

水力喷射微小井眼技术用于海域水合物 钻探的可行性分析

王志刚¹, 胡志兴², 李小洋¹, 伍晓龙¹, 董新柱¹,
史二铃¹, 尹浩¹, 梁健¹, 刘秀美¹

(1.中国地质科学院勘探技术研究所,河北廊坊 065000; 2.河北省煤田地质局第二地质队,河北邢台 054000)

摘要:天然气水合物具有储量丰富、清洁高效的特点,世界各国非常重视天然气水合物资源的调查和开采工作,我国在 2017 年顺利实施了海域天然气水合物直井试采工作,并取得了丰硕的成果。水力喷射微小井眼技术是一项正在兴起的新型钻探技术,已经在石油钻探中得到了一定的应用,将其应用到海域天然气水合物钻探中具有钻井成本低、可顺利完成水平段钻进、降低井眼轨迹控制难度、储层污染小,降低了大规模海底坍塌的风险的优势,但是还存在着水平段长度短、井壁稳定性差、卡钻事故处理难度大、钻井工具开发难、连续油管寿命短等关键技术问题需要解决。

关键词:海洋钻探;海域天然气水合物;水力喷射微小井眼;钻井技术

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)02-0030-06

Feasibility of application of hydraulic jet micro-borehole technology to marine hydrate drilling

WANG Zhigang¹, HU Zhixing², LI Xiaoyang¹, WU Xiaolong¹, DONG Xinzhu¹,
SHI Erling¹, YIN Hao¹, LIANG Jian¹, LIU Xiumei¹

(1.The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2.The Second Geological Team of Hebei Coal Geology Bureau, Xingtai Hebei 054000, China)

Abstract: In the post-petroleum era, natural gas hydrate has become the best energy source for exploitation. It has the characteristics of abundant reserves, cleanliness and high efficiency. Countries all over the world attach great importance to the investigation and exploitation of natural gas hydrate resources. In 2017, China successfully implemented the vertical well production test of marine natural gas hydrate, and achieved fruitful results. The hydraulic jet micro-wellbore technology is a new drilling technology that has been developed and applied in oil drilling; and its application to marine natural gas hydrate drilling has the advantages of low drilling cost, smooth drilling of the horizontal section, less difficulty in control of the well trajectory, small reservoir pollution, and reduced risk of large-scale seabed collapse. But there are still some key technical issues remained for solution, such as the length of the horizontal section, the stability of the borehole, the handling of stuck drills, the development of drilling tools, the short life of coiled tubing.

Key words: marine drilling; marine natural gas hydrate; hydraulic jet micro-borehole; drilling technology

0 引言

天然气水合物也称“可燃冰”,在全世界范围之

内都广受关注,属于非常规清洁能源,具有赋存深度浅、储量大且能量高的特点,因此成为了当前各国研

收稿日期:2019-12-20 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.02.004

基金项目:战略性国际科技创新合作重点专项“天然气水合物勘查开发技术联合研究”(编号:SQ2018YFE20424)

作者简介:王志刚,男,汉族,1987年生,工程师,油气井工程专业,硕士,从事水合物、页岩气、干热岩、石油钻井与开发等工作,河北省廊坊市金光道77号,1036821833@qq.com。

引用格式:王志刚,胡志兴,李小洋,等.水力喷射微小井眼技术用于海域水合物钻探的可行性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(2):30-35.

WANG Zhigang, HU Zhixing, LI Xiaoyang, et al. Feasibility of application of hydraulic jet micro-borehole technology to marine hydrate drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(2):30-35.

究的重点。天然气水合物是在高压、低温条件下形成的一种固态物质,其中大多数分布于海底当中,只有少部分赋存在陆域冻土当中。我国十分重视天然气水合物资源的调查工作,并在我国南海北部地区发现了相当于我国油气探明储量一半的水合物矿藏,因此具有非常高的开发价值^[1]。

继在俄罗斯的麦索亚哈气田发现天然气水合物之后,美国、加拿大、日本等国家都相继计划进行水合物试采工作,并纷纷制定了水合物开采的长期研究计划^[2-7]。我国在建国以后一直在追赶世界油气的开发技术,因此对于天然气水合资源的调查在开始阶段落后于上述国家。1997年,我国正式启动国家“863 可燃冰勘探技术开发”研究专项。经过多年的努力,在 2007 年第一次获取了天然气水合物样品^[8-9]。2008—2016 年,中国地质科学院勘探技术研究所在我国青海和西藏地区开展了为期 9 年的陆域天然气水合物科学钻探工作,并在 2016 年取得了陆域水合物水平对接井试采的成功^[10]。2017 年我国首次进行了海域水合物试采,采取流体抽取法,在水深 1266 m 的粉砂质土层中获得了首次海域水合物试采的成功,连续采气 60 d,采气量达到了 $30.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,最高日产量 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,这是世界上首次采气持续时间最长、气流最稳定的海域水合物试采工程^[11],为此党中央国务院专门发出贺电,鼓励科研人员要再接再厉,本次试采采用的是直井模式,接下来计划采用水平井进行试采。本文将对水力喷射微小井眼技术用于海域水合物钻探的可行性进行分析,为接下来实施的海域水合物水平井试采工作奠定基础。

1 水力喷射微小井眼钻井技术国内外研究发展现状

1994 年,美国洛斯阿拉莫国家实验室率先提出了微小井眼径向钻井技术,随后美国能源部资助了多个微小井眼研究项目,目的是实现微小井眼钻井技术的商业化应用,微小井眼技术是正在兴起的一项钻井新技术^[12]。通常情况下井眼直径一般小于 88.9 mm,转弯半径约为 0.3 m,当前水力喷射微小井眼径向水平井钻井技术受到了世界各国的青睐,该技术是利用高压水流破岩,在储层的不同位置,或者是不同储层钻出一个或者多个井眼,降低钻井成

本,增加油气通道,提高油气产量。

经过多年的发展,径向水力喷射微小井眼钻井技术在美国、加拿大、俄罗斯、阿根廷等国家得到了充分的应用,取得了十分良好的效果^[13-15]。我国从 1978 年开始推广应用高压喷射钻井技术,中国石油长城钻探工程有限公司通过自主研究,逐步掌握了套管开窗和水力喷射两大技术,并在 X_1 油井进行了试验,共完成 6 个 30 m 的水平井眼,增产效果十分显著,同时在 X_2 稠油井中也进行了水力喷射钻井,完成 50 m 长度的水平井眼 4 个,完成 100 m 长度的水平井眼 4 个,注入蒸汽之后,日产油增加 4.2 t ^[16]。中原油田在塔河地区进行了 35 MPa 的高压水力喷射钻井试验,共完成 2 口井,与传统钻井工艺相比,钻井周期明显缩短^[17]。彩南油田通过引进高压水力喷射钻井技术,对区块内 2 口井进行了微小井眼水力喷射钻进,增产效果明显^[18]。此外,我国的辽河油田、胜利油田、大庆油田、吉林油田以及辽宁阜新盆地都进行了微小井眼水平井钻井试验,为该项水平井钻井技术的发展积累了大量的经验。

2 水力喷射微小井眼钻井技术

2.1 微小井眼径向水平井钻井系统

微小井眼径向水平井钻井技术首先需要的就是连续油管系统,因此地面设备首先包括连续管设备,其次还包含储水罐、高压泵组和数据采集系统等。井下设备主要包括转向定位工具设备、套管开窗设备和水力喷射设备,如图 1 所示。在钻井过程中第一步是完成直井钻进,下入套管水泥固井;第二步下入转向定位工具到施工位置,以便于连续油管从轴向变为径向;第三步利用连续油管连接套管开窗设备进行套管开窗;第四步用连续油管连接水力喷射设备进行喷射钻进^[19-22]。

2.2 水力喷射系统

水力喷射系统主要包括多孔射流钻头和高压软管。多孔射流钻头需要合理布置喷嘴,其中最重要的是要实现钻井系统的自进式钻进及钻头位置的平衡,因此不仅需要具备前向喷嘴,同时还需要具备后向和上下喷嘴,前向喷嘴的作用是喷出井眼,后向喷嘴的作用是为整个钻井系统的前进提供动力,上下喷嘴的作用是平衡钻头位置^[23-29]。

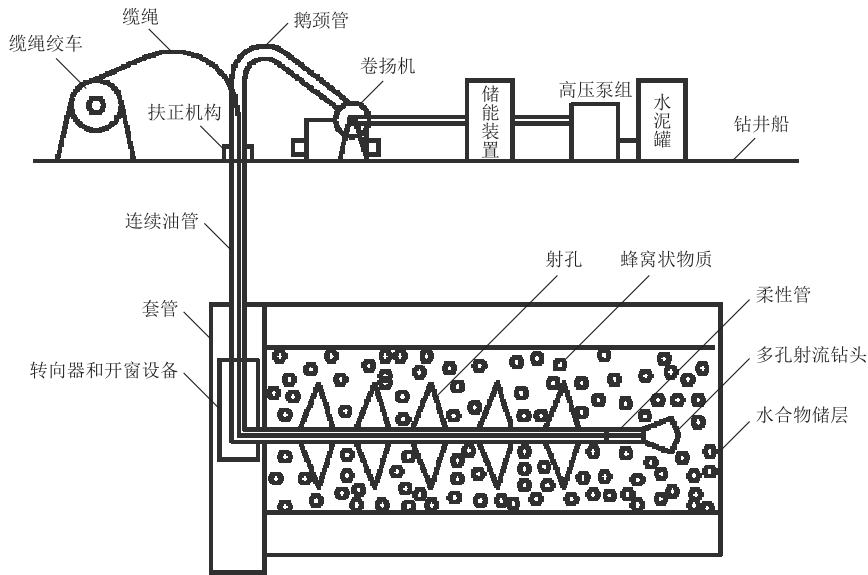


图1 水力喷射发泡水泥在海域水合物钻探中的应用示意
Fig.1 Hydraulic jet foamed cement used in hydrate drilling

3 水力喷射微小井眼技术在海域水合物钻探中的应用前景分析

3.1 钻井成本低

无论是中国还是其他国家进行海域天然气水合物试采,都离不开钻井船的支撑,钻井船在设计之初就已经确定了吨位和体积,因此可用平台空间有限,出海后日消耗费用非常高昂,可达几十万美元,因此进行海域水合物试采重视成本的节约是非常重要的。微小井眼技术采用的是连续油管钻井设备,而连续油管是盘绕在一个大的滚筒上,整体体积较少,质量轻,便于移动,因此降低了对钻井船体积和承载能力的要求,将大大节省造船和用船费用。同时采用微小井眼钻井技术,设备安装上花费的时间少,不需要耗费太多的人工和支撑设备,不需要停泵接单杆,如无事故发生可以实现连续钻进,节约了钻井时间,缩短了钻井周期,提高了钻井效率,节约了钻井成本。采用微小井眼技术,可以减少钻井液使用约20%,在钻井方案制定上也大大缩短时间。如果采用微小井眼钻井技术可以节约成本50%以上^[16]。

3.2 可顺利完成水平段钻进

通常情况,水平井钻井可分为三段,第一段是直井段,直井段通常在储层上方;第二段是造斜段,选择储层上方地层稳定,满足造斜工具要求的一点为造斜点,从该点开始进行定向钻进,直到进入到储层中的某一点为止;第三段是稳斜段也就是水平段,这

一段已经完成造斜,只需在储层中沿着水平方向钻进即可。在造斜段一般使用螺杆或者涡轮钻具,连接随钻测量系统按照设计好的井眼轨迹钻进到某一个深度,转弯半径为10~100 m。我国南海海域天然气水合物赋存在沉积层中,地层属于粉砂型储层,未固结成岩,采用传统的水平井钻井工具在未固结地层很难完成水平井造斜钻进工作,如果定向钻进不能进行则整个工作都得停止。采用水力喷射微小井眼技术钻水平井时,主要分为两个阶段,第一个阶段是完成直井钻进,直井要穿过水合物储层,然后下入套管固井,保证直井的稳定性,即使是水平段钻进无法进行,也可以保证直井段的开采;第二阶段进行套管开窗侧钻,完成水平井钻进。微小井眼的转弯半径仅为0.3 m,不需要对套管进行锻铣扩孔,不需要造斜工具进行造斜,在套管内部通过转向器就可以实现从轴向到径向直接转变。径向水平段钻进时,高压软管一头与连续油管连接,一头与多孔射流钻头连接,启动高压泵以后,多孔射流钻头反向喷嘴喷出的液体产生的作用力带动整个钻井系统向前钻进。采用该技术可以在不同深度处完成多个水平段的钻进,增大开采面积。

3.3 降低了井眼轨迹控制难度

水力喷射微小井眼技术采用的是多孔射流钻头,而多孔射流钻头的上下喷嘴都是均匀布置的。钻进过程中,如果钻头处于井眼中间位置,则径向作用力自平衡。如果多孔射流钻头靠近井底位置,则

下部喷嘴所产生的反向作用力将增大,会将多孔射流钻头推向中心位置,一直达到径向力平衡位置,可有效达到调节钻头位置的作用,保证了水平钻进,降低了井眼轨迹的控制难度。

3.4 储层污染小,降低了大规模海底坍塌的风险

连续油管没有接头,不需要停钻接单杆,这为实现欠平衡钻井创造了良好的条件,所谓欠平衡钻井就是井内液柱压力要小于井底压力,可减少钻井液对储层的损害。天然气水合物储层渗透性非常差,采用微小井眼技术可实现欠平衡钻井,避免了钻井液侵入储层,堵塞孔道,进一步降低储层的渗透率,从而减小了对储层的污染,有利于天然气水合物的开采。海域天然气水合物赋存于未固结储层中,钻井作业会破坏地层中的力学平衡,很容易引起海底地层坍塌,发生滑坡等地质灾害,这也是海域天然气水合物钻井面临的最大挑战,采用微小井眼钻井技术井眼尺寸最大为 88.9 mm,最小可以达到 25.4 mm,与传统水平井钻井相比井眼尺寸要小的多,因此对地层的力学平衡的破坏也要小的多,降低了因水平井钻进而引发的大规模海底坍塌、滑坡的风险。

4 水力喷射微小井眼技术在海域水合物钻探中应用的关键技术

虽然水力喷射微小井眼技术在海域水合物钻探中具有钻井成本低、可顺利完成水平段钻进、降低了井眼轨迹控制难度、储层污染小,降低大规模海底坍塌风险等技术优势,但也存在着一定的技术问题,比如水平段长度、井壁稳定、卡钻事故处理、钻井工具开发、连续油管寿命短等技术问题需要解决。

4.1 水平段长度

水力喷射微小井眼技术在水平钻进过程中主要依靠多孔射流钻头正向喷嘴破碎地层,反向喷嘴产生的反作用力提供前进的动力。根据现有资料记载,水力喷射微小井眼技术已经在世界许多国家进行了现场试验,取得了非常好的效果,但是利用水力喷射在固结地层进行水平井钻进,最大水平段长度只能达到 100 m,海域水合物赋存地层为未固结地层,采用水力喷射径向钻进深度应该会有所延长,但是仍然很难达到长距离钻进的目的,为了更好的实现水力喷射微小井眼技术在海域水合物钻探中的广泛应用,应该加强水力喷射微小井眼技术径向钻进

距离方面的研究。

4.2 井壁稳定

海域水合物储层为未固结地层,在钻进过程中因为连续油管的支撑作用能够完成水平段的钻进工作,但是当连续油管上提出井口以后,由于井壁缺乏支撑作用,极易发生井壁坍塌事故,使已经钻开的水平段地层重新闭合。虽然可将钻井用的连续油管当作套管留在井中,在其内再下入一层连续油管当作开采管,但由于连续油管造价很高,采用这种方式会大幅增加钻井成本。也有学者提出在水平段钻进中,可以采用能够形成蜂窝状固体物质的喷射液,这样不仅有效地支撑了井壁,同时还为分解后的甲烷气体提供了流通通道^[8],不过目前尚没有相关的研究。

4.3 卡钻事故处理

水力喷射微小井眼钻进技术不能进行旋转钻进,再加上井眼尺寸小、环空压耗大,岩屑输送困难,极易发生卡钻事故。而海域天然气水合物储层虽为未固结储层,钻井时不会产生大块岩屑,但是出砂情况严重,发生卡钻事故的概率更大,如若采用水力喷射微小井眼技术,需要解决好卡钻事故。

4.4 钻井工具开发

微小井眼技术区别于普通钻井技术和小井眼钻井技术,因此现有的钻进设备很难满足微小井眼钻井的要求,必须开发出移动性能好,高度集成化,可以完成下套管和固井等操作的小型复合连续管钻机。同时由于井眼尺寸的限制,现有的井下工具也不再适用,且在发生井下钻井事故时,无能够通过微小井眼的井下事故处理工具。所以将水力喷射微小井眼钻井技术应用到海域水合物钻探中必须重视钻井工具的开发。

4.5 连续油管寿命短

连续油管是微小井眼钻井技术的关键所在,是高科技产品。目前我国国内连续油管的材质都是碳钢,在连接方式上采用的是焊接,而井下服役条件复杂,受到多种载荷的复合作用,这也使得连续油管使用寿命并不太长。国外开发了新型的玻璃纤维和碳纤维复合的连续油管,使用寿命加长,油管重也得到了减轻,但成本非常高,且很难进行维护,能否进行商业化生产还是一个未知数,所以加强新型连续油管的开发也是关键技术之一。

5 结论和建议

天然气水合物是一种清洁、高效、绿色的新能源,其中海域天然气水合物储量最多,其开发过程必须通过钻井来实现。由于海域天然气水合物储层为粉砂型储层,未固结成岩,如采用常规的水平井钻井方式,则面临着钻井成本高、无法完成定向造斜、井眼轨迹控制困难和易引发海底塌陷和滑坡的风险。水力喷射微小井眼技术是刚刚兴起的新型水平井钻井技术,将其应用到海域水合物钻井中,具有钻井成本低、可顺利完成水平段钻进、降低井眼轨迹控制难度、储层污染小,降低了大规模海底坍塌的风险的优势。目前还没有国家在海域水合物钻探中采用水平井钻进的方式进行试采,而将水力喷射微小井眼技术应用到海域水合物钻探中也只是一种探索,但不失为一种很好的选择,建议加强水平段长度、井壁稳定、卡钻事故处理、钻井工具开发、连续油管寿命短等技术问题的研究,采用喷射发泡水泥在水合物储层形成蜂窝状物质以达到改造水合物储层的目的,实现水力喷射微小井眼技术在海域天然气水合物钻探中的应用。

参考文献(References):

- [1] 王志刚,张永勤,梁健,等.SAGD 技术应用于陆域冻土天然气水合物开采中的理论研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(5):15-18.
WANG Zhigang, ZHANG Yongqin, LIANG Jian, et al. Theoretical study on the application of SAGD technology in exploitation of natural gas hydrate in land permafrost region[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(5):15-18.
- [2] 史斗,郑军卫.世界天然气水合物研究开发现状和前景[J].地球科学进展,1999,14(4):330-339.
SHI Dou, ZHENG Junwei. The status and prospects of research and exploitation of natural gas hydrate in the world[J]. Advance in Earth Science, 1999,14(4):330-339.
- [3] 佟乐,杨双春,王璐,等.天然气水合物研究现状和前景分析[J].辽宁石油化工大学学报,2017,37(2):17-20.
TONG Yue, YANG Shuangchun, WANG Lu, et al. Research state and prospective natural gas hydrates[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2017,37(2):17-20.
- [4] 周怀阳,彭晓彤,叶瑛.天然气水合物勘探开发技术研究进展[J].地质与勘探,2002,38(1):70-73.
ZHOU Huaiyang, PENG Xiaotong, YE Ying. Development in technology of prospecting and exploitation for gas hydrates[J]. Geology and Exploitation, 2002,38(1):70-73.
- [5] 左汝强,李艺.日本南海海槽天然气水合物取样调查与成功试采[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(12):1-20.
ZUO Ruqiang, LI Yi. Japan's sampling study and successful production test for NGH in Naikai Trough[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(12):1-20.
- [6] 左汝强,李艺.美国阿拉斯加北坡永冻带天然气水合物研究和成功试采[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(10):1-17.
ZUO Ruqiang, LI Yi. The research and successful production test for NGH in Alaska North Slope, USA[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(10):1-17.
- [7] 左汝强,李艺.加拿大 Mallik 陆域永冻带天然气水合物成功试采回顾[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(8):1-12.
ZUO Ruqiang, LI Yi. The review of Mallik NGH successful production tests in Canada's Permafrost Zone[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(8):1-12.
- [8] 张永勤,李鑫淼,李小洋,等.冻土区天然气水合物开采技术进展及海洋天然气水合物开采技术方案研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):154-159.
ZHANG Yongqin, LI Xinmiao, LI Xiaoyang, et al. Technical progress of gas hydrate production in permafrost and research on oceanic gas hydrate production[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):154-159.
- [9] 祝有海,张永勤,文怀军,等.祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J].地球学报,2010,31(1):7-16.
ZHU Youhai, ZHANG Yongqin, WEN Huaijun, et al. Gas hydrates in the Qilian Mountain Permafrost and their basic characteristics[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2010,31(1):7-16.
- [10] 张洪涛,祝有海.中国冻土区天然气水合物调查研究[J].地质通报,2011,30(12):1809-1815.
ZHANG Hongtao, ZHU Youhai. Survey and research on gas hydrate in permafrost region of china[J]. Geological Bulletin of China, 2011,30(12):1809-1815.
- [11] 张旭辉,鲁晓兵,李鹏.天然气水合物开采方法的研究综述[J].中国科学(物理学 力学 天文学),2019,49(3):1-21.
ZHANG Xuhui, LU Xiaobing, LI Peng. A comprehensive review in natural gas hydrate recovery methods[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2019,49(3):1-21.
- [12] 李慧,黄本生,刘清友.微小井眼钻井技术及应用前景[J].钻采工艺,2008,31(2):42-45.
LI Hui, HUANG Bensheng, LIU Qingyou. Micro-borehole drilling technology and its application prospect[J]. Drilling & Production Technology, 2008,31(2):42-45.
- [13] DICKINSON W, DYKSTRA H, NEES J M, et al. The ultra-short radius system applied to thermal recovery of heavy oil[R]. SRE 24087, 1992.
- [14] BRUNI M A, BIASOTTI J H, SALOMNE G D. Radial drilling in Argentina[R]. SPE 107382, 2007.
- [15] KAMEL A H. RJD: a cost effective frackless solution for production enhancement in marginal fields[R]. SPE 184053, 2016.
- [16] 施连海,杨帆,黄志强,等.径向水平井技术的应用及其发展方向探讨[J].西部探矿工程,2014,8(7):60-65.

- SHI Lianhai, YANG Fan, HUANG Zhiqiang, et al. Application and development of radial horizontal well technology[J]. West-China Exploration Engineering, 2014, 8(7): 60-65.
- [17] 刘晓敏, 侯树刚, 蒋金宝, 等. 高压喷射钻井技术及其应用[J]. 断块油气田, 2013, 20(6): 809-812.
- LIU Xiaomin, HOU Shugang, JIANG Jinbao, et al. High pressure jet drilling technique and its application[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2013, 20(6): 809-812.
- [18] 吕振虎, 王宁, 冯业庆, 等. 高压水力喷射径向钻井技术在彩南油田的应用[J]. 石油规划设计, 2017, 28(1): 18-21.
- LÜ Zhenhu, WANG Ning, FENG Yeqing, et al. Application of high pressure hydraulic jet radial drilling technology in Cainan Oilfield [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2017, 28(1): 18-21.
- [19] 崔龙连, 汪海阁, 葛云华, 等. 新型径向钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(6): 29-33.
- CUI Longlian, WANG Haige, GE Yunhua, et al. New radial drilling technologies[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(6): 29-33.
- [20] 陈朝伟, 周英操, 申瑞臣, 等. 微小井眼钻井技术概况、应用前景和关键技术[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(1): 5-9.
- CHEN Chaowei, ZHOU Yingcao, SHEN Ruichen, et al. Overview, application prospects and critical technologies of micro hole drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1): 5-9.
- [21] 毕宗岳. 连续油管及其应用技术进展[J]. 行业综述, 2012, 35(9): 5-11.
- BI Zongyue. Coiled tubing(CT) and its application technology development[J]. Industry Overview, 2012, 35(9): 5-11.
- [22] 侯学军, 高德利, 沈忠厚. 微小井眼连续油管钻井牵引器系统结构设计[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(2): 1-5.
- HOU Xuejun, GAO Deli, SHEN Zhonghou. Structure design of micro-hole coiled tubing sliding drilling tractor system[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(2): 1-5.
- [23] 许朝辉, 高德利. 微小井眼连续油管的侧钻开窗[J]. 技术纵横, 2014, 33(1): 82-83.
- XU Chaohui, GAO Deli. Side drilling window of coiled tubing in micro-borehole[J]. Technical Aspect, 2014, 33(1): 82-83.
- [24] 迟焕鹏, 李根生, 黄中伟, 等. 水力喷射径向水平井技术研究现状及分析[J]. 钻采工艺, 2013, 36(4): 119-124.
- CHI Huanpeng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Research status and analysis of radial horizontal well technology with hydraulic jet[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(4): 119-124.
- [25] 黄中伟, 李根生, 唐志军, 等. 水力喷射侧钻径向微小井眼技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4): 37-41.
- HUANG Zhongwei, LI Gensheng, TANG Zhijun, et al. Technology of hydra-jet sidetracking of horizontal micro-radial laterals[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(4): 37-41.
- [26] 毕刚, 李根生, 沈忠厚, 等. 超临界二氧化碳径向水平井钻井技术应用前景分析[J]. 石油机械, 2013, 41(6): 14-19.
- BI Gang, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. Analysis of the application prospect of supercritical CO₂ radial horizontal drilling technology[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(6): 14-19.
- [27] 毕刚, 马东军, 李根生, 等. 水力喷射侧钻径向水平井眼延伸能力[J]. 断块油气田, 2016, 23(5): 643-647.
- BI Gang, MA Dongjun, LI Gensheng, et al. Extension ability of hydra-jet sidetracking of radial horizontal well[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(5): 643-647.
- [28] 窦斌, 蒋国盛, 秦明举, 等. 水力输送法开采海底浅层天然气水合物技术研究[J]. 地质与勘探, 2009, 45(4): 427-429.
- DOU Bin, JIANG Guosheng, QIN Mingju, et al. Hydraulic conveying technology used for exploitation of arine gas hydrates [J]. Geology and Exploration, 2009, 45(4): 427-429.
- [29] 杨东, 高庆云, 朱英洁, 等. 油气井径向水力喷射钻井工艺技术研究与应用[J]. 油气井测试, 2017, 26(1): 67-69.
- YANG Dong, GAO Qingyun, ZHU Yingjie, et al. Research and application of radial hydraulic jet drilling technology for oil and gas wells[J]. Well Testing, 2017, 26(1): 67-69.

(编辑 韩丽丽)