2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2067-2077

地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn

ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

周广旭,闫传梁,程远方,等.2026.油页岩岩石力学特征研究:以长 7 油页岩与流二段油页岩为例.地球物理学进展,41(5):2067-2077,doi:10.6038/pg2026JJ0303.

ZHOU GuangXu, YAN ChuanLiang, CHENG YuangFang, *et al*. 2026. Study on rock mechanical characteristics of oil shale: a case study of Chang 7 oil shale and Liu 2 oil shale. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2067-2077,doi:10.6038/pg2026JJ0303.

油页岩岩石力学特征研究:以长 7 油页岩与流二段油页岩为例

Study on rock mechanical characteristics of oil shale: a case study of Chang 7 oil shale and Liu 2 oil shale

周广旭[1,2],闫传梁[1,2*],程远方[1,2],韩忠英[1,2]

ZHOU GuangXu[1,2], YAN ChuanLiang[1,2*], CHENG YuangFang[1,2], HAN ZhongYing[1,2]

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580
2. 中国石油大学(华东)深层油气全国重点实验室,山东青岛 266580
1. *School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong* 266580, *China*
2. *State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong* 266580, *China*

摘 要 页岩油是我国能源战略的重要组成部分,目前我国陆上页岩油与海上页岩油的研究并进,油页岩岩石力学性质的研究是实现页岩油高效勘探开发的基础.本文以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油页岩与涠西南凹陷流沙港组二段油页岩为研究对象,基于岩石强度、各向异性、微观结构、破裂特征、水化作用等角度,展开了全面的岩石物理性质研究,研究了油页岩的岩石力学特征,分析了陆上油页岩与海上油页岩的共性与区别.结果表明:(1)油页岩均具有明显的各向异性特征,岩石强度随层理角度呈现规律性变化.流二段油页岩层理发育程度更高,各向异性强于长 7 油页岩.(2)油页岩各向异性影响岩石破裂模式,层理角度 60°时为剪切破坏,90°时为劈裂破坏,流二段油页岩的破裂受各向异性影响更明显.(3)长 7 油页岩的岩石强度高于流二段油页岩,但长 7 油页岩水化作用更强,水化后强度衰减程度高.研究成果可为页岩油钻井井壁稳定性研究及压裂方案设计提供技术支撑.

关键词 油页岩;岩石力学;各向异性;破坏模式

中图分类号 P631
文献标识码 A
doi:10.6038/pg2026JJ0303
CSTR:32085.14.pg2026JJ0303

Abstract Shale oil is an important component of China's national energy strategy. Research on onshore and offshore shale oil in China is advancing in parallel, and investigating the rock mechanical properties of oil shale is fundamental to achieving efficient shale oil exploration and development. In this study, Chang 7 oil shale from the Yanchang Formation in the Ordos Basin and the second member of the Liushagang Formation (Liu 2) oil shale from the Weixinan Sag were selected as research targets. A comprehensive investigation of their physical and mechanical properties was conducted from the perspectives of rock strength, anisotropy, microstructure, failure characteristics, and hydration behavior. The mechanical characteristics of the oil shales were clarified, and the similarities and differences between onshore and offshore oil shales were analyzed. The results show that: (1) Both oil shales exhibit pronounced anisotropy, and rock strength varies systematically with bedding angle. The Liu 2 oil shale has more developed bedding and stronger anisotropy than the Chang 7 oil shale. (2) Anisotropy significantly affects failure modes. Shear failure occurs at a bedding angle of 60°, whereas splitting failure dominates at 90°. The influence of anisotropy on failure is more evident for the Liu 2 oil shale. (3) The Chang 7 oil shale exhibits higher strength than the Liu 2 oil shale. However, Chang 7 oil shale is more susceptible to hydration, showing a greater degree of strength degradation after hydration. These findings provide technical support for wellbore stability studies and hydraulic fracturing design.

Keywords Oil shale; Rock mechanics; Anisotropy; Failure mode

收稿日期 2025-11-23; **修回日期** 2026-04-15. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 国家自然科学基金基础科学中心项目"超深特深层油气钻采流动调控"(52288101)、山东省泰山学者青年专家项目(tsqn202408102)和山东省高等学校"青创团队计划"(2022KJ072)联合资助.

第一作者简介 周广旭,男,博士研究生,从事石油工程岩石力学研究.E-mail:lawrence1222@163.com

***通讯作者** 闫传梁,男,教授,博士生导师,从事石油工程岩石力学研究.E-mail:yanchuanliang@163.com

0 引 言

随着世界经济的发展,全球能源的需求量不断增长,仅靠传统石油资源已经难以满足,非常规油气资源成为目前研究的重点与难点所在(贾承造,2024).其中,页岩油的勘探开发是当前能源领域的热点研究课题,实现安全、高效的页岩油勘探开发对于缓解油气供需矛盾、保障国家能源安全具有重要意义(李国欣等,2022).

全球页岩油资源丰富,主要集中在美国、中国、加拿大、俄罗斯和阿根廷等国家.美国通过推动页岩革命,大幅提高原油产量,已成为世界上最大的页岩油生产国,对世界能源格局产生了深刻影响(郭旭升等,2023;赵喆等,2024).近年来,我国已将页岩油的探勘开发作为能源战略的重要组成部分(张宇等,2024).我国页岩油资源分布广泛,新一轮评估中页岩油地质资源潜力为 397.46×10^8 t,勘探开发潜力巨大,是增储上产的重要接替资源(贾承造等,2024;汪海阁等,2024).目前,我国页岩油的勘探开发卓有成效,相关研究主要包括鄂尔多斯盆地延长组长 7 页岩油、准噶尔盆地吉木萨尔页岩油、松辽盆地古龙页岩油、渤海湾盆地济阳坳陷页岩油等(赵文智等,2020;郭秋麟等,2023).其中,鄂尔多斯盆地是中国最大的油气生产基地,三叠系延长组长 7 段页岩油气资源丰富,油气勘探潜力大(吴佳等,2025).此外,我国海上页岩油勘探也实现了重大突破,全球海上首口页岩油探井 WY-1 井压裂测试成功,北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组油页岩具备页岩油发育条件,初步估算涠西南凹陷页岩油资源量约 8.2×10^8 t,具有良好的勘探开发前景(徐长贵等,2023;范彩伟等,2025).因此,本文以鄂尔多斯盆地长 7 段油页岩以及涠西南凹陷流沙港组二段油页岩作为研究对象,展开油页岩岩石力学性质研究.

油页岩岩石力学性质是页岩油勘探开发研究的基础,是水平井技术、井壁稳定技术、压裂技术等关键技术的基础前提与技术保证(熊健等,2024).然而,油页岩层理发育程度高,各向异性强,与常规地层差别较大,原有的技术方案并不适用.此外,我国陆上页岩油与海上页岩油的研究并进,而陆上与海上油页岩岩石力学性质存在差异,再次制约了工程方案的制定,限制了页岩油的高效开发.因此,展开油页岩岩石力学特征研究具有十分重要的工程意义.但由于油页岩层理发育程度高,取心易破损,且海上钻井取心成本高,部分区块可供研究的油页岩岩心尤其是海上油页岩岩心数量稀少,进一步限制了油页岩岩石力学性质的研究.目前,此方面的研究甚少.因此,本文选取鄂尔多斯盆地延长组长 7 油页岩与涠西南凹陷流沙港组二段油页岩为研究对象,分析油页岩岩石力学特征,研究陆上与海上油页岩岩石力学性质的共性与差异,为陆上及海上页岩油的储层岩石力学评估、安全高效钻井以及压裂方案设计提供技术支持,为页岩油高效勘探开发提供理论依据.

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是目前国内最大的油气生产基地,地处于中国东部构造域与西部构造域接合部位(付金华等,2020).鄂尔多斯盆地晚三叠世形成了大型内陆坳陷湖盆,三叠系延长组是一套内陆河流-三角洲-湖泊相地层,自上而下依次划分为长 1 至长 10 共 10 个段(付金华等,2021).其中,长 7 段主要以半深湖—深湖亚相沉积为主,黑色页岩等优质烃源岩发育,是油气勘探开发的重点区域(梁锋和曹哲,2025).

北部湾盆地位于中国南海北部,是中国南海重要的油气产区.涠西南凹陷是盆地的一个次级构造单元,是一个在古生代基底上发育的以新生代沉积为主的断陷湖盆,包括有古新世长流组、始新世流沙港组、渐新世涠洲组等(姜洪丰等,2024).流沙港组沉积时期是湖盆发育的鼎盛时期,自下而上可进一步分为流三段、流二段和流一段.其中,流沙港组二段发育中深湖相油页岩,含油性及储集性良好,具有良好的页岩油勘探开发潜力(徐建永等,2024).

鄂尔多斯盆地长 7 段与涠西南凹陷流二段为页岩油勘探开发的典型区域,以此来研究陆上与海上油页岩岩石力学特征.

2 试 验

2.1 试验样品

试样样品为长 7 油页岩与流二段油页岩的真实井下岩心.由于油页岩各向异性强,取样时区分层理角度,选取层理角度为 0°、30°、45°、60°、90°的岩石试样,如图 1 所示.在单轴压缩实验、三轴压缩实验中,将岩样加工成直径 25 mm,高 50 mm 的圆柱体试件(如图 2 所示),在抗拉强度劈裂试验中,将岩样加工成直径 25 mm,厚度 15 mm 的圆柱体试件.

在开展油页岩水化作用研究时,采用了水基钻井液,由膨润土、KCl、Na_2CO_3、NaOH、羧甲基纤维

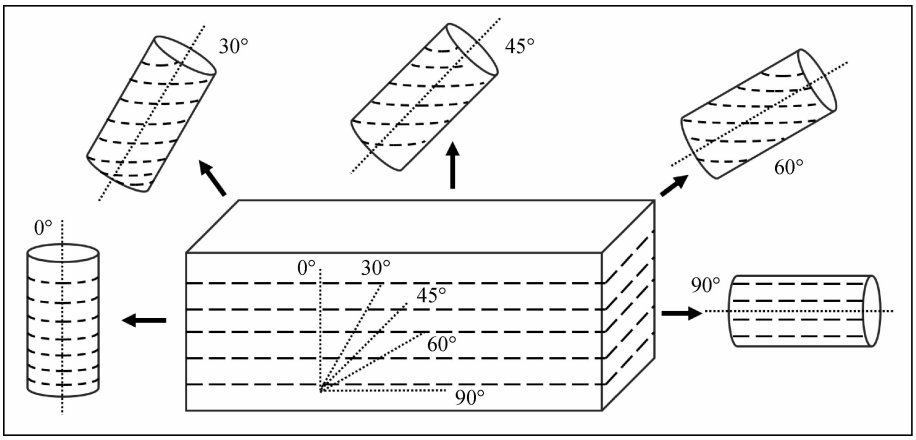


图 1 油页岩层理角度选取

Fig. 1 Selection of bedding angle for oil shale

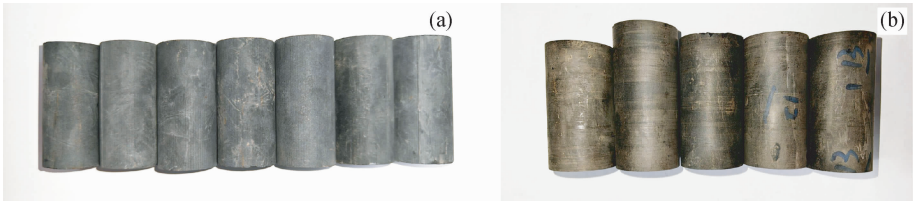


图 2 油页岩岩石试样

(a)长 7 油页岩;(b)流二段油页岩.

Fig. 2 Oil shale rock samples

(a) Chang 7 oil shale; (b) Liu 2 oil shale.

素、聚丙烯酰胺钾盐、低黏聚阴离子纤维素、聚胺抑制剂、纳米封堵剂、润滑剂配制而成.

2.2 试验方案

针对鄂尔多斯盆地延长组长 7 油页岩与涠西南凹陷流沙港组二段油页岩,展开全面的岩石物理性质研究,具体试验方案如下:

(1)岩石矿物组分. 基于 X 衍射仪,依据矿物组分测试标准 SY/T 5163-2018《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》,分析油页岩岩石矿物组分以及黏土矿物相对含量.

(2)层理微观结构. 利用扫描电镜分析岩石微观结构,观察并对比油页岩层理、孔隙发育程度.

(3)各向异性. 基于取样层理角度的变化,分析油页岩岩石强度各向异性,对比陆上与海上油页岩各向异性对岩石强度的影响.

(4)岩石强度特征. 基于 TAW-1000 岩石力学试验系统,展开油页岩岩石力学实验,获取岩石抗拉强度、单轴抗压强度、三轴抗压强度、弹性模量、内聚力、内摩擦角. 研究油页岩岩石强度特征,对比陆上与海上油页岩岩石强度差异. 其中,三轴压缩实验中围压设置为 10 MPa、20 MPa.

(5)水化作用. 使用钻井液浸泡岩心,测试不同浸泡时间后的岩石强度,对比钻井液对陆上与海上油页岩的影响,分析油页岩水化后岩石强度变化规律.

(6)破裂形态. 分析油页岩岩心在力学试验后的破坏形态,研究对比陆上与海上油页岩在不同层理角度下的破坏形态,分析破裂形态、各向异性与岩石强度的关联规律,分析破坏后裂缝发育情况及岩石破裂模式.

2.3 试验仪器

岩石力学试验采用深层油气全国重点实验室 TAW-1000 岩石力学试验系统,该系统由实验釜、伺服控制系统、轴压加压系统、围压加压系统、数据采集系统组成,如图 3 所示. 仪器围压加载量 200 MPa,轴向加载量 150 kN. 轴向加载采用位移控制,加载速率为 0.1 mm/min,轴向、径向变形由传感器进行测量.

3 结果与讨论

3.1 岩石矿物组分

岩石矿物组分是开展岩石特性研究的基础,黏土矿物可以用于岩石成岩演化研究(Zhao *et al.*, 2023),脆性矿物的含量可以辅助研究岩石强度、地层压裂(曹峰等,2026),易水化的矿物的含量可以用于开展力学-化学耦合研究,进一步开展井壁稳定性研究(Zhou *et al.*,2022). 表 1 展示了油页岩的岩石矿物组分,长 7 油页岩主要包括黏土矿物(35%~54.6%)和石英(25%~42.5%),其次为斜长石和钾长石. 黏土矿物中伊蒙混层含量高(36%~43%),此外含有高岭石、绿泥石以及伊利石. 流二段油页岩中含量最高的为黏土矿物(35.23%~57.26%),其次为石英(26.35%~31.99%). 黏土矿物中主要为伊利石(40%~45%)和伊蒙混层(30%~38%). 由此可见,长 7 油页岩与流二段油页岩中均为黏土矿物与石英占比最高. 石英含量高代表油页岩呈现出一定的硬脆性,大量的黏土矿物表明油页岩具有一定的水化作用. 长 7 油页岩的伊蒙混层含量高于流二段油页岩,且蒙脱石混层比更高,表明长 7 油页岩具有更强的水化作用,在钻井过程中,钻井液的侵入会导致水化膨胀作用,从而造成裂缝扩展,降低岩石强度,影响井壁稳定性. 因此,相较流二段油页岩,长 7 油页岩更需要关注钻井液的抑制性能.

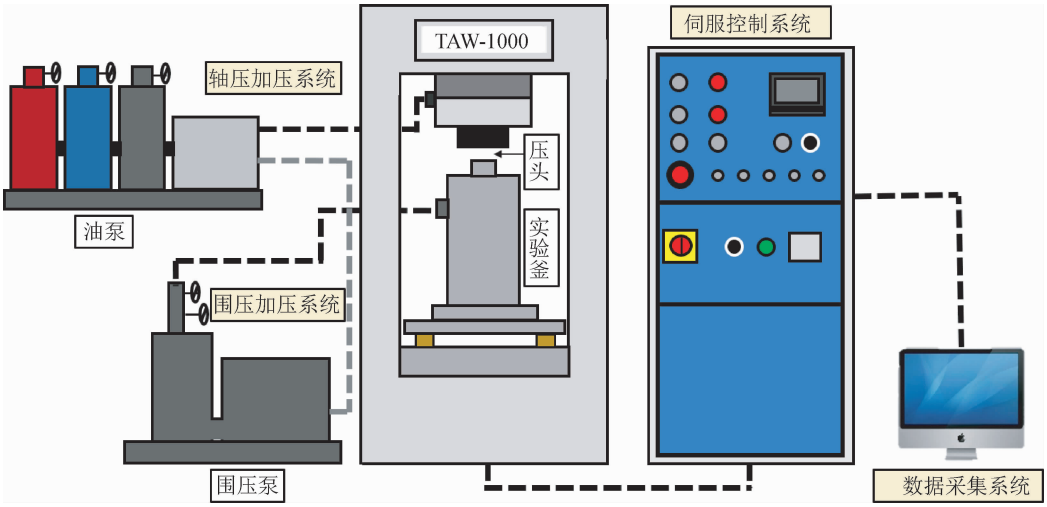


图 3 TAW-1000 岩石力学试验系统

Fig. 3 TAW-1000 Rock mechanics test system

表 1 岩石矿物组分

Table 1 Rock mineral components

页岩类别	序号	全岩矿物含量(%)										黏土矿物相对含量(%)				
		石英	钾长石	斜长石	方解石	铁白云石	菱铁矿	赤铁矿	黄铁矿	锐钛矿	黏土矿物	高岭石	绿泥石	伊利石	伊蒙混层	伊蒙混层比(S%)
长 7 油页岩	1	25.0	7.1	18.8	—	—	—	0.8	—	—	48.3	24.4	30.1	8.9	36.6	20
	2	26.7	7.2	11.5	—	—	—	—	—	—	54.6	20	25	12	43	15
	3	42.5	6.4	16.1	—	—	—	—	—	—	35.0	23	28	13	36	15
流二段油页岩	1	31.99	—	—	—	—	10.75	—	9.21	0.77	47.28	19	6	45	30	5
	2	26.35	—	—	25.04	1.76	2.36	—	8.61	0.65	35.23	13	4	45	38	5
	3	26.61	—	—	—	—	0.98	—	13.69	1.46	57.26	24	6	40	30	5

3.2 层理微观结构

油页岩是一种典型的沉积岩,矿物颗粒在沉积过程中具有择优选向,因此,油页岩具有明显的层理结构(孙清佩等,2019). 层理发育程度高,各向异性

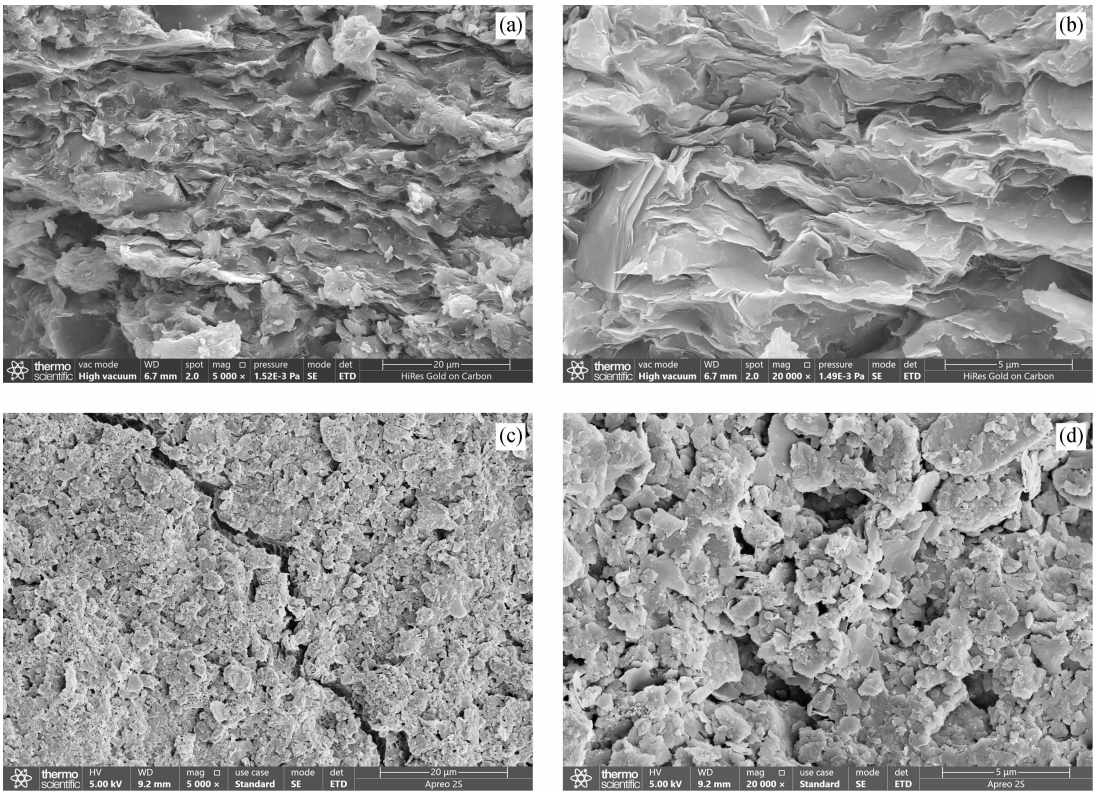


图 4 油页岩扫描电镜图

(a)(b)长 7 油页岩;(c)(d)流二段油页岩.

Fig. 4 SEM images of oil shales

(a) (b) Chang 7 oil shale; (c) (d) Liu 2 oil shale.

强,同时含有微裂缝、微孔隙,在油页岩勘探开发过程中,岩石受力及工作液的侵入会导致油页岩微裂缝扩展,形成通道后进一步加剧工作液的侵入,影响井壁稳定安全. 因此,分析油页岩层理微观结构是研究油页岩的重要步骤之一. 图 4 展示了长 7 油页岩及流二段油页岩的扫描电镜图,可以发现,长 7 油页岩及流二段油页岩均具有明显的层状沉积特征. 长 7 油页岩层理发育明显,呈现片状、鳞片状(图 4a),进一步放大后可见明显层间裂缝及层间孔隙(图 4b). 流二段油页岩同样孔隙、裂缝发育明显,且存在贯穿裂缝,极易形成强度弱面(图 4c),放大后可以看到,流二段油页岩中存在大量微纳米孔隙(图 4d),相对长 7 油页岩而言,流二段油页岩的层理裂缝分明,微孔隙发育程度更高,更容易出现裂缝扩展.

3.3 各向异性

油页岩力学性质受岩石本体和层理结构面的共同控制,具有显著的各向异性特征(Liu *et al.*,2017;王伟等,2025). 油页岩的各向异性特征是研究井壁稳定性以及分析水力压裂中裂缝产生与扩展的关键因素(叶春烽等,2024). 在实际工程应用中,若将页岩视为各向同性介质,将在分析中产生误差,影响工程方案制定(曹文科等,2021). 图 5 展示了不同层理角度下的岩石抗压强度. 从整体来看,长 7 油页岩的抗压强度显著高于流二段油页岩. 随着层理角度的变化,长 7 油页岩与流二段油页岩的岩石抗压强度均展现出较强的各向异性,其中,当层理角度为 60°时两种油页岩的岩石抗压强度均最低,对于流二段油页岩,层理角度为 0°时抗压强度最高,且随着层理角度的增加,抗压强度先减少后增加,呈现出近似于“U”型的变化规律. 而对于长 7 油页岩而言,层理角度为 90°时抗压强度最高,与 30°时强度相近,0°时抗压强度稍低,随着层理角度的增加,呈现出双拐点的折线状变化规律. 对于流二段油页岩而言,当层理角度为 0°时,强度加载方向与层理面垂直,加载过程中层理趋向逐渐压实的过程,岩石强度较大程度受岩石基质强度的影响,因此强度相对偏高. 当层理角度为 90°时,强度加载方向平行作用于层理

面,加剧了层理附近的裂缝、孔隙的发育(陈天宇等,2014),同时层理间的黏结作用在平行应力的作用下更容易产生破坏,进而导致沿层理面的劈裂破坏(He and Afolagboye,2018;王辉,2022).在应力加载方向与层理方向存在其他角度时,由于内部应力分布不均,存在应力集中现象(赵珠宇等,2025),而当层理角度为30°时,应力分力较大部分作用于压实层理结构上,而当层理角度为60°时,应力分力作用于分解层理间胶结结构,加剧原始裂缝扩展,因此,层理角度为60°时岩石强度更低.与流二段油页岩相比,长7油页岩的各向异性规律的不同之处在于,长7油页岩在层理角度为0°时岩石强度相对较低.分析认为,流二段油页岩中裂缝、孔隙主要分布在层理结构附近,垂直于层理面的应力趋向于将层理结构压实,而对于长7油页岩,在沿层理角度分布有层间页理缝外,在不同于层理方向的角度也分布有成岩缝与构造裂缝(王幸蒙等,2018;张轩昂等,2025),在垂直应力加载过程中,不同走向的裂缝扩展导致强度弱面,并与原有的层理弱面贯穿,从而产生由裂缝弱面延展而出的劈裂破坏(如图6所示).

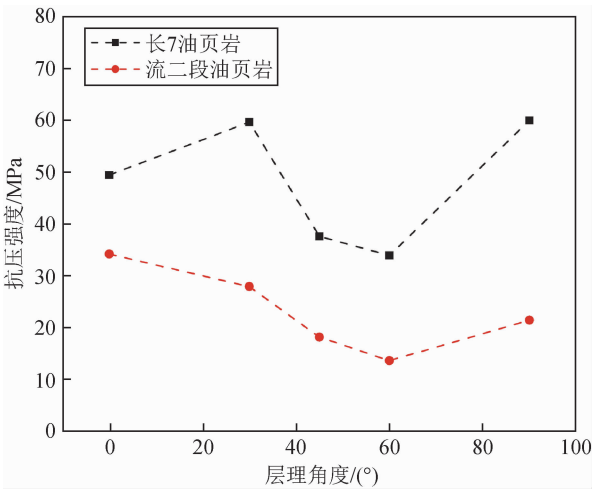


图5 油页岩强度各向异性分析

Fig. 5 Strength anisotropy of oil shale

各向异性度 R_c 可以用来表征岩石强度的各向异性,其计算公式为(Saroglou and Tsiambaos,2008):

$$R_c=\frac{\sigma_{ci(\perp)}}{\sigma_{ci(min)}}, \tag{1}$$

其中,$\sigma_{ci(\perp)}$ 为垂直层理的抗压强度,$\sigma_{ci(min)}$ 为不同层理角度试样在相同测试条件下的最低抗压强度.

考虑到在本研究中存在垂直层理角度的抗压强度并非最大的情况,将各向异性度公式修正为:

$$R'_c=\frac{\sigma_{ci(max)}}{\sigma_{ci(min)}}, \tag{2}$$

其中,$\sigma_{ci(max)}$ 为不同层理角度试样在相同测试条件下的最高抗压强度.

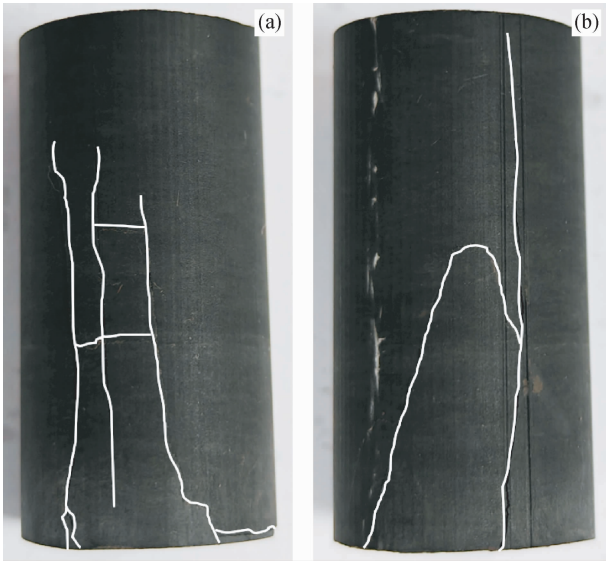


图6 0°长7油页岩单轴压缩实验后岩心破裂图

Fig. 6 Fracture morphology of 0° Chang 7 oil shale after uniaxial compression test

由此得到,流二段油页岩的各向异性度为2.49,长7油页岩的各向异性度为1.81,流二段油页岩的各向异性更明显.在钻井设计中,流二段油页岩更应避免钻井过程中沿层理弱面剥落、滑移等井壁失稳问题,合理设计井斜角与方位角,避免井周最大应力与层理弱面的重合.在压裂过程中,层理弱面会阻止裂缝继续向最大主应力方向发展,而是沿着层理面进行扩展,应在压裂设计中充分考虑(高梁等,2024).

3.4 强度特征

在不同的围压状态下,油页岩的层理及裂缝会被不同程度的压实,从而改变岩石力学强度特征.因此,应充分考虑围压的影响.图7展示了层理角度90°的油页岩在不同围压下岩石抗压强度及弹性模量.随着围压的升高,油页岩层理、裂缝以及片状矿物均受到压实作用影响,岩石紧密程度提高,长7油页岩与流二段油页岩的岩石强度均提高.从增长的百分比来看,流二段油页岩随着围压的提升岩石强度增幅更大,分析认为,流二段油页岩相对长7油页岩岩石强度更低,层理发育程度更高,在围压影响下

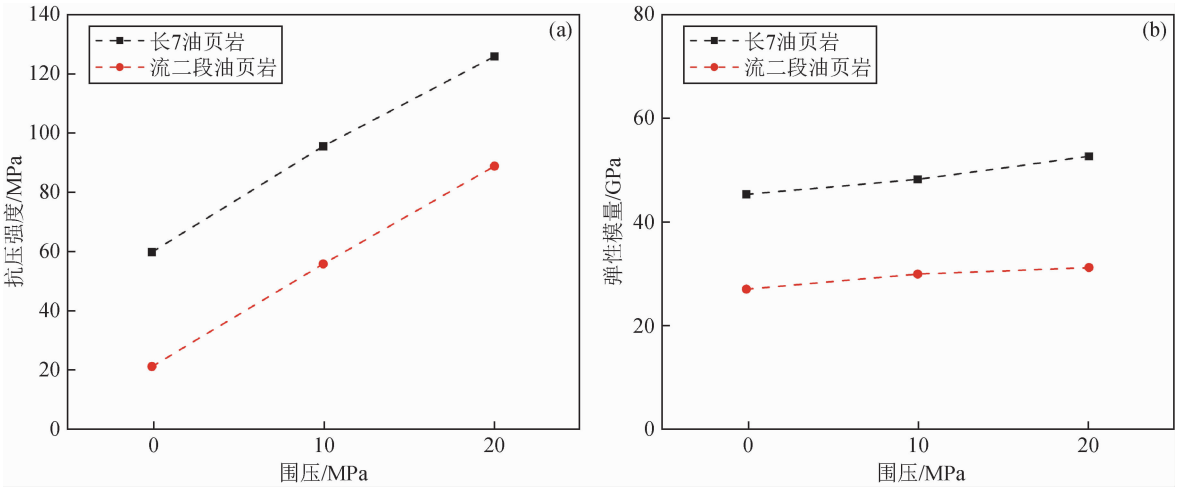


图 7 不同围压下岩石抗压强度及弹性模量

Fig. 7 Rock compressive strength and elastic modulus under different confining pressures

层理及裂缝的压实作用更明显,因此强度增幅更高. 弹性模量随着围压的增大而增大,与抗压强度呈现出相似的规律.

基于三轴压缩试验获取的油页岩岩石力学强度,利用 Mohr-Coulomb 准则获取油页岩的内摩擦角与内聚力. 内摩擦角和内聚力可以描述岩石的抗剪特性,有助于研究井壁稳定、水力压裂问题,同时内聚力可以应用于各类内聚力模型,进而实现计算机模拟. Mohr-Coulomb 破坏准则可用主应力表示为线性函数:

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \sigma_3 k \ , \tag{3}$$

其中,σ_1 为最大主应力;σ_3 为最小主应力;σ_0 为 σ_1 轴上的截距,为单轴抗压强度; k 为三轴应力因子,是 σ_1 对 σ_3 数据的线性最佳拟合的斜率:

$$k = \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \ . \tag{4}$$

由此得到内聚力 C 和内摩擦角 φ(周广旭等,2022):

$$C = \frac{\sigma_0}{2\sqrt{k}} \ , \tag{5}$$

$$\tan\varphi = \frac{k - 1}{2\sqrt{k}} \ . \tag{6}$$

流二段油页岩的内聚力为 5.91 MPa,内摩擦角为 32.82°,长 7 油页岩的内聚力为 16.75 MPa,内摩擦角为 32.26°,长 7 油页岩相对流二段油页岩具有更强的抗剪能力,流二段油页岩更易出现井壁失稳的问题.

在岩石强度特征分析中,由于油页岩的抗拉强度远低于抗压强度,多数情况下井壁失稳、裂缝起裂、裂缝扩展均基于拉应力开始(沈仲辉等,2023),抗拉强度的分析同样重要. 对长 7 油页岩及流二段油页岩开展劈裂实验,并通过式(7)计算岩石抗拉强度:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi d l} \ , \tag{7}$$

式中,d 为试件直径,单位为 mm,l 为试件厚度,单位为 mm,P 为破坏载荷,即荷载峰值,单位为 N.

结果如图 8 所示,长 7 油页岩抗拉强度高于流二段油页岩. 油页岩在破坏时,存在沿基质破坏与沿纹理破坏的不同情况,其中,流二段油页岩层理发育程度更高,岩石劈裂试验中试样沿层理破坏,抗拉强度主要体现在破坏层理间的胶结强度,抗拉强度低. 而长 7 油页岩破坏时纹理与基质共同破坏,抗拉强度相对更高. 但从整体情况来看,长 7 油页岩及流二段油页岩的抗拉强度均较低,岩石破裂压力低,在钻进过程中应及时调整钻井液密度,注意井壁稳定性问题.

3.5 水化作用

油页岩层理、裂缝发育,在钻井过程中,钻井液会随着裂缝侵入,与黏土矿物发生水化作用,黏土膨胀,进而产生次生裂缝,加剧钻井液的侵入,并对岩石强度造成影响. 页岩水化是重要的研究部分,在以往的研究中学者们针对泥页岩、页岩气井的致密页岩展开了众多的研究,但针对油页岩水化研究较少. 图 9 则展示了层理角度 90°的油页岩经水基钻井液浸泡后的岩石强度. 随着浸泡天数的增加,岩石强度

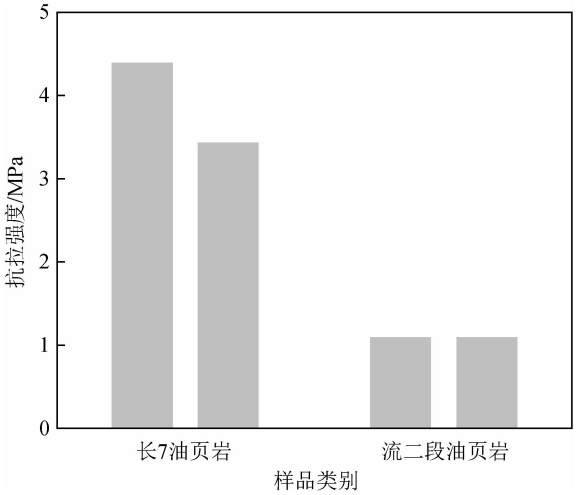


图 8 油页岩抗拉强度

Fig. 8 Tensile strength of oil shale

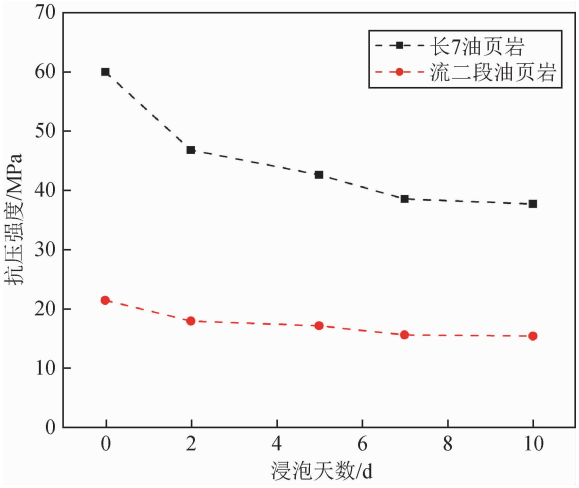


图 9 钻井液浸泡后抗压强度变化

Fig. 9 Compressive strength after drilling fluid immersion

不断降低. 在浸泡起始 2 天时岩石强度下降幅度较大,后续趋于稳定. 采用式(8)水化损伤系数 D_h 描述岩石强度的降低程度,结果如图 10 所示. 在钻井液浸泡油页岩后,长 7 油页岩岩石强度下降程度大于流二段油页岩,与矿物组分分析的结果一致. 长 7 油页岩与流二段油页岩的黏土矿物含量相近,但是长 7 油页岩的伊蒙混层占比高于流二段油页岩,且伊蒙混层中蒙脱石占比也更高,钻井液侵入后更易与黏土矿物发生水化膨胀,导致产生次生裂缝,降低岩石强度. 因此,页岩油钻井过程中,应调制钻井液配方,提高钻井液的抑制性,同时合理计算钻井安全周期,确保钻井液水化作用下的井壁稳定性问题. 式(8)为:

$$D_h = \frac{\sigma_w}{\sigma_d}, \tag{8}$$

其中,σ_w 为水化后的岩石强度,σ_d 为干燥时的岩石强度.

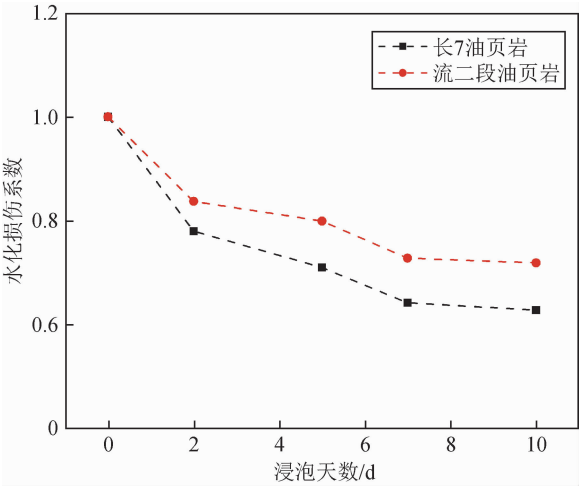


图 10 钻井液浸泡后水化损伤系数

Fig. 10 Hydration damage coefficient after drilling fluid immersion

3.6 破裂形态

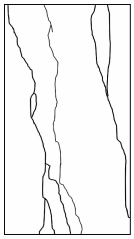
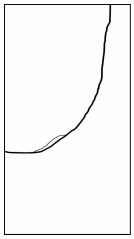
岩石的破裂形态与岩性、受力、层理结构等多种因素有关,不同的受力状态及层理角度均会导致不同的破裂形态. 表 2 展示了层理角度 60°及 90°的长 7 油页岩及流二段油页岩在单轴力学实验后的破裂形态,油页岩层理发育明显,岩石破碎时主要沿层理弱面破裂. 在层理角度 60°时,对于长 7 油页岩,载荷施加导致试样沿层理面滑移,同时应力集中导致裂纹扩展,呈现多裂纹下的剪切破坏. 而流二段油页岩沿层理方向存在更为明显的层理弱面,在载荷施加后试样沿弱面呈现单一剪切破坏. 在层理角度 90°时,载荷方向平行于层理方向,层理附近的原生裂纹、孔隙呈现扩展、延伸、贯通,产生次生裂缝,而当应力突破层理间的胶结力时,试样则会呈现出沿层理方向的多条平行破裂面,且其间的裂缝扩展、贯通,形成多层理面的劈裂破坏. 由此可见,对于油页岩而言,层理弱面是影响其强度及破裂的重要因素,层理角度的不同将产生不同的破裂形态及破裂模式,这对于流二段油页岩的影响更为明显.

4 结 论

(1)流二段油页岩与长 7 油页岩均具有较强的

表 2 试验后岩心破裂图

Table 2 Fracture morphology of oil shale after test

	长 7 油页岩 60°	长 7 油页岩 90°	流二段油页岩 60°	流二段油页岩 90°
试验后岩心				
破裂裂缝图				

各向异性,层理角度 60°时油页岩抗压强度最低. 流二段油页岩层理角度 0°时抗压强度最高,而长 7 油页岩为层理角度 90°. 油页岩各向异性影响岩石破裂模式,层理角度 60°时为沿层理面的剪切破坏,层理角度 90°时为平行层理面的多面劈裂破坏. 流二段油页岩层理发育程度更高,各向异性强于长 7 油页岩,破裂受各向异性影响更明显.

(2)油页岩层理发育程度高,同时含有微裂缝、微孔隙. 相对长 7 油页岩,流二段油页岩的层理裂缝分明,微孔隙发育程度更高,更容易出现裂缝扩展. 流二段油页岩受强度弱面影响大,岩石强度低于长 7 油页岩.

(3)油页岩中含有大量的黏土矿物与石英,长 7 油页岩的伊蒙混层含量高于流二段油页岩,且蒙脱石混层比更高,具有更强的水化作用. 在水基钻井液浸泡油页岩后,长 7 油页岩岩石强度的下降程度大于流二段油页岩.

(4)流二段油页岩层理发育更高,而长 7 油页岩的水化作用更强,因此,在工程设计中,流二段油页岩应更加注重各向异性的影响,避免井周最大应力与层理弱面的重合,防止钻井过程中沿层理弱面产生井壁失稳问题,并充分考虑压裂过程中层理弱面对裂缝扩展的影响. 而长 7 油页岩更需要关注钻井液的性能,调制钻井液配方,提高钻井液的抑制性,合理计算钻井安全周期,确保钻井液水化作用下的井壁稳定性.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Cao F, He J H, Cao H X, *et al*. 2026. Multi-scale rock mechanical parameters and quantitative assessment of brittleness in alkaline lacustrine shale reservoirs. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition) (in Chinese), 53(2): 301-318.

Cao W K, Xing X S, Zhou C S. 2021. Borehole wall stability analysis of horizontal well in shale formation based on jointed plastic model. Journal of Safety Science and Technology (in Chinese), 17(10): 152-157, doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2021.10.023.

Chen T Y, Feng X T, Zhang X W, *et al*. 2014. Experimental study on mechanical and anisotropic properties of black shale. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 33(9): 1772-1779, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.006.

Fan C W, Chen M, Gao Y D. 2025. Characterization and dual-sweet spots evaluation of offshore lacustrine shale oil reservoir: A case study from the second Member of Liushagang Formation in the Weixinan sag, Beibuwan basin. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 99(3): 897-913.

Fu J H, Li S X, Niu X B, *et al*. 2020. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development (in Chinese), 47(5): 870-883.

Fu J H, Guo W, Li S X, *et al*. 2021. Characteristics and exploration potential of muti-type shale oil in the 7th Member of Yanchang Formation, Ordos Basin. Natural Gas Geoscience (in Chinese), 32(12): 1749-1761, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2021.07.016.

Gao L. 2024. Study on anisotropic mechanical properties of reservoir shale and its influence on fracture propagation mechanism [Master's

thesis](in Chinese). Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, doi: 10.27144/d.cnki.ghbsc.2024.000825.

Guo Q L, Mi S Y, Zhang Q, *et al*. 2023. Assessment methods and potential of shale oil resources in China. Petroleum Geology & Experiment (in Chinese), 45(3): 402-412.

Guo X S, Li M W, Zhao M Y. 2023. Shale oil development and utilization and its role in energy industry. Bulletin of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 38(1): 38-47.

He J M, Afolagboye L O. 2018. Influence of layer orientation and interlayer bonding force on the mechanical behavior of shale under Brazilian test conditions. Acta Mechanica Sinica, 34(2): 349-358, doi: 10.1007/s10409-017-0666-7.

Jia C Z. 2024. Prospects and five future theoretical and technical challenges of the upstream petroleum industry in China. Acta Petrolei Sinica (in Chinese), 45(1): 1-14.

Jia C Z, Wang Z G, Jiang L, *et al*. 2024. Progress and key scientific and technological problems of shale oil exploration and development in China. World Petroleum Industry (in Chinese), 31(4): 1-11.

Jiang H F, Liu B, Gao Y D, *et al*. 2024. Geological characteristics and evaluation of fracturability of Weixinan Liushagang Formation shale reservoirs. Science Technology and Engineering (in Chinese), 24(15): 6241-6253, doi: 10.12404/j.issn.1671-1815.2304624.

Li G X, Lei Z D, Dong W H, *et al*. 2022. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC. China Petroleum Exploration (in Chinese), 27(1): 1-11.

Liang F, Cao Z. 2025. Characteristics, formation environment and enrichment model of Triassic Chang 7 shale oil reservoir in Huachi area, Ordos Basin. Lithologic Reservoirs (in Chinese), 37(1): 24-40.

Liu X W, Guo Z Q, Liu C, *et al*. 2017. Anisotropy rock physics model for the Longmaxi shale gas reservoir, Sichuan Basin, China. Applied Geophysics, 14(1): 21-30, doi: 10.1007/s11770-017-0609-x.

Saroglou H, Tsiambaos G. 2008. A modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(2): 223-234, doi: 10.1016/j.ijrmms.2007.05.004.

Shen Z H, Zhou L J, Li X J, *et al*. 2023. Hydraulic fracturing characteristics of laminated shale and its enlightenment to fracture pressure. Coal Science and Technology (in Chinese), 51(11): 119-128.

Sun Q P, Zhang Z Z, Li P C, *et al*. 2019. Study on the bedding effect and damage constitutive model of black shale under dynamic loading. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese), 38(7): 1319-1331, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1333.

Wang H. 2022. Study on damage evolution theory and fracture mechanism of layered shale considering transversely isotropic characteristics [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chongqing: Chongqing University, doi: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.000948.

Wang H G, Chang L, Zhuo L B, *et al*. 2024. Current status and suggestions for drilling technology of CNPC continental shale oil reservoirs. Xinjiang Oil & Gas (in Chinese), 20(3): 1-14, doi: 10.12388/j.issn.1673-2677.2024.03.001.

Wang W, Wang Z L, Chen S H, *et al*. 2025. Experimental study on anisotropic characteristics of shale oil matrix of Fengcheng formation in Junggar Basin. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(5): 2105-2113, doi: 10.6038/pg2025II0329.

Wang X M, Jiang Z X, Wang S C, *et al*. 2018. Characteristics of natural fractures in shale and their control effect on shale gas accumulation and development. Science Technology and Engineering (in Chinese), 18(8): 34-42.

Wu J, Zhao W W, Liu Y C, *et al*. 2025. Shale rock-reservoir collocation and hydrocarbon enrichment rule of Triassic Chang 7 member in Yan'an area, Ordos Basin. Lithologic Reservoirs (in Chinese), 37(1): 170-181.

Xiong J, Wu J J, Liu X J, *et al*. 2024. Study on rock mechanical properties of different lithologies in marine continental transitional formation: a case study of the Shanxi Formation in the eastern margin of Ordos Basin. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(2): 759-769, doi: 10.6038/pg2024HH0165.

Xu C G, Lai W C, Zhang X T, *et al*. 2023. New progress and future exploration thinking of CNOOC oil and gas exploration. China Offshore Oil and Gas (in Chinese), 35(2): 1-12, doi: 10.11935/j.issn.1673-1506.2023.02.001.

Xu J Y, Zheng R H, Li H Y, *et al*. 2024. Differences of formation environment and hydrocarbon generation characteristics between oil shale and mudstone in the second Member of Liushagang Formation in Weixinan sag. China Offshore Oil and Gas (in Chinese), 36(3): 25-36, doi: 10.11935/j.issn.1673-1506.2024.03.003.

Ye C F, Xie H P, Li C B. 2024. Anisotropic failure characteristics and strength prediction model of shale under direct shear. Advanced Engineering Sciences (in Chinese), 56(2): 257-267, doi: 10.15961/j.jsuese.202201072.

Zhang X A, Yan J P, Wu H, *et al*. 2025. Types, characteristics and well-log identification methods of deep shale fractures: taking Wufeng-Longmaxi Formation in Luzhou area, southern Sichuan Basin as an example. Fault-Block Oil & Gas Field (in Chinese), 32(6): 887-897, doi: 10.6056/dkyqt202506002.

Zhang Y, Zhao P R, Liu S L, *et al*. 2024. Main exploration progress and development strategy of Sinopec during the 14th Five-Year Plan period. China Petroleum Exploration (in Chinese), 29(1): 14-31.

Zhao T X, Xu S, Hao F. 2023. Differential adsorption of clay minerals: Implications for organic matter enrichment. Earth-Science Reviews, 246: 104598, doi: 10.1016/j.earscirev.2023.104598.

Zhao W Z, Hu S Y, Hou L H, *et al*. 2020. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil. Petroleum Exploration and Development (in Chinese), 47(1): 1-10.

Zhao Z, Bai B, Liu C, *et al*. 2024. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs. Oil & Gas Geology (in Chinese), 45(2): 327-340.

Zhao Z Y, Yan C L, Xue J C, *et al*. 2025. Study on the rock mechanical properties and anisotropy of Paleocene Huxiang reservoirs: a case study of the Shahejie Formation in the southeastern Bohai Bay Basin. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(2): 806-816, doi: 10.6038/pg2025II0025.

Zhou G X, Ye Y, Zhu J Z, *et al*. 2022. Application of digital core technology in wellbore stability research. Petrophysics, 63(2): 256-269, doi: 10.30632/PJV63N2-2022a7.

Zhou G X. 2022. Study on wellbore instability mechanism in southwest Tarim and technical countermeasures [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Petroleum (Beijing), doi: 10.27643/d.cnki.gsybu.2022.002257.

附中文参考文献

曹峰, 何建华, 曹红秀, 等. 2026. 碱湖相页岩储层多尺度岩石力学参数及脆性定量评价. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(2): 301-318.

曹文科, 幸雪松, 周长所. 2021. 基于节理塑性模型的页岩地层水平井井壁稳定性分析. 中国安全生产科学技术, 17(10): 152-157, doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2021.10.023.

陈天宇, 冯夏庭, 张希巍, 等. 2014. 黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究. 岩石力学与工程学报, 33(9): 1772-1779, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.09.006.

范彩伟, 陈鸣, 高永德. 2025. 海上断陷湖盆页岩油储集特征及"双甜点"评价——以北部湾盆地涠西南凹陷流沙港组二段为例. 地质学报, 99(3): 897-913.

付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 2020. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页

岩油地质特征与勘探实践. 石油勘探与开发, 47(5): 870-883.

付金华, 郭雯, 李士祥, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地长 7 段多类型页岩油特征及勘探潜力. 天然气地球科学, 32(12): 1749-1761, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2021.07.016.

高梁. 2024. 储层页岩各向异性力学性质及其对压裂裂缝扩展机制的影响研究[硕士论文]. 郑州: 华北水利水电大学, doi: 10.27144/d.cnki.ghbsc.2024.000825.

郭秋麟, 米石云, 张倩, 等. 2023. 中国页岩油资源评价方法与资源潜力探讨. 石油实验地质, 45(3): 402-412.

郭旭升, 黎茂稳, 赵梦云. 2023. 页岩油开发利用及在能源中的作用. 中国科学院院刊, 38(1): 38-47.

贾承造. 2024. 中国石油工业上游前景与未来理论技术五大挑战. 石油学报, 45(1): 1-14.

贾承造, 王祖纲, 姜林, 等. 2024. 中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题. 世界石油工业, 31(4): 1-11.

姜洪丰, 柳兵, 高永德, 等. 2024. 涠西南流沙港组页岩储层地质特征及可压性评价. 科学技术与工程, 24(15): 6241-6253, doi: 10.12404/j.issn.1671-1815.2304624.

李国欣, 雷征东, 董伟宏, 等. 2022. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望. 中国石油勘探, 27(1): 1-11.

梁锋, 曹哲. 2025. 鄂尔多斯盆地华池地区三叠系长 7 页岩油储层特征、形成环境及富集模式. 岩性油气藏, 37(1): 24-40.

沈仲辉, 周令剑, 李希建, 等. 2023. 含层理页岩水压致裂特性及对破裂压力的启示. 煤炭科学技术, 51(11): 119-128.

孙清佩, 张志镇, 李培超, 等. 2019. 黑色页岩动载破坏的层理效应及损伤本构模型研究. 岩石力学与工程学报, 38(7): 1319-1331, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1333.

王辉. 2022. 考虑横观各向同性特征的层状页岩的损伤演化理论及其断裂机理研究[博士论文]. 重庆: 重庆大学, doi: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.000948.

汪海阁, 常龙, 卓鲁斌, 等. 2024. 中国石油陆相页岩油钻井技术现状与发展建议. 新疆石油天然气, 20(3): 1-14, doi: 10.12388/j.issn.1673-2677.2024.03.001.

王伟, 王振林, 陈山河, 等. 2025. 准噶尔盆地风城组页岩基质的声速各向异性实验研究. 地球物理学进展, 40(5): 2105-2113, doi: 10.6038/pg2025II0329.

王幸蒙, 姜振学, 王世骋, 等. 2018. 泥页岩天然裂缝特征及其对页岩气成藏、开发的控制作用. 科学技术与工程, 18(8): 34-42.

吴佳, 赵卫卫, 刘钰晨, 等. 2025. 鄂尔多斯盆地延安地区三叠系长 7 页岩源储配置及油气富集规律. 岩性油气藏, 37(1): 170-181.

熊健, 吴建军, 刘向君, 等. 2024. 海陆过渡相地层不同岩性岩石力学特性研究——以鄂尔多斯盆地东缘山西组为例. 地球物理学进展, 39(2): 759-769, doi: 10.6038/pg2024HH0165.

徐长贵, 赖维成, 张新涛, 等. 2023. 中国海油油气勘探新进展与未来勘探思考. 中国海上油气, 35(2): 1-12, doi: 10.11935/j.issn.1673-1506.2023.02.001.

徐建永, 郑瑞辉, 李宏义, 等. 2024. 涠西南凹陷流二段油页岩与泥岩形成环境及生烃特征差异性. 中国海上油气, 36(3): 25-36, doi: 10.11935/j.issn.1673-1506.2024.03.003.

叶春烽, 谢和平, 李存宝. 2024. 直接剪切下页岩的各向异性破坏特征和强度预测模型. 工程科学与技术, 56(2): 257-267, doi: 10.15961/j.jsuese.202201072.

张轩昂, 闫建平, 吴寒, 等. 2025. 深层页岩裂缝的类型、特征及测井判识方法——以川南泸州地区五峰组—龙马溪组为例. 断块油气田, 32(6): 887-897, doi: 10.6056/dkyqt202506002.

张宇, 赵培荣, 刘士林, 等. 2024. 中国石化“十四五”主要勘探进展与发展战略. 中国石油勘探, 29(1): 14-31.

赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 2020. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界. 石油勘探与开发, 47(1): 1-10.

赵喆, 白斌, 刘畅, 等. 2024. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考. 石油与天然气地质, 45(2): 327-340.

赵珠宇, 闫传梁, 薛锦春, 等. 2025. 古近系湖相储层岩石力学特性及各向异性研究——以渤海湾盆地东南部沙河街组为例. 地球物理学进展, 40(2): 806-816, doi: 10.6038/pg2025II0025.

周广旭. 2022. 塔西南地区井壁失稳机理及技术对策研究[硕士论文]. 北京: 中国石油大学(北京), doi: 10.27643/d.cnki.gsybu.2022.002257.