

深层煤岩气二氧化碳泡沫压裂压后评价方法

陈海涌¹, 苏伟东^{2,3}, 武月荣^{2,3}, 徐 洋^{2,3}, 王筱箐^{2,3}, 王历历⁴

1 中国石油长庆油田公司工程技术部 2 中国石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院
3 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 4 中国石油长庆油田公司油气工艺研究院

摘要: 为了评价 CO₂ 泡沫压裂对深层煤岩气的适用性及分析深层煤的压裂地质特征,文章以鄂尔多斯盆地深层煤岩气水平井 X1 井的 CO₂ 泡沫压裂作业为例,通过采用压裂停泵压降速率分析、G 函数压降曲线分析及压裂注入沿程管路摩阻分析等压力诊断方法,评价了 X1 井的压裂地质特征、裂缝扩展特征及压裂液类型对压后效果的影响。研究结果表明:鄂尔多斯盆地的深部煤岩具有较好的渗透性;CO₂ 压泡沫压裂工艺能够满足鄂尔多斯盆地深层煤岩气水平井的压裂作业需要,增能助排优势突出,压后增产效果明显;与胍胶压裂液相比,CO₂ 泡沫压裂液改造后的停泵压降速率更快、渗透性更好;通过提高单簇进液强度、提高压裂的裂缝内压力能够改善地层的渗透性。此外,与砂岩相比,煤岩 CO₂ 泡沫压后的 CO₂ 喷势小、气体浓度低,见到了 CO₂ 在地层中被吸附的预期。本研究可为深层煤岩气的压裂工艺优选及压裂参数优化提供经验及建议。

关键词: 深部煤岩气; CO₂ 泡沫压裂; 压力诊断; 压后评价

DOI: 10. 3969/J. ISSN. 1006-768X. 2024. 03. 13

引用格式: 陈海涌,苏伟东,武月荣,等. 深层煤岩气二氧化碳泡沫压裂压后评价方法[J]. 钻采工艺,2024,47(3): 97-101

CHEN Haiyong, SU Weidong, WU Yuerong, et al. Post-fracturing Evaluation Method of the Deep Coal Bed Methane Reservoir Stimulated with CO₂/Foam Fracturing Technology[J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(3): 97-101

Post-fracturing Evaluation Method of the Deep Coal Bed Methane Reservoir Stimulated with CO₂/Foam Fracturing Technology

CHEN Haiyong¹, SU Weidong^{2,3}, WU Yuerong^{2,3}, XU Yang^{2,3}, WANG Xiaoqing^{2,3}, WANG Lili⁴

1. Engineering Technology Management Department of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 2. Drilling & Production Engineering Technology Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. Oil & Gas Technology Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China

Abstract: In order to evaluate the applicability of CO₂ foam fracturing to deep coal bed methane and analyze the fracturing geological characteristics of deep coal, this paper takes the CO₂ foam fracturing operation of Well X1 in the deep coal bed methane horizontal well in the Ordos Basin as an example, and evaluates the influence of the fracturing geological characteristics, fracture propagation characteristics and fracturing fluid type on the post-fracturing effect of Well X1 by using pressure diagnosis methods such as pump-stopping pressure drop rate analysis, G-function pressure drop curve analysis and friction analysis of the pipeline along the fracturing injection. The results show that: the deep coal bed methane reservoir in the Ordos Basin has good permeability. The CO₂ foam fracturing process can meet the fracturing needs of deep coal bed methane horizontal wells in in the Ordos Basin, and the advantages of energy enhancement and drainage are prominent, and the effect of post-fracturing stimula-

基金项目: 中国石油集团攻关性应用性专项“非常规储层体积压裂共性技术研究”(编号: 2023ZZ28YJ01)。

作者简介: 陈海涌(1968—),工程师,主要从事试油气压裂工作。地址:(710018)陕西省西安市未央区兴隆园小区, E-mail:

chy1_cq@petrochina.com.cn

tion is obvious. Compared with guar gum fracturing fluid, the pump-stopping pressure drop rate is faster and permeability better after the application of CO₂ foam fracturing fluid. The permeability of the formation can be improved by increasing the single-cluster injection intensity and increasing the pressure in the fracture. In addition, compared with the operation in sandstone reservoir, the CO₂ flow rate and concentration of CO₂ are lower after CO₂ foam fracturing in deep coal bed methane, which confirms the expectation that CO₂ is adsorbed in formation. This study can provide experience and suggestions for the optimization of fracturing process and fracturing parameters in deep coal and rock gas.

Key words: deep coal bed methane; CO₂ foam fracturing; pressure diagnosis; post-fracturing evaluation

0 引言

我国拥有储量丰富的煤层气资源,其中 1 000 m 以内的浅层煤已经形成了较成熟的开发技术。近年来,以鄂尔多斯盆地 2 000 m 以深的深层煤岩气勘探开发迎来重大突破,将成为我国天然气资源的又一重要产区^[1-3]。与浅层煤层气资源相比,深层煤岩气资源由于地层埋深大、地应力高、压实作用更强等原因导致开发难度大、开发成本高^[4-6]。深部煤目前主要采用水平井压裂改造方式完井投产,与浅层煤层气普遍采用活性水压裂液不同,深部煤需要携砂造缝能力更强的压裂液,如:胍胶压裂液、乳液聚合物压裂液及 CO₂ 泡沫压裂液等,其中 CO₂ 泡沫压裂液因其独特的技术优势受到关注^[4-5]。CO₂ 泡沫压裂较常规压裂不但具有入地液量少、返排能量高的技术特点,还具有甲烷置换潜力以及节水环保、碳利用等优势^[6-14]。

常用的压后效果评价方法主要有远离裂缝的直接压裂诊断技术(地下微地震监测等)、直接近井眼裂缝诊断技术(井温测井等)和间接压裂诊断技术三种类型。压力诊断方法是基于压裂数学模型,通过对压裂过程中的压力响应特征来评价储层地质特征、压裂裂缝尺寸及扩展特征等的一种间接压裂诊断技术。与其他压后效果评价方法相比,压力诊断方法能够在更大的尺度(地层岩体)上对地层及裂缝的多方面属性进行对比评价,且具有操作简便、比对性强的优点。

本文以鄂尔多斯盆地某深层煤岩气水平井 X1 井为例,开展了基于压力诊断方法的深层煤岩气井 CO₂ 泡沫压后评价,为更好地认识深层煤岩气的压裂地质特征、优选压裂液体系及优化压裂工艺参数等提供借鉴。

1 钻完井概况

1.1 钻井基础资料

X1 井位于鄂尔多斯盆地,目的层 8[#]煤层,完钻井深 4 520 m,垂深 3 176~3 199 m,水平段长 1 130 m,

钻遇煤层 946 m,煤层钻遇率 83.7%,气测峰值 89.41%,采用 Ø139.7 mm 套管完井。

1.2 压裂作业实施情况

X1 井采用可溶桥塞分段压裂工艺,将水平段划分为 13 段 38 簇,单段段长 70~95 m,平均 87 m,2~3 簇/段。为增加地层返排能量、减少压裂用水量,采用胍胶+CO₂ 发泡的泡沫压裂工艺,泡沫液施工排量 4.0~12.0 m³/min(其中:液态 CO₂ 的排量为 3.0~6.0 m³/min),单段加砂量 129.6~200 m³,地面平均砂比 27%~45.5%,累计单井加砂量 2 223.4 m³,累计注入液态 CO₂ 5 315.3 m³,注入胍胶压裂液 9 174 m³。与同排量常规压裂液相比,CO₂ 泡沫压裂施工压力较高(80~83 MPa),但施工压力较平稳,加砂施工顺利,能够满足煤岩气体积压裂的施工需要,并可实现同规模加砂常规压裂节约用水 40% 以上。为了能够更好地认识深部煤的压裂地质特征,提高增产改造效果,对此次压裂施工开展了基于压力诊断方法的压后效果评价。

2 压裂地质特征分析

2.1 煤岩渗透性

在压裂施工中的两个压力响应结果显示煤岩的渗透性很好:一是首段清水注入停泵压降测试。X1 井首段注入清水 3.2 m³ 后停泵 5 min,测得井口压力由 44.2 MPa 降至 33.7 MPa,压降速率达到 10.5 MPa/5 min,由于注入排量较小且未见到明显的地层破裂压力显示,预计地层中未形成人工裂缝,但测得的压降速率很快,表明煤岩的基质渗透性很好。二是胍胶压开地层的破裂压力响应明显。首段注入清水 50 m³(井容约 50 m³) 未见明显破压,胍胶入地后地层立即见到明显破压,井口破裂压力达 86.5 MPa,说明黏度较低的清水因滤失速率大而难以实现地层破压,间接表明地层具有很好的渗透性。

2.2 地层渗透性是随压力变化的

通过压降数据得到的 G 函数压力曲线是压力诊断常用的工具之一。X1 井各段在压裂停泵后均进行

了45 min的压降测试,根据这些压降数据,完成了本井压裂的12段(共13段,其中1段未测压降曲线)压降数据的G函数曲线绘图。结果显示:12段中有6段(第1、3、4、7、10、11段)的G函数曲线表现为地层渗透性是随压力变化的,以第10段为例(图1),压力的增加改善了地层的渗透性。

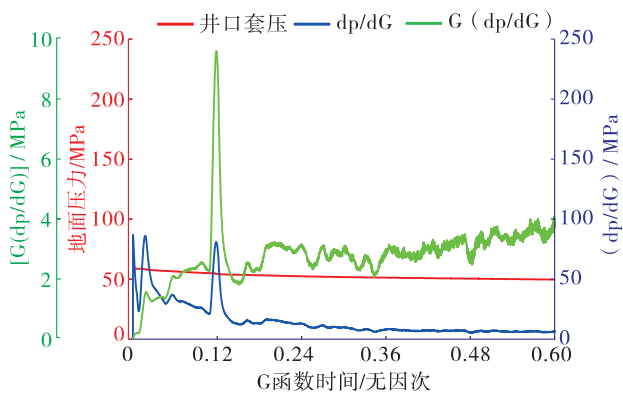


图1 X1井第10段压降数据的G函数曲线图

2.3 煤岩裂缝在停泵后裂缝仍然在扩展

能够判断压裂停泵后裂缝是否继续扩展是G函数压力诊断的又一功能,当G函数曲线表现为随时间无明显变化的斜线时,表明在停泵后裂缝仍然在扩展。本井压裂的12段中有8段(第2、3、4、7、8、9、10、12段)的G函数曲线表现为停泵后的裂缝仍在扩展,以第10段为例见图1。

3 影响压裂效果的主要因素分析

3.1 压裂液类型的影响

3.1.1 CO₂ 泡沫压裂液比胍胶的压降速率快

X1井第4段初期采用CO₂泡沫压裂液,后期因设备故障中止了CO₂的注入,改用胍胶压裂液施工。对比第4段前后两种压裂液施工的停泵压降速率可知:CO₂泡沫压裂液的压降速率为6.67 MPa/10 min,远高于胍胶压裂液的2.14 MPa/10 min。本井其余12段均采用CO₂泡沫压裂液。通过对比可知:CO₂泡沫压裂施工的12段中有11段的压降速率均高于胍胶压裂段(图2)。

3.1.2 CO₂ 泡沫压裂对地层渗透性的增加更明显

根据X1井第4段前后两种压裂液施工的停泵压降数据,完成了本段的两次作业后停泵压降曲线的G函数曲线绘制(图3、图4)。CO₂泡沫注入停泵压降的G函数曲线表现为随渗透率增压力变化特征,胍胶注入停泵压降数据的G函数曲线则无此特征,由此可知:CO₂泡沫压裂后地层渗透性增加更明显。

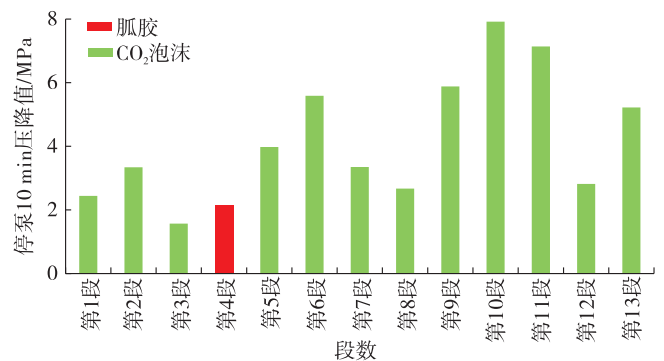


图2 X1井各段停泵10 min内压降数据对比图

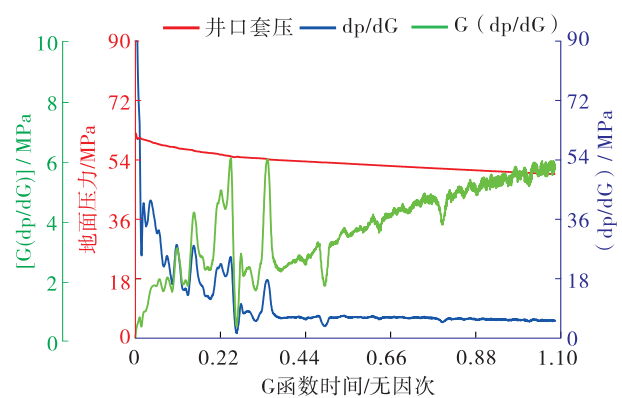


图3 X1井第4段CO₂泡沫注入停泵压降数据的G函数曲线图

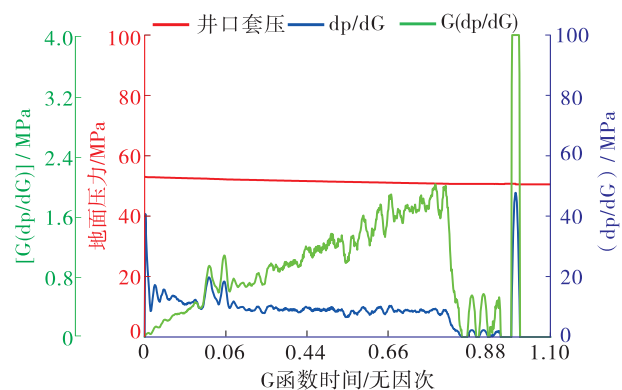


图4 X1井第4段胍胶注入停泵压降数据的G函数曲线图

3.1.3 煤岩压后放喷现象与常规砂岩区别明显

前期研究结果表明:在同等压力条件下,煤岩样品对CO₂的吸附量约为甲烷吸附量的2倍^[16]。此外,CO₂吸附表面能、自由能变化及吸附热均高于甲烷,其吸附能力为甲烷的2.68~19.41倍。注入动态过程,CO₂吸附速率高于甲烷,吸附更加有序,释放热量大,有利于置换甲烷。

通过X1作业后放喷过程中的CO₂喷势及浓度观察发现:与砂岩CO₂泡沫压裂井相比,X1井CO₂泡沫压后放喷的CO₂喷势小、气体浓度低,CO₂被煤岩吸附具有较好的预期。

3.2 压力的影响

由于煤岩的密度低、强度小,更易受到压力的影响。据此,统计了本井 13 段的压后瞬时停泵压力,并分析了停泵压力值与压降速率的相关性。结果显示:井口瞬时停泵压力值处于 60.8~68.6 MPa 区间的压裂段共有 8 个改造段,这 8 个改造段的压降速率均高于井口瞬时停泵压力值小于 54.2 MPa 的其他 4 个改造段(图 5),从而表明裂缝内压力值与地层渗透性之间具有较好的正相关特性。

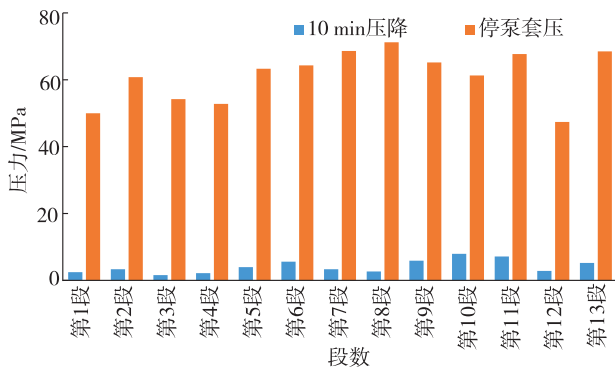


图 5 X1 井井口瞬时停泵压力与压降速率对照图

3.3 射孔参数的影响

X1 采用的是分段多簇压裂工艺,单段内的射孔簇数除首段为 2 簇外,其余均为每段 3 簇,各段射孔数均为 72 孔。采用沿程管路摩阻分析法进行了各段射孔簇开启情况的判别。首先建立了胍胶压裂液的管路摩阻图版(图 6),作为判断各段是否存在明显孔眼摩阻的依据;然后,将各段胍胶顶替阶段的摩阻数据与管路摩阻图版对比发现:X1 井第 10 段、第 11 段的摩阻数值远高于图版参考值。认为第 10 段、第 11 段的实际进液孔眼数少、单簇进液强度更大。由图 5 可知,第 10 段、第 11 段的压降速率最快,分别为 7.92、7.14 MPa/10 min。由此可见:地层的进液强度与地层的渗透性之间表现为较好的正相关特性。

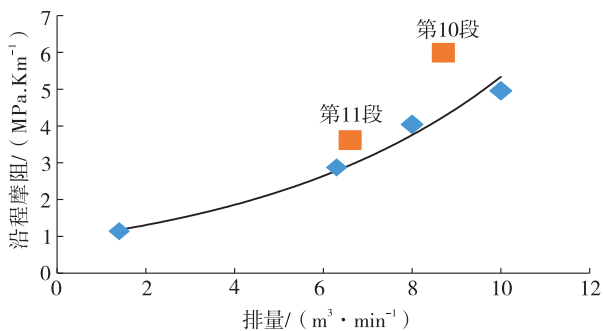
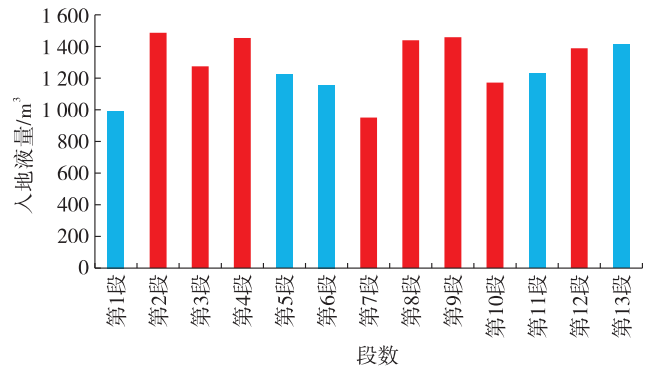


图 6 X1 井第 10、11 段摩阻数据及沿程摩阻图版对比图

3.4 压裂规模的影响

通过对比 X1 井各段入地液量(图 7)可知:注入

液量较多(1 274~1 486.8 m³)的井段表现为停泵后裂缝仍在扩展,反映出地层能够容纳更大规模的砂、液量。



注:红色为该段G函数曲线表现为停泵后裂缝仍在扩展

图 7 X1 井各段入地液量对比图

4 压后效果

X1 井压后连续自喷排液 15 d 后,井口套压 7.4 MPa,点火焰 5~6 m,折算千米水平段长度的试气产量为 7.2×10^4 m³/d,较同区块常规压裂井的折算千米水平段长度的平均试气产量 4.75×10^4 m³/d 有了明显提高,见到了较好的压后增产效果。

5 结论

(1) CO₂ 泡沫压裂工艺满足鄂尔多斯盆地深部煤岩气水平井的压裂需要,能够实现大排量、大砂量、大液量的施工作业,压后增产效果明显。

(2) 基于压后压降分析的压力诊断结果显示:深部煤岩具有较好的渗透性,且其渗透性是随压力变化的,与流体压力表现为较好的正相关特性。

(3) 基于 G 函数曲线的压力诊断结果显示:深部煤岩在大规模压裂液注入停泵后裂缝仍在扩展。此外,与胍胶压裂液相比,CO₂ 泡沫压裂液的压降速率更快、渗透性更好。

(4) 压裂管路摩阻分析可知:部分井段未能实现射孔簇的完全开启,提高射孔簇开启率是下步优化方向;此外,提高单簇进液强度及裂缝内压力能够获得更快的压后压降速率,有利于提高压裂效果。

参 考 文 献

[1] 邹才能,陈艳鹏,孔令峰,等. 煤炭地下气化及对中

- 国天然气发展的战略意义 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46 (2): 195-204.
- ZOU Caineng, CHEN Yanpeng, KONG Lingfeng, et al. Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46 (2): 195-204.
- [2] 郭绪杰, 支东明, 毛新军, 等. 准噶尔盆地煤岩气的勘探发现及意义 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26 (6): 38-49.
- GUO Xujie, ZHI Dongming, MAO Xinjun, et al. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26 (6): 38-49.
- [3] 桑树勋, 李瑞明, 刘世奇, 等. 新疆煤层气大规模高效勘探开发关键技术领域研究进展与突破方向 [J]. 煤炭学报, 2024, 49 (1): 563-585.
- SANG Shuxun, LI Ruiming, LIU Shiqi, et al. Research progress and breakthrough directions of the key technical fields for large scale and efficient exploration and development of coalbed methane in Xinjiang [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49 (1): 563-585.
- [4] 张聪, 李梦溪, 胡秋嘉, 等. 沁水盆地南部中深部煤层气储层特征及开发技术对策 [J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52 (2): 122-133.
- ZHANG Cong, LI Mengxi, HU Qiujia, et al. Moderately deep coalbed methane reservoirs in the southern Qinshui Basin: characteristics and technical strategies for exploitation [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52 (2): 122-133.
- [5] 张懿, 朱光辉, 郑求根, 等. 中国煤层气资源分布特征及勘探研究建议 [J]. 非常规油气, 2022, 9 (4): 1-8.
- ZHANG Yi, ZHU Guanghui, ZHENG Qiugen, et al. Distribution characteristics of coalbed methane resources in China and recommendations for exploration research [J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9 (4): 1-8.
- [6] 苏伟东, 宋振云, 马得华, 等. 二氧化碳干法压裂技术在苏里格气田的应用 [J]. 钻采工艺, 2011, 33 (4): 39-40.
- SU Weidong, SONG Zhenyun, MA Dehua, et al. Application of CO₂ fracturing technology in Sulige gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2011, 33 (4): 39-40.
- [7] 毛恒博, 刘毅, 李丽, 等. 新型氮气泡沫压裂液体系研究及其在煤层气储层中的应用 [J]. 钻采工艺, 2022, 45 (5): 139-143.
- MAO Hengbo, LIU Yi, LI Li, et al. Study on new nitrogen foam fracturing fluid system and its application in coalbed methane reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45 (5): 139-143.
- [8] 蒋思思, 郭永强, 廖明敏, 等. 二氧化碳敏感清洁压裂液的研制及性能评价 [J]. 钻采工艺, 2023, 46 (6): 126-132.
- JIANG Sisi, GUO Yongqiang, LIAO Mingmin, et al. Development and performance evaluation of CO₂ sensitive clean fracturing fluid [J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46 (6): 126-132.
- [9] 刘佳佳, 聂子硕, 于宝种, 等. 超临界二氧化碳对煤体增透的作用机理及影响因素分析 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51 (2): 204-216.
- LIU Jiajia, NIE Zishuo, YU Baozhong, et al. Analysis of the mechanism and influencing factors of supercritical carbon dioxide on coal permeability enhancement [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51 (2): 204-216.
- [10] 郑维师, 宋振云, 苏伟东. 液态二氧化碳压裂施工压力分析研究与应用 [C] //2020 油气田勘探与开发国际会议论文集, 2020-09-23, 中国四川成都, 2020.
- ZHENG Weishi, SONG Zhenyun, SU Weidong. Research and application of operation pressure analysis in liquid carbon dioxide fracturing [C] //The 2020 International Field Exploration and Development Conference, 2020-09-23, Chengdu, Sichuan, China, 2020.
- [11] 王梓麟, 时婧玥, 徐栋, 等. 煤储层无水压裂技术现状及展望 [J]. 钻采工艺, 2024, 47 (1): 80-86.
- WANG Zilin, SHI Jingyue, XU Dong, et al. Research status and prospects of waterless fracturing technology in coal reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47 (1): 80-86.
- [12] 周长林, 彭欢, 桑宇, 等. CO₂ 泡沫压裂技术研究进展及应用展望 [J]. 钻采工艺, 2016, 39 (3): 46-49.
- ZHOU Changlin, PENG Huan, SANG Yu, et al. Research progress and application prospect of CO₂ foam fracturing technology [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39 (3): 46-49.
- [13] 李雪娇, 陈帅, 甄怀宾, 等. 碎软煤层夹矸间接压裂开发煤层气技术研究 [J]. 钻采工艺, 2022, 45 (5): 69-74.
- LI Xuejiao, CHEN Shuai, ZHEN Huaibin, et al. Study on indirect fracturing technology for CBM development in the parting of broken soft coal seams [J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45 (5): 69-74.
- [14] 俞天军, 翟中波, 漆世伟, 等. 鄂尔多斯盆地南缘山1盒8储层混二氧化碳压裂技术新探索 [J]. 钻采工艺, 2022, 45 (5): 63-68.
- YU Tianjun, ZHAI Zhongbo, QI Shiwei, et al. New ideas for the development of Shan 1 and he 8 reservoirs with mixed CO₂ fracturing technology in the South of Ordos basin [J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45 (5): 63-68.