

# CCFET 测井技术在超深致密碎屑岩气井中的应用

杨丽兵<sup>1</sup>, 吴晓光<sup>2</sup>, 吴家安<sup>2</sup>, 吴春燕<sup>2</sup>, 李德才<sup>2</sup>, 赵翔<sup>2</sup>

1. 中国石化西南油气分公司油气开发管理部 四川成都 610041

2. 中石化经纬有限公司西南测控公司 四川成都 610100

项目支持: 中石化石油工程技术服务有限公司科技攻关项目“致密碎屑岩断缝体储层测录井技术研究”(SG22-19K)

引用: 杨丽兵, 吴晓光, 吴家安, 等. CCFET 测井技术在超深致密碎屑岩气井中的应用[J]. 油气井测试, 2026, 35(1): 50-58.

Cite: YANG Libing, WU Xiaoguang, WU Jia'an, et al. Application of CCFET logging technology in ultra-deep tight clastic gas wells[J]. Well Testing, 2026, 35(1): 50-58.

**摘要** 川西地区超深致密碎屑岩气田开发进入中后期, 井筒完整性管理、套后储层评价及水淹情况分析面临巨大挑战, 常规生产测井技术在过油管、小井眼条件下难以提供全面评价。套损-固井-储层评价综合测井仪具备外径小, 耐高温高压, 技术融合性强等技术优势, 一次测井可以实现管柱检测、固井质量、储层评价等多项地质工程评价。经川西新场气井 X201 现场应用, 在过油管条件下, 精准诊断出 X201 井油管与衬管的穿孔、严重腐蚀及变形位置, 量化评价了技术套管外水泥环充填质量, 并在管外致密碎屑岩储层中识别水淹层和含气层, 为该井修井、堵水及挖潜提供了技术依据。该技术为超深致密碎屑岩高温高压气井的井筒管柱检测、剩余气潜力分析等提供了高效、综合的一体化解决方案, 具有推广应用价值。

**关键词** CCFET 测井; 川西地区; 超深井; 致密碎屑岩; 套损检测; 固井质量; 储层评价; 一体化技术

中图分类号: TE332

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2026.01.007

## Application of CCFET logging technology in ultra-deep tight clastic gas wells

YANG Libing<sup>1</sup>, WU Xiaoguang<sup>2</sup>, WU Jia'an<sup>2</sup>, WU Chunyan<sup>2</sup>, LI Decai<sup>2</sup>, ZHAO Xiang<sup>2</sup>

1. Development Management Department of Southwest Petroleum Branch, Sinopec, Chengdu, Sichuan 610041, China

2. Xi'nan Geosteering & Logging Company, Sinopec Matrix Corporation, Chengdu, Sichuan 610100, China

**Abstract:** As the development of ultra-deep tight clastic gas fields in the western Sichuan region enters its middle-to-late stages, significant challenges have emerged in wellbore integrity management, behind-casing reservoir evaluation, and water-flooding analysis. Under through-tubing and slim-hole conditions, conventional production logging technologies struggle to provide comprehensive evaluations. The casing-cement-formation evaluation tool is characterized by a compact outer diameter, high-temperature and high-pressure (HTHP) tolerance, and high technological integration. In a single logging run, multiple geological and engineering evaluations—including tubular inspection, cementing quality assessment, and reservoir evaluation—can be successfully accomplished by using this tool. Field application in well X201 in the Xinchang area of western Sichuan demonstrate that the locations of perforations, severe corrosion, and deformations within the tubing and liner were precisely identified under through-tubing conditions. Furthermore, the filling quality of the cement sheath outside the technical casing was quantitatively evaluated, and both water-flooded and gas-bearing zones were successfully identified within the extra-tubular tight clastic reservoirs. These results established a solid technical foundation for subsequent workover, water shutoff, and potential tapping operations. This technology provides a highly efficient and comprehensive integrated solution for wellbore tubular inspection and remaining gas potential analysis in ultra-deep, high-temperature, high-pressure tight clastic gas wells, demonstrating strong potential for broader application.

**Keywords:** CCFET logging; western Sichuan region; ultra-deep well; tight clastic rock; casing damage inspection; cementing quality; reservoir evaluation; integrated technology

超深油气井一般具多层管柱结构, 在外部应力、化学腐蚀、高温高压等多重因素长期作用下, 油、套管易腐蚀、破坏、变形甚至穿孔<sup>[1-2]</sup>, 同时水泥环也易受力学载荷波动产生结构损坏, 导致管外气窜, 影响油气井寿命<sup>[3]</sup>。套管、油管等管柱的损坏

可通过电磁探伤<sup>[4-5]</sup>、多臂井径、超声波成像测漏<sup>[6]</sup>、井下电视<sup>[7]</sup>等技术等测井技术开展监测, 近年来, 有学者开始应用分布式声波传感技术(DAS)、温度传感技术(DTS)等开展套损检测<sup>[8-9]</sup>。生产层剩余油气评估可以通过套管电阻率测井<sup>[10]</sup>、脉冲中

子测井<sup>[11]</sup>、中子寿命测井<sup>[12]</sup>、碳氧比(C/O)测井<sup>[13]</sup>技术等进行测量和监测。上述传统套损检测及过套管剩余油气饱和度测井是针对单项解决方案设计而来,且在过油管作业条件下受到极大限制。因此,仪器融合逐渐成为发展趋势,刘汉斌等<sup>[14]</sup>设计了集井下电视、套管外水泥胶结(RBT)、多臂井径成像+磁测壁厚测井(2M)技术为一体的综合测井工艺管柱,实现了井筒彩色全帧率视频图像、套管外水泥环胶结状况、套管壁厚及内径变化特征信息的全面监测。近年来,国内从俄罗斯引进了集成了电磁探伤与宽能域核测井功能的CCFET综合测井仪,其外径小(50 mm),能够在油管内一次下井完成对管柱损伤、水泥环、地层含气性的“一站式”综合评价。陈立雄等<sup>[15]</sup>、黎明等<sup>[16]</sup>采用该技术在多个国内多个储气库进行了实践应用,取得了较好的应用效果。通过调研国内外文献发现,在国内超深层致密碎屑岩气井领域,CCFET测井技术尚未有商业应用案例。

川西新场地区上三叠统须家河组二段气藏(简称须二气藏),现今埋藏深度4 500~5 300 m,属于超深层( $\geq 4\ 500$  m)范畴;岩芯分析平均孔隙度约3.3%,基质渗透率主体小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于特低孔( $<10\%$ )、特低渗( $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )储层。新场须二气藏已经开发20余年,勘探实践基本明确了须二气藏为有水气藏<sup>[17-18]</sup>,优质储层非均质性强,产能依赖于裂缝系统,气藏通常具有边水、底水、层间

水,气水关系复杂,规律性差,无统一气水界面,开发效果较差,从产水井分布来看,虽然早期存在着无水或低水气比生产期,但难以掩盖气藏被水侵和水体能量较大的现实问题;部分气藏水体能量活跃,一旦通过大断裂、裂缝系统沟通水体,易导致气井短时间内暴性水淹,产气量会迅速下降乃至停产。随着气田开发进入中后期,部分老井面临剩余气资源评估及挖潜工作,然而超深、高温高压、管柱损坏情况不明的井下极端环境给管柱完整性及剩余气监测测井带来了较大的施工难度。因此,选用CCFET测井技术在川西超深层致密碎屑岩X201井中进行了应用,属国内首次,综合分析认为该技术在超深气井后期管柱检测及剩余气评估方面具有较广阔的应用前景,为类似地质工程条件下的气井井下监测提供了技术借鉴和解决方案。

## 1 CCFET测井技术

套损-固井诊断-储层评价综合测井仪(CCFET)主要由电磁探伤(MID-S)和宽能域核测井(SGR+MNL)两大功能模块组成,SGR(Spectral Gamma Ray)为自然伽马能谱测井短节,MNL(Multipole Nuclear Logging)为三探头中子-伽马能谱、双探头中子-中子测井短节,仪器直径50 mm、极限耐温150℃、耐压100 MPa,可通过内径 $>60$  mm的油管,套管测量最大外径为200 mm,管柱测量总壁厚不超过25 mm(见图1)。

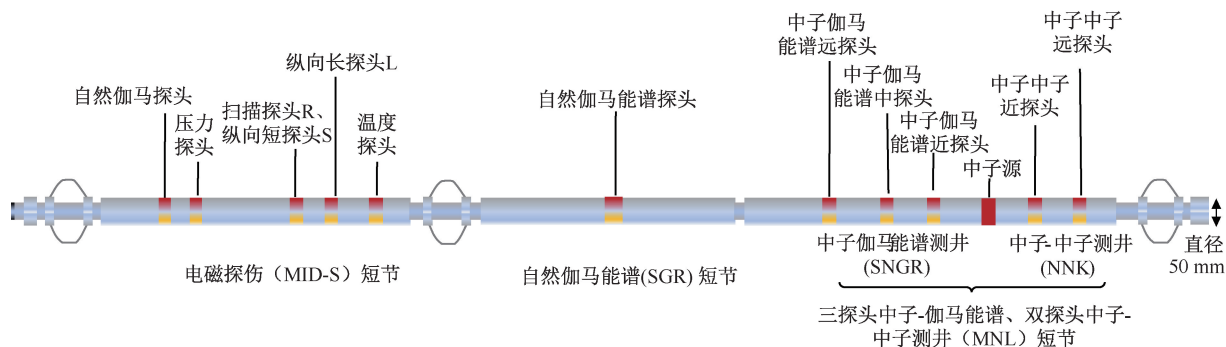


图1 CCFET测井仪仪器示意图

Fig. 1 The schematic diagram of CCFET logging tool

CCFET测井技术主要适用于储气库井和气井,具有如下技术优势:①可以过油管(或套管)带压测井,不影响生产;②无需洗井、节约作业时间;③能够评价双层管柱及管外信息;④一次下井可综合获取套损程度、固井质量、储层孔隙度、饱和度、温压等多重参数,实现管柱损坏检测及寿命预测、管外水泥环质量评估、气窜气漏识别、储层物性及含油

气性评价等“一体化”式综合分析。

### 1.1 电磁探伤模块

电磁探伤模块工作原理基于电磁感应定律,通过发射线圈通断直流电,在多层管柱中感生涡流,接收线圈记录随之衰减的感应电动势。通过感应电动势衰减时间图谱分析评估管柱壁厚、管损(腐蚀、孔洞、变形等),识别射孔段、接箍等。该模块记

录了共 120 条电动势衰减曲线以及压力、温度、线圈电流、自然伽马等 6 条辅助曲线,其中纵向长探头 L (42 条曲线)主要研究多层管柱的壁厚,纵向短探头 S (30 条曲线)和横向探头 R (48 条曲线)主要研究第 1 层管柱的损伤问题。

### 1.2 宽能域核测井模块

宽能域核测井(SGR+MNL)模块由自然伽马能谱(SGR)短节及多探头核测井(MNL)短节组成。自然伽马能谱(SGR)短节采集获取地层中铀(U)、钍(Th)、钾(K)含量。多探头核测井(MNL)短节集成了三探头(近、中、远)中子-伽马能谱(SNGR)和双探头(近、远)中子-中子测井(NNK)。中子-伽马能谱(SNGR)测井近、中、远 3 个不同源距的伽马探测器可对地层不同径向区域进行探测,实现 0.1~8 MeV 范围内的常规能谱(道宽 30 keV)及 0.1~0.8 MeV 内的低能区俘获伽马能谱(道宽 3 keV)的宽能谱详细测量。中子-中子测井模块(NNK)通过 2 个不同源距的<sup>3</sup>He 计数管探测器测量的经过地层慢化并散射回来的热中子得到远、近 2 个中子计数率。

### 1.3 CCFET 测井仪特色功能

CCFET 测井仪的一体化、集成化、创新性显著

提升了其在解决井下地质、工程方面的综合能力,主要用于解决以下 4 个方面的地质工程问题。

(1)管柱探伤:电磁探伤模块可以实现双层管柱形变、腐蚀、漏窜等监测。

(2)储层评价:①构建岩性矿物体积模型:在俘获伽马能谱上识别氢、钙、硅、氯等特征元素的谱峰,通过处理分析得到上述各类元素的含量,结合自然伽马能谱铀、钍、钾的含量建立岩性矿物含量体积模型,开展岩性精细评价,确定黏土矿物类型,分析沉积环境,对比地层层序等。②计算孔隙度:定义中子-中子测井模块近、远中子计数率比值为孔隙度函数,利用在标准刻度井中确定中子孔隙度与孔隙度函数的关系,确定储层孔隙度。③求取含气饱和度:俘获伽马射线的空间分布主要和地层含氢量有关,还受地层含氯量即地层水矿化度的影响;计算探测半径依次增大的氯函数 Pdd\_nnk(中子-中子)、Pdd\_mz(近伽马)、Pdd\_cz(中伽马)、Pdd\_bz(远伽马),详见表 1,基于实际的含油气饱和度模型理论图版<sup>[19-20]</sup>,根据氯函数与中子-中子孔隙度函数交会特征,通过插值法计算含气饱和度。

表 1 中子伽马能谱测井、中子-中子仪器探测范围

Table 1 Detection range of neutron-gamma spectrometry logging and neutron-neutron instrument

短节类型	中子测井		中子伽马能谱测井		
	井筒近区	井筒远区	近区	中区	远区
探头类型	短探头	长探头	短探头>2.3 MeV	中探头>2.3 MeV	长探头>2.3 MeV
井筒为气探测深度范围	10~15 cm	1~25 cm	20~40 cm	30~50 cm	40~60 cm
井筒为液探测深度范围	7~15 cm	10~20 cm	15~30 cm	20~35 cm	30~40 cm

(3)固井质量诊断:通过近、中、远中子伽马探测器低能域(光电效应能量部分)的能谱分析,计算出反应地层密度的近、中、远函数(DEN<sub>mz</sub>、DEN<sub>cz</sub>、DEN<sub>bz</sub>),远密度函数反映地层信号,近密度函数受管柱和水泥环影响较大,中密度函数降低,说明水泥充填程度变差。由介质的密度函数 DEN 及通量密度参数 NGGK 计算得到生产套管和技术套管外环空水泥充填程度曲线 CEM<sub>1</sub> 和 CEM<sub>2</sub>,分别用来判断生产套管外和技术套管外水泥填充程度。根据实际模型实验确定了环空水泥填充程度评价标准,CEM 曲线值在 100%~95%为水泥填充充分;95%~35%为水泥填充不充分;35%以下为水泥缺失。水泥中子孔隙度高,水泥充填变差,水泥环存在气体聚集,中子计数会升高,中子伽马伽马曲线计数率、中子-中子计数率升高。

(4)判断管外气体聚集:将不同探测半径的氯

函数曲线进行叠合,保证纯泥岩段氯质量函数重合,当径向中子-中子氯函数和近伽马氯函数叠合出现包络面积,中子-中子氯函数值降低,表明生产套管外有气体聚集;中子-中子氯函数与中伽马氯函数出现包络面积,指示技术套管外有气体聚集或者判断地层气体。基于管外环空(水泥环或未固井段)气体聚集,结合水泥充填曲线可以评估固井质量、管外漏窜等。

## 2 现场应用

针对川西新场地区超深致密碎屑岩水淹停产气井管柱腐蚀情况不明、剩余气及挖潜潜力待评估等核心问题,通过调研论证,从设备适配、工艺优化、仪器集成度、施工条件等多方面综合考虑,选择了 CCFET 测井仪在 X201 井中进行了过油管一趟测井,实现了 X201 井管柱质量检测、剩余气潜力分

析、水淹分析、固井质量评估等技术目的。

## 2.1 X201井区气藏地质工程概况

新场地区深层须二气藏具有高温高压、含CO<sub>2</sub>、非均质性强、气水关系复杂特征,生产中管柱CO<sub>2</sub>腐蚀及盐水电化学腐蚀现象严重,为满足须二段致密碎屑岩储层产能释放需求,早期在部分井次中采用衬管加封隔器完井工艺<sup>[21-22]</sup>。X201井是在当时勘探形势下采用衬管加封隔器完井的井次之一,该井位于川西坳陷中段孝泉-丰谷构造带七朗庙高点北翼,其完井测试采用了衬管完井替喷试气工艺,于2009年10月30日投产,投产初期日产气 $2.8 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,产液110 m<sup>3</sup>/d,日产气最高 $7.05 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,日产液290 m<sup>3</sup>/d,该井于2024年5月30日关井停产,累产气 $12575.5 \times 10^4$  m<sup>3</sup>;在排除储层地质影响因素后,其累产气量显著低于区域邻井产气量(见表2)。X201井完井实测地层压力68.9 MPa,地层温度131.7℃,CO<sub>2</sub>

体积分数1.7%,CH<sub>4</sub>体积分数95.96%,地层水型为CaCl<sub>2</sub>型,地层水矿化度114705.1 mg/L,产出流体含CO<sub>2</sub>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等离子<sup>[23]</sup>。

X201井生产初期表现出产水量缓慢上升,产气量随之缓慢下降的缓慢水侵特征(见图2a),邻井X856及多口井表现出暴性水淹特征(见图2b)。为全面评估水淹井井筒状况及储层剩余气潜力,根据水淹停产井井筒条件,遴选出X201井开展过油管套损-固井-储层评价综合测井。在测井之前,X201井水淹停产且积液液面位于井口附近,井口油压7.16 MPa,套压9.35 MPa,并伴有少量气泡产出;CCFET测井仪在88.9 mm的油管中完成施工,油管下深5023.89 m,测前油管内通畅遇阻底深为5005.0 m,193.7 mm技术套管下深4709.78 m,139.7 mm衬管深度4659.4~5230.0 m,CCFET测量井段4696.00~4996.0 m,测量井段内井温分布在131~137℃。

表2 X201井及邻井产气量(截止2025/10/22)

Table 2 Gas production of X201 well and adjacent wells

井名	生产时间	累产气量 /10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	产气量 /(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	产液量 /(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	油压 /MPa	套压 /MPa	井况
X201	2009/10/30—2024/5/30	12 575.5	0	0	7.16	9.35	2024/5/30 水淹停产
X2	2007/7/12—2025/10/18	108 228.5	2.0	360	12.30	9.60	高水气比生产
X856	2006/3/9—2009/10/11	36 648.8	0	0	2.70	4.80	2019/10/11 水淹停产

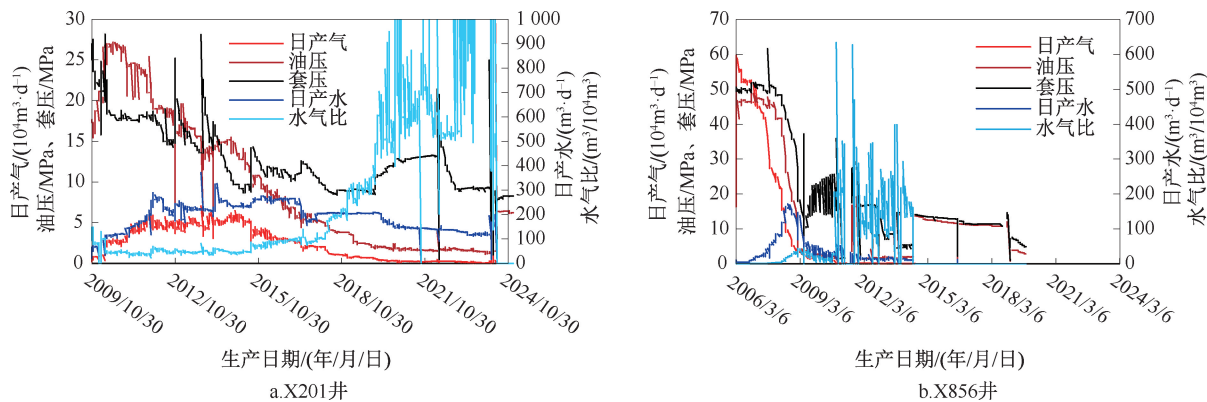


图2 X201井、X856井生产历史曲线

Fig. 2 Production history curves of X201 well and X856 well

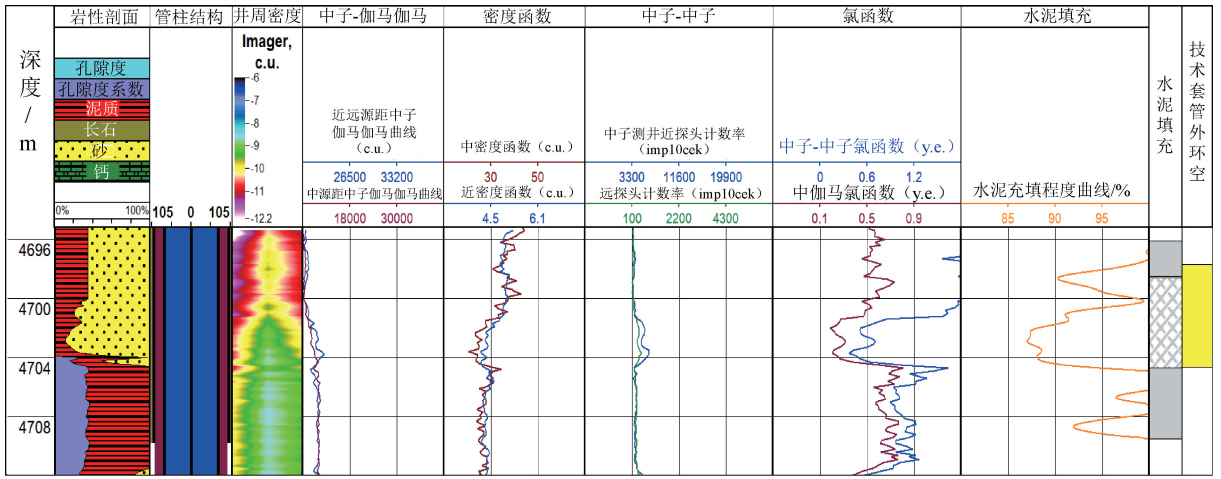
## 2.2 固井质量与气体聚集诊断

根据技术套管外环空水泥充填程度曲线对193.7 mm技术套管(4696.00~4709.78 m)进行了固井质量评价,4696.00~4698.5 m、4704.7~4709.78 m水泥充填充分,4698.6~4704.7 m水泥部分充填,整体固井质量较好。在4698.00~4704.7 m深度内,中子中子氯函数与中伽马氯函数叠合存在包络,且存在下降趋势,密度函数下降,远、近中子计数率升高,指示含氢指数下降,均表明技术套管外环空存在一定的气体聚集段,与水泥部

分充填段吻合(见图3)。

## 2.3 套损检测评价

根据X201井电磁探伤测井仪长轴ZL+短轴ZS+扇区R测井曲线响应及壁厚反演,该井Φ88.9 mm×6.50 mm油管在4929.00~4936.90 m井段发现穿透性腐蚀,4772.00~4775.50 m井段存在变形;Φ139.7 mm×10.54 mm衬管在4929.00~4936.90 m井段同样存在穿透性腐蚀,与油管损伤位置对应,表明该井段为严重腐蚀区(见图4);此外,衬管在4946.22~4946.97 m存在严重腐蚀。



图例 水泥充填充分 水泥部分充填 气体聚集

图 3 X201 井技术套管外固井质量及气体聚集成果图

Fig. 3 Results of external cementing quality and gas accumulation of technical casing in X201 well

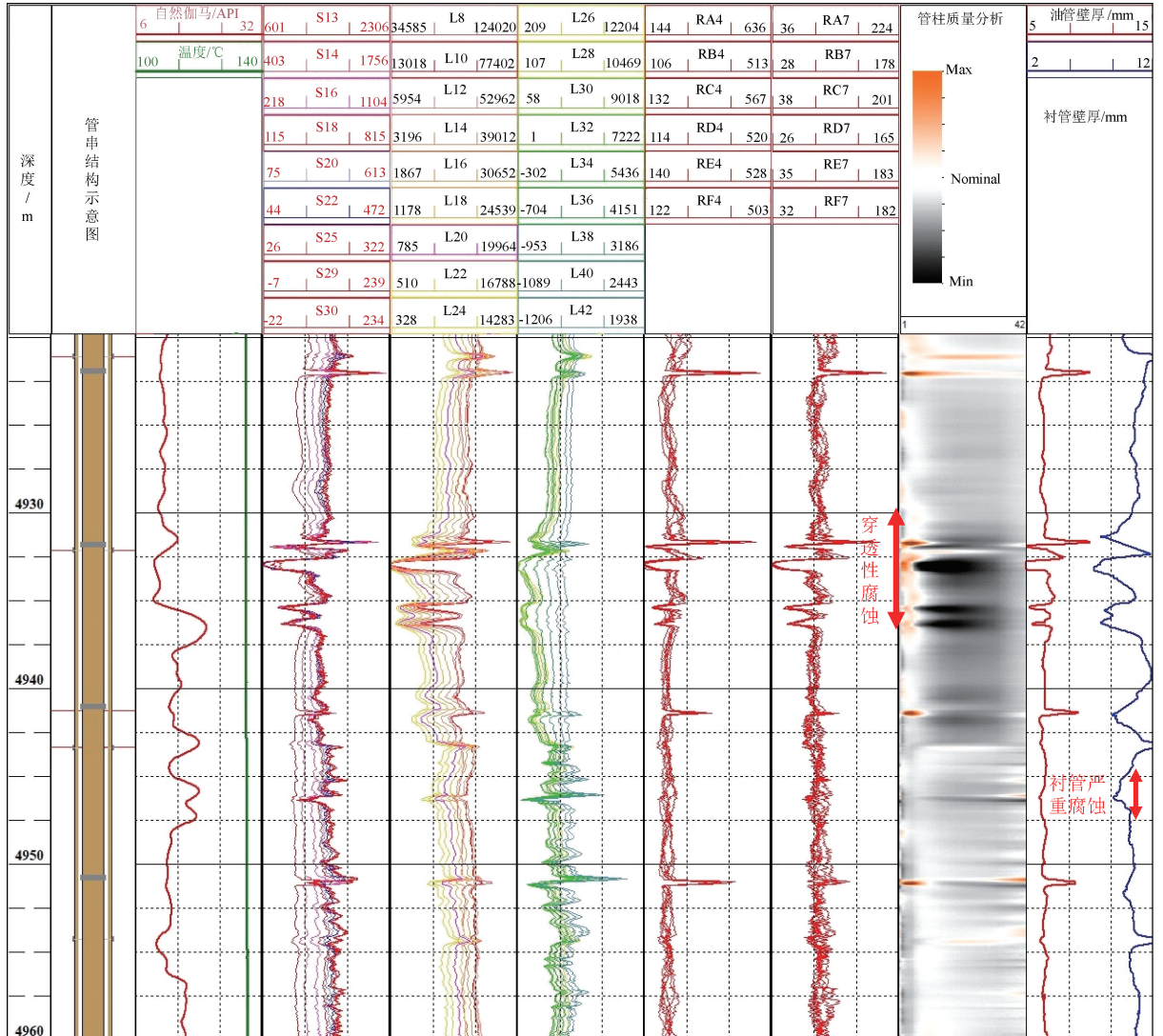


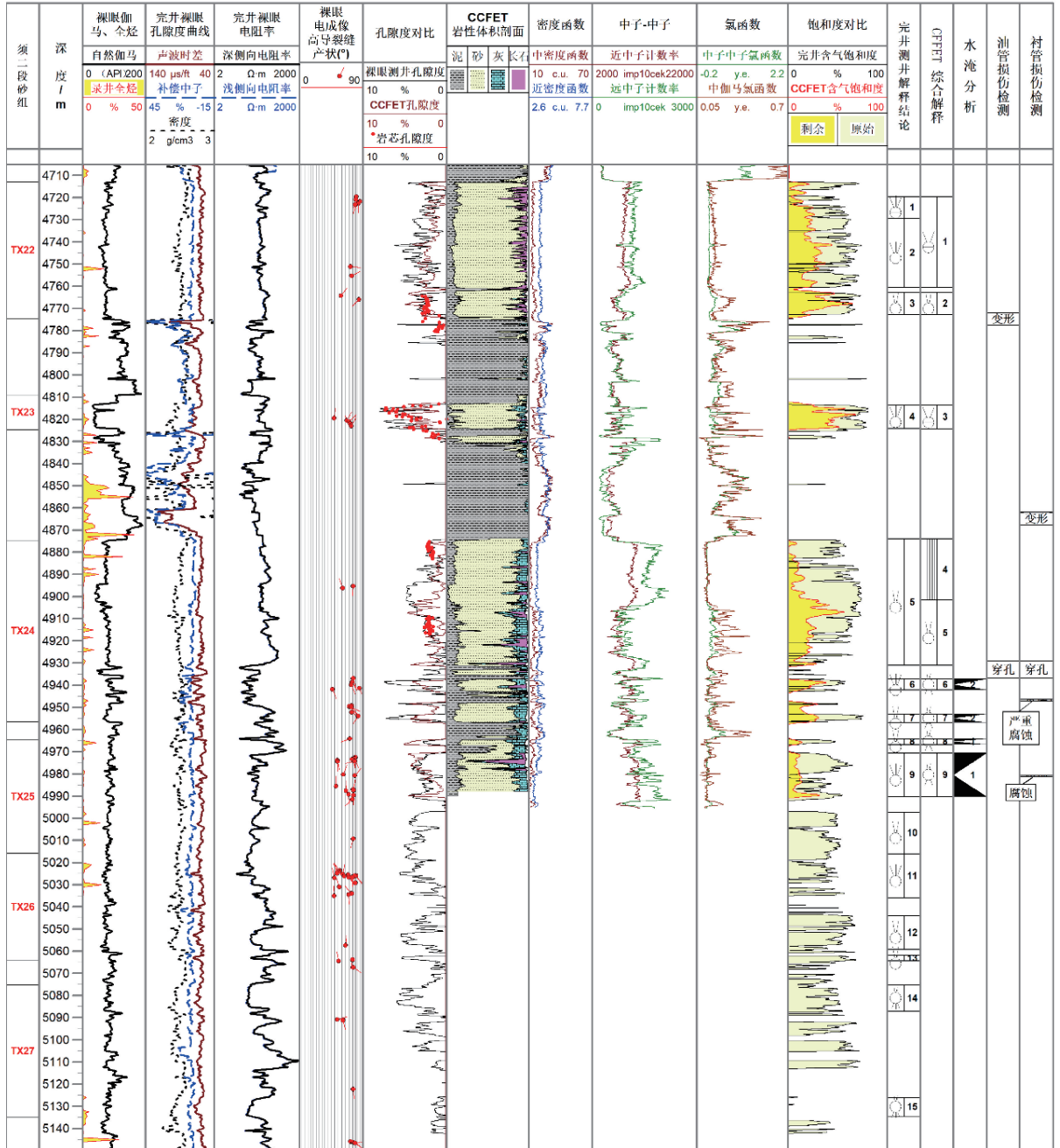
图 4 X201 井电磁探伤评价成果图

Fig. 4 Evaluation results of electromagnetic flaw detection in X201 well

### 2.4 储层含气性精细评价

当管外储层含气时,CCFET 孔隙度、含气饱和度表现为相对高值,中子-中子探测器长、短探测器计数率升高且存在差异,中子-中子氯函数以及中子响应特征,共解释 9 个储层,并与完井裸眼测井参数进行了对比,其中 TX<sub>2</sub><sup>2</sup> 砂组、TX<sub>2</sub><sup>3</sup> 砂组孔隙度、剩余气饱和度较高,建议挖潜(见表 3)。

征,利用 CCFET 核测井数据对 X201 井须二段 4 709.78~4 996 m 储层进行评价,通过计算岩性矿物体积剖面、分析孔隙度、含气饱和度、氯函数以及中子响应特征,共解释 9 个储层,并与完井裸眼测井参数进行了对比,其中 TX<sub>2</sub><sup>2</sup> 砂组、TX<sub>2</sub><sup>3</sup> 砂组孔隙度、剩余气饱和度较高,建议挖潜(见表 3)。



图例 气层 含气层 含气水层 差气层 强水淹 弱水淹

图 5 X201 井须家河组二段 CCFET 测井、裸眼测井储层处理成果图

Fig. 5 The results of CCFET logging and open hole logging reservoir treatment in the second member of Xujiahe formation in X201 well

表3 X201井CCFET测井解释成果表  
Table 3 CCFET logging interpretation results table in X201 well

层号	砂组	厚度/m	CCFET 测井		CCFET 解释结论	综合建议
			含气饱和度/%	孔隙度/%		
1	TX <sub>2</sub> <sup>2</sup>	40.9	23.13	2.73	差气层	建议挖潜
2	TX <sub>2</sub> <sup>2</sup>	10.1	36.87	2.84	含气层	建议挖潜
3	TX <sub>2</sub> <sup>3</sup>	10.8	43.21	3.82	差气层	建议挖潜
4	TX <sub>2</sub> <sup>4</sup>	27.5	8.32	0.82	致密层	
5	TX <sub>2</sub> <sup>4</sup>	29.5	24.74	1.72	含气层	
6	TX <sub>2</sub> <sup>4</sup>	4.8	23.29	3.61	含气水层(弱水淹)	堵水
7	TX <sub>2</sub> <sup>4</sup>	3.8	23.75	3.24	含气水层(弱水淹)	堵水
8	TX <sub>2</sub> <sup>5</sup>	2.6	9.37	3.28	含气水层(强水淹)	堵水
9	TX <sub>2</sub> <sup>5</sup>	19.4	11.32	2.52	含气水层(强水淹)	堵水

X201井完井裸眼测井孔隙度经过岩芯孔隙度刻度(见图5第7道),储层测井孔隙度介于1.0%~7.3%,其中须二下亚段TX<sub>2</sub><sup>7</sup>砂组发育2层含气水层(完井测井解释第14层5 075.3~5 087.0 m孔隙度平均4.1%、第15层5 126.0~5 134.5 m孔隙度平均1.8%),物性致密,天然裂缝系统不发育。经过衬管完井投产后,2011年4月1日至2015年8月14日期间平均日产气4.96×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,平均日产水224 m<sup>3</sup>,平均水气比45.4 m<sup>3</sup>/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,油压由24.2 MPa降至11.0 MPa,套压由17.6 MPa降至8.9 MPa,底水锥进控制相对较好。其中,2015年8月10日至14日期间,油压维持在11.2~11.0 MPa,套压8.8~8.9 MPa,日产气量在5.06~5.0×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,日产水232~232 m<sup>3</sup>,水气比在45.89~46.39 m<sup>3</sup>/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>之间,油套压差为2.4~2.1 MPa,气井生产尚未表现出强水淹特征。气井生产状态自2025年8月15日开始出现异常变化,在8月15日至8月21日短短7日内,日产气量自3.85×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>下降至3.49×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,日产水量自232 m<sup>3</sup>上升至252 m<sup>3</sup>,水气比自60.26 m<sup>3</sup>/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>上升至72.07 m<sup>3</sup>/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,油压自11.0 MPa降至9.72 MPa,套压自8.9 MPa上升至14.3 MPa,套压开始超过油压,油套压差自2.1 MPa降至-4.58 MPa,油套压差由正转负且绝对值升高,指示井底积液液面升高,水淹加剧,随后该井便表现出油压、产气量持续下降,水气比持续升高特征,携液产出困难直至水淹停产。在TX<sub>2</sub><sup>4</sup>砂组下部至TX<sub>2</sub><sup>5</sup>砂组顶部,CCFET解释的第6~7层(4 937.3~4 956.8 m)孔隙度相比裸眼测井解释孔隙度局部升高,指示弱水淹,第8层(4 964.1~4 966.7 m)、第9层(4 970.8~4 990.2 m)顶部孔隙度相比裸眼测井解释孔隙度升高明显,指示强水淹。完井裸眼电成

像测井显示4 937~4 954 m发育10条倾角50.5~76.3°的高角度天然裂缝、4 964.0~4 991.6发育16条倾角33.4~65.7°的中高角度天然裂缝,综合天然裂缝发育特征(图5第6道),分析认为自2015年8月15日起,疑为层间远端地层水沿高角度天然裂缝高渗系统推进至井筒。水淹层位上部附近的4 929.0~4 936.9 m油管、衬管的穿透性腐蚀可能与地层水沿裂缝系统持续对管柱的长期冲蚀有关(见图5)。管柱损伤检测、套后含气性评价及水淹分析结果为该井下一步修井作业、堵水、选择性挖潜压裂改造提供了技术依据。

### 3 结论

(1)川西新场地区超深层、高温高压致密碎屑岩气藏水淹、套后储层评价及井筒完整性管理、挖潜面临严峻挑战。CCFET测井仪通过替代传统电磁探伤、水泥密度测井和套后储层饱和度测井,在川西超深致密碎屑岩气井中实现了工程与地质一体化精细评价,大幅提升了作业效率,为井下复杂井况检测和剩余油气评估提供了新的思路和技术手段,对于推动类似地质工程条件下的气藏高效、安全开发及动态监测具有一定的推广应用价值。

(2)通过对比X201井CCFET测井与完井测井评价结果,开展了剩余气监测、管柱损坏评估、水淹情况分析,在特低孔渗的须家河组碎屑岩储层中,有效区分了含气层、差气层与含气水层,与气井地质、生产认识吻合度高,为后期老井治理、堵水、挖潜、修井作业和安全生产决策提供了关键技术依据。

(3)X201所处探区存在类似X856暴性水淹井,X201剩余气评价结果对了解区域其他老井剩余气潜力具有一定的参考和指导意义。

**致谢:**感谢中国石化西南油气分公司同意本论文公开发表,感谢中石化经纬有限公司西南测控公司提供的技术支持。

### 参考文献

- [1] 孙彦才, 郑华, 崔艳辉. 多层管柱电磁探伤测井技术[J]. 测井技术, 2003, 27(3): 246-249.  
SUN Yancai, ZHENG Hua, CUI Yanhui. The multilayer case-pipes electromagnetic defect detecting logging [J]. Well Logging Technology, 2003, 27(3): 246-249.
- [2] 乐大发, 姚辰明, 郭体军, 等. MID-K 多层管柱电磁探伤测井及在孤岛油田的应用[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(2): 479-481.  
LE Dafa, YAO Chenming, GUO Tijun, et al. MID-K multilayer string electromagnetic flaw detection logging and its application in Gudao oilfield [J]. Journal of Petroleum and Natural Gas, 2008, 30(2): 479-481.
- [3] 石耀, 郭海敏, 李恒, 等. 40 臂井径测井结合电磁探伤测井识别套损套变[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(2): 29-33.  
SHI Yao, GUO Haimin, LI Heng, et al. 40-arm caliper logging combined with electromagnetic flaw detection logging to identify casing damage and casing deformation [J]. Journal of Yangtze University (Science Edition), 2015, 12(2): 29-33.
- [4] 张德辉. MIT & MTT 组合测井技术在黑帝庙储气库建库前井筒评价中的应用[J]. 测井技术, 2022, 46(3): 352-355.  
ZHANG Dehui. Application of MIT & MTT combination logging technology in wellbore evaluation before the construction of Heidimiao gas storage [J]. Well Logging Technology, 2022, 46(3): 352-355.
- [5] 郑云萍, 刘奇, 聂畅, 等. 气井井下腐蚀检测技术及其应用[J]. 测井技术, 2013, 37(6): 707-710.  
ZHENG Yunping, LIU Qi, NIE Chang, et al. A review of casing inspection technology and its application in downhole corrosion evaluation of gas well [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(6): 707-710.
- [6] 陈洪海, 孙志峰, 王文梁, 等. 多功能超声波成像测井仪套损检测的实验研究[J]. 测井技术, 2012, 36(4): 340-344.  
CHEN Honghai, SUN Zhifeng, WANG Wenliang, et al. Model experiments on casing inspection with the multi-functional ultrasonic imaging logging tool [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(4): 340-344.
- [7] 柴满洲, 向绪金, 张庆生, 等. 井下电视测井系统在套管检测中的应用[J]. 测井技术, 2002, 26(3): 242-246.  
CHAI Manzhou, XIANG Xujin, ZHANG Qingsheng, et al. Applications of downhole video logging tool in casing inspections. [J]. Well Logging Technology, 2002, 26(3): 242-246.
- [8] 宋学锋, 李志彬, 刘金铭, 等. 深层深井井筒完整性检测技术发展现状[J]. 新疆石油天然气, 2024, 20(4): 8-18.  
SONG Xuefeng, LI Zhibin, LIU Jinming, et al. Development status of wellbore integrity inspection technology for deep strata and deep wells [J]. Xinjiang Petroleum and Natural Gas, 2024, 20(4): 8-18.
- [9] 杨留强, 江松元, 宫继刚, 等. 基于光纤磁传感的套损检测技术研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(4): 155-159.  
YANG Liuqiang, JIANG Songyuan, GONG Jigang, et al. Study on the technology of casing damage detection based on optical fiber magnetic sensing [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(4): 155-159.
- [10] 程希, 任战利. 过套管电阻率测井评价储集层含油气变化特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2008, 38(3): 462-466.  
CHENG Xi, REN Zhanli. Cased-hole resistivity logging reservoir evaluation of petroleum feature changes [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2008, 38(3): 462-466.
- [11] 王振, 周清. 套管井脉冲中子测井仪发展综述[J]. 测井技术, 2020, 44(5): 432-437.  
WANG Zhen, ZHOU Qing. Review on development of pulsed neutron logging tools used for cased-hole [J]. Well Logging Technology, 2020, 44(5): 432-437.
- [12] 曾磊, 陈金科, 边松伟, 等. 应用四中子饱和度测井技术指导油井分层采油[J]. 油气井测试, 2023, 32(5): 67-73.  
ZENG Lei, CHEN Jinke, BIAN Songwei, et al. Application of four-neutron saturation logging technology to guide stratified oil production [J]. Well Testing, 2023, 32(5): 67-73.
- [13] 王振, 梁国武, 邱飞, 等. 砂泥岩储层碳氧比测井泥质校正方法[J]. 油气井测试, 2022, 31(4): 23-30.  
WANG Zhen, LIANG Guowu, QIU Fei, et al. Shale correction method for C/O logging in sand-shale reservoirs [J]. Well Testing, 2022, 31(4): 23-30.
- [14] 刘汉斌, 李大建, 王晓飞, 等. 水平井深度可视化监测快速找水试验探索[J]. 油气井测试, 2024, 33(1): 55-60.  
LIU Hanbin, LI Dajian, WANG Xiaofei, et al. Depth visualization monitoring for rapid water detection in horizontal wells [J]. Well Testing, 2024, 33(1): 55-60.
- [15] 陈立雄, 袁洪波, 熊伟, 等. 套损-固井诊断-储层评价综合测井仪在储气库井监测中的应用[J]. 测井技术, 2022, 46(5): 611-617.  
CHEN Lixiong, YUAN Hongbo, XIONG Wei, et al. Application of casing cementing formation evaluation tool in gas storage well monitoring [J]. Well Logging

- Technology, 2022, 46(5): 611-617.
- [16] 黎明, 邱金权, 金鑫, 等. 新型电磁探伤 MID-S 测井技术套损检测研究 [J]. 石油仪器, 2012, 26(4): 4-6.  
LI Ming, QIU Jinquan, JIN Xin, et al. Research on casing damage detection of new electromagnetic flaw detection MID-S logging technology [J]. Petroleum Instruments, 2012, 26(4): 4-6.
- [17] 楼章华, 苏一哲, 朱蓉, 等. 四川盆地新场构造带上三叠统须家河组二段地层水化学动态特征及其成因 [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4): 841-851.  
LOU Zhanghua, SU Yizhe, ZHU Rong, et al. Dynamic chemical characteristics and origin of formation water in the second member of Xujiahe formation, Xinchang structural belt, Sichuan basin [J]. Oil and Gas Geology, 2021, 42(4): 841-851.
- [18] 乔林. 新场须二气藏隔气式气水分布特征及开发对策研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015: 7-84.  
QIAO Lin. Research on the characteristics of gas and water distribution and development strategies in  $T_3x^2$  compartment-gas reservoir in Xinchang gas field [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015: 7-84.
- [19] 李娟, 陈通, 陈绪龙. 宽能域中子伽马能谱测井技术及其应用 [J]. 油气藏评价与开发, 2014, 4(4): 34-38.  
LI Juan, CHEN Tong, CHEN Xulong. Wide field neutron-gamma spectrum logging and its application [J]. Evaluation and Development of Oil and Gas Reservoirs, 2014, 4(4): 34-38.
- [20] 白彬艳, 赵景, 高勃胤. 宽能域中子伽马能谱测井技术 [J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(2): 142-146.  
BAI Binyan, ZHAO Jing, GAO Boyin. The wide-range spectrometric neutron gamma ray logging technology [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(2): 142-146.
- [21] 何进, 蒲杨, 骆仕洪, 等. 新场气田高压高产气井封隔器完井工艺分析 [J]. 钻采工艺, 2008, 31(3): 119-120.  
HE Jin, PU Yang, LUO Shihong, et al. Analysis of packer completion technology for high pressure and high production gas wells in Xinchang gas field [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(3): 119-120.
- [22] 补成中, 熊友明, 朱澄清, 等. 川西深层完井方式的优选 [J]. 天然气工业, 2008, 28(9): 95-97.  
BU Chengzhong, XIONG Youming, ZHU Chengqing, et al. Optimization of completion modes in deep formation of west Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(9): 95-97.
- [23] 王雨生. 新场须二气井采气流程结垢机理及阻垢技术 [J]. 油气田地面工程, 2024, 43(3): 69-75.  
WANG Yusheng. Scale formation mechanism and scale inhibition technology in the gas production process of Xinchang Xu'er gas well [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2024, 43(3): 69-75.

编辑 方志慧

第一作者简介: 杨丽兵, 男, 1980 年出生, 高级工程师, 硕士, 2009 年毕业于成都理工大学地球探测与信息技术专业, 现主要从事测井储层综合评价、油气田开发技术研究及管理工作。电话: 028-65285676, Email: 43653895@qq.com。通信地址: 四川成都中国石化西南油气分公司, 邮政编码: 610041。