

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2022038

引用格式: 耿学礼, 郑晓斌, 苏延辉, 等. 沁南区域煤层气水平井瓜尔胶钻井液技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 34-39.

GENG Xueli, ZHENG Xiaobin, SU Yanhui, et al. Guar gum drilling fluid technology for coalbed methane horizontal wells in Qinnan Area [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 34-39.

沁南区域煤层气水平井瓜尔胶钻井液技术

耿学礼, 郑晓斌, 苏延辉, 敬 倩, 史 斌, 李 建

(中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300451)

摘 要: 针对沁南区域 15 号煤层水平井钻井采用清洁盐水和常规聚合物钻井液施工时的井壁坍塌和储层伤害等问题, 在分析储层特征及钻井技术难点的基础上, 研发了瓜尔胶钻井液和生物酶破胶液。通过优化瓜尔胶加量和评价瓜尔胶的耐盐性能, 并复配其他处理剂, 形成了瓜尔胶钻井液; 通过优选生物酶种类、优化生物酶和助排剂的加量, 形成了生物酶破胶液。室内试验表明, 瓜尔胶钻井液具有良好的流变性和耐盐性能, 可大幅提高煤岩抗压强度, 在低温下易破胶, 破胶后残渣小于 300 mg/L, 煤岩的渗透率恢复率达 85% 以上。沁南区域煤层气水平井应用瓜尔胶钻井液后, 井壁稳定性良好; 配合生物酶破胶液可以实现低温破胶, 且单井日产能提高 15% 以上, 具有较好的储层保护效果。研究结果表明, 瓜尔胶钻井液可实现煤层气长水平段钻井的顺利施工, 完钻后可低温破胶, 为易塌煤层气水平井钻井施工提供了一种新的储层保护方法。

关键词: 煤层气; 水平井; 瓜尔胶钻井液; 低温破胶; 井壁稳定; 沁南区域

中图分类号: TE254⁺.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)01-0034-06

Guar Gum Drilling Fluid Technology for Coalbed Methane Horizontal Wells in Qinnan Area

GENG Xueli, ZHENG Xiaobin, SU Yanhui, JING Qian, SHI Bin, LI Jian

(CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin, 300451, China)

Abstract: Wellbore collapse and reservoir damage occurred when clean brine and conventional polymer drilling fluids were used in drilling horizontal wells of No. 15 coal seam in Qinnan Area. In view of this, according to reservoir characteristics and challenges encountered during drilling, a guar gum drilling fluid and a bio-enzyme gel breaking fluid were developed. Specifically, the guar gum drilling fluid was formed by optimizing the dosage of guar gum, evaluating the salt tolerance, and integrating with other treatment agents. And the bio-enzyme gel breaking fluid was produced by optimizing types and dosage of bio-enzyme and cleanup additive. The laboratory test showed that the guar gum drilling fluid had good rheological and salt tolerance properties. It could greatly improve the compressive strength of coal and rock, and easily achieve gel breaking at low temperatures, with residues after breaking less than 300 mg/L. The permeability recovery rate of coal rock was more than 85%. In terms of the application of the guar gum drilling fluid in coalbed methane (CBM) horizontal wells in Qinnan Area, the fluid showed positive wellbore stability. In addition, it not only achieved gel breaking at low temperatures but also improved the daily productivity of a single well by more than 15% after integrating with the bio-enzyme gel breaking fluid, which indicated a favorable reservoir protection effect. The research shows that the guar gum drilling fluid can ensure smooth drilling of long horizontal sections in coal seams and achieve gel breaking at low temperatures after drilling, which provides a new reservoir protection method for drilling horizontal wells in fragile coal seams.

Key words: coalbed methane; horizontal well; guar gum drilling fluid; gel breaking at low temperature; wellbore stability; Qinnan Area

收稿日期: 2022-07-17; 改回日期: 2022-12-28。

作者简介: 耿学礼 (1983—) 男, 河北沧州人, 2007 年毕业于长江大学化学工程与工艺专业, 高级工程师, 主要从事钻井液及储层保护技术研究。E-mail: gengxl2@cnooc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项 “大型油气田及煤层气开发” (编号: 2016ZX05025) 部分研究内容。

沁南区域煤层气主力储层 15 号煤层具有割理及微孔发育、煤层易破碎的特点, 进行水平井钻井时外来流体易侵入煤层, 引起煤层井壁坍塌和储层伤害^[1-2]。国内煤层气水平井钻井使用的钻井液主要为清洁盐水和聚合物钻井液。清洁盐水具有良好的保护储层能力, 但沁南区域水平井段长, 15 号煤层易破碎、坍塌, 使用清洁盐水钻井风险高^[3-4]。聚合物钻井液具有稳定煤层井壁的能力, 完钻后可破胶解堵, 但沁南区域 15 号煤层温度低, 氧化破胶剂普遍存在低温破胶困难, 破胶后残渣含量高, 且聚合物钻井液储存条件苛刻, 对环境、人员不友好等问题, 导致其应用受限^[5-7]。目前使用的钻井液无法满足沁南区域 15 号煤层水平井钻井对稳定井壁、低温破胶和保护储层的需求。

瓜尔胶具有低温易破胶, 破胶后残渣含量低的优点, 生物酶破胶剂具有破胶专一、易低温破胶的优点; 但瓜尔胶一般用作压裂增稠剂, 生物酶破胶剂也常用于压裂破胶和废弃物生物降解^[8-10]。国内外学者对瓜尔胶钻井液鲜有研究, 研究范围也仅限于降解性能、流变性能等方面的室内评价^[11-13], 尚未系统性研究低温、易塌煤层气水平井钻井施工对其稳定井壁、低温破胶和保护储层等方面的性能需求。因此, 将瓜尔胶引入钻井液中作为增黏剂, 并与生物酶破胶剂配套使用, 开展了瓜尔胶加量优化和生物酶破胶剂优选, 评价了瓜尔胶钻井液稳定煤层和保护储层的性能。瓜尔胶钻井液在保留聚合物钻井液性能的基础上, 可实现低温破胶, 达到稳定井壁与保护储层的目的^[14-16]。

1 15 号煤层特征及钻井技术难点

沁南区域石炭系太原组的 15 号煤层孔隙度 4.75%~5.75%, 渗透率 0.26~0.85 mD; 裂隙较 3 号煤层更为发育, 且具有破碎结构和原生结构共存的特点, 普遍具有丰富的割理和裂隙, 微裂缝较多, 多呈平形状、不规则网状、丝状和树枝状成组出现; 孔隙普遍被矿物充填, 矿物种类较多, 包括黏土矿物、黄铁矿、石英和方解石等。15 号煤层的上述特征除造成储层连通性较差外, 较多的割理和裂隙也导致 15 号煤层的力学性能较差, 与 3 号煤层相比更容易坍塌^[17-18]。

以 15 号煤层为目的层的煤层气水平井, 水平段长 800~1 000 m, 储层温度 30~40 ℃, 煤层压力系数 0.20~0.60。该区块使用清洁盐水钻进 15 号煤

层, 水平钻进时间超过 1 d 后, 煤层普遍存在坍塌, 造成钻井失败。使用常规聚合物钻井液钻进时, 虽能保证煤层井壁稳定, 但储层温度较低造成破胶困难, 投产后存在产气量低的问题。保证煤层长水平段井壁稳定、降低聚合物钻井液对煤层的伤害和保证侵入煤层的钻井液可破胶返排, 是沁南区域 15 号煤层水平井钻井的技术难点^[19]。

2 瓜尔胶钻井液及破胶液研究

2.1 瓜尔胶钻井液的配方

根据上文所述 15 号煤层水平井的钻井技术难点及施工经验, 保持钻井液的黏度可维持煤层稳定, 基于 15 号煤层孔渗低、连通性较差的特点, 要求钻井液的滤失量不高于 20 mL, 以满足钻井施工要求。设计钻井液组成为清水+增黏剂+降滤失剂+辅助添加剂。

2.1.1 瓜尔胶加量优化

从保护储层角度讲, 瓜尔胶加量越小, 残渣含量就越低, 储层保护效果就越好。但为保证水平井井眼清洁和井壁稳定需求, 钻井液要维持一定的黏度, 根据该区块水平井的钻井经验可知, 钻井液漏斗黏度为 40~50 s 时可满足水平井井眼清洁和稳定井壁需求。选取淡水基压裂液使用的羟丙基瓜尔胶作为钻井液增黏剂, 测试清水加入不同量瓜尔胶后的漏斗黏度, 以优化瓜尔胶的加量。瓜尔胶为江苏昆山某厂生产的羟丙基瓜尔胶, 测试结果见图 1。

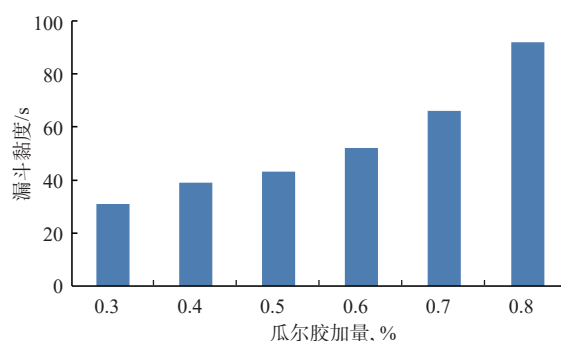


图 1 清水加入不同量瓜尔胶后的漏斗黏度

Fig.1 Funnel viscosity at different guar gum dosages

由图 1 可知: 随着瓜尔胶加量增大, 溶液的漏斗黏度持续升高; 瓜尔胶加量达到 0.5% 时, 溶液的漏斗黏度为 43 s; 瓜尔胶加量达到 0.6% 时, 溶液的漏斗黏度为 52 s, 可以满足水平井施工对钻井液黏度的要求。现场施工时, 瓜尔胶加量可根据实际情况

在 0.5%~0.6% 间选择。

2.1.2 瓜尔胶耐盐性能评价

该区块要求钻井液密度为 1.00~1.10 kg/L, 以 KCl 为钻井液密度调节剂。测试瓜尔胶钻井液中加入不同量 KCl 后的漏斗黏度, 以评价瓜尔胶的耐盐性能。瓜尔胶钻井液配方为清水+0.6% 瓜尔胶, 测试结果见图 2。

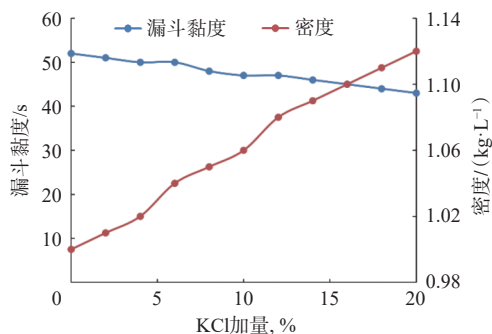


图 2 瓜尔胶钻井液加入不同量 KCl 后的密度和漏斗黏度
Fig.2 Density and funnel viscosity of guar gum drilling fluid after adding different amounts of KCl

由图 2 可知: 随着 KCl 加量增大, 瓜尔胶钻井液密度呈上升趋势, 漏斗黏度呈略微下降趋势; KCl 加量为 16% 时, 瓜尔胶钻井液的密度达到 1.10 kg/L, 漏斗黏度降为 45 s。总体来看, 瓜尔胶钻井液的漏斗黏度稳定在 52~45 s, 在现场对钻井液漏斗黏度要求范围内, 能够满足现场钻井要求。

2.1.3 瓜尔胶钻井液配方确定

为保证钻井液的其他性能, 选用可降解的淀粉为降滤失剂, 改性矿物油为润滑剂, KCl 为密度调节剂, 以维持钻井液的整体性能, 形成了瓜尔胶钻井液配方: 清水+0.5% 瓜尔胶+0.3% 改性淀粉+5.0%KCl+1.5% 润滑剂。其基本性能: 漏斗黏度 45 s, 表观黏度 25 mPa·s, 塑性黏度 14 mPa·s, 动切力 11 Pa, 动塑比 0.78, 静切力 6/8 Pa, API 滤失量 13.2 mL, 滤饼厚度 0.05 mm, pH 值 9.0, 润滑系数 0.09。

该钻井液黏度适中, 动切力和动塑比较高, 能够满足水平井眼清洁需求; 润滑系数为 0.09, 且滤饼较薄, 能够满足水平井施工对钻井液润滑性能的要求。钻井液基本性能在设计范围内, 可满足煤层气水平井钻井需求。

2.2 生物酶破胶液

为确保瓜尔胶钻井液的储层保护性能, 完钻后需使用破胶液对其破胶。为此, 优选了在低温下可实现瓜尔胶钻井液降解破胶的生物酶破胶剂, 同时

在破胶液中加入助排剂, 以实现破胶后顺利返排。设计破胶液组成为清水+生物酶破胶剂+助排剂。

2.2.1 生物酶破胶剂优选

为解除瓜尔胶等聚合物对煤层的伤害, 需要在完钻后对其破胶以解除伤害。参照《水基压裂液性能评价方法》(SY/T 5107—2016)中的破胶性能评价方法, 在瓜尔胶钻井液中加入不同种类和不同量的破胶剂, 在 30 ℃ 的水浴中加热 12 h 后, 使用六速旋转黏度计测试其在 100 r/min(剪切速率为 170 s⁻¹) 转速下的表观黏度, 并测试钻井液破胶后的残渣含量(表观黏度低于 3 mPa·s 时视为完全破胶), 结果见表 1。I 型生物酶破胶剂为胍胶糖苷特异性水解酶和淀粉糖苷特异性水解酶的复配产品, II 型生物酶破胶剂为胍胶糖苷特异性水解酶。

由表 1 可知: 在 30 ℃ 温度下, 瓜尔胶钻井液中加入过硫酸铵养护 12 h, 不能破胶; 加入次氯酸钙虽能破胶, 但次氯酸钙属于危险化学品, 使用局限性较大; 加入 0.1% I 型生物酶破胶剂和 0.08% II 型生物酶破胶剂时, 瓜尔胶钻井液的黏度均降至 3.0 mPa·s, 表明瓜尔胶钻井液完全破胶。残渣含量越低, 对储层的伤害也就越低, 瓜尔胶钻井液加入次氯酸钙、I 型生物酶破胶剂和 II 型生物酶破胶剂破胶后的残渣含量分别为 590, 120 和 251 mg/L。综合考虑破胶剂的加量和破胶后的残渣含量, 选择 I 型生物酶破胶剂作为瓜尔胶钻井液的破胶剂, 加量应不低于 0.1%。

2.2.2 助排剂加量优化

对于煤层气井, 表面张力是影响破胶液返排的最重要因素之一, 基于助排剂性价比和有效降低表面张力的原则, 选择氟碳型表面活性剂为助排剂, 以利于钻井液滤液和破胶后钻井液的返排。参照《压裂液通用技术条件》(SY/T 6376—2008)中的相关规定, 破胶液的表面张力不大于 28 mN/m 时可满足返排要求。

破胶液加入不同量的助排剂, 使用 TX500™ 型旋转滴超低界面张力仪测试其表面张力, 根据测试结果优化助排剂加量。破胶液的配方为清水+0.1% I 型生物酶破胶剂, 试验结果见表 2。

由表 2 可知: 随着助排剂加量增大, 破胶液的表面张力不断降低; 助排剂加量为 0.2% 时, 破胶液的表面张力为 28 mN/m; 助排剂加量为 0.3% 时, 破胶液的表面张力为 18 mN/m。因此, 助排剂的最优加量为 0.2%~0.3%。

表 1 不同种类破胶剂的破胶效果
Table 1 Gel breaking effect of different breakers

破胶剂类型	破胶剂及加量	表观黏度/(mPa·s)	残渣含量/(mg·L ⁻¹)
空白样		49.0	未破胶
氧化破胶剂	0.30%过硫酸铵	21.0	未破胶
	0.70%过硫酸铵	21.0	未破胶
	0.10%次氯酸钙	4.5	未破胶
	0.20%次氯酸钙	3.0	590
复合生物酶	0.02% I 型生物酶破胶剂	15.0	未破胶
	0.05% I 型生物酶破胶剂	4.5	115
	0.08% I 型生物酶破胶剂	4.5	108
	0.10% I 型生物酶破胶剂	3.0	120
单一生物酶	0.02% II 型生物酶破胶剂	6.0	未破胶
	0.05% II 型生物酶破胶剂	4.5	240
	0.08% II 型生物酶破胶剂	3.0	251

表 2 破胶液加入不同量助排剂后的表面张力
Table 2 Surface tension of gel breaking fluid at different cleanup additive dosages

助排剂加量, %	表面张力/(mN·m ⁻¹)	降低率, %
0	65	
0.1	35	46.15
0.2	28	56.92
0.3	18	72.31
0.4	12	81.54

3 稳定井壁和储层保护性能评价

为了验证瓜尔胶钻井液维持煤层井壁稳定的能力和对煤层的保护效果,评价了瓜尔胶钻井液的相关性能,并与现场使用的清洁盐水、常规聚合物钻井液进行了对比。

3.1 煤层井壁稳定性能评价

取数块同一煤块上钻取的岩心(煤块取自 15 号煤层矿井,埋深约 800 m)进行抗压强度试验。将煤岩岩心在不同钻井液中加压 5 MPa 浸泡 24 h 后,使用 TAW-1000 型岩石三轴试验机测试其单轴抗压强度,每种钻井液浸泡 2 块岩心作为平行样,利用抗压强度表征钻井液对煤层井壁的稳定效果(见图 3)。瓜尔胶钻井液配方与 2.1.3 节相同,常规聚合物钻井液配方为清水+0.4% 黄原胶+0.3%PAC-LV+5.0%KCl。

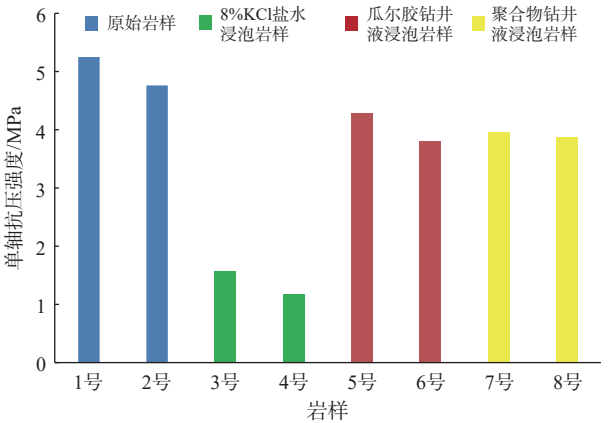


图 3 不同钻井液对煤岩抗压强度的影响
Fig.3 Influence of different drilling fluids on compressive strength of coal rock

由图 3 可知,煤岩经 8%KCl 盐水浸泡后,抗压强度的下降幅度最大,经常规聚合物钻井液和瓜尔胶钻井液浸泡后,抗压强度的下降幅度相当。浸泡过程中,盐水易沿煤岩割理侵入煤岩内部,造成煤岩抗压强度降低;瓜尔胶钻井液和常规聚合物钻井液侵入煤岩的速度和总滤失量远低于盐水,抗压强度的下降幅度也最小。瓜尔胶钻井液稳定煤层井壁的效果与常规聚合物钻井液相当。

3.2 储层保护性能评价

针对不同类型钻井液,使用 JHDS-III 型高温高压动态失水试验仪和 KDY-50 型岩心流动试验装置进行钻井液对煤层的保护性能试验。首先,用地层

水饱和待测煤岩岩样,用氮气测试煤岩岩样在束缚水饱和度下的初始渗透率;然后,在压差 3.5 MPa 条件下用钻井液污染煤岩岩样,再用 2 倍孔隙体积的

破胶液反向驱替,测试破胶液驱替后煤岩岩样在束缚水饱和度下的气测渗透率,计算渗透率恢复率。试验用钻井液配方同 2.3.1 节,试验结果见表 3。

表 3 煤岩渗透率损害试验结果

Table 3 Permeability damage test results of coal rock

煤岩 编号	污染工作液	气测渗透率/mD		气测渗透率 恢复率, %	束缚水饱和度, %
		污染前	污染后		
QS-2-4	8%KCl盐水	0.22	0.20	87.50	54.71
QS-2-5	常规聚合物钻井液+破胶液	0.21	0.10	47.86	63.25
QS-2-6	瓜尔胶钻井液+破胶液	0.55	0.47	85.16	58.24
QS-2-9	瓜尔胶钻井液+破胶液	0.34	0.29	85.08	54.50

由表 3 可知,常规聚合物钻井液在破胶后对煤岩的伤害率依然在 50% 以上,而清洁盐水和瓜尔胶钻井液对煤岩的伤害率都较小。瓜尔胶钻井液破胶后煤岩的渗透率恢复率在 85% 以上,略低于清洁盐水,表现出良好的储层保护效果。

4 现场应用

目前,沁南区域 15 号煤层使用瓜尔胶钻井液钻的井年均达 20 口以上,解决了清洁盐水不能稳定煤层井壁和常规聚合物钻井液存在储层伤害的问题。与使用清洁盐水的井相比,使用瓜尔胶钻井液的 5 口水平井未发生井下故障,平均钻井周期缩短了 32.1%,平均井径扩大率从 21.4% 降至 13.3%,单井日产气量同比提高 15.0%~25.0%。下面以 PZ*E4-4H 井为例介绍瓜尔胶钻井液的应用情况。

PZ*E4-4H 井为单分支水平井,主要目的层为 15 号煤层,完钻井深 1 650 m,最大井斜角 105°,水平段长 1 046 m,纯煤层进尺 838 m,煤层钻遇率 80.11%,钻井周期 16.90 d,水平段钻井周期 8.35 d。

该井水平段采用瓜尔胶钻井液钻进,按上文配方配制瓜尔胶钻井液,将其漏斗黏度调整至 45 s 左右开钻。钻进过程中补充瓜尔胶胶液,维持钻井液黏度;间歇开启离心机,以清除有害固相,并将钻井液密度维持在 1.03~1.07 kg/L;根据定向托压及扭矩变化情况适时加入润滑剂,每钻进 100 m 使用漏斗黏度 100 s 左右的稠浆清扫井眼。该井 15 号煤层厚度较薄,水平段多次钻遇煤层顶底板的泥岩地层,但瓜尔胶钻井液性能稳定,钻进期间仅有少量掉块,未发生阻卡等井下故障,瓜尔胶钻井液表现出良好的稳定煤层井壁的效果,且其黏度、密度和

滤失量等性能参数与常规聚合物钻井液相当。

该井下入玻璃钢筛管后,挤注生物酶破胶液破胶,以解除瓜尔胶钻井液的污染,投产后日产气量达 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$;与使用常规聚合物钻井液的煤层气水平井相比(水平段长度和煤层钻遇率相似),单井产能从 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 提高至 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,瓜尔胶钻井液表现出良好的储层保护效果。

5 结 论

1) 针对沁南区域 15 号煤层水平井钻井施工要求,通过优化瓜尔胶加量和瓜尔胶的耐盐性能,将瓜尔胶与其他处理剂复配形成了瓜尔胶钻井液。该钻井液与清洁盐水相比可有效提高煤层的抗压强度,与常规聚合物钻井液相比可实现低温破胶,破胶后残渣含量低,储层保护效果好。

2) 基于沁南区域 15 号煤层的地质特征和钻井需求研究的瓜尔胶钻井液,并未对其滤失量做要求,但对滤失量要求严格的煤层气钻井,还需系统性研究可生物降解的降滤失剂。

3) 瓜尔胶钻井液在沁南区域 15 号煤层水平井钻井中表现出了良好的稳定井壁和保护储层的效果,可在储层温度低、井壁易失稳、储层易伤害的煤层气水平井中推广应用。

参 考 文 献

References

- [1] 包敏新,殷玉平,张裕. 低温储层生物酶破胶工艺研究与应用[J]. 石油化工应用, 2019, 38(6): 49-51.
BAO Minxin, YIN Yuping, ZHANG Yu. Study and application of biological enzyme gel breaking technology in low temperature reservoir[J]. Petrochemical Industry Application, 2019, 38(6):

- 49–51.
- [2] 周建平, 杨战伟, 徐敏杰, 等. 工业氯化钙加重胍胶压裂液体系研究与现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(2): 96–101.
ZHOU Jianping, YANG Zhanwei, XU Minjie, et al. Research and field tests of weighted fracturing fluids with industrial calcium chloride and guar gum[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(2): 96–101.
- [3] 徐涛, 倪小明. 潘庄区块煤层气井井径扩大主控因素研究[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2014, 16(1): 92–95.
XU Tao, NI Xiaoming. Study on the main controlling factor of CBM borehole diameter expansion in Panzhuang Block[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition)*, 2014, 16(1): 92–95.
- [4] 宋瑞, 宋峙潮, 李小刚, 等. 煤储层低伤害 CO₂ 泡沫压裂液[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(5): 641–647.
SONG Rui, SONG Zhichao, LI Xiaogang, et al. Low damage CO₂ foam fracturing fluid for coal bed fracturing[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(5): 641–647.
- [5] 孙建平, 张健, 王建中. 沁南潘河煤层气田空气钻井和固井技术[J]. *天然气工业*, 2011, 31(5): 24–27.
SUN Jianping, ZHANG Jian, WANG Jianzhong. Air drilling and cementing in the Panhe CBM Gas Field, southern Qinshui Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(5): 24–27.
- [6] 宫大军. 海水基速溶低摩阻胍胶压裂液的研究[J]. *钻井液与完井液*, 2021, 38(3): 371–374.
GONG Dajun. Study on instant low friction seawater based guar gum fracturing fluids[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2021, 38(3): 371–374.
- [7] 叶建平, 吴建光, 房超, 等. 沁南潘河煤层气田区域地质特征与煤储层特征及其对产能的影响[J]. *天然气工业*, 2011, 31(5): 16–20.
YE Jianping, WU Jianguang, FANG Chao, et al. Regional geological and reservoir characteristics of the Panhe CBM Gas Field in the southern Qinshui Basin and their influences on CBM gas production capacity[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(5): 16–20.
- [8] 许启鲁, 黄文辉, 刘贝, 等. 沁水盆地南部 15 号煤储层物性特征分析[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(3): 160–163.
XU Qilu, HUANG Wenhui, LIU Bei, et al. Physical characteristics analysis of No. 15 coal reservoir in southern Qinshui Basin[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(3): 160–163.
- [9] 毛金成, 杨小江, 宋志峰, 等. 耐高温清洁压裂液体系 HT-160 的研制及性能评价[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(6): 105–109.
MAO Jincheng, YANG Xiaojiang, SONG Zhifeng, et al. Development and performance evaluation of high temperature resistant clean fracturing fluid system HT-160[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(6): 105–109.
- [10] 陈彬, 张伟国, 姚磊, 等. 基于井壁稳定及储层保护的钻井液技术[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(2): 184–188.
CHEN Bin, ZHANG Weiguo, YAO Lei, et al. Drilling fluid technology based on well stability and reservoir protection[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(2): 184–188.
- [11] 许朋琛, 陈宁, 胡景东, 等. 可降解清洁钻井液的研究及现场应用[J]. *钻井液与完井液*, 2017, 34(3): 27–32.
XU Pengchen, CHEN Ning, HU Jingdong, et al. Study and field application of degradable clear drilling fluid[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2017, 34(3): 27–32.
- [12] 张政, 秦勇, 傅雪海, 等. 潘庄区块煤层气气性分布规律及地质控制因素分析[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(5): 98–102.
ZHANG Zheng, QIN Yong, FU Xuehai, et al. Distribution law of gas-bearing property of coal seams and analysis on geological control factors in Panzhuang Block[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(5): 98–102.
- [13] 邓钧耀, 刘奕杉, 乔磊, 等. 保德煤层气田黄河压覆区长水平段水平井钻井完井技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(2): 37–41.
DENG Junyao, LIU Yishan, QIAO Lei, et al. Drilling and completion technology of horizontal wells with long horizontal section in the Yellow River overlay area of the Baode coalbed methane field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(2): 37–41.
- [14] 闫霞, 温声明, 聂志宏, 等. 影响煤层气开发效果的地质因素再认识[J]. *断块油气田*, 2020, 27(3): 375–380.
YAN Xia, WEN Shengming, NIE Zhihong, et al. Re-recognition of geological factors affecting coalbed methane development effect[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(3): 375–380.
- [15] 乔磊, 申瑞臣, 黄洪春, 等. 煤层气多分支水平井钻井工艺研究[J]. *石油学报*, 2007, 28(3): 112–115.
QIAO Lei, SHEN Ruichen, HUANG Hongchun, et al. Drilling technology of multi-branch horizontal well[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(3): 112–115.
- [16] 温航, 陈勉, 金衍, 等. 钻井液活度对硬脆性页岩破坏机理的实验研究[J]. *石油钻采工艺*, 2014, 36(1): 57–60.
WEN Hang, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental research on brittle shale failure caused by drilling fluid activity[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(1): 57–60.
- [17] 岳前升, 陈军, 邹来方, 等. 沁水盆地基于储层保护的煤层气水平井钻井液的研究[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(增刊2): 416–419.
YUE Qiansheng, CHEN Jun, ZOU Laifang, et al. Research on coalbed methane drilling fluid for horizontal well based on coal reservoir protection in Qinshui Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(supplement2): 416–419.
- [18] 袁光杰, 付利, 王元, 等. 我国非常规油气经济有效开发钻井完井技术现状与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(1): 1–12.
YUAN Guangjie, FU Li, WANG Yuan, et al. The up-to-date drilling and completion technologies for economic and effective development of unconventional oil & gas and suggestions for further improvements[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(1): 1–12.
- [19] 曹立虎, 张遂安, 王晶, 等. 松软煤层水平孔生物酶可解堵钻井液研究[J]. *石油化工高等学校学报*, 2014, 27(2): 65–68.
CAO Lihu, ZHANG Suian, WANG Jing, et al. Research of enzyme drilling fluid in soft coal seam[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2014, 27(2): 65–68.

[编辑 滕春鸣]