

# 钻井液浸泡下深部泥岩强度特征试验研究

卢运虎<sup>1,2</sup>, 陈 勉<sup>1</sup>, 金 衍<sup>1</sup>, 滕学清<sup>1,2</sup>, 吴 文<sup>3</sup>, 刘绪全<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 针对钻井液作用下深部泥岩破坏的关键技术难题, 通过室内试验分析钻井液浸泡下深部泥岩强度弱化规律, 并从微观角度分析试样发生变化的机制。研究表明: (1) 钻井液浸泡下, 随取芯夹角增大, 岩石强度先增大后减小, 岩石强度降幅高达 49.5%~54.7%; 随着围压增加, 取芯夹角为 0° 和 90° 时岩石强度增幅较低, 仅为 26.4%~39.2%。(2) 泥岩弹性模量随钻井液作用时间的增加而降低, 随取芯夹角的增加呈现先增大后减小的变化规律, 泊松比变化规律则相反。(3) 与内摩擦角相比, 泥岩黏聚力变化规律性强, 0° 和 90° 条件下黏聚力降低幅度较大, 最高达 67.3%; 其他情况下泥岩黏聚力变化幅度不大。(4) 钻井液滤液的渗入导致泥岩内部裂缝尖端应力强度因子增加、临界断裂韧性降低、裂缝扩展, 这是泥岩强度降低的根本原因。同时, 钻井液滤液改变了层理面填充物的矿物成分, 降低裂缝面的摩擦因数, 加剧岩石强度的降低。

**关键词:** 岩石力学; 深部泥岩; 强度; 取芯夹角; 浸泡时间; 钻井液界面性质

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2012)07 - 1399 - 07

## EXPERIMENTAL STUDY OF STRENGTH PROPERTIES OF DEEP MUDSTONE UNDER DRILLING FLUID SOAKING

LU Yunhu<sup>1,2</sup>, CHEN Mian<sup>1</sup>, JIN Yan<sup>1</sup>, TENG Xueqing<sup>1,2</sup>, WU Wen<sup>3</sup>, LIU Xuquan<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*; 2. *Tarim Oil Field Company, Petro China, Korla, Xinjiang 841000, China*; 3. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*)

**Abstract:** According to the key technical problem of deep mudstone failure under drilling fluid soaking, the weakening law of strength is analyzed by the laboratory test; and the changing mechanism of core samples is analyzed through microcosmic angle. The result shows that: (1) Under the drilling fluid soaking, the mudstone strength increases first and then decreases with increase of coring angle. The decreasing range of strength is up to 49.5% - 54.7%. With the increase of confining pressure, the increasing range of strength is lower and it is only 26.4% - 39.2% with coring angles of 0° and 90°. (2) The elastic modulus of mudstone decreases with the increase of soaking time, and increases first and then decreases with the increase of coring angle. But the change law of the Poisson's ratio is opposite with that of the elastic modulus. (3) Comparing with the internal friction angle, the change of mudstone cohesion presents stronger regularity. The decreasing range of cohesion is larger with coring angles of 0° and 90°, and it reaches 67.3%; but the change range of cohesion is small under other

**收稿日期:** 2012 - 03 - 15; **修回日期:** 2012 - 05 - 07

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226700); “十一五” 国家科技重大专项项目(2011ZX05031 - 004 - 005 HZ); 国家自然科学基金资助项目(51074171)

**作者简介:** 卢运虎(1983 -), 男, 2011 于中国石油大学(北京)油气井工程专业获博士学位, 现为在站博士后, 主要从事岩石力学、井壁稳定和油田地应力测量方面的研究工作。E-mail: luyunhu20021768@163.com

coring angles. (4) Because of the invasion of drilling fluid, the stress intensity factor of crack at the tip increases; the critical fracture toughness decreases and the cracks propagate, which is the basic reason for strength decrease of mudstone. Simultaneously, mineral composition of the fitting in bedding surface is changed by the action of drilling fluid. So, the friction factor crack face decreases and the decrease of mudstone strength is intensified.

**Key words:** rock mechanics; deep mudstone; strength; coring angle; soaking time; drilling fluid interfacial property

## 1 引言

目前, 深层钻井期间所遇到的大多数岩石为泥岩, 并且大多数井壁失稳问题都发生在此类岩石中, 而关于泥岩力学特性的研究却较少。石油工业中, 井壁稳定性预测与泥岩破坏力学特征密切相关, 因此, 对于超深井和水平钻井而言, 泥岩力学特性的研究显得尤为重要。

井壁围岩从变形到失稳破坏一般经历 2 个阶段, 即弹性变形和塑性变形阶段。清楚井壁围岩力学特性, 建立其本构关系和强度准则是井壁稳定性研究的关键。岩石力学中, 应用较广泛的强度准则有 Mogh-Coulomb, Drucker-Prage 和 Griffith 准则<sup>[1]</sup>。徐松林等<sup>[2]</sup>开展了大理岩三轴压缩试验, 获得了大理岩围压条件下峰前和峰后的变形和强度特征; 葛修润<sup>[3]</sup>采用 CT 扫描技术, 研究了脆性岩石受力过程中微观变形特征, 获得了岩石变形过程中裂缝发育、扩展的演变规律, 为研究岩石的内在变形机制提供了一种新方法; V. Hajiabdolmajid 等<sup>[4]</sup>提出了一种新的本构关系, 即黏聚力弱化 - 摩擦强化理论; S. K. Sharan<sup>[5]</sup>根据脆性岩石的应力 - 应变全过程曲线的主要特点, 将其简化成线弹性 - 脆性跌落 - 理想塑性三段直线。在泥岩水化研究方面, M. E. Chenevert<sup>[6]</sup>对其进行了室内试验, 利用泥页岩的水活度来表示膨胀压, 借助热扩散理论来研究水在泥页岩中的流动和分布, 并提出了水化应力的概念, 建立了相关的模型, 开辟了泥岩力化耦合定量研究方面的先河; C. H. Yew 等<sup>[7]</sup>根据 M. E. Chenevert<sup>[6]</sup>的水化试验结果, 研究了井眼周围的应力变化; 黄荣樽等<sup>[8]</sup>建立了泥岩物理力学参数与含水量的关系, 在线弹性力学本构的基础上, 采用有限差分求解了井周围岩水化应力; M. Yu 等<sup>[9-11]</sup>对泥页岩水化机制进行了进一步研究, 但没有涉及水化泥页岩变形的非线性力学问题; C. H. Yang 等<sup>[12]</sup>利用力学与化学耦合的研究方法, 提出了井壁坍塌周期的定量

计算方法。

然而, 对于钻井液作用下深部泥岩强度特征时间效应的研究较少<sup>[13-16]</sup>。针对钻井液作用下深部泥岩破坏的关键技术难题, 开展不同围压、不同钻井液浸泡时间下泥岩强度室内试验, 获得钻井液浸泡过程中深部泥岩强度变化规律和机制, 为深部泥岩地层钻井井壁稳定预测提供科学依据。

## 2 深部泥岩矿物成分分析

试样取自西部 T 井桑塔木组泥岩段, 取样深度为 6 240.0~6 246.8 m。取 3 处不同深度的岩屑开展了全岩矿物和 X - 衍射分析试验, 分析了全岩矿物组分和黏土矿物组份含量, 分析结果见表 1, 2。

表 1 T 井桑塔木组岩样全岩矿物分析  
Table 1 Rock mineral compositions of rock samples from T well Sangtamu formation

岩性	井段/m	矿物种类及含量/%					黏土矿物
		石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	总量/%
泥岩	6 240.0~ 6 246.8	30.2	0.9	10.3	11.7	7.5	39.4
		25.2	0.8	9.2	34.6	6.5	23.7
		31.8	2.5	10.5	20.2	6.0	29.0

表 2 T 井桑塔木组岩样黏土矿物相对含量分析数据表  
Table 2 Clay mineral relative content of of rock samples from T well Sangtamu formation

岩性	井段/m	黏土矿物相对含量/%						混层含量/%	
		S	I/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S
泥岩	6 240.0~ 6 246.8	-	52	26	6	16	-	25	-
		-	51	22	7	20	-	25	-
		-	54	22	6	18	-	20	-

注: S 表示蒙脱石; I 表示伊利石; K 表示高岭石; C 表示绿泥石类; C/S 表示绿/蒙混层; I/S 表示伊/蒙混层。

分析试验结果可知, 桑塔木组黏土矿物含量达到 30%。黏土矿物均以伊/蒙混层发育为特点, 含量

达到 50%，其次为伊利石、绿泥石和高岭石，其含量分别为 22%~26%，16%~20%及 6%。根据钻井液行业泥岩分类标准，奥陶系泥岩属于中硬~硬脆性泥岩。

由图 1 可知，钻井液未浸泡前桑塔木组泥岩结构致密，表面发育微裂缝和微孔，微裂缝和层理面定向排列，层理面中填充物为黏土矿物。

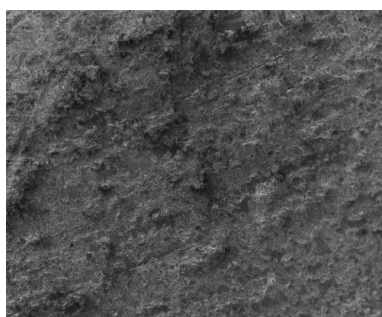
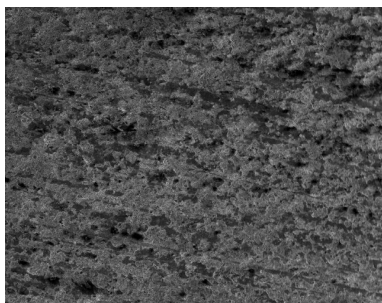


图 1 T 井钻井液浸泡前桑塔木组泥岩岩芯断面电镜扫描图  
Fig.1 Scanning electron microscope graphs of core cross-section of T well Sangtamu formation mudstone before drilling fluid soaking

### 3 试验方案设计

硬脆性泥岩普遍发育着裂缝、微裂缝及层理面，这些结构面在力学上表现为弱面，而岩石的强度往往受控于岩石中的弱面和外界流体的性质。本文试验着重研究弱面和钻井液浸泡对深部泥岩强度特征的影响规律，试样为桑塔木组 6 240.0~6 246.8 m 深度处硬脆性泥页岩(见图 2)。



图 2 西部某油田硬脆性泥岩岩芯  
Fig.2 Hard-brittle mudstone core of an oilfield in western China

### 3.1 试样准备

在全尺寸岩芯上标定初始方位，取芯过程中，岩芯轴线和初始垂直所取的岩芯 1 轴线按给定的 0°，30°，45°，60°，75°和 90°角度取芯(见图 3)，按照国际岩石力学试验标准制作成φ 25 mm×50 mm 的标准试样，进行烘干处理后，常温浸泡于现场所取钻井液。

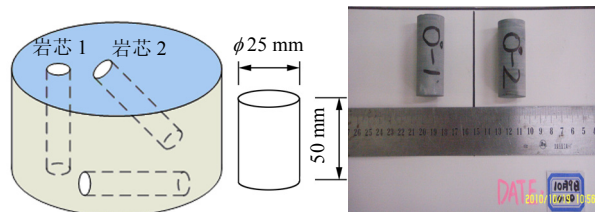


图 3 定向取芯示意图  
Fig.3 Sketches of orientational coring

钻井液浸泡对泥岩的影响主要体现在钻井液滤液的渗透作用，钻井液滤液渗透岩芯，产生 2 个方面的影响：(1) 钻井液滤液与泥岩内部的矿物发生化学反应，受控于滤液的 pH 值；(2) 钻井液滤液在岩芯内部微裂缝产生毛细管力，改变岩石的受力状态。本试验所采用钻井液的性能参数如表 3 所示。

表 3 试验用钻井液性能参数

Table 3 Performance parameters of testing drilling fluid				
密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	pH 值	高温高压失水量/ mL	界面张力/ (mN · m <sup>-1</sup> )	润湿角/ (°)
1.33	10	11	2.3	34.2

### 3.2 试验方案

试样设备采用 MTS - 815 岩石力学试验机，全套装置由高温高压三轴室、围压加压系统、轴向加压系统和数据自动采集控制系统四大部分组成。高温高压三轴室的设计指标为：围压为 140 MPa，可容纳岩样的尺寸为φ 25 mm；最大轴压为 1 500 kN。

将获取的标准岩芯放入现场采集的钻井液中，研究不同取芯夹角下钻井液浸泡对岩石强度特征的影响，具体的试验方案见表 4。

## 4 试验结果分析

### 4.1 钻井液浸泡下泥岩强度特征的影响

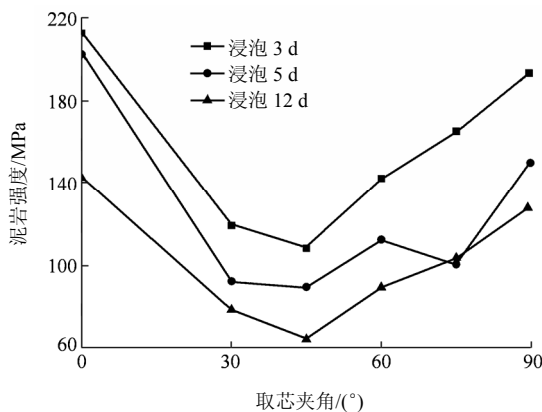
试验结果表明，在相同的取芯夹角和围压条件下，随着钻井液浸泡时间的增加，岩石的强度降低，

不同的取芯夹角导致岩石强度的降低程度各异，如围压为 30 MPa、取芯夹角 30°时，岩石强度从浸泡 3 d 的 119.3 MPa 降低到浸泡 12 d 的 78.6 MPa。在相同的钻井液浸泡时间和围压条件下，随着取芯夹角的增加，岩石强度先降低后增加，存在一个最小临界强度(见图 4(a))，如取芯夹角 45°时岩石强度比取芯夹角 0°时降低了 49.5%~54.7%。在相同取芯

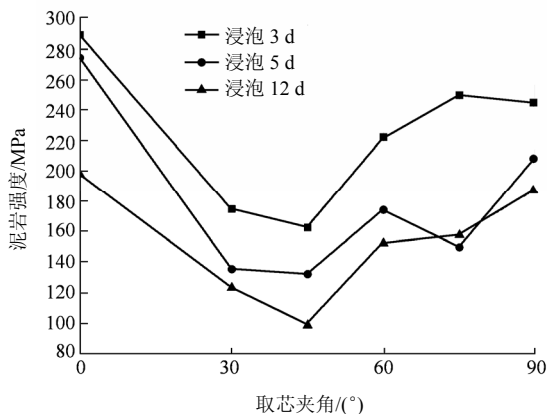
表 4 不同取芯夹角下泥岩钻井液水化试验方案

Table 4 Mudstone hydration experimental scheme of drilling fluid under different coring angles

取芯夹角/(°)	钻井液浸泡时间/d	围压/MPa
0	0, 3, 5, 12	30, 50
30		
45		
60	3, 5, 12	30, 50
75		
90		



(a) 围压 30 MPa



(b) 围压 50 MPa

图 4 围压 30, 50 MPa 下钻井液浸泡作用对泥岩强度的影响  
Fig.4 Effects of drilling fluid immersion on strength of mudstone under confining pressures of 30 and 50 MPa

夹角和钻井液浸泡时间作用下，随着围压的增加，岩石的强度增加；不同取芯夹角下强度增幅不同，如取芯夹角为 0°和 90°时，岩石强度增幅为 26.4%~39.2%，取芯夹角为 30°，45°，60°和 75°时，岩石强度增幅为 46.5%~52.6%(见图 4(b))。

从上述分析发现，钻井液浸泡、取芯夹角和围压对泥岩的强度降低起着不可忽视的作用，但作用机制不同，钻井液浸泡作用改变了岩石本身力学性质，而取芯夹角和围压则改变岩石内部的受力状态。

#### 4.2 钻井液浸泡对泥岩弹性模量的影响

分析图 5 可知，在相同的取芯夹角下，随着钻井液浸泡时间的增加，泥岩的弹性模量降低，如取芯夹角为 90°时，弹性模量从 35.6 GPa 降低到 29.48 GPa；在相同的钻井液浸泡时间下，随着取芯夹角的增加，岩石的弹性模量呈现先降低后增加的趋势。总体弹性模量变化趋势规律性较差。

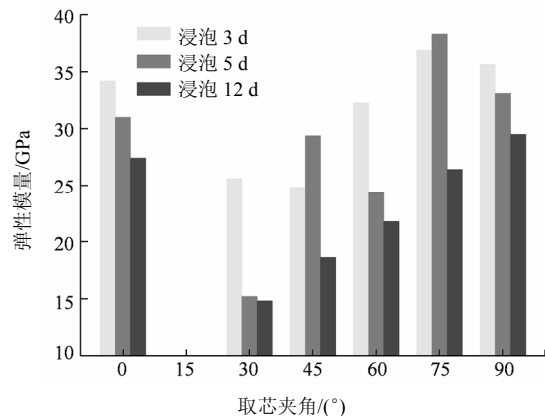


图 5 钻井液浸泡作用对泥岩弹性模量的影响

Fig.5 Effect of drilling fluid immersion on elastic modulus of mudstone

#### 4.3 钻井液浸泡对泥岩泊松比的影响

泥岩的泊松比也是反映岩石变形特征的一个重要参数。图 6 为钻井液浸泡作用对泥岩泊松比的影响。在相同的取芯夹角下，随着钻井液浸泡时间的增加，泥岩的泊松比增加；在相同的钻井液浸泡时间下，随着取芯夹角的增加，岩石的泊松比呈现先增加后降低的趋势。

#### 4.4 钻井液浸泡对泥岩强度参数 c, φ 值的影响

泥岩的强度受控于强度参数(黏聚力 c 和内摩擦角 φ)，在相同的取芯夹角条件下，随着钻井液浸泡时间的增加，泥岩的内摩擦角发生不同程度的降

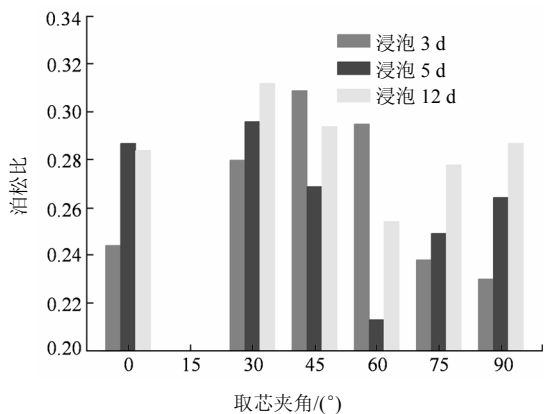


图 6 钻井液浸泡作用对泥岩泊松比的影响

Fig.6 Effect of drilling fluid immersion on Poisson's ratio of mudstone

低，降低程度与取芯夹角大小有关，如取芯夹角 0° 时，内摩擦角从 35.79° 降低到 28.05°；取芯夹角为 45° 时，内摩擦角降幅达到 44.3%；但取芯夹角 90° 时，内摩擦角出现增加，与试样内部结构和试验操作有关(见图 7)。

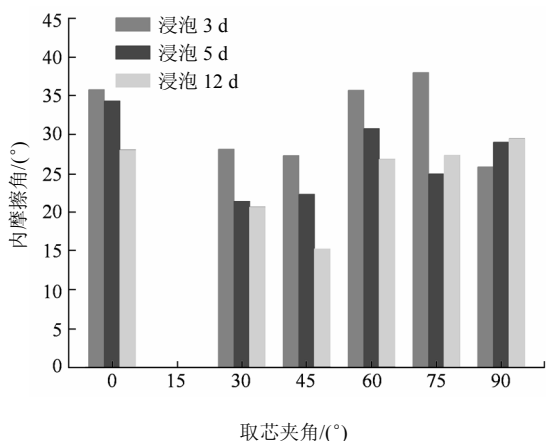


图 7 钻井液浸泡作用对泥岩内摩擦角的影响

Fig.7 Effect of drilling fluid immersion on internal friction angle of mudstone

泥岩的黏聚力  $c$  在钻井液浸泡作用下发生不同程度的降低，与内摩擦角相比，黏聚力降低变化规律性较强。在相同钻井液浸泡时间下，与取芯夹角 0° 和 90° 相比，取芯夹角 30°，45°，60° 和 75° 条件下泥岩黏聚力降低幅度较大，如浸泡时间为 3 d，黏聚力从 0° 时的 25.03 MPa 降低到 60° 时的 8.28 MPa，降幅达到 67.3%；但是，在取芯夹角为 30°，45°，60° 和 75° 时，泥岩黏聚力随钻井液浸泡时间增加变化幅度不大，这与内摩擦角的变化规律存在差异(见图 8)。

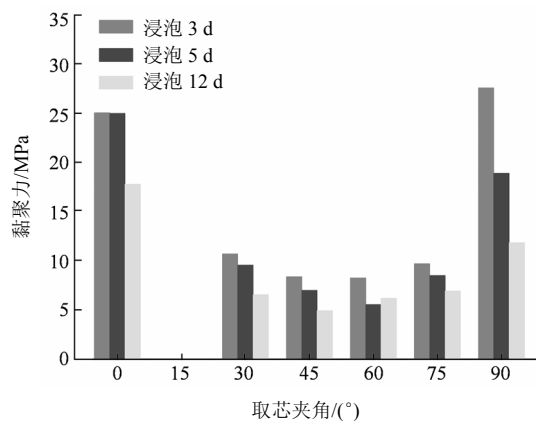


图 8 钻井液浸泡作用对泥岩黏聚力的影响

Fig.8 Effect of drilling fluid immersion on cohesion of mudstone

## 5 钻井液浸泡对泥岩强度特征影响机制分析

钻井液浸泡泥岩后，宏观力学参数发生不同程度的劣化，主要是钻井液的化学成分对泥岩矿物的溶蚀造成的。同时，钻井液界面性质的改变使岩石内部微裂缝的扩展和钻井液滤液改变层理面的摩擦性能。

### 5.1 钻井液界面性质的作用

在干燥情况下，泥岩的强度受取芯夹角和围压条件的影响。当泥岩浸泡于钻井液中，钻井液滤液沿层理面或裂隙进入岩石，将在微裂缝缝间产生毛细管力，改变缝尖的应力状态(见图 9)。

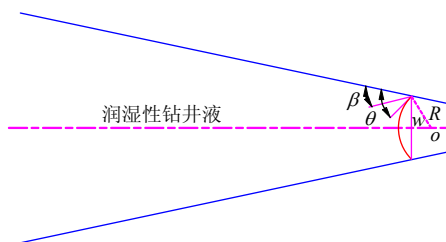


图 9 不同截面缝的毛细管力

Fig.9 Capillary pull of different intersection seams

由几何关系得知，钻井液为润湿性介质，缝尖毛细管力为

$$F = \frac{2\gamma \cos(\theta - \beta)}{w} \quad (1)$$

式中： $\gamma$  为液体界面张力， $w$  为裂缝宽度， $\beta$  为裂缝壁与毛细管力中心线的夹角， $\theta$  为润湿角。

裂缝毛细管力产生的应力强度因子为

$$K_1^\alpha = \frac{2\gamma\sqrt{\pi H} \cos\theta \cos(\theta - \beta)}{w} \quad (2)$$

式中： $H$ 为裂缝半长(mm)。

杨春和等<sup>[17]</sup>的研究结果表明，随着浸泡时间的增加，润湿角与时间呈对数关系：

$$\theta = A + B \ln t \quad (3)$$

式中： $A, B$ 均为润湿角试验模拟参数。

联立式(2)和(3)获得钻井液浸泡时间与裂缝缝尖应力强度的因子的表达式：

$$K_1^\alpha = \frac{2\gamma\sqrt{\pi H} \cos(A + B \ln t) \cos[(A + B \ln t) - \beta]}{w} \quad (4)$$

利用式(4)，研究钻井液浸泡时间对裂缝尖端应力强度因子的影响规律。

由图 10 可知，随着钻井液浸泡时间的增加，泥岩内部微裂缝缝尖应力强度因子增加，岩石临界断裂韧性降低，裂缝更容易扩展，这是泥岩强度降低的根本原因。从图 11 可知，钻井液浸泡前，岩石表面无裂缝(见图 11(a))；钻井液浸泡一段时间后，钻井液滤液促使岩石内部裂缝的扩展，泥岩表面呈现

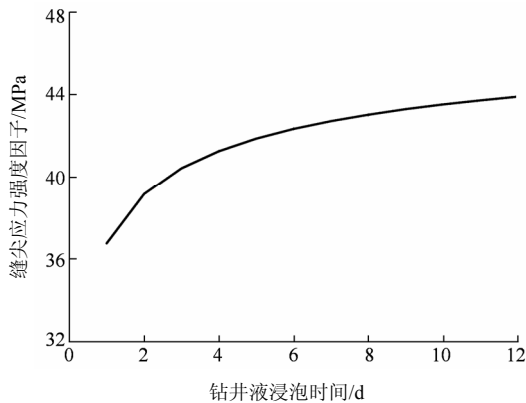
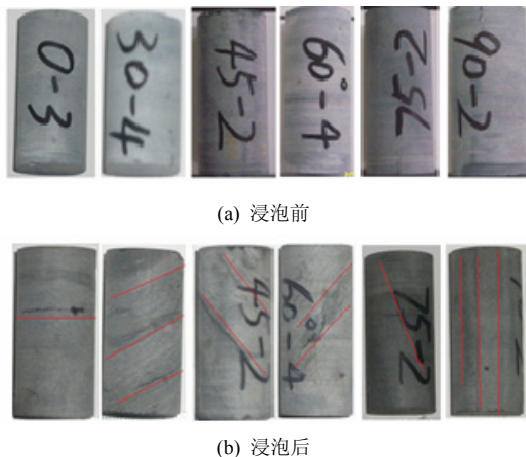


图 10 钻井液浸泡时间对缝尖应力强度因子的影响

Fig.10 Effect of drilling fluid soaking time on stress intensity factor of crack at tip of mudstone



(c) 岩芯破坏

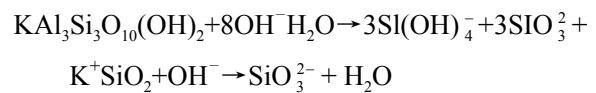
图 11 钻井液浸泡前、后泥岩岩芯对比状态

Fig.11 Comparison of mudstone core states before and after drilling fluid immersion

不同角度的裂缝(见图 11(b))，最终沿相应的裂缝面发生破坏(见图 11(c))。

### 5.2 钻井液滤液的润滑作用

随着钻井液浸泡时间的增加，钻井液滤液进入微裂缝，泥岩充填在层理面的伊利石和蒙脱石在碱性条件下与溶液中的离子发生反应：



上述化学反应的进行，改变了层理面填充物的矿物成分，改变裂缝面的摩擦性能，降低泥岩的整体强度。

## 6 结 论

本文开展了钻井液浸泡作用下深部泥岩的宏观力学试验，在试验结果的基础上，分析了钻井液浸泡下深部泥岩的强度特征变化规律和作用机制，获得了如下主要结论：

(1) 钻井液浸泡下，随取芯夹角增大，岩石强度先增后减，并存在临界强度，岩石强度降幅高达 49.5%~54.7%；随着围压增加，不同取芯夹角下岩石强度增幅不同，取芯夹角为 0°和 90°时岩石强度增幅较低，仅为 26.4%~39.2%。

(2) 泥岩的弹性模量随钻井液作用时间的增加而降低，随取芯夹角的增加呈现先增后减；泊松比变化规律则相反，由于泥岩内部结构的复杂性，其变化规律性较差。

(3) 泥岩的内摩擦角和黏聚力随钻井液作用时间的增加而降低，黏聚力变化规律性较强；0°和 90°取芯夹角下黏聚力降低幅度大，最高达 67.3%；其他情况下泥岩黏聚力变化幅度不大。

(4) 钻井液滤液的渗入导致泥岩内部裂缝缝尖应力强度因子增加、临界断裂韧性降低、裂缝扩展，

这是泥岩强度降低的根本原因。同时, 钻井液滤液改变了层理面填充物的矿物成分, 降低裂缝面的摩擦因数, 加剧了岩石强度的降低。

### 参考文献(References):

- [1] 陈 勉, 金 衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 19 - 30.(CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guangqing. Petroleum engineering rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2008: 19 - 30.(in Chinese))
- [2] 徐松林, 吴 文, 王广印, 等. 大理岩等围压三轴压缩全过程研究 I: 三轴压缩全过程和峰前、峰后卸围压全过程试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 763 - 767.(XU Songlin, WU Wen, WANG Guangyin, et al. Study on complete procedures of marble under triaxial compression I: testing study on complete procedure of triaxial compression and the processes of unloading confining at the pre-peak and post-peak[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 763 - 767.(in Chinese))
- [3] 葛修润. 岩石疲劳破坏的变形控制律、岩土力学试验的实时 X - 射线 CT 扫描和边坡坝基抗滑稳定分析的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 1 - 20.(GE Xiurun. Deformation control law of rock fatigue failure, real-time X-ray CT scan of geotechnical testing, and new method of stability analysis of slopes and dam foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 1 - 20.(in Chinese))
- [4] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P K, MARTIN C D. Modelling brittle failure of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6): 731 - 741.
- [5] SHARAN S K. Elastic-brittle-plastic analysis of circular openings in Hoek-Brown media[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(6): 817 - 824.
- [6] CHENEVERT M E. Adsorptive pressure of argillaceous rocks[C]// Proceedings of the 11th Symposium on Rock Mechanics. Berkeley, California: RollaRolla, 1969: 16 - 19.
- [7] YEW C H, CHENEVERT M E, WANG C L, et al. Wellbore stress distribution produced by moisture adsorption[J]. SPE Drilling Engineering, 1990, 5(4): 311 - 316.
- [8] 黄荣樽, 陈 勉, 邓金根, 等. 泥页岩井壁稳定力学与化学的耦合研究[J]. 钻井与完井液, 1995, (3): 15 - 25.(HUANG Rongzun, CHEN Mian, DENG Jingen, et al. Study on shale stability of wellbore by mechanics coupling with chemistry method[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 1995, (3): 15 - 25.(in Chinese))
- [9] YU M, CHEN G F, CHENEVERT M E, et al. Chemical and thermal effects on wellbore stability of shale[R]. SPE 71366, 2001: 1 - 11.
- [10] CHEN X, TAN C P. A study on wellbore stability in fractured rock masses with impact of mud infiltration[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 38: 145 - 154.
- [11] 金 衍, 陈 勉. 水敏性泥页岩地层临界坍塌时间确定方法[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(2): 12 - 14.(JIN Yan, CHEN Mian. A method for determining the critical time of wellbore instability at water-sensitive shale formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(2): 12 - 14.(in Chinese))
- [12] YANG C H, MAO H J, WANG X C. Microscopic structure and mechanical property when slate encountering water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2 090 - 2 098.
- [13] 金 衍, 陈 勉. 弱面地层的直井井壁稳定力学问题[J]. 钻采工艺, 1999, 22(3): 13 - 14.(JIN Yan, CHEN Mian. Mechanics model of sidewall stability of straight wells drilled through weakly consolidated formations[J]. Drilling and Production Technology, 1999, 22(3): 13 - 14.(in Chinese))
- [14] 金 衍, 陈 勉, 柳贡慧, 等. 弱面地层斜井井壁稳定性分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1999, 23(4): 33 - 35.(JIN Yan, CHEN Mian, LIU Gonghui, et al. Analysis of borehole stability of weak-face formation in directional wells[J]. Journal of The University Of petroleum: Science and Technology, 1999, 23(4): 33 - 35.(in Chinese))
- [15] JIN Y, QI Z L, CHEN M, et al. Time-sensitivity of the Kaiser effect of acoustic emission in limestone and its application to measurements of in-situ stress[J]. Petroleum Science, 2009, (6): 176 - 180.
- [16] LU Y H, CHEN M, JIN Y. Mechanical model of borehole stability for weak plane formation under porous flow[J]. Petroleum Science and Technology, 2010, doi: 10916466.2010.514583.
- [17] 杨春和, 冒海军, 王学潮, 等. 板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J]. 岩石力学, 2006, 27(12): 2 090 - 2 098.(YANG Chunhe, MAO Haijun, WANG Xuechao, et al. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2 090 - 2 098.(in Chinese))