

引用格式: 万有维, 刘向君, 袁芳, 等. 塔里木盆地巴西改组岩石理化性能及力学特性研究[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(5): 753-759.
WAN Youwei, LIU Xiangjun, YUAN Fang, et al. Physic-chemical and mechanical properties of rocks in Baxigai Formation, Tarim Basin [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5): 753-759.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.05.013

塔里木盆地巴西改组岩石理化性能及力学特性研究

万有维¹, 刘向君¹, 袁芳², 熊健¹, 李超²

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;
2. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:塔里木盆地克拉苏构造带巴西改组地层在钻井过程中井壁失稳现象频发,严重影响钻井效率。以巴西改组岩石为研究对象,开展了矿物组成测试、阳离子交换实验等理化性能测试,以及三轴压缩试验等力学测试,研究了巴西改组砂岩与泥岩理化性能、力学特性差异以及钻井液浸泡对力学性能的影响。研究结果表明,巴西改组泥岩的黏土矿物含量较高,阳离子交换容量约为砂岩的3倍,并发育大量微裂缝,水化膨胀能力明显强于砂岩,在溶液浸泡作用下更容易发生结构损伤。同时,由于油基钻井液的润滑作用,导致强度降低,且泥岩强度降低量约为砂岩的1.5倍。在相同围压状态下,巴西改组泥岩与砂岩的强度、临界破坏点处对应的轴向、径向应变以及岩石破坏模式均存在差异,且钻井液浸泡对泥岩强度影响大于砂岩。通过分析巴西改组地层岩石力学特性,对弄清该地层井壁失稳机理、制定井壁失稳防控措施具有重要意义。

关键词:理化性能;力学特性;钻井液浸泡;实验;巴西改组

中图分类号: TE319

文献标识码: A

Physic-chemical and mechanical properties of rocks in Baxigai Formation, Tarim Basin

WAN Youwei¹, LIU Xiangjun¹, YUAN Fang², XIONG Jian¹, LI Chao²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: During the drilling process, the wellbore instability frequently occurs in Baxigai Formation in the Kelasu structural belt of the Tarim Basin, which seriously affects the drilling efficiency. In order to study the physic-chemical and mechanical properties, differences of physical and mechanical characteristics and influence of drilling fluid immersion on the mechanical properties of the sandstone and mudstone in Baxigai Formation, the physic-chemical characteristic tests (such as mineral composition test and cation exchange experiment), and mechanical test (such as triaxial compression test) have been carried out. The research results show that the clay minerals content of mudstone in Baxigai Formation is high, and the cation exchange capacity is about three times that of sandstone. The mudstone here also has a large number of micro-cracks, and the hydration swelling is obviously stronger than that of sandstone. All these things make it more prone to be damaged. At the same time, the strength decreases under the immersion and lubricating effects of oil-based drilling fluid. The strength decrease of mudstone is about 1.5 times that of sandstone. Under the same confining pressure, the mudstone and sandstone strength, the corresponding axial and radial strain at the critical failure point, and the rock damage mode of mudstone and sandstone in Baxigai Formation are different. The damage to mudstone structure caused by drilling fluid immersion is greater than that of sandstone. The analysis of the mechanical properties of the rock in Baxigai Formation is of great significance to clarify the mechanism of wellbore instability in this formation and formulate prevention and control measures for wellbore instability.

Keywords: physic-chemical properties, mechanical properties, drilling fluid immersion, experiment, Baxigai Formation

收稿日期: 2020-07-09。

第一作者简介: 万有维(1996—),男,在读博士研究生,主要从事石油工程测井相关方面研究。地址:四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学,邮政编码:610500。E-mail: swpu_wyw@163.com

通信作者简介: 刘向君(1969—),女,博士,教授,主要从事井眼稳定性、岩石力学和岩石物理方面的科研和教学工作。地址:四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学,邮政编码:610500。E-mail: liuxj@swpu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目“富有机质硬脆性页岩水化机理基础研究”(41772151)。

塔里木盆地蕴含丰富的油气资源,是我国西气东输的起点。其中克拉苏构造带是塔里木盆地重要的能源勘探开发区域之一,显示出巨大的开发潜力^[1-3]。油气井钻井过程中井壁稳定性问题受到广泛关注^[4-5],研究区块已钻井资料统计显示巴西改组地层在钻井过程中,井下复杂状况频发,影响钻井效率,严重时将造成较严重的经济损失^[6]。地层的井壁稳定性与岩石的理化性能、力学特性直接相关。同时,钻井过程中,在毛细管及压差的作用下,钻井液通过岩石中的微裂缝以及孔隙等通道渗入地层,在骨架颗粒与颗粒之间起润滑作用,并与岩石发生相互作用,造成岩石发生损伤,使岩石的强度产生弱化,从而导致井壁失稳。因此,开展钻井液浸泡后岩石力学特性研究也有助于进一步认识实际地层条件下岩石情况,为安全钻井提供数据支撑。

目前,岩石力学特性可以通过多种手段来研究。YAGIZ^[7]利用岩石强度、密度参数评估泥页岩的硬脆性等力学参数。韩超超^[8]利用常规声学测试以及三轴强度试验,获取了岩石力学特征参数。牛贯非等^[9]利用数值模拟方法结合岩石力学试验结果以及测井资料对岩石力学参数进行数值分析。对于溶液浸泡后岩石强度变化方面,骆韬等^[10]研究了水化作用对砂岩单轴、三轴力学参数的影响。向朝纲等^[11]研究了页岩在水、油基以及水基钻井液3类流体浸泡后,抗压强度、弹性模量、内聚力等参数变化情况。WYERING等^[12]、FROLOVA等^[13]研究了热液蚀变后的岩石力学和物理性质变化。HE等^[14]、刘厚彬等^[15]、刘向君等^[16]、丁乙等^[17]也对泥页岩等开展了相关研究。结果表明,地层的井壁稳定性不仅与其黏土矿物组成、力学性质和理化性质有关,而且取决于与之接触的钻井液,应将地层和钻井液作为一个整体来进行研究。这些研究成果有助于人们认识不同类型岩石的理化性能、力学性能,并为井壁稳定性研究提供了

依据。巴西改组地层多发生阻卡、憋钻等井下复杂事故,这些复杂事故给钻井提速带来挑战。因此,为了保障安全且高效钻井需要,需要开展巴西改组岩石的理化性能及力学特性研究。

以克拉苏构造带巴西改组地层泥岩、砂岩为研究对象,开展XRD测试、扫描电镜、阳离子交换容量测试等,获取巴西改组岩石理化性能。同时,开展岩石三轴压缩试验获取岩石的力学性能。在此基础上,进一步开展了钻井液浸泡后岩石力学测试,研究钻井液浸泡作用对岩石力学性能影响,对比分析钻井液浸泡前后岩石强度参数及弹性参数变化。

1 实验样品与实验方法

1.1 实验样品

实验样品取自于塔里木盆地克拉苏构造带巴西改组地层,其主要发育砂岩、泥岩互层,是该区块钻井过程中关键地层^[18]。采集的岩样按照测试需求加工为3种类型的测试样品:第一种为直径25 mm、高50 mm的圆柱体岩石试件,其中砂岩、泥岩各15块,用于三轴压缩测试;第二种为100目的岩样粉末,用于开展全岩分析以及阳离子交换容量测试;第三种为长、宽、高都不超过1 cm的小方块状试样,用于扫描电镜测试。基础物性测试结果表明,巴西改组砂岩密度分布范围为2.52~2.60 g/cm³,孔隙度分布范围为5.00%~7.40%,渗透率分布范围为(0.50~1.49)×10⁻³ μm²;泥岩密度分布范围为2.42~2.46 g/cm³,孔隙度分布范围为3.30%~5.30%,渗透率分布范围为(0.09~0.25)×10⁻³ μm²。根据基础物性测试结果,将砂岩分为a~e组,泥岩分为f~j组,每组包含3块岩样(部分岩样如图1所示)。分组的依据是让开展同种测试的岩样基础物性基本相同,确保测试结果的可重复性。

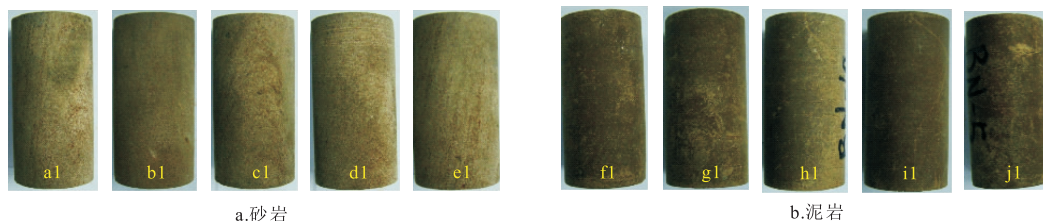


图1 塔里木盆地巴西改组泥岩与砂岩部分岩样

Fig. 1 Partial rock samples of mudstone and sandstone in Baxigai Formation, Tarim Basin

1.2 实验方法

1) 全岩分析

将已经加工成100目粉末状的泥岩与砂岩样品,借助XRD分析技术进行全岩分析、黏土成分分析,以获取巴西改组砂、泥岩的矿物组成。

2) 电镜扫描

将已加工好的泥岩与砂岩小方块状试样进行电镜扫描实验,通过仪器扫描系统发出的细聚焦电子束在样品表面上逐点进行扫描,激发产生能够反映样品表面特征的信息来调制成像,通过图像观察岩石微裂缝等微观孔隙结构。

3) 阳离子交换容量测试

将100目粉末状的泥岩与砂岩样品按比例加入蒸馏水、过氧化氢溶液和硫酸溶液配置成浆液,实验中将3.20 g试剂级亚甲基蓝溶成1 L溶液,质量分数为0.003 2。采用亚甲基蓝滴定法进行了阳离子交换容量测试,根据滴定结果结合式(1)计算得到砂岩与泥岩的阳离子交换容量。

$$CEC = \frac{\rho\omega V}{MG} \quad (1)$$

式中:CEC为阳离子交换容量,mmol/L; ρ 为亚甲基蓝溶液密度, g/cm^3 ; ω 为亚甲基蓝溶液质量分数; V 为滴定所耗亚甲基蓝溶液量,mL; M 为亚甲基蓝溶液的相对分子质量; G 为滴定所取样品量,g。

4) 三轴压缩测试

将直径25 mm、高50 mm的巴西改组砂岩与泥岩圆柱体岩样放置于烘箱中,在60 °C条件下烘干24 h。三轴压缩试验仪器为高温高压三轴流变仪,设置无围压、半围压以及有效地层围压3种围压状态,测试获取岩石不同围压状态下的抗压强度,并基于该结果获取砂岩与泥岩在不同围压条件下临界破坏点处的轴向与径向应变值。为了解钻井液浸泡作用对岩

石强度影响,将岩石在3 MPa围压、120 °C条件下在钻井液中浸泡48 h,浸泡完后取出进行三轴压缩试验获取浸泡后岩石抗压强度,并计算其弹性参数。对比钻井液浸泡前后岩石强度及弹性参数变化。

2 实验结果与讨论

2.1 理化性能

X射线衍射实验结果显示,巴西改组砂岩与泥岩矿物组成大致相同,但含量相差较大。其中,砂岩矿物组成以石英为主,比重为37.0%~50.8%,其次是长石(21.9%~41.9%)、碳酸盐岩(10.1%~13.4%)、黏土矿物(10.2%~15.1%),且黏土矿物主要以伊利石为主。泥岩主要矿物组成为黏土矿物,比重为39.2%~45.0%,其余依次是石英(22.3%~23.9%)、碳酸盐岩(17.9%~20.0%)、长石(13.3%~20.0%),且所有黏土矿物中伊利石所占比例最高。砂岩与泥岩样品中均未见蒙脱石发育,但泥岩样品中含有大量的伊/蒙混层,使其具有一定膨胀性,易发生水化作用。

电镜扫描实验测试结果如图2所示。从图2可以看出,巴西改组砂岩中黏土矿物较少,岩石颗粒呈杂基胶结,岩石压实程度高、发育有极少的微裂缝。而泥岩含有大量黏土矿物,且样品中微裂缝和孔隙大量发育,这些孔隙和裂缝的发育为流体进入岩石内部提供通道,弱化原岩力学性能。同时,促进泥岩与流体之间相互作用,导致泥岩结构发生破坏。在此基础上,开展阳离子交换容量实验测试,以获取巴西改组泥岩与砂岩具体阳离子交换能力。结果显示,泥岩阳离子交换容量较大,达到260~275 mmol/kg,而砂岩仅有85~90 mmol/kg,泥岩的阳离子交换容量约为砂岩的3倍,即泥岩水化膨胀性强,这与泥岩中黏土矿物的伊/蒙混层含量较高有关。在钻井液浸泡

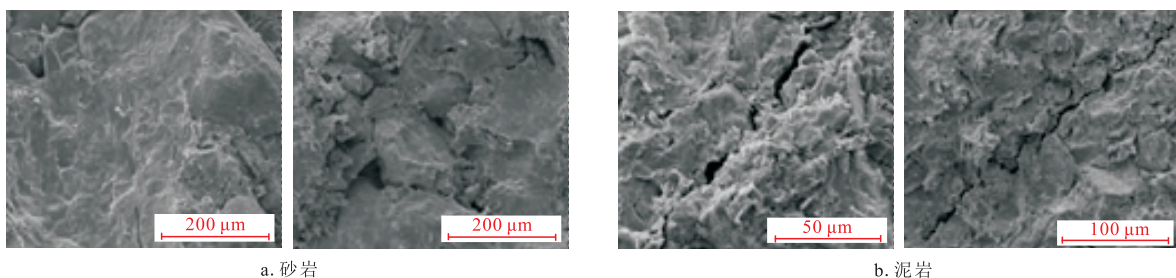


图2 塔里木盆地巴西改组泥岩与砂岩扫描电镜

Fig. 2 Scanning electron micrograph of mudstone and sandstone in Baxigai Formation, Tarim Basin

作用下,钻井液滤液将通过岩石的孔隙和微裂缝渗入岩石内部,岩石中黏土矿物颗粒(主要为伊/蒙混层)发生水化作用,造成岩石内部孔隙结构发生改变。

为了进一步了解泥岩的水化特性,开展了泥岩浸泡实验,浸泡后巴西改组泥岩发生破裂,形成宏观裂缝。这是由于巴西改组泥岩黏土矿物含量高且含有大量伊/蒙混层。同时,泥岩内部发育大量微裂缝,在毛细管和压差的作用下,水进入岩石内部,并发生水化作用,产生水化应力,造成裂纹尖端产生应力集中,从而使裂纹逐渐扩展,最终导致岩样表面形成宏观裂缝。这说明巴西改组泥岩的水化表现形式不同于传统泥岩,后者水化表现形式主要为水化崩解,说明了巴西改组泥岩也表现出较强的水化作用,这与泥岩的高阳离子交换容量有关。

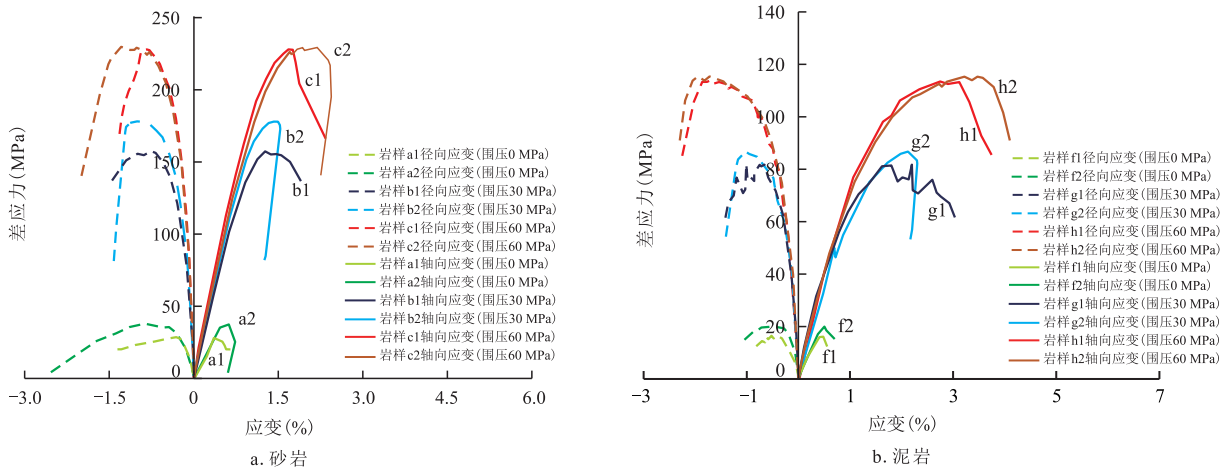
根据以上实验结果可看出,巴西改组泥岩与砂岩中均含有黏土矿物,且黏土矿物以伊利石为主,而泥岩中伊/蒙混层含量较高,阳离子交换容量大,水化膨胀能力强,且其内部发育大量微裂缝,为流体进入泥岩内部提供通道,水进入泥岩中后,泥岩中黏土颗粒将发生水化作用,进一步产生水化能力,结合流体的润滑作用,弱化泥岩岩石强度^[19-20]。砂岩虽也有微裂缝发育,但其矿物组成中黏土含量较低,阳离子交换容量小,与泥岩相比,其发生的水化作用较弱。因此,在钻井过程中,钻井液中应考虑加入水化抑制剂,抑制泥岩水化,减少岩石损伤,降低井壁地层失稳的可能性。

2.2 原岩力学特性

基于三轴压缩试验获取了巴西改组砂、泥岩在不同围压状态下的应力—应变曲线(图3),并进一步获取岩石在不同围压下的峰值强度。其中,砂岩与泥岩在每种测试围压条件下各使用了3块岩样。可以看出,无论砂岩还是泥岩,随围压增加,岩石内部孔隙逐渐压密,曲线孔隙压密阶段消失,当应力作用于岩石上时,岩石直接进入弹性变形阶段。随围压增加,岩石弹性变形阶段曲线斜率逐渐增加,即弹性模量逐渐增大。同时,随围压增大,岩石塑性不断增强,破坏前应变增大,破坏后阶段也发生明显变化。

统计发现泥岩及砂岩在不同围压状态下临界破坏点处的轴向应变、径向应变均存在差异。对于砂岩,在临界破坏点处的轴向应变、径向应变随所施加围压的增加而增加。而轴向应变增长速度较快,当围压较低时,轴向应变小于径向应变,随围压增加,轴向应变量渐渐高于径向应变量。对于泥岩,临界破坏点处的轴向应变和径向应变均随围压的增大而增大,且增长速度较快,在0 MPa围压时,轴向应变与径向应变大致相同,但随着围压增大,轴向应变增长速度快于径向应变增长速度。对比泥岩与砂岩,在相同围压条件时,临界破坏点处砂岩的轴向应变量低于泥岩。低围压时,砂岩的径向应变大于泥岩,而高围压时,砂岩的径向应变小于泥岩。

不同围压下峰值强度对比如图4所示。可以看



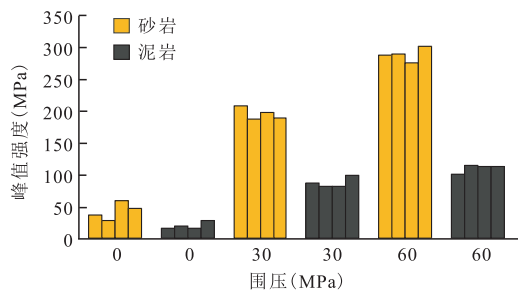
注:砂岩与泥岩每种围压条件各绘制了2块岩样的应力—应变曲线。

图3 不同围压条件下泥岩与砂岩应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of mudstone and sandstone under different confining pressures

出,相同围压条件下,泥岩的峰值强度均低于砂岩的峰值强度,泥岩与砂岩峰值强度随围压增加而增加,且增加速率逐渐降低,泥岩峰值强度随围压增加而增加的速率低于砂岩,砂岩在无围压状态下的抗压强度平均为48.10 MPa,在30.00,60.00 MPa围压下的抗压强度约为无围压状态的4倍和6倍,而泥岩在无围压状态下抗压强度平均为21.40 MPa,在30.00,60.00 MPa围压下的抗压强度约为无围压状态的4倍和5.3倍。当围压增加到一定值后,由于岩石压实得非常致密,强度变化值较小。

不同围压条件下,岩样三轴压缩实验后破坏形式如图5所示,可以看出,不同围压条件下岩石的破坏形式存在差异。0 MPa围压时,砂岩或泥岩岩石破坏模式表现为劈裂破坏,而随着围压增加,岩石破坏形式表现为剪切破坏。



注:砂岩与泥岩每种围压条件各绘制了4块岩样的测试结果。

图4 不同围压下峰值强度对比

Fig. 4 Comparison of peak strength under different confining pressures

2.3 浸泡钻井液后岩石力学特性

井壁附近地层除了受到应力挤压外,钻井过程中通常需要使用钻井液,为了获取钻井液浸泡作用下的岩石强度,进一步研究了巴西改组砂岩与泥岩在钻井液浸泡作用后的强度特性。实验所用钻井液为井场取回钻井过程中实际使用钻井液,钻井液类型为UDM—2油基钻井液,相对密度1.86 g/cm³,该钻井液为类似油基钻井液体系中的油包水钻井液,水作为必要组分均匀的分布在柴油当中,钻井液中主要包含主乳化剂(INVERMULNT)、辅乳化剂(EZMULNT)以及柴油等添加剂。

测试结果如图6所示。可以看出,浸泡后砂岩仍然比较致密,岩石受压后,应力—应变曲线中孔隙压实阶段不明显,直接进入弹性变形阶段,并且当轴向应力达到峰值强度时,岩石立即发生破坏,失去承压能力。砂岩浸泡后应力—应变曲线的弹性变形阶段斜率低于原岩,说明岩石弹性模量降低,岩石强度下

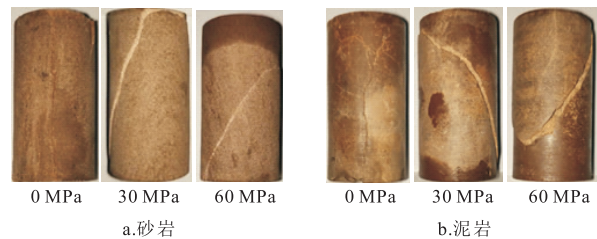
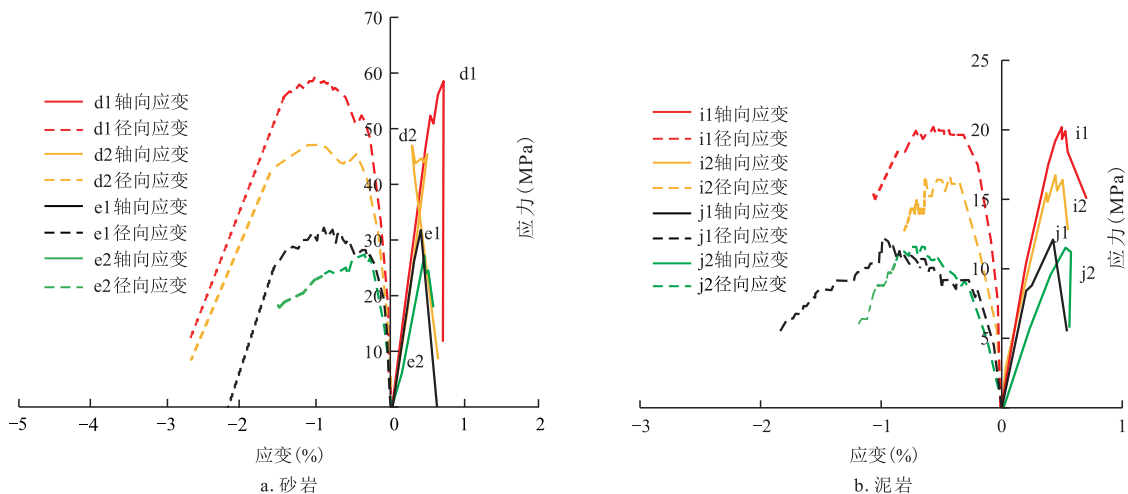


图5 不同围压条件下岩石破坏模式

Fig. 5 Rock failure mode under different confining pressures



注:d1、d2、i1、i2为原岩岩样,e1、e2、j1、j2为浸泡后岩样,砂岩、泥岩原岩和钻井液浸泡后各绘制了2块岩样的应力—应变曲线。

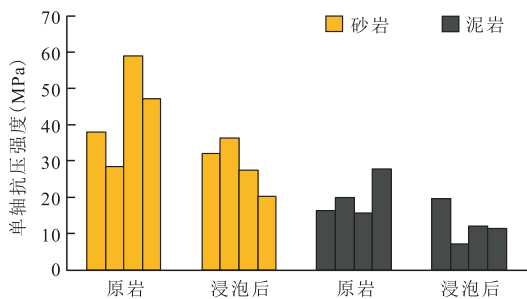
图6 原岩及浸泡钻井液后岩石应力—应变曲线对比

Fig. 6 Comparison of stress-strain curve of original rock and rock after immersion

降,且浸泡后轴向与径向应变量略低于原岩应变量。而浸泡后泥岩应力—应变曲线与原岩相比弹性变形阶段变短,岩石塑性比原岩更强,浸泡后应力—应变曲线的弹性变形阶段斜率明显低于原岩,也同样说明岩石弹性模量降低,岩石强度下降。浸泡后泥岩轴向应变量与原岩大致相同,但径向应变量明显高于原岩。说明钻井液浸泡后,钻井液滤液进入岩石孔隙中,使得岩石内部结构发生变化,同时受钻井液润滑作用影响,强度也随之改变,岩石向塑性变形转换。对比砂岩与泥岩发现,浸泡后砂岩应力—应变曲线弹性段斜率高于砂岩,说明浸泡后砂岩强度仍大于泥岩。原岩与钻井液浸泡后岩石单轴抗压强度对比如图7所示,可以看出,浸泡后砂岩单轴抗压强度平均值为31.96 MPa,与原岩相比降低33.56%。浸泡后泥岩单轴抗压强度平均值为10.32 MPa,与原岩相比降低51.78%。泥岩的强度降低量高于砂岩,原因可能是泥岩与砂岩随着油基钻井液中的表面活性剂实现润湿翻转,同时在压差及毛细管作用下,钻

井液进入岩石孔隙及微裂缝当中,在骨架颗粒与颗粒之间起润滑作用,使得岩石塑性增强,强度降低。砂岩由于微裂缝发育较少,钻井液进入有限,影响程度低于泥岩。而泥岩除钻井液润滑作用外,泥岩中黏土矿物还会与钻井液中含有的少量水之间发生相互作用,使得泥岩发生一定程度的水化膨胀,岩石结构产生损伤,进一步造成强度降低。在钻井液润滑以及钻井液中少量水的水化二者综合作用下,使得泥岩强度降低量高于砂岩。由此得知,钻井液浸泡后,钻井液滤液进入岩石内部,在岩石骨架颗粒与颗粒之间起润滑作用,同时使岩石发生结构损伤,使得岩石强度降低。如果长时间浸泡,岩石强度将进一步降低,特别在泥岩地层,大量发育的微裂缝为钻井液进入岩石内部提供通道,并且较高的阳离子交换容量以及泥质含量,导致泥岩更容易发生损伤,强度值降低,从而导致井壁失稳,进一步诱发井下复杂事故,影响安全高效钻井。

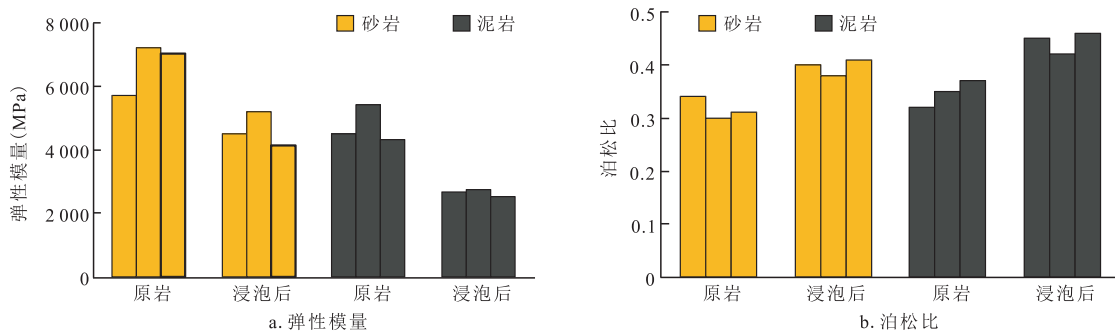
除岩石强度参数外,岩石的弹性参数也是表征岩石力学特性的重要参数,根据单轴压缩测试结果能够获取岩石的弹性模量和泊松比,这两个参数能用于描述和表征岩石变形的难易程度。钻井液浸泡前后砂岩与泥岩弹性模量与泊松比计算结果如图8所示。可以看出,砂岩弹性模量大于泥岩弹性模量,而泊松比小于泥岩泊松比,说明在相同的应力增量下,泥岩的轴向应变量大于砂岩的轴向应变量,而泥岩的径向应变量与轴向应变量的比值大于砂岩,这与从应力—应变曲线以及岩心破坏模式总结所得结论一致。此外,无论泥岩还是砂岩,浸泡钻井液后岩石弹性模量低于原岩,其中砂岩弹性模量平均降低30.84%,泥岩平均降低44.14%,即泥岩降低量高于



注:砂岩与泥岩浸泡前后各绘制了4块岩样的测试结果。

图7 钻井液浸泡前后单轴抗压强度对比

Fig. 7 Comparison of uniaxial compressive strength before and after drilling fluid immersion



注:砂岩与泥岩浸泡前后各绘制了3块岩样的测试结果。

图8 钻井液浸泡前后弹性参数对比

Fig. 8 Comparison of elastic parameters before and after drilling fluid immersion

砂岩。砂岩与泥岩泊松比均高于原岩,其中砂岩泊松比平均增大 25.26%,泥岩平均增大 27.88%,即泥岩泊松比增大大量高于砂岩,原因还是由于钻井液作用,使得岩石结构发生变化,强度降低。

根据以上试验结果可以看出,钻井液浸泡后砂岩与泥岩抗压强度、弹性模量、泊松比等岩石力学参数均发生改变,都指示岩石强度降低,钻井液浸泡对泥岩结构损伤程度大于砂岩,泥岩强度降低值更大。岩石强度降低不利于井壁保持稳定,长期的浸泡将导致井壁失稳,发生地层坍塌等,从而引发井下复杂事故。在实际钻井过程中,应该尽可能减少钻井液浸泡时间,尽可能降低岩石强度损伤,防止井壁失稳。

3 结论

1) 巴西改组砂岩与泥岩矿物组成相似,但泥岩黏土矿物含量远大于砂岩,泥岩中发育有大量微裂缝,且阳离子交换容量约为砂岩的3倍,其水化膨胀性明显强于砂岩。

2) 巴西改组泥岩与砂岩在各种围压状态下,岩石峰值强度、临界破坏点处对应的轴向应变、径向应变以及岩石破坏模式均存在差异,岩石峰值强度随围压增大而增大。在相同围压条件下,临界破坏点处砂岩的轴向应变变量低于泥岩,径向应变变量在低围压时,砂岩大于泥岩,而高围压时,砂岩低于泥岩。

3) 钻井液浸泡后,钻井液滤液进入岩石内部,钻井液的润滑作用及钻井液中的水与黏土矿物间的相互作用造成岩石强度降低,其中浸泡后砂岩单轴抗压强度平均降低 33.56%,弹性模量降低 30.84%,泊松比增大 25.26%,而浸泡后泥岩单轴抗压强度平均降低 51.78%,弹性模量降低 44.14%,泊松比增大 27.88%。

参考文献

[1] 杨海军,李勇,唐雁刚,等.塔里木盆地克拉苏盐下深层大气田的发现[J].新疆石油地质,2019,40(1):12-20.
YANG Haijun, LI Yong, TANG Yangang, et al. Discovery of deep gas field under the Krasu Salt in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(1): 12-20.

[2] 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.

[3] 孙宁富,郭凤霞.大北—克拉苏构造带盐下天然气识别[J].复杂油气藏,2014,7(3):20-23.
SUN Ningfu, GUO Fengxia. Natural gas identification under evaporate bed of Dabei-Kelasu tectonic belt[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2014, 7(3): 20-23.

[4] 华松,常洪超,尹付国,等.东胜气田锦58井区井塌原因分析及钻井液认识[J].石油地质与工程,2020,34(4):102-105.
HUA Song, CHANG Hongchao, YIN Fuguo, et al. Causes analysis of well collapse and understanding of drilling fluid in Jin58 well area of Dongsheng gas field[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(4): 102-105.

[5] 王翔,鄂尔多斯盆地西部页岩油水平井井壁稳定技术[J].石油地质与工程,2019,33(4):88-91.
WANG Xiang. Wellbore stability technique in horizontal wells for shale oil reservoirs in western Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2019, 33(4): 88-91.

[6] 董萌.克拉苏构造盐膏层钻井提速措施研究与应用[D].成都:西南石油大学,2017.
DONG Meng. Research and application of drilling speed-up measures for Krassu structural salt paste layer[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

[7] YAGIZ S. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(1): 66-74.

[8] 韩超超.陇东地区长7储层岩石力学特性试验研究[D].西安:西安石油大学,2016.
HAN Chaochao. Experimental study on rock mechanical properties of Chang 7 reservoir in Longdong area[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.

[9] 牛贯非,李连崇,李明,等.基于数值模拟的储层岩石力学参数预测模型分析及应用[J].油气地质与采收率,2017,24(2):73-79.
NIU Guanfei, LI Lianchong, LI Ming, et al. Analysis and application of reservoir rock mechanical parameter prediction model based on numerical simulation[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 73-79.

[10] 骆韬,郭保华,焦峰,等.水化学作用对砂岩力学性质影响试验研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(5):1316-1322.
LUO Tao, GUO Baohua, JIAO Feng, et al. Experimental study on the influence of water chemistry on the mechanical properties of sandstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1316-1322.

[11] 向朝纲,陈俊斌,杨刚.钻井液浸泡作用下脆性页岩强度特征实验[J].断块油气田,2018,25(6):803-806.
XIANG Chaogang, CHEN Junbin, YANG Gang. Experimental study on strength characteristics of brittle shale under drilling fluid soaking[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(6): 803-806.

[12] WYERING L D, VILLENEUVE M C, WALLIS I C, et al. Mechanical and physical properties of hydrothermally altered