

引用格式:朱化蜀,王希勇,徐晓玲,等.威荣深层页岩长水平段工程钻探能力延伸极限研究[J].油气藏评价与开发,2022,12(3):506-514.
ZHU Huashu, WANG Xiyong, XU Xiaoling, et al. Extendability limit of engineering drilling in long horizontal section of Weirong deep shale gas[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 506-514.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.03.013

威荣深层页岩长水平段工程钻探能力延伸极限研究

朱化蜀¹,王希勇¹,徐晓玲²,郭治良¹,黄河淳¹

(1. 中国石化西南油气分公司石油工程技术研究院,四川 德阳 618000;

2. 中国石油青海油田勘探开发研究院,甘肃 敦煌 736202)

摘要:威荣深层页岩气垂深达3 800 m,地层坍塌压力系数高达1.95以上,区域超长水平井逐年增加,超长水平井成为后期气田稳产的重要开发手段。以旋转导向钻井方式研究为前提,通过水力裸眼评价模型和钻柱应力计算方法对地质参数、轨迹剖面、钻柱力学、水力参数和地面装备进行影响因素综合分析,不同钻机条件下和不同工况下超长水平段的延伸极限不同。剖面类型优选利于井间防碰和管柱安全下入,三维轨迹剖面钻柱力学所受应力强度是二维轨迹剖面的2倍,钻井液密度和黏度都将影响超长水平段的延伸。评价结果表明,在不考虑钻机能力的条件下,理论裸眼水平段极限为5 840 m,而70钻机因钻深能力限制最大水平段延伸为3 500 m,机泵排量越大,钻井液密度越低,延伸能力越长。

关键词:威荣;深层页岩气;长水平段;延伸极限;旋转导向钻井

中图分类号:TE242

文献标识码:A

Extendability limit of engineering drilling in long horizontal section of Weirong deep shale gas

ZHU Huashu¹, WANG Xiyong¹, XU Xiaoling², GUO Zhiliang¹, HUANG Hechun¹

(1. *Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec Southwest Oil and Gas Company, Deyang, Sichuan 618000, China;*

2. PetroChina Qinghai Oilfield research institute of exploration&development, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: The vertical depth of Weirong deep shale gas reaches 3 800 m, and the formation collapse pressure coefficient is above 1.95. The ultra-long horizontal wells in the region are increasing year by year, and the ultra-long horizontal wells have become an important development means for stable production in the later stage of the gas field. Based on the research of rotary steerable drilling method, the hydraulic open-hole evaluation model and Landmark software are used to comprehensively analyze the influencing factors of geological parameters, trajectory profile, drill string mechanics, hydraulic parameters and surface equipment. The extension limits of the ultra-long horizontal section were different under different rig conditions and working conditions. The optimized profile type is beneficial to prevent collision between wells and safe running of pipe string. The stress intensity of the drill string in 3D trajectory profile is twice that of 2D trajectory profile, and both the density and viscosity of drilling fluid will affect the extension of ultra-long horizontal section. The evaluation results show that the theoretical limit of open hole horizontal section is 5 840 m without considering the drilling capacity, while the maximum horizontal section extension of 70 drilling rig is 3 500 m due to the drilling depth limit. The larger the pump displacement, the lower the drilling fluid density, and the longer the elongation capacity.

Keywords: Weirong; deep shale gas; ultra-long horizontal section; extension limit; rotary steering drilling

收稿日期:2020-10-15。

第一作者简介:朱化蜀(1977—),男,硕士,高级工程师,从事钻井工程设计和科研工作。地址:四川省德阳市龙泉山北路298号,邮政编码:618000。E-mail: xiaozhuly@163.com

基金项目:中国石化“十条龙”课题“深层页岩气高效钻完井技术”(P1805-2)。

随着中国页岩气勘探开发步伐加快,垂深3 500 m以浅的页岩气水平井钻井配套技术趋于成熟,超长水平段垂深普遍小于3 000 m,水平段长平均在3 000 m,国内最长水平段纪录为陇东华H50-7井,水平段长为4 088 m^[1-2]。近年来,页岩气的勘探开发趋向于超长水平段的发展,仅中国石油川渝地区超长水平段井数较2017年增长4倍,超长水平段水平井测试产量较常规水平井提高32%~58.6%^[3-4]。随着钻井技术的不断进步,大位移水平井得到了越来越多的应用,其最大测深也不断创造出新的世界纪录。美国日食资源公司和Utica页岩气公司超长水平段长分别为5 652.21 m和4 572 m,总井深分别为8 244.23 m和9 144 m,其储层垂深超过4 000 m,与国内威荣、永川、丁山和林滩场龙马溪组目的层垂深相近^[5]。威荣深层页岩气龙马溪储层平均垂深在3 800 m,水平段普遍段长为1 500 m,钻井液密度最高达到2.25 g/cm³。高密度下深层页岩气超长水平井面临管柱下入摩阻大、泵压高、易井漏和井壁失稳,大位移水平井延伸能力有多强,已经成为人们普遍关心的核心问题。超长水平井的裸眼延伸极限主要与环空压耗和地层破裂压力等因素有关,不同的钻井液流变模式又会对环空压耗的描述产生较大的影响,高德利^[6]建立了水平钻井裸眼延伸极限的预测模型及综合评估方法;李鑫等^[7-9]建立了考虑排量影响的水平钻井水力延伸极限的预测模型,在裸眼井段受到地层承压能力和地面机泵条件限制下,最大井眼测深主要与井壁稳定以及钻井泵的性能有关;王建龙等^[10-13]利用井眼轨迹控制、设备优选,模拟大钩载荷、扭矩、井眼清洁程

度,以钻具安全为前提分析管柱安全下入,控制钻井参数实现长宁页岩气超长水平段长达到2 556 m。首次以钻机钻深能力为基础,利用大位移水平井的裸眼延伸极限原理,考虑地层承压能力、地面机泵能力、钻井液性能参数和轨迹剖面影响,定量分析深层页岩气水平井的延伸极限。在此基础上评价了影响延伸极限的关键地质工程因素,包括轨道剖面与摩阻关系、井眼曲率、钻井液黏滞阻力、管柱下入等,以降低超长水平段长的影响程度为目标,对不同井眼、不同钻具尺寸、不同轨道剖面等提出了量化建议。

1 工区水平段井壁稳定性分析

根据威荣页岩气田实钻资料,结合测井解释压力剖面,从表1可以看出,地层压力随深度增加而增大,陆相地层为1.00~1.30 MPa/hm,海相地层为1.30~1.90 MPa/hm。

根据W23井岩心实验结果,结合该井测井数据建立井壁稳定性分析模型,设置威荣岩石力学参数、地应力、地层压力剖面以及测井参数,计算威荣井区地层坍塌压力总体小于地层孔隙压力,以地层孔隙压力梯度为钻井液密度下限能满足井壁稳定要求^[14-15]。破裂压力总体较大,呈现出随深度增加逐渐减小的趋势,近平衡钻井安全钻井液密度窗口较宽。当地层岩石完整、无裂缝时,储层段坍塌压力为1.6~1.7 MPa/hm,井斜方位影响不大;完整岩石井壁起裂压力为2.7~3.2 MPa/hm,井斜方位影响较大,井筒或射孔眼偏向最大水平应力方向时,破裂压力较低(图1)。

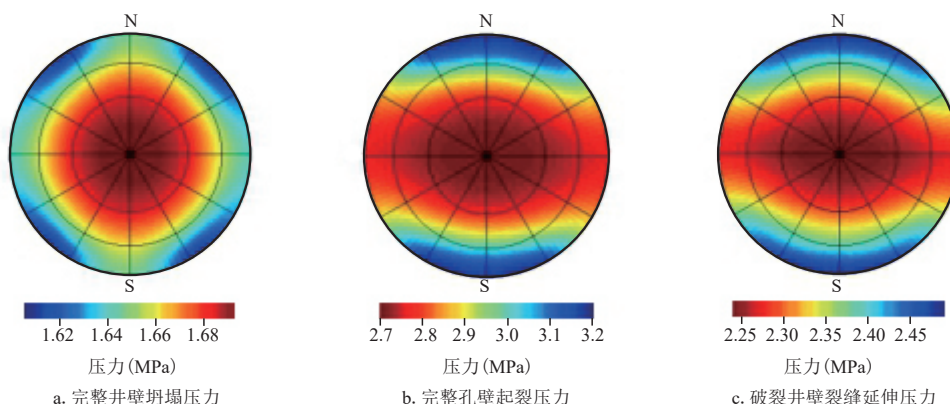


图1 龙马溪组储层坍塌压力及破裂压力饼图

Fig. 1 Pie chart of reservoir collapse pressure and fracture pressure of Longmaxi Formation

威荣工区储层地应力及力学参数计算坍塌压力受裂缝影响较大(图2)。考虑储层改造获产要求,当沿最小水平地应力方向钻水平井,钻遇水平缝、低角度缝时,坍塌压力达2.0 MPa/hm左右;或井筒与裂缝斜交叉时,即不论裂缝倾角大小,坍塌压力都大于1.95 MPa/hm。钻井过程中,在高密度条件下泵压始终保持较高的状态,降低密度会导致井壁掉块,同时危及井下安全,从而影响超长水平段的延伸。

2 井眼轨道设计影响分析

2.1 剖面类型影响分析

威荣页岩气井工厂平台一般采用5段制二维剖面、8~9段制双二维剖面和8段制三维剖面,使用不同剖面轨迹,摩阻大小相差很大(表2)。设计剖面类型、造斜点、稳斜角的大小和造斜率的选择引起摩阻的变化规律不同^[6]。深层页岩气水平井从式井组通常在二开造斜,剖面类型不同,定向段长度不同,特别是三维剖面大井斜强增方位,定向段越长,摩阻越大,越不利于超长水平段的延伸。从表2可以看出,三维轨迹剖面类型井下钻柱摩阻最大,次之为双二维剖面和二维剖面。摩阻较小的二维和双二维轨迹剖面更有利于超长水平段的延伸。

2.2 井眼曲率影响分析

从深层页岩气井不同井眼曲率所需最短靶前距(表3)可以看出,威荣区域三维水平井靶前距大多在280~300 m,若控制井眼曲率为16~17(°)/hm,

表1 地层压力及破裂压力特征

Table 1 Characteristics of formation pressure and fracture pressure

地层	地压梯度(MPa/hm)	破压梯度(MPa/hm)
遂宁组—新田沟组	1.00~1.10	1.8左右
自流井组—须家河组	1.10~1.30	大于1.8
雷口坡组—飞仙关组	1.30~1.50	大于2.0
长兴组—龙潭组	1.40~1.50	大于2.0
茅口组—石牛栏组	1.40~1.60	大于2.3
龙马溪组—五峰组	1.60~1.90	2.2~3.2

表2 不同剖面类型摩阻大小

Table 2 Friction of different profile types

剖面类型	斜井段长(m)	井下摩阻(kN)
二维剖面	400~450	200~250
双二维剖面	630~750	260~280
三维剖面	1 600~1 850	300~330

表3 不同井眼曲率下最短靶前距

Table 3 Relation curve between dogleg degree and shortest target distance

井眼曲率 [(°)/hm]	最短靶前距 (m)	井眼曲率 [(°)/hm]	最短靶前距 (m)
16	358	21	272
17	337	22	260
18	318	23	249
19	302	24	239
20	286		

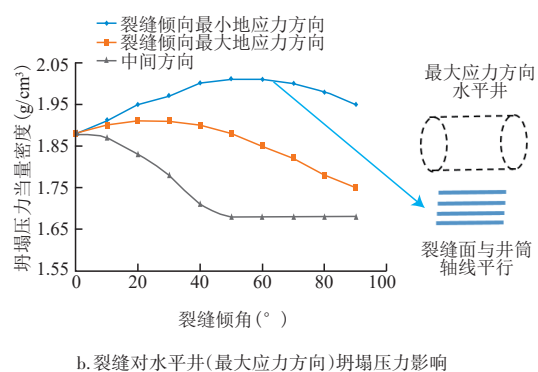
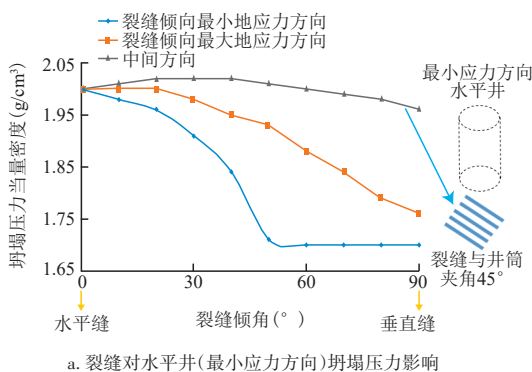


图2 龙马溪组裂缝产状对水平井坍塌压力影响分析

Fig. 2 Influence of fracture occurrence on collapse pressure of horizontal well in Longmaxi Formation

二开提前造斜负位移必须达到360 m,总井深将增加100~200 m,定向井段大幅增加。同时,造成摩阻和扭矩同比增加30%~50%,严重影响超长水平段的延伸,且轨迹定向井段控制必须严格按设计轨道执行,限制提速提效,同时增加三开防碰风险(图3a)。

若地质提前10~15 m,井斜没有增至有效角度,为了保证地质中靶,填井侧钻的风险较大,成为实钻中最大的隐患。考虑井间防碰风险,威荣深层页岩气超长水平井井眼曲率宜在18~24(°)/hm内选择,采用先大后小的方式,旋转导向可以适当提高造斜率,有利于水平段的延伸(图3b)。

3 钻柱力学特性和强度分析

为了得出底部钻具组合的受力情况,需要对超

长水平井工况进行分析。井眼尺寸是215.9 mm,参考钻具组合为215.9 mm PDC钻头+旋转导向工具+127 mm无磁承压钻杆×1根+钻具止回阀+127 mm钻杆+旁通阀+127 mm加重钻杆×45根+159 mm震击器+127 mm加重钻杆×9根+139.7 mm钻杆×(0~2 300 m)井深。

3.1 有效拉力分析

模拟不同剖面下钻具受到的拉力作用,同时考虑不同工况,大井斜强扭方位三维超长水平井钻具受有效拉力影响较大。如图4所示,2 000 m以下井段有效拉力平均高于1 000 kN,随着井深的增加,最高达近4 000 kN。起钻时受到的有效拉力接近极限范围,而二维超长水平井有效拉力相对较小,2 000 m以下井段平均低于1 000 kN,局部为2 000 kN以上,

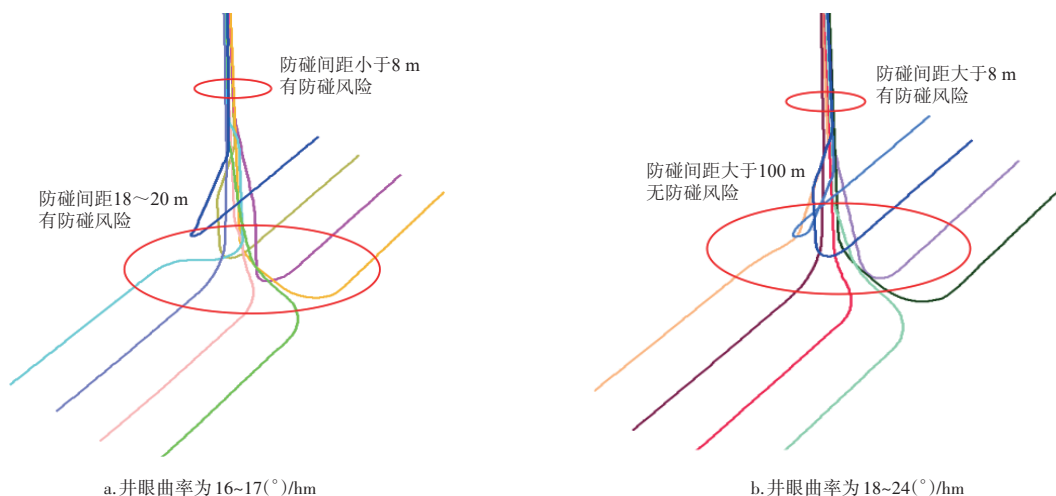


图3 不同井眼曲率下井眼轨迹

Fig. 3 Borehole trajectory under different overall angle change rate

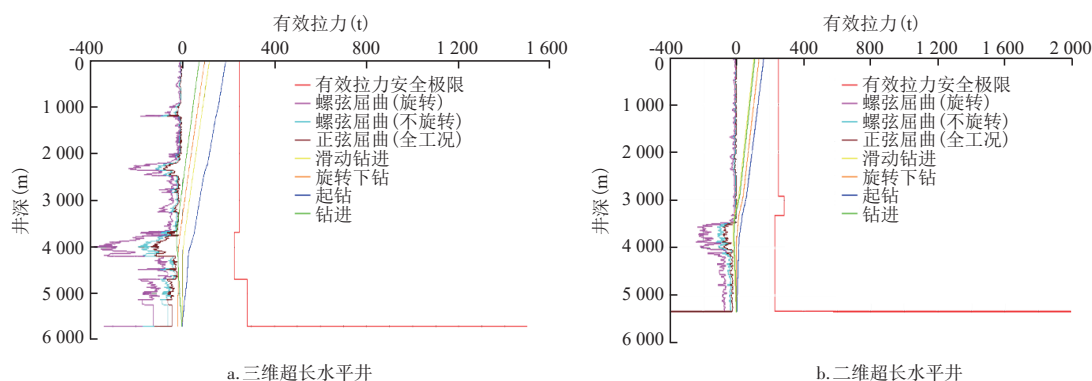


图4 三维超长水平井和二维超长水平井钻具有效拉力对比

Fig. 4 Comparison of drilling tool effective tension between 3D and 2D ultra-long horizontal wells

3 000 m 以下井深最高不超过 2 600 kN,同时各种工况下所受有效拉力距极限拉力较远,安全边界较高,二维轨迹更有利于水平段的延伸。从水平段的长度来看,常规水平井和超长水平井有效拉力差异的变化很小,后期水平段延伸的有效拉力还有减少的趋势。

3.2 应力强度作用分析

模拟不同剖面下钻具受到的纵向应力作用(图5),同时考虑不同应力作用的影响^[17-20],三维超长水平井钻具环向应力和冯麦斯应力及轴向应力远超安全极限,弯曲应力变化较大,最高达 250 MPa。而二维超长水平井各项应力远离安全边界,且弯曲应力最高仅为 50 MPa 左右,钻柱安全系数相对较高。从水平段长来看,常规水平井和超长水平井应力差异变化较小,后期水平段延伸应力作用不明显,还有减少的趋势。影响较大的还是剖面类型,而水平段的长短对应力作用不明显。

4 裸眼水力延伸极限分析

4.1 裸眼水力延伸计算

大位移井裸眼段延伸能力水力延伸极限是指其在裸眼井段受到地层承压能力和地面机泵条件限制下最大井眼测深,主要与井壁稳定程度以及钻井泵的性能有关。水平段越长机泵负荷越大,水力参数将直接决定极限钻深的长度。按深层页岩气地面机泵 35 MPa F1600 泥浆泵计算最大延伸能力,水平段环空压耗不超过 30 MPa 极限来进行计算分析。

$$\Delta p_h = 0.00981(\rho_f - \rho_{mix})H - (\Delta p_v + \sum \Delta p_d) \quad (1)$$

式中: Δp_h 为环空压耗,MPa; ρ_f 为破裂压力当量密度, g/cm^3 ; ρ_{mix} 为子钻井液当量密度, g/cm^3 ; H 为井深,m; Δp_v 为垂直段环空压耗,MPa; $\sum \Delta p_d$ 为若干斜井段环空压耗,MPa。

区域钻井液密度按 1.9~2.25 g/cm^3 计算,由图 6

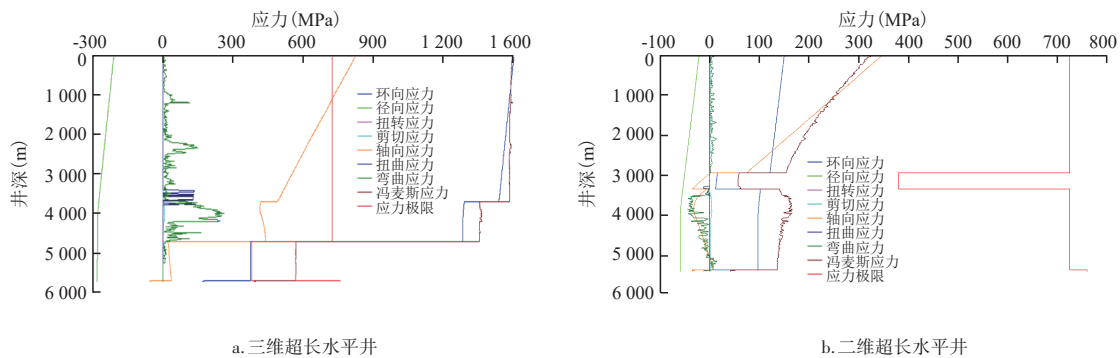
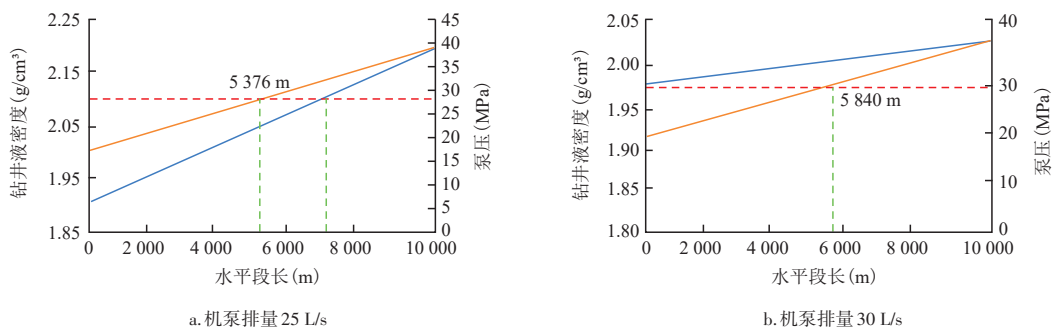


图5 三维超长水平井和二维超长水平井钻具应力强度对比

Fig. 5 Comparison of drilling stress intensity between 3D and 2D ultra-long horizontal wells



注:红色虚线表示最大泵压极限,绿色虚线表示极限深度,蓝色与橙色实线表示不同密度对应的泵压。

图6 不同机泵排量下的泵压

Fig. 6 Pump pressure at different pump displacement

可知,在不考虑钻机的钻深能力下,排量为25 L/s时,水平段最大延伸极限长度为5 376 m;排量为30 L/s时,水平段最大延伸极限长度为5 840 m,排量提升有助于钻深能力的延长。钻井液密度是影响钻深能力的重要参数,钻井液密度越高,随着井深的增加泵压也就越高,高于1.95 g/cm³将限制水平段的延伸,延长水平段长到极限深度需要配备52 MPa高压泥浆泵。钻井液当量循环密度计算结果表明,随着水平段长度的增加,井底流动压力增加,从A靶点开始井底每300 m当量密度增加0.012 g/cm³。按5 840 m水平段计算井底当量密度增加至0.2 g/cm³,若裸眼段钻遇裂缝,井漏风险相应增加;根据钻井液当量循环密度计算排量不能低于27.5 L/s,否则将会产生岩屑床。由以上分析可以看出,水力参数、机泵功率直接影响极限钻深,密度的增加进一步限制水平段的延伸。

4.2 摩阻计算

由于摩擦系数取值受区块、地层、泥浆体系等因素的影响,不同工况下摩阻计算差别较大。如图7所示,在基础参数一样的情况下,起下钻、钻进、滑动等工况摩阻相差200~300 kN。不同摩擦系数对单一工况下摩阻也不一样。如图8所示,摩阻相差50~100 kN。所以在对摩擦系数取值和工况的选择上,摩阻计算对后期钻柱安全和管柱下入尤为关键,特别是长水平段管柱安全下入摩阻是最重要的考虑因素。

通过对威荣区域钻井过程中不同工况摩阻统计,结合WellPlan软件计算拟合井下摩阻,不断调整摩擦系数使其与实钻值更为接近,威荣深层页岩气裸眼段摩擦系数拟合如表4。

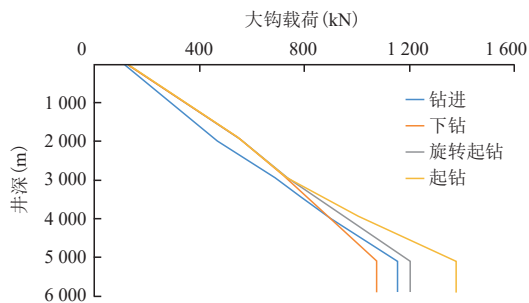


图7 不同工况下大钩载荷

Fig. 7 Hook load under different working conditions

不同区域摩擦系数不同,井眼条件不同,摩阻增量不同,长水平段的延伸必须考虑套管的安全下入。按最大水平段长5 840 m计算套管下入摩阻,大钩载荷如图9,常规水平段下套管摩阻在300 kN左右,到极限钻深摩阻将达到600 kN左右,现场须做好双扶通井,确保套管安全下入。

4.3 钻井液黏滞阻力计算

超长水平井达到极限钻深须要考虑套管安全下入问题,而钻井液的黏滞力引起的摩阻力不容忽视。威荣页岩气水平段钻探钻井液密度高达2.05~2.15 g/cm³,塑性黏度在65~95 mPa·s,现场数

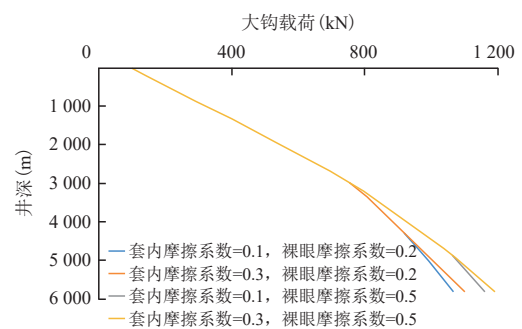


图8 不同摩擦系数下大钩载荷

Fig. 8 Hook load under different friction coefficient

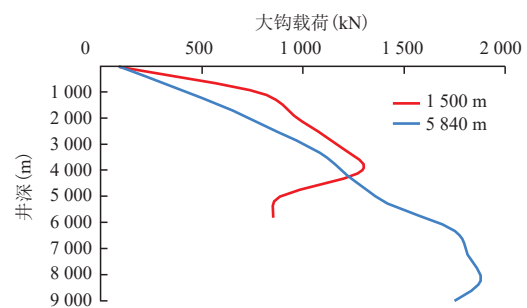


图9 不同水平段长钻深大钩载荷

Fig. 9 Hook load at different horizontal section

表4 威荣地区推荐摩擦系数
Table 4 Recommended friction coefficient of Weirong area

类型	常规取值		威荣地区	
	油基	水基	油基	水基
套管	0.23	0.29	0.24	0.32
裸眼	0.32	0.37	0.35	0.41

据(表5)表明黏度越高,井下摩阻越大。在计算时,考虑套管下入时速度慢,利用LandMark软件,按井内钻井液流动模式选用宾汉流体模型计算黏滞阻力。

从图10可以看到,不考虑钻井液黏滞效应时的摩阻最高为156 kN;在添加黏滞力后,管柱下入摩阻达到202 kN,钻井液黏滞阻力达46 kN,摩阻增加30%。因此,对于深层页岩气井钻井液黏滞力对管柱的下入有一定影响,长水平段后期管柱下入摩阻本身较大,钻井液性能要求上要对黏度控制在合理范围,以此降低管柱下入摩阻。

5 地面装备能力分析

70钻机名义钻深是采用114 mm钻杆,最大钻深为7 000 m,其立根盒额定载荷最大负荷为2 600 kN,指梁长度为2 200 mm,绞车功率1 400 kW,绞车制动功率2 400 kW^[15]。按页岩气井身结构特点,最后一开采用215.9 mm钻头,按立根盒承载最大负荷2 600 kN

表5 威荣地区钻井液性能与摩阻
Table 5 Drilling fluid performance and friction resistance of Weirong area

井号	塑性黏度 (mPa·s)	摩阻 (kN)	井号	塑性黏度 (mPa·s)	摩阻 (kN)
WY26-6	68~70	100	WY31-2	71~80	150
WY26-1	60~70	80	WY31-7	75~85	180
WY23-8	60~77	180	WY34-1	80~95	230
WY35-2	65~77	150	WY29-8	75~95	250

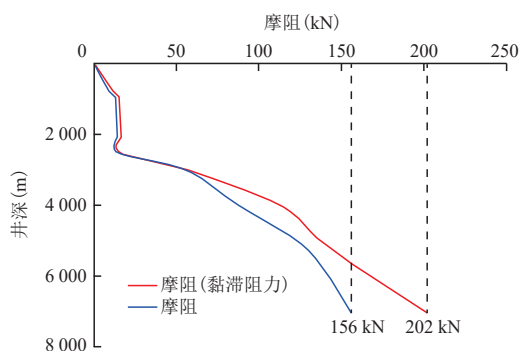


图10 钻井液黏滞力对管柱摩阻计算
Fig. 10 Calculation of friction between mud viscosity and string

计算139.7 mm+127 mm复合钻杆下最大钻深为7 300 m,如图11所示,但拉力余量仅80 t,抗拉安全系数1.38。

立根盒不仅要考虑承载负荷,还须计算不同钻具下的容量是否可以完全摆放在钻台面上。若为了满足钻深要求,而钻台面无法摆放钻具就会增加施工量和安全隐患。立根盒容量与二层台指梁长度相关,70钻机指梁标配为2 200 mm,其容量多少与钻具尺寸的大小和接头大小相关。在最大载荷下复合钻具多出4柱,钻台无法摆放,而165.1 mm井眼钻至井深7 500 m时,钻具全部摆下(表6)。

根据中国石油化工集团公司企业标准《钻井队钻井设备配套标准 第5部分:7000 m钻机:Q/SH 0168.5—2008》计算70钻机钻至7 500 m时的参数性能^[21],对电控系统能耗制动单元功率、绞车功率和机泵功率进行计算。

绞车功率:

$$N_j = 300 \times L_{\max} \quad (2)$$

表6 最大载荷2 600 kN下70钻机立根盒最大容量
Table 6 Maximum capacity of 70 drill pipe setback under maximum load of 2 600 kN

井眼直径 (mm)	钻具直径 (mm)	柱数 (柱)	共计 (柱)	剩余空间 (柱)
215.9	139.7	43	254	-4(4柱不能摆放)
	127.0	211		
165.1	139.7	36	270	0
	127.0	95		
	101.6	139		

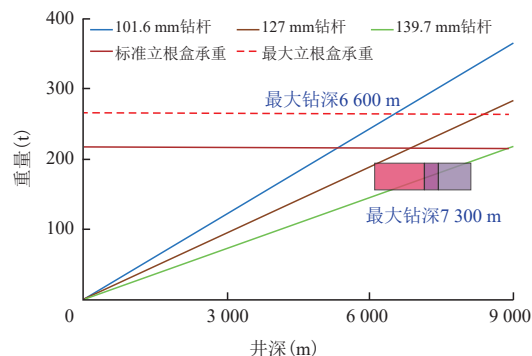


图11 70钻机不同钻具条件下最大承载与钻深关系
Fig. 11 Relation between maximum load and drilling depth of 70 drilling rig

表7 不同井眼和不同工况条件下极限钻深
Table 7 Limit drilling depth under different wellbore and different working conditions

井眼直径 (mm)	直井段段长 (m)	斜井段段长 (m)	70钻机最大钻深 (m)	裸眼水力延伸极限 (m)	受钻机限制水平段长 (m)	不考虑钻机限制总井深 (m)
215.9	3 400	400	7 300	5 840	3 500	9 640
165.1	3 400	400	7 500	5 840	3 700	9 840

泵组水功率和泵组功率:

$$N_{w\max} = 308 \times L_{\max} \quad (3)$$

$$N_p = (308/Y_p) \times L_{\max} \quad (4)$$

式(2)—(4)中: N_j 为绞车功率, hp, 1 hp=0.746 W; L_{\max} 为最大钻深, m; $N_{w\max}$ 为泵组水功率, hp; N_p 为泵组功率, hp; Y_p 为泵效率, 取值0.9。

考虑钻机限制, 70钻机钻深能力下威荣地区深层页岩气水平段长可延伸至3 500 m(表7)。从表8可以看出, 70钻机电控系统能耗制动单元功率、绞车功率和机泵功率偏小, 均需要升级改造。若不考虑钻机能力, 按裸眼水力参数计算最大水平段长可延伸至5 840 m, 但全井需采用90及以上级别钻机。水平段的延伸并不是固定数值, 必须考虑钻机的施工能力来获得最大钻深。

6 结论

1) 利用水力延伸极限环空压耗计算模型, 计算出威荣深层页岩气超长水平井裸眼极限为5 840 m, 延伸极限受钻井液密度和排量的直接影响, 钻井液密度越高极限延伸长度越短。

2) 由钻柱力学特性分析可以看出, 大位移三维轨迹剖面综合工况所受有效拉力较大, 超出二维轨迹剖面2倍, 应力作用远超出安全极限, 三维轨迹不利于超长水平段的延伸。

3) 从地质特征参数分析, 威荣深层页岩气坍塌压力受裂缝影响较大, 沿最小主应力方向坍塌压力大于1.95 MPa/hm, 造成超长水平段后期泵压较高, 宜采用高压钻井泵实现极限钻深; 钻井液排量应高于27.5 L/s, 同时塑性黏度控制在60~75 mPa·s有利于降低泵压和井下摩阻。

4) 通过分析区域地质参数、井身结构、剖面类

表8 70钻机主要参数对比分析
Table 8 Comparison and analysis of main parameters of 70 drilling rig

钻机类型	最大起重量 (kN)	绞车功率 (hp)	泵组功率 (hp)
70钻机	4 500	2 000	1 600
7 500 m所需升级钻机	3 664	2 137	2 567

注: 1 hp=0.746 W

型和水利参数, 综合地面装备能力和钻具安全强度, 不同钻机类型下超长水平井延伸极限不同, 70钻机条件下水平段极限长度达到3 500 m, 但电控系统制动单元、绞车和机泵均需要升级改造; 而90及以上钻机, 水平段极限可以达到5 840 m。

5) 超长水平段长延伸极限并非固定不变, 要根据区域地质特征、轨迹剖面、水利参数、钻柱受力和管柱安全下入综合计算来确定。

参考文献

- 柳伟荣, 倪华峰, 王学枫, 等. 长庆油田陇东地区页岩油超长水平段水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 9-14.
LIU Weirong, NI Huafeng, WANG Xuefeng, et al. Shale oil horizontal drilling technology with super-long horizontal laterals in the Longdong Region of the Changqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 9-14.
- 孙永兴, 贾利春. 国内3 000 m长水平段水平井钻井实例与认识[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 393-401.
SUN Yongxing, JIA Lichun. Cases and understandings on the drilling of horizontal well with horizontal section of 3 000 m long in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(4): 393-401.
- 樊好福, 臧艳彬, 张金成, 等. 深层页岩气钻井技术难点与对策[J]. 钻采工艺, 2019, 42(3): 20-23.
FAN Haofu, ZANG Yanbin, ZHANG Jincheng, et al. Difficulties and counter measures of deep shale gas drilling

- technology[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(3): 20-23.
- [4] 于洋飞,杨光,陈涛,等.新疆玛湖区块2 000 m长水平段水平井钻井技术[J]. *断块油气田*, 2017, 24(5): 727-730.
YU Yangfei, YANG Guang, CHEN Tao, et al. Drilling technology of 2 km-long horizontal section in Mahu Block, Xinjiang Oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2017, 24(5): 727-730.
- [5] 杨金华,郭晓霞.一趟钻新技术应用与进展[J]. *石油科技论坛*, 2017, 36(2): 38-40.
YANG Jinhua, GUO Xiaoxia. Application of new technology: Single bit-run drilling[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2017, 36(2): 38-40.
- [6] GAO D L. Modeling & simulation in drilling and completion for oil & gas[J]. Tech Science Press, Duluth, USA, 2012: 231-252.
- [7] GAO D L, TAN C, TANG H. Limit analysis of extended reach drilling in South China Sea[J]. *Petroleum Science*, 2009, 6(2): 166-171.
- [8] LI X, GAO D L. Study on open-hole extended-reach limit model analysis for horizontal drilling in shales[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, 2016, 34: 520-533.
- [9] LI X, GAO D L. A comprehensive prediction model of hydraulic extended-reach limit considering the allowable range of drilling fluid flow rate in horizontal drilling[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3083.
- [10] 于洋飞,杨光,陈涛,等.新疆玛湖区块2 000 m长水平段水平井钻井技术[J]. *断块油气田*, 2017, 24(5): 727-730.
YU Yangfei, YANG Guang, CHEN Tao, et al. Drilling technology of 2 km-long horizontal section in Mahu Block, Xinjiang Oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2017, 24(5): 727-730.
- [11] 王建龙,冯冠雄,刘学松.长宁页岩气超长水平段水平井钻井完井关键技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 1-8.
WANG Jianlong, FENG Guanxiong, LIU Xuesong. Key technology for drilling and completion of horizontal wells in Changning shale gas ultra-long horizontal section[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 1-8.
- [12] 汪志明,郭晓乐,张松杰,等.南海流花超大位移井井眼净化技术[J]. *石油钻采工艺*, 2006, 28(1): 4-8.
WANG Zhiming, GUO Xiaole, ZHANG Songjie, et al. Borehole cleaning technology for mega-extended-reach wells at Lihua Field in South China Sea[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2006, 28(1): 4-8.
- [13] 罗显尧.孤岛地区水平井摩阻分析与减摩技术研究[D].北京:中国石油大学(北京),2010.
LUO Xianyao. Friction analysis and friction reduction technology of horizontal wells in Gudao area[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2010.
- [14] 兰俊.海陆过渡相煤系页岩气成藏条件及储层特征[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(5): 27-32.
LAN Jun. Reservoir forming conditions and reservoir characteristics of coal measure shale gas in marine continental transitional facies[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2021, 35(5): 27-32.
- [15] 刘娜娜.南川地区龙马溪组优质页岩段微观孔隙结构特征[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(4): 21-25.
LIU Na'na. Micro pore structure characteristics of high quality shale section of Longmaxi formation in Nanchuan area[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2021, 35(4): 21-25.
- [16] 杨洁,董波,郑义,等.川西气田二开长裸眼固井质量保障工艺[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(6): 81-85.
YANG Jie, DONG Bo, ZHENG Yi, et al. Cementing quality assurance technology of long open hole in the second spud of western Sichuan gas field[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2021, 35(6): 81-85.
- [17] 张晓明,耿应春,赵洪山,等.“单弯双稳”导向钻具组合受力分析及在胜利油田的应用[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(4): 110-113.
ZHANG Xiaoming, GENG Yingchun, ZHAO Hongshan, et al. Force analysis of “single bend and double stabilizers” steering BHA and its application in Shengli oilfield[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2021, 35(4): 110-113.
- [18] 郭东明.欠压实理论在随钻地层压力预测中的应用[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(3): 80-83.
GUO Dongming. Application of under compaction theory in formation pressure prediction while drilling[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2021, 35(3): 80-83.
- [19] 石崇东.鄂尔多斯盆地宁陕区块深井钻井关键技术[J]. *石油地质与工程*, 2021, 35(3): 89-92.
SHI Chongdong. Key drilling techniques for deep exploration wells in Ningshan block of Ordos basin[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2021, 35(3): 89-92.
- [20] 胥豪,唐洪林,董广华,等.永进油田深层侧钻水平井钻井技术[J]. *石油地质与工程*, 2020, 34(6): 84-88.
XU Hao, TANG Honglin, DONG Guanghua, et al. Deep sidetracking horizontal well drilling technology in Yongjin oilfield[J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2020, 34(6): 84-88.
- [21] 中国石油化工有限公司科技开发部.钻井队钻井设备配套标准(第5部分:7000 m钻机): Q/SH 0168.5—2008[S].北京:中国石化出版社,2008,3:1-7.
Sinopec Science & Technology R&D Department. Standard for the drilling equipment matching a drilling rig of a drilling crew Part 5: The skid-mounted drilling rig of No.70: Q/SH 0168.5—2008[S]. Beijing: China Petrochemical Press, 2008, 3:1-7.

(编辑 顾丽媛)