

南海西部高温高压井精准卡层关键技术 体系构建及应用

郭书生^{1,2,3} 王世越^{1,2} 彭志春^{1,2} 柳泽旭¹ 秦 瑞⁴

1. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口 570100;
2. 海南省深海深层能源工程重点实验室, 海南 海口 570100;
3. 中国海油南海油气能源院士工作站, 海南 海口 570100;
4. 海油发展(澄迈)能源技术有限公司, 海南 海口 570312

摘 要:南海西部莺琼盆地是世界三大海上高温高压区域之一,勘探作业面临地层高温高压以及异常压力导致的钻井安全压力窗口窄的难题,实现安全钻探的必要条件之一即要实现精准卡层,进而将套管下至合适位置,保证充足的安全压力窗口钻进至目的层段。深度、压力预测的常规手段是利用邻井的时深关系和地层对比,但预测精度低、分辨率差同时也无法解决地层横向非均质性的问题。为解决以上问题,在现有技术基础上系统开展了高温高压探井精准卡层关键技术研究,总结了一套基于常规随钻声波测井、垂直地震剖面测井和随钻电阻率前视测井技术的高温高压井精准卡层关键技术体系,为高温高压井合理优化井身结构提供了有力的技术支持,地质目的完成率和作业时效显著提升,释放高温高压勘探作业的成本压力,推动了南海西部高温高压勘探作业安全顺利实施。研究成果可为高温高压井钻探过程中准确预测目的层深度提供技术参考。

关键词:莺琼盆地;高温高压;随钻声波;垂直地震剖面;随钻电阻率前视;精准卡层

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2024.06.014

The key technology system construction and application for accurate horizon prediction of HTHP wells in the Western South China Sea

GUO Shusheng^{1,2,3}, WANG Shiyue^{1,2}, PENG Zhichun^{1,2}, LIU Zexu¹, QIN Rui⁴

1. CNOOC China Ltd., Hainan Branch, Haikou, Hainan, 570100, China;
2. Key Laboratory of Deep Sea Deep Formation Energy Engineering of Hainan Province, Haikou, Hainan, 570100, China;
3. CNOOC South China Sea Oil & Gas Energy Academician Workstation, Haikou, Hainan, 570100, China;
4. CenerTech Chengmai Energy Technology Co., Ltd., Haikou, Hainan, 570312, China

Abstract: The Yinggehai-Qiongdongnan Basin in the Western South China Sea is one of the three major high-temperature high-pressure (HTHP) marine areas in the world. Exploration operations in this area face challenges such as high formation temperatures, high pressures, and abnormal pressures, which result in a narrow drilling safety pressure window. One of the necessary conditions for safe drilling is the

收稿日期:2024-07-16

基金项目:中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目“海上深层/超深层油气勘探技术”(KJGG2022-0405)

作者简介:郭书生(1975-),男,河南新安人,教授级高级工程师,硕士,主要从事地质作业管理及技术研究工作。E-mail: guoshusheng@cnooc.com.cn

precise prediction of target depth and formation pressure. This allows for the proper placement of casing, ensuring sufficient safety pressure window to drill into the target interval. At present, the conventional methods for depth and pressure prediction are based on the time-depth relationship and formation correlation of adjacent wells. However, these methods suffer from low accuracy and poor resolution and cannot address the issue of lateral heterogeneity in the formation. To overcome these challenges, key technologies for accurate depth and pressure prediction in HTHP exploration wells have been systematically developed based on existing technologies in the Western South China Sea. A set of key technological systems, based on Conventional Sonic Logging While Drilling, Vertical Seismic Profile (VSP) Logging, and IriSphere Look-Ahead-While-Drilling Service, has been summarized. These provide robust technical support for the optimization of wellbore structure of HTHP wells, significantly improving the geological completion rate and operational efficiency, reducing the cost pressure of HTHP exploration operations, and promoting the safe and smooth implementation of HTHP exploration operations in the Western South China Sea. The research results provide technical references for accurate prediction of target layer depths during the drilling of HPHT wells.

Keywords: Yinggehai-Qiongdongnan Basin; HTHP; Sonic logging while drilling; Vertical seismic profile; IriSphere; Accurate horizon prediction

0 前言

南海西部莺琼盆地属于新生代大型走滑盆地,构造上位于印澳—欧亚—太平洋三大板块交界处,油气资源丰富,储层发育区面积近 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$,是世界三大海上高温高压区域之一。储层具有典型的高温高压特征,如古近系黄流组二段储层,段埋深约 4 000 m,地层温度 $> 200 \text{ }^\circ\text{C}$,地层压力系数 $> 2.25^{[1-2]}$ 。自 1984 年,阿科石油公司在黄流组二段钻探了第 1 口高温高压井,之后 20 余年里雪佛龙、英国石油、壳牌等多家国际石油公司先后钻探了 15 口高温高压井,由于受到当时设备和技术条件的限制,大多数探井未成功钻达地质目标^[3-5]。20 世纪 90 年代,国内石油公司开始了南海西部的勘探工作,但由于安全压力窗口极窄,部分井甚至无安全压力窗口,钻进过程中溢流、井漏、喷漏同层等复杂情况频发,多口井被迫提前完钻甚至报废^[6-10]。早期勘探过程中,卡层主要是利用地震资料和区域速度资料进行深度预测,但受制于地震资料处理技术的局限和地震数据的分辨率,仅靠钻前地震资料进行深度和压力的预测,预测精度无法满足安全钻进的需求^[11]。为解决以上问题,通过技术应用探索并依托科研项目攻关系统开展高温高压井精准卡层关键技术研究,引入先进随钻测井和中途测井技术,在随钻过程中对地层界面深度和地层压力进行更为精细的预测,进而卡准层位,优化井身结构,在合适的位置下入套管,保证足够的安全压力窗口钻进至目的层段。通过对精准卡层关键技术进行梳理,最终构建了一套切实可行的高温高压井精准卡层关键技术体系,并在实践中取得了良好效果。

1 高温高压井精准卡层关键技术体系构建

南海西部高温高压井目的层压力系数高,压力形成机制复杂且非目的层通常存在高压薄弱层,精细卡层并准确下入套管封固薄弱层对钻井安全作业尤为关键。通过对南海西部已钻高温高压井的研究发现,高温高压井地层速度变化复杂,地震上标志层不明显,钻前标定成果与实钻地层深度误差过大,无法为工程精细作业提供帮助^[12]。为解决上述问题,在现有钻前地震标定的基础上引入随钻测井和中途垂直地震剖面 (Vertical Seismic Profile, VSP) 测井等技术,通过随钻实时资料不断更新迭代深度及压力预测结果,以达到提高预测精度的目的。此外,还从地层速度、目的层砂体、压力窗口等方面分析了不同地质条件的卡层难点和各技术手段的适用性,形成更有针对性的不同技术组合方案,最终构建了一套切实可行的高温高压井精准卡层关键技术体系,见图 1。

高温高压井精准卡层关键技术体系通过收集钻前的地面地震资料、现场地质录井资料、随钻测井资料以及 VSP 测井资料等,利用地震合成记录、地层对比技术对设计井主要目的层深度和压力等进行初步预测,钻进过程中再利用随钻、VSP 测井资料重新对地层进行标定,由于 VSP 测井资料分辨率明显优于地面地震资料,这一过程可以提高预测精度;在此基础上,再次引入随钻地层前视技术,对钻头前方电阻率差异界面进行实时预测,结合之前的随钻测井和中途 VSP 测井,进一步提高了深度预测的准确性,最终实现了精准卡层的目的,保证高温高压井能够顺利安全完成勘探目的。

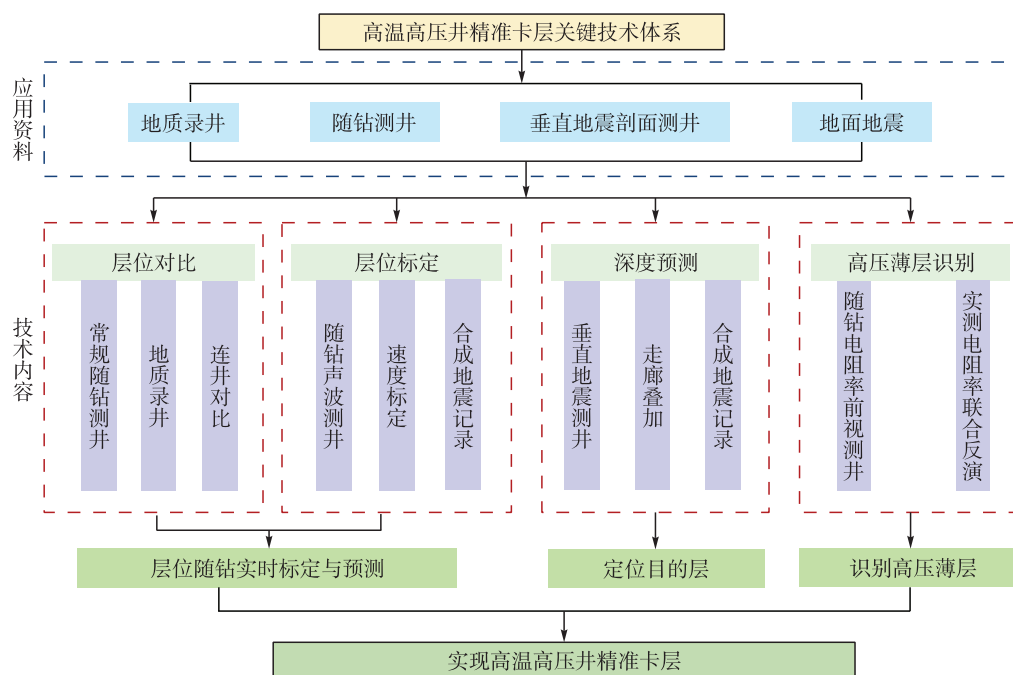


图 1 南海西部高温高压井精准卡层关键技术体系示意图

Fig. 1 Sketchmap of the key technology system for depth and pressure prediction in HTHP Wells in the Western South China Sea

2 高温高压井精准卡层关键技术原理

2.1 基于随钻地质资料的层位随钻实时标定技术

基于声波资料进行合成记录标定是进行深度预测的重要常规手段。早期通常在完钻后进行电缆声波资料的测量来获取地层速度,但在高温高压钻井过程中钻后的电缆声波资料对于钻进过程风险控制无意义^[13-14]。为了解决这一问题,通过引入随钻声波测井在钻进过程中对已钻地层进行随钻采集,以随钻声波资料和地质录井为基础进行随钻合成记录标定修正钻前地面地震标定,保证已钻地层深度标定的可靠,缩小未钻地层深度预测的误差。基于随钻声波的合成记录标定仅在资料来源上不同,技术原理同常规的合成记录标定并无区别,见式(1)。

$$S_{(t)} = W_{(t)} * R_{(t)} + N_{(t)} \quad (1)$$

式中: $S_{(t)}$ 为合成地震记录; $W_{(t)}$ 为地震子波,通常用理论雷克子波代替; $R_{(t)}$ 为地层反射系数,同地质界面上下的速度和密度相关; $N_{(t)}$ 为噪声。

2.2 基于 VSP 测井的钻头前层位预测技术

VSP 测井是一种井中地震观测技术,作为一种地面地震和测井相结合的技术手段,VSP 技术在油气勘探、开发中发挥了重要作用^[15]。利用 VSP 资料的特殊性,通过中途 VSP 资料进行钻头下方地层层速度反演,获得待钻井段一定深度范围的层速度,进而对未钻地层界面进行相对准确的深度预测^[16-17]。通常用于深度预测的 VSP 测井资料为零偏移距或最小偏移距资料,可以看成

是自集自收的资料,假设地层为水平层状介质,则地层反射系数见式(2)。

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (2)$$

式中: R 为地层反射系数; ρ_1 、 ρ_2 分别为地质界面上、下的密度, g/cm^3 ; v_1 、 v_2 分别为地质界面上、下的速度, m/s 。

由式(2)可得到相邻上、下两层的层速度关系式见式(3)。

$$v_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2} \times \frac{1+R}{1-R} v_1 \quad (3)$$

利用现有密度测井数据或 Gardner 经验公式求取密度,见式(4)。

$$\rho = a v^b \quad (4)$$

式中: ρ 为地层密度, g/cm^3 ; v 为地层速度; a 、 b 为经验系数,具有区域特性。

将式(4)代入式(3),得到求取层速度,见式(5)。

$$v_2 = \left(\frac{1+R}{1-R} \right)^{\frac{1}{1+b}} v_1 \quad (5)$$

根据式(5)可由上一层的层速度求取下一层的层速度,同时可将速度转换成时差。上述公式中, a 、 b 可由已钻井段 VSP 速度和随钻测井密度数据计算得到; R 采用共轭梯度法迭代修改地层模型逐次逼近求取。得到层速度资料后可以通过 VSP 桥式标定法结合地面地震资料对钻头前反射异常进行深度预测和解释。

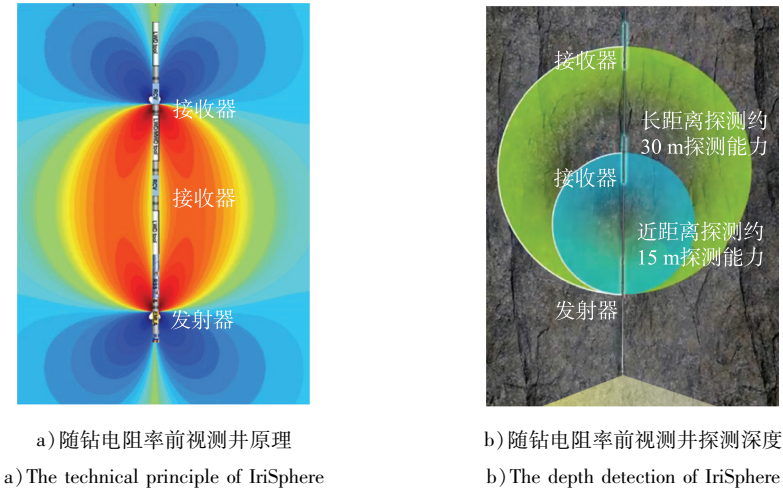
2.3 基于随钻电阻率前视测井的高压薄层识别技术

随钻电阻率前视测井技术是一种利用钻头前方电

磁波电阻率反演未钻开地层界面的技术,探测方向与井眼/钻进方向相同,主要用于随钻卡层和地质导向^[18-19]。在垂直和低角度井,通过优化井下仪器结构提高反射信号精度与强度,同时结合其他随钻测井、地面地震等资料,建立油藏模型,进行联合反演,计算得到远处地层参数。钻头前方地层突变是导致钻井工程风险的主因,随钻电阻率前视测井技术可通过前视反演提前预测钻头前方地层变化,是高效控制该风险的有效方法,并有助于优化套管下深来确保井眼稳定、避免不必要的工程措施调整来提高钻井时效,节省钻井成本^[20]。

随钻电阻率前视测井工具由 1 个发射器短节和 2~3 个接收器短节组成,见图 2。在井下钻具中,发射器短节要尽可能靠近钻头,多个接收器沿着钻具串间隔排列,中间夹着多个随钻测量(Measure While Drilling,

MWD)和随钻测井(Logging While Drilling, LWD)工具。发射器短节发射出多达 6 种频率(2、6、12、24、48、96 kHz)的电磁波,由接收器接收,并以电压的形式来体现电磁波传播路径中地层和流体的影响作用,同时提供丰富的不同频率的超深方向性测量数据^[19]。电磁波探测范围包括发射传感器已穿过的地层和前方未穿过的地层两部分,前视测量敏感区域位于发射器前方未穿过的地层部分。前视反演可综合 LWD 实测电阻率数据提供的已知信息得以优化。超深电磁波前视反演的探测范围约 30 m,这一范围受到发射器和接收器的间距、发射电磁波频率、地层界面电阻率对比度、地层厚度和薄夹层特征等因素的影响。电磁波频率越低、发射器和接收器的间距越大、地层电阻率对比度越高、地层越均质且越厚,则前视探测深度越远,反之越近^[21-22]。



a) 随钻电阻率前视测井原理
a) The technical principle of IriSphere
b) 随钻电阻率前视测井探测深度
b) The depth detection of IriSphere

图 2 随钻电阻率前视测井技术原理及探测深度示意图

Fig. 2 The technical principle and depth detection sketch map of IriSphere

3 高温高压井精准卡层关键技术优选

高温高压井精准卡层关键技术在不同区域、不同地质条件、不同作业难度下的适用性也不同。在高温高压井精

准卡层关键技术体系构建过程中,从作业安全和作业成本角度出发,对地层速度、目的层砂体、压力窗口等方面进行了分析,厘清了不同地质条件的卡层难点并对卡层关键技术进行优选组合,形成更有针对性的技术组合方案,见表 1。

表 1 不同地质条件的高温高压井精准卡层关键技术组合方案表

Tab. 1 The key technology portfolio for depth and pressure prediction in HTHP Wells in different geological conditions

地质条件			技术组合方案
地层速度	目的层特征	压力窗口	
地层速度基本落实,有邻井参考,多适用于评价井	标志层明显,目的层砂体明确,地震响应清晰	压力窗口宽裕(>0.2)	方案 1:基于随钻地质资料的层位随钻实时标定技术
地层速度未落实,无邻井参考,多适用于预探井	标志层不明显,目的层砂体明确,地震响应清晰	压力窗口窄(<0.2),需要精确落实井身结构	方案 2:基于随钻地质资料的层位随钻实时标定技术+基于垂直地震剖面测井的钻头前层位预测技术
地层速度未落实,无邻井参考,多适用于预探井	标志层不明显,目的层压力不明确,地震响应识别困难	压力窗口窄(<0.2),需要精确落实井身结构并规避高压薄层风险	方案 3:基于随钻地质资料的层位随钻实时标定技术+基于垂直地震剖面测井的钻头前层位预测技术+基于随钻前视电阻率测井的高压薄层识别技术

4 应用效果分析

4.1 实例分析

DL10 井是莺歌海盆地凹陷斜坡带南段东块较高部位的垂直评价井,目的层为黄流组二段底部水道砂,邻井在目的层黄流组均有良好油气发现,但温压条件极端(温度>200℃、压力系数>2.25),地层压力纵向变化大、抬升快以及薄弱层的存在导致安全压力窗口极窄,多口邻井因压力、深度、岩性预测不准、井身结构不合理等因素导致钻探失败。DL10 井预测:3 509~3 882 m 时压力系数为 1.83~1.99,3 882~4 198 m 时压力系数为 1.99~2.27,目的层压力系数为 2.27~2.24;预测主要目的层温度为 192~200℃,井底温度约 205℃,见图 3。

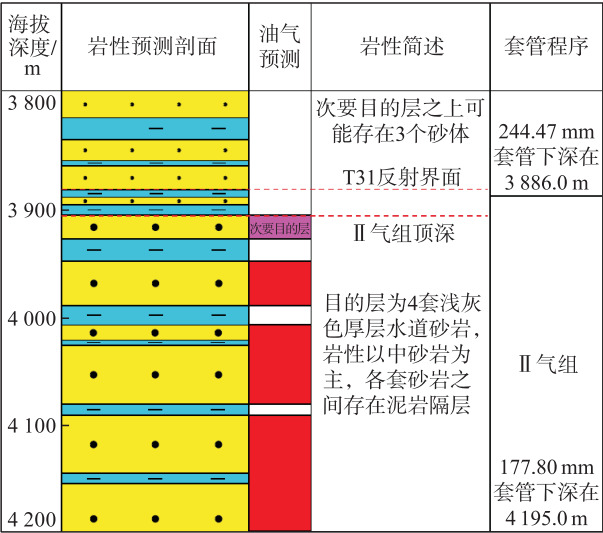


图3 DL10 井钻前地质工程设计图
Fig.3 The pre-drilling geological engineering design map of DL10

鉴于 DL10 井目的层温压特征,要求将 244.47 mm 套管要求下在 T31 界面之下、目的层 II 气组之上的泥岩中,防止在 311.15 mm 井段揭开黄流组二段高压气层造成钻探失败,因此卡准 244.47 mm 套管下深对于钻探成功与否至关重要。为解决上述问题,依据南海西部高温高压井精准卡层关键技术体系优选出技术组合方案 3: 基于随钻地质资料的层位随钻实时标定技术、基于垂直地震剖面测井的钻头前层位预测技术、基于随钻电阻率前视测井的高压薄层识别技术,对目的层顶深进行精细预测,降低钻前深度及预测误差,成功将 244.47 mm 套管下至目的层之上厚度仅 20 m 的泥岩中,为目的层作业创造了足够的压力窗口,有效规避钻井风险。

DL10 井 311.15 mm 井段实施了随钻声波测井和随钻电阻率前视测井,钻进至 3 845 m 时起钻进行中途 VSP。基于随钻地质资料的层位随钻实时标定技术预测 T31 界

面在 3 918 m,钻前设计 3 905 m,实钻 3 918 m,随钻预测 T31 界面误差为 0,提前了 73 m 对 T31 顶界面进行了准确预测;基于垂直地震剖面测井的钻头前层位预测技术预测目的层 II 气组顶深 3 937 m,落实了安全界面;基于随钻电阻率前视测井的钻头前高压薄层精细识别技术实时监控目的层之上可能存在的高压薄层风险,最终指导决策钻至 3 922 m 中完,成功将 244.47 mm 套管下至目的层之上厚度仅 20 m 的泥岩中,管鞋处承压试验折算钻井液当量密度 2.38 未漏,为目的层作业创造了足够的安全压力窗口。后续目的层井段作业只钻开 14 m,3 936 m 即揭开 II 气组,预测与实钻安全界面误差仅 1 m,再次证实了南海西部高温高压井精准卡层关键技术体系优选出技术组合方案 3 的准确性和有效性,见表 2。

表 2 DL10 井随钻卡层误差统计表
Tab.2 Statistics table of depth prediction errors while drilling of DL10

目的层	钻前预测深度 /m	随钻预测深度 /m	实钻深度 /m	误差 /m	距离钻头深度 /m
T31	3 905	3 918	3 918	0	73
II 气组顶	3 929	3 937	3 936	1	91

4.2 应用效果

高温高压井精准卡层关键技术体系构建后已在 DL 区进行了多口井的实践探索,通过对不同地质条件的高温高压井卡层技术组合方案的实践应用,逐渐摸索出不同区域适用的技术组合方案,有力推动了高温高压 DL 区的勘探作业及商业气田的成功落实,见表 3。

表 3 高温高压井精准卡层关键技术组合方案应用效果统计表
Tab.3 The application effect statistics table of key technology portfolio for depth and pressure prediction in HTHP Wells

阶段	井名	钻探成效	技术组合方案
探索阶段	DL1	失利	方案 1
	DL2	失利	方案 1
突破阶段	DL3	成功	方案 2
	DL6	成功	方案 2
挑战阶段	DL4	失利	方案 2
成熟阶段	DL13	成功	方案 2
	DL10	成功	方案 3
	DL12	成功	方案 3

5 结论

1) 通过开展高温高压井精准卡层关键技术研究,基

于随钻测井、VSP测井等技术开展技术创新应用和攻关,建立了高温高压井精准卡层关键技术体系,为实现精准卡层提供了科学的技术体系保障。

2) 高温高压井精准卡层关键技术体系综合利用地面地震资料、现场地质录井资料、随钻测井资料以及中途VSP测井资料等多专业资料,逐步提高深度预测精度,最终实现了精准卡层的目的,保证高温高压井能够顺利安全实施。

3) 通过实践应用优化不同技术组合,建立了针对不同地质条件的高温高压井卡层技术组合方案,提高了卡层准确性的同时也有效降低了高温高压井的作业成本。

4) 经过经验积累和技术攻关,逐步摸清了南海西部高温高压区域的高压成因及地质工程风险,提出高温高压井地质工程一体化理念,构建了多专业交叉、多技术组合的地质工程一体化特色作业体系。

参考文献:

- [1] 谢玉洪. 中国海洋石油总公司油气勘探新进展及展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 26-35.
XIE Yuhong. New progress and prospects of oil and gas exploration of China National Offshore Oil Corporation [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 26-35.
- [2] 谢玉洪. 南海西部海域高温高压天然气成藏机理与资源前景——以莺—琼盆地为例[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(6): 713-722.
XIE Yuhong. High-temperature and high-pressure natural gas accumulation mechanism and resource prospects in the western South China Sea: A case study of the Ying-Qiong Basin [J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2016, 38(6): 713-722.
- [3] 谢玉洪. 南海莺歌海盆地东方13-1高温高压气田特征与成藏机理[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(8): 1731-1739.
XIE Yuhong. Characteristics and accumulation mechanism of Dongfang 13-1 high-temperature and high-pressure gas field in Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(8): 1731-1739.
- [4] 李中. 南海高温高压气田开发钻完井关键技术现状及展望[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(6): 730-736.
LI Zhong. Current status and prospects of key drilling and completion technologies for high-temperature and high-pressure gas field development in the South China Sea [J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2016, 38(6): 730-736.
- [5] 黄熠. 南海高温高压勘探钻井技术现状及展望[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(6): 737-745.
HUANG Yi. Current status and prospects of high temperature and high pressure exploration drilling technology in the South China Sea [J]. Petroleum Drilling Technology, 2016, 38(6): 737-745.
- [6] 郭书生, 陈现军, 廖高龙, 等. 莺歌海盆地地层超压成因与定量评价方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 143-148.
GUO Shusheng, CHEN Xianjun, LIAO Gaolong, et al. Causes and quantitative evaluation methods of formation overpressure in Yinggehai Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2022, 46(6): 143-148.
- [7] 郭书生, 朱江梅, 王世越, 等. 基于多元回归模型的钻头前方地层速度预测方法[J]. 中国海上油气, 2022, 34(3): 49-54.
GUO Shusheng, ZHU Jiangmei, WANG Shiyue, et al. Prediction method of formation velocity ahead of drill bit based on multivariate regression model [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(3): 49-54.
- [8] 郭书生, 陈现军, 廖高龙, 等. 琼东南盆地永乐8区基底花岗岩潜山分带特征[J]. 中国海上油气, 2023, 35(3): 68-76.
GUO Shusheng, CHEN Xianjun, LIAO Gaolong, et al. Characteristics of basement granite buried hill zonation in Yongle 8 area, Qiongdongnan Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(3): 68-76.
- [9] 廖高龙, 郭书生, 胡益涛, 等. 地质工程一体化理念在南海高温高压井的实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 142-154.
LIAO Gaolong, GUO Shusheng, HU Yitao, et al. Practice of geological engineering integration concept in high temperature and high pressure wells in the South China Sea [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 142-154.
- [10] 梁豪, 郭书生, 廖高龙. 莺琼盆地乐东区非欠压实成因超压随钻监测技术与应用[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 147-151.
LIANG Hao, GUO Shusheng, LIAO Gaolong. Overpressure monitoring technology and application of non-undercompaction-induced overpressure in Ledong area of Yingqiong Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 147-151.
- [11] 韩成, 罗鸣, 杨玉蒙, 等. 莺琼盆地高温高压窄安全密度窗口钻井关键技术[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(5): 568-572.
HAN Cheng, LUO Ming, YANG Yuhao, et al. Key technologies for high temperature and high pressure narrow safety density window drilling in Yingqiong Basin [J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2019, 41(5): 568-572.
- [12] 张永华, 陈萍, 赵雨晴, 等. 基于合成记录的综合层位标定技术[J]. 石油地球物理勘探, 2004(1): 92-96.
ZHANG Yonghua, CHEN Ping, ZHAO Yuqing, et al. Comprehensive horizon calibration technology based on synthetic records [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2004(1): 92-96.
- [13] 浦世照, 李世宏, 牟中海. 地震地质综合层位标定方法及

- 其应用[J]. 石油地质与工程, 2007(4): 27-29.
- PU Shizhao, LI Shihong, MOU Zhonghai. Seismic geological comprehensive horizon calibration method and its application [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007 (4): 27-29.
- [14] 王 蓉, 王定亚, 郝和伢, 等. 海洋超高温高压油气钻井关键设备技术研究[J]. 石油机械, 2024, 52(1): 76-81.
- WANG Rong, WANG Dingya, HAO Heya, et al. Technical Research on key equipment for offshore ultra-high temperature and high-pressure oil and gas well drilling [J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52 (1): 76-81.
- [15] 王界益, 高秋涛. 超高温高压井测井技术及应用[J]. 测井技术, 2008, 32(6): 556-561.
- WANG Jieyi, GAO Qiutao. Ultra-high temperature and high pressure well logging technology and its application [J]. Well Logging Technology, 2008, 32 (6): 556-561.
- [16] 郭书生, 廖高龙, 梁 豪, 等. 琼东南盆地 BD21 井深水区天然气勘探重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(5): 49-59.
- GUO Shusheng, LIAO Gaolong, LIANG Hao, et al. Major breakthrough and significance of natural gas exploration in the deepwater area of BD21 well in the Qiongdongnan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26 (5): 49-59.
- [17] 杨红君, 蔡 军. 基于 VSP 的孔隙压力预测方法在莺歌海盆地的应用[J]. 中国海上油气, 2014, 26(4): 20-24.
- YANG Hongjun, CAI Jun. Application of pore pressure prediction method based on VSP in Yinggehai Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26 (4): 20-24.
- [18] 高永德, 王世越, 常波涛, 等. 基于随钻前视探测技术的异常高压气层综合识别方法[J]. 天然气工业, 2022, 42(10): 98-106.
- GAO Yongde, WANG Shiyue, CHANG Botao, et al. Comprehensive identification method of abnormally high-pressure gas layers based on forward-looking detection while drilling technology [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42 (10): 98-106.
- [19] 侯 亮, 杨 虹, 赵颇如, 等. 随钻远探—前视技术发展现状[J]. 世界石油工业, 2020, 27(2): 35-41.
- HOU Liang, YANG Hong, ZHAO Poru, et al. Current status of development of remote exploration while drilling-forward-looking technology [J]. World Petroleum Industry, 2020, 27 (2): 35-41.
- [20] 唐 宇, 王小宁. 斯伦贝谢公司的 IriSphere 随钻前视技术[J]. 测井技术, 2019, 43(3): 282.
- TANG Yu, WANG Xiaoning. Schlumberger's IriSphere forward-looking technology while drilling [J]. Well Logging Technology, 2019, 43 (3): 282.
- [21] UPCHURCH E R, VIANDANTE M G, SALEEM S, et al. Geo-stopping with deep-directional resistivity logging-while-drilling: A new method for wellbore placement with below-the-bit resistivity mapping [J]. SPE Drilling & Completion, 31 (4): 295-306.
- [22] KHALIL H, SEYDOUX J, DENICHO J, et al. Successful implementation of real-time look-ahead resistivity measurements in the North Sea [C]//SPE Norway One Day Seminar, 18 April 2018, Bergen, Norway. New York: SPE-191340-MS, 2018.

我国首次在超深水碳酸盐岩勘探领域取得重大突破

2024 年 9 月 10 日, 中国海油宣布, 我国珠江口盆地荔湾 4-1 构造超深水海域钻获一口天然气井, 测试日产天然气无阻流量 43 万立方米, 这是我国首次在超深水碳酸盐岩勘探领域取得重大突破, 对进一步加快深水油气勘探开发、保障国家能源安全具有重要意义。

中国海油方面介绍, 该井位于珠江口盆地面积最大的富烃凹陷——白云凹陷, 距深圳东南约 300 公里、水深近 1 640 米。该井垂深近 3 000 米, 完钻井深近 4 400 米, 在水平段钻遇气层约 650 米, 有力推动了白云凹陷天然气勘探进程, 展现了我国超深水天然气领域勘探广阔的前景。

中国海油总地质师徐长贵介绍: “以前中国超深水领域勘探以碎屑岩为主, 该井的成功钻探首次揭示了中国超深水碳酸盐岩这一勘探新领域的巨大潜力, 标志着在该领域的勘探认识与作业技术方面均取得重要突破。”国际上一般将水深超过 300 米海域的油气资源定义为深水油气, 1 500 米水深以上称为超深水。深水是全球油气资源重要的接替区。全球超过 70% 的油气资源蕴藏在海洋之中, 其中 40% 来自深水。

据悉, 中国海油在南海北部莺歌海、琼东南、珠江口三个盆地, 已先后勘探发现番禺 30-1、东方 13-2、荔湾 3-1、“深海一号”、宝岛 21-1、陵水 36-1 等一批天然气田, 累计探明天然气地质储量突破 1 万亿立方米, 成功建成“南海万亿大气区”。

(杨 寒 摘编自新华网 <http://www. news. cn /politics /20240910 /4a40a04f43dc469eb250169e9d6048c8 /c. html>)