

# 基于连续划痕实验确定复杂地层岩石强度参数的方法研究

刘洪涛<sup>1,2</sup>, 薄克浩<sup>1,3</sup>, 金衍<sup>1,3</sup>, 卢运虎<sup>1,3\*</sup>, 朱金智<sup>2</sup>, 张震<sup>2</sup>, 张峰<sup>2</sup>

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 中国石油塔里木油田公司, 库尔勒 841000

3 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

\* 通信作者, luyh@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-04-15

国家自然科学基金面上项目(52074314)、国家自然科学基金石油化工联合基金重点支持项目(U1762215)和国家自然科学基金企业联合基金集成项目(U19B6003-05-03) 联合资助

**摘要** 岩石黏聚力和内摩擦角是进行井壁稳定和水力压裂研究的关键参数, 目前常通过多组标准岩样的压缩剪切破坏实验进行评价(常规压缩实验, 国际岩石力学学会标准)。但由于其制样要求复杂, 对于取样困难的复杂岩体强度参数评价并不适用。基于塑性破坏模式下尖、钝刀头破岩力学模型, 结合摩尔库伦破坏准则, 建立了基于刀头破岩载荷确定岩石黏聚力和内摩擦角的力学模型; 利用连续划痕实验设备, 通过对划痕顺序间干扰性、划痕位置间替代性及不同刮深划痕破岩模式进行研究, 形成了准确获得刀头破岩载荷曲线的划痕参数设置方法和划痕实验流程。分别利用新方法 with 常规三轴压缩法, 对中国西部某油田吉迪克组泥岩进行了强度参数评价, 对比发现两者测试结果基本保持一致, 证实了新方法是可靠的。新方法制样简单, 能够进行复杂岩性和结构的岩石强度参数测试; 同时, 实验过程中不破坏试件整体结构, 结果重复性强, 为研究水岩作用前后试样强度参数的测试提供了新手段。

**关键词** 强度参数; 连续划痕; 实验方法; 复杂岩体

## Determination of rock strength parameters during drilling based on continuous scratch tests

LIU Hongtao<sup>1,2</sup>, BO Kehao<sup>1,3</sup>, JIN Yan<sup>1,3</sup>, LU Yunhu<sup>1,3</sup>, ZHU Jinzhi<sup>2</sup>, ZHANG Zhen<sup>2</sup>, ZHANG Feng<sup>2</sup>

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 PetroChina Tarim Oilfield Company, Kuerle 841000, China

3 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

**Abstract** Rock cohesion strength and internal friction angle are the fundamental and important parameters of borehole stability and hydraulic fracturing research. The conventional method for obtaining the above rock strength properties is triaxial compression test standardized by the International Society of Rock Mechanics (ISRM). The rock mechanics parameters including compressive strength and elastic modulus can be obtained by applying a certain confining pressure to the specimen, and then gradually increasing the axial pressure until shear failure occurs in the rock sample. And because of the advantages of strong adaptability and accurate measurement, triaxial compression experiment method has been widely used. However, this method

引用格式: 刘洪涛, 薄克浩, 金衍, 卢运虎, 朱金智, 张震, 张峰. 基于连续划痕实验确定复杂地层岩石强度参数的方法研究. 石油科学通报, 2022, 04: 532-542

LIU Hongtao, BO Kehao, JIN Yan, LU Yunhu, ZHU Jinzhi, ZHANG Zhen, ZHANG Feng. Determination of rock strength parameters during drilling based on continuous scratch tests. Petroleum Science Bulletin, 2022, 04: 532-542. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.045

has high requirements for sample making and which will lead to rock sample breakage, so the sample can't be reused again. Because it is difficult to make standard samples of complex rock mass, this method is not suitable in complex study. In this paper, based on the mechanical model of rock scratching with sharp and blunt cutters in plastic failure mode, and combined with Mohr-Coulomb criterion, the mechanical model of rock cohesion strength and internal friction angle were established by using the force of rock breaking with cutters. Then, with the continuous scratch test device, the influence of the order, location and depth of the sharp and blunt cutters on the rock breaking mechanical behavior of the cutters were evaluated, and the scratch parameter setting methods and scratch tests process for accurately obtaining the rock breaking stress curve of the cutters were proposed. The normal stress and shear stress were obtained by cutting the rock sample with sharp and blunt cutters, and then the rock mechanics parameters including cohesion strength and internal friction angle can be obtained by substituting them into the calculation model. Compared with the traditional triaxial compression test, the values of rock mechanical parameters measured by using the continuous scratch methods were consistent with those measured by the traditional triaxial compression test, and there was a certain proportion between them, which proved that the new method is feasible. The new method requires simple sample preparation specifications, short experimental time, and can test rock strength parameters of complex rock. At the same time, the whole structure of rock sample will not be destroyed in the process of experiment, so the experiment has strong repeatability, which provides a new idea for the test of sample strength parameters before and after water rock interaction, and also provides a new method for the study of hydration.

**Keywords** strength parameter; continuous scratch test; experimental method; complex rock

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.04.045

## 1 连续划痕测试方法

岩石黏聚力和内摩擦角是表征岩石强度特征的关键参数, 是进行井壁稳定和水力压裂研究的重要基础<sup>[1-7]</sup>。目前测量岩石强度参数的方法可分为直接法和间接法。直接法一般是利用常规三轴压缩实验<sup>[8-9]</sup>, 通过对多组测试岩样进行剪切破坏来获取岩石强度参数。该方法适用性强, 但是岩心制样要求高(圆柱形试样, 岩样高径比 2.0~3.0; 端面垂直于岩样轴线、精度要求 0.001 弧度, 平整度要求 0.01 mm; 岩样侧面光滑, 精度要求 0.3 mm)<sup>[10]</sup>, 测试时间长, 属于破坏性测试, 岩样测试后完全损坏, 每次测试至少需要 2~3 块标准试样。直剪实验<sup>[10]</sup>也是一种直接测试岩石剪切强度参数的有效方法, 其测试原理简单, 操作方便, 但测试干扰因素较难控制, 且属于破坏性测试。国外有学者提出了利用间接法进行岩石强度参数的测量, 包括钻孔法<sup>[11-12]</sup>和划痕法<sup>[13-15]</sup>。Sajjad Kalantari 等<sup>[11-12]</sup>人建立了 T 型钻头旋转钻进过程中的力学平衡理论模型, 并依此提出了利用钻头破碎岩石数据估算岩石强度参数(单轴抗压强度、内聚力及内摩擦角)的方法。钻孔法测强度参数简便、快捷, 便于工程应用, 但是仅能反映岩样单点的强度参数, 实验属于破坏性测试, 不能保证试件结构的完整性。Detournay 等<sup>[13]</sup>人率先提出了利用连续划痕实验测试岩石单轴抗压强度和内摩擦角的方法。划痕法不破坏岩样的完整性, 具有重复性测试、测试时间短及试样制作简单的

特点<sup>[16-19]</sup>。但是, 利用划痕试样确定表征岩石强度特征的黏聚力参数的方法未见系统研究, 且划痕过程中未考虑尖、钝刀头划痕顺序及划痕位置对测试结果的影响。

本文基于塑性破坏模式下尖、钝刀头破岩力学模型, 引入摩尔库伦准则, 借助连续划痕实验手段, 形成利用划痕刀头破岩载荷确定岩石黏聚力和内摩擦角的方法。评估了尖、钝刀头划痕顺序、位置和深度对刀头破岩力学行为的影响, 提出准确获得刀头破岩载荷曲线的划痕参数设置方法和划痕实验流程。将新方法和常规三轴压缩法测试结果对比, 验证了新方法的合理性与可靠性。

## 2 实验原理

在塑性破岩模式下, 利用尖刀头(图 1(b), 刀头破岩时, 仅有切削面做功)对岩样进行连续划痕, 可确定岩样单轴抗压强度; 利用钝刀头(图 1(a), 刀头破岩时, 切削面和摩擦面共同做功)对岩样进行连续划痕, 可确定岩样内摩擦角; 引入摩尔库伦准则, 进而可以获得岩样黏聚力。

Detournay 和 Defourny<sup>[13]</sup>于 1992 年分别建立了塑性破坏模式下尖、钝刀头刮削岩石的力学模型, 将划痕过程中刀头受力分解为法向和切向进行分析。

### 2.1 尖刀头切削

尖刀头在岩石表面以一定深度  $d$  进行划痕时, 刀

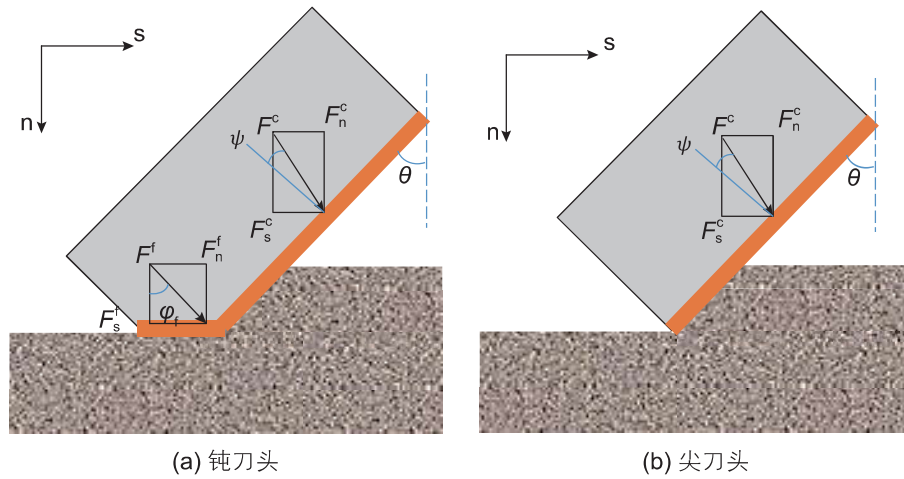


图1 尖、钝头示意图

Fig. 1 Forces models of sharp cutter and blunt cutter

头底部对岩石的摩擦作用忽略不计, 作用于岩石的力  $F^c$  仅由刀头切削面提供, 其可分解为法向作用力  $F_n^c$  和切向作用力  $F_s^c$ , 如图 1(b) 所示。

$$F_s^c = \varepsilon wd \quad (1)$$

$$F_n^c = \zeta \varepsilon wd \quad (2)$$

式中,  $c$  表示作用于岩石的力的方向,  $n$  表示法向,  $s$  表示切向,  $F_n^c$  为刀头切削面法向力, N;  $F_s^c$  为刀头切削面切向力, N;  $\varepsilon$  为岩石固有破碎比功, MPa;  $w$  为划痕刀头宽度, mm;  $d$  为刮痕深度, mm;  $\zeta = \tan(\theta + \psi)$  为法向力与切向力的比值;  $\theta$  为刀头后倾角, °;  $\psi$  为界面摩擦角, °。

## 2.2 钝刀头切削

钝刀头具有摩擦面和切削面, 如图 1(a) 所示。对于作用于钝刀头上合力  $F$ , 可以将其分为切削面上的作用力  $F^c$  和摩擦面上的作用力  $F^f$ 。切削面上作用力依然满足式(1)、(2)的关系。摩擦面上的作用力满足关系(3):

$$F_s^f = \mu F_n^f \quad (3)$$

式中,  $F_s^f$  为刀头摩擦面作用力的切向分量, N;  $F_n^f$  为刀头摩擦面上作用力的法向分量, N;  $\mu = \tan(\varphi_f)$  为摩擦系数;  $\varphi_f$  可视为钝刀头摩擦面与岩石表面间的接触摩擦角。

结合式(1)、(2)、(3)可知, 作用于钝刀头上合力的法向和切向力满足关系(4):

$$\begin{aligned} F_s &= F_s^c + F_s^f = \varepsilon wd + \mu(F_n^f - F_n^c) \\ &= (1 - \mu\zeta)\varepsilon wd + \mu F_n \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $F_s$  为刀头切向力, N;  $F_n$  为刀头法向力, N。

## 2.3 岩石强度参数的确定

Detournay 等<sup>[13]</sup> 人引入破碎比能  $E$  和划痕强度  $S$  的概念, 并对其进行了定义, 式(5)、(6),

$$E = F_s / (wd) \quad (5)$$

$$S = F_n / (wd) \quad (6)$$

式中,  $E$  为破碎比能, MPa;  $S$  为划痕强度, MPa。

由式(4)可知, 钝刀头的  $E$  和  $S$  值满足如下关系,

$$E = E_0 + \mu S \quad (7)$$

式中,  $E_0 = (1 - \mu\zeta)\varepsilon$ , 为常数。

由式(1)和(2)可知, 尖刀头的  $E$  和  $S$  值满足关系式(8),

$$\begin{cases} E = \varepsilon \\ S = \zeta \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

由于  $\varepsilon$ 、 $\zeta$ 、 $\mu$  都为常数, 可绘制  $E$ - $S$  关系曲线如图 2 所示。在  $E$ - $S$  曲线中可以看出, 尖刀头划痕同一岩石的数据为一固定点(尖刀头切削点), 钝刀头划痕同一岩石的数据呈线性关系(摩擦线), 其中  $\mu$  即为该线的斜率。大量实验研究表明<sup>[15]</sup>, 尖刀头切削点对应的  $\varepsilon$  破碎比功即为岩石的单轴抗压强度(UCS), 钝刀头切削岩石测得的摩擦系数  $\mu$  即为岩石内摩擦角( $\varphi$ )的正切值, 即满足式(9)。

$$\varphi = \varphi_f = \arctan(\mu) \quad (9)$$

利用尖、钝刀头划痕实验确定岩石的单轴抗压强度和内摩擦角后, 本文引入线性摩尔库伦准则<sup>[10]</sup>, 即可计算得到岩石的内聚力, 如式(10)所示:

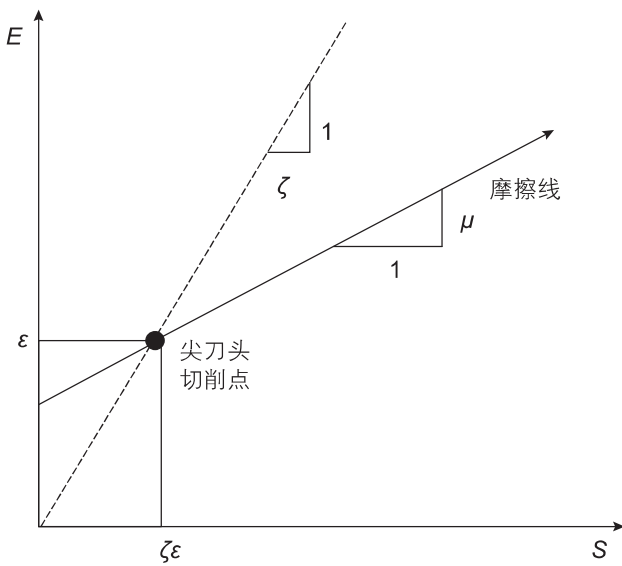


图 2 E-S关系曲线示意图

Fig. 2 E-S diagram

$$C = \frac{UCS \cdot (1 - \sin\phi)}{2\cos\phi} \quad (10)$$

式中， $UCS = \epsilon$ 为岩石单轴抗压强度，MPa； $\phi$ 为岩石内摩擦角，°； $C$ 为岩石内聚力，MPa。

### 3 实验方法

#### 3.1 实验装置与岩样制作

##### (1) 实验装置

研究采用美国 TerraTek 连续划痕测试系统，由动力加载装置、位移测量模块、载荷测量模块、划痕刀具、试样夹持装置、数据采集及分析系统组成(图 3)。TerraTek 连续划痕测试系统可以实现实时记录刀头在以固定刻划深度和刻划速率进行划痕时的法向和切向受力情况，进而获得岩石力学参数。TerraTek 连



图 3 连续划痕实验仪

Fig. 3 Scratch test system

续划痕测试系统的详细技术指标如表 1 所示。

##### (2) 实验制样

在利用尖、钝刀头连续划痕实验进行岩石强度参数测试时，划痕试样制作要求如下：

①划痕试样形状没有严格要求，但为方便夹持固定，岩样建议加工成圆柱体或长方体状；岩样有效直径允许范围 20~200 mm，岩样长度允许范围 20~400 mm。

②岩样测试面需打磨平整光滑，保证划痕刀头可以与试样划痕面均匀接触。

本文研究试样均取自西北地区吉迪克组露头泥岩，见图 4。

#### 3.2 划痕参数的敏感性分析

划痕参数的合理设置，是确保获得准确的划痕刀头受力特征曲线、进而准确评价岩石强度参数的关键。本文采用 TerraTek 连续划痕测试系统，分别针对刀头划痕顺序、位置和深度对划痕测试结果的影响，进行了划痕参数敏感性分析。

##### (1) 尖、钝刀头划痕顺序

分别对同一凹槽位置依次进行了刮深 0.18 mm 尖刀头、刮深 0.15 mm 钝刀头、刮深 0.18 mm 尖刀头、刮深 0.15 mm 钝刀头、刮深 0.15 mm 钝刀头的划痕测试(图 5)，并选取划痕中①和②段位置(如图 5(a)中标)数据，进行不同顺序间划痕干扰性分析(见表 2)。

从表 2 中可以看出，第 1 次和第 3 次划痕的尖刀头平均法向力及平均切向力基本保持一致，说明第 2

表 1 连续划痕测试系统技术参数

Table 1 Parameters of TerraTek scratch test system

技术指标	参数数值	技术指标	参数数值
水平位移精度	0.1 mm	尖刀头宽度	10 mm
划痕深度精度	0.001 mm	钝刀头宽度	10 mm
数据点精度	10 pts/mm	钝刀摩擦面长度	1 mm



图 4 西部某油田吉迪克组泥岩露头

Fig. 4 Mudstone of an oilfield in Western China

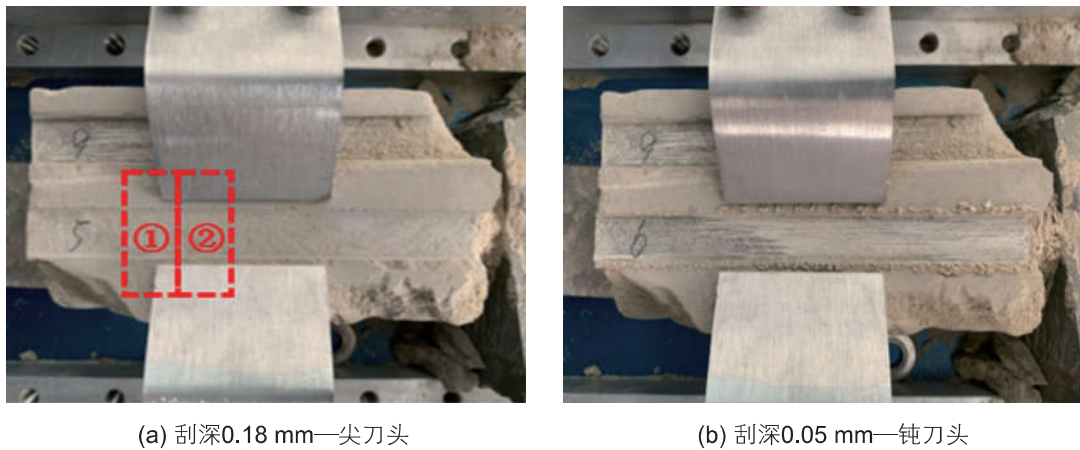


图5 不同顺序划痕间干扰性测试

Fig. 5 Snapshots of scratch tests with different order

表2 不同顺序划痕间干扰性测试结果

Table 2 Results of scratch tests with different order

刀头类型	刮深 $d/\text{mm}$	划痕第①段 (10 mm)				划痕第②段 (10 mm)			
		平均 $F_w/\text{N}$	平均 $F_s/\text{N}$	$S/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$	平均 $F_w/\text{N}$	平均 $F_s/\text{N}$	$S/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$
尖刀头	0.18	26.08	34.77	14.49	19.32	33.32	43.41	18.51	24.12
钝刀头	0.15	346.59	252.53	231.06	168.35	431.56	307.28	287.71	204.86
尖刀头	0.18	25.99	34.91	14.44	19.39	34.90	46.08	19.39	25.60
钝刀头	0.15	331.46	245.94	220.97	163.96	429.12	307.38	286.08	204.92
钝刀头	0.15	356.88	258.36	237.92	172.24	445.70	338.80	297.13	235.87

次钝刀头划痕对于下一次尖刀头划痕没有影响；对比第2次和第4次划痕，钝刀头的作用力也趋于一致，表明中间尖刀头划痕并没干扰下一次钝刀头的划痕测试；对比第4次和第5次钝刀头划痕，其测试数据波动不大，说明前后顺序钝刀头划痕间的相互干扰也较小。基于以上分析可以发现，划痕法测试强度参数时，划痕顺序并不影响该岩样的划痕测试结果。

### (2) 不同位置划痕间替代性

考虑到试样凹槽划痕后有可能出现缺失甚至破坏的情况，尤其对于研究水岩作用问题时浸泡后的泥页岩岩样。为保证岩石强度参数的可比性，有必要针对不同位置划痕间的替代性进行分析。

采用尖刀头以固定划痕深度 0.18 mm 按照图 6 中位置进行岩样划痕，并监测刀头的法向和切向作用力，如图 7 所示。

从图 7 中可以看出，该岩样相邻位置两条划痕的刀头作用力监测点贴合度很高，说明这两条划痕的强度参数具有替代性。当其中一条划痕测试过程中损坏时，在相邻位置继续进行划痕，依然可以保持强度参

数的可比性。该特点适用于进行水岩作用过程中岩石强度参数变化规律的研究。

### (3) 不同刮深划痕破岩模式

利用钝刀头分别以 0.2 mm 和 0.4 mm 刮深进行了泥页岩样划痕实验，如图 8 所示。从图 8 中可以看出，当划痕深度较小时，刀头刮削后划痕表面平整，所产生岩屑均为粉末状颗粒，属塑性破坏<sup>[15]</sup>；当划痕深度较大时，划痕表面凹凸不平，表现为脆性破坏<sup>[15]</sup>。这

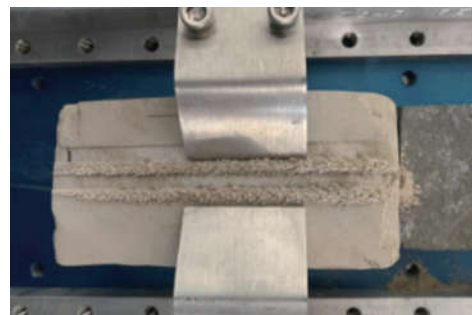


图6 岩样相邻位置划痕

Fig. 6 Snapshots of scratch test with different grooves

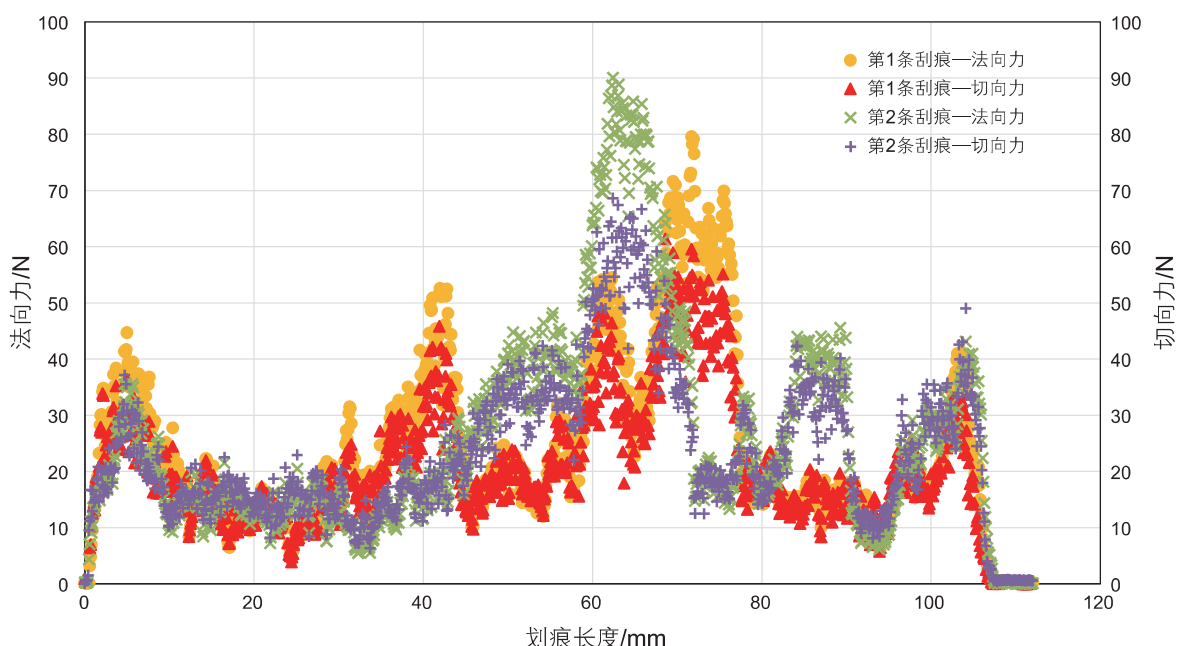
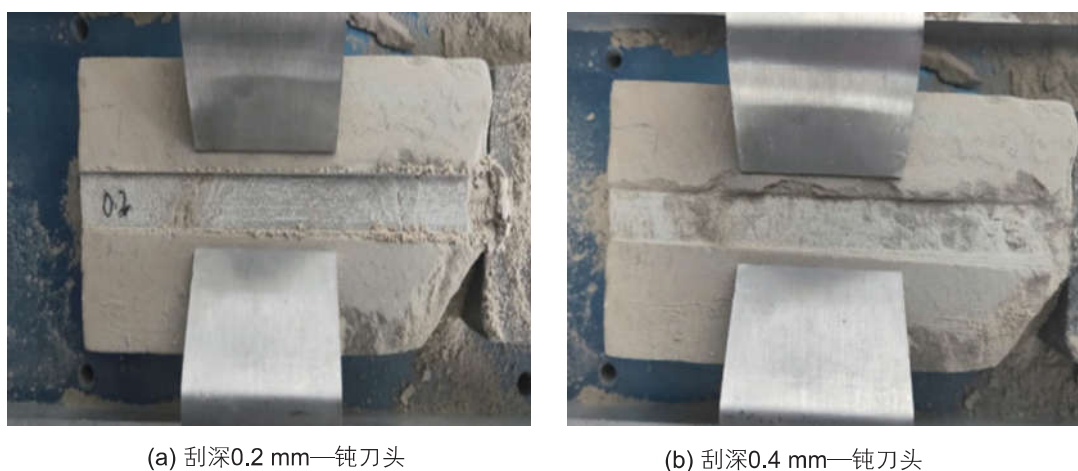


图 7 相邻位置划痕刀头的法向力和切向力

Fig. 7 Forces applied on the cutter for different grooves



(a) 刮深0.2 mm—钝刀头

(b) 刮深0.4 mm—钝刀头

图 8 不同刮深划痕岩样破坏模式

Fig. 8 Snapshots of failure modes with different cutting depths

说明明确塑性破坏模式下刀头的刮深区间，对于岩石强度参数的准确测试十分关键。

### 3.3 实验流程

基于对岩样划痕参数的敏感性分析，提出了连续划痕实验确定岩石强度参数的具体步骤。

#### (1) 测试准备

根据划痕试样制作要求进行岩样加工，将加工后试样放于夹持器内固定；校准刀头位置，并以一定划痕深度进行试切削，使划痕刀头可以与试样划痕面均匀接触。

#### (2) 数据选取

为减小测试误差，每一刮深划痕需重复刻划 2 次，对每 10 mm 段的划痕数据点 (100 个点) 取平均即可为一组数据样本。

#### (3) 划痕参数确定

可以不考虑刀头划痕顺序的影响，以不同划痕深度进行试样划痕，分析刀头破岩特征，确定塑性破岩模式下划痕深度区间。初始划痕破坏时，可进行相邻位置划痕替代性测试。

#### (4) 强度参数测试

根据前面实验确定的划痕参数对试样进行连续划

痕实验, 收集并选取数据, 计算试样强度参数。

## 4 实验结果

利用本文所建立新方法和常规三轴压缩法 (ISRM 标准<sup>[10]</sup>), 分别对A#露头、B#露头和C#露头泥岩进行

了强度参数评价。为保证强度参数具有对比性, 划痕用试样和三轴压缩用试样均取自同一块泥岩露头。

### 4.1 划痕参数确定实验

在同一划痕位置, 利用钝刀头分别以 0.05、0.08、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 mm 的划痕深度依次进行

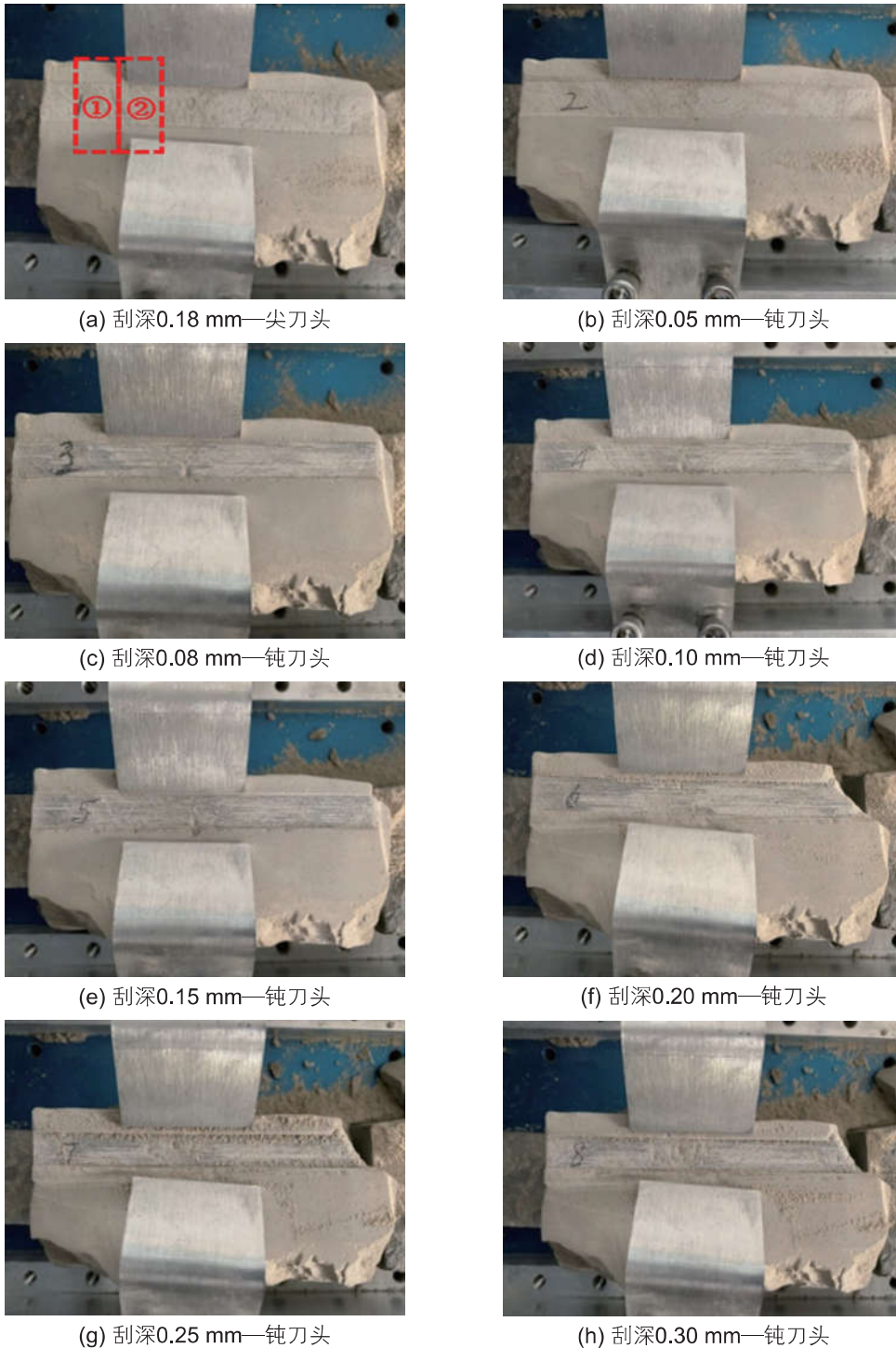


图9 不同刮深划痕

Fig. 9 Snapshots of scratch test with different depths

划痕测试(见图 9)。从图 9 中可以看出, 划痕表面平整, 岩屑均为粉末状颗粒、无剥落掉块, 说明在 0.05~0.3 mm 划痕深度范围内, 尖、钝刀头对该泥岩岩样的切削均为塑性破坏。

选取上述划痕中①和②段位置(如图 9(a)中所标)为分析对象, 对该位置不同刮深条件下的刀头受力情况进行监测, 基于式(5)、(6), 计算并绘制该泥岩试样的  $E-S$  曲线如图 10 所示。

由式(4)可知, 塑性破岩状态下, 随着划痕深度的增加, 钝刀头切削面的破岩作用会趋于主导地位, 其破岩力学响应会趋向于尖刀头。即, 随着刮深增加,

钝刀头的破碎比能  $E$  和划痕强度  $S$  渐小。图 10 中  $E-S$  关系曲线满足上述特征, 再次说明, 在 0.05~0.3 mm 划痕深度范围内, 钝刀头对该泥岩划痕属塑性破坏。

#### 4.2 岩石强度参数确定

依据前面实验中确定的划痕参数, 采用连续划痕实验测试 A<sup>#</sup>、B<sup>#</sup> 和 C<sup>#</sup> 露头泥岩强度参数, 测试数据如图 11、12、13 所示。

结合式(9)、(10), 可获得 A<sup>#</sup>、B<sup>#</sup> 和 C<sup>#</sup> 露头泥岩的强度参数, 如图 14 所示(详细结果见表 3)。

从图 14 和表 3 中可以看出, 新方法测试结果与常

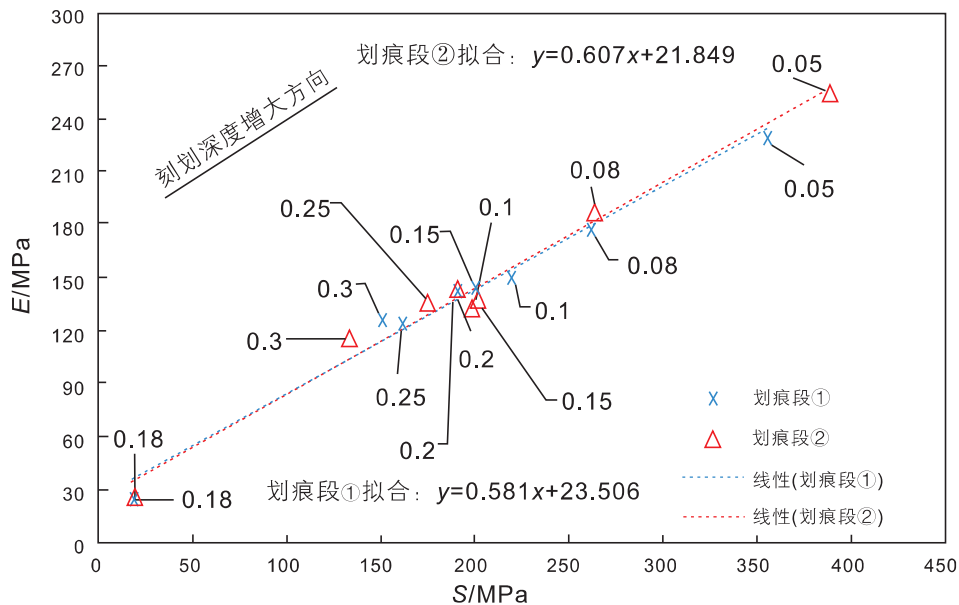


图 10 泥岩  $E-S$  关系曲线

Fig. 10  $E-S$  diagram of mudstone

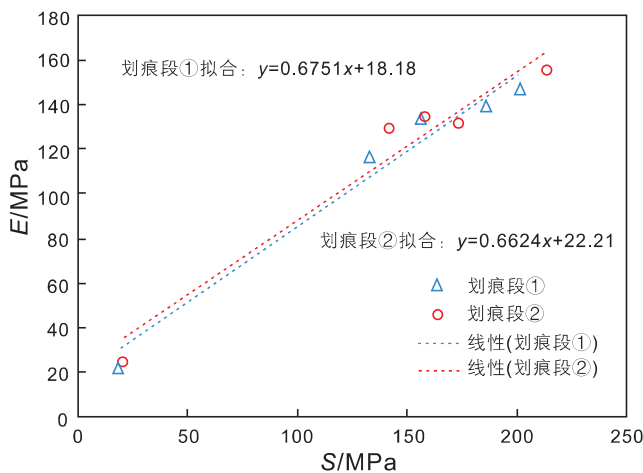


图 11 A<sup>#</sup> 泥岩  $E-S$  关系曲线

Fig. 11  $E-S$  diagram of A<sup>#</sup> mudstone

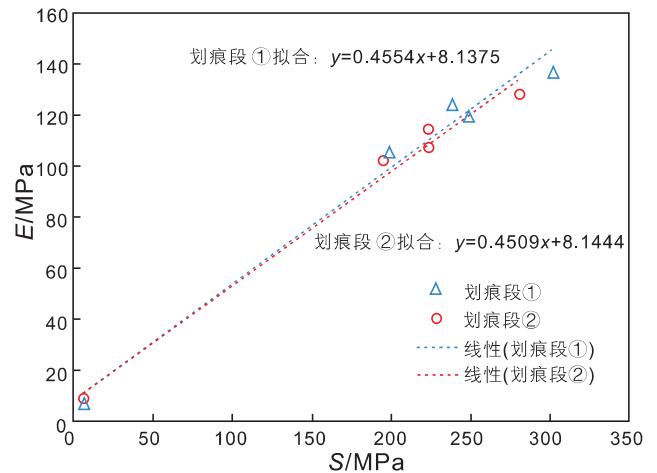


图 12 B<sup>#</sup> 泥岩  $E-S$  关系曲线

Fig. 12  $E-S$  diagram of B<sup>#</sup> mudstone



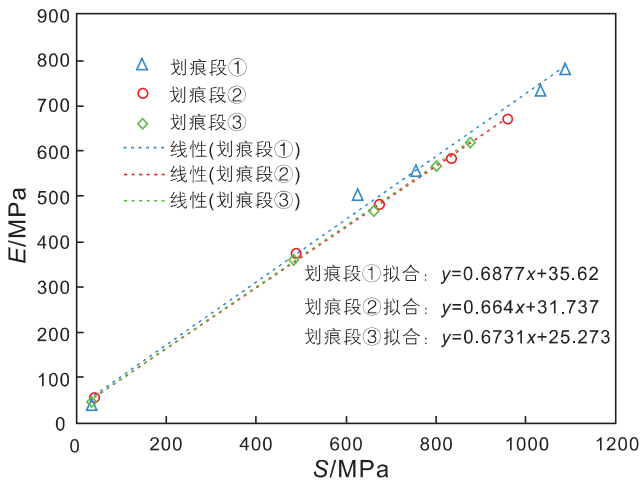


图 13 C# 泥岩 E-S 关系曲线

Fig. 13 E-S diagram of C# mudstone

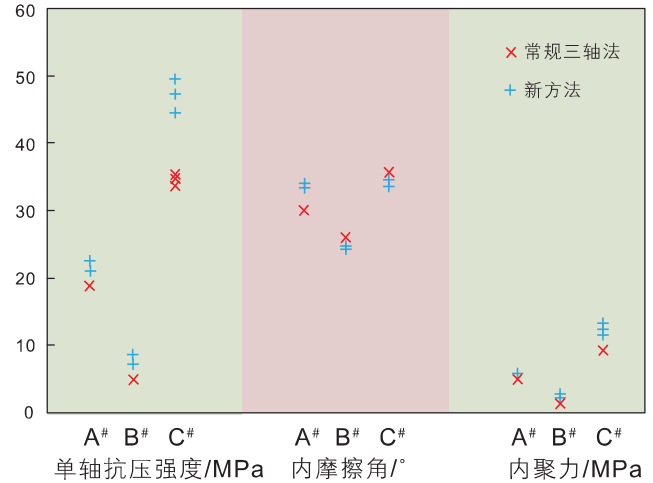


图 14 常规三轴法和划痕法测试结果对比

Fig. 14 Comparison of experimental results

表 3 常规三轴法和划痕法泥岩强度参数测试详细结果

Table 3 Results of scratch tests and compressive tests of mudstones

测试方法	测试岩样	围压/MPa	抗压强度/MPa	内摩擦角/°	内聚力/MPa
常规三轴法	A# 露头	0	19.0	30.0	5.48
		10	48.0		
	B# 露头	0	5.0	25.9	1.57
		2	10.1		
	C# 露头	0	33.6	35.4	9.51
		0	35.3		
0		34.8			
新方法	A# 露头	5	46.0	34.0	6.00
		10	87.2		
	B# 露头	-	22.6	24.7	2.36
		-	21.0		
	C# 露头	-	7.4	33.6	13.25
		-	8.7		
		-	44.4		
	-	-	49.4	33.9	11.67
	-	-	47.1	33.9	12.56

规三轴压缩法的测试结果对比发现,两种方法测试的泥岩强度参数存在误差,但这可能与露头岩样本身的非均质性有关。总体而言,基于划痕实验的强度参数测试结果与常规三轴压缩法具有一致性,证明了新方法的可靠性。

基于连续划痕实验确定岩石强度参数的新方法制样简单(表面平整,大的井下掉块也可适用),克服了复杂地层标准试件(常规三轴法)制作难的问题,能够实现复杂岩性和结构岩石的强度参数测试,且测试时

间短,测试为非破坏性实验(同一块试件可实现重复性测试),有利于进行对比性实验,这为研究水岩作用前后岩样强度参数的变化规律提供了新手段。

### 5 结论

(1)基于塑性破岩模式下尖、钝刀头划痕力学模型,引入摩尔库伦准则,形成了利用划痕刀头载荷确定岩石强度参数的计算模型;考虑尖、钝刀头划痕顺

序、位置和深度对划痕刀头力学行为的影响,提出了准确获得刀头破岩载荷曲线的划痕实验流程;结合以上计算模型和实验方法,建立了基于连续划痕实验的岩石强度参数确定方法,其可实现岩石内摩擦角、内聚力及单轴抗压强度的同时测量。

(2)应用新方法对西北地区吉迪克组泥岩的强度参数进行了评价,与常规三轴法的测试结果对比发现,

两者测试结果具有很好的一致性,验证了新方法的可靠性。

(3)基于连续划痕实验的岩石强度参数测试方法测试时间短,测试具有重复性,且岩样制作简单,能够实现复杂岩性和结构岩石的强度参数测试。为下一步研究水岩作用后岩石强度参数劣化而引起的井壁稳定问题提供了新手段。

## 参考文献

- [1] 金衍,陈勉.井壁稳定力学[M].北京:科学出版社,2012. [JIN Y, CHEN M. Wellbore stability mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [2] 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].钻井液与完井液,1995,12(3):15-21. [HUANG R Z, CHEN M, DENG J G, et al. Study on shale stability of wellbore by mechanics coupling with chemistry method [J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 1995, 12(3): 15-21. (in Chinese)]
- [3] 路保平,鲍洪志.岩石力学参数求取方法进展[J].石油钻探技术,2005,33(5):44-47. [LU B P, BAO H Z. Testing methods of rock mechanics parameters [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 44-47 (in Chinese)]
- [4] 卢运虎,陈勉,金衍,等.钻井液浸泡下深部泥岩强度特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1399-1405. [LU Y H, CHEN M, JIN Y, et al. Experimental study of strength properties of deep mudstone under drilling fluid soaking [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1399-1405 (in Chinese)]
- [5] 石林,史臻,田中兰,等.中石油页岩气开发中的几个岩石力学问题.石油科学通报,2019,03:223-232. [SHI L, SHI C, TIAN Z L, et al. Several rock mechanics problems in the development of shale gas in PetroChina[J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 03: 223-232.(in Chinese)]
- [6] 谭鹏,金衍,陈刚.四川盆地不同埋深龙马溪页岩水力裂缝缝高延伸形态及差异分析.石油科学通报,2022,01:61-70. [TAN P, JIN Y, CHEN G. Differences and causes of fracture height geometry for Longmaxi shale with different burial depths in the Sichuan basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 01: 61-70. (in Chinese)]
- [7] 滕学清,陈勉,金衍,等.致密地层井壁失稳的孔隙弹性动力学机理研究.石油科学通报,2017,04:478-489. [TENG X Q, CHEN M, JIN Y, et al. Poroelastic dynamics mechanisms of wellbore instability in tight formations[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 04: 478-489. (in Chinese)]
- [8] 陈勉,金衍,张广清.石油工程岩石力学[M].北京:科学出版社,2008. [CHEN M, JIN Y, ZHANG G Q. Rock mechanics in petroleum engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]
- [9] 张年学,盛祝平,李晓,等.岩石泊松比与内摩擦角的关系研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):2600-2609. [ZHANG N X, SHENG Z P, LI X, et al. Study of relationship between poisson's ratio and angle of internal friction for Rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 2600-2609. (in Chinese)]
- [10] ISRM. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006 [S]. Ankara: ISRM Turkish National Group, 2007.
- [11] KALANTARI S, HASHEMOLHOSSEINI H, BAGHBANAN A. Estimating rock strength parameters using drilling data [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 45-52.
- [12] KALANTARI S, BAGHBANAN A H, ASHEMOLHOSSEINI H. An analytical model for estimating rock strength parameters from small scale drilling data [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(1): 135-145.
- [13] DETOURNAY E, DEFOURNY P. A. Phenomenological model for the drilling action of drag bits [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining. Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(1): 13-23.
- [14] ADACHI J I, DETOURNAY E, DRESCHER A. Determination of rock strength parameters from cutting tests [C]// Proceedings of 2nd North American Rock Mechanics Symposium. Montreal, Quebec, Canada: American Rock Mechanics Association, 1996: 1517-1523.
- [15] RICHARD T, DAGRAIN F, POYOL E, et al. Rock strength determination from scratch tests [J]. Engineering Geology, 2012, 147: 91-100.
- [16] DAGRAIN F, RICHARD T, GERMA Y C. The rock strength device: A scratching apparatus to determine rock properties [C]// Proceedings of 7th National Congress on theoretical and applied Mechanics. Belgium. 2006: 1-9.
- [17] 陈军海,王怡,韩艳浓,等.一种利用岩石强度刻划试验确定岩石PDC钻头可钻性级值的方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(2):94-99. [CHEN J H, WANG Y, HAN Y N, et al. A new method for assessing rocks drill ability for PDC bits via a

- scratch testing [J]. Journal of China University of Petroleum, 2017, 41(2): 94–99. (in Chinese)]
- [18] ROSTAMSOWLAT I, AKBARI B, EVANS B. Analysis of rock cutting process with a blunt PDC cutter under different wear flat inclination angles [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 171: 771–783.
- [19] YAHIAOUI M, PARIS J, DELBE K, et al. Independent analyses of cutting and friction forces applied on a single polycrystalline diamond compact cutter [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 85: 20–26.

(责任编辑 林伯韬 编辑 马桂霞)