 2\beta)^n$ <p>For: $\alpha_1 \leq \beta \leq \alpha_2$:</p> $\tan \varphi_0 = C_1 - D_1 (2\alpha_2 - 2\beta)^m$ <p>For: $\alpha_2 \leq \beta \leq 90^\circ$:</p> $\tan \varphi_0 = C_2 - D_2 (2\alpha_2 - 2\beta)^m$

3.2. 强度准则参数

由于龙马溪页岩实验数据存在部分围压下的离散点(如表 1 中不同文献的抗压强度数据差异), 绝对平均误差对异常值的敏感度更低, 能避免单组极端数据主导参数优化结果, 更贴合多来源实验数据的拟合需求。本文基于实验数据, 选取绝对平均误差(Diffabs)为网格搜索法的目标函数, 对各向异性强度准则的材料参数进行系统优化。该方法通过构建参数空间内的多维搜索网格, 以理论计算值与实验观测值之间的绝对平均误差(Diffabs)最小化为目标函数, 遍历求解各准则的最优材料常数。网格搜索法示意图如图 12 所示。基于网格搜索法得到的三个准则的相关参数如表 4 所示:

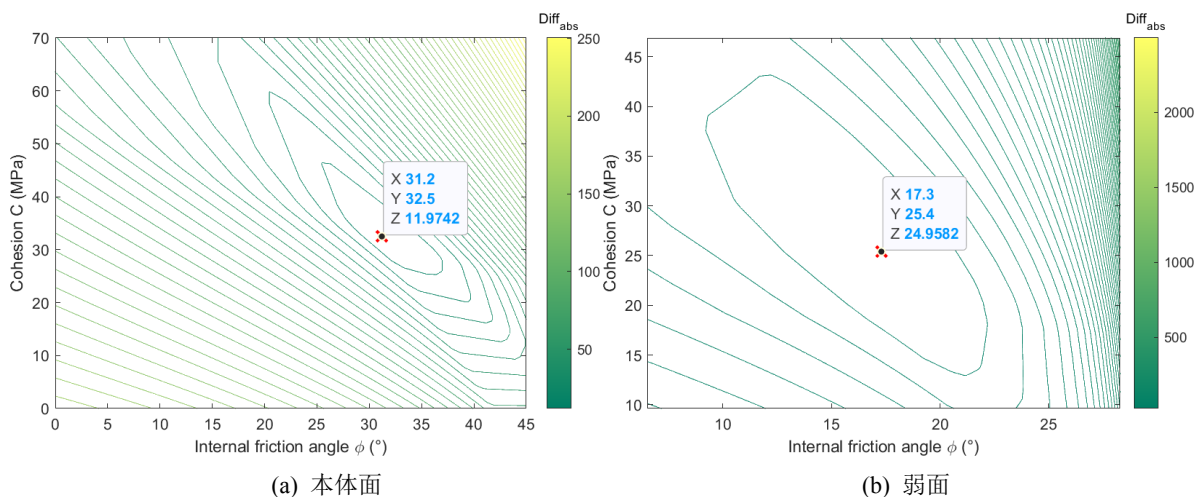


Figure 12. Optimization results from the SWP heuristic grid search

图 12. SWP 准则网格搜索优化结果

Table 4. Parameters for compressive strength criteria

表 4. 抗压强度准则参数

SWP 准则	φ_w	17.3°	c_w	25.4	φ_0	31.2°	c_0	32.5
WPP 准则	φ_w	16.7°	c_w	27.8	φ_0	30.8°	c_0	33.7
	β	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
ML-G 准则	c	32.6	30.7	31	21.7	15.9	21.4	36.4
	φ	30.5	32.5	27.8	29.4	30.3	34.2	33.7

3.3. 强度准则优选

当各向异性强度准则中的材料参数确定后, 以表 1 中强度平均值为基准, 对比不同强度准则理论计算结果差异, 通过均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)、相对误差(MRE)及最大误差(MaxError)开展强度准则优选, 同时从模型复杂性、参数数量、参数物理意义及获取难易度等角度综合分析各准则的适配性, 为工程应用提供参考。

图 13 展示了抗压强度理论计算结果与实际值差异。结果表明: 在抗压强度准则方面, ML-G 准则的预测误差最小(RMSE 为 24.19507, R^2 为 0.90698, MRE 为 -0.05983, MaxError 为 53.78), 明显优于 SWP 准则(RMSE 为 48.83364, R^2 为 0.62108, MRE 为 -0.06484, MaxError 为 96.48628)和 WPP 准则(RMSE 为 26.62445, R^2 为 0.88737, MRE 为 -0.01579, MaxError 为 73.67825)。ML-G 准则为分段函数形式表征力学响应, 模型复杂度高于 SWP 准则, 但参数仅为岩石力学核心的内聚力与内摩擦角, 物理意义明确, 且

参数可通过常规三轴压缩实验直接获取；SWP 准则模型形式简单、参数数量少，但其未考虑弱面不连续性的损伤效应，对复杂层理页岩的适配性有限；WPP 准则在 SWP 准则基础上新增斑块参数，无明确物理意义，且需通过大量实验数据拟合获取，参数获取难度显著提升。

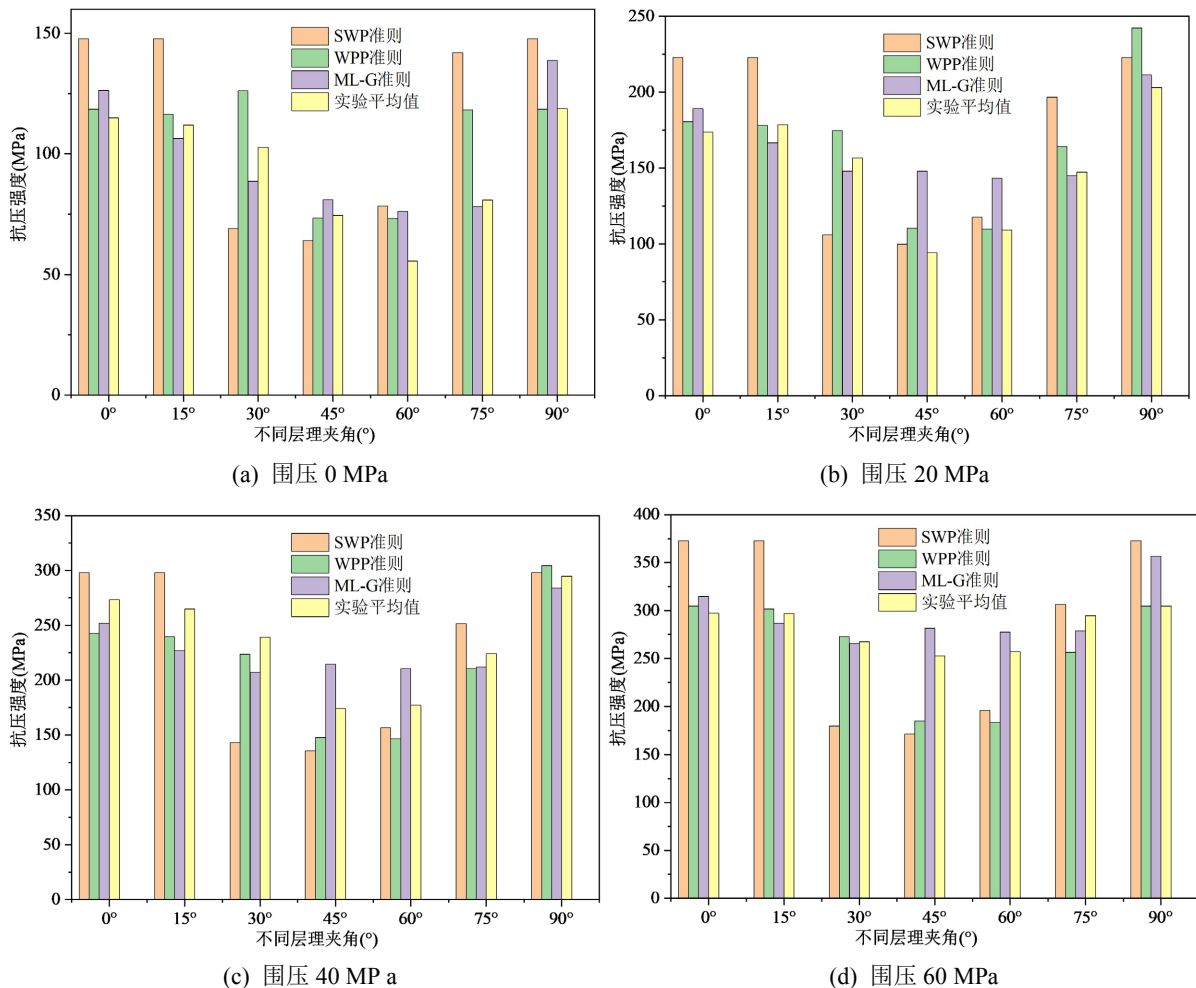


Figure 13. Comparison of compressive strength results under different bedding angles using various compressive strength criteria

图 13. 不同抗压强度准则在不同层理夹角下抗压强度对比结果

图 14 展示了抗拉强度理论计算结果与实际值差异。结果表明：在抗拉强度准则方面，Barron 准则表现出最优的预测精度，其 RMSE 为 0.60218， R^2 为 0.92770，MRE 仅为 -0.00445，MaxError 控制在 1.475，显著优于 SPW (RMSE 为 0.77683， R^2 为 0.81215，MRE 为 0.05144，MaxError 为 1.86)、N-Z (RMSE 为 0.694776429， R^2 为 0.85466，MRE 为 0.07208，MaxError 为 3.69)、L-P (RMSE 为 0.77143， R^2 为 0.88439，MRE 为 0.03177，MaxError 为 1.8) 和 L-A (RMSE 为 0.77957， R^2 为 0.88189，MRE 为 0.03096，MaxError 为 1.82) 准则。Barron 准则为余弦函数形式表征力学响应，模型最简单，仅包含垂直、平行层理抗拉强度 2 个参数，物理意义直观，可通过常规巴西劈裂实验直接测得；SPW 准则需区分岩石基体与层理弱面强度参数，参数数量翻倍，且需判断破坏形式，模型应用流程更复杂；N-Z 准则引入双参数描述耦合效应，参数无直观物理意义，需大量实验拟合；L-P 准则基于张量形式构建破坏函数，L-A 准则引入非线性修正项，二者模型数学形式复杂，参数获取难度大，对计算要求较高。

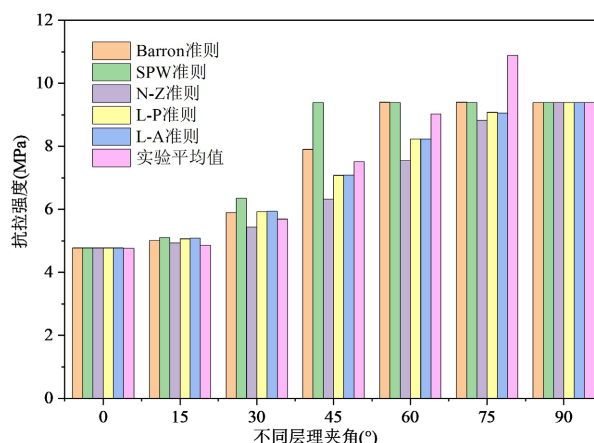


Figure 14. Comparison of tensile strength results under different bedding angles using various tensile strength criteria

图 14. 不同抗拉强度准则在不同层理夹角下抗拉强度对比结果

4. 结论

1) 基于实验数据揭示了龙马溪页岩力学参数的各向异性特征规律, 结果表明: 龙马溪页岩抗压强度各向异性比值范围为 0.81~1.70, 抗拉强度为 0.81~3.10, 杨氏模量为 0.79~2.47, 泊松比为 0.84~1.72; 强度参数各向异性程度显著高于弹性参数, 其中抗拉强度对层理方向最为敏感, 最大比值高至 3.10, 其中抗拉强度对层理方向最为敏感, 最大比值高至 3.10, 表明层理弱面在拉应力作用下极易成为优先破裂路径。

2) 梳理了各向异性抗压强度准则和各向异性抗拉强度准则, 通过网格搜索法确定了强度准则材料参数。该方法采用全参数空间遍历模式, 基于岩石力学规律约束参数边界, 从算法层面规避了局部最优解问题, 优化所得参数具有良好的可靠性与物理合理性, 通过该方法可高效确定各向异性强度准则材料参数。

3) 通过均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)、相对误差(MRE)及最大误差(MaxError)定量分析了各向异性抗压强度准则。结果表明, ML-G 准则在抗压强度预测中精度最高, RMSE 为 24.19507, R^2 为 0.90698, MRE 为 -0.05983, MaxError 为 53.78。ML-G 准则为分段函数形式, 模型复杂度稍高, 参数为内聚力、内摩擦角, 物理意义明确, 参数数量适配层理角度划分, 可通过常规三轴压缩实验获取。

4) 通过均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)、相对误差(MRE)及最大误差(MaxError)定量分析了各向异性抗拉强度准则。结果表明, Barron 准则在抗拉强度预测中表现最优, RMSE 为 0.60218, R^2 为 0.92770, MRE 仅为 -0.00445, MaxError 为 1.475。Barron 准则为余弦函数形式, 模型最简单, 仅 2 个参数, 为垂直、平行层理抗拉强度, 物理意义直观, 可通过巴西劈裂实验直接测得, 适配现场快速测算、参数易获取的实际需求。

致 谢

本研究受重庆科技大学石油与天然气工程学院大学生科技创新训练计划(项目编号: 2025201011)资助, 在此对学院给予的经费支持与科研保障表示诚挚谢意。

参考文献

[1] Jiang, Y., Luo, Y., Lu, Y., Qin, C. and Liu, H. (2016) Effects of Supercritical CO₂ Treatment Time, Pressure, and

- Temperature on Microstructure of Shale. *Energy*, **97**, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.124>
- [2] Yang, F., Ning, Z. and Liu, H. (2014) Fractal Characteristics of Shales from a Shale Gas Reservoir in the Sichuan Basin, China. *Fuel*, **115**, 378-384. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.040>
- [3] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-2.
- [4] 卢文欣. 长宁地区页岩热演化程度对弹性各向异性的作用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- [5] 曹文科, 邓金根, 蔚宝华, 等. 弹性参数各向异性对页岩井周应力的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2016, 31(5): 27-35, 42.
- [6] 王倩, 王鹏, 项德贵, 等. 页岩力学参数各向异性研究[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 62-65, 130.
- [7] 徐敬宾, 杨春和, 吴文, 等. 页岩力学各向异性及其变形特征的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(4): 16-19.
- [8] 杨志鹏, 何柏, 谢凌志, 等. 基于巴西劈裂试验的页岩强度与破坏模式研究[J], 岩土力学, 2015, 36(12): 3447-3455.
- [9] Cho, J., Kim, H., Jeon, S. and Min, K. (2012) Deformation and Strength Anisotropy of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **50**, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.12.004>
- [10] 侯振坤, 杨春和, 郭印同, 等. 单轴压缩下龙马溪组页岩各向异性特征研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2541-2550.
- [11] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 609-616.
- [12] Geng, Z., Chen, M., Jin, Y., Yang, S., Yi, Z., Fang, X., et al. (2016) Experimental Study of Brittleness Anisotropy of Shale in Triaxial Compression. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **36**, 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.10.059>
- [13] 贾利春, 孙本法, 连太炜. 富有机质页岩各向异性力学特性试验研究[J]. 钻采工艺, 2017, 40(2): 20-23.
- [14] Mohr, J. and Nevin, J.R. (1990) Communication Strategies in Marketing Channels: A Theoretical Perspective. *Journal of Marketing*, **54**, 36-51. <https://doi.org/10.1177/002224299005400404>
- [15] Hoek, E., Wood, D. and Shah, S. (1992) A Modified Hoek-Brown Failure Criterion for Jointed Rock Masses. *Proceedings of the International ISRM Symposium on Rock Characterization*, Chester, 14-17 September 1992, 202-214.
- [16] Jaeger, C. (1979) *Rock Mechanics and Engineering*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511735349>
- [17] Ramamurthy, T. (1993) Strength and Modulus Responses of Anisotropic Rocks. *Comprehensive Rock Engineering*, **1**, 313-329.
- [18] 马天寿, 彭念, 陈平, 等. 页岩气水平井井壁裂缝起裂力学行为研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 87-99.
- [19] 张永泽, 刘俊新, 冒海军, 等. 单轴压缩下页岩力学特性的各向异性试验研究[J]. 金属矿山, 2015(12): 33-37.
- [20] 张萍, 杨春和, 汪虎, 等. 页岩单轴压缩应力-应变特征及能量各向异性[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2106-2114.
- [21] 洪国斌, 陈勉, 卢运虎, 等. 川南深层页岩各向异性特征及对破裂压力的影响[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 78-85.
- [22] Wu, Y., Li, X., He, J. and Zheng, B. (2016) Mechanical Properties of Longmaxi Black Organic-Rich Shale Samples from South China under Uniaxial and Triaxial Compression States. *Energies*, **9**, Article 1088. <https://doi.org/10.3390/en9121088>
- [23] Guo, Y., Li, X. and Huang, L. (2024) Effect of Height-Diameter Ratio on the Mechanical Characteristics of Shale with Different Bedding Orientations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **16**, 2482-2502. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.11.041>
- [24] Ma, T., Qiu, Y., Liu, Y. and Xiang, G.F. (2021) Evaluation of Anisotropic Strength Criteria for Longmaxi Shale Rock. *55th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 18-25 June 2021, ARMA-2021-1054.
- [25] 何柏, 谢凌志, 李凤霞, 等. 龙马溪页岩各向异性变形破坏特征及其机理研究[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47(11): 107-118.
- [26] 马天寿, 王浩男, 刘梦云, 等. 页岩抗张力学行为各向异性实验与理论研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 1391-1401.
- [27] 侯鹏, 高峰, 杨玉贵, 等. 考虑层理影响页岩巴西劈裂及声发射试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1603-1612.
- [28] Guo, Y., Huang, L. and Li, X. (2023) Experimental Investigation of the Tensile Behavior and Acoustic Emission Characteristics of Anisotropic Shale under Geothermal Environment. *Energy*, **263**, Article ID: 125767.

-
- <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125767>
- [29] Gao, X., Wang, M., Shi, X., Dai, P. and Zhang, M. (2024) Wellbore Stability Research Based on Transversely Isotropic Strength Criteria in Shale Formation. *Soils and Foundations*, **64**, Article ID: 101541. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101541>
- [30] Barron, K. (1971) Brittle Fracture Initiation in and Ultimate Failure of Rocks: Part III-Anisotropic Rocks: Experimental Results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **8**, 565-575. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(71\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(71)90027-1)
- [31] Jaeger, J.C. (1960) Shear Failure of Anisotropic Rocks. *Geological Magazine*, **97**, 65-72. <https://doi.org/10.1017/s0016756800061100>
- [32] Nova, R. and Zaninetti, A. (1990) An Investigation into the Tensile Behaviour of a Schistose Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **27**, 231-242. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)90526-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)90526-8)
- [33] Lee, Y. and Pietruszczak, S. (2015) Tensile Failure Criterion for Transversely Isotropic Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **79**, 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.08.019>
- [34] Li, L. and Aubertin, M. (2002) A Crack-Induced Stress Approach to Describe the Tensile Strength of Transversely Isotropic Rocks. *Canadian Geotechnical Journal*, **39**, 1-13. <https://doi.org/10.1139/t01-069>
- [35] Fjr, E. and Nes, O.M. (2013) Strength Anisotropy of Mancos Shale. *47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, San Francisco, 23-26 June 2013, ARMA-2013-519.
- [36] McLamore, R. and Gray, K.E. (1967) The Mechanical Behavior of Anisotropic Sedimentary Rocks. *Journal of Engineering for Industry*, **89**, 62-73. <https://doi.org/10.1115/1.3610013>