

引用本文:徐珂,鞠玮,张辉,等.塔里木盆地库车坳陷白垩系巴什基奇克组致密砂岩力学性质影响因素及其变化规律[J].石油实验地质, 2024, 46(4): 823-832. DOI: 10.11781/sysydz202404823.

XU Ke, JU Wei, ZHANG Hui, et al. Factors affecting the mechanical properties of tight sandstone and their patterns of variation in Cretaceous Bashijiqike Formation of Kuqa Depression in Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(4): 823-832. DOI: 10.11781/sysydz202404823.

塔里木盆地库车坳陷白垩系巴什基奇克组 致密砂岩力学性质影响因素及其变化规律

徐珂^{1,2,3}, 鞠玮^{4,5}, 张辉^{1,2,3}, 梁艳⁴, 尹国庆^{1,2,3},
王志民^{1,2,3}, 徐浩然^{4,6}, 张玮^{1,2,3}, 梁景瑞^{1,2,3}

1. 中国石油天然气股份有限公司 塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000;
2. 中国石油天然气集团有限公司 超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆 库尔勒 841000;
3. 新疆维吾尔自治区 超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆 库尔勒 841000;
4. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;
5. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008;
6. 山东省煤田地质局 第二勘探队, 山东 济宁 272100

摘要:为查明塔里木盆地库车坳陷白垩系巴什基奇克组致密砂岩力学特性,结合深层—超深层油气勘探开发的现场问题,采用三轴压缩实验定量研究了围压、流体和加载速率影响岩石力学性质变化的规律,并初步分析其原因。研究表明,砂岩试样最大主应力差、弹性模量均随着围压的增大而显著增大,其微观原因在于围压增大使岩石内部质点彼此之间距离缩短,增强了岩石的内聚力,颗粒之间不易离散;砂岩试样经历低围压脆性→脆—韧性转换→高围压韧性变形破裂演化的过程。与干燥砂岩试样相比,纯净水浸泡样、150 g/L 溶液浸泡样、250 g/L 溶液浸泡样和 350 g/L 溶液浸泡样弹性模量降低幅度分别为 67.71%、61.45%、64.69% 和 57.32%,纯净水浸泡造成的降低幅度最大,流体矿化度的升高能够减弱岩石力学参数弱化的趋势;晶体表面结晶和双电层厚度变化是上述变化规律的重要控制因素。在较低的加载速率条件时,砂岩试样的最大主应力差、弹性模量和泊松比的值都较小,但随着加载速率的增大增速较快;当加载速率达到一定关键数值之后(本次实验为 0.05 mm/min 左右),岩石力学参数值增速变缓。

关键词:岩石力学性质;加载速率;流体类型;巴什基奇克组;白垩系;库车坳陷;塔里木盆地

中图分类号:P554

文献标识码:A

DOI: 10.11781/sysydz202404823

Factors affecting the mechanical properties of tight sandstone and their patterns of variation in Cretaceous Bashijiqike Formation of Kuqa Depression in Tarim Basin

XU Ke^{1,2,3}, JU Wei^{4,5}, ZHANG Hui^{1,2,3}, LIANG Yan⁴, YIN Guoqing^{1,2,3},
WANG Zhimin^{1,2,3}, XU Haoran^{4,6}, ZHANG Wei^{1,2,3}, LIANG Jingrui^{1,2,3}

1. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China;
2. Research and Development Center for Ultra-Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Korla, Xinjiang 841000, China;
3. Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla, Xinjiang 841000, China;
4. School of Researches and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;
5. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process (Ministry of Education), China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;
6. The Second Exploration Team of Shandong Provincial Bureau of Coal Geology, Jining, Shandong 272100, China

收稿日期 (Received): 2023-08-26; 修订日期 (Revised): 2024-04-10; 出版日期 (Published): 2024-07-28.

作者简介:徐珂(1991—),男,博士,高级工程师,主要从事油气田地质学学科研究和生产工作。E-mail: xukee0505@163.com.

通信作者:鞠玮(1988—),男,博士,副教授,本刊青年编委,主要从事非常规油气储层地质力学教学与研究工作。E-mail: wju@cumt.edu.cn.

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“库车坳陷深层—超深层天然气田开发关键技术研究与应用”(2018E-1803)和江苏省基础研究计划(自然科学基金)面上项目“超深层致密砂岩孔隙结构温敏性及力学特性响应机理”(BK20201349)联合资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: To clarify the mechanical characteristics of tight sandstone in the Cretaceous Bashijiqike Formation of Kuqa Depression in Tarim Basin, and address field issues in deep and ultra-deep oil and gas exploration and development, triaxial compression experiments were used to quantitatively study the patterns of changes in rock mechanical properties influenced by confining pressure, fluid, and loading rate, with a preliminary analysis of their causes. The results showed that the maximum principal stress difference and elastic modulus of the sandstone samples increased significantly with confining pressure. The micro-reason was that the increase in confining pressure reduced the distance between particles inside the rock, enhancing the rock's cohesion and making particle dispersion less likely. Sandstone samples exhibited a progression from brittleness under low confining pressure to brittle-ductile transformation, and to ductile deformation under high confining pressure. Compared with dry sandstone samples, the reduction in the elastic modulus of samples soaked in pure water, 150 g/L solution, 250 g/L solution, and 350 g/L solution were 67.71%, 61.45%, 64.69%, and 57.32%, respectively, with pure water soaking causing the greatest reduction. Increasing fluid salinity could mitigate the weakening trend in rock mechanical parameters. Crystallization on crystal surfaces and changes in the electric double layer thickness were important controlling factors for these patterns. At lower loading rates, the values for maximum principal stress difference, elastic modulus, and Poisson's ratio of the sandstone samples were smaller, but they increased faster with increasing loading rates. When the loading rate reached a certain critical value (around 0.05 mm/min in this experiment), the rate of increase in rock mechanical parameters slowed down.

Key words: mechanical properties of rock; loading rate; fluid type; Bashijiqike Formation; Cretaceous; Kuqa Depression; Tarim Basin

塔里木盆地油气资源丰富,近几年勘探开发不断取得突破^[1-7]。塔里木盆地天然气主要富集在盆地周缘拗陷和台盆区古生界碳酸盐岩内,其中库车拗陷天然气三级储量超过万亿立方米,是我国“西气东输”工程的主力气源地^[8]。前期实践表明,库车拗陷克拉苏构造带博孜一大北段白垩系巴什基奇克组沉积厚度较大,油气资源富集,具有较好的勘探与开发前景^[1,11-12]。但巴什基奇克组储层致密、埋深差异大、非均质性强,导致岩石力学场情况复杂,影响储层地质力学评价改造与油气效益开发。

致密储层油气井的自然产能极低,往往需要借助压裂增产措施、水平井等才能实现工业化产能。现今地应力场、岩石力学性质是影响压裂改造效果的关键地质因素。弹性模量、泊松比等岩石力学性质是储层可压裂性评价、地应力预测、压裂优化设计、裂缝预测与成因机制分析以及井壁稳定性分析的重要参数,在钻井、油气开发领域具有重要意义^[13-17]。

砂岩的矿物成分、粒度、结构以及构造等内部因素影响岩石力学性质。郭培峰等^[18]研究发现,鄂尔多斯盆地长8储层砂岩弹性模量随着粒度的增大而增大,泊松比则减小。砂岩弹性模量一般与泥质含量成负相关,与石英、长石的含量成正相关^[19]。李智武等^[20]分析川东北地区致密砂岩岩石力学性质的影响因素,认为岩石组成和结构是决定

性内在因素,弹性模量随石英等碎屑含量的增加、泥质含量的降低而增加,当岩石内发育薄弱面(如先存裂缝、层理等)时,岩石弹性模量和抗压强度明显降低。周文等^[16]研究新场气田沙二段地层岩石力学性质影响因素,发现在常温常压下,砂岩弹性模量随密度增大而增大、随孔隙度增加而减小。

围压、溶液、应力作用方式和时间等是影响砂岩岩石力学性质的重要外部环境因素。徐珂^[21]研究南堡凹陷砂岩岩石力学性质变化规律,发现埋深、流体、温度、压力等外部环境因素对弹性模量、泊松比、抗压强度等岩石力学参数均呈现不同程度的影响。李庆辉等^[22]分析超深层砂岩力学性质影响因素及其变化规律,结果显示,砂岩力学参数随着围压升高而得到强化,岩石强度随温度增加而降低,围压、温度、物性和胶结程度等是影响超深层砂岩力学特性的关键因素。ZHANG等^[23]研究温度对于砂岩力学性质的影响,在25~400℃时,弹性模量降低迅速,降幅为83.3%,而超过400℃之后,降幅减慢;泊松比在500℃以内缓慢增长,其后断崖式降低。ERGULER等^[24]研究含水量对于岩石力学性质的影响,相较于干燥条件,充分饱和和试样的单轴抗压强度、弹性模量和抗张强度分别降低90%、93%和90%。王云飞等^[25]分析了加载速率和饱水对砂岩力学行为的影响,随着加载速率的增大,在0.001~0.01 mm/s加载速率区间内,砂岩的

单轴抗压强度增速较大,弹性模量线性增大;在加载速率0.01~0.1 mm/s时,单轴抗压强度增速变缓,弹性模量整体呈线性减小。

针对库车坳陷巴什基奇克组砂岩,侯连浪等^[26]开展其在地层围压条件下的三轴岩石力学实验,结果显示,泊松比主要在0.35以下,弹性模量集中分布在40~50 GPa范围内,但该研究并未进一步揭示多种地质因素影响砂岩力学性质的变化规律。为此,本次研究针对巴什基奇克组砂岩,通过开展系统的岩石力学实验与分析,从力学参数、破裂方式等方面查明围压、流体、加载速率等多种因素影响岩石力学性质变化规律,以期为库车坳陷致密砂岩油气藏评价提供支撑,助力效益开发。

1 地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北缘南天山构造带和塔北隆起之间,面积约 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,是一个中、新生代坳陷,具有“南北分带、东西分段、上下分层”的构造特征,可进一步划分为北部单斜构造带、克拉苏构造带、拜城凹陷、阳霞凹陷、秋里塔格构造带、南部斜坡带等几个次级构造单元^[27-29]。在印度—欧亚板块碰撞远程效应作用下,南天山发生挤压收缩变形和强烈隆升,受其影响,库车坳陷

强烈挤压变形,发育一系列逆冲断层和褶皱构造(图1)。

克拉苏构造带平面上总体呈NE—SW走向展布,东、西段存在明显差异;纵向上,主要受一系列逆冲断层控制,主断层克拉苏断裂为一条上陡下缓的犁式断层,其最大垂直断距超过3 000 m。由山前向拜城凹陷方向,断层规模逐渐减小,倾角变缓,断距变小。整体上,克拉苏构造带由于受应力作用方向及大小的差异,表现出明显的分段性,根据构造样式、膏盐层厚度及展布特征,将其自东向西细划分为:克深段、大北段、博孜段和阿瓦特段(图2)。

克拉苏构造带主力勘探开发目的层为白垩系巴什基奇克组和巴西改组。巴什基奇克组为辫状河三角洲前缘、扇三角洲前缘沉积,自下而上可细分为三段:第一段(K_1bs^1)发育辫状河三角洲前缘亚相,岩性主要是细砂岩、粉砂岩以及泥质粉砂岩,此段多缺失;第二段(K_1bs^2)发育辫状河三角洲相,岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩为主;第三段(K_1bs^3)发育扇三角洲相,岩性主要是细—中砂岩和含砾中砂岩。巴西改组主要为辫状河三角洲前缘沉积,其岩性以中—厚层褐色中砂岩、细砂岩、粉砂岩为主,可见交错层理、粒序层理、波状层理、冲刷面以及砂质条带等沉积构造(图3)。整体

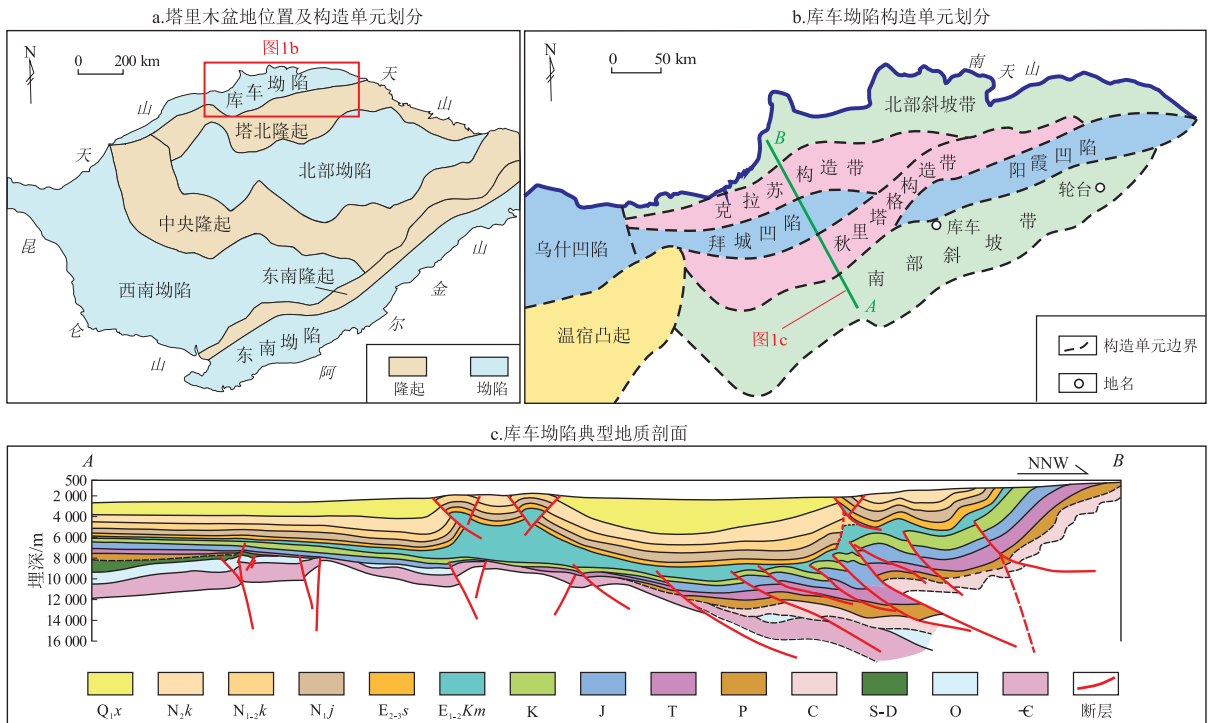


图1 塔里木盆地库车坳陷构造单元划分与典型地质剖面

C.寒武系, O.奥陶系, S—D.志留系—泥盆系, C.石炭系, P.二叠系, T.三叠系, J.侏罗系, K.白垩系, $E_{1-2}Km$.库姆格列木群, $E_{2-3}s$.苏维依组, N_{1j} .吉迪克组, $N_{1-2}k$.康村组, N_2k .库车组, Q_1x .西域组。

Fig.1 Division of structural units and typical geological sections in Kuqa Depression of Tarim Basin

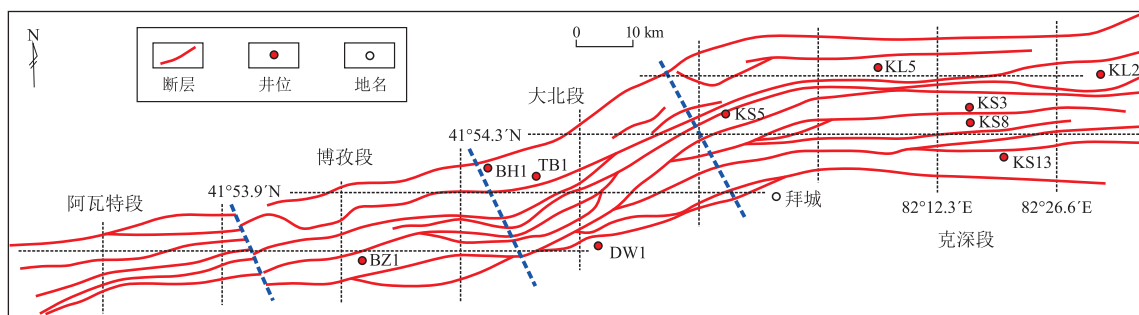


图 2 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带构造特征

Fig.2 Structural features of Kelasu structural belt in Kuqa Depression of Tarim Basin

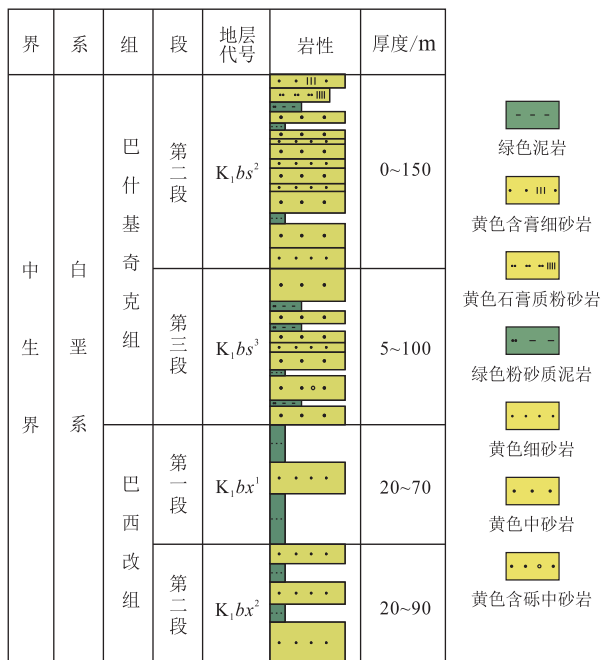


图 3 塔里木盆地库车坳陷下白垩统巴西改组—巴什基奇克组典型地层柱状图

Fig.3 Typical strata section of Lower Cretaceous Baxigai Formation and Bashijiqike Formation in Kuqa Depression, Tarim Basin

上,白垩系储层砂岩孔隙度主要介于 4%~11%,平均值为 7%,渗透率为 $(0.035 \sim 0.500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值 $0.234 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为一套致密砂岩储层^[29]。

2 实验设计与参数计算

岩石力学实验采用中国矿业大学“岩石多场耦合试验系统 (Rock 1000-50VHT)”,该设备技术指标为:偏应力测量范围 0~750 MPa,精度 ± 0.01 MPa,围压最大工作压力约 100 MPa,活塞行程 0~20 mm,精度 0.001 mm,温控最大量程 250 ℃。

本次实验研究采用的样品全部来自库车坳陷拜城地区白垩系巴什基奇克组野外新鲜露头砂岩。

岩石力学实验参照中华人民共和国国家标准《煤和岩石物理力学性质测定方法 第 9 部分:煤和岩石三轴强度及变形参数测定方法:GB/T 23561.9-2009》进行。本次研究重点探讨不同围压、流体类型、加载速率等因素影响岩石力学性质的变化规律。

考虑库车坳陷巴什基奇克组深层—超深层埋藏(约 6 000~8 500 m)和高储层压力(压力系数 1.63~1.95)特点,实验过程中设定围压分别为 30、40、50、60、70 和 80 MPa,围压范围符合研究区目的层地质条件,此系列实验过程中,其他条件保持不变;地层水矿化度为主要离子质量浓度之和,参考研究区目的层地层水特点,按照氯化钠与氯化钙质量比 9:1 比例配制不同矿化度液体,实验流体类型为纯净水、150 g/L、250 g/L 和 350 g/L 矿化液,此过程中控制围压恒定为 40 MPa,加载速率为 0.06 mm/min;库车坳陷西段缩短距离为 13~52 km^[30],据此计算获取缩短速率为 2.3~9.6 mm/a,考虑实验条件与实际的相似性分析,实验中加载速率分别设定为 0.01、0.03、0.06、0.15 和 0.30 mm/min,此系列实验过程中,其他条件保持不变。

实验过程中保持围压恒定,逐渐增加轴向载荷直至岩石破坏,由此可获取岩石加载过程中的轴向应力、轴向应变和径向应变,据其计算岩石弹性模量和泊松比:

$$E = (\sigma_1 - \sigma_3)_{(50)} / \varepsilon_{h(50)} \quad (1)$$

$$\mu = \varepsilon_{d(50)} / \varepsilon_{h(50)} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量,单位 GPa; μ 为泊松比,无量纲; $(\sigma_1 - \sigma_3)_{(50)}$ 为样品最大主应力差的 50%,单位 MPa; $\varepsilon_{h(50)}$ 和 $\varepsilon_{d(50)}$ 分别为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{(50)}$ 所对应的轴向和径向压缩应变,单位 %。

3 围压影响岩石力学性质变化规律

地壳中岩石所受的围压主要来自上覆岩层的

重力和地层压力。一般情况下,越往地壳深处,围压越大,围压对岩石力学性质具有重要影响^[31]。在含油气盆地内,岩石变形和力学性质主要受控于围压的变化,对温度效应不敏感^[32]。

基于 XRD 全岩测试与薄片粒度分析,本次实验采用的岩石为岩屑细砂岩,利用实验记录数据绘制主应力差—应变曲线(图 4a)。结果显示,随着围压的增大,样品经历了从脆性变形到脆—韧性变形转换,甚至逐渐发展为应变硬化的韧性变形(图 4a)。

当围压为 30 MPa 时,主应力差下降明显,以劈裂

或剪切破裂的脆性破坏为主(图 5a);围压 40~70 MPa,主应力差下降逐渐减弱,岩石变形主要表现为脆—韧性变形转换阶段,发育局部破裂,形成共轭剪切缝(图 5b);当围压增加到 80 MPa 时,砂岩样品显现应变硬化趋势,岩石内可发生一定程度的塑性流动(图 5c)。计算弹性模量和泊松比,结果可见,岩石最大主应力差、弹性模量随着围压增大均显著增大(图 4b,c),泊松比并未呈现明显的变化规律(图 4d)。

依据库仑准则,用最大(σ_1)和最小(σ_3)主应力表示时,其公式为:

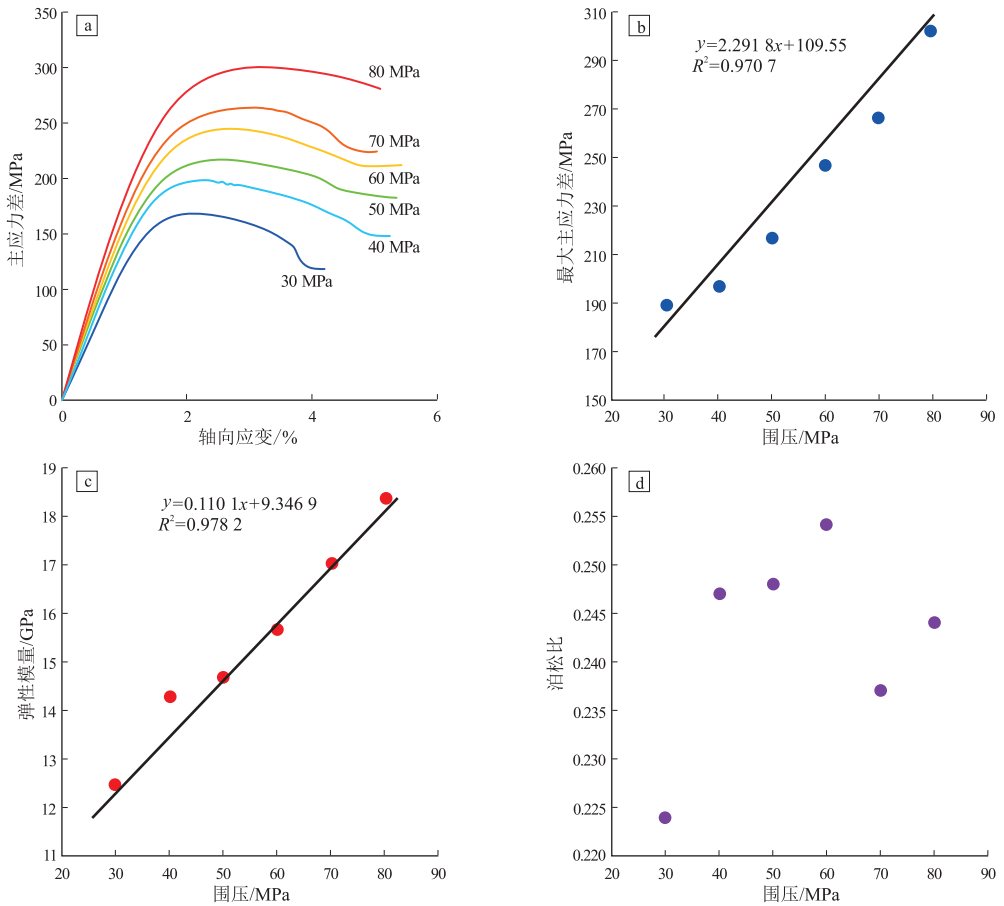


图 4 围压影响岩石力学性质变化规律

a.主应力差—应变曲线;b.最大主应力差随围压变化规律;c.弹性模量随围压变化规律;d.泊松比随围压变化规律。

Fig.4 Variation chart showing the effect of confining pressure on mechanical properties of rock

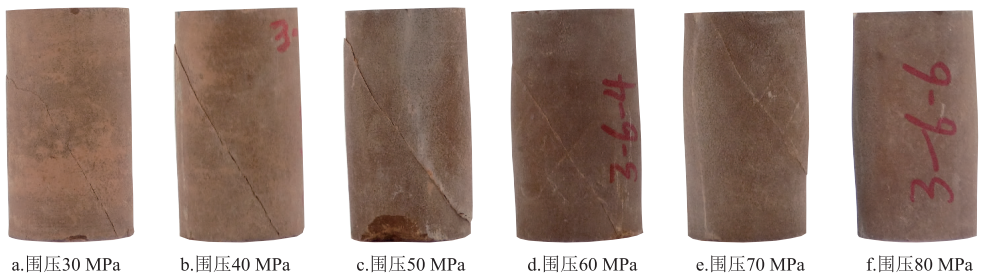


图 5 围压影响岩石差异破裂样式照片

Fig.5 Differential pattern of rock failure under the effect of confining pressure

$$\sigma_1 = C_0 + q\sigma_3 \quad (3)$$

式中: q 为围压对岩石强度的影响系数,无量纲,表示当 σ_3 增大 1 倍时,使岩石破裂所需的 σ_1 值需增大 $q\sigma_3$ 倍,其可通过式(4)计算获取; C_0 为单轴抗压强度,单位 MPa。

$$q = [(f^2 + 1)^{1/2} + f]^2 \quad (4)$$

式中: f 为内摩擦系数,无量纲,对大多数岩石 $f \approx 0.6 \sim 0.8$,因此 q 介于 3~5 之间,可见围压的增大显著提高了岩石强度^[33]。

从微观角度看,围压影响岩石力学性质的原因,是由于围压增大使岩石内部质点彼此之间距离缩短,从而增强了岩石的内聚力,颗粒之间不易离散,矿物晶格不易破坏,进而岩石强度和弹性模量等力学参数升高^[34]。前人研究表明,岩石从脆性过渡到韧性过程包括 3 个阶段,即脆—韧性变形开始阶段、脆—韧性变形阶段和脆—韧性变形结束阶段。不同岩性岩石脆—韧性变形围压范围存在差异,室温条件下,石英岩的脆—韧性转换围压为 100~600 MPa,大理岩为 30~300 MPa^[35-36]。

针对研究区目的层,如果按上覆岩层压力梯度平均为 24.5 kPa/m、地层压力梯度平均为 17.9 kPa/m 计

算,围压条件所对应的脆—韧性转换深度约为 6 000~10 000 m。

上述实验结果表明,不同围压大小影响变形、破裂样式和岩石力学性质(图 4,图 5),因此在面向库车坳陷深层—超深层油气勘探开发时,查明围压影响岩石力学性质的规律,揭示脆性→脆—韧性转换→韧性变形中围压的临界值,对压裂开发等过程至关重要。

4 流体影响岩石力学性质变化规律

实际地质条件下的岩石赋存于不同类型流体环境中。本次实验所采用的样品为长石岩屑细砂岩,依据 X 衍射(XRD)测试分析显示,该砂岩试样矿物成分分别是 45.79% 石英、25.67% 斜长石、23.70% 方解石、2.88% 黏土矿物、1.11% 白云石和 0.85% 黄铁矿,与巴什基奇克组岩心砂岩矿物组成类似。实验过程中,首先将试样放置于烘烤箱内,设置 105 ℃,干燥 24 h;然后再对其进行预先浸泡处理,浸泡过程中每间隔 15 min 取出称重,在浸泡 24 h 时样品重量已不再变化,表明样品在自吸条件下已经达到饱和。

利用实验记录数据绘制主应力差—应变曲线(图 6a),结果显示,干燥样品主应力差下降明显,以破裂或剪切破裂的脆性破坏为主。经过流体浸泡处理后,

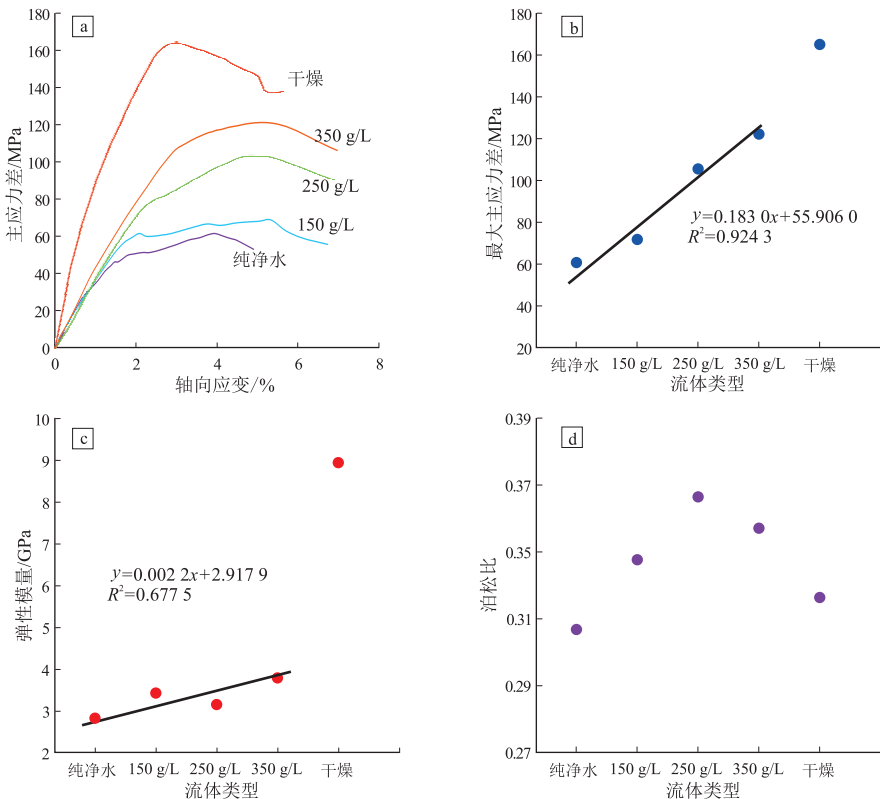


图 6 流体影响岩石力学性质变化规律

a. 主应力差—应变曲线; b. 最大主应力差随流体类型变化规律; c. 弹性模量随流体类型变化规律; d. 泊松比随流体类型变化规律。

Fig.6 Variation chart showing the effect of fluid type on mechanical properties of rock

样品表现为脆—韧性变形转换特征。计算岩石弹性模量和泊松比,可见岩石最大主应力差和弹性模量均呈现不同程度的降低,干燥样、纯净水浸泡样、150 g/L 溶液浸泡样、250 g/L 溶液浸泡样和 350 g/L 溶液浸泡样的弹性模量分别为 8.95、2.89、3.45、3.16 和 3.82 GPa,流体浸泡样品的降低幅度依次分别为 67.71%、61.45%、64.69% 和 57.32%,纯净水浸泡造成的弹性模量降低幅度最大,而流体矿化度的升高具有缓解岩石力学参数弱化趋势(图 6b,c);纯净水及不同矿化流体作用后实验样品的泊松比整体规律不明显(图 6d)。

流体与岩石之间的复杂作用会对岩石强度、变形、渗透性等造成不可忽视的影响。流体对岩石的损伤主要体现在其力学、物理和化学效应,如润滑作用、劈裂作用、冲刷作用、软化作用等^[21,37]。上述变化规律的原因主要是砂岩试样在纯净水浸泡时,水会沿着岩石中的孔隙和微裂隙浸入,浸湿矿物颗粒、水解可溶性物质,并继续沿颗粒之间的接触面向岩石内部浸入,削弱颗粒之间联结,造成岩石力学性能弱化^[15]。而在不同矿化度溶液浸泡之后,会导致试样的晶体表面结晶,一定程度上填充孔隙,从而减缓变形^[38-39],因此,矿化流体浸泡后试样弹性模量比在纯净水浸泡时有所增加。杨鑫^[40]根据双电层(固定层和扩散层)厚

度理论,认为双电层厚度与溶液离子浓度成反比,离子浓度越大则双电层厚度越小。从微观角度,双电层厚度变厚,导致矿物颗粒与相邻其他颗粒之间的黏聚力和摩擦力减小,进而表现为岩石强度的降低。因此,高矿化流体浸泡后的砂岩试样力学参数比低矿化流体浸泡时增大。

5 加载速率影响岩石力学性质变化规律

岩石的力学行为会随着加载环境的改变而发生变化,加载速率对岩石力学性质具有显著影响^[25],这种现象称为载荷速率效应。库车坳陷经历了多期次构造运动,且不同构造部位的挤压变形速率也存在差异,导致岩石力学参数具强非均质性。为此,本次研究利用实验记录数据绘制主应力差—应变曲线(图 7a),计算岩石力学参数。结果显示,在较低的加载速率条件时,最大主应力差、弹性模量和泊松比的值都较小,但随着加载速率的增大增速较快;当加载速率达到一定关键数值之后(本次实验 0.05 mm/min 左右),岩石力学参数增速变缓(图 7b,c,d)。

一般而言,在较低的加载速率时,砂岩内部颗粒之间的应力在不断相互转移,初始损伤和微裂缝

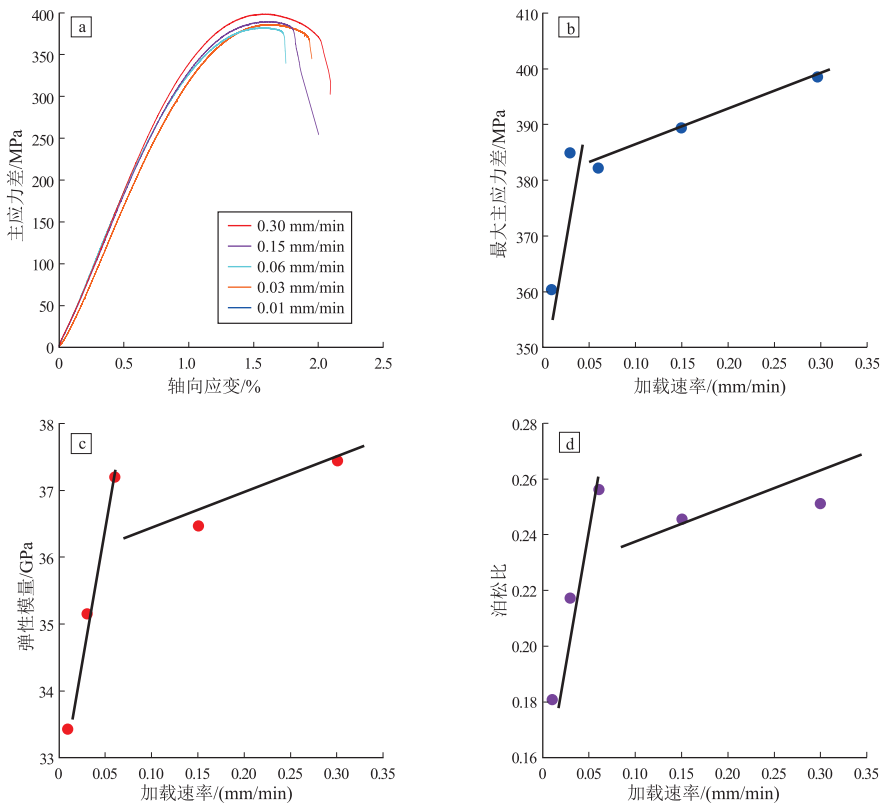


图7 加载速率影响岩石力学性质变化规律

a. 主应力差—应变曲线; b. 最大主应力差随加载速率变化规律; c. 弹性模量随加载速率变化规律; d. 泊松比随加载速率变化规律。

Fig.7 Variation chart showing the effect of loading rate on mechanical properties of rock

可以得到充分演化发展,此过程中砂岩试样结构承载能力不断被削弱,导致岩石力学强度降低;当加载速率较高时,砂岩试样达到峰值强度所需的时间缩短,样品内微裂缝来不及进一步扩展就发生脆性破裂,岩石具有较高的强度^[41-42]。

针对克拉苏构造带“南北分带”的特征,构造力作用强度以及活动挤压速率由北向南逐渐减弱。根据不同构造带内钻井岩心岩石力学实验测试结果,建立巴什基奇克组岩石弹性模量与距山前距离之间的关系,为了消除埋藏深度(围压)对岩石力学性能的影响,采用“弹性模量/埋深(K)”这一参数进行表征,结果可见, K 值具有从北(近山前)到南(远山前)减小的规律,一定程度上反映了“速率”对岩石力学参数的控制(图8)。

6 结论

针对塔里木盆地库车坳陷巴什基奇克组致密砂岩开展不同围压、流体和加载速率下的岩石力学实验分析,研究在其作用下的力学参数变化规律,主要获取如下结论:

(1)不同围压条件下砂岩试样应力—应变曲线存在差异,随着围压从30 MPa到80 MPa,岩石经历脆性、脆—韧性转换,直至呈现韧性趋势,岩石最大主应力差、弹性模量随围压增大而显著增大,泊松比并未呈现明显的变化规律。面向研究区目的层深层—超深层地质特征,揭示脆性→脆—韧性转换→韧性变形中围压的临界值,对压裂开发等过程至关重要。

(2)不同流体浸泡后的岩石最大主应力差和弹性模量均表现出不同程度的降低,纯净水浸泡样、150 g/L溶液浸泡样、250 g/L溶液浸泡样和

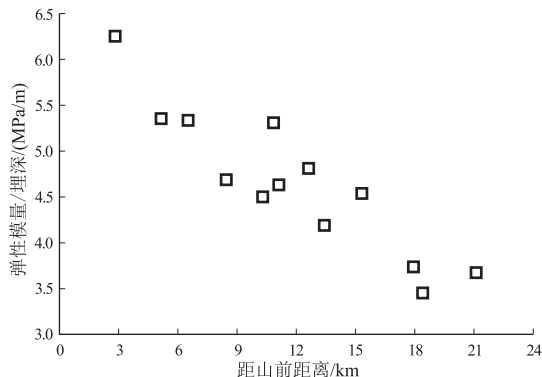


图8 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带巴什基奇克组岩石弹性模量与距山前距离的关系

Fig.8 Relationship between elastic modulus of rock of Cretaceous Bashijiqike Formation of Kelasu structural belt of Kuqa Depression of Tarim Basin and mountain front

350 g/L溶液浸泡样的弹性模量相较于干燥样分别降低67.71%、61.45%、64.69%和57.32%,纯净水浸泡造成的弹性模量降低幅度最大,在不同矿化度溶液浸泡后会导致晶体表面结晶,一定程度上填充孔隙,减缓变形,流体矿化度的升高具有缓解岩石力学参数弱化的趋势。

(3)在较低的加载速率条件时,最大主应力差、弹性模量和泊松比随着加载速率的增大增速较快,加载速率超过一定关键数值之后,岩石力学参数增速变缓。揭示加载速率影响岩石力学性质变化的规律有助于认识库车坳陷分带特征,助力油气勘探开发。

致谢:感谢中国矿业大学王胜宇参与野外地质调查与取样工作;感谢评审专家提出的建设性意见,有效提升论文质量。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

徐珂负责论文撰写和修改;鞠玮负责研究方案设计;张辉负责实验实施;梁艳、张玮、梁景瑞负责数据分析;王志民、徐浩然负责图件绘制;尹国庆负责稿件校对。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The manuscript was drafted and revised by XU Ke. The study was designed by JU Wei. The experimental operation was completed by ZHANG Hui. The data analysis was completed by LIANG Yan, ZHANG Wei and LIANG Jinggui. The diagrams were drawn by WANG Zhiming and XU Hairan. YIN Guoqing proofread the manuscript. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] 田军,杨海军,吴超,等.博孜9井的发现与塔里木盆地超深层天然气勘探潜力[J].天然气工业,2020,40(1):11-19.
TIAN Jun, YANG Haijun, WU Chao, et al. Discovery of well Bozi 9 and ultra-deep natural gas exploration potential in the Kelasu tectonic zone of the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 11-19.
- [2] 王清华,杨海军,汪如军,等.塔里木盆地超深层走滑断裂带控大油气田的勘探发现与技术创新[J].中国石油勘探,2021,26(4):58-71.
WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 58-71.
- [3] 张仲培,徐勤琪,刘士林,等.塔里木盆地巴麦地区东段北东向走滑断裂体系特征及油气地质意义[J].石油实验地质,2023,45(4):761-769.
ZHANG Zhongpei, XU Qinqi, LIU Shilin, et al. Characteristics of NE strike-slip fault system in the eastern section of Bachu-Maigaiti area, Tarim Basin and its oil-gas geological signifi-

- cance[J].*Petroleum Geology & Experiment*,2023,45(4):761-769.
- [4] 程建,周小进,刘超英,等.中西部大盆地重点勘探领域战略选区研究[J].*石油实验地质*,2023,45(2):229-237.
CHENG Jian,ZHOU Xiaojin,LIU Chaoying,et al.Strategic area selection and key exploration fields in central and western large basins[J].*Petroleum Geology & Experiment*,2023,45(2):229-237.
- [5] 周学文,林会喜,郭景祥,等.塔里木盆地库车坳陷南斜坡新和地区白垩系亚格列木组沉积模式及油气意义[J].*石油实验地质*,2023,45(2):266-279,392.
ZHOU Xuewen,LIN Huiyi,GUO Jingxiang,et al.Depositional model and petroleum significance of the Cretaceous Yageliemu Formation in Xinhe area on the southern slope of Kuqa Depression,Tarim Basin[J].*Petroleum Geology & Experiment*,2023,45(2):266-279.
- [6] 漆立新,丁勇.塔里木盆地顺北地区东西部海相油气成藏差异[J].*石油实验地质*,2023,45(1):20-28.
QI Lixin,DING Yong.Differences in marine hydrocarbon accumulation between the eastern and western parts of Shunbei area,Tarim Basin[J].*Petroleum Geology & Experiment*,2023,45(1):20-28.
- [7] 吕志凯,张建业,张永宾,等.超深层裂缝性致密砂岩气藏储层连通性及开发启示:以塔里木盆地库车坳陷克深2气藏为例[J].*断块油气田*,2023,30(1):31-37,95.
LÜ Zhikai,ZHANG Jianye,ZHANG Yongbin,et al.Reservoir connectivity of ultra-deep fractured tight sandstone gas reservoir and development enlightenment:taking Keshen 2 gas reservoir in Kuqa Depression of Tarim Basin as an example[J].*Fault-Block Oil and Gas Field*,2023,30(1):31-37,95.
- [8] 黄少英,杨文静,卢玉红,等.塔里木盆地天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J].*天然气地球科学*,2018,29(10):1497-1505.
HUANG Shaoying,YANG Wenjing,LU Yuhong,et al.Geological conditions,resource potential and exploration direction of natural gas in Tarim Basin[J].*Natural Gas Geoscience*,2018,29(10):1497-1505.
- [9] 张坦,齐育楷,姚威,等.塔里木盆地库车坳陷南斜坡三叠系烃源岩热演化特征及油气地质意义[J].*石油实验地质*,2022,44(6):1018-1027.
ZHANG Tan,QI Yukai,YAO Wei,et al.Thermal evolution characteristics of Triassic source rocks and their petroleum geological significance on the southern slope of Kuqa Depression,Tarim Basin[J].*Petroleum Geology & Experiment*,2022,44(6):1018-1027.
- [10] 徐珂,张辉,刘新宇,等.库车坳陷深层裂缝性储层现今地应力特征及其对天然气勘探开发的指导意义[J].*油气地质与采收率*,2022,29(2):34-45.
XU Ke,ZHANG Hui,LIU Xinyu,et al.Current in-situ stress characteristics of deep fractured reservoirs in Kuqa Depression and its guiding significance to natural gas exploration and development[J].*Petroleum Geology and Recovery Efficiency*,2022,29(2):34-45.
- [11] 雷刚林,谢会文,张敬洲,等.库车坳陷克拉苏构造带构造特征及天然气勘探[J].*石油与天然气地质*,2007,28(6):816-820.
LEI Ganglin,XIE Huiwen,ZHANG Jingzhou,et al.Structural features and natural gas exploration in the Kelasu structural belt,Kuqa Depression[J].*Oil & Gas Geology*,2007,28(6):816-820.
- [12] 王招明,谢会文,李勇,等.库车前陆冲断带深层盐下大气田的勘探和发现[J].*中国石油勘探*,2013,18(3):1-11.
WANG Zhaoming,XIE Huiwen,LI Yong,et al.Exploration and discovery of large and deep subsalt gas fields in Kuqa foreland thrust belt[J].*China Petroleum Exploration*,2013,18(3):1-11.
- [13] 鞠玮,姜波,秦勇,等.多煤层条件下现今地应力特征与煤层气开发[J].*煤炭学报*,2020,45(10):3492-3500.
JU Wei,JIANG Bo,QIN Yong,et al.Characteristics of present-day in-situ stress field under multi-seam conditions: implications for coalbed methane development[J].*Journal of China Coal Society*,2020,45(10):3492-3500.
- [14] 刘敬寿,丁文龙,杨海盟,等.鄂尔多斯盆地华庆地区天然裂缝与岩石力学层演化:基于数值模拟的定量分析[J].*地球科学*,2023,48(7):2572-2588.
LIU Jingshou,DING Wenlong,YANG Haimeng,et al.Natural fractures and rock mechanical stratigraphy evaluation in Huaqing area,Ordos Basin:a quantitative analysis based on numerical simulation[J].*Earth Science*,2023,48(7):2572-2588.
- [15] 刘向君,罗平亚.岩石力学与石油工程[M].北京:石油工业出版社,2004:195.
LIU Xiangjun,LUO Pingya.Rock mechanics and petroleum engineering[M].Beijing:Petroleum Industry Press,2004:195.
- [16] 周文,高雅琴,单钰铭,等.川西新场气田沙二段致密砂岩储层岩石力学性质[J].*天然气工业*,2008,28(2):34-37.
ZHOU Wen,GAO Yaqin,SHAN Yuming,et al.Lithomechanical property of tight sand reservoirs in the second member of Shaximiao Formation in Xinchang gas field,west Sichuan Basin[J].*Natural Gas Industry*,2008,28(2):34-37.
- [17] ZOBACK M D.Reservoir geomechanics[M].Cambridge:Cambridge University Press,2007:485.
- [18] 郭培峰,邓虎成,邓勇,等.鄂尔多斯盆地南缘长8储层岩石力学特征及影响因素[J].*科学技术与工程*,2019,19(18):189-198.
GUO Peifeng,DENG Hucheng,DENG Yong,et al.Rock mechanics characteristics and influence factors analysis of Chang 8 reservoir in the southern margin of Ordos Basin[J].*Science Technology and Engineering*,2019,19(18):189-198.
- [19] 于少群,李理.低渗储层岩石的力学性质及其控制因素:以牛庄洼陷牛35块沙三中为例[J].*地质科学*,2021,56(3):845-853.
YU Shaoqun,LI Li.Mechanical properties of low permeability reservoir rocks and their controlling factors:take the third member of Shahejie Formation of Niu-35 fault block in Niu Zhuang Sag as an example[J].*Chinese Journal of Geology*,2021,56(3):845-853.
- [20] 李智武,罗玉宏,刘树根,等.川东北地区地层条件下致密储层力学性质实验分析[J].*矿物岩石*,2005,25(4):52-60.
LI Zhiwu,LUO Yuhong,LIU Shugen,et al.The experimental analysis of mechanical properties of compact reservoir rocks under formation conditions,northeast of Sichuan Basin,China[J].*Journal of Mineralogy and Petrology*,2005,25(4):52-60.
- [21] 徐珂.南堡凹陷高尚堡油藏现今地应力研究[D].青岛:中国

- 石油大学(华东),2019;196.
- XU Ke. Current in-situ stress of Gaoshangpu reservoir, Nanpu Sag, Bohai Bay Basin, China [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019;196.
- [22] 李庆辉, 李少轩. 超深层砂岩储层岩石力学特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 948-957.
- LI Qinghui, LI Shaoxuan. Experimental study on mechanical properties of ultra-deep sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 948-957.
- [23] ZHANG Yuliang, SUN Qiang, HE Huan, et al. Pore characteristics and mechanical properties of sandstone under the influence of temperature [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 537-543.
- [24] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 355-370.
- [25] 王云飞, 刘晓, 王立平, 等. 加载速率和饱水对砂岩力学行为和微观损伤特征的影响 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 421-428.
- WANG Yunfei, LIU Xiao, WANG Liping, et al. Coupling effect of loading rate and saturated water on mechanical behavior and micro damage property of sandstone [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(2): 421-428.
- [26] 侯连浪, 刘向君, 梁利喜, 等. 巴什基奇克组地层岩石力学及地应力特征 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 3894-3903.
- HOU Lianlang, LIU Xiangjun, LIANG Lixi, et al. Investigation of rock mechanics and in-situ stress characteristics of Bashijiqike Formation [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 3894-3903.
- [27] 鞠玮, 侯贵廷, 黄少英, 等. 库车坳陷依南—吐孜地区下侏罗统阿合组砂岩构造裂缝分布预测 [J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 592-602.
- JU Wei, HOU Guiting, HUANG Shaoying, et al. Structural fracture distribution and prediction of the Lower Jurassic Ahe Formation sandstone in the Yinan-Tuzi area, Kuqa Depression [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4): 592-602.
- [28] 王招明. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律 [J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 153-166.
- WANG Zhaoming. Formation mechanism and enrichment regularities of Kelasu subsalt deep large gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 153-166.
- [29] 徐珂, 田军, 杨海军, 等. 塔里木盆地库车坳陷超深层现今地应力对储层品质的影响及实践应用 [J]. 天然气地球科学, 2022, 33(1): 13-23.
- XU Ke, TIAN Jun, YANG Haijun, et al. Effects and practical applications of present-day in-situ stress on reservoir quality in ultra-deep layers of Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(1): 13-23.
- [30] 罗世伟. 库车坳陷克拉苏富油气区构造研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2019;73.
- LUO Shiwei. Study on the structure of the oil-gas enrichment area in Kelasu Kuqa Depression [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019;73.
- [31] 王升. 致密储层脆性主控因素及可压性分级评价研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2021;112.
- WANG Sheng. Study on the main controlling factors of brittleness and compressibility classification evaluation for tight reservoirs [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2021;112.
- [32] FOSSEN H. Structural geology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010;463.
- [33] 席道瑛, 徐松林. 岩石物理学基础 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012;350.
- [34] XI Daoying, XU Songlin. Foundations of rock physics [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2012;350.
- [34] 谢仁海, 渠天祥, 钱光谟. 构造地质学 [M]. 2版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007;344.
- XIE Renhai, QU Tianxiang, QIAN Guangmo. Structural geology [M]. 2nd ed. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007;344.
- [35] 吴树仁, 石玲. 断层的脆—韧性转换研究综述 [J]. 世界地质, 1993, 12(4): 1-7.
- WU Shuren, SHI Ling. Research on fault brittle-ductile transition [J]. World Geology, 1993, 12(4): 1-7.
- [36] HADIZADEH J, RUTTER E H. The low temperature brittle-ductile transition in a quartzite and the occurrence of cataclastic flow in nature [J]. Geologische Rundschau, 1983, 72(2): 493-509.
- [37] 李根, 唐春安, 李连崇. 水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展 [J]. 力学进展, 2012, 42(5): 593-619.
- LI Gen, TANG Chun'an, LI Lianchong. Advances in rock deformation and failure process under water-rock coupling [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 593-619.
- [38] 杨圣奇, 许帅博, 刘振. 深部盐水环境下砂岩力学及渗透特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(2): 292-304.
- YANG Shengqi, XU Shuaibo, LIU Zhen. Experimental study on mechanical and permeability behaviors of sandstone under deep saline environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(2): 292-304.
- [39] HUANG Yanhuang, YANG Shengqi, HALL M R, et al. The effects of NaCl concentration and confining pressure on mechanical and acoustic behaviors of brine-saturated sandstone [J]. Energies, 2018, 11(2): 385.
- [40] 杨鑫. 水及化学溶液对岩石力学性质影响的试验研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2010;66.
- YANG Xin. Experimental study on effects of water and chemical solution on mechanical properties of rock [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2010;66.
- [41] 党亚倩, 王团结, 汪洪菊, 等. 加载速率对岩石材料力学性质与能量演化特征的影响 [J]. 金属矿山, 2022(12): 45-51.
- DANG Yaqian, WANG Tuanjie, WANG Hongju, et al. Effect of loading rate on mechanical behavior and energy evolution characteristics of rock materials [J]. Metal Mine, 2022(12): 45-51.
- [42] 杨科, 张寨男, 华心祝, 等. 饱和煤样力学及损伤特征的加载速率微观作用机制研究 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 130-142.
- YANG Ke, ZHANG Zhainan, HUA Xinzhu, et al. Microscopic mechanism of loading rate of saturated coal sample mechanics and damage characteristics [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 130-142.