

引用本文:葛祥,刘伟,孙鑫,等.测控技术在深层、常压页岩气勘探开发中的应用[J].石油实验地质,2023,45(6):1221-1230.DOI:10.11781/sysydz2023061221.

GE Xiang, LIU Wei, SUN Xin, et al. Application of measurement and control technology in deep and normal pressure shale gas exploration and development[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(6): 1221-1230. DOI: 10.11781/sysydz2023061221.

## 测控技术在深层、常压页岩气勘探开发中的应用

葛祥<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 孙鑫<sup>2</sup>, 王春伟<sup>2</sup>, 马林<sup>3</sup>

1. 中国石化 经纬有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 中国石化 经纬有限公司 地质测控技术研究院, 山东 青岛 266000;
3. 中国石化 经纬有限公司 华东测控分公司, 江苏 扬州 225000

**摘要:** 深层、常压页岩气是中国石化页岩气增储上产的重点领域。面临效益开发的困难,对井筒测控技术提出了提速降本、提产增效的更高要求。为了准确评价页岩气储层,开展了储层微观特征定量表征、孔隙压力系数预测、含气量计算、低阻页岩评价和可压性评价研究,形成了比较成熟的页岩气“双甜点”精细评价技术。为了提高深层优质页岩钻遇率,打造了定测录导一体化工作模式,基于多属性地质建模,测录震多专业融合,形成了复杂构造区水平井地质导向技术。针对不同工区工程地质特征的差异,明确了旋转导向和螺杆+MWD 两种提速技术的适用范围,实现分类施策提速提效。为了配合大规模体积压裂,研发应用了多级射孔桥塞联作、等孔径射孔、高温井下微地震监测和“牵引器+DAS 光纤”压裂监测等多项技术。研究形成的页岩气“双甜点”精细评价技术、提高储层钻遇率技术、钻井提速和压裂提产配套技术,在深层、常压页岩气领域得到广泛应用,较好地支撑了勘探开发。下一步,需要进一步发挥定测录导一体化优势,不断推进测控技术创新,在新层系/新类型页岩气解释评价、高温测控仪器和工具研制、基础资料录取等方向持续攻关,全力保障深层、常压页岩气高质量勘探与效益开发。

**关键词:** 测控技术; 深层页岩气; 常压页岩气; 勘探开发; 钻井提速; 压裂提产

中图分类号: TE242

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz2023061221

## Application of measurement and control technology in deep and normal pressure shale gas exploration and development

GE Xiang<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, SUN Xin<sup>2</sup>, WANG Chunwei<sup>2</sup>, MA Lin<sup>3</sup>

1. SINOPEC Matrix Corporation, Qingdao, Shandong 266000, China;
2. Geosteering & Logging Research Institute, SINOPEC Matrix Corporation, Qingdao, Shandong 266000, China;
3. Huadong Geosteering & Logging Company, SINOPEC Matrix Corporation, Yangzhou, Jiangsu 225000, China

**Abstract:** Deep and normal-pressure shale gas is the key field of shale gas exploration and development of SINOPEC. At present, this type of shale gas is faced with difficulties in the beneficial development. In order to increase the productivity of single well and further reduce cost and increase efficiency, higher technical requirements are put forward for wellbore measurement and control technology. In order to accurately evaluate shale gas reservoirs, quantitative characterization of reservoir micro-characteristics, prediction of pore pressure coefficient, calculation of gas content, evaluation of low-resistivity shale, and compressibility evaluation of shale gas reservoirs have been carried out, forming a relatively mature shale gas “double sweet spots” fine evaluation technology. In order to improve the drilling rate of deep high-quality shale, a working model integrating directional drilling, mud logging, logging and steering is created. Based on multi-attribute geological modeling and well-to-seismic integration, the geosteering technology for horizontal wells in complex structural areas is formed. According to the difference of geological characteristics in different blocks, the application scopes of the two drilling speed improvement technologies, namely rotary steering and screw + MWD, are defined, thus realizing targeted measures for speed

收稿日期 (Received): 2023-08-28; 修订日期 (Revised): 2023-10-13; 出版日期 (Published): 2023-11-28.

作者简介: 葛祥 (1970—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事测井解释与储层评价。E-mail: gexiang.osjw@sinopec.com.

通信作者: 孙鑫 (1993—), 男, 助理研究员, 主要从事非常规储层解释与评价。E-mail: upesunxin@163.com.

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05061)、中国石化集团公司重点科技项目 (JP15051、JP17033) 及中国石化集团公司“十条龙”项目 (P21080) 联合资助。

improvement. To meet the requirements of large-scale volumetric fracturing, a number of technologies such as multi-stage perforating bridge plug combined operation, equal aperture perforation, high temperature underground microseismic monitoring and “tractor + DAS fiber” fracturing monitoring have been developed and applied. The shale gas “double sweet spots” fine evaluation technology, the technology for improving reservoir drilling rate, and the technology for increasing drilling speed and fracturing performance have been widely used in deep and normal-pressure shale gas field, which well support the exploration and development of deep and normal-pressure shale gas. Next, SINOPEC will give full play to its advantages in the technology integrating directional drilling, mud logging, logging and steering, continue to promote measurement and control technology innovation, and continue to solve key problems in the interpretation and evaluation technology of new formations/new types of shale gas, the development of high-temperature measurement and control instruments and tools, and the acquisition of basic data, so as to fully guarantee the high-quality exploration and cost-effective development of deep and normal-pressure shale gas.

**Key words:** measurement and control technology; deep shale gas; normal-pressure shale gas; exploration and development; drilling speed increase; fracturing performance improvement

中国主要沉积盆地页岩气资源丰富,已经在四川盆地上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组、二叠系大隆组、吴家坪组、茅口组、寒武系筇竹寺组等海相地层取得了页岩气勘探商业发现<sup>[1-2]</sup>,并在涪陵焦石坝地区实现了中深层海相页岩气的规模效益开发<sup>[3]</sup>。

中国石化矿权内有利页岩气资源以深层(埋深超过 3 500 m)、常压(地层压力系数小于 1.3 MPa/hm)为主,攻关突破深层、常压和新区新层系已成为页岩气勘探开发的趋势<sup>[4-5]</sup>。深层页岩气主要分布在四川盆地盆内和盆缘地区,包括威荣、永川、丁山、东溪、南川、江东、平桥、凤来等区块<sup>[6-7]</sup>,埋深约 3 500~4 500 m,地层压力系数介于 1.0~2.0 MPa/hm<sup>[8]</sup>,游离气占总含气量的比例一般介于 50%~80%,产能差异较大。常压页岩气主要分布在盆缘和盆外地区,包括东胜、白马、武隆、赤水等区块<sup>[9]</sup>,埋深约 2 000~4 000 m,地层压力系数介于 0.9~1.3 MPa/hm,游离气占总含气量的比例一般低于 60%,单井产能总体较低。由于复杂构造带应力作用的影响,水平应力差异系数相对较大<sup>[10]</sup>。

已有研究表明,影响页岩气单井产能的主控因素包括地质、工程和开发技术政策等方面<sup>[11]</sup>。其中,地质因素包括地层压力系数、优质储层厚度、孔隙度、含气量、地层破裂压力梯度、水平地应力差异系数、天然裂缝等;工程因素包括铂金储层钻遇率、分段分簇长度、注液强度、加砂强度等;开发技术政策包括水平井部署方位与最小主应力夹角、布井方式、水平井段长度和生产制度等。为了提高单井产能,进一步降本增效,页岩气勘探开发中贯穿了地

质工程一体化的理念,对井筒测控服务提出了双甜点精细评价、提高优质储层钻遇率、配套钻井提速和压裂提产等测录定技术需求。

## 1 页岩气领域测录定技术现状

中国石化已开发页岩气藏都分布在四川盆地及周缘地区,以上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组为主,主要包括以涪陵焦石坝为代表的中深层高压页岩气藏、以威荣为代表的深层高压页岩气藏和以南川为代表的常压页岩气藏。以涪陵页岩气田勘探发现为契机,页岩气测录定技术得到充分发展,形成了比较成熟的水平井地质导向技术和定测录导一体化工作模式、页岩气测录井采集技术、“双甜点”解释评价技术和“井工厂”多级射孔桥塞联作技术,水平井优质储层钻遇率超过 96%、水平井测井一次成功率超过 95%、测录井资料优质率超过 95%、储层评价解释符合率超过 97%,为油气田提速降本、提产增效做出了积极贡献,较好地支撑了页岩气勘探开发。

## 2 双甜点评价技术

针对地质、工程双甜点识别和定量评价难题,将储层微观特征与宏观评价相结合,建立了基于主控因素的页岩气“双甜点”解释评价技术,支撑靶窗优选、压裂分段优化。

### 2.1 储层微观特征定量表征

页岩气储层既是烃源层又是储集层<sup>[12]</sup>,其赋存状态以吸附态或游离态为主<sup>[13]</sup>,岩性多为富含有机质的暗色、黑色页岩、高碳页岩及含沥青质页岩,也有暗色页岩与粉砂岩类的互层<sup>[14]</sup>,储集空间

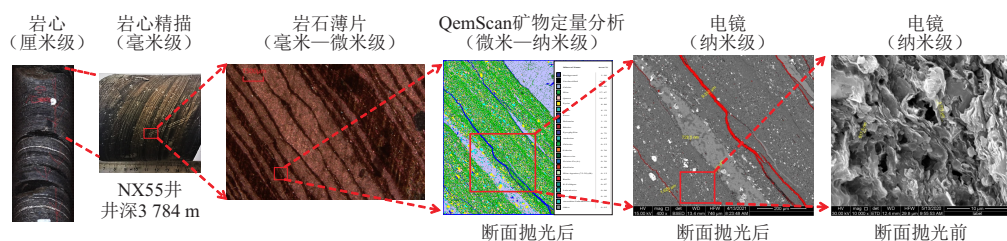


图1 多尺度页岩气储层微观表征技术

Fig.1 Multi-scale microscopic characterization technology for shale gas reservoirs

主要包括有机质孔、矿物颗粒间微孔和晶间孔等<sup>[15]</sup>。因此,准确描述储层的微观结构特征,明确页岩气甜点分布,可以更好地优化地质工程方案,指导深层、常压页岩气勘探开发<sup>[16]</sup>。

针对不同层系、不同类型页岩气甜点评价的需求,目前发展了多项适用于现场快速评价的实验分析方法<sup>[17]</sup>,这些技术手段可以通过对储层微观结构和特征的精细观察和分析,实现页岩气储层多尺度(厘米级、毫米级、微米级、纳米级)及多维度(岩性、岩相、物性、孔隙结构、含气性)的快速定量评价。其中岩心精细描述可以明确厘米—毫米级的岩石类型及裂缝发育情况;岩石薄片技术直观显示毫米—微米级页岩纹层及裂缝的发育程度,反映纹层厚度及规模;QemScan 矿物定量分析、扫描电镜技术可以清晰展示微米—纳米级页岩矿物组成及储集空间特点(图1)。激光扫描共聚焦分析可以明确有机质的分布状态;核磁共振岩心分析可以统计纳米级孔隙孔径的分布情况,计算孔隙度,表征储层物性;X 射线衍射(XRD)技术可以获得岩石中脆性矿物的含量及占比,判断页岩可压性。

## 2.2 孔隙压力系数预测

页岩气开发实践证明,地层压力对于评价页岩含气性和产能有重要的参考意义<sup>[18]</sup>。地层孔隙压力预测方法主要有:等效深度法、Eaton 法(声波时差、电阻率、钻井  $d_c$  指数)<sup>[19]</sup>等。这些方法都基于普通泥页岩压实理论,在复杂岩性和致密地层应

用,预测精度较低。

探索了声波时差(声速)与孔隙压力的关系,结果表明,相同岩性和孔隙度条件下,随着含气性变好,孔隙压力增大,纵横波速度比降低。采用相邻普通页岩与富有机质含气页岩的纵横波速度的比值,可以预测地层孔隙压力系数。该方法在四川盆地东南缘多个深层、常压页岩气区块进行了应用,预测的地层孔隙压力系数与实测数据的吻合度及产能相关性均较好(图2,表1)。

## 2.3 含气量定量评价

页岩含气量影响因素众多,主要有地层压力、孔隙发育程度、温度、压力、含气饱和度、总有机碳含量、干酪根类型、黏土矿物等<sup>[20]</sup>。在岩心实验的

表1 实测压力系数与预测压力系数对比

Table 1 Comparison of measured and predicted pressure coefficients

井名	实测压力系数	预测压力系数	日产能/ ( $10^4 \text{ m}^3$ )	备注
SY1	1.30	1.33	7.10	微压测试
JY194-3	1.35	1.41	34.30	微压测试
JY10	1.18	1.21	18.90	微压测试
LY1	1.08	1.03	5.00	微压测试
PY1	0.98	1.04	2.52	微压测试
SY5	1.18	1.23	15.00	微压测试
SY6	1.28	1.21	13.20	微压测试
JY10-10	1.15	1.20	9.01	微压测试
LY3	1.32	1.16	17.19	微压测试

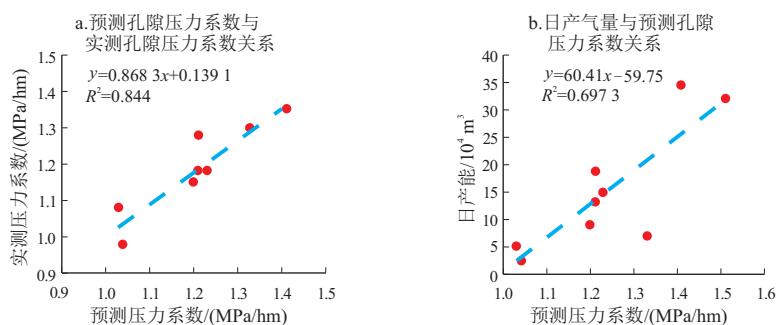


图2 孔隙压力系数预测技术应用与效果

Fig.2 Application and effect of pore pressure coefficient prediction technology



基础上,筛选含气量敏感因素,建立了基于页岩吸附能力、温度、压力、黏土含量以及总有机碳含量等多因素约束的页岩储层含气量评价方法,在龙马溪组—五峰组深层页岩气储层含气性评价中取得了良好的应用效果<sup>[21]</sup>。

页岩气主要由吸附气和游离气组成<sup>[22]</sup>,总含气量计算模型为:

$$V_t = V_f + V_a \quad (1)$$

式中: $V_t$ 表示地层总含气量,单位  $m^3/t$ ;  $V_f$ 表示地层游离气量,单位  $m^3/t$ ;  $V_a$ 表示地层吸附气量,单位  $m^3/t$ 。  $V_f$ 一般采用石油天然气行业标准《页岩气测井资料处理与解释规范:SY/T 6994—2020》推荐方法计算获得<sup>[23]</sup>。  $V_a$ 可以采用统计模型或动态兰氏模型计算获取。

该方法已在数百口页岩气井中进行了应用,测井计算含气量与岩心实验结果具有较好的一致性(图3)。

### 2.4 低阻页岩评价

四川盆地周缘及盆内深层常见低阻页岩,一般产能较低,与高产页岩气层的中高阻特征存在一个

数量级以上的差异,其低阻原因和含气性差异引起了地质学家的广泛关注。

页岩气储层低阻的原因有很多种,如地层含有一定数量的黄铁矿或磁铁矿等导电矿物、裂缝发育、地层水矿化度过高、有机质热演化程度过高、黏土矿物附加导电、保存条件差等<sup>[24]</sup>。通过页岩岩心物理实验及数值模拟,研究了页岩电阻率随总有机碳含量、热成熟度( $R_o$ )及温度、压力的变化规律。随着温度、压力(埋深)的增加,页岩电阻率数值呈降低趋势,但是由于埋藏条件不同而导致的变化达不到数量级的影响程度。进一步研究表明,五峰组—龙马溪组和寒武系富有机质页岩都具有相似的电性规律,即  $R_o$  低于 3.0%~3.5%时,页岩电阻率随总有机碳含量增大而增大; $R_o$  超过 3.0%~3.5%时,页岩电阻率随总有机碳含量增大而急剧降低(图4)。

基于大量测试层统计结果,初步明确了富有机质含气页岩的有利电性窗口,寒武系一般为 30~300  $\Omega \cdot m$ ,五峰组—龙马溪组一般为 10~500  $\Omega \cdot m$ 。在有利电性值域范围内,有机页岩电阻率与产能具有较好的正相关关系。

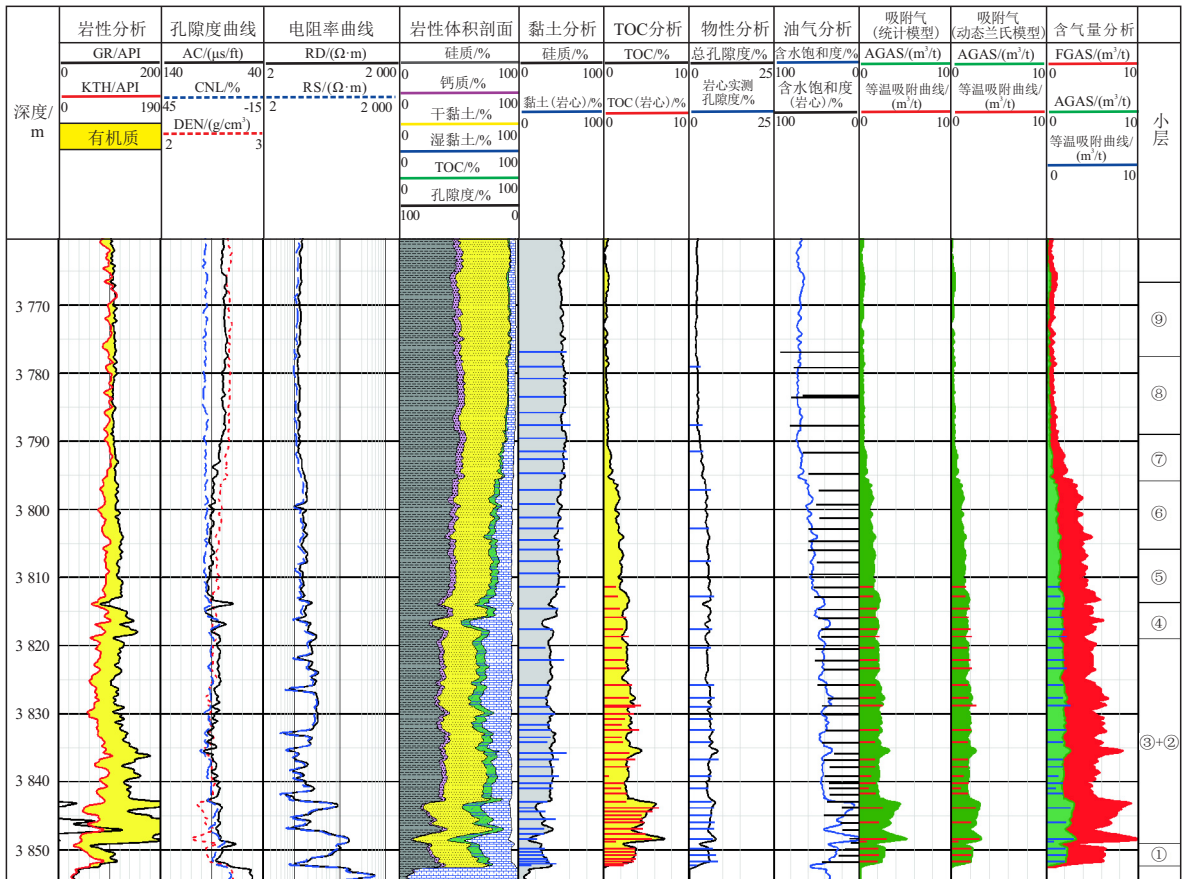


图3 四川盆地 WY23-1 井含气量计算结果对比

Fig.3 Comparison of gas content calculation results of well WY23-1 in Sichuan Basin

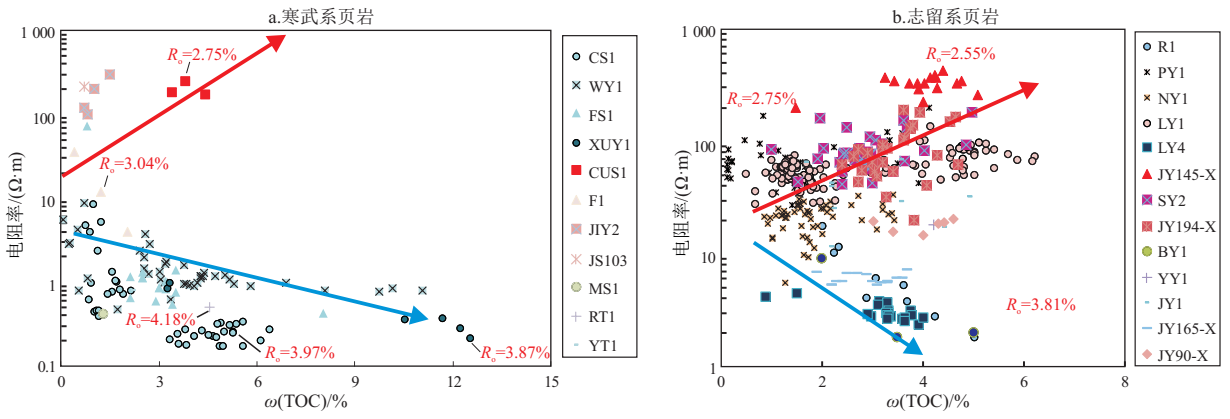


图 4 页岩储层电阻率与总有机碳含量、热成熟度的关系

Fig.4 Relationship between resistivity and TOC,  $R_0$  in shale reservoirs

### 2.5 可压性评价

目前主要通过脆性矿物百分比来评价页岩储层脆性,利用岩石力学参数来评价页岩储层可压性<sup>[25-26]</sup>。在矿物脆性评价方面,一是运用 X 射线衍射(XRD)技术可以直接测得岩石中石英、方解石和白云石等不同脆性矿物的含量及占比,反映页岩脆性;二是通过 X 射线荧光分析(XRF)技术可以测得岩石中 36 种元素,用特定元素计算脆性矿物含量也可以间接判断页岩脆性;三是岩性扫描或元素俘获测井可以测量 10~18 种元素含量,通过氧闭合模型准确计算各种矿物含量,从而评价页岩脆性。

在岩石力学参数评价方面,页岩脆性一般用泊松比和杨氏模量表征。泊松比反映岩石塑性,杨氏

模量反映岩石脆性,杨氏模量越高,泊松比越低,岩石的可压性就越好。现场实践反映,深层、常压页岩气井体积压裂难度更大,表现出破裂压力高、裂缝形态单一等特点。在泊松比和杨氏模量计算的基础上,结合破裂压力梯度和水平应力差异系数可以更客观地评价深层、常压页岩可压性,支撑双甜点评价。

如图 5 所示,S2 井底部(2 986.0~2 994.0 m)自然伽马和电阻率呈高值,中子和密度低值,声波时差较大,脆性矿物含量和“甜点”指数较高;杨氏模量相对较高,泊松比相对较低,应力差异系数较小(0.105),破裂压力相对较低,反映该段可压性较好。综合评价该段属于优质页岩气层,侧钻水平井测试日产气  $32 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,与测井评价结果一致。

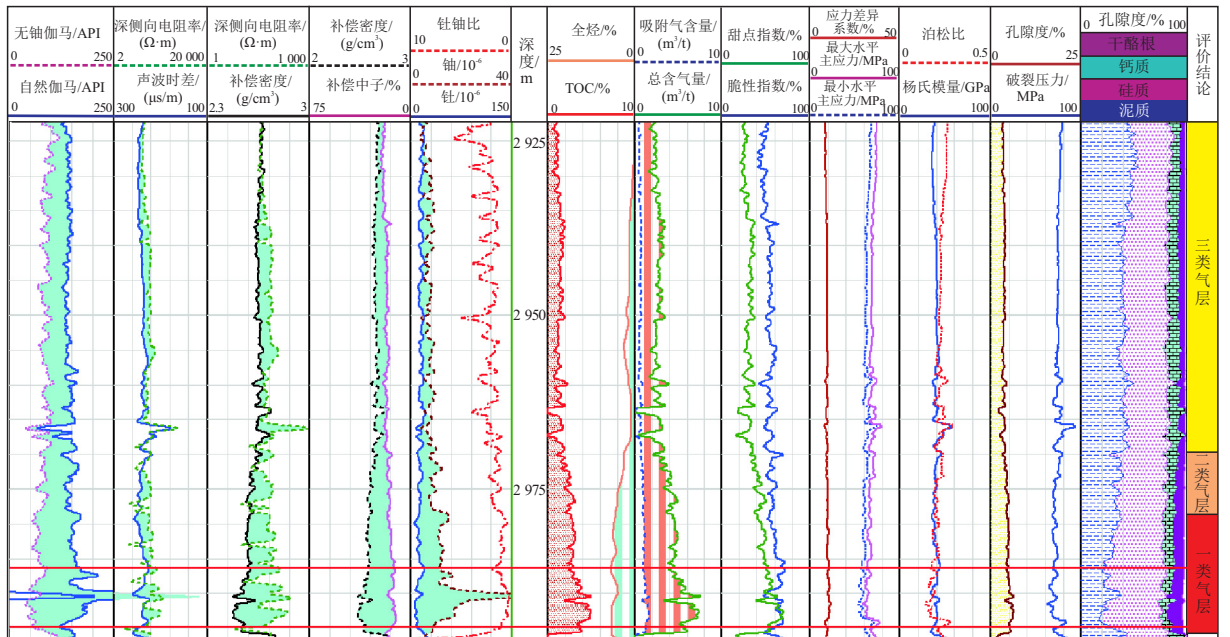


图 5 四川盆地 S2 井可压性评价结果

Fig.5 Compressibility evaluation results of well S2 in Sichuan Basin

### 3 提高钻遇率技术

影响深层、常压页岩气水平井钻遇率的主要因素包括:① 深层和复杂构造区地震预测精度低,实钻与预测差异较大;② 水平段靶窗厚度小,微幅构造与微断层发育,导致钻遇率低;③ 起伏型地层长水平段穿行,井筒轨迹的低狗腿度设计,影响了储层钻遇率;④ 简单的定向和导向工具组合,影响了微幅构造区储层钻遇率。针对以上影响因素,攻关形成了定测录导一体化工作模式,完善了多属性地质建模技术,通过井震协同多专业融合,精细对比、分段控斜,确保精准入靶,进一步提高了深层、常压页岩气水平井储层钻遇率。

#### 3.1 打造定测录导一体化工作模式

通过不断摸索以及实践优化,基于定向、测井、录井、导向各专业人员、装备及技术一体化整合的思路,建立了水平井定测录导一体化技术的运行模式,实现了人员装备统一管理及工作流程顺畅运行。

通过科学合理优化配置一体化施工队伍,优化岗位及人员结构,传统的水平井定测录导施工队伍定员标准为 13 人,优化后施工队伍精减为 9 人。各专业人员通过对定测录导数据的综合运用,实时掌握随钻过程中各项资料信息,消除专业壁垒,更好地为油气藏高效开发服务。此外,在后方组织专家成立远程支持中心,实现技术和物资装备的全天候在线支持,根据实际情况,快速形成钻井技术方案及复杂情况应急处置方案,保障安全、高效施工。

#### 3.2 应用多属性建模技术,支撑精准地质导向

运用邻井的钻井、测井以及地质研究数据,按

“相控”原则,采取序贯指示模拟的方法,选择优质储层表征参数,钻前构建研究区多属性三维地质模型,实现构造形态、储层纵横向变化的精细表征;建立工区地质、工程异常数据库,加强地质工程预警和防碰绕障设计;实施钻进过程中,不断更新地质导向模型,确保水平井准确入靶;根据中完测井、录井数据更新水平井地质模型,结合随钻测井数据,对水平段可能钻遇地层的岩性和物性实时预测并做出及时调整,提高优质储层的钻遇率。

#### 3.3 井震协同、多专业融合,提高复杂构造区储层钻遇率

据威荣—永川工区统计,储层钻遇率低于 90% 的井均为钻遇断层或微幅构造导致,采用多属性地震剖面+随钻伽马变化率+元素录井特征图版+旋转导向的综合地质导向技术,实时跟踪调整导向模型,提升小微尺度断层及构造的识别能力,保障复杂地质条件下获得较高的储层钻遇率。正常情况下,水平段所处的地层位置不会有大幅度的变化,随钻测井曲线的测值会保持相对稳定的变化率。通过模拟与统计,正常地层中,间距 1 m 的两个测点的伽马比值介于 0.81~1.25,钻遇断层后伽马比值通常会有明显变化(图 6)。多属性结合综合识别微断层的方法如表 2 所示。

2021 年以来,水平井地质导向技术已应用于 620 口页岩气水平井,储层钻遇率超过 96%,其中威荣、永川、白马等深层复杂构造区 120 口井的钻遇率达到 98%。

### 4 钻井提速配套技术

深层页岩气水平井钻井面临岩石硬度高,常

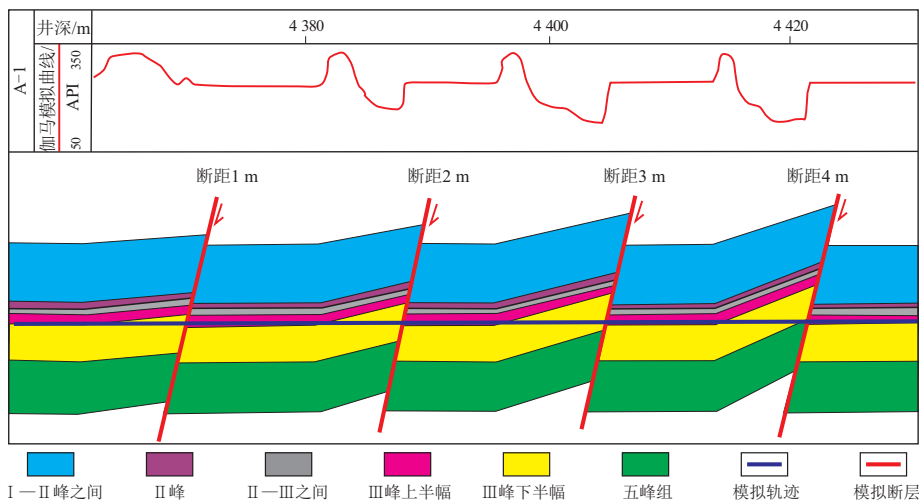


图 6 不同尺度断层 GR 变化模式

Fig.6 GR change patterns of faults in different scales



表 2 复杂构造区微断层的综合识别模式  
Table 2 Comprehensive identification method for microfaults in complex structural areas

序号	地层模式	地震属性	伽马值变化率	特征元素图版	判别结果
1	伽马值比较稳定	无异常	0.81~1.25	地层连续	正常地层
2	伽马值突增	有异常或无异常	>1.25		钻遇断层
3	伽马值突降	有异常或无异常	<0.80		钻遇断层
4	伽马值比较稳定	有异常或无异常	0.92~1.25	地层缺失	钻遇断层

规定向机械钻速慢;超长水平段携岩困难,摩阻扭矩大,定向托压严重;地层产状变化大,需要高精度随钻地质参数指导钻井等复杂困难情况。常压页岩气水平井,总体岩石硬度较低,可钻性强,部分井区地质构造复杂,面临井漏、掉块等复杂情况。针对不同工区工程地质特征的差异,明确了旋转导向和螺杆+MWD 两种提速技术的适用范围,实现分类施策提速提效。

4.1 深层页岩气推广旋转导向钻井技术提高钻速

旋转地质导向工具具备全旋转钻进能力,配合大扭矩螺杆,提速效果显著,可解决定向滑动钻进钻具屈曲、托压问题,实现长井段安全快速钻进;轨迹控制精度高,可解决深层页岩气小靶窗穿行等技术难题。威荣深层页岩气岩石硬度高,常规定向工具的机械钻速低,仅 4~6 m/h,应用旋导工具后机械钻速大于 8 m/h,提速效果显著,两种提速工具的机械钻速对比见表 3。总体来说,水平段设计长

度超过 3 000 m 的区块,如涪陵、南川等;地层产状变化大、铂金储层钻遇率低的区块,如丁山、白马等,都适合应用旋转导向钻井技术,进一步提高机械钻速和储层钻遇率。

目前,旋导工具在四川盆地页岩气区块应用于 110 口井,以深层页岩气为主,平均机械钻速从 2021 年的 8.29 m/h 提高到 2023 年的 9.37 m/h。“经纬领航”旋转地质导向钻井系统在 JY18-S11HF 井“一趟钻”钻进 3 210 m,入井工作时间 333 h,系统性能得到充分验证。

4.2 常压页岩气应用螺杆+MWD 工具提高钻速

常压页岩气工区岩石硬度相对较低,中长水平段(<3 000 m)的机械钻速较快;地层产状稳定区,仅需自然伽马就能实现地质导向目的;红星、复兴等常压深层页岩气,旋导作业风险高,适合采用螺杆+MWD 工具提速,有利于控制钻井成本和风险。定向井段硅质地层优选高造斜率定向工具,提高复合钻进比例,提高定向段机械钻速。水平段推广优快定向钻井技术,应用 PDC 钻头,配套振荡螺杆、水力加压器等提速工具。高摩阻水平段推广低摩阻剖面 and 降摩减阻工具,提高水平段延伸能力。

2021 年以来,该技术应用于 700 余口井,平均趟钻进尺 618 m;趟钻成功率 95.1%,同比提高 3.1 个百分点,主要工区的应用情况见图 7 所示。

4.3 “瘦身井”配套技术

为了节约成本,页岩气开发井进一步采用“瘦

表 3 四川盆地威荣工区不同钻井方式机械钻速对比  
Table 3 Comparison of drilling rate with different drilling methods in Weirong area, Sichuan Basin

年份	平均机械钻速/(m/h)	
	旋导	常规
2021	8.94	4.02
2022	8.15	6.16
2023	8.53	4.65

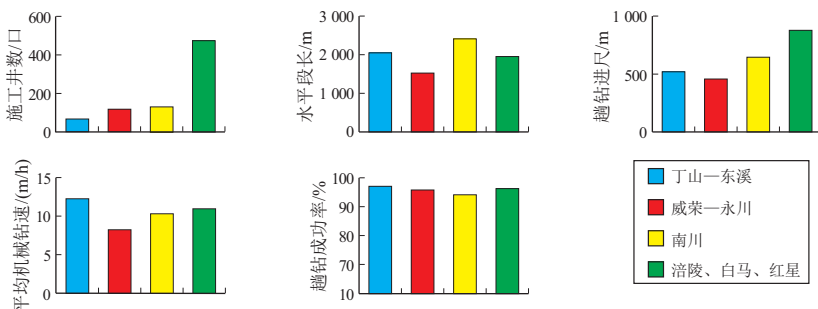


图 7 2021 年以来四川盆地页岩气领域螺杆施工情况

Fig.7 Application of screw drilling tools in shale gas reservoirs in Sichuan Basin since 2021

身”井身结构。“瘦身Ⅰ型”钻头尺寸为171.5 mm,“瘦身Ⅱ型”为190.5 mm。“瘦身井”采用非常规尺寸,可选提速工具少;小尺寸钻具组合对钻压、地层变化更敏感,复合钻进的趋势不稳定,容易与设计出现较大偏差。

紧跟页岩气“瘦身井”开发策略调整,采用变曲率、渐增式剖面设计,控制了摩阻扭矩增加,完善“瘦身井”小井眼定向控制技术、水平段轨迹精细控制及延伸技术、录井工程风险控制技术等相关测录井配套技术,为“瘦身井”提供技术保障。根据需求制定定向工具,完善“瘦身Ⅰ型”井、“瘦身Ⅱ型”井MWD和近钻头工具的配套与升级改造;推广应用Φ50型、Φ70型牵引器和Φ60型、Φ73型多级射孔工具,为“瘦身井”提供装备保障。

截至2023年4月,完成瘦身井定向服务46口井,水平段一趟钻完成率58%,平均机械钻速14.72 m/h,比常规水平井提升20%。JY10-Z3HF井水平段机械钻速27.18 m/h,刷新涪陵工区水平段机械钻速最快纪录。

#### 4.4 水平井测井提速技术

针对深层页岩气水平段较长、完井后实施无钻测井等问题,研制了直推式、过钻头存储式测井仪器和大功率牵引器,实现水平井一趟测。

深层高温页岩气水平井,一般选择直推存储式测井技术,提高测井时效和质量。近3年在川渝页岩气累计应用124口井,资料优质率98.9%,一次成功率97.1%,相比湿接头工艺,单井节约时效13 h。

水平段超2 000 m的中深层水平井,一般选择过钻头存储式测井技术,保障提速和安全作业。近3年在川渝页岩气应用43口井,平均单井测井时间47.1 h,一次成功率95.3%。

套管水平井,一般选择“牵引器+”技术,保障套管井作业提速。累计应用1 500口井,测井一次成功率大于98%,对比连续油管输送方式,时效提高50%以上,成本降低60%以上。

## 5 压裂提产配套技术

深层页岩气开发,面临高温高压射孔和高温井压裂监测技术难题,压裂施工还面临破裂压力高等复杂情况。为了配合“井工厂”压裂,实施了多级射孔桥塞联作技术;为改善深层压裂效果,应用了等孔径射孔技术;为解决高温深井压裂监测难题,研制了175℃高温井下微地震监测仪,开展了“牵引器+DAS光纤”压裂监测技术现场试验,并取得成功。

### 5.1 多级射孔桥塞联作,助力井工厂压裂提速建产

涪陵页岩气开发以来,配套的多级射孔技术从学习提升到自主研发,逐步达到国际先进水平,2017年完全替代国外技术。研制了全可溶桥塞、模块化射孔枪、全系列(Φ60/73/80/89 mm)耐高温高压(175℃/160 MPa)多级射孔配套工具和实时泵送模拟调整软件。配套140 MPa井口设备及井下工具,满足深层页岩气压裂技术要求,实现与“拉链式”压裂作业无缝连接,射孔效率从早期的每天2段提高到每天7段,较好地支撑了平台井压裂提速。近两年该技术应用300余井次,在涪陵工区43天完成8口井226段泵送射孔,成功率99%以上。

### 5.2 等孔径射孔技术,改善压裂效果

深层、常压页岩气的致密层段,常规射孔存在破裂压力较高、排量降低、加砂困难等复杂情况。等孔径射孔技术可以有效降低孔眼摩阻和破裂压力,改善压裂效果。该技术在川渝页岩气应用176口井,其中威荣气田150口井,同等条件下破裂压力可降低5~10 MPa。

### 5.3 井中微地震和光纤压裂监测,实时监测指导优化压裂

国内常用的井中微地震监测仪耐温指标为150℃,在120℃以上的高温井中持续工作时间较短,不能满足长期监测要求。针对高温井压裂监测难题,通过线路优化和关键元器件改造,研制了175℃高温井下微地震监测仪。该仪器在135℃高温下连续稳定监测50天,最远监测距离2 146 m,实时监测压裂缝分布方位和规模,指导压裂参数优化、暂堵时机选择和套变预警,已经应用的13口井中监测成功率97%。

“牵引器+DAS光纤”压裂监测技术国内首次应用在JY11-Z1HF井应用,261 h内完成32段压裂实时监测,全程同步,直观观测每一段压裂微震事件,刻画裂缝形态走向,支撑压裂暂堵等决策。

## 6 技术发展方向

测控技术进步较好地支撑了中国石化在四川盆地及周缘地区的页岩气勘探开发。随着勘探向深层、超深层(4 500~6 000 m)发展,向盆外常压、低压区发展,向二叠系、寒武系等新层系发展,新问题不断涌现,现有测控技术还有进一步提高的空间。

(1)联合攻关新层系、新类型页岩气解释评价技术。针对二叠系大隆组、吴家坪组、茅口组及寒武系筇竹寺组等“三新”领域的页岩气储层解释精



度低等问题,与油气田分公司联合攻关,加强岩石物理实验,聚焦产能主控因素,加强含气量计算和可压性评价,完善“双甜点”识别技术与评价标准。

(2)加强高温仪器和工具的研制。超深页岩气井面临高温高压技术挑战,需要进一步提升旋导工具的耐高温性能,推广应用自研高温旋导,提高仪器保障能力。研制存储式高温电成像测井仪,满足超深水平井裂缝评价要求。研制175~200℃高温牵引器,满足超深水平井套管作业要求。加强光纤测井技术研究,积极开展压裂监测与产剖测井的现场试验,支撑科学开发页岩气藏。

(3)加强基础资料录取,支撑高效勘探开发。页岩气储层复杂,非均质性强,需要高精度的测录井资料支撑,保障地质建模、解释评价、靶窗选取和压裂分段的科学性。目前,页岩气平台测井比例较低,给解释评价和压裂分段等带来困难,复杂情况分析依据不充分,建议对测井系列进行规范和持续优化。

## 7 结束语

页岩气是中国石化贯彻国家“稳油增气”战略,实施天然气增储上产的重点领域。前期攻关以五峰组—龙马溪组为主要研究对象,已经形成了比较成熟的页岩气测控系列技术,有力支撑了勘探发现与百亿方产能建设。针对深层、常压页岩气增储上产阵地面临的问题,坚持需求牵引、问题导向,强化靠前服务、联合作战,发挥定测录导一体化优势,不断推进测控技术创新,持续提高解释评价精度、提高优质储层钻遇率、支撑钻井提速降本、支撑压裂提速增产,全力保障页岩气高质量勘探与效益开发。

### 利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献/Authors' Contributions

葛祥、孙鑫参与全文数据梳理、论文写作和修改;刘伟参与双甜点评价技术资料收集、整理;王春伟参与提高钻遇率与钻井提速配套技术资料收集、整理;马林参与压裂提产配套技术资料收集、整理。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The total manuscript was drafted and revised by GE Xiang and SUN Xin. The double sweet spots evaluation part was completed by LIU Wei. The improving drilling rate and drilling speed parts were completed by WANG Chunwei. The hydraulic fracturing part was completed by MA Lin. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

### 参考文献:

[1] 杨跃明,陈玉龙,刘燊阳,等.四川盆地及其周缘页岩气勘探开

发现状、潜力与展望[J].天然气工业,2021,41(1):42-58.

YANG Yueming, CHEN Zhenglong, LIU Shenyang, et al. Status, potential and prospect of shale gas exploration and development in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 42-58.

[2] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等.中国页岩气勘探发现状与优选方向[J].中国矿业大学学报,2020,49(1):13-35.

NIE Haikuan, HE Zhiliang, LIU Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 13-35.

[3] 孙焕泉,蔡勋育,胡德高,等.页岩气立体开发理论与实践:以四川盆地涪陵页岩气田为例[J].石油勘探与开发,2023,50(3):573-584.

SUN Huanquan, CAI Xunyu, HU Degao, et al. Theory, technology and practice of shale gas three-dimensional development: a case study of Fuling shale gas field in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 573-584.

[4] 汪凯明.川东南盆缘复杂构造区深层页岩气富集特征[J].天然气地球科学,2023,34(2):334-348.

WANG Kaiming. Enrichment characteristics of deep shale gas in tectonically complex regions of the southeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(2): 334-348.

[5] 薛冈,熊炜,张培先.常压页岩气藏成因分析与有效开发:以四川盆地东南缘武隆地区五峰组—龙马溪组页岩气藏为例[J/OL].油气藏评价与开发,2023;1-9.(2023-06-20).  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1825.TE.20230620.0945.002.html>.

XUE Gang, XIONG Wei, ZHANG Peixian. Genesis analysis and effective development of normal pressure shale gas reservoir: a case of Wufeng-Longmaxi shale gas reservoir in Wulong area, southeast Sichuan Basin[J/OL]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023; 1-9. (2023-06-20). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1825.TE.20230620.0945.002.html>.

[6] 杨振恒,陶国亮,鲍云杰,等.南方海相深层页岩气储集空间差异化发育及保持机理探讨[J].石油实验地质,2022,44(5):845-853.

YANG Zhenheng, TAO Guoliang, BAO Yunjie, et al. Differential development and maintenance mechanism of reservoir space for marine shale gas in South China's deep strata[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5): 845-853.

[7] 聂海宽,李沛,孙川翔.四川盆地龙马溪组深层页岩气勘探开发[J].石油知识,2022(4):6-7.

NIE Haikuan, LI Pei, SUN Chuanxiang. Exploration and development of deep shale gas in Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Knowledge, 2022(4): 6-7.

[8] 舒红林,何方雨,李季林,等.四川盆地大安区块五峰组—龙马溪组深层页岩地质特征与勘探有利区[J].天然气工业,2023,43(6):30-43.

SHU Honglin, HE Fangyu, LI Jilin, et al. Geological characteristics and favorable exploration areas of Wufeng Formation-Longmaxi Formation deep shale in the Da'an block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(6): 30-43.

- [9] 何希鹏,何贵松,高玉巧,等.常压页岩气勘探开发关键技术进展及攻关方向[J].天然气工业,2023,43(6):1-14.  
HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuqiao, et al. Progress in and research direction of key technologies for normal-pressure shale gas exploration and development [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(6):1-14.
- [10] 郭彤楼,蒋恕,张培先,等.四川盆地外围常压页岩气勘探开发进展与攻关方向[J].石油实验地质,2020,42(5):837-845.  
GUO Tonglou, JIANG Shu, ZHANG Peixian, et al. Progress and direction of exploration and development of normally-pressured shale gas from the periphery of Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5):837-845.
- [11] 马新华,李熙喆,梁峰,等.威远页岩气田单井产能主控因素与开发优化技术对策[J].石油勘探与开发,2020,47(3):555-563.  
MA Xinhua, LI Xizhe, LIANG Feng, et al. Dominating factors on well productivity and development strategies optimization in Weiyuan shale gas play, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3):555-563.
- [12] 刘德华,肖佳林,关富佳.页岩气开发技术现状及研究方向[J].石油天然气学报,2011,33(1):119-123.  
LIU Dehua, XIAO Jialin, GUAN Fujia. Current situation and research direction of shale gas development [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(1):119-123.
- [13] 李维,张海杰,罗彤彤,等.渝西地区页岩储层微观孔隙结构对页岩气赋存影响[J].天然气地球科学,2022,33(6):873-885.  
LI Wei, ZHANG Haijie, LUO Tongtong, et al. Influence of micro pore structure of shale reservoir on shale gas occurrence in western Chongqing [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6):873-885.
- [14] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.  
ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7):15-18.
- [15] 熊亮,杨振恒,申宝剑,等.川南威荣地区五峰组—龙马溪组深层页岩气微观储集空间发育特征及意义[J].天然气地球科学,2022,33(6):860-872.  
XIONG Liang, YANG Zhenheng, SHEN Baojian, et al. Micro reservoir space characteristics and significance of deep shale gas in Wufeng-Longmaxi formations in Weirong area, south Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6):860-872.
- [16] 巴俊杰,张庆玉,莫国宸,等.页岩气储层微观表征技术研究[J].中国矿业,2023,32(S1):107-109.  
BA Junjie, ZHANG Qingyu, MO Guochen, et al. Analysis on microscopic characterization technology of shale gas reservoir [J]. China Mining Magazine, 2023, 32(S1):107-109.
- [17] 徐旭辉,申宝剑,李志明,等.页岩气实验地质评价技术研究现状及展望[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):1-8.  
XU Xuhui, SHEN Baojian, LI Zhiming, et al. Status and prospect of experimental technologies of geological evaluation for shale gas [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1):1-8.
- [18] 高键,李慧莉,何治亮,等.渝东彭水地区常压页岩气压力演化与富集保存[J].天然气工业,2022,42(8):124-135.  
GAO Jian, LI Huili, HE Zhiliang, et al. Pressure evolution, enrichment and preservation of normal-pressure shale gas in the Pengshui area of eastern Chongqing [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8):124-135.
- [19] 刘向君,梁利喜.油气工程测井理论与应用[M].北京:科学出版社,2015.  
LIU Xiangjun, LIANG Lixi. Theory and application of oil and gas engineering logging [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [20] 游声刚,郭茜,耿小焜,等.页岩含气量的影响因素分析及含气量测试方法[J].中国矿业,2015,24(12):80-85.  
YOU Shenggang, GUO Qian, GENG Xiaojin, et al. Factors affecting the shale gas content and gas content testing methods [J]. China Mining Magazine, 2015, 24(12):80-85.
- [21] 颜磊,周文,樊靖宇,等.川南深层页岩气储层含气量测井计算方法[J].测井技术,2019,43(2):149-154.  
YAN Lei, ZHOU Wen, FAN Jingyu, et al. Log evaluation method for gas content of deep shale gas reservoirs in southern Sichuan Basin [J]. Well Logging Technology, 2019, 43(2):149-154.
- [22] 苏海琨,聂海宽,郭少斌,等.深层页岩含气量评价及其差异变化:以四川盆地威荣、永川页岩气田为例[J].石油实验地质,2022,44(5):815-824.  
SU Haikun, NIE Haikuan, GUO Shaobin, et al. Shale gas content evaluation for deep strata and its variation: a case study of Weirong, Yongchuan gas fields in Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5):815-824.
- [23] 国家能源局.页岩气测井资料处理与解释规范:SY/T 6994-2020[S].北京:石油工业出版社,2020.  
National Energy Administration. Specification for shale gas logging data processing and interpretation: SY/T 6994-2020 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [24] 石文睿,张占松,黄梓桑,等.低阻页岩气储层含气饱和度计算方法:以涪陵地区焦石坝区块为例[J].断块油气田,2022,29(2):183-188.  
SHI Wenrui, ZHANG Zhansong, HUANG Zisang, et al. Study on calculation method of gas saturation in low-resistivity shale gas reservoir: a case study of Jiaoshiba block in Fuling area [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(2):183-188.
- [25] 朱国璋,何传亮,樊靖宇.川南深层页岩气藏含气量及可压性测井评价方法[J].测井技术,2022,46(4):433-438.  
ZHU Guozhang, HE Chuanliang, FAN Jingyu. Log evaluation method for gas bearing and fracability of deep shale gas reservoirs in southern Sichuan [J]. Well Logging Technology, 2022, 46(4):433-438.
- [26] 王良,杨建,彭鈞亮,等.川中地区大安寨段页岩油储层可压性评价实验[J].钻采工艺,2023,46(1):163-168.  
WANG Liang, YANG Jian, PENG Junliang, et al. Experimental evaluation on compressibility of shale oil reservoir in Da'anzhai section in central Sichuan area [J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(1):163-168.