文章编号:1673-5005(2017)06-0108-09

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.06.013

中等强度砂岩饱水力学参数变化试验及 动态出砂规律

董长银1,周 崇1,钟奕昕1,王 鹏2,崔明月2,曾思睿1,尚校森1

(1. 中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580; 2. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:为了研究含水条件变化对砂岩储层出砂的定量影响规律,对国外某油田 N 储层中等强度砂岩 27 块岩心进行 不同饱水时间和饱水度条件下的三轴强度破坏试验,测试不同围压三轴破坏强度、弹性模量、泊松比以及内聚力、内 摩擦角随饱水时间和饱水度的变化。试验揭示中等强度砂岩力学参数随饱水度的变化规律。根据试验数据,利用 极限稳定强度指数模型拟合岩心力学强度参数随饱水时间和饱水度的变化经验关系式,用于该储层的动态出砂临 界条件预测。结果表明:在饱水时间为0~50 d内,不同围压下的三轴破坏强度、弹性模量随着饱水时间明显下降, 饱水 50 d 时围压 40 MPa 下的破坏强度和弹性模量均下降约 30%;随着饱水度从0 增加到 100%,岩心三轴破坏强 度、内聚力和弹性模量先降低较快,然后趋于稳定,最终无量纲强度比约为 72%;该储层含水饱和度上升至 0.85 时, 储层出砂临界压差下降 25% ~30%,而地层压力下降 30%情况下,出砂临界压差降低 10% ~11%;未来含水上升和 地层压力下降是导致该储层出砂的主要诱发条件。

关键词:中等强度砂岩;饱水度;饱水时间;力学强度参数;三轴破坏试验;动态出砂预测

中图分类号:TE 358.1 文献标志码:A

引用格式:董长银,周崇,钟奕昕,等. 中等强度砂岩饱水力学参数变化试验及动态出砂规律[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(6):108-116.

DONG Changyin, ZHOU Chong, ZHONG Yixin, et al. Experimental study on mechanical properties of medium strength sandstone saturated with water and its dynamic sanding behaviors [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017, 41(6):108-116.

Experimental study on mechanical properties of medium strength sandstone saturated with water and its dynamic sanding behaviors

DONG Changyin¹, ZHOU Chong¹, ZHONG Yixin¹, WANG Peng², CUI Mingyue², ZENG Sirui¹, SHANG Xiaosen¹

School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
 Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to quantify the effect of water saturation on sand production, a series of core tri-axial testing was performed using 27 cores from a medium strength sandstone reservoir in an oilfield abroad, in which different water saturating time and water saturation at various surrounding pressure were applied for the measurement and analysis of the failure strength, elastic modulus, Poisson ratio, cohesive force and internal friction angle of the rock samples. The variations of rock strength at different water saturation conditions were revealed in the experiments. Based on the experimental data, an empirical ultimate strength exponential model was fitted to quantify the relationship of rock strength and water saturating conditions. The results indicate that the failure strength of the rock samples and elastic modulus decrease obviously with water saturating time varying from 0 to 50 d, and can drop to 70% of their initial value under water saturating time of 50 d and surrounding pressure of 40 MPa. With water saturation changing from 0 to 100%, the compressing failure strength, elastic modulus and cohesive force decrease dramatically at the early stage,

收稿日期:2017-06-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51374226,51774307);国家重点研发计划项目(2017YFC0307304)

作者简介:董长银(1976-),男,教授,博士,研究方向为采油及采气工程、油气井防砂理论与技术。E-mail:dongey@upc.edu.cn。

then slowly to a stable state, the final dimensionless strength ratio of which is about 72%. The empirical model can be further used for the prediction of dynamic sanding behaviors. The increasing water saturation to 0.85 can cause a reduction of the critical sanding pressure drawdown (CSPD) by 25% - 30%. Meanwhile, a 30% reduction of the reservoir pressure can lead to 10% - 11% decreasing of the CSPD. The increase of water saturation and reduction of reservoir pressure in the Iraq reservoir studied can be the main inducing conditions for sand production in the process of future production.

Keywords: medium strength sandstone; water saturation; water saturating time; rock mechanical parameters; tri-axial failure test; dynamic sanding prediction

对于疏松砂岩油气藏,生产过程中的出砂是其正 常开发面临的棘手问题。生产过程中的地层压力、含 水条件以及地层温度变化会导致岩石力学性质和地 应力变化,进而导致出砂临界条件和出砂规律发生改 变,即动态出砂规律预测^[13]。其中含水条件对储层 岩石强度和出砂规律的动态影响是研究重点之一,首 先是含水上升使地层颗粒间毛管力下降,导致地层岩 石强度降低:其次由于胶结物被水溶解,特别是一些 黏土矿物(如蒙脱石等),遇水后膨胀、分散,大大降低 了地层岩石强度^[4]。国内外学者对砂岩岩石强度随 饱水条件的变化开展了初步研究。林海等^[5]和周翠 英等[6]分别通过试验研究了含水条件下的岩石单轴 抗压强度和三轴破坏强度,得出了岩石强度随饱水时 间下降的定性规律。侯艳娟^[7]和朱珍德等^[8]对几种 典型软砂岩在不同饱水状态下进行单轴和三轴压缩 试验,分析了不同饱水状态下试样强度和变形参数的 变化规律;于德海等^[9]对干燥和饱水状态的绿泥石片 岩进行三轴压缩试验,分析水对试样强度和变形特征 的影响及强度和变形指标与围压的关系;熊德国 等^[10]对煤系地层岩石进行饱水试验,分析饱水前后 围压对岩石强度的影响;Skjaerstein^[11]对含水率对完 整性砂体出砂影响进行了室内试验研究:Dvke 等^[12] 研究了不同含水量岩心的单轴抗压强度的差异,试验 表明饱水后单轴抗压强度比干燥条件下下降 24%~ 34%。其他学者^[13-21]也开展了类似的研究,针对不同 类型岩石初步探索了其力学性质随饱水条件的变化 规律。但是,上述研究使用的岩石类型多样,主要使 用胶结较为疏松的砂岩岩样,针对某一单项岩石强度 参数进行测试分析,得到的系统定量关系不多,也鲜 有在出砂预测中的定量应用。鉴于上述问题,为了进 一步得到岩石的弹性变形及强度参数随围压、饱水时 间及饱水度的定量变化规律,并研究中等强度岩石力 学参数随饱水条件的变化,笔者利用国外某油田N储 层中等强度砂岩的27块天然岩心,系统测试其三轴 破坏强度、弹性模量、泊松比、内聚力和内摩擦角等随 围压和饱水条件的变化,拟合定量关系经验模型,分 析含水上升和地层压力下降对储层出砂规律的动态

影响。

1 试验方法与岩心样品

1.1 试验装置与试验方法

试验使用长春市朝阳技术有限责任公司研制的 TAW-1000 型微机控制电液伺服岩石三轴试验仪, 由轴压系统、侧向压力系统、孔隙水系统和微机系统 4 部分组成。试验机可作岩石单轴及三轴(包括带 孔隙水压)的各种试验。采用双层微机测控配置, 高分辨率快速全数字化自动控制技术,利用此仪器 进行砂岩岩石抗拉、抗压强度测试试验。

岩样饱水时,首先采用索氏抽提仪抽提洗净,岩 心烘干后称干重;然后在负压-0.1 MPa 下装满水的 抽滤瓶中抽真空 48 h 以上,称湿重。计算岩心干湿 重质量差 Δm_1 ,作为该岩心完全饱和水时的质量。 然后将岩心用滤纸均匀包裹进行吸水,定时称重,将 滤纸吸水后岩心的质量与完全干燥时的质量差 Δm_2 与 Δm_1 的比值作为岩心的饱水度。将达到试验预 定条件下的岩心使用密封胶套密封,到达试验规定 饱水时间后取出进行三轴破坏试验。

试验目的为测试目的储层初始条件下岩石力学 强度参数,以及强度参数随饱水时间和饱水度的变 化。三轴围压条件分别设定为 10、20 和 40 MPa,饱 水度条件设定为 30%、50%、70%、90% 和 100%,饱 水时间设定为 20、30、40 和 50 d。

本试验采用加载不同围压条件下不同饱水度、 饱水时间的三轴试验方法^[3,6-12],在室温条件下实 施,温度约 25 ℃,试验采用轴向位移控制,速率为 0.002 mm/s,围压控制在 10~40 MPa。对于同一储 层岩心进行不同条件下的强度对比试验,为了使试 验结果有可对比性,试验采用控制变量法,即对比不 同饱水度时的岩石强度变化,保持围压、饱水时间一 致;对比不同饱水时间时的岩石强度变化,保持围 压、饱水度一致,最后对比不同围压条件下的强度变 化规律。

1.2 岩心样品与试验方案

试验岩心取自国外某砂岩油田 N 储层,埋深

3650~3675 m,原始尺寸为 Φ 3.8 cm×6.7 cm,统一 切割加工成约 Φ 25 mm×50 mm标准岩心,用于三轴 破坏试验;切割余料加工成 Φ 25 mm×15 mm岩心薄 片用于巴西劈裂试验。试样两端面不平行度小于 0.05 mm,满足测定方法的要求^[13]。试验岩心样品 如表1所示。

衣 I	讥当	应石心件	ĀĀ	
Table 1	Core	samples	for	test

~ ~ ~ ~ ~ ~

	- man - tott market tott the							
编号	深度/m	长度/mm	直径/mm	方位	围压/MPa	饱水度/%	饱水时间/d	试验用途
1#	3 653. 24	49.5	25	水平	40	30	40	
2#	3 669. 34	49.5	25	水平	10	80	40	
9#	3 673. 81	49.5	25	水平	10	100	40	
12#	3 675. 60	48.0	25	水平	40	50	40	
14#	3 676. 59	48.0	25	水平	20	30	40	不同饱水度条件下强
24#	3 676. 63	48.0	25	水平	10	30	40	度测试
25#	3 677. 05	48.0	25	水平	20	70	40	
26#	3 677. 50	49.5	25	水平	20	100	40	
27#	3 653. 05	48.0	25	垂直	40	90	40	
28#	3 670. 07	49.0	25	垂直	20	50	40	
3#	3 669. 60	49.0	25	水平	10	50	40	
7#	3 672. 63	49.0	25	水平	10	50	30	
15#	3 676. 87	47.5	25	水平	20	50	20	
16#	3 677. 54	49.0	25	水平	40	50	40	
17#	3 678. 27	48.5	25	水平	20	50	30	不同饱水时间条件下
18#	3 678. 80	47.5	25	水平	40	50	30	的强度测试
23#	3 675. 55	48.0	25	水平	20	50	40	
35#	3 677. 96	48.0	25	垂直	40	50	50	
30#	3 672. 07	49.5	25	垂直	10	50	20	
31#	3 673. 74	49.5	25	垂直	20	50	50	
6#	3 672. 40	50.5	25	水平	20	—	—	
8#	3 673. 63	48.5	25	水平	10	—	—	
$10^{#}$	3 674. 56	51.0	25	水平	10	_	_	
11#	3674.76	49.5	25	水平	40	_	_	原始强度测试
13#	3 675. 82	49.5	25	水平	20	_	_	
19#	3 669. 66	49.5	25	水平	20	_	_	
33#	3675 75	49 5	25	垂首	40	_	_	

试验使用的岩心中包含 6 块垂直岩心,为了考察该储层岩石强度的垂向与水平非均质性,对比 3 组相同或相近条件下的垂直和水平岩心的三轴破坏强度。30*垂直岩心和 7*水平岩心在相同饱水度和围压下(饱水时间略有差异)测试得到的破坏强度分别为 82.53 和 79.68 MPa,误差 3.4%;31*垂直岩心和 23*水平岩心相似条件下的破坏强度分别为 110.01 和 111.31 MPa,误差 1.16%;33*垂直岩心和 11*水平岩心在完全相同条件下的破坏强度分别为 204.61 和 200.23 MPa,误差 2.13%。N 储层水平方向岩心与垂直方向岩心在近似试验条件下破坏强度 基本接近,这表明垂直和水平岩心强度特性差异不大,试验中可以互换使用。

2 试验结果分析

2.1 初始力学强度参数测试结果

为了便于对比饱水条件下的岩石强度变化情

况,首先测试原始条件下的岩石力学强度参数。按照表1方案首先使用7块岩心进行不同围压下的三轴破坏强度测试,结果如表2所示。N储层岩心的 弹性模量为11.969~17.263 GPa,平均为14.76 GPa;泊松比为0.214~0.374,平均为0.306。其中33*岩心破坏前后的照片如图1所示,应力-应变曲线如图2所示。

表 2 岩心初始力学强度参数测试数据

 Table 2
 Initial strength parameters test result in prime conditions

			•			
	围压/ MPa	岩心 编号	密度/ (g・cm ⁻³)	三轴破坏 强度/MPa	弹性模 量/GPa	泊松比
	10	10#	2.144	86. 193	11.969	0.214
	10	8#	2.021	86.802	13.304	0.313
		6#	2.059	144.300	15.003	0.341
	20	19#	2.152	135.730	14.778	0.340
		13#	2.555	134.943	16.794	0.374
	40	33#	2.220	204.606	14.249	0.257
	40	11#	2.088	200. 230	17.263	0.304



图 3 为根据不同围压条件下的破坏强度拟合得 到的摩尔应力圆,使用直线逼近拟合,得到该储层内



聚力为 14.06 MPa,内摩擦角为 35.67°, 拟合相关系数为 0.95, 试验结果相关性较好。



2.2 力学强度参数随饱水度变化

在不同围压、饱水时间 40 d 条件下测试得到岩 心三轴破坏强度随饱水度的变化如图 4 所示。图 4 (b)中三轴破坏强度比为饱水条件下三轴破坏强度 与相同围压条件下初始破坏强度的比值。

分析图 4 可知,随饱水度增加岩石强度初期降低 较快,然后逐渐变缓。在围压 10 MPa 下岩石破坏强 度较初始强度下降 16.994 MPa,降幅约 18%;围压 20 MPa 下强度下降 39.935 MPa,降幅约 28%;在围压 40 MPa 时下降 64.221 MPa,降幅约 30%。随着围压增 加,岩石强度随饱水度下降的幅度和比例越大。



弹性模量和泊松比随饱水度变化如图 5 所示。 弹性模量随含水条件变化总体呈下降趋势,饱水度 100%条件下平均下降约 30%,饱水度约 50% 对岩 石软化作用最强。泊松比随饱水度条件变化有波 动,但无明显规律。泊松比反映岩心在横向和轴向 两个方向弹性形变的差异,根据对垂直和水平岩心 强度对比分析,N储层的的水平和垂直岩心强度性 质几乎接近;而泊松比仅表征轴向和径向变形相对 强弱,因此其随饱水度变化不大。图5(b)中的测试 数据波动应属于测试误差范围内的波动以及不同深 度岩心的性质差异所致。



图 5 弹性模量与泊松比随饱水度变化测试结果



图 6 为利用图 3 所示的莫尔圆测试和拟合得到 岩石内聚力和内摩擦角随饱水度的变化。随着饱水 度增加,岩石内聚力明显下降,其规律与三轴破坏强 度相似;随饱水度增加,内摩擦角略有提高,变化较 小。由于岩心数量有限,得到的内聚力和内摩擦角 随饱水度变化的试验数据点较少(一个内聚力数据 至少需要2~3个岩心三轴破坏数据拟合得到),其 规律难以进一步详细分析。



图 6 内聚力和内摩擦角随饱水度变化测试结果



2.3 力学强度参数随饱水时间变化

根据图 4 和图 5,饱水度 50% 条件下,岩石破坏 强度和弹性模量降低幅度较大,基本接近最低值。 设定恒定饱水度 50%,不同的饱水时间,然后进行 不同围压条件下的岩石三轴破坏强度测试,得到如 图 7 所示的三轴破坏强度及强度比随饱水时间的变 化曲线。

在相同饱水度 50%条件下,岩心三轴破坏强度 随饱水时间的增加而逐渐降低。围压 10 MPa 时,饱 水 40 d 时岩石破坏强度较初始值下降 11.305 MPa, 降幅 13.1%;围压 20 MPa 时,下降 28.313 MPa,降 幅约 20.4%;围压 40 MPa 时,下降 55.838 MPa,降 幅约 29%。随着饱水时间的延长,砂岩的抗压强度 逐渐降低,40~50 d 后逐渐趋于稳定。

试验得到弹性模量和泊松比随饱水时间的变化

曲线如图 8 所示。由图 8 可知,弹性模量随饱水时 间明显下降,表明岩心弹性模量随饱水时间延长逐 渐软化,易于变形;初期弹性模量变化较慢,晚期变 化较快,约 30 d 开始明显降低。图 8(b)所示的泊 松比随饱水时间的变化规律与图 5(b)类似,有波动 但规律不明显,其原因与图 5(b)的分析相同。

使用岩心切割余料加工成的 Φ25 mm×15 mm 岩心薄片采用巴西劈裂法测定 N 储层岩心的抗拉 强度随饱水时间的变化,结果如图 9 所示。

根据图 9,该储层砂岩岩心抗拉强度相对较低, 初始状态下抗拉强度为 2.437 MPa,饱水 40 d 后的 抗拉强度为 1.082 MPa,饱水 120 d 后的抗拉强度为 0.6874 MPa,下降趋势先快后慢,最终饱水状态下 的抗拉强度约为初始强度的 40%;含水条件变化对 该储层岩石抗拉强度影响较大。





Fig. 7 Tested tri-axial failure strength varying with water saturating time



图 8 弹性模量与泊松比随饱水时间变化测试结果





3 定量关系拟合及动态出砂预测应用

3.1 岩石强度变化经验关系拟合

文献[2]中提出了一种岩石强度随饱水时间和 饱水度变化的极限强度指数模型,本文中利用该模 型使用试验数据进行经验关系拟合。岩石强度参数 随饱水时间变化的关系模型为

 $K_t = (1 - K_{tmin}) \exp(\alpha t) + K_{tmin}.$ (1) 式中, K_t 为随饱水时间变化的无量纲强度比; K_{tmin} 为饱水后极限强度比, 由试验数据拟合得到; t 为饱 水时间, $d; \alpha$ 为拟合系数。 岩石强度随饱水度变化的经验关系模型为

 $K_{e} = (1 - K_{emin}) \exp(\beta(S_{w} - S_{w0})) + K_{emin}.$ (2) 式中, K_{e} 为无量纲强度比; K_{emin} 为饱水后极限强度 比,由试验数据拟合得到; S_{w0} 为岩心初始含水饱和 度; S_{w} 为岩心含水饱和度; β 为拟合系数。

利用试验数据拟合上述模型,拟合系数如表 3 所示,拟合曲线如图 10 所示。

表 3	岩石强度随含水条件变化关系拟合系数
Table 3	Coefficient fitting results from test data

拟合强度类型	围压/ MPa	$K_{ ext{tmin}}$ 和 $K_{ ext{cmin}}$ /%	拟合 系数	相关系 数 R ²
*********	40	70.916	-0.082	0.99
	20	79.416	-0.039	0.93
и,ц(1), мажмα	10	85.875	-0.032	0.87
抗拉强度随饱水时间变 化,式(1) 拟合系数 α	_	25.56	-0.054	0. 904
冲行 羽 声 胜 伊 小 声 主	40	69.968	-0.051	0.99
	20	74.021	-0.018	0.92
$\mathcal{M}_{\mathcal{M}}(2)$ work $\mathcal{M}_{\mathcal{P}}$	10	80.353	-0.019	0.94

根据表 3,该油田 N 储层岩石的破坏强度随含 水条件变化的极限强度比为 70% ~ 80%。由于岩 心数量有限,岩石内聚力得到的数据点较少(一个 数据点需要至少 2 ~ 3 块岩心试验数据),不足以进 行系数拟合,其变化规律采用围压40 MPa下的破坏 强度随饱水度的变化规律及其拟合系数。利用上述 拟合经验关系,可以进行未来生产条件下的动态出 砂规律预测。





Fig. 10 Test data fitting of tri-axial failure strength varying with water saturation and time

3.2 动态出砂预测应用

文献[2]中提出了一种根据地层压力、含水条 件和温度变化进行储层动态出砂临界压差预测的模 型和方法。利用该模型和表 3 所示的 N 储层岩石 强度随含水条件变化规律拟合经验关系,进行该储 层 A、B、C、D 4 口井的出砂临界压差随含水饱和度 和地层压力的变化,结果如图 11 所示。





Fig. 11 Dynamic critical sanding pressure drawdown varying with water saturation

and reservoir pressure of four wells in N reservoir

根据 N 储层 4 口井的动态出砂临界压差预测 结果,当含水饱和度上升至 0.85 时,A、B、C、D 4 口 井的出砂临界生产压差下降分别约为 25.25%、 30.28%、30.68%和 30.32%;当储层压力由原始静 压下降约 30%后,4 口井的出砂临界生产压差下降 幅度大,分别为 10.78%、10.97%、10.58%和 11.16%。当含水饱和度和地层压力同时变化时,A 井出砂临界压差由初始的 13.73 MPa 降低为 8.84 MPa,降幅为 37.81%。该储层油井生产压差较大, 为 5~15 MPa,产量较高,目前已有少量油井轻微出 砂,未来含水上升和地层压力下降是导致该储层出 砂的主要诱发条件。

4 结 论

(1)随饱水度和饱水时间的增加,中等强度砂

岩岩石三轴破坏强度明显降低,并且在变化初期降低较快,然后逐渐变缓。在围压 10~40 MPa、饱水度 0~100%、饱水时间 0~50 d 范围内,岩石强度降低约 13%~30%。岩石抗压强度和内聚力变化规律相似;随着围压增加,岩石强度随饱水条件的降低幅度增大。

(2)弹性模量随饱水时间延长及饱水度增加总体呈降低趋势,总体下降幅度为25%~30%;饱水约30d弹性模量开始明显降低,饱水度约50%对岩石软化作用最强。由于N储层的水平和垂直岩心强度性质非常接近,泊松比随饱水度条件变化有波动,但无明显规律。

(3)当含水饱和度上升至0.85时,N储层出砂临界生产压差下降25%~30%;储层压力由原始静压下降约30%后,出砂临界生产压差下降幅度为

10%~11%;两者条件同时变化时,出砂临界压差降 幅为37.81%。含水上升和地层压力下降是导致N 储层出砂的主要诱发条件。

参考文献:

- [1] 董长银.油气井防砂技术[M].2版.北京:中国石化出版社,2017.
- [2] 董长银,张清华,崔明月.复杂条件下疏松砂岩油藏动态出砂预测研究[J].石油钻探技术,2015,43(6):82-86.

DONG Changyin, ZHANG Qinghua, CUI Mingyue. A dynamic sanding prediction model for unconsolidated sandstone reservoirs with complicated production conditions [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43 (6): 82-86.

[3] 董长银,贾碧霞,刘春苗,等. 机械防砂筛管挡砂介质 堵塞机制及堵塞规律试验[J].中国石油大学学报(自 然科学版),2011,35(5):82-88.

> DONG Changyin, JIA Bixia, LIU Chunmiao, et al. Blocking mechanism and blocking laws experiments of sand retention media in mechanical screens[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011,35(5):82-88.

- [4] 何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社,2002.
- [5] 林海,邓金根,胡连波,等.含水率对岩石强度及出砂 影响研究[J].科学技术与工程,2013,13(13):3710-3713.

LIN Hai, DENG Jingen, HU Lianbo, et al. Study on the effect of water content on rock strength and sand production [J]. Science Technology and Engineering, 2013,13 (13):3710-3713.

 [6] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等. 饱水软岩力学性质软化
 的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005, 24(1):33-38.

> ZHOU Cuiving, DENG Yimei, TAN Xiangshao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (1):33-38.

[7] 侯艳娟,张顶立,郭富利. 涌水隧道支护对围岩力学性质的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2010,41
 (3):1152-1157.

HOU Yanjuan, ZHANG Dingli, GUO Fuli. Influences of support on mechanical property of rock in water-containing tunnel[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2010,41(3):1152-1157.

[8] 朱珍德,邢福东,王思敬,等. 地下水对泥板岩强度软

化的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004, 23(增2):4739-4743.

ZHU Zhende, XING Fudong, WANG Sijing, et al. Analysis of strength softening of argillite under ground water by damage mechanics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (sup2): 4739-4743.

[9] 于德海,彭建兵. 三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学 性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28
(1):205-211.

YU Dehai, PENG Jianbing. Experimental study of mechanical properties of chlorite schist with water under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1);205-211.

- [10] 熊德国,赵忠明,苏承东. 饱水对煤系地层岩石力学 性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,30(5):998-1006.
 XIONG Deguo, ZHAO Zhongming, SU Chengdong. Experimental study on effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(5):998-1006.
- [11] SKJAERSTEIN A. Effect of water breakthrough on sand production: experimental and field evidence [R]. SPE 38806,1997.
- [12] DYKE C G, DODERINER L. Evaluating the strength and deformability of sandstones [J]. Geol, 1991, 24: 123-134.
- [13] 汪伟英,张公社,何海峰,等. 毛管力与含水饱和度对 岩石出砂的影响[J].中国海上油气(工程),2003,15 (3):47-48.
 WANG Weiying, ZHANG Gongshe, HE Haifeng, et al. The effect of capillary pressure and water saturation on

sand production [J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 2003,15(3):47-48.

- [14] 中华人民共和国国家标准编写组.煤和岩石物理力
 学性质测定方法[S].北京:中国标准出版社,1987:
 32-33.
- [15] 陈朝晖,谢一婷,邓勇. 疏松砂岩油藏出砂应力敏感 实验研究[J]. 石油钻探技术,2013,41(1):61-64. CHEN Zhaohui,XIE Yiting, DENG Yong. Experimental study on sanding stress sensitivity in unconsolidated sandstone reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(1):61-64.
- [16] POUYA A, GHOREYCHI M. Determination of rock mass strength properties by homogenization [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25(13):1285-1303.
- [17] DYKE C G, DODERINER L. Evaluating the strength and deformability of sandstones [J]. Geol, 1991, 24:123-134.

- [18] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content[J]. Q J Engng Geol, 1992,25:115-130.
- [19] ESSAM P, WALLY A. Effect of water injection on sand production associated with oil production in sandstone reservoirs[R]. SPE 108297,2007.
- [20] 郭富利,张顶立,苏洁,等.地下水和围压对软岩力学 性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,26(11):2324-2332.

GUO Fuli, ZHANG Dingli, SU Jie, et al. Experimental study on influences of groundwater and confining pressure on mechanical behaviors of soft rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (11):2324-2332.

[21] 尤明庆,苏承东,周英.不同煤块的强度变形特征及强度准则的回归方法[J].岩石力学与工程学报,2003,22(12):2081-2085.

YOU Mingqing, SU Chengdong, ZHOU Ying. Strength and deformation of specimens for different coal blocks and regression method of strength criteria [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (12):2081-2085.

(编辑 李志芬)