

# 普光千佛崖含多类型弱面陆相页岩水化结构损伤特征研究

薄克浩<sup>1,2\*</sup>, 高书阳<sup>1,2</sup>, 金衍<sup>3</sup>, 陈军海<sup>1,2</sup>

1 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206

2 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206

3 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

\* 通信作者, bkh1615@163.com

收稿日期: 2025-02-16; 修回日期: 2025-03-10

中石化科技部重点攻关项目“多类型气藏钻完井关键技术研究”(P24231)和中石化科技部基础前瞻项目“陆相页岩地层水平井井壁失稳机理研究”(P24248)联合资助

**摘要** 川东北千佛崖组页岩水平段钻进井壁垮塌难成井问题, 严重制约着普光陆相页岩油气资源的高效开发。明确普光千佛崖组陆相页岩水化结构损伤特征, 是揭示其井壁失稳机理形成对应成井措施的重要前提。井下岩心观察发现, 普光千佛崖组陆相页岩较长井段同步发育层间页理和有机质富集的滑动镜面。为此, 分别以不含滑动镜面和含滑动镜面的千佛崖组陆相页岩为研究对象, 开展了页岩基础组构特征及理化特性分析, 探究了不同流体作用下(去离子水、白油、油基钻井液和水基钻井液)含多类型弱面页岩细观结构损伤特征, 同时结合所构建的考虑多类型弱面的页岩井壁稳定模型, 进行了井壁失稳机制分析讨论。研究结果表明: (1)普光千佛崖组陆相页岩以黏土矿物(近 60%)和石英为主, 黏土矿物中主要含伊利石和绿泥石; 内部平行层理方向微裂缝发育, 具有明显油水双亲特征, 总体水化分散特征相对偏弱。(2)去离子水和水基钻井液作用下页岩水化结构损伤特征明显; 白油和油基钻井液作用下, 不含滑动镜面和含滑动镜面的页岩内部均未出现明显的细观结构损伤, 说明现场油基钻井液具有较好的水化抑制性, 同时表明含多类型弱面页岩内部并未发生明显的有机质溶解现象; 在一定程度上也说明, 油基钻井液与千佛崖组页岩间的物理化学作用并不是主导其井壁垮塌的主控因素。(3)忽略千佛崖组页岩内多类型弱面结构发育的特征, 会很大程度低估页岩层井壁坍塌压力, 导致水平段失稳垮塌风险增加。研究结果深化了对普光千佛崖组陆相页岩水化结构损伤特征及失稳机理的认识, 为千佛崖组页岩水平段安全高效成井提供了技术支撑。

**关键词** 井壁失稳; 陆相页岩; 普光地区; 千佛崖组; 滑动镜面; 多类型弱面; 水化损伤

**中图分类号:** TE21; P618.13

## Study on hydration damage characteristics of continental shale with multi-type weak planes in Qianfoya Formation, Puguang Area

BO Kehao<sup>1,2</sup>, GAO Shuyang<sup>1,2</sup>, JIN Yan<sup>3</sup>, CHEN Junhai<sup>1,2</sup>

I SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China

引用格式: 薄克浩, 高书阳, 金衍, 陈军海. 普光千佛崖含多类型弱面陆相页岩水化结构损伤特征研究. 石油科学通报, 2025, 10(03): 496–510  
BO Kehao, GAO Shuyang, JIN Yan, CHEN Junhai. Study on hydration damage characteristics of continental shale with multi-type weak planes in Qianfoya Formation, Puguang Area. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(03): 496–510. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.03.012

2 Shale Oil and Gas Enrichment Mechanism and Effective Development State Key Laboratory, Beijing 102206, China

3 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Received: 2025-02-16; Revised: 2025-03-10

**Abstract** Wellbore instability of horizontal wells in Qianfoya Formation in northeast Sichuan seriously restricts the efficient development of the continental shale oil and gas resources in Puguang Area. Analyzing hydration damage characteristics of Qianfoya continental shale is the important basis for revealing wellbore collapse mechanism and supporting wellbore stability. The underground core observation shows that a large number of organic-rich slickensides and interlayer structures are developed in Qianfoya continental shale in Puguang Area. Therefore, the continental shale samples with and without slickenside structures are selected as the research objects respectively. In this study, the characteristics of mineral composition, microstructure and chemical-physical properties of Qianfoya shale are analyzed. Furthermore, the hydration damage effects of different fluids (i.e. deionized water, white oil, oil-based drilling fluid and water-based drilling fluid) on meso-structure of Qianfoya shale with multi-type weak planes are studied based on CT technology. In addition, the analysis and discussion about wellbore instability mechanism of Qianfoya shale in Puguang are conducted based on the developed wellbore stability model considering the influence of multi-type weak-plane structures. The results show that: (1) The Qianfoya continental shale in Puguang Area is mainly composed of quartz and clay minerals (nearly 60%) which is dominated by illite and chlorite. The micro fractures parallel to the bedding plane are well developed in Qianfoya shale with the wettability of water-wet and oil-wet. And the overall hydration dispersion of shale is relatively weak. (2) The hydration damage characteristics of shales immersed in deionized water and water-based drilling fluid are obvious. On the contrary, the hydration damage effects of white oil and oil-based drilling fluid on meso-structure of shale samples with and without organic-rich slickensides are not obvious. It indicates that the oil-based drilling fluid has good performance in hydration inhibition and there is no obvious organic matter dissolution in the shale with multi-type weak planes. To a certain extent, it can be concluded that the physicochemical interaction between oil-based drilling fluid and Qianfoya shale is not the main factor leading to the wellbore collapse. (3) Ignoring the characteristics of multi-type weak-plane structures in Qianfoya shale will underestimate wellbore collapse pressure and result in an increased risk of horizontal wells instability. The research results deepen the understanding of the hydration damage characteristics and wellbore instability mechanism of Qianfoya continental shale in Puguang Area and provide theoretical support for the horizontal well construction in Qianfoya shale formation.

**Keywords** wellbore instability; continental shale; Puguang Area; Qianfoya Formation; slickenside; multi-type weak planes; hydration damage

**DOI:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.03.012

## 0 引言

川东北普光地区普陆页1井的高产工业气流显示(试获日产气  $10.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ),实现了普光气田新层系、新类型天然气勘探的重大突破,揭示了川东北地区侏罗系千佛崖组具备形成大规模陆相页岩气藏的可能<sup>[1-2]</sup>。目前,普光地区千佛崖陆相页岩气已实施水平井6口,但在采用油基钻井液钻进水平井段千佛崖组页岩地层时,均出现了严重垮塌问题,导致成井困难,严重制约了千佛崖陆相页岩油气资源的开发。厘清普光千佛崖组陆相页岩水化结构损伤特征,是揭示其井壁失稳机理进而形成对应成井措施的重要前提。

目前国内外学者采用各种无损探伤测试手段,针对不同地区泥页岩水化前后结构的损伤演化特征,开展了大量研究工作<sup>[3-25]</sup>。石秉忠等人<sup>[3-4]</sup>以川西地区须家河组三段泥页岩为研究对象,采用CT扫描成像技术,揭示了泥页岩水化过程中微裂纹萌生、扩展、分

叉、归并、重分叉、再扩展、贯通至宏观破坏的演化过程,认为自吸水化产生次生裂缝破坏是硬脆性泥页岩地层井壁失稳的主要原因之一。林永学等人<sup>[5]</sup>以涪陵龙马溪页岩为研究对象,基于CT层析成像技术,探究了常温常压环境内不同流体作用下页岩微裂缝扩展规律,包括去离子水、KCl-聚合物钻井液、水基钻井液和油基钻井液,发现不同流体浸泡下页岩的细观结构损伤具有明显差异性。马天寿等<sup>[6]</sup>、贾利春等<sup>[7]</sup>、高书阳等人<sup>[8]</sup>也先后以龙马溪组页岩为研究对象,利用CT扫描成像法,分析了常温常压环境页岩不同水化阶段的细观结构损伤特征。Wang等人<sup>[9]</sup>借助CT扫描成像技术,发现浸泡围压环境对龙马溪页岩水化微裂纹演化特征具有显著影响。Zhang等人<sup>[10]</sup>以Mancos页岩为研究对象,利用CT扫描成像技术,对三维条件下页岩水化微裂纹演化过程进行了分析。卢运虎等<sup>[11-12]</sup>以四川宜宾市珙县龙马溪组页岩为例,采用热场发射环境扫描电镜,探究了高温环境去离子水作用下页岩

微观结构变化特征,实验发现温度的增加会加速页岩内部结构的损伤。薛华庆等人<sup>[13]</sup>以重庆市巫溪地区龙马溪组页岩为研究对象,利用场发射扫描电镜,对常温常压环境蒸馏水作用下页岩内无机矿物和有机质微观结构的演化特征开展了研究,研究发现水化作用对页岩中有机质的主体形态和位置没有影响,损伤主要由无机矿物、有机质与无机矿物之间的裂缝衍生、延伸、扩展导致。隋微波等人<sup>[14]</sup>以四川彭水、自贡及涪陵和长庆地区页岩为研究对象,采用场发射扫描电镜,对常温常压环境蒸馏水作用下页岩内微观结构的变化进行了定点观察,研究发现高含量的蒙脱石及碳酸盐类矿物有助于水化作用形成溶蚀孔及矿物颗粒的松动和脱落,水化作用未改变有机质孔隙结构。另外,吴小林等<sup>[15]</sup>、王光兵等<sup>[16]</sup>、王萍等<sup>[17]</sup>、钱斌等<sup>[18]</sup>还采用超声波透射、核磁共振等技术手段,对昭通龙马溪、长7层等地层泥页岩水化结构损伤特征开展了实验评价工作。总体而言,前期研究多聚焦于揭示常温常压环境去离子水作用下页岩的结构损伤特征,对于原位高温环境不同流体作用下页岩的微观结构损伤特征仍不清晰,尤其对于本文所关注的普光地区千佛崖组含多类型弱面(发育层间页理和有机质富集的滑动镜面)页岩而言,相关研究更鲜有涉及。

为系统揭示普光千佛崖组陆相页岩水化结构损伤特征及影响机理,本文首先开展X射线衍射、热滚回收、线性膨胀、润湿性测试系列实验,明确页岩基础组构特征及理化特性,然后分别以不含滑动镜面和含滑动镜面的千佛崖组页岩为研究对象,利用CT扫描成

像技术,对高温环境不同流体作用下(去离子水、白油、油基钻井液和水基钻井液)页岩的微观结构损伤特征进行研究,同时结合所构建的考虑多类型弱面的页岩井壁稳定模型,对页岩水平段井壁失稳机制进行分析讨论。

## 1 实验样品、仪器及方法

### 1.1 实验样品

#### 1.1.1 页岩岩样

普光地区千佛崖组自下而上分为千一段、千二段和千三段3个岩性段,普陆页1井在千一段取得页岩气重大勘探突破<sup>[1]</sup>,而目前采用油基钻井液钻进发生严重垮塌导致难成井的井段也主要在千一段。据前期研究,千一段页岩有机碳含量一般介于0.1%~2.88%,镜质组反射率分布在1.90%~2.10%,成熟度整体在高成熟—过成熟演化阶段<sup>[2]</sup>。通过对千佛崖组易垮塌层段井下岩心观察发现,普陆7井和普陆8井千一段页岩较长层段同步发育层间页理和有机质富集的滑动镜面多种类型弱面结构,如图1中红框所示区域。为探究含多类型弱面页岩水化结构损伤特点,本文分别选取不含滑动镜面和含滑动镜面的岩样为研究对象,开展系列实验评价,实验岩样取自普陆7井千一段灰黑色页岩,样品埋藏深度介于2953~2965 m。

#### 1.1.2 作用流体

实验流体分别采用去离子水、3#白油、水基钻井液和油基钻井液,目的在于通过表征不同流体作用下



图1 普陆7井千一段页岩井下岩心

Fig. 1 Qianfoya continental shale in Well PL-7

不同类型弱面的结构损伤效应,揭示普光千佛崖组含多类型弱面页岩结构损伤的作用机制。其中,水基钻井液配方为(常用高性能水基钻井液):1.5%膨润土+0.5%SMS-19+2%SMYZ-1+2.5%SMART+3.5%SMFF-3+4%SMFD-2+1%SMJH-1+0.3%XC;油基钻井液配方为(参照现场采用油基泥浆):3#白油+10%氯化钙盐水(油水比90:10)+3%乳化剂+1%润湿剂+2%增黏剂+3%氧化钙+4%有机土+3%降滤失剂+5%高效封堵剂+3%超细碳酸钙。

## 1.2 实验仪器及方法

### 1.2.1 实验仪器

主要实验仪器包括安东帕自动化多用途粉末X射线衍射仪XRDYNAMIC-500(光管电压和电流分别为20 kV至60 kV和2 mA至50 mA)、全量程接触角测量仪DSA-100、高温高压页岩膨胀测试仪、高温滚动加热炉、日本电子公司JSM-7200F型场发射扫描电子显微镜、美国通用电气公司高精度工业CT-Phoenix V/tome/x m300。

### 1.2.2 实验方法

#### (1) 岩石矿物组成分析实验

依据行业标准《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》(SY/T 5163-2018)<sup>[26]</sup>,首先将岩样在低于60 °C条件下进行烘干,然后利用粉碎机粉碎岩样并研磨筛选粒径小于40 μm或手指搓捏无颗粒感的粉末,利用安东帕X射线衍射仪XRDYNAMIC-500进行页岩岩样全岩矿物及黏土矿物组分分析。

#### (2) 页岩微观结构电镜扫描(SEM)实验

参考行业标准《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》(SY/T 5162-2021)<sup>[27]</sup>,选取不含滑动镜面和含滑

动镜面的2种类型页岩岩样为研究对象,并分别以平行层理方向和垂直层理方向的自然断面为观察面,根据标准要求制取测试样品,利用JSM-7200F型场发射扫描电子显微镜进行微观结构表征。

### (3) 理化性能评价实验

根据行业标准《钻井液测试泥页岩理化性能试验方法》(SY/T 5613-2016)<sup>[28]</sup>,分别利用高温高压页岩膨胀测试仪和高温滚动加热炉,对去离子水作用24 h条件下页岩岩样的水化膨胀率和分散性进行了测试评价。

### (4) 润湿性评价实验

参考行业标准《油藏岩石润湿性测定方法》(SY/T 5153-2017)<sup>[29]</sup>和国家标准《玻璃表面疏水污染物检测接触角测量法》(GB/T 24368-2009)<sup>[30]</sup>,基于滴定法利用全量程接触角测量仪,分别测试了去离子水和3#白油在页岩岩样平行层理面和垂直层理面上的接触角。

### (5) 页岩水化细观结构损伤CT扫描实验

选取不含滑动镜面和含滑动镜面的页岩岩样,参照行业标准《岩石三维孔隙结构测定方法第1部分:CT扫描法》(SY/T 7410.1-2018)<sup>[31]</sup>,利用美国通用电气公司高精度工业CT,评价不同流体作用(去离子水、白油、水基钻井液和油基钻井液)前后岩样细观结构损伤变化特征。其中,流体—岩样耦合作用实验条件为95 °C浸泡48 h。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 千佛崖组陆相页岩基础组构及理化特征

#### 2.1.1 页岩组构特征

##### (1) 页岩矿物组成

普光千佛崖灰黑色页岩全岩矿物及黏土矿物相对含量测试结果如图2和图3所示。

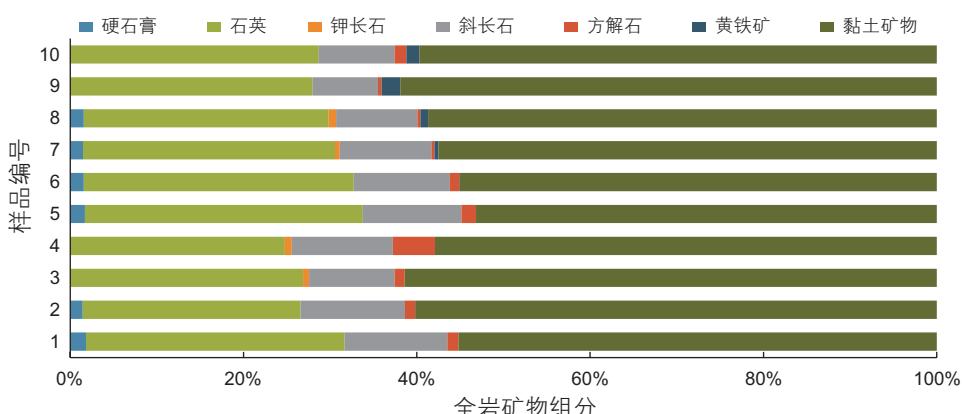


图2 页岩全岩矿物组分分布

Fig. 2 Rock mineral contents of Qianfoya shale

从图 2 和图 3 中可以看出, 普光千佛崖组陆相页岩以石英、斜长石和黏土矿物为主, 石英和斜长石总体含量分布在 35%~45%, 黏土矿物含量相对较高接近 60%, 主要为伊利石、伊/蒙混层、绿泥石和高岭石, 其中伊利石平均含量在 45% 左右, 伊/蒙混层平均含量为 26% 左右, 伊/蒙混层比平均约 15%。千佛崖组

页岩岩样黏土矿物中无水化膨胀性较强的蒙脱石, 但含有一定量的伊/蒙混层, 说明岩样整体水敏性可能不强, 但具有一定的水化膨胀潜力。

## (2) 页岩微观结构特征

图 4 和图 5 分别为滑动镜面岩样和非滑动镜面岩样平行和垂直层理的自然断面微观结构电镜扫描结果。

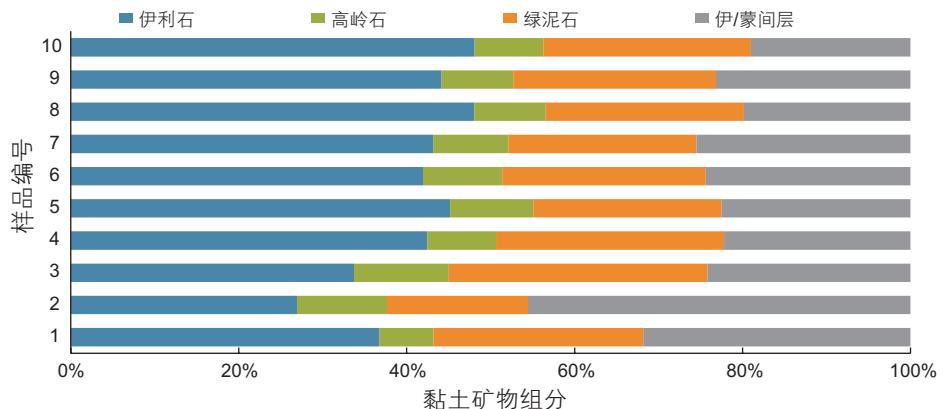
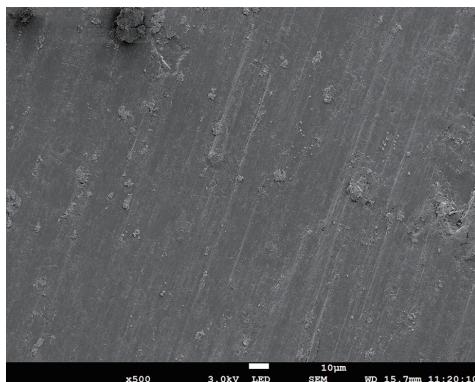
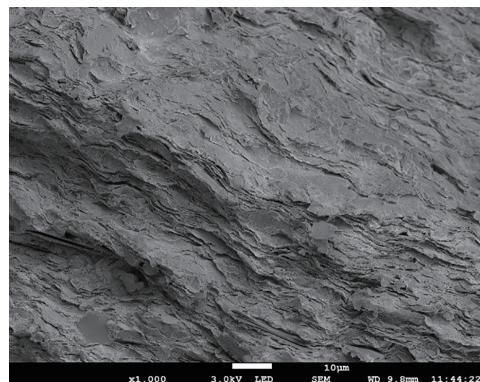


图 3 页岩黏土矿物相对含量分布

Fig. 3 Clay mineral contents of Qianfoya shale



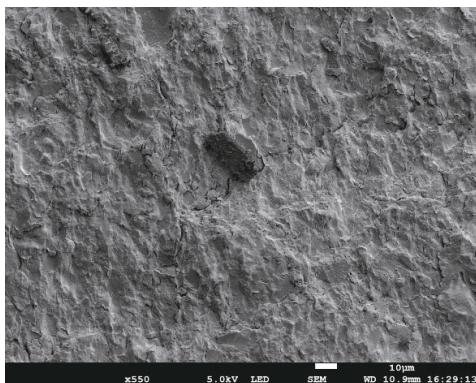
(a) 平行层理断面微观结构(滑动镜面断面)



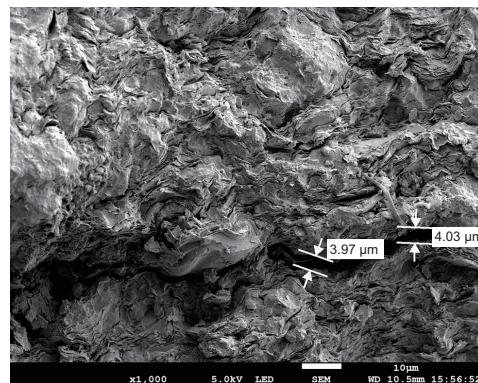
(b) 垂直层理断面微观结构

图 4 平行层理和垂直层理自然断面电镜扫描图像(滑动镜面岩样)

Fig. 4 SEM photographs of natural surfaces parallel and perpendicular to bedding plane (shale samples with slickenside structure)



(a) 平行层理断面微观结构(层间页理断面)



(b) 垂直层理断面微观结构

图 5 平行层理和垂直层理自然断面电镜扫描图像(非滑动镜面岩样)

Fig. 5 SEM photographs of natural surfaces parallel and perpendicular to bedding plane (shale samples without slickenside structure)

从图 4 和图 5 中可以看出, 页岩岩样的滑动镜面比较光滑平整, 表面分布有多条平行擦痕, 而岩样的层间页理断面表面较为粗糙; 另外, 从垂直层理的自然断面电镜扫描结果来看, 无论是滑动镜面岩样还是非滑动镜面岩样, 均发育大量平行于层理方向且缝宽达微米尺度的裂缝, 微裂缝的长度可达几十甚至上百微米。

### 2.1.2 页岩理化特性

普光千佛崖组页岩在去离子水作用 24 h 条件下水化膨胀率变化情况如图 6 所示。从图 6 中可以看出,

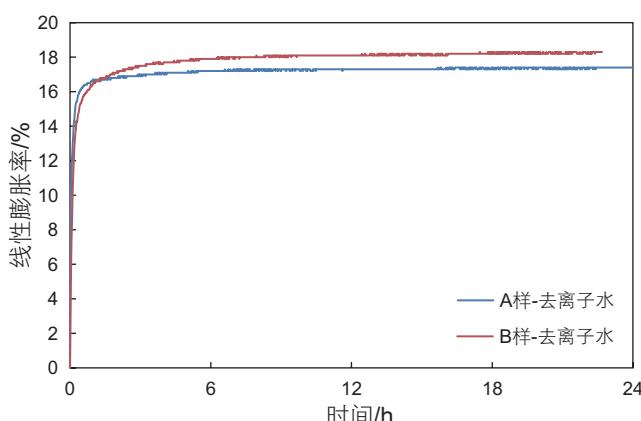


图 6 普光千佛崖组页岩水化线性膨胀率

Fig. 6 Linear hydration expansion of Qianfoya shale in Puguang area

表 1 普光千佛崖组页岩水化分散性测试结果

Table 1 Hydration dispersion of Qianfoya shale in Puguang area

样品编号	实验条件	热滚前重量/g	热滚后重量/g	回收率/%	平均回收率/%
1 <sup>#</sup>	去离子水浸泡	15.15	14.26	94.13	
2 <sup>#</sup>	95 °C, 24 h	15.21	14.17	93.16	94.53
3 <sup>#</sup>		15.19	14.63	96.31	

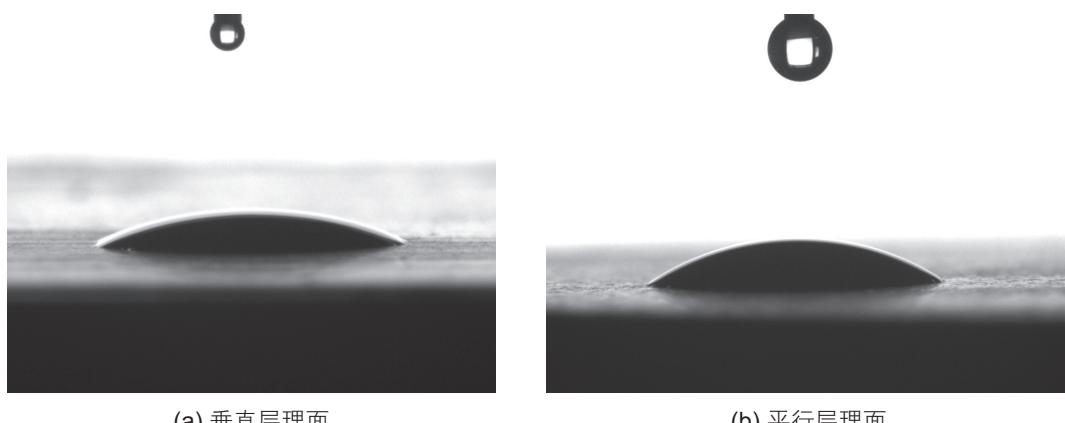


图 7 去离子水在页岩垂直层理面和平行层理面润湿性能

Fig. 7 Wettability of distilled water on shale surfaces parallel and perpendicular to bedding plane

页岩岩样在与去离子水接触后便迅速发生膨胀, 线性膨胀率在 2 h 内便接近峰值, 而后水化膨胀率缓慢增加, 最终去离子水作用下的千佛崖组页岩线性膨胀率维持在 17% 左右, 表明岩样具有较强的水化膨胀特性。

表 1 为去离子水作用下千佛崖页岩热滚回收率测试结果。从表 1 中可以看出, 页岩岩样的热滚回收率介于 93.16%~96.31%, 平均滚动回收率为 94.53%, 说明页岩岩样的水化分散性较弱。

### 2.1.3 页岩润湿性质

图 7 和图 8 分别为去离子水和白油在页岩垂直层理面和平行层理面的润湿性测试结果。从图 7 和图 8 中可以看出, 在页岩垂直层理面, 去离子水润湿角为 38.8°, 白油基本呈现铺展状态; 在页岩平行层理面, 去离子水润湿角为 32.8°, 白油较短时间内即发生完全铺展; 总体而言, 普光千一段陆相页岩垂直和平行层理面润湿性能差异不大, 均表现较强的亲水亲油双亲特性, 且亲油特性更强, 说明千一段页岩对水基钻井液和油基钻井液滤液均具有较强的渗吸潜力。

## 2.2 不同流体作用下页岩水化结构损伤特征

### 2.2.1 宏观结构变化情况

图 9 和图 10 分别为不含滑动镜面岩样和含滑动镜面岩样在不同流体作用下宏观结构变化情况。从图 9

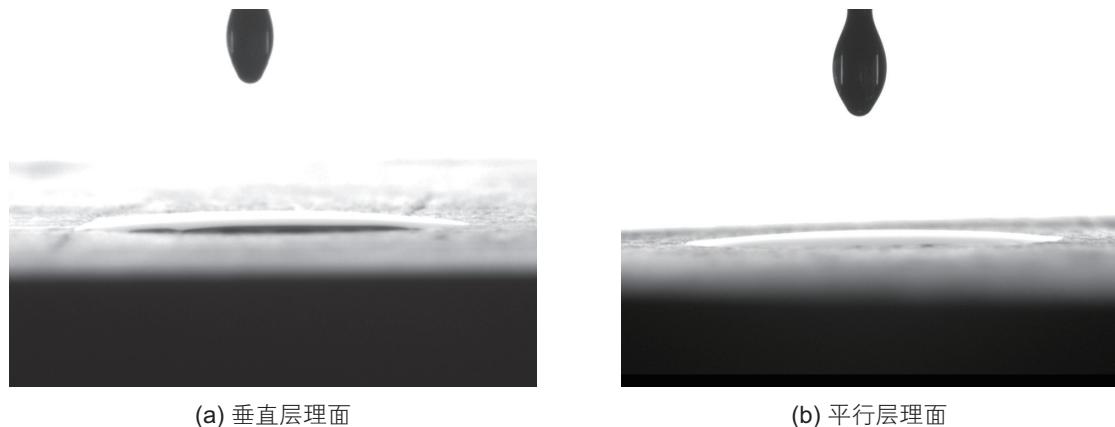


图 8 白油在页岩垂直层理面和平行层理面润湿性能

Fig. 8 Wettability of white oil on shale surfaces parallel and perpendicular to bedding plane



图 9 不同流体浸泡前后不含滑动镜面页岩宏观结构

Fig. 9 Macrostructure of shale without slickenside structure before and after immersing in different fluids



图 10 油基钻井液(左)和白油(右)浸泡后含滑动镜面页岩宏观结构

Fig. 10 Macrostructure of shale with slickenside structure immersed in oil-based drilling fluid and white oil

和图 10 中可以发现,对于不含滑动镜面页岩而言,在去离子水和油基钻井液作用下岩样均出现了剥落掉块现象,在水基钻井液作用下岩样沿中间发生了断裂分离,白油作用下的岩样宏观结构没有发生明显变化;对于含滑动镜面页岩而言,在白油和油基钻井液作用下岩样宏观结构均没有发生明显剥落分离现象。

### 2.2.2 细观结构损伤特征

去离子水、水基钻井液、白油和油基钻井液作用前后不含滑动镜面页岩岩样细观结构 CT 扫描结果分别如图 11 至图 14 所示,其中在三维重构成像视图中,

所标注裂缝体颜色由蓝至红对应裂缝体体积由小至大。

从图 11 至图 14 中可以看出,在与流体相互作用前,不含滑动镜面页岩岩样本身内部沿层理方向裂纹就较为发育;在高温条件下与去离子水相互作用后,页岩岩样内部衍生出大量新的裂纹,同时原生裂纹发生明显延伸扩展,其中右下部一条原生微裂纹在水岩作用下发生扩展贯通,导致出现剥落掉块现象;在高温条件下与水基钻井液作用后,不含滑动镜面页岩岩样内部也衍生出许多新的微裂纹,原生裂纹发生明显延伸扩展,缝宽缝长均明显增加,其中岩样中部一条

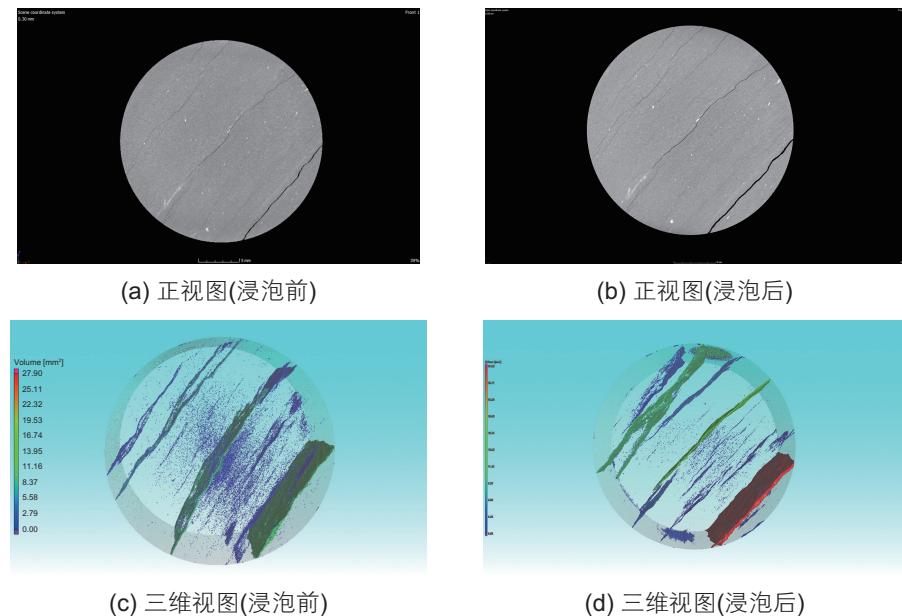


图 11 去离子水浸泡前后不含滑动镜面页岩细观结构CT扫描图像

Fig. 11 CT scanning images of shale without slickenside structure before and after immersing in distilled water

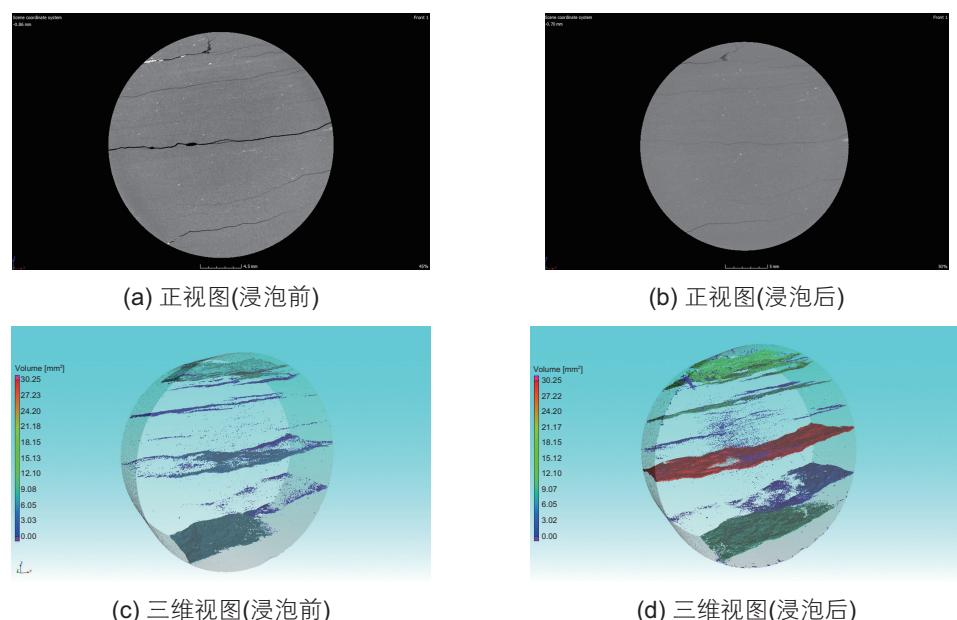


图 12 水基钻井液浸泡前后不含滑动镜面页岩细观结构CT扫描图像

Fig. 12 CT scanning images of shale without slickenside structure before and after immersing in water-based drilling fluid

原生裂纹发生扩展贯通，导致岩样从中部断裂分离；在高温条件下与白油作用后，不含滑动镜面页岩岩样内部原生微裂纹并未发现明显的延伸扩展，整体细观结构未见明显变化；在高温条件下与油基钻井液作用后，不含滑动镜面页岩岩样内部未发现大量新衍生微裂纹，原生裂纹也未见明显延伸扩展，仅右下部一条原生裂纹发生了扩展贯通，导致出现了部分剥落掉块。

通过对以上实验结果分析可以发现，对于不含滑

动镜面页岩而言，在高温条件下与去离子水和水基钻井液作用后，岩样展现出明显的细观结构损伤特征，而在白油和油基钻井液作用下，岩样内部细观结构损伤并不明显。这说明现场油基钻井液具有较好的抑制页岩发生水化损伤的能力，在一定程度上反映水化作用不是主导普光千佛崖组陆相页岩水平段井壁垮塌失稳的主控因素。

另外，由于普光千佛崖组陆相页岩发育多种类型

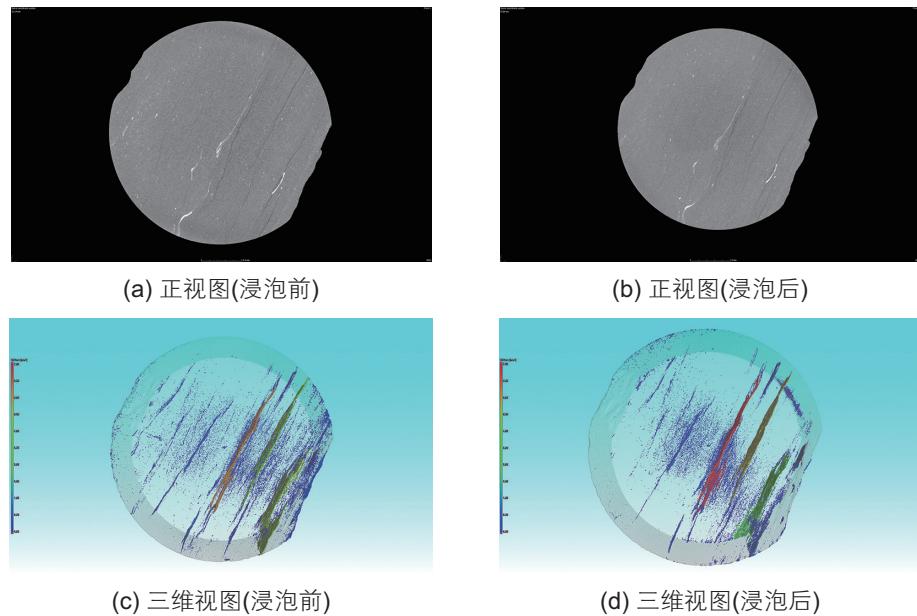


图 13 白油浸泡前后不含滑动镜面页岩细观结构 CT 扫描图像

Fig. 13 CT scanning images of shale without slickenside structure before and after immersing in white oil

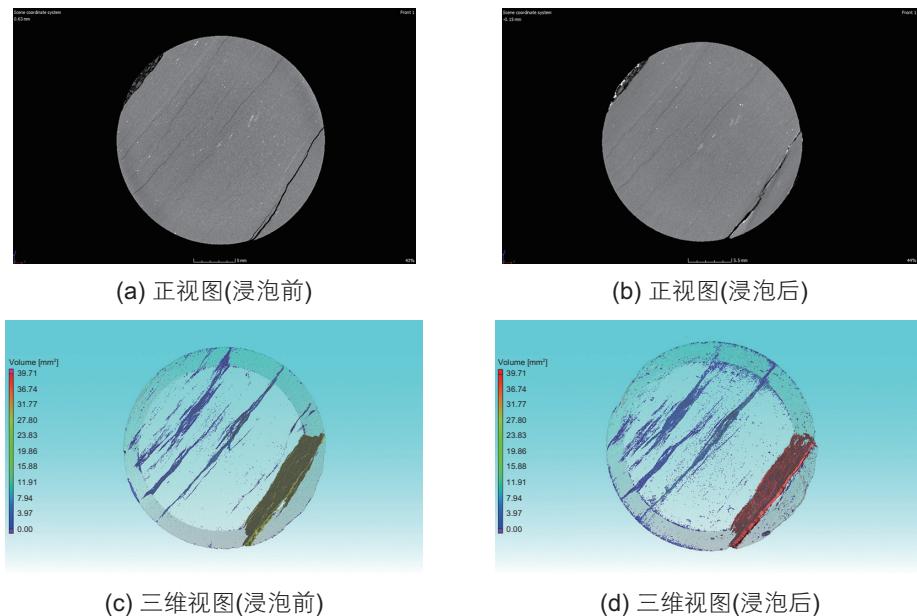


图 14 油基钻井液浸泡前后不含滑动镜面页岩细观结构 CT 扫描图像

Fig. 14 CT scanning images of shale without slickenside structure before and after immersing in oil-based drilling fluid

弱面结构，其中较长井段大量发育有机质富集的滑动镜面，因此亦有必要进一步探究钻井流体作用下含滑动镜面页岩细观结构损伤特征及影响机制。图 15 和图 16 分别为白油和油基钻井液作用前后含滑动镜面页岩岩样细观结构 CT 扫描结果。

从图 15 和图 16 中可以看出，含滑动镜面页岩岩样本身发育有沿层理方向分布的微裂纹；在高温条件下分别与白油和油基钻井液作用后，含滑动镜面页岩

岩样内部均未见大量新衍生微裂纹，原生微裂纹未出现明显延伸贯通现象，整体细观结构损伤未见明显变化。这说明白油和油基钻井液中的油相虽然很容易渗吸侵入页岩微裂缝中，但并未与滑动镜面表面富集的有机质发生明显溶解或溶胀现象。

### 2.3 多类型弱面陆相页岩井壁失稳分析讨论

通过前面页岩水化结构损伤特征实验研究发现，

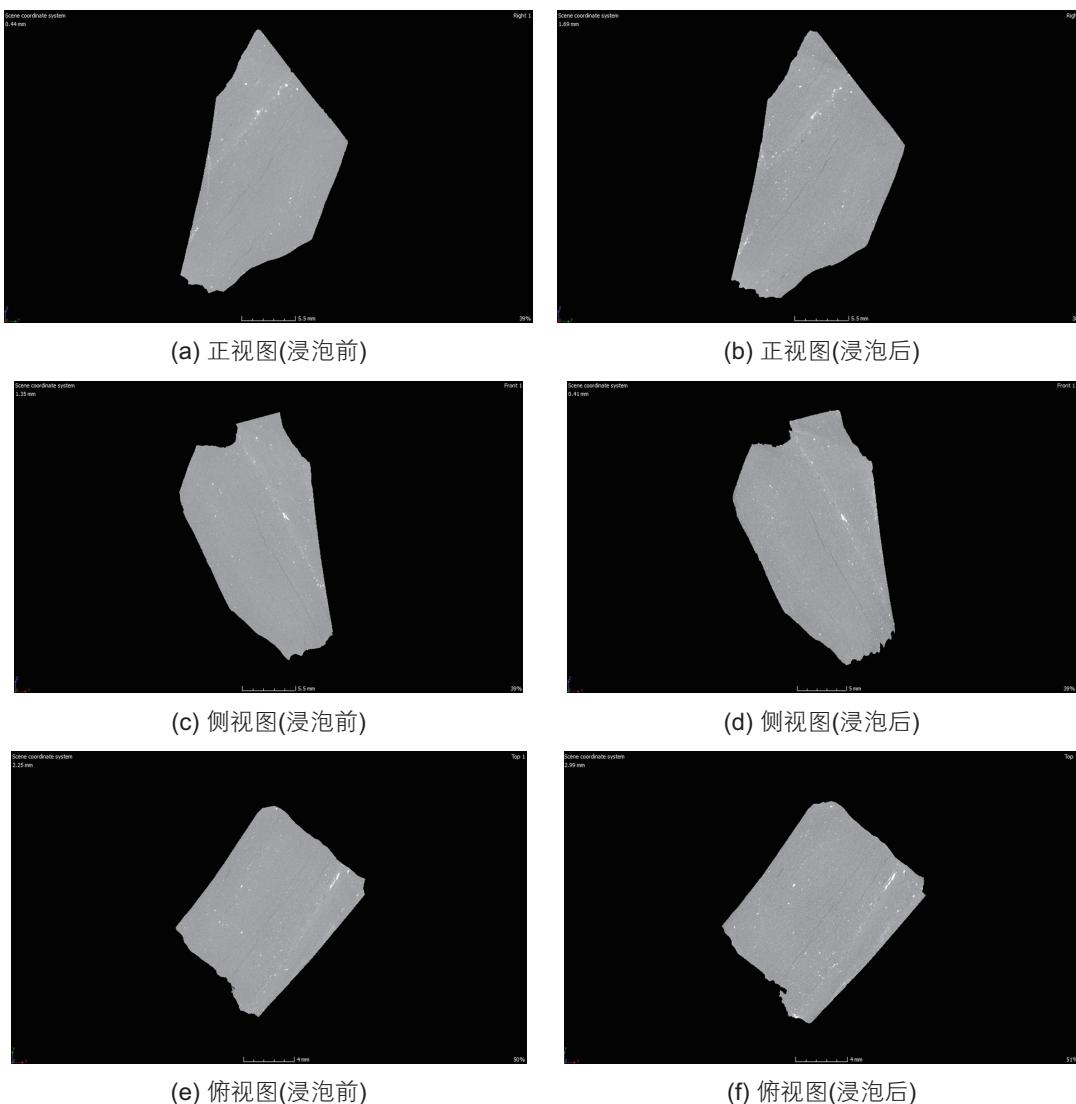


图 15 白油浸泡前后含滑动镜面页岩细观结构 CT 扫描图像

Fig. 15 CT scanning images of shale with slickenside structure before and after immersing in white oil

在油基钻井液作用下,页岩内层间页理弱面和有机质富集的滑动镜面均没有出现明显的结构损伤特征,在一定程度上反映,油基钻井液与千佛崖页岩间的物理化学作用不是导致其井壁失稳的主控因素。很多学者在对页岩井壁稳定问题进行研究时,发现页岩弱结构面的力学效应对井筒稳定性会有一定影响<sup>[32-40]</sup>,但目前相关研究多局限于层间页理弱面,鲜有研究兼顾考虑滑动镜面对页岩井壁稳定的影响。

因此,本文针对普光千佛崖组陆相页岩储层较长井段发育多类型弱结构面的特点,构建了含多类型弱面页岩井壁稳定模型,分析讨论了多类型弱面的力学效应对千佛崖陆相页岩水平井井筒稳定性的影响。

### 2.3.1 井壁稳定模型

含弱面页岩井筒的坍塌破坏一般存在基岩破坏和

弱面破坏两种形式。因此,在对含多类型弱面页岩进行井筒稳定性分析时,应分别以页岩基岩和页岩弱面为研究对象开展。

#### (1) 井周应力分布

井筒基岩的应力状态受原地应力状态和井眼轨迹影响,利用空间坐标转换方法(由远场地应力坐标系转换至大地坐标系,再转换至井筒坐标系)和线弹性叠加原理,可以确定井眼柱坐标系下的井壁基岩应力分布,具体应力分布模型详见前期研究<sup>[40]</sup>。

根据应力状态分析,井壁基岩 3 个主应力满足式(1),由于井壁基岩应力存在多种可能的主应力状态,需要对计算获得的 3 个主应力进行排序,以确定最大主应力、中间主应力和最小主应力,进而结合井壁基岩破坏准则进行井壁稳定分析。

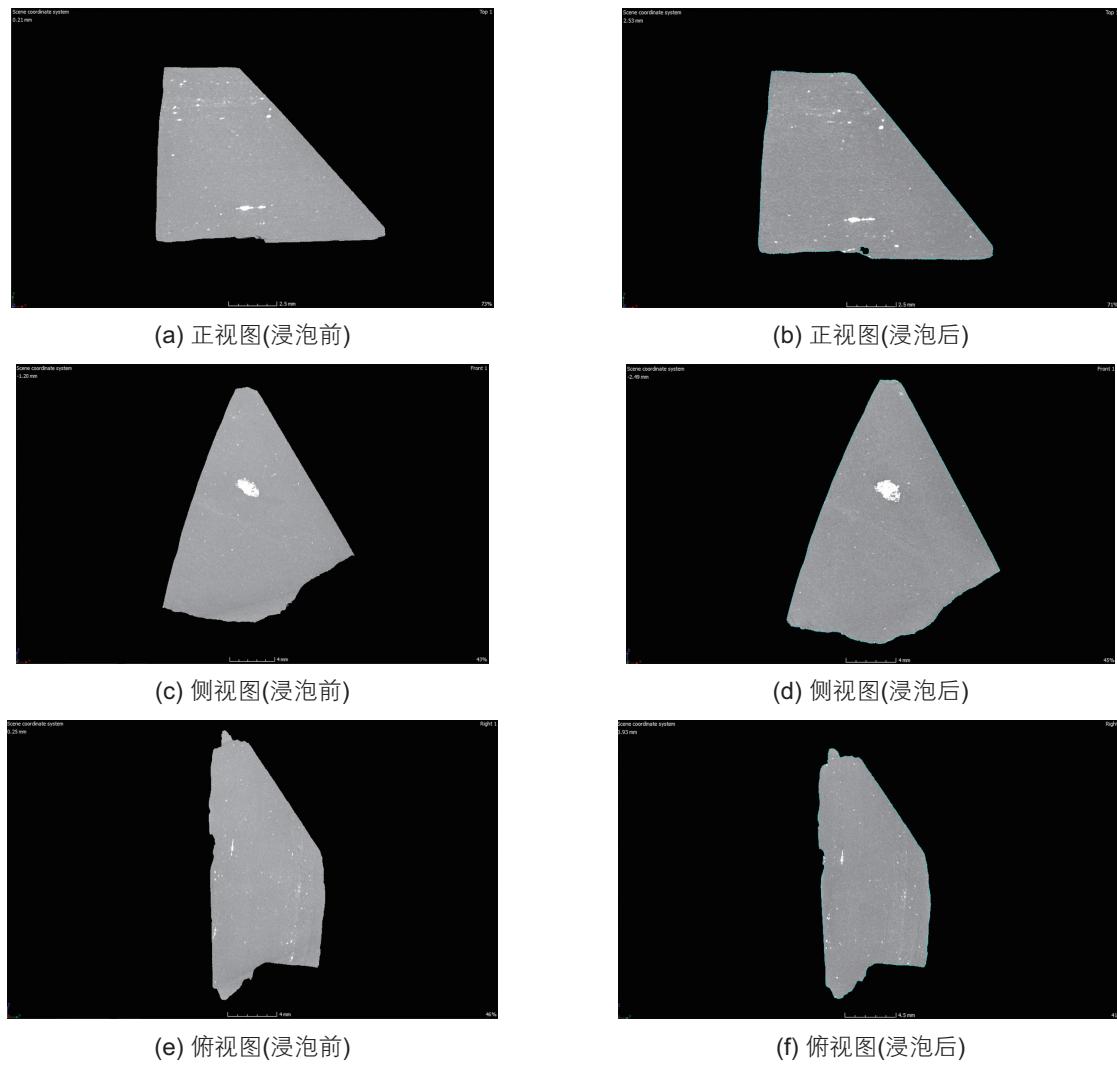


图 16 油基钻井液浸泡前后含滑动镜面页岩细观结构 CT 扫描图像

Fig. 16 CT scanning images of shale with slickenside structure before and after immersing in oil-based drilling fluid

$$\begin{cases} \sigma_i = \sigma_r \\ \sigma_j = \frac{(\sigma_\theta + \sigma_z)}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \\ \sigma_k = \frac{(\sigma_\theta + \sigma_z)}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_i$ ,  $\sigma_j$ ,  $\sigma_k$  分别表示井壁基岩 3 个主应力, MPa;  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{\theta z}$  分别为井眼柱坐标系下井壁基岩径向应力、周向应力、轴向应力和切应力, MPa。

井筒页岩弱面的应力状态与原地应力状态、井眼轨迹和弱面产状相关。通过将井筒柱坐标系下的基岩应力, 依次在井筒坐标系、大地坐标系、弱面坐标系下进行转换<sup>[32-40]</sup>, 即可获得弱面坐标系下的应力分布。根据柯西公式<sup>[34]</sup>弱面上的剪应力和法向应力满足式(2), 结合井壁页岩弱面破坏准则即可进行井壁

稳定分析。

$$\begin{cases} \sigma_{wi,n} = \sigma_{wi,x} \\ \tau_{wi} = \sqrt{\tau_{wi,xy}^2 + \tau_{wi,xz}^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, 当  $i=1$  时, 描述页理弱面结构应力状态; 当  $i=2$  时, 描述滑动镜面结构应力状态;  $\sigma_{wi,x}$ ,  $\tau_{wi,xy}$ ,  $\tau_{wi,xz}$  分别表示弱面坐标系下的弱面应力分量, MPa;  $\sigma_{wi,n}$ ,  $\tau_{wi}$  分别为弱面上的法向应力和剪应力, MPa。

#### (2) 强度破坏准则

对于普光含多类型弱面陆相页岩而言, 井壁围岩除了在基岩内部和层间页理弱面发生剪切破坏外, 也容易沿滑动镜面发生剪切破坏。根据摩尔库伦破坏模型, 含多类型弱面页岩井壁基岩、层间页理弱面和滑动镜面发生剪切破坏的条件, 如式(3)所示:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_3 + 2(C_0 + \sigma_3 \tan \varphi_0) \left( \sqrt{(\tan \varphi_0)^2 + 1} + \tan \varphi_0 \right) \\ \tau_{w1} = C_{w1} + \sigma_{w1,n} \tan \varphi_{w1} \\ \tau_{w2} = C_{w2} + \sigma_{w2,n} \tan \varphi_{w2} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $C_0$ ,  $C_{w1}$ ,  $C_{w2}$  分别为井壁基岩、页理弱面和滑动弱面内聚力, MPa;  $\varphi_0$ ,  $\varphi_{w1}$ ,  $\varphi_{w2}$  分别为井壁基岩、页理弱面和滑动弱面内摩擦角,  $^\circ$ ;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  分别为最大主应力和最小主应力, MPa;  $\sigma_{w1,n}$ ,  $\tau_{w1}$  分别为页理弱面法向应力和剪应力, MPa;  $\sigma_{w2,n}$ ,  $\tau_{w2}$  分别为滑动弱面法向应力和剪应力, MPa。

### 2.3.2 井壁稳定分析讨论

为探究弱面结构类型对页岩井壁稳定性的影响, 分别以不考虑弱面结构、考虑单类型弱面结构(仅含层间页理弱面)和考虑多类型弱面结构(发育层间页理弱面和滑动弱面)的页岩为研究对象, 基于上述模型进行了井壁稳定性分析。具体基础计算参数如下所述: 水平井水平段沿方位角  $350^\circ$  钻进, 地层深度 3390 m, 水平最大地应力 75 MPa, 水平最小地应力 68 MPa, 垂直地应力 71 MPa, 水平最大地应力方向北偏东近  $110^\circ$ , 页岩基岩内聚力取 15 MPa, 内摩擦角取  $35^\circ$ , 页岩层间页理弱面内聚力取 10 MPa, 内摩擦角取  $30^\circ$ , 页岩滑动弱面内聚力取 5 MPa, 内摩擦角取  $25^\circ$ 。

图 17 至图 19 分别为不考虑弱面结构、考虑单类型弱面结构(仅含层间页理弱面)和考虑多类型弱面结构(含层间页理弱面和滑动弱面)页岩的井壁坍塌压力当量密度分布云图, 其中, 云图周向坐标轴表示方位

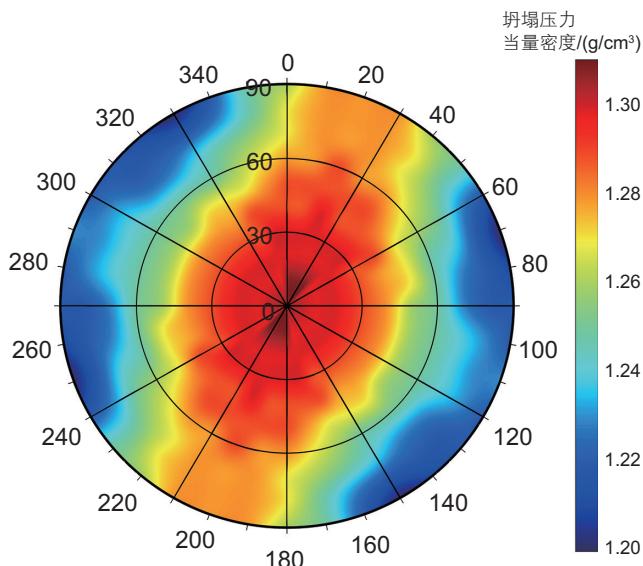


图 17 不考虑弱面结构的井壁坍塌压力当量密度分布图

Fig. 17 Wellbore collapse pressure distribution map with no consideration of weak plane

角变化, 径向坐标轴表示井斜角变化, 图例表示坍塌压力当量密度大小(单位为  $g/cm^3$ )。

从图 17 至图 19 中可以看出, 当不考虑页岩弱面结构时, 井壁坍塌压力计算结果呈现随井斜角增大而降低趋势, 而当考虑页岩弱面结构影响时, 井壁坍塌压力计算结果呈现随井斜角增加而增加趋势; 通过对上述 3 种模型所预测的对应方位水平段坍塌压力发现(不考虑弱面结构影响的坍塌压力:  $1.25 g/cm^3$ ; 仅考虑单类型弱面结构影响的坍塌压力:  $1.43 g/cm^3$ ; 考

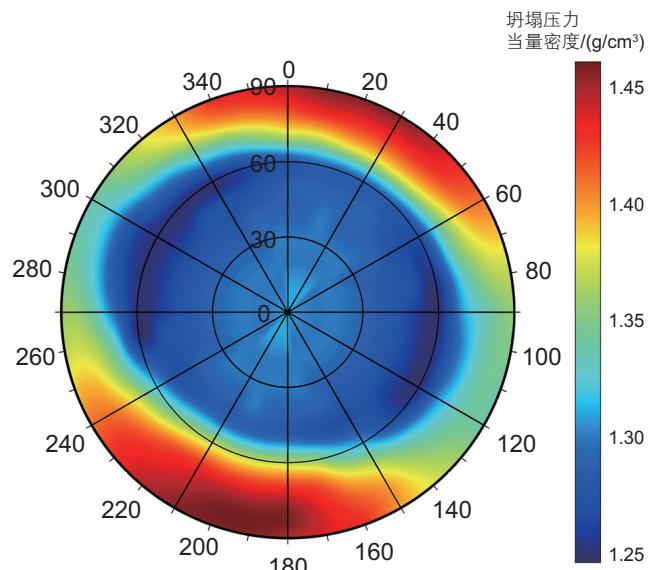


图 18 考虑单类型弱面结构的井壁坍塌压力当量密度分布图

Fig. 18 Wellbore collapse pressure distribution map with consideration of single type weak plane

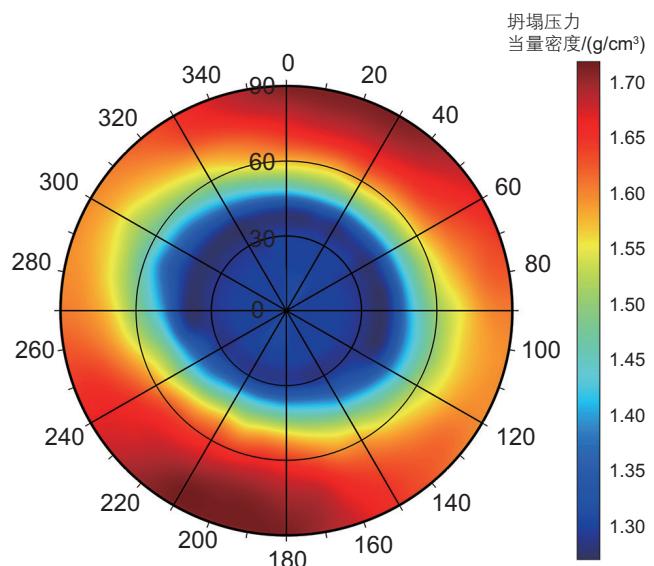


图 19 考虑多类型弱面结构的井壁坍塌压力当量密度分布图

Fig. 19 Wellbore collapse pressure distribution map with consideration of multitype weak planes

虑多类型弱面结构影响的坍塌压力:  $1.68 \text{ g/cm}^3$ ), 相对于考虑页岩多类型弱面结构而言, 不考虑弱面结构或仅考虑单类型弱面结构页岩井壁坍塌压力计算结果较低; 总体而言, 忽略普光千佛崖组陆相页岩多类型弱结构面发育的特点, 会低估井壁坍塌压力, 导致水平段钻井过程中失稳风险增加, 因此, 除了注重油基钻井液化学性能的维护, 同时也应更加注重密度的控制以实现力学稳定的维持。

### 3 结论

(1) 普光千佛崖组陆相页岩以石英、斜长石和黏土矿物为主, 黏土矿物含量较高近 60%, 黏土矿物中无水化膨胀性较强的蒙脱石, 但含有一定量的伊/蒙混层; 内部平行层理方向微裂缝发育, 具有层间页理和有机质富集的滑动镜面多种类型弱面结构; 垂直和平行层理面润湿性能差异不大, 表现较强的油水双亲特性, 且亲油特性更强, 对水相和油相滤液均具有较强渗吸潜力; 总体具有一定水化膨胀性、分散性较弱。

(2) 高温条件下去离子水和水基钻井液作用后, 普

光千佛崖组页岩水化结构损伤特征明显; 高温条件下白油和油基钻井液作用后, 仅含层间页理弱面的页岩和含多类型弱面(发育层间页理弱面和有机质富集的滑动镜面)的页岩内部均未出现明显的细观结构损伤, 说明现场油基钻井液具有较好的水化抑制性, 同时表明含多类型弱面页岩内部并未发生明显的有机质溶解或溶胀现象; 在一定程度上也反映, 油基钻井液与千佛崖组页岩间的物理化学作用并不是主导其井壁垮塌的主控因素。

(3) 考虑普光千佛崖组页岩较长井段大量发育层间页理弱面和滑动镜面的特点, 开展了含多类型弱面页岩的井壁稳定数值模拟分析, 发现了多类型弱面结构会显著降低水平段井筒围岩抵抗坍塌破坏的能力。基于常规井壁稳定模型指导钻井液密度选择时, 会很大程度低估页岩水平段井壁坍塌失稳风险, 故现场除了注重油基钻井液化学性能的维护, 同时也应更加注重密度的控制以实现力学稳定的维持。论文研究结果深化了对普光千佛崖组陆相页岩水化结构损伤特征及失稳机理的认识, 为千佛崖组页岩水平段安全高效成井提供了技术支撑。

### 参考文献

- [1] 王学军, 周勇水, 彭君, 等. 川东北普光地区侏罗系千佛崖组页岩气重大突破[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 52–61. [WANG X J, ZHOU Y S, PENG J, et al. Major breakthrough of shale gas in the Jurassic Qianfoya Formation in Puguang area in the northeastern Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5): 52–61.]
- [2] 李进, 王学军, 王睿, 等. 普光地区千佛崖组半深湖相页岩含气性特征及影响因素[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 736–743. [LI J, WANG X J, WANG R, et al. Gas-bearing characteristics and influencing factors of semi-deep lacustrine shale of Qianfoya Formation in Puguang Area[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(6): 736–743.]
- [3] 石秉忠, 夏柏如. 硬脆性泥页岩水化过程的微观结构变化[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(6): 28–34. [SHI B Z, XIA B R. Microstructure change of hard brittle shale in hydration process[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2011, 35(6): 28–34.]
- [4] 石秉忠, 夏柏如, 林永学, 等. 硬脆性泥页岩水化裂缝发展的CT成像与机理[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 137–142. [SHI B Z, XIA B R, LIN Y X, et al. CT imaging and mechanism of hydration fracture development in hard brittle shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 137–142.]
- [5] 林永学, 高书阳, 曾义金. 基于层析成像技术的页岩微裂缝扩展规律研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47(11): 1–7. [LIN Y X, GAO S Y, ZENG Y J. Study on the propagation law of shale micro-cracks in tomography technology[J]. Scientia Sinica(–Physica, Mechanica & Astronomica), 2017, 47(11): 1–7.]
- [6] 马天寿, 陈平. 基于CT扫描技术研究页岩水化细观损伤特性[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 227–233. [MA T S, CHEN P. Study on meso-damage characteristics of shale hydration based on CT scanning technology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 227–233.]
- [7] 贾利春, 张超平, 周井红. 结合CT技术的页岩水化损伤规律研究[J]. 断块油气田, 2017, 24(2): 214–217. [JIA L C, ZHANG C P, ZHOU J H. Study on hydration damage law of shale combined with CT technology[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(2): 214–217.]
- [8] 高书阳, 豆宁辉, 林永学, 等. 川渝地区龙马溪组页岩储层水化特征评价方法[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 20–26. [GAO S Y, DOU N H, LIN Y X, et al. Evaluation method of shale reservoir hydration characteristics of Longmaxi Formation in Chuanyu area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 20–26.]

- [9] WANG Q, LYU C, COLE D. Effects of hydration on fractures and shale permeability under different confining pressures: An experimental study[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 176: 745–753.
- [10] ZHANG S, SHENG J. Study of the propagation of hydration-induced fractures in mancos shale using computerized tomography[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2017, 95: 1–7.
- [11] 卢运虎, 梁川, 金衍, 等. 高温下页岩水化损伤的各向异性实验研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(11): 1–8. [LU Y H, LIANG C, JIN Y, et al. Anisotropic experimental study on shale hydration damage at high temperature[J]. *Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2017, 47(11): 1–8.]
- [12] LU Y, ZENG L, JIN Y, et al. Effect of shale anisotropy on hydration and its implications for water uptake[J]. *Energies*, 2019, 12: 1–20.
- [13] 薛华庆, 周尚文, 蒋雅丽, 等. 水化作用对页岩微观结构与物性的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 1075–1081. [XUE H, ZHOU S W, JIANG Y L, et al. Effect of hydration on microstructure and physical properties of shale[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 1075–1081.]
- [14] 隋微波, 田英英, 姚晨晨. 页岩水化微观孔隙结构变化定点观测实验[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 894–901. [SUI W B, TIAN Y Y, YAO C C. Fixed-point observation experiment of shale hydration microscopic pore structure change[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 894–901.]
- [15] 吴小林, 刘向君. 泥页岩水化过程中声波时差变化规律研究[J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29: 57–60. [WU X L, LIU X J. Study on the variation law of acoustic time difference during the hydration process of shale[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2007, 29: 57–60.]
- [16] 王光兵, 刘向君, 梁利喜. 硬脆性页岩水化的超声波透射实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(36): 60–66. [WANG G B, LIU X J, LIANG L X. Experimental study on ultrasonic transmission of hard brittle shale hydration[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(36): 60–66.]
- [17] 王萍, 屈展. 基于核磁共振的脆硬性泥页岩水化损伤演化研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 687–693. [WANG P, QU Z. Study on hydration damage evolution of brittle hard shale based on nuclear magnetic resonance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(3): 687–693.]
- [18] 钱斌, 朱炬辉, 杨海, 等. 页岩储集层岩心水化作用实验[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(4): 615–621. [QIAN B, ZHU J H, YANG H, et al. Core hydration experiment of shale reservoir[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(4): 615–621.]
- [19] 曾凡辉, 张蔷, 陈斯瑜, 等. 水化作用下页岩微观孔隙结构的动态表征[J]. *天然气工业*, 2020, 40(10): 66–75. [ZENG F H, ZHANG Q, CHEN S Y, et al. Dynamic characterization of microscopic pore structure of shale under hydration[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(10): 66–75.]
- [20] 刘敬平, 孙金声. 页岩气藏地层井壁水化失稳机理与抑制方法[J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(3): 25–29. [LIU J P, SUN J S. Mechanism and inhibition method of wellbore hydration instability in shale gas reservoirs[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2016, 33(3): 25–29.]
- [21] 刘向君, 熊健, 梁利喜. 龙马溪组硬脆性页岩水化实验研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(3): 178–186. [LIU X J, XIONG J, LIANG L X. Experimental study on hydration of hard brittle shale in Longmaxi Formation[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2016, 38(3): 178–186.]
- [22] WANG Y, LIU X, LIANG L, et al. Experimental study on the damage of organic-rich shale during water-shale interaction[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 74: 1–15.
- [23] WANG P, QU Z, CHARALAMPIDOU E. Shale hydration damage captured by nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2019, 40(8): 1129–1135.
- [24] 余致理, 郭高峰, 余恒, 等. 水化作用下页岩微观孔隙结构伤害特征[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 37(1): 44–50. [YU Z L, GUO G F, YU H, et al. Damage characteristics of shale microscopic pore structure under hydration[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2022, 37(1): 44–50.]
- [25] MA T, YANG C, CHEN P, et al. On the damage constitutive model for hydrated shale using CT scanning technology[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 28: 204–214.
- [26] 国家能源局. 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: SY/T 5163–2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [National Energy Administration. Analysis method for clay minerals and ordinary non-clay minerals in sedimentary rocks by the X-ray diffraction: SY/T 5163–2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.]
- [27] 国家能源局. 岩石样品扫描电子显微镜分析方法: SY/T 5162–2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. [National Energy Administration. Analytical method for rock samples by scanning electron microscope: SY/T 5163–2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.]
- [28] 国家能源局. 钻井液测试泥页岩理化性能试验方法: SY/T 5613–2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Energy Administration. Testing of drilling fluids-Test method of physical and chemical properties for shale: SY/T 5613–2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

- [29] 国家能源局. 油藏岩石润湿性测定方法: SY/T 5153-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Energy Administration. Test method of reservoir rock wettability: SY/T 5153-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
- [30] 中国国家标准化管理委员会. 玻璃表面疏水污染物检测 接触角测量法: GB/T 24368-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for hydrophobic contamination on glass by contact angle measurement: GB/T 24368-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.]
- [31] 国家能源局. 岩石三维孔隙结构测定方法 第 1 部分: CT 扫描法: SY/T 7410.1-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [National Energy Administration. 3D pore structure characterization of rocks-Part 1: CT scanning method: SY/T 7410.1-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.]
- [32] 金衍, 陈勉, 陈治喜, 等. 弱面地层的直井井壁稳定性力学模型[J]. 钻采工艺, 1999, 22(3): 13-14. [JIN Y, CHEN M, CHEN Z X, et al. Mechanics model of sidewall stability of straight wells drilled through weakly consolidated formations[J]. Drilling & Production Technology, 1999, 22(3): 13-14.]
- [33] 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 Y, CHEN M, LIU G H, et al. Analysis on borehole stability of weak-face formation in directional well[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1999, 23(4): 33-35.]
- [34] 丁立钦, 王志乔, 王瑜, 等. 层理性地层钻井稳定性分析模型[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(3): 1-9. [DING L Q, WANG Z Q, WANG Y, et al. Analysis model of borehole stability in bedding formations[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(3): 1-9.]
- [35] 曹文科, 邓金根, 蔚宝华, 等. 页岩层理弱面对井壁坍塌影响分析[J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 114-122. [CAO W K, DENG J G, YU B H, et al. Analysis on the influence of bedding shale weak planes on borehole caving[J]. CHINA Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 114-122.]
- [36] 陈平, 马天寿, 夏宏泉. 含多组弱面的页岩水平井坍塌失稳预测模型[J]. 天然气工业, 2014, 34(12): 87-93. [CHEN P, MA T S, XIA H Q. A collapse pressure prediction model of horizontal shale gas wells with multiple weak planes[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12): 87-93.]
- [37] 刘向君, 叶仲斌, 陈一健. 岩石弱面结构对井壁稳定性的影响[J]. 天然气工业, 2002, 22(2): 41-42. [LIU X J, YE Z B, CHEN Y J. Influence of rock weak plane texture on sidewall stability[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(2): 41-42.]
- [38] 刘志远, 陈勉, 金衍, 等. 多弱面地层水平井裸眼井壁垮塌量分析[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 102-107. [LIU Z Y, CHEN M, JIN Y, et al. Calculation model for borehole collapse volume of a horizontal openhole in multiple-weak-plane formation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 102-107.]
- [39] 马天寿, 陈平. 层理性页岩水平井井壁稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1375-1383. [MA T S, CHEN P. Analysis of wellbore stability for horizontal wells in stratification shale[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(4): 1375-1383.]
- [40] BO K, JIN Y, LU Y, et al. A quantitative evaluation method of anti-sloughing drilling fluid inhibition for deep mudstone[J]. Energies, 2022, 15(3): 1-21.

(编辑 杨雅露)

**第一作者及通信作者:** 薄克浩(1993 年—), 博士, 助理研究员, 主要从事复杂岩性地质力学特征与井筒流体作用机制、岩石力学与井壁稳定方面研究, bkh1615@163.com。