

海相 - 陆相 - 油页岩的力学响应差异性研究

谢宇新¹, 王鑫尧^{1*}, 董佳琪¹, 纪凡祥¹, 王 春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: 2025年11月17日; 录用日期: 2025年12月24日; 发布日期: 2026年1月7日

摘 要

页岩的典型层理结构与矿物组分主导特性直接影响水力压裂与井壁稳定等关键工程的成效。通过对比分析不同荷载及层理取向条件下海相 - 陆相 - 油页岩的力学参数差异性, 揭示了荷载垂直和平行层理状态下的三种页岩力学响应规律。结果表明: 在单轴压缩条件下, 海相页岩强度最高, 较陆相页岩高23~147 MPa, 陆相页岩较油页岩高28~49 MPa。海相页岩垂直层理的弹性模量较陆相页岩低, 但平行层理的弹性模量远高于陆相页岩, 而陆相页岩的弹性模量比油页岩高出10~27 GPa; 在三轴压缩条件下, 海相页岩的强度与弹性模量均显著优于力学性能相近的陆相页岩与油页岩, 其抗压强度与弹性模量分别高出74~111 MPa与7~39 GPa; 在巴西劈裂条件下, 海相页岩抗拉强度同样最高, 整体上较陆相页岩高0~11 MPa, 而陆相页岩整体上较油页岩高0~5 MPa。该力学差异主要受控于页岩矿物组成与结构, 即海相页岩中丰富的脆性矿物构成了高强度刚性骨架, 而陆相页岩中高含量的黏土矿物和油页岩中丰富的有机质显著弱化了其力学性能。研究结果揭示了不同页岩储层的力学行为本质差异, 为海相页岩、陆相页岩以及油页岩储层的差异化高效开发与压裂优化提供了理论依据。

关键词

海相页岩, 陆相页岩, 油页岩, 矿物组成, 力学性能

Differential Study on the Mechanical Response of Marine Shale, Continental Shale, and Oil Shale

Yuxin Xie¹, Xinyao Wang^{1*}, Jiaqi Dong¹, Fanxiang Ji¹, Chun Wang²

¹School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

²Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Survey Co., Ltd., Taiyuan Shanxi

*通讯作者。

文章引用: 谢宇新, 王鑫尧, 董佳琪, 纪凡祥, 王春. 海相-陆相-油页岩的力学响应差异性研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(1): 92-101. DOI: 10.12677/me.2026.141010

Received: November 17, 2025; accepted: December 24, 2025; published: January 7, 2026

Abstract

The typical bedding structures and dominant characteristics of mineral composition in shale directly influence the effectiveness of key engineering processes such as hydraulic fracturing and wellbore stability. Through a comparative analysis of the differences in mechanical parameters of marine, continental, and oil shales under varying loads and bedding orientations, three mechanical response patterns of shale under loads perpendicular and parallel to the bedding were revealed. The results indicate that under uniaxial compression, marine shale exhibits the highest strength, exceeding continental shale by 23~147 MPa, while continental shale surpasses oil shale by 28~49 MPa. The elastic modulus of marine shale perpendicular to the bedding is lower than that of continental shale, but its elastic modulus parallel to the bedding is significantly higher. In contrast, the elastic modulus of continental shale is 10~27 GPa higher than that of oil shale. Under triaxial compression, both the strength and elastic modulus of marine shale are significantly superior to those of continental and oil shales with similar mechanical properties, with compressive strength and elastic modulus exceeding them by 74~111 MPa and 7~39 GPa, respectively. Under Brazilian splitting conditions, marine shale also demonstrates the highest tensile strength, generally exceeding continental shale by 0~11 MPa, while continental shale surpasses oil shale by 0~5 MPa. These mechanical differences are primarily governed by the mineral composition and structure of the shales. Specifically, the abundance of brittle minerals in marine shale forms a high-strength rigid framework, whereas the high clay mineral content in continental shale and the rich organic matter in oil shale significantly weaken their mechanical properties. The findings reveal the fundamental differences in the mechanical behavior of various shale reservoirs, providing a theoretical basis for the differentiated and efficient development and fracturing optimization of marine, continental, and oil shale reservoirs.

Keywords

Marine Shale, Continental Shale, Oil Shale, Mineral Composition, Mechanical Properties

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

油气资源在全球一次能源消费中的关键地位与日俱增。近年来，页岩油气的快速发展，更是在全球油气供应增长中扮演了主导角色[1]。页岩油气作为资源潜力巨大且具备开发可行性的非常规资源，是 21 世纪重要的战略接替能源[2]。页岩油气资源的成功开发是全球能源领域的一场革命，其经济效益的实现高度依赖于水平井钻井与水力压裂技术。这些技术的核心地质力学基础在于对页岩储层力学响应的深刻理解，即岩石在外部应力作用下所表现出的变形、强度及破坏行为。页岩作为一种典型的沉积岩，其强烈的层状结构和组分导向性导致了显著的力学各向异性。这种各向异性的核心体现即为垂直层理方向与平行层理方向力学性质的差异，它直接控制了水力裂缝的扩展路径、井筒的稳定性以及储层的可压裂性。然而，不同成因的页岩，如海相页岩、陆相页岩和油页岩，由于其沉积环境、矿物组成和微观结构特征上存在显著差异，导致其表现出截然不同的力学响应。

目前, 尽管针对单一类型页岩的力学特性研究已取得一定成果, 但缺乏一个系统的框架来对比与阐释这三类页岩在力学性质上的差异性。因此, 本文分析海相、陆相及油页岩在矿物组成与微观结构方面的本质差异, 并基于单轴压缩、三轴压缩和巴西劈裂试验, 系统阐明三类页岩在荷载垂直层理和平行层理方向上的力学响应规律。研究结果为页岩储层的安全高效开发提供了重要的理论依据与实践指导。

2. 矿物组成与微观结构特征

2.1. 矿物组成差异性分析

海相页岩通常形成于深海、半深海、浅海等海洋环境, 脆性矿物含量高。王迎港等人[3]对四川盆地龙马溪组海相页岩的矿物组成进行研究, 研究发现海相页岩中包含 48.5% 的石英、19.4% 的长石、8.7% 的方解石及 19.8% 的黏土矿物。郭春礼等人[4]对修武盆地寒武统荷塘组海相页岩的矿物组成进行研究, 发现其脆性矿物的含量占据绝对主导地位, 其具体数值分布区间为 58.3%~66.5%, 平均值达到了 62.61%。

陆相页岩形成于湖泊、河流、沼泽等陆地环境, 黏土矿物含量高。王迎港等人[3]也研究发现鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩黏土矿物占比最高, 达 45.3%。石英和长石次之, 分别为 32.8% 和 15.6%。左如斯等人[5]发现川西坳陷须家河组陆相页岩呈现出高黏土矿物的组成特征, 辅以石英和长石等组成的硅质矿物, 碳酸盐岩含量甚微。

油页岩形成深湖、沼泽等闭塞、缺氧水体环境。油页岩是一种富含有机质的沉积岩, 作为一类矿物基质含量丰富的腐泥煤, 它属于低热值固态化石燃料, 常见浅灰至深褐色。其有机质以不溶于溶剂的高分子聚合物——“油母”为主, 沥青含量甚少。而无机矿物质(如石英、云母、碳酸盐岩等)含量更高, 约占 50%~85% [6]。Wang D. M. 等人[7]对抚顺、桦甸、龙口与长春油页岩的对比研究揭示, 其矿物含量存在显著地域性差异。Zhang 等人[8]对龙口油页岩样品的综合分析表明, 干酪根主要富集于低密度组分中。其无机矿物以石英、高岭石、蒙脱石、方解石、方沸石、白云石及黄铁矿为主。Al-Anazeh N. M. [9]等人对约旦 Yarmouk 盆地的 Wadi Ash Shallala 油页岩样品进行分析, 发现其矿物组成以方解石为主, 并含有高岭石、石英、氟磷灰石等矿物。

2.2. 微观结构差异性分析

张洪等人[10]将陆相页岩和海相页岩进行对比分析, 发现海相页岩以吸附力强的有机孔和构造裂隙为主; 陆相页岩则以孔径较大、吸附力弱的无机孔和内生裂隙为主。孙彩蓉等人[11]对贵州凤冈区的海相页岩进行研究, 研究发现海相页岩主要为 I 型、II 型干酪根, 孔隙以有机质孔为主且孔隙比表面积较高。管全中等人[12]对我国海相和陆相页岩储层进行试验研究, 研究发现相较于陆相页岩以无机孔为主, 海相页岩主要发育粒间孔和有机质孔。此外, 海相页岩虽孔径较小, 但其比表面积与孔容更为发育。Wang Q. 等人[13]对塔里木盆地陆相下侏罗统页岩进行研究, 陆相页岩中主要为 II₂ 型、III 型干酪根。Wu W. 等人[14]对喀什凹陷北部侏罗系陆相页岩进行研究, 研究发现陆相页岩中主要是 II 和 III 干酪根。

由于有机质和矿物的紧密堆积, 油页岩在原始状态下几乎不发育有效的储集孔隙网络。其原生孔隙度极低, 通常远低于常规油气储层。Saif T. 等人[15]对油页岩样品进行热解来观察其孔隙度的变化, 研究发现油页岩在热解过程中因干酪根分解产烃, 内部流体压力积聚并诱发裂缝。这些裂缝从沿层理萌生, 最终互联成网, 致使样品孔隙度达到 23.3%。Jovanievi B. 等人[16]对 Aleksinac 油页岩试样进行研究, Aleksinac 油页岩发育有未成熟的有机质, 这些有机质主要源自藻类, 并以 I 型和 II 型干酪根为主。Xudong H. 等人[17]分析了油页岩孔裂隙系统的演化过程及其各向异性连通性, 结果表明: 原始样品结构致密, 没有明显孔隙网络; 在 314℃ 以上蒸汽作用下, 沿层理面产生裂隙, 显著改变了平行层理方向的传质能力;

当温度超过 382℃，热解作用产生簇状孔隙并连接相邻裂隙，形成“孔隙－裂隙簇”；温度进一步升至 500℃以上时，该结构开始垂直层理方向扩展，从而显著改变了垂直方向的传质性能。

综上所述，三类页岩的矿物组成和微观结构对比，见表 1。

Table 1. Comparison of mineral composition and microstructure of marine shale, continental shale and oil shale
表 1. 海相页岩、陆相页岩、油页岩的矿物组成和微观结构对比

岩石类型	沉积环境	核心特征	有机质特征	孔隙类型	参考文献
海相页岩	深海、半深海、浅海等海洋环境	脆性含量高	主要为 I 型、II 型	主要为粒间孔、有机质孔	文献[3] [4]、文献[10]-[12]
陆相页岩	湖泊、河流、沼泽等陆地环境	黏土含量高	主要为 II 型、III 型	主要为无机孔	文献[3]、文献[5]、文献[10]、文献[12]-[14]
油页岩	深湖、沼泽等闭塞、缺氧水体环境	有机质含量高	主要为 I 型、II 型	原始结构无明显孔隙网络，在热解过程中会生成大量孔隙	文献[6]、文献[8]、文献[15]-[17]

3. 海相－陆相－油页岩的力学性质研究

国内外学者通过多种试验手段对海相页岩、陆相页岩和油页岩的力学性质进行了系统研究。下面将基于单轴压缩试验、三轴压缩试验和巴西劈裂试验，分别介绍具体研究人员对这三类页岩的研究成果，并进行对比分析。

3.1. 海相－陆相－油页岩的单轴压缩变形破坏特征研究

王一婷等人[18]对修武盆地下寒武统荷塘组海相页岩试样进行单轴压缩试验，结果表明：荷载垂直层理时抗压强度为 83 MPa，弹性模量为 13.4 GPa；荷载平行层理时抗压强度为 200 MPa，弹性模量为 51.35 GPa。荷载垂直层理时，破坏模式主要为拉张破坏和剪切－拉张转换破坏；荷载平行层理时，破坏模式主要为沿层理的拉张破坏。

对于陆相页岩，根据之前对鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长 7² 段陆相页岩试样进行单轴压缩试验，结果表明：荷载垂直层理时，抗压强度为 59.4 MPa，弹性模量为 18.94 GPa；荷载平行层理时，抗压强度为 53.8 MPa，弹性模量为 28.32 GPa。荷载垂直层理时，试样表现出穿透层理面的拉张破坏特征；荷载平行层理时，试样表现出沿层理面的竖向劈裂型拉张破坏特征[19]。

根据严轩辰、陈晨、沈国军等人[20]-[23]的研究，得到了吉林的农安、汪清地区的油页岩的单轴抗压强度、弹性模量以及泊松比。农安油页岩在荷载垂直层理时，平均抗压强度为 10.90 MPa，平均弹性模量为 6.2 GPa；荷载平行层理时，平均抗压强度为 17.14 MPa，平均弹性模量为 1.9 GPa。汪清油页岩在荷载垂直层理时，平均抗压强度为 25.62 MPa，平均弹性模量为 8.4 GPa；荷载平行层理时，平均抗压强度为 14.88 MPa，平均弹性模量为 1.4 GPa。可以看出吉林省农安和汪清地区的单轴压缩抗压强度和弹性模量较为相近，因此，这两个地区的力学性质较为相似。

根据上述文献，对荷塘组海相页岩、鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长 7² 段陆相页岩、农安地区油页岩(选取农安地区油页岩为农安、汪清地区油页岩的代表)的单轴抗压强度和弹性模量进行对比分析，见图 1、图 2。

总体而言，海相页岩抗压强度显著优于陆相页岩，其差值范围为 23~147 MPa；而陆相页岩抗压强度又明显高于油页岩，差值范围为 28~49 MPa。在弹性模量方面，海相页岩垂直层理的弹性模量较陆相页岩

岩垂直层理的弹性模量低约 5.5 GPa，但平行层理的弹性模量显著高出陆相页岩约 23 GPa，而陆相页岩的弹性模量在总体上又远高于油页岩的弹性模量，其模量差值范围为 10~27 GPa。

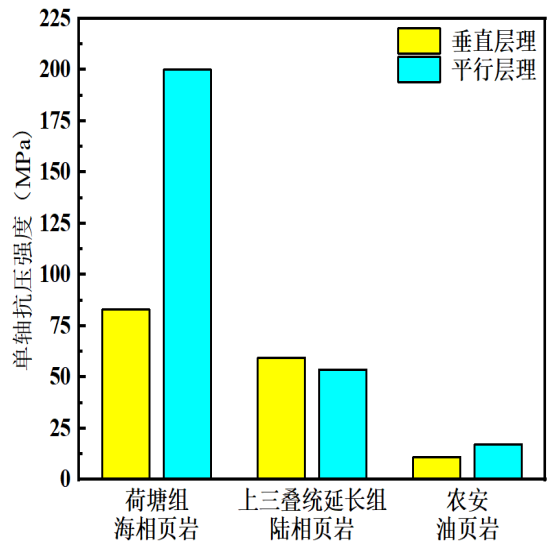


Figure 1. Comparison of uniaxial compressive strength between Hetang Group marine shale, Yanchang Group continental shale, and Nongan oil shale [18]-[22]

图 1. 荷塘组海相页岩、延长组陆相页岩与农安油页岩的单轴抗压强度对比[18]-[22]

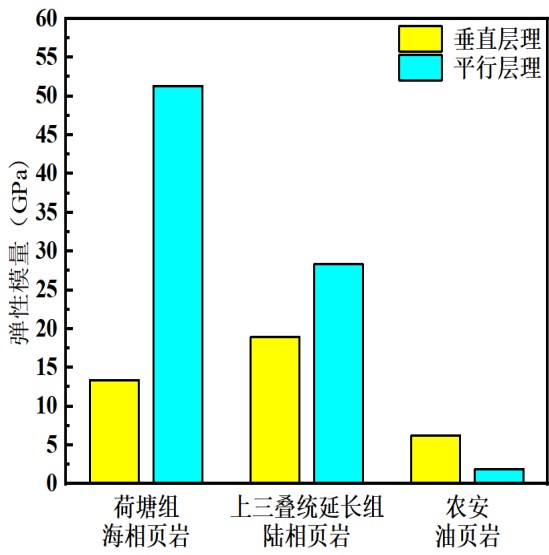


Figure 2. Comparison of elastic modulus between Hetang group marine shale, Yanchang group continental shale, and Nongan oil shale [18]-[22]

图 2. 荷塘组海相页岩、延长组陆相页岩与农安油页岩的弹性模量对比[18]-[22]

3.2. 海相 - 陆相 - 油页岩的三轴压缩变形破坏特征研究

衡帅等人[24]对龙马溪组海相页岩进行三轴压缩试验，结果表明：在围压为 10 MPa 条件下，荷载垂直层理加载时，海相页岩的三轴压缩抗压强度为 154.84 MPa，弹性模量为 22.91 GPa，破坏模式主要为贯穿层理的剪切破坏；荷载平行层理加载时，海相页岩的三轴压缩抗压强度为 160.07 MPa，弹性模量为 42.94 GPa，破坏模式主要为共轭剪切破坏。

李士斌等人[25]对松辽盆地陆相页岩进行三轴压缩试验, 结果表明: 在围压为 12 MPa 条件下, 荷载垂直层理加载时, 陆相页岩的三轴抗压强度为 77.205 MPa, 弹性模量为 4.6341 GPa; 荷载平行层理加载时, 陆相页岩的三轴抗压强度为 49.172 MPa, 弹性模量为 8.1527 GPa。

朱颖[26]对不同层理面的马泉油页岩试样进行三轴压缩试验, 结果表明: 在围压为 10 MPa 下, 荷载垂直层理面加载时, 油页岩的三轴抗压强度为 80.54 MPa, 弹性模量为 6.9774 GPa, 破坏模式主要为穿透层理面的劈裂破坏; 荷载平行层理加载时, 油页岩的三轴抗压强度为 73.21 MPa, 弹性模量为 15.2548 GPa, 破坏模式主要为竖向劈裂型的剪切 - 张拉复合破坏。

三轴压缩试验结果进一步揭示了页岩力学特性对围压和层理方向的响应。在相近的围压条件下, 龙马溪组海相页岩、松辽盆地陆相页岩以及马泉油页岩表现出以下特征, 见图 3、图 4。

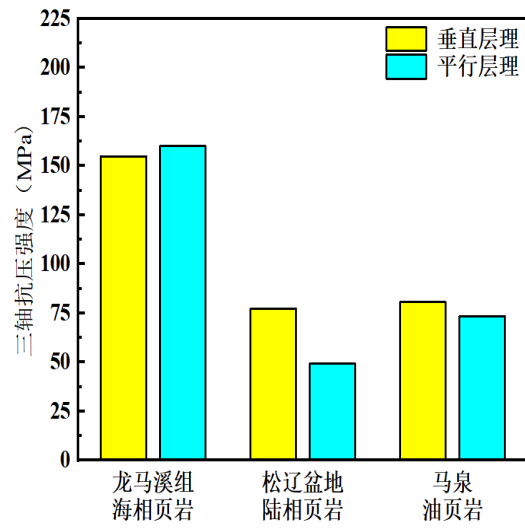


Figure 3. Comparison of triaxial compressive strength between Longmaxi group marine shale, Songliao basin continental shale, and Maquan oil shale [24]-[26]

图 3. 龙马溪组海相页岩、松辽盆地陆相页岩与马泉油页岩的三轴抗压强度对比[24]-[26]

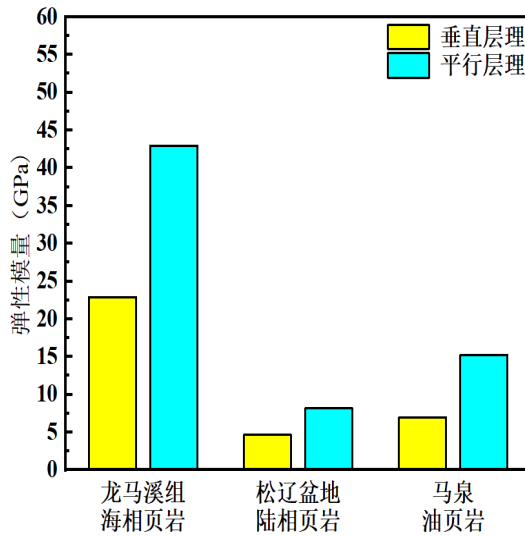


Figure 4. Comparison of elastic modulus between Longmaxi group marine shale, Songliao basin continental shale, and Maquan oil shale [24]-[26]

图 4. 龙马溪组海相页岩、松辽盆地陆相页岩与马泉油页岩的弹性模量对比[24]-[26]

总体而言, 陆相页岩与油页岩三轴抗压强度相近, 海相页岩的三轴抗压强度远高于陆相页岩和油页岩, 其差值范围为 74~111 MPa; 陆相页岩与油页岩的弹性模量也较为相近, 而海相页岩同样具有绝对优势, 较陆相与油页岩高出 7~39 GPa。

3.3. 海相 - 陆相 - 油页岩的劈裂受载变形破坏特征研究

He J.等人[27]对龙马溪组海相页岩进行不同层理面的巴西劈裂试验, 结果表明: 荷载垂直层理加载时, 海相页岩的平均抗拉强度为 7.071 MPa, 破坏后观察到弯曲裂缝; 荷载平行层理加载时, 海相页岩的平均抗拉强度为 3.091 MPa, 破坏后观察到中心线性裂缝。Duo Wang 等人[28]对鄂尔多斯盆地乌拉里克组海相页岩进行了巴西劈裂试验, 结果表明: 荷载垂直层理加载时, 海相页岩抗拉强度为 11.11 MPa; 平行层理加载时, 海相页岩的抗拉强度为 5.50 MPa。荷载垂直层理和水平层理试样的破坏模式均为拉伸破坏。

张润辉[29]对大庆古龙页岩油储层的陆相页岩试样进行巴西劈裂试验, 结果表明: 室温下陆相页岩垂直层理加载的抗拉强度平均值为 4.656 MPa; 平行层理加载的抗拉强度平均值为 1.967 MPa。根据之前对鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长 7² 段陆相页岩进行的巴西劈裂试验, 结果表明: 荷载垂直层理加载时, 平均抗拉强度为 5.154 MPa, 破坏模式为阶梯型偏心拉张破坏; 荷载平行层理时, 平均抗拉强度为 0.669 MPa, 破坏模式为直线型/月牙型穿心拉张破坏[19]。

严轩辰、陈晨、沈国军等人[20]-[23]也对吉林省农安、汪清两个地区的油页岩进行了巴西劈裂试验, 结果表明: 农安地区油页岩在荷载垂直层理加载时, 平均抗拉强度为 0.46 MPa; 荷载平行层理加载时, 平均抗拉强度为 0.98 MPa。汪清地区油页岩在荷载垂直层理加载时, 平均抗拉强度为 0.44 MPa; 荷载平行层理加载时, 平均抗拉强度为 1.81 MPa。

根据上述文献, 对龙马溪和乌拉里克组海相页岩、大庆古龙和鄂尔多斯延长组长 7² 段陆相页岩、农安、汪清地区油页岩的抗拉强度进行对比分析, 见图 5。

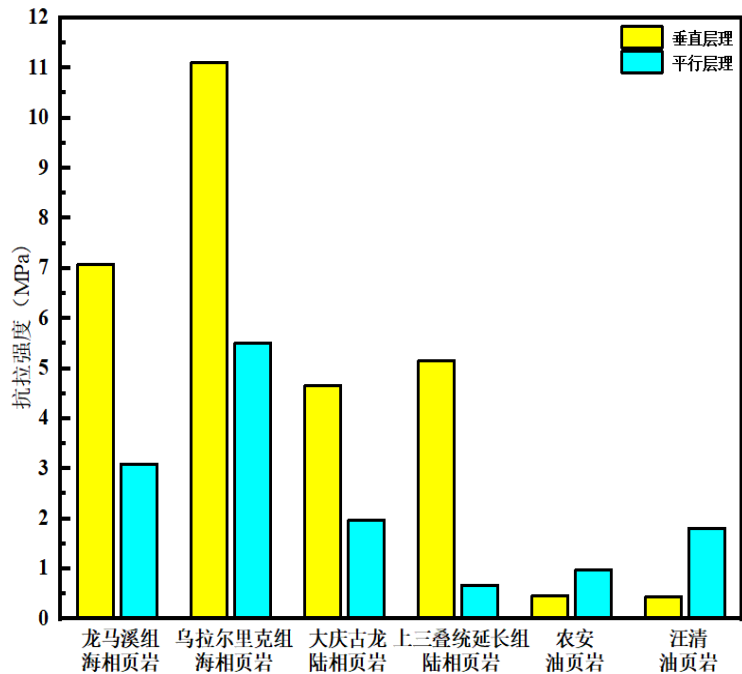


Figure 5. Comparison of tensile strength of three types of shale[19]-[23] [27]-[29]

图 5. 三类页岩的抗拉强度对比[19]-[23] [27]-[29]

总体而言,除龙马溪组海相页岩平行层理抗拉强度较低外,海相页岩抗拉强度显著高于陆相页岩,其高出范围为 0~11 MPa;虽然上三叠统延长组长 7²段陆相页岩平行层理抗拉强度低,但陆相页岩抗拉强度总体上仍高于油页岩,高出范围为 0~5 MPa。

4. 海相 - 陆相 - 油页岩力学行为差异的影响因素

王拔秀等人[30]发现海相页岩中的生物成因微晶石英不仅显著增强了页岩的脆性特征,还通过构建刚性硅质框架,显著增强了岩石的整体力学性能。

陈立超等人[31]发现四川盆地海相页岩的硬度、刚度及破裂压力均显著高于内蒙古石拐盆地陆相页岩。该差异主要归因于二者在矿物组成与结构上的不同:海相页岩富含石英、方解石等脆性矿物且结构致密,而陆相页岩则黏土含量高且发育粒间孔导致结构疏松。

王迎港等人[3]也发现相较于鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩,四川盆地龙马溪组海相页岩表现出更高的平均起裂压力。这主要归因于陆相页岩中更高的黏土矿物含量,从而显著降低了其力学强度。

康毅力等人[32]对鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段富有机质页岩进行研究,研究发现动态力学参数(G, K, E)随有机质含量增加而同步下降,泊松比则呈上升趋势。

刘圣鑫等人[33]对川南龙马溪组页岩进行研究,研究发现页岩中不同矿物组分的力学性质差异显著,其中有机质 - 黏土矿物的弹性模量与硬度远低于石英等脆性矿物。此差异进一步决定了纹层尺度的力学非均质性——富碎屑纹层表现出较高模量和较高硬度,而富有机质 - 黏土纹层则力学强度显著较低。

由以上文献结合表 1 可知,页岩的力学性质主要受其矿物组成和结构控制,海相页岩因高脆性矿物含量与致密结构表现出高强度、高刚度特征;陆相页岩受高黏土含量与疏松结构控制导致力学性能显著弱化;而油页岩的力学行为则受有机质主导,有机质作为一种力学上的“软弱组分”,会降低岩石整体的强度、硬度和弹性模量。

5. 结论与展望

本文通过系统梳理与对比国内外关于海相、陆相及油页岩力学性质的研究,得出以下核心结论:

(1) 三类页岩的强度和弹性模量呈现明显差异:单轴抗压强度海相页岩较陆相页岩高 23~147 MPa,陆相页岩较油页岩高 28~49 MPa。海相页岩平行层理的弹性模量最大,但垂直层理的弹性模量低于陆相页岩,但陆相页岩的弹性模量远高于油页岩的弹性模量,其模量差值范围为 10~27 GPa;陆相页岩与油页岩的三轴抗压强度和弹性模量相近,海相页岩的三轴抗压强度和弹性模量远高于陆相页岩和油页岩,其三轴抗压强度差值范围为 74~111 MPa,其弹性模量差值范围为 7~39 GPa;海相页岩抗拉强度显著高出陆相页岩 0~11 MPa,陆相页岩抗拉强度总体上高出油页岩 0~5 MPa。文中有些地区平行层理强度高于垂直层理强度,在水力压裂设计中应充分考虑这一特殊性。

(2) 海相页岩因富含脆性矿物且结构致密,表现出最高的强度、刚度和破裂压力;陆相页岩受高黏土矿物含量和疏松结构主导,力学性能显著弱化;油页岩则因富含有机质,导致弹性模量与强度较低。

(3) 本文的结论基于以上文献的梳理与归纳。然而,无论是海相、陆相还是油页岩,其内部都存在巨大的非均质性。同一类型页岩在不同盆地、不同层位,其矿物组成和结构也可能有显著差异。未来须深化基础理论研究,并推动技术理念交叉(比如将海相页岩体积压裂理念用于油页岩开发),以支撑非常规油气高效开发。

参考文献

- [1] 王敬,魏志鹏,胡俊瑜.中国页岩油气开发历程与理论技术进展[J].石油化工应用,2021,40(10):1-4+18.
- [2] 王建,郭秋麟,赵晨蕾,等.中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J].石油学报,2023,44(12):2033-2044.

- [3] 王迎港, 申峰, 吴金桥, 等. 海相与陆相页岩微观特征差异及其对可压性的影响[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(1): 26-33.
- [4] 郭春礼, 杨爽, 王安东, 等. 修武盆地寒武统海相页岩储层及 CH₄ 吸附特征[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(4): 598-610.
- [5] 左如斯, 杨威, 王乾右, 等. 川西坳陷须家河组陆相页岩岩相控制下的微观储集特征[J]. 特种油气藏, 2019, 26(6): 22-28.
- [6] 钱家麟, 王剑秋, 李术元. 世界油页岩综述[J]. 中国能源, 2006(8): 16-19.
- [7] Wang, D.M., Xu, Y.M., He, D.M., *et al.* (2009) Investigation of Mineral Composition of Oil Shale. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, **4**, 691-697. <https://doi.org/10.1002/apj.319>
- [8] Zhang, Z.J., Zhang, H.Y., Yang, X.X., *et al.* (2016) Mineralogical Characterization and Washability of Longkou Oil Shale. *Energy Sources Part A Recovery Utilization & Environmental Effects*.
- [9] Al-Ananzeh, N.M., Al-Smadi, M.L. and Dawagreh, A.M.A. (2018) Thermogravimetric and Composition Analysis of Jordanian Oil Shale. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **40**, 1374-1379. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1476625>
- [10] 张洪, 李靖, 郑庆龙, 等. 页岩孔缝结构及海相与陆相储层特征差异研究[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(1): 1-6.
- [11] 孙彩蓉, 唐书恒, 魏建光. 中国南方海相页岩气与华北煤系页岩气储层特征差异分析[J]. 中国矿业, 2017, 26(3): 166-170.
- [12] 管全中, 董大忠, 王淑芳, 等. 海相和陆相页岩储层微观结构差异性分析[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(3): 524-531.
- [13] Wang, Q., Tang, H., Guo, Z., Cheng, G., Lv, Z. and Liu, Q. (2022) Geological and Geochemical Characteristics of the Terrestrial Lower Jurassic Shale in Tarim Basin and Its Favorable Exploration Areas. *Frontiers in Earth Science*, **10**, Article 839427. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.839427>
- [14] Wu, W., Liao, Z., Chen, H., Li, S., Su, A., Hussain, I., *et al.* (2021) Jurassic Terrestrial Shale Gas Potential of the Northern Kashi Sag in the Tarim Basin, Northwestern China. *Geofluids*, **2021**, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/5542447>
- [15] Saif, T., Lin, Q., Butcher, A.R., Bijeljic, B. and Blunt, M.J. (2017) Multi-Scale Multi-Dimensional Microstructure Imaging of Oil Shale Pyrolysis Using X-Ray Micro-Tomography, Automated Ultra-High Resolution SEM, MAPS Mineralogy and FIB-SEM. *Applied Energy*, **202**, 628-647. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.039>
- [16] Jovančević, B., Stojanović, K. and Životić, D. (2024) Organic Geochemical Study of Aleksinac Oil Shale. *International Journal of Earth Sciences*, **113**, 1819-1839. <https://doi.org/10.1007/s00531-024-02413-x>
- [17] Huang, X.D., Yang, D., Wang, G.Y., *et al.* (2024) Evolution Patterns and Anisotropic Connectivity Characteristics of Pores and Fissures in Oil Shale after Steam Heating at Different Temperatures. *Natural Resources Research*, **34**, 409-425. <https://doi.org/10.1007/s11053-024-10406-5>
- [18] 王一婷, 杨爽, 石常亮, 等. 修武盆地寒武统荷塘组海相页岩单轴应力作用下的各向异性研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(5): 443-451.
- [19] 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]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022.
- [20] 严轩辰. 农安和桦甸油页岩力学性能及其水力压裂与破碎关键参数研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [21] 严轩辰, 陈晨, 刘鑫鹏, 等. 农安油页岩物理力学性能及其水力压裂设计中的相关参数计算[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(2): 9-11.
- [22] 陈晨, 沈国军, 张颖, 等. 汪清、农安和桦甸油页岩物理力学性质及裂缝起裂压力对比分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(3): 1-6.
- [23] 沈国军, 陈晨, 高帅, 等. 汪清油页岩物理力学性质及裂缝起裂压力的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(9): 1-4.
- [24] 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.
- [25] 李士斌, 梁凯, 王昶皓, 等. 层理性页岩各向异性井壁失稳机理研究[J]. 当代化工, 2022, 51(3): 550-554.
- [26] 朱颖. 油页岩层理对其力学特性及裂缝起裂与扩展的影响研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [27] He, J. and Afolagboye, L.O. (2017) Influence of Layer Orientation and Interlayer Bonding Force on the Mechanical Behavior of Shale under Brazilian Test Conditions. *Acta Mechanica Sinica*, **34**, 349-358. <https://doi.org/10.1007/s10409-017-0666-7>
- [28] Wang, D. and Liu, Z.D. (2023) Lamina Influences on Tensile Strength of Shallow Marine Shales from Upper Ordovician, Western Ordos Basin. *ACS Omega*, **8**, 30024-30036. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01954>

-
- [29] 张润辉. 非均质陆相页岩导流能力研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- [30] 王拔秀, 张鹏辉, 梁杰, 等. 生物成因微晶石英特征及其对海相页岩储层孔隙发育的影响[J]. 沉积学报, 2024, 42(5): 1738-1752.
- [31] 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.
- [32] 康毅力, 白佳佳, 游利军. 有机质含量对页岩声波传播特性的影响[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(9): 1341-1349.
- [33] 刘圣鑫, 王宗秀, 张林炎, 等. 基于纳米压痕的页岩微观力学性质分析[J]. 实验力学, 2018, 33(6): 957-968.