

# 高温高压钻井关键技术发展现状及展望

罗鸣<sup>1,2</sup>, 冯永存<sup>1\*</sup>, 桂云<sup>1</sup>, 邓金根<sup>1</sup>, 韩城<sup>2</sup>

1 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

2 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 湛江 524057

\* 通信作者: yfeng@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-07-13

中国石油大学(北京)科研基金(2462019YJRC008)和国家自然科学基金面上项目(52074312)联合资助

**摘要** 随着我国对深层油气资源需求的不断增长, 在勘探开发过程中, 高温高压地层变的越来越常见, 给钻井带来了诸多困难与挑战。高温高压钻井除了要面临高温高压的挑战, 还要克服地层压力预测难、井身结构复杂、井控难、钻井液流变性差、机械钻速低、井下工具适应性差等一系列的问题。通过对国内外高温高压钻井技术文献的整理, 从地层压力预测、井身结构优化、控压钻井、抗高温钻井液、钻头与高效破岩、随钻测量与导向工具等6个方面对目前高温高压钻井技术的发展进行了总结, 并对各个方面的发展做了一定的展望。目前, 国内外高温高压钻井关键技术中, 高温是最急需解决的问题。对于国内来说, 井下175℃是一个坎, 许多国内的钻井设备与技术面临这个温度时都会产生一系列问题, 因此, 也限制了国内技术的规模化应用, 而且与国外的先进水平相比, 尚有一定差距。国外高温高压钻井关键技术主要集中在Schlumberger、Halliburton、Baker Hughes、Weatherford等主要石油工程技术公司中, 且都已经形成了自己的特色系列产品并进行过一定规模的应用。例如斯伦贝谢公司的自动节流控压钻井系统、威德福公司和雪弗龙公司合作开发的随钻测井技术服务HEX等。总的来说, 过去几年高温高压钻井技术得到了快速的发展, 取得了很大的成就; 但如何实现高温高压井安全高效的钻进, 仍是国内外共同需要努力的方向, 而且对于高温高压非常规井的钻井技术研究也十分缺乏。因此, 国内外仍要加大对高温高压钻井技术的研究力度, 特别是国内, 应继续跟踪加强研究, 以满足日益苛刻的钻井需求。虽然目前的技术能力并不能解决所有问题, 但是为今后高温高压钻井技术的发展奠定了良好的基础。

**关键词** 钻井技术; 高温高压; 深层; 发展现状; 发展展望

## Development status and prospect of key technologies for high temperature and high pressure drilling

LUO Ming<sup>1,2</sup>, FENG Yongcun<sup>1</sup>, GUI Yun<sup>1</sup>, DENG Jingen<sup>1</sup>, HAN Cheng<sup>2</sup>

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 CNOOC China Limited Zhanjiang Branch, Zhanjiang 524057, China

**Abstract** With the increasing demand for deep oil and gas resources in China, drilling in high temperature and high pressure (HTHP) formations is becoming more and more common in the process of exploration and development, which leads to many difficulties and challenges for the drilling industry. In addition to the challenges of high temperature and high pressure, HTHP

引用格式: 罗鸣, 冯永存, 桂云, 邓金根, 韩城. 高温高压钻井关键技术发展现状及展望. 石油科学通报, 2021, 02: 228-244

LUO Ming, FENG Yongcun, GUI Yun, DENG Jingen, HAN Cheng. Development status and prospect of key technologies for high temperature and high pressure drilling. Petroleum Science Bulletin, 2021, 02: 228-244. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.018

drilling must overcome a series of problems, such as difficult formation pressure prediction, complex well structures, difficult well control, poor rheology of drilling fluids, low rate of penetration (ROP) and lack of capable downhole tools. Based on a literature review of HTHP drilling technology at home and abroad, this paper summarizes the development of HTHP drilling technology from six aspects. These are: formation pressure prediction, wellbore structure optimization, pressure control drilling, high temperature resistant drilling fluid, bit and efficient rock breaking, MWD and steering tools. This provides a possibility for the development of various improvements. At present, high temperature is the most challenging problem in the key technologies of high temperature and high pressure drilling at home and abroad. For China, a downhole temperature of 175 °C is a barrier. Much domestic drilling equipment and technologies will have a series of problems when facing this temperature. Therefore, large-scale applications of domestic technology are limited, and there is still a gap compared with the advanced levels in foreign countries. The key technologies of HTHP drilling abroad were mainly developed by the petroleum engineering technology companies such as Schlumberger, Halliburton, Baker Hughes, and Weatherford. In these companies, series of products with their own characteristics have been developed and used widely, for example, Schlumberger’s managed pressure drilling system and the logging while drilling technology HEX codeveloped by Weatherford and Chevron. In general, HTHP drilling technologies have been developing rapidly in the past few years and made great progress. However, achieving safe and efficient drilling of HTHP wells is still the common direction of efforts at home and abroad, and research into drilling technology of HTHP unconventional wells is rare. Therefore, research on HTHP drilling technology should be further strengthened. In particular, China should continue to follow up and strengthen research to meet the increasing drilling needs. Although the current technical ability cannot solve all the HTHP drilling problems, it has laid a good foundation for the development of new HTHP drilling technology in the future.

**Keywords** drilling technology; HTHP; deep formation; development status; prospects

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.018

## 0 前言

高温高压井在国外称为HTHP井，根据国际HTHP合作促进协会的规定，地层温度达到 300 °F(149 °C)，地层压力达到 15 000 psi(103.4 MPa)或井口压力达到 10 000 psi(68.9 MPa)以上的井称为高温高压井<sup>[1]</sup>。然而，不同组织和公司对高温高压井也有不同的定义，图 1 为斯伦贝谢、贝克休斯和哈里伯顿 3 大油田服务公司

定义。

随着油气开发技术的进步，越来越多的高温高压油田被发现，如中国南海莺歌盆地，马来西亚浅海，印度东海岸的 Krishna Godavary 盆地和南德克萨斯盆地等<sup>[2]</sup>。高温高压油气田开发过程中面临一系列的钻井问题，严重制约着油气田的安全高效开发。为了保障高温高压环境下钻井作业的安全高效进行，这些油田、区块需要更完善的钻井技术与配套工艺，这为国内外高温高压钻井技术的发展带来了更多的机遇与挑战。

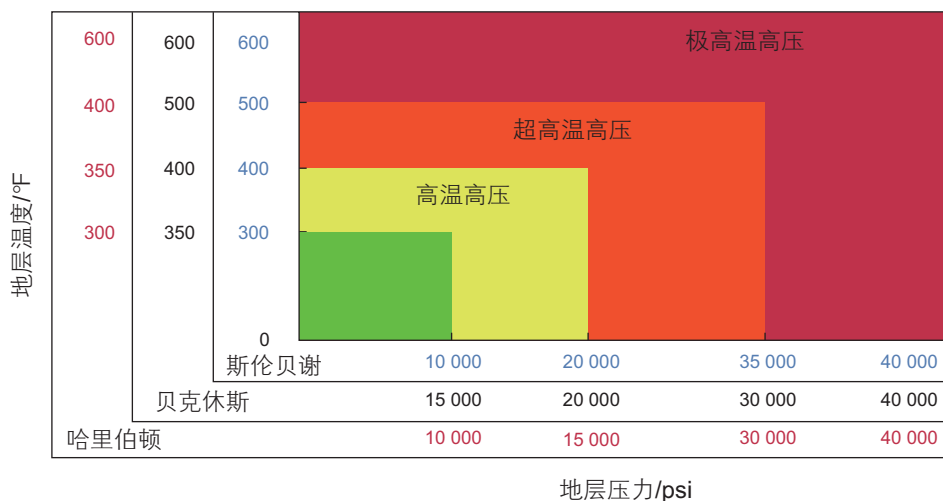


图 1 高温高压地层分类

Fig. 1 HTHP formation classification

本文对国内外高温高压钻井技术文献进行了整理,从地层压力预测、井身结构设计、控压钻井、抗高温钻井液、高效破岩、测量与导向工具等6个方面对目前高温高压钻井技术的发展进行了总结,并对各个方面的发展做了一定的展望。

## 1 高温高压钻井面临的技术挑战

与常规的钻井作业不同,高温高压环境下的钻井作业,不仅具有高度的复杂性与危险性,还对钻井技术、设备、工具与工艺等提出了更严苛的要求。

### (1) 地层压力预测

高温高压钻井要面对地层压力变化规律难以掌握以及由于地层压力预测不准造成的井壁失稳、井下复杂情况等问题。目前的地层压力预测技术中,地震数据处理技术相对粗糙,数据分辨率的准确性较低,预测精度无法满足安全钻进的需求。这不仅导致了钻井的危险性大大增加,还增加了相当程度的经济损失。特别是深井钻探中窄密度窗口钻井问题最为复杂,对地层压力的认识程度要求会更高。

### (2) 井身结构

大部分的高温高压井井身结构比较复杂,因此常会使用非标准的井眼尺寸配合标准尺寸的套管,套管与环空的间隙小,不利于维持井壁稳定。另外,因为高温高压井通常较深,传统自下而上的井身结构设计方法已不能满足需求。

### (3) 控压钻井

高温高压钻井的压力控制与窄密度窗口作业是一个十分巨大的挑战。钻井过程中井下压力的控制对储层保护、防止钻井液污染地层、减小井底正表皮系数、维持井壁稳定等非常重要。窄密度窗口需要更为先进的控压钻井技术,通过控制井口回压等措施,准确地调节井底压力,控制环空压力和当量循环密度。

### (4) 抗高温钻井液

温度对水基钻井液的影响非常大,超过150℃时大多数聚合物处理剂易分解或降解,或出现高温交联现象,引起增稠、胶凝、固化成型或减稠等流变性恶化问题,造成钻井液体系的不稳定性。因此高温高压钻井液的技术难点体现在:钻井液处理剂在高温高压下失效、钻井液高温流变性的控制、高温滤失造壁性的控制、抗高温钻井液的护胶、高温高压条件下防漏堵漏材料选择、高温高压条件下钻井液的润滑性问题以及高密度的钻井液的维护等问题<sup>[3]</sup>。

### (5) 高效破岩

随着温度的升高,岩石的性质会发生很大的变化,例如强度降低、塑性增强、可钻性等级发生变化。同时,高温对钻进系统也会产生很大影响,例如钻井液携岩能力降低、钻头磨损加剧等<sup>[4]</sup>。高温地层中的钻进会加剧钻头的磨损,大大降低钻头的使用寿命,同时也影响了机械钻速。因此高温高压地层中往往会面临着地层可钻性等级低、钻头使用寿命低、机械钻速低、经济效益低等困境。

### (6) 测量与导向工具

高温高压井的井深普遍在5000 m以上,因此对随钻测量工具和导向工具的工作能力,尤其是耐温和耐压能力要求很高。由于井比较深,所以易产生井斜,导致井眼偏离设计轨迹,工具就可能因为井斜超过允许范围而无法正常运行,进而产生不必要的损失。再加上高温高压井地下环境复杂,较普通井更易造成井壁坍塌、卡钻,固井窜槽、管外冒油气等问题。因此,高温高压井中测量与导向工具的安全、正常、精确的运行,就显得十分重要。

## 2 高温高压钻井关键技术发展现状

### 2.1 地层压力预测技术

目前,关于高温高压地层压力预测方法主要有地震法、三维地质应力分析法、Eaton法、磁测法、速度差法等方法。近几年在国外,除了常规的地层压力预测方法外,随钻压力监测也得到了越来越多的重视。比如,Geoservices公司研发了一种可对高温高压井进行现场地层压力随钻监测的EquiPoise系统,科研人员根据地层压力监测的实际结果来修正地层压力预测模型,进而对钻头以下100~300 m深度的地层压力剖面进行实时预测。在中海油湛江分公司的钻后实测压力验证表明,该方法地层孔隙压力预测精度达到了94%<sup>[5]</sup>。

另外,一些国外学者还提出了考虑多种因素进行地层压力预测与分析的新方法。比如,澳大利亚研究人员通过对伊朗某油田碳酸盐岩储层的研究,利用储层的压缩性来预测孔隙压力,即当地层被压实时,孔隙空间减小,会对填充孔隙的流体施加压力,从而建立了孔隙流体压力产生机制,并尝试了碳酸盐岩孔隙压力预测的新方法。Stephen等人基于泊松比和杨氏模量(地震推导),结合地震反演,得到孔隙度分布和压缩性的信息,然后将其与孔隙压力联系起来,进而为远程压力的预测提供了可能性等等。Dutta在研究中将

地层压力看作是页岩比率、温度和成岩作用的函数,通过建立它们之间的关系来预测孔隙压力。Lee等人在研究中将地层异常高压作为孔隙度和水深的函数建立起一个新的异常压力预测模型<sup>[6-8]</sup>。这些方法虽然对施工有一定的指导作用,但也有一定的局限性,并不能完全满足深部高温高压地层压力预测的需求。

国内的高温高压井地层压力预测技术多是建立在基于地震和测井数据的常规方法,同时也借鉴了国外的一些新技术。近些年,针对南海西部莺歌海盆地和塔里木盆地等高温高压含油气地层的孔隙压力研究,促进了我国高温高压孔隙压力预测技术的进步。比较有代表性的是,蔡军等人改变传统的单井点地层压力预测模式,从三维地质模型的建立出发,引入三维地质应力模拟方法,为待钻井提供精确地层压力剖面<sup>[9]</sup>。樊建华等基于叠加速度的约束反演获得背景层速度,再以叠后波阻抗反演获得目的层精确的层速度,然后采用Fillippone公式直接由地震速度计算得到地层压力,有效提高了地层压力预测的精度和可靠性<sup>[10]</sup>。罗鸣等人研发了深度卡层与智能预警技术和随钻VSP技术,可实时更新钻头在地震剖面中的位置和钻头前方高压层的位置,为准确确定套管下入深度、反演下部层位深度及压力提供参考。还有一些国内学者改进了国内外的传统地层压力预测公式,并且结合地区的具体情况,综合利用多种预测技术,提出了高温超压地层孔隙压力预测的新思路<sup>[11-14]</sup>。

近几年,面对中国石油资源劣质化和油气勘探开发对象逐渐复杂化的问题,地质工程一体化技术体系在国内得到快速发展<sup>[15]</sup>。地质工程一体化技术是将地质研究、工程设计和现场实施组织纳入一体化协作体系,解决工程难题。关键技术主要包括科学化的工作机制流程、井位和井轨迹优化技术、钻前压力预测技术、井壁稳定性预测技术和完井改造优化技术等<sup>[16]</sup>。目前该技术已得到成功应用,例如在中国南海西部高温高压井(目的层埋深超过4000 m,地层压力系数大于2.2,温度在200℃左右)地质作业及钻井工程中得到了成功应用,地质作业成功率由85%提高至100%,钻井作业复杂情况下下降60%,不仅降本增效成果显著,而且大大提高了钻井效率<sup>[17]</sup>;塔里木油田的克深储层是致密气砂岩储层,在高构造应力下,储层压力超过110 MPa,温度高达165℃,为了更好得到克深储层力学性质和地应力的关键信息,根据KS205和KS207井的岩芯,以及15口井的测井数据建立了综合地质力学评价系统,为增产人员提供了可靠的信息<sup>[18]</sup>。在未来,日益复杂的油气藏勘探开发需要地质工程一体化

这一理念及方法,要不断加强创新与尝试,开发出针对不同油气藏的地质工程一体化技术体系。

在与地层压力密切相关的井壁稳定性方面,井漏是高温高压钻井面临的最为突出的井壁稳定性问题。在井漏预测与控制方面,众多学者通过综合分析漏失层的影响因素,预测可能发生漏失的地层层位,进而从合理井身结构、钻井液密度、类型、配方、性能及钻井工程技术措施等方面预防漏失的发生<sup>[19]</sup>。例如,中石化针对沙特B区块高温高压气井漏失情况设计了相关的配套钻井技术,包括井身结构优化、钻头评价与优选、复合钻进、加强防漏堵漏、应用MPD钻井技术等<sup>[20]</sup>;针对塔中区块碳酸盐岩缝洞型异常高温高压储集层,研究人员研发了一种新型的抗高温高压的复合堵漏材料SXM-I,所形成的堵漏钻井液抗温达到了180℃以上,新配制的堵漏钻井液体系对裂缝和孔洞均具有较好的封堵效果,裂缝封堵承压9 MPa以上;针对南海西部高温高压油气田,研究人员研发了高温高压井高密度钻井液堵漏技术,并进一步优化了堵漏钻井液体系,优化前后的堵漏钻井液黏度变化不大,但钻井液API滤失量降低<sup>[21]</sup>。近年来,有学者又提出了包括智能形状记忆合金、智能形状记忆聚合物、智能凝胶、智能膜和智能仿生材料等智能型材料在复杂地层中的应用,可显著提高堵漏效率,但总体仍处于起步阶段,未来仍需制定科学化和智能化的堵漏工艺,推动钻井液防漏堵漏技术的实用性、创新性和智能化发展,使之能更好地应用于高温高压等复杂环境中<sup>[22]</sup>。

在国外, Dasgupta等人开发的新型耐高温分散纤维堵漏体系,软化点和熔点在200℃以上,在印度东部油田和西部海上油田得到了推广应用<sup>[23]</sup>。Baker Hughes开发的抗高温高压堵漏体系S-II,室内实验抗温达204℃,室内试验显示,新的堵漏体系在100 psi的压差下,能更有效地密封200目砂层;在现场应用过程中,表现出优良的兼容性,能够加固井壁,有效避免和减少固井过程中的漏失情况,目前已有超过100家企业使用过<sup>[24]</sup>。BJ Services Company开发的新型生物可降解聚合物处理剂,引入这种新型处理剂后,研制的新型堵漏体系抗温达204℃,该体系包含两种堵漏材料LCM和LCM+, LCM是由疏水改性聚合物和改性多糖悬浮剂组成,其粒度分布低于200 μm, LCM+作为桥堵材料使用,粒度分布低于1500 μm。其中,LCM的疏水改性聚合物达到一定使用溶度时,会形成胶束,使用浓度越高,形成的胶束越多,胶束溶液在地层表面的吸附与在水溶液中的溶解之间存在

基于压差的动态平衡。随着压差的增大,越来越多的胶束吸附并填满地层/裂缝中的孔隙,形成不渗透的液压膜,起到压力密封的作用,从而阻止流体渗透到地层/裂缝中。在西班牙的现场作业中,有效提高密度窗口超过 1.33 ppg。目前在超过 1200 口井中进行过推广应用<sup>[25]</sup>。

另外,控压钻井技术是解决漏失和溢流同时存在等极端情况下的一种有效方法。通过合理的井身结构优化设计,也可以在一定程度上避免钻井施工过程中复杂事故的发生,在解决高温高压井存在多套压力系统等问题的同时,还可以有效降低钻井过程中的ECD<sup>[26]</sup>。这两项技术的进展将在下面做具体讨论。

## 2.2 井身结构优化设计技术

传统井身结构设计方法通常采用自下而上的方法,由目的层深度确定完井套管的下入深度,根据地层特性设计上部套管合理的下入深度,以获取最大的经济效益,但如今已经不能满足高温高压井的需求<sup>[27]</sup>。目前,我国的深井、超深井中普遍采用的套管结构是 20"—13<sup>3</sup>/<sub>8</sub>"—9<sup>5</sup>/<sub>8</sub>"—7"—5",少数陆地超深井和海洋钻井已采用 30"—20"—13<sup>3</sup>/<sub>8</sub>"—9<sup>5</sup>/<sub>8</sub>"—7"—5"的套管结构程序<sup>[28]</sup>。

国内外在深井超深井中采用的套管系列已比较齐全,应用范围广,不仅有常规系列,也有非常规系列<sup>[28]</sup>,以中石油塔里木油田公司与斯伦贝谢合作研发

的非标准套管系列(塔里木标准 TS II型和TS II-B型)为例,如图 2 所示。TS II井身结构主要用于开发井,TS II-B井身结构主要用于探井。该非标准套管结构有效降低了钻井和固井的风险,固井作业合格率从 2005 年的 55% 稳步提高到目前的 73%<sup>[29]</sup>。

在美国陆上和墨西哥湾地区深井超深井钻井应对多压力系统复杂情况时主要采用拓展井身结构技术来保障钻井安全,例如采用扩眼技术、膨胀管技术等,以应对超深井复杂状况。国外对随钻扩眼技术的研究一直是几大油田服务公司的研究热点及核心技术。几大油田服务公司都有成熟的随钻扩眼工具,如斯伦贝谢公司的Rhino系列扩眼工具、哈里伯顿公司的XR<sup>TM</sup>和UR<sup>TM</sup>扩眼工具、贝克休斯公司的Gauge Pro扩眼工具、威德福公司的Rip Tide扩眼工具和国民油井公司的Anderreamer扩眼工具等<sup>[30]</sup>。

在国内的南海莺—琼盆地,已知钻井最高井底温度达到了 249 °C,最高地层压力系数高达 2.38,绝对地层压力高达 120 MPa。研究者通过总结以往数十年的钻井经验,创新采用了“自上而下”、“自下而上”相结合并综合考虑必封点、ECD、井控和固井因素影响的双向动态循环井身结构设计方法(图 3)。该技术在满足所取地质资料要求与地层压力平衡的前提下,根据地质必封点和地层压力分布确定技术套管的尺寸、层次和下入深度,根据下部复杂地层情况,制定备用技术套管方案。设计时优先考虑常规井身结构,在确

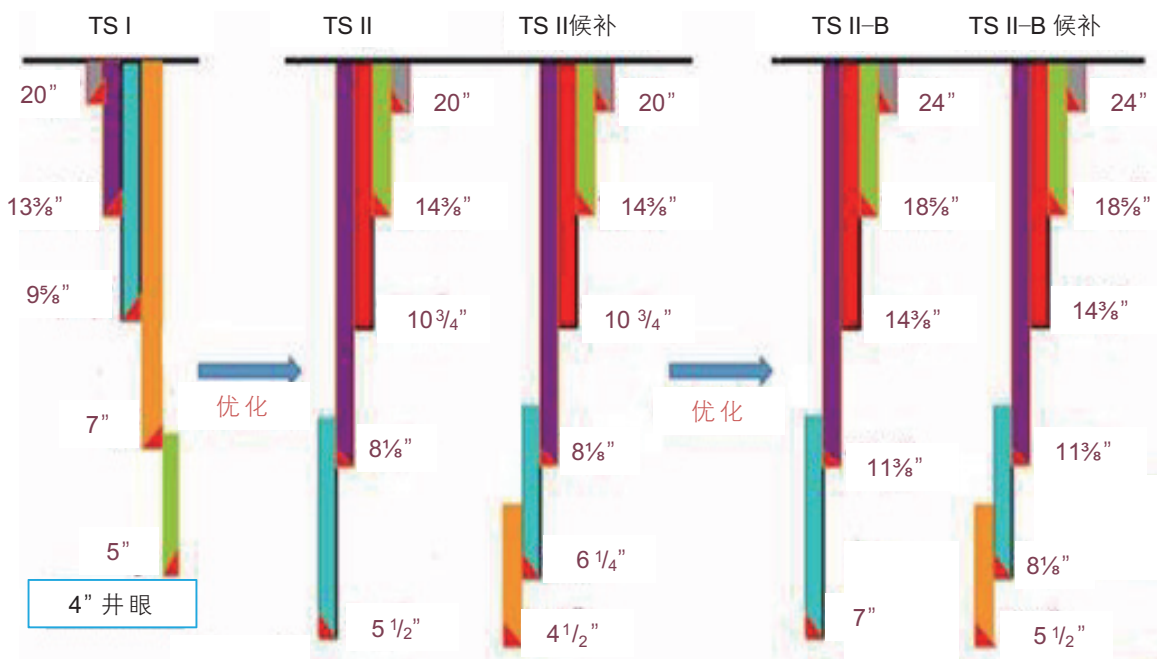


图 2 塔里木库车区块井身结构<sup>[29]</sup>

Fig. 2 Well structure in Kuqa block, Tarim Basin<sup>[29]</sup>

认常规套管程序无法满足安全钻进的前提下，增加 1 层非常规尺寸套管，保证最后 1 层套管尺寸满足地层评价的要求<sup>[31]</sup>。除此之外，国内为适应海上复杂的高温高压深井钻井要求，还采用过一种强化型套管、钻头系列，并取得了成功。该技术主要优点是在不改变原有套管程序的条件下增加了一层技术套管，可以封隔 3 套不同压力系统的地层，并可以使用现有配套设备及工具<sup>[28]</sup>。

### 2.3 控压钻井技术

国内外现行主要控压钻井技术有精细控压钻井技术、微流量控压钻井技术、双梯度控压钻井技术、泥浆帽控压钻井技术等。国内外多年的实践表明，在诸多深井、超深井、高温高压井钻探可能面临的钻井复杂中，窄密度窗口钻井问题最为复杂，其中控压钻井工艺能有效地解决窄密度窗口钻井难题，随着窄密度窗口钻井问题愈加普遍和突出，近年来该技术发展也

十分迅速。

国外从 20 世纪 60 年代就已经开始了对精细控压钻井技术的研究，经过多年的实践与摸索，国外多家油服公司都开发出了完善的控压钻井系统，目前主要有以下几种：

① 哈里伯顿公司的 Flex 移动式集成控压钻井系统 (图 4)：其节流管汇进出口为 4 in，科式流量计出口为 4 in，该产品在简单的安装、拆卸钻机时，无需从拖车取下装备，可以减少作业时间，而且只需装配旋转控制装置和管线，集成式的解决方案，便于往返钻井现场。但其体积比较庞大，安装拆卸比较耗时<sup>[32]</sup>。

② 威德福公司的 Victus 控压钻井及流体取样系统：其钻井深度为 500~4600 m，井眼尺寸为 150~220 mm，流量为 683~1000 L/min。该产品对机器通信以及井下条件实时分析都来自中央系统的指令，自动响应的同时还可以比较精确地保持井底压力。产品的取样系统能够在带压条件下，连续录取砂样，精确分析天然气

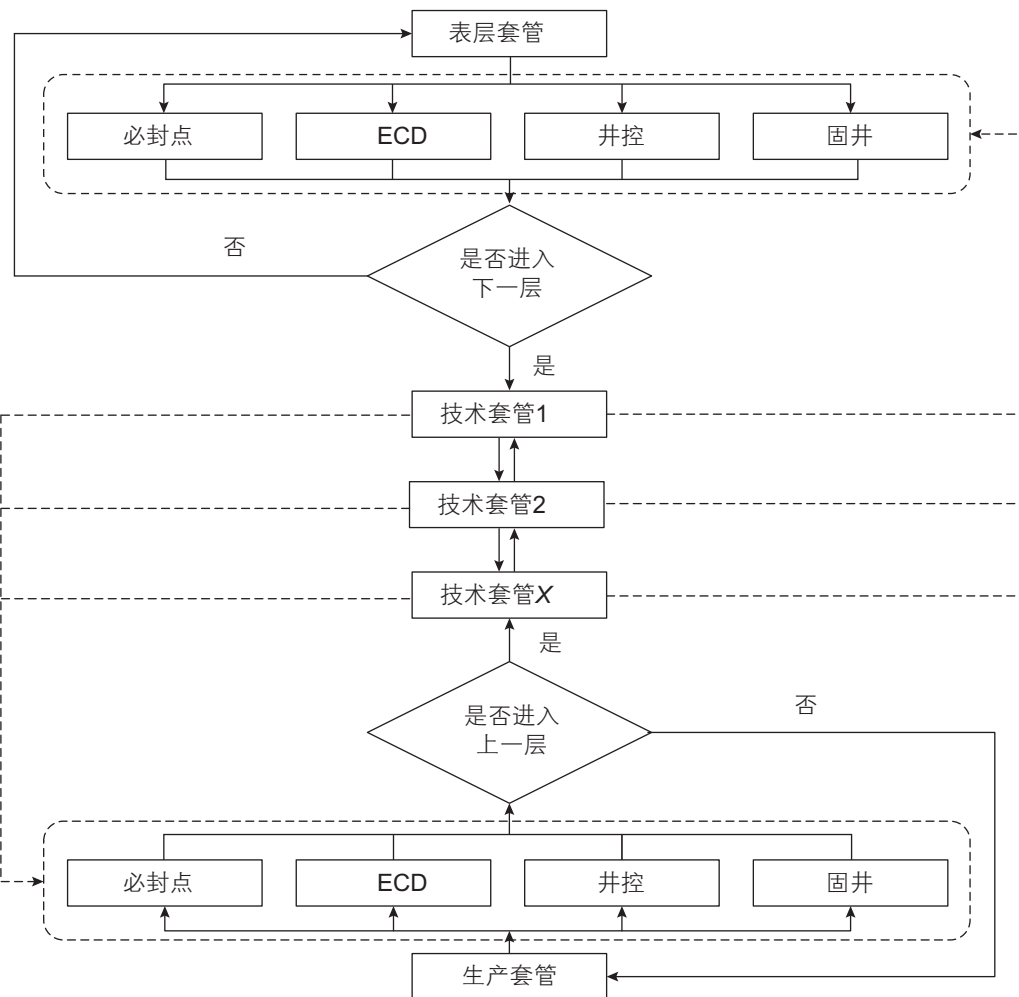


图 3 双向动态循环井身结构设计方法<sup>[31]</sup>

Fig. 3 Design method of bidirectional dynamic circulation well structure<sup>[31]</sup>

组分和储层特征。但该系统对井底压力的控制存在误差与延迟<sup>[32]</sup>。

③ 国民油井公司的MPowerD精细控压钻井管理系统：该产品的工作压力为13.79 MPa。随时保证井筒压力的恒定、杜绝事故与复杂工况的同时，还可以精确监测元件的磨损，增强元件寿命的可预测性。但会因停泵等原因产生井筒压力变化、设备密封件磨损的问题<sup>[32]</sup>。

④ 斯伦贝谢公司的自动节流控压钻井系统：该系统可以通过环空压力监测等井下实时监测技术，与已

建立的地质力学、水力学等模型进行比较，对自动节流阀开度进行自动调整。并可进一步通过一个压力补偿泵来补偿井底压力(图5)，保持各种工况下的井底压力不变，这套系统非常适合窄密度窗口钻井<sup>[33-35]</sup>。该系统已在马来西亚浅海超高温高压井中得到了成功应用<sup>[36]</sup>。

⑤ 壳牌公司的动态环空压力控制系统：可以实时利用水力模型模拟井底及井口压力、流量、温度，预计井底压力，设定允许的波动范围，调节地面设备以满足井底压力。

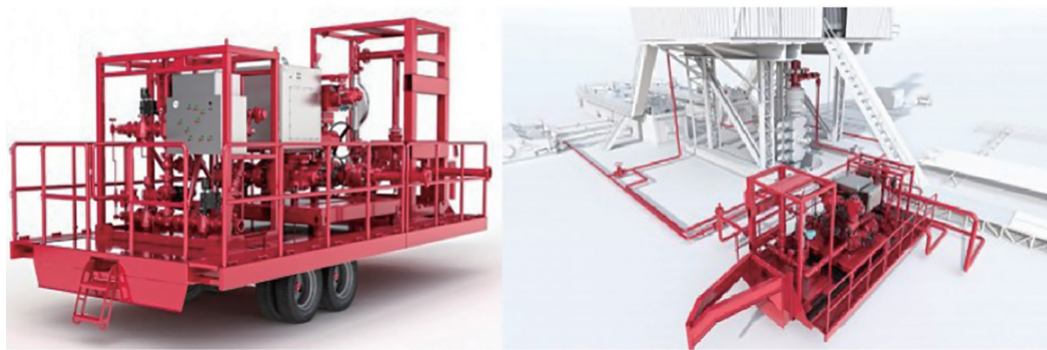


图4 哈里伯顿Flex移动式集成控压钻井系统<sup>[32]</sup>

Fig. 4 Halliburton Flex mobile integrated pressure control drilling system<sup>[32]</sup>

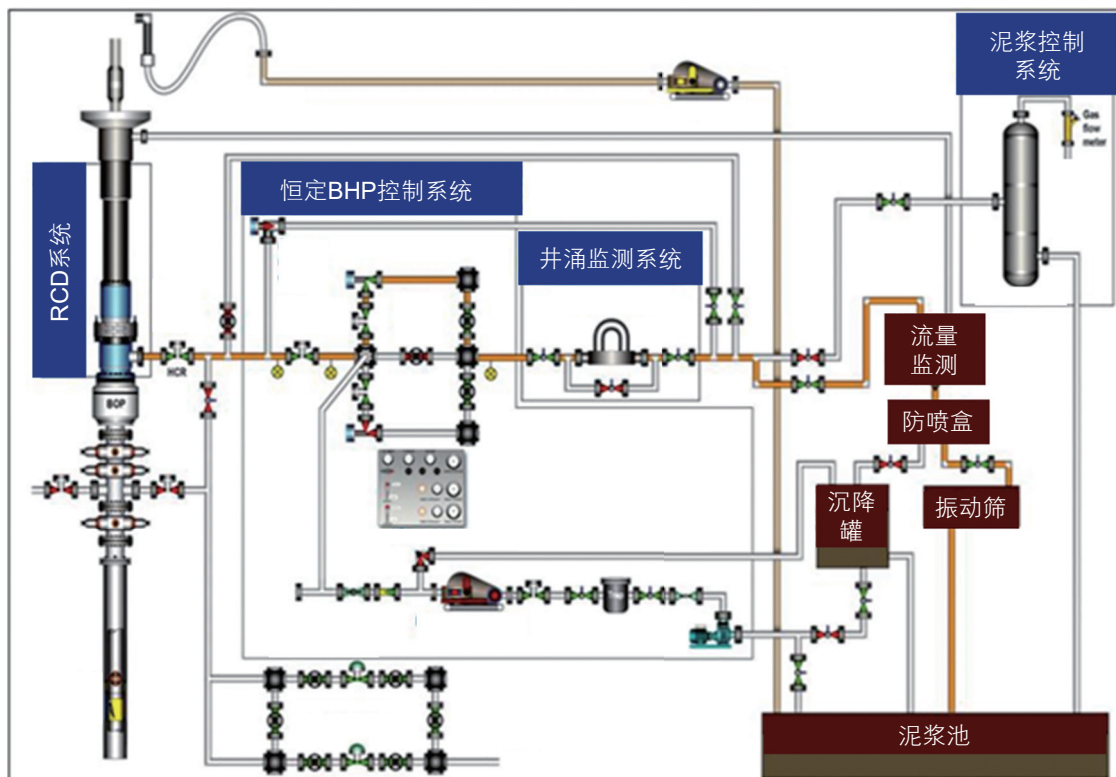


图5 斯伦贝谢公司控压钻井设备简图<sup>[36]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of Schlumberger pressure control drilling equipment<sup>[36]</sup>

我国精细控压钻井技术起步较晚,早期窄密度窗口复杂井的处理基本都是依靠国外精细控压工艺及设备。经过多年的摸索及实践,目前国内控压钻井工艺从理论研究到装备配套都得到进一步完善,并已经在多个油田进行了成功实验应用。国内的中国石油天然气集团有限公司从2008年开始进行精细控压钻井技术研究和精细控压钻井装备的研制,在之后的2011年,中国石油集团钻井工程技术研究院依托国家科技重大专项自主研发了PCDS-I精细控压钻井系统。该系统具有微流量和井底恒压双目标控制功能,可实现自适应、快速响应、精确控制,并且在塔里木油田库车山前高温(170℃)高压(190 MPa)深部钻井中采用微流量控压钻井技术钻进高压盐水层,用时11天钻穿高压盐水层,取得了显著效果<sup>[37]</sup>。但目前还未实现规模化应用,需要更多的高温高压现场试验。另外在同一时期,川庆钻探工程有限公司也研发出了完全自主知识产权的CQMPD-I型精细控压钻井系统。该系统可根据实时采集的工程参数以及井下环空压力参数,由水力学计算分析与压力控制决策模块实时计算分析与决策并下达相关指令,进而依靠自动节流控制系统的自动节流阀来精确控制套压,精确控制环空压力剖面以适应环空流量或密度等参数变化引起的井底压力变化,确保控制井底压力在目标值,目前已在川渝多个井场和在冀东南堡油田进行了成功的试验<sup>[38]</sup>。

高温高压井中除了应用精细控压钻井技术外,在国内的塔里木油田中,也曾实施过简易注气控压钻井技术与液面监测控压钻井技术,现场应用也证实了可以有效的解决高温高压地层和窄密度窗口地层所出现的钻井复杂问题<sup>[39]</sup>。

## 2.4 抗高温钻井液技术

目前,抗高温高压钻井液体系研究主要是在不改变钻井液体系的流变性的基础上,提高钻井液在高温高压的条件下的综合性能。抗高温钻井液主要可以分为水基钻井液、油基钻井液与合成基钻井液3种。近几年,高温高压井的环境保护问题日益突出,因此环保型钻井液也逐渐被人们所重视。

### (1) 高温高压水基钻井液

水基钻井液目前在国内外应用最为广泛,国外在深井超深井钻探方面起步较早,水基钻井液的使用温度已经超过260℃<sup>[40]</sup>。国外有多个钻井液服务公司拥有自主知识产权的高性能水基钻井液,如M-I SWACO公司研制的ULTRADRILTM体系、Baroid公司研制的Hydro-Guard体系及Baker Hughes公司研制

的PERFORMAX体系等。其所使用的聚合物基本上含有磺酸基团,以提高钻井液的抗高温能力。国外还有一种独特的SIV钻井液体系<sup>[41]</sup>,热稳定性高达370℃。其他的,如海泡石钻井液、石灰类钻井液、低胶体钻井液、聚合物钻井液、褐煤表面活性剂钻井液、DURATHERM水基钻井液体系、THERMA.DIULLTM高温水基钻井液、水基耐高温钻井液(WBHT)等都有其对应的抗高温水基钻井液产品,根据产品的使用条件,抵抗温度可在160~260℃之间。

与国外相比,我国在高温水基钻井液技术研究方面起步较晚,相应的抗高温处理剂与钻井液体系相对缺乏。国内3大石油公司下属研发机构也均研发了各种高性能水基钻井液,如中国石油集团钻井工程技术研究院研制的高润滑强抑制高性能钻井液体系,中石化中原石油工程有限公司西南钻井分公司研制的KPF高性能钻井液体系,中海油能源发展股份有限公司工程技术湛江分公司研制的高性能深水钻井液体系等。除此之外,近几年一些国内学者也研发相应的抗高温水基钻井液体系,如蒲亮春研发的KGWTEK钻井液体系,在大丰1井的180℃高温井段也能保持良好的性能,实行了安全钻进<sup>[42]</sup>;毛惠研制出SDT10、SDT11抗高温钻井液关键处理剂,然后以此为基础研制出了抗248℃的超高温水基钻井液体系配方和抗220~240℃、密度达2.46~2.55 g/cm<sup>3</sup>的超高温超高密度水基钻井液体系<sup>[40]</sup>等。

### (2) 高温高压油基钻井液

在一般情况下,油基钻井液的热稳定性可达260℃。在国外,当遇到盐层、易坍塌层、高温层等复杂情况时往往首先考虑使用油基钻井液来克服这些问题<sup>[41]</sup>。近年来,美国Intl公司研制的全油钻井液,其密度低,表面活性剂含量低,减少储层伤害的同时,也可以抵抗213℃的高温。美国Van Slyke等研制出的钻井液体系密度可达2.39 g/cm<sup>3</sup>抗310℃和203 MPa的油包水钻井液(油水比为85:15~90:10),体系使用了新型抗高温处理剂配制,具有很好的稳定性<sup>[43]</sup>。美国的M-I公司研制的柴油基钻井液VERSADRIL,低毒性矿物油基钻井液VERSACLEAN,单桶乳化剂油基钻井液MEGADRIL在全球市场上占据着主导地位。其它的如贝克休斯的NEXT-DRILL逆乳化油包水钻井液体系,Bechtel公司使用的LVT油基钻井液等,也都已经在现场的高温环境中的得到了成功应用。

在国内,塔里木库车山前超深井、四川威远—长宁、云南昭通页岩气、大庆致密油水平井等都多采用油基钻井液,虽然国内的油基钻井液的研究起步较晚,



但我国近几年油基钻井液技术也获得了飞速发展,形成了全油基、柴油基、白油基、气制油等多套油基体系。其中,中石油通过自主攻关,成功研发了乳化剂、降滤失剂等关键处理剂,形成了国产高密度油基钻井液技术,并且在克深1101,克深21,佳木2等井都得到过成功应用。长城钻探公司研制了可抗高温200℃的全油基钻井液抑制性能好,抗污染和润滑性能较好,储集层保护效果好,具有泥页岩水化抑制作用,并且在苏10-32-45CH井中得到了成功的应用<sup>[43-44]</sup>。另外,国内一些学者也研发了相应的抗高温钻井液体系,如李哲研发的抗高温油基钻井液体系能抗220℃的高温,目前已在NGS-P-2井得到了成功的应用<sup>[45]</sup>;刘亚研制的抗温可达220℃,密度可调至2.2 g/cm<sup>3</sup>的高温高密度全油基钻井液配方和高温高密度油包水钻井液配方,在牛94井的现场得到了成功的应用<sup>[43]</sup>。

### (3) 高温高压合成基钻井液

目前已开发并在现场应用见到效果的合成基钻井液有脂基钻井液、醚基钻井液和聚 $\alpha$ -烯烷基钻井液3大类,以及后期又发展出的第二代合成基钻井液。国外抗高温合成基钻井液的研发以M-I公司最为突出,包括:反向逆乳化成基钻井液体系,现场应用已被证实了可抗204℃的高温,具有钻井稳定,流体易维护,岩屑亲油不聚集等优点;ECOGREEN酯类合成基钻井液体系和RHELIANT流变性能不变的合成基钻井液体系,主要用于海上或深水钻探,清洁井底能力较强、重晶石悬浮能力和减小井漏能力较好,对海洋生态的破坏也比较小<sup>[46]</sup>。除此之外,贝克休斯INTEQ公司研制的Syn-TEQ合成基钻井液可耐温高于226.7℃,并且在高温下不水解<sup>[41]</sup>。美国休斯顿的EEX公司所研制的合成基钻井液,在墨西哥湾的高温井中,已被证实了耐温能达到226.7℃。

国内对抗高温合成基钻井液的研究较少。经过近几年的发展,中海油服也发展了比较成熟的合成基钻井液技术,研制出了一种以气制油为基油的合成基钻井液,可抗180℃的高温,曾在渤海以及印尼进行过现场试验,提高了30%的钻速,未发生井下安全事故,应用效果比国外同类的钻井液还要好。另外,胜利钻井泥浆公司也研制出了抗温高达200℃,密度在0.88~2.0 g/cm<sup>3</sup>的合成基钻井液,在郑41-平2井的强水敏性砂层四段地层现场得到了成功应用<sup>[46]</sup>。

### (4) 环保型钻井液

国外对环保型钻井液的研究较早,早在20世纪末M-I钻井液有限责任公司就针对温度高达232℃(450°F)的钻井应用,开发过一种环保的新型水性聚

合物系统,之后环保型钻井液也逐渐被人们所重视。目前,贝克休斯研制过一种新的水基泥浆体系,作为石油和合成乳液基泥浆(OBM/SBM)的一种高性能、保护环境的替代品。并且已在陆上、深水等地区进行过广泛的现场测试。还有Bechtel公司低粘低毒矿物油的LVT油基钻井液;美国Perish Bareid和BP公司专家研制的可生物降解的油包水钻井液等,也都在现场取得过良好的效果。

近几年在国内,中石油与中海油也均研发过环保型钻井液,如中国石油集团钻井工程技术研究院钻井液研究所研制出的一种抗高温(215℃)高密度(2.15 g/cm<sup>3</sup>)低毒油包水钻井液、中国石油海洋工程有限公司研制的耐高温(200℃)新型环保型水基聚合物体系、中国石油天然气集团公司钻井工程技术研究院研制的新型无毒高温聚合物钻井液。另外,还有一些国内学者提出了环保型钻井液设计的新原理和新方法,大大促进了我国环保型钻井液的发展。

除了上述的抗高温钻井液技术以外,中海油在近几年研发了高温高压钻完井液多功能智能工作平台,工作平台额定工作温度240℃,额定工作压力48 MPa,该平台既解决了高温深井温度、压力高的难题,也做到了一机多能,完成了包括高温高压滤失实验、缝隙堵漏实验、孔隙堵漏实验、岩屑分散实验、钻井液高温老化实验在内的5种钻完井液高温性能五种测试<sup>[47]</sup>。该钻完井液多功能智能工作平台的出现,为今后国内开发出更为先进的智能钻井液设备奠定了良好的基础。

## 2.5 钻头与高效破岩技术

钻头在钻进技术和钻进过程中永远都是处于核心的地位。目前国内外高温高压井所使用的最多的钻头是金刚石钻头,其中又以孕镶金刚石钻头和金刚石复合片钻头最具有代表性。而钻进技术的核心就是提高钻速,不仅关系到钻头,更是涉及到地层、提速工具、破岩方式、钻进参数的配合、井身结构、钻井液的特性与排量等诸多因素。

一般的高温高压井井深都很大,随着地层深度与温度的增加,钻头的使用寿命也在不断降低,所以近几年国内外对钻头的研究多在提高钻头的使用寿命上。例如,在国外菲律宾内格罗斯南部开发地,针对当地的超深井研究设计出了创新的圆锥形金刚石元件(CDE),并设计出相应的新型PDC钻头,如图6所示。与传统PDC钻头相比具有更高的冲击强度和耐磨性<sup>[48]</sup>。还有一些公司则从钻头的制造工艺上入手,如



图 6 新型 PDC 钻头切削结构<sup>[48]</sup>

Fig. 6 New PDC bit cutting structure<sup>[48]</sup>

斯伦贝谢公司研发的新型高温高压 PDC 钻头刀具制造技术, 提高了 PDC 的微结构强度并降低了钴含量, 从而提高了金刚石结构的热稳定性与耐磨性, 实验室测试表明, HTHP 刀具比标准 PDC 刀具具有更高的耐磨性和抗热疲劳性能, 提高了约 100%, 同时又不影响耐冲击性<sup>[49]</sup>。不仅如此, 国外还设计出了智能钻头。例如, 贝克休斯公司在 2017 年发布了行业内第一款自适应钻头—TerrAdapt, 该钻头上有一个调节装置, 可以根据地层岩石的情况, 自动调节钻头切削深度, 提高钻井速度<sup>[50]</sup>; 哈里伯顿推出了其新一代自适应钻头技术—Cruzer™ 深切削滚珠元件, 可以根据井下工况自动调整钻进参数, 大幅降低扭矩的同时还可以提高机械钻速, 增加钻井效益<sup>[51]</sup>。

在国内, 北京石油机械有限公司与中石油共同研发了一款专门用于高温高压井的带有空心刀具的新型 PDC 钻头<sup>[52]</sup>, 但目前还没有进行现场应用。还有一些学者, 对钻头进行了优化, 并且提出了新的想法, 比如高温高压井由于井底的压持效应原因, 开展了减压提速钻头方面的研究工作<sup>[53-55]</sup>, 通过改善井底环境来提高机械钻速等等。

对于高温高压下破岩方式的研究, 国内赵金昌研究发现, 在 4000 m 埋深静水压力下, 冲击破岩适用于温度不超过 150 °C 的坚硬岩石中的钻进, 不适合更高温度下的钻井; 切削破岩方式适合应用在温度大于 300 °C 的岩层钻进中; 冲击—切削复合钻进方式兼有二者特点, 适用于温度约 150~300 °C 的岩层钻进中<sup>[56]</sup>。

对于高效破岩技术, 可以采用提高钻头运行的稳定性, 给钻头提供稳定且充足的能量, 降低破岩的门限钻压与门限扭矩等方式来提高钻井效率, 降低成本。比如使用减振、隔振、降阻等工具及低压耗钻井

液; 优选合适的钻头、冲击类工具; 降低岩石抗压强度、优化井眼尺寸等<sup>[57]</sup>。如在中国的准格尔盆地的 Moshen-1 井, 采用了 35 MPa 高压喷射钻井技术、正排量电动机和 Power-V 技术、涡轮钻复合钻进技术、高温水基钻井液等技术, 成功的解决了该高温高压井所面临的难题<sup>[58]</sup>。还有国外在墨西哥湾曾使用过 Baker Hughes 公司的混合钻头技术<sup>[59]</sup>与 GE-Baker Hughes 的自适应 PDC 钻头技术, 都已被证实了可以提高钻速。

总之, 目前的坚硬地层, 高温高压等复杂井的钻井提速仍然是世界级难题。

## 2.6 测量与导向工具

国外对于 200 °C、105 MPa 之内的井, 哈里伯顿公司和斯伦贝谢公司已拥有成熟的测试技术; 对于 200~230 °C 之间的井, 据了解哈里伯顿公司和斯伦贝谢公司以此作为专项课题进行设计施工, 目前未见成功案例。其他的公司也有相应的技术, 如威德福公司 (Weatherford) 和雪弗龙公司 (Chevron) 合作开发的随钻测井技术服务 HEX, 贝克休斯公司推出的 FASTrak 随钻测井技术, 威德福公司的压力波随钻测井地层压力测试工具, 斯伦贝谢公司的地震随钻测量 (SWD, 图 7) 技术与多功能地震成像仪 (VSI, 图 8)<sup>[60-61]</sup>等。其中有些仪器的最高耐温耐压分别可以达到 210 °C 和 206.8 MPa。还有一些现场人员, 对测试工具与技术进行了改进, 均能够满足当时的现场需求<sup>[62-69]</sup>。

国内的高温高压井测试技术相比于国外来说起步较晚, 上世纪 90 年之后才逐渐发展起来。近几年在国内, 众多油田和公司均研究出了有相应的随钻测量新技术, 如大庆油田研发的 DQ-LWD 随钻测井仪器, 具有多参数近距离测量的特点, 工作温度 -40~150 °C, 仪器耐压 140 MPa, 可连续工作时间 200 h。渤海钻探油气井测试公司改良创新的高温高压测井工具与工艺<sup>[70]</sup>, 形成了 180 °C 以内、180~200 °C、200~230 °C 3 个系列测试工艺技术, 研制开发了耐温达 230 °C 套管测试密封件和裸眼测试胶筒, 井下工作时间分别大于 120 h 和 30 h, 研制的高温存储电子压力计可耐温 230 °C, 量程达 105 MPa, 工作时间大于 120 h, 压力精度达 0.02%。中石油的高温高压气井测试管柱优化配置<sup>[71]</sup>, 为满足库车山前超深储层测试需求, 通过研究和现场试验, 逐步优化管柱配置形成了以 3 种特色管柱结构, 如图 9 所示, 可以耐 109.61 MPa 的高压和 178 °C 的高温。中石油的随钻测井电阻率成像工具 (RIT)<sup>[72]</sup>、PPS 公司的井下永久动态监测系统 (PDMS) 等均在现场得到了有效的应用, 能够满足高温

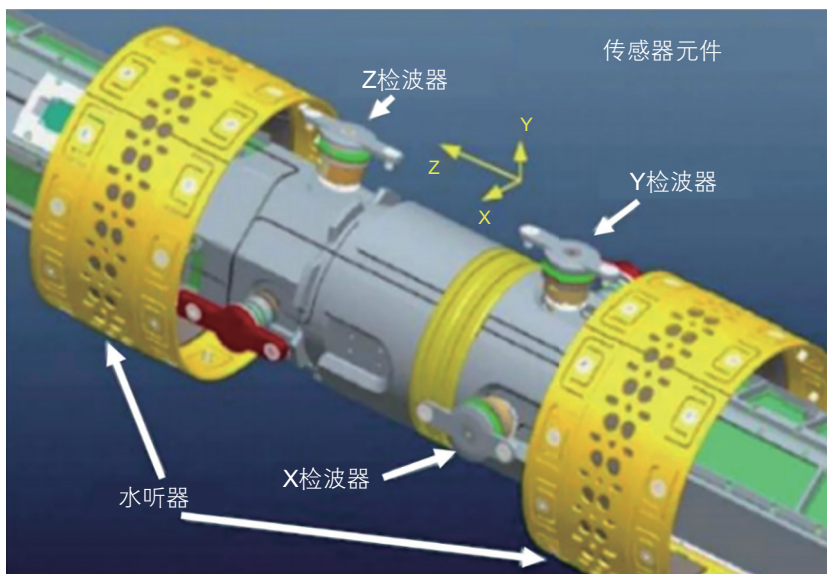


图7 斯伦贝谢公司的地震随钻测量(SWD)工具<sup>[60]</sup>

Fig. 7 Schlumberger Seismic While Drilling(SWD) tool<sup>[60]</sup>

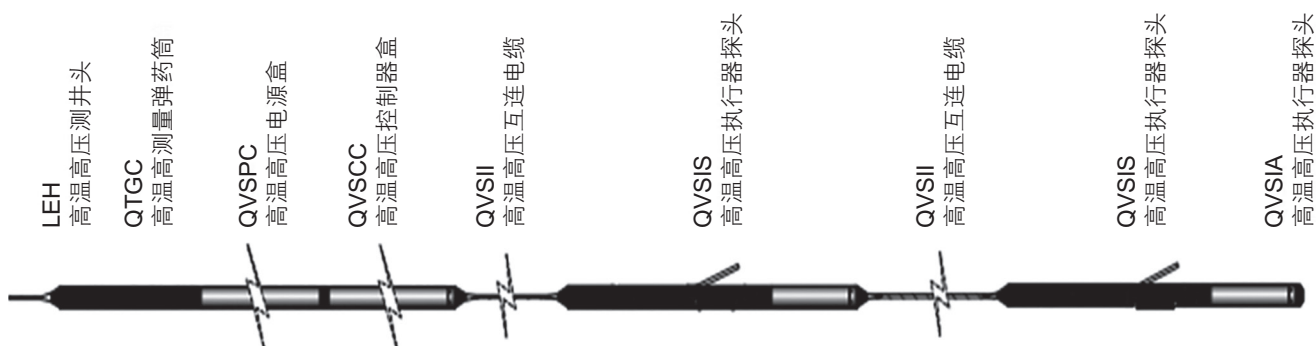


图8 斯伦贝谢公司的HPHT VSI工具串<sup>[61]</sup>

Fig. 8 Schlumberger's HPHT VSI tool string<sup>[61]</sup>

(160~230 °C)高压(100 MPa)的需求。对于高温高压环境下的随钻测量和导向工具,将会出现很高的故障率。中石油还研发了一套主动冷却技术,研究表明,井下冷却技术具有制冷能力大、体积小、适应性强、模块化等特点,大大提高了设备的承温上限<sup>[73]</sup>。

近年,智能测试技术也在国内外逐渐兴起,较为典型的是中石油针对深井酸性气层所研发的井下智能测试工具,形成了以电控开关阀工具为核心的井下多层智能测试工艺,目前已在华北、塔里木、吉林及冀东油田进行了58井次的地层测试,测试一次成功率达98.3%,解决了深井及酸性气层测试技术难题<sup>[74]</sup>。同样的,国外斯伦贝谢公司推出的Ora智能电缆地层测试平台,平台上的阀门、仪表和数百个其他关键系统组件都配备了智能控制系统,可以相互通信。而且平台具有200 °C和241 MPa的承温承压能力,平台建

立在数字基础架构上,可自动进行复杂的测试分析工作,能缩短运行时间50%以上,并可实现高精度流体分析,能够实时可靠地集成到油藏环境中,以便快速、明智地做出决策<sup>[75]</sup>。

对于高温高压井的导向系统,国内外存在明显差距。国外比较具有代表性的有斯伦贝谢公司研发的一种推靠式和指向式相结合的混合型旋转导向系统(Power Drive Archer系统),如图10所示。该系统4个钻井液控制的活塞靠在铰接式圆柱形导向套筒内部,然后通过万向节连接枢轴把钻头导向所需的方向,其每100 m最大造斜率可达18°,而且在钻井过程中能够建立井眼轨道智能控制算法,对钻井参数进行智能调控,自动修正经验轨迹,但是所适用的井深较浅,目前在我国的渤海绥中36-1油田和川东南地区页岩气水平井DY-3井都得到过成功的应用,能够有效解决

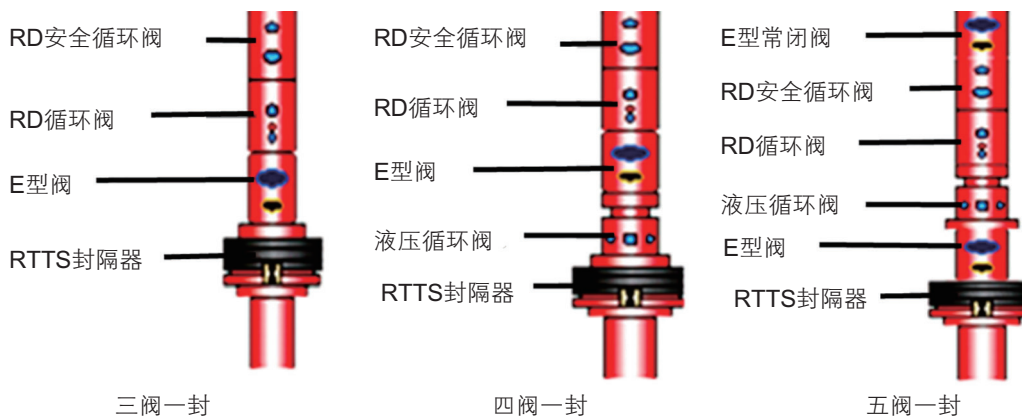


图 9 中石油的高温高压气井测试管柱<sup>[71]</sup>  
 Fig. 9 CNPC HTHP gas well test string<sup>[71]</sup>

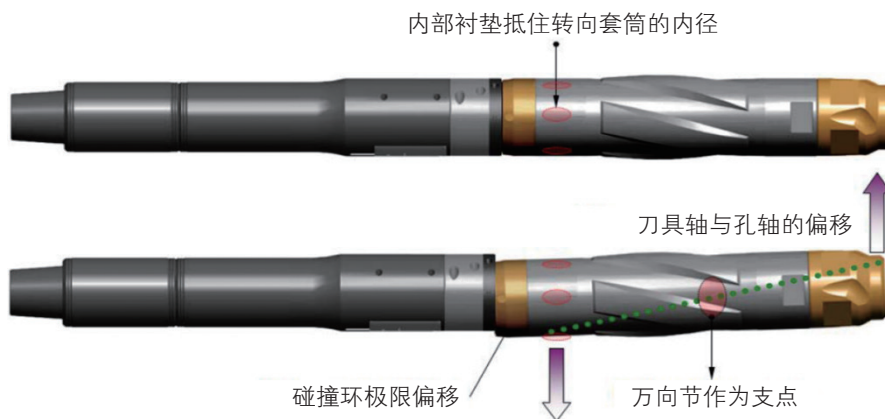


图 10 Power Drive Archer 系统  
 Fig. 10 Power Drive Archer system

轨迹跟踪控制和钻井提速方面的难题<sup>[76-77]</sup>。贝克休斯的 AutoTrak Curve 旋转导向系统，如图 11 所示。在传统旋转导向系统的基础上对导向力学、水力学和导向板进行重新设计，导向板能适应从软到硬以及研磨性等各种地层。为适应较高的井眼曲率，BHA 具有更强的柔性，且配备了 MWD，能保证对井眼轨迹的精确控制，每 30 m 造斜率可达 15°。可以提高 3 倍的机械钻速，并且可以适用更大的井深，其在国内桑塔木油田的 LN14-1CH 井以及海上赵东平台都得到过成功应用，提高钻速的同时还缩短了钻井周期，提高了经济效益<sup>[78-79]</sup>。威德福公司的 Motary Steerable 定向转速控制技术 (Targeted bit speed, TBS) 综合了容积式马达和旋转导向系统的特点，性能优于前者，成本低于后者，填补了两者之间的空白，在旋转钻井的造斜率每 30 m 最高可达 3°。另外，壳牌公司针对北美 Haynesville 页岩气勘探，该区井底最高温度可达 188 °C，最高压力可达 62 MPa，公司通过优化旋转轴的外径，采用不锈钢材质，最终克服了高温高压环境下定向钻井工具

失效等问题。这些，都为国内高温高压井的导向工具上的研究提供了宝贵的经验。

### 3 高温高压钻井关键技术发展展望

目前国内外高温高压钻井关键技术中，最有待解决的就是高温的问题，对于国内来说，井下 175 °C 是一个坎，许多国内的钻井设备与技术面临这个温度时都会产生一系列问题，而且与国外的先进水平相比，尚有一定差距。在未来高温高压钻井关键技术的发展中，如何持续保持安全、低成本、高效作业，仍是国内外需要努力的方向。因此，对未来高温高压钻井关键技术的发展提出以下建议：

#### (1) 地层压力预测技术

要研究更为精确的地震速度分析方法，更为完善的三维地质应力建模预测方法；预测上要充分考虑地质和沉积因素，按照多种机理分别进行压力计算；还要尝试人工智能的地层压力预测新方法以及基于有效



图 11 AutoTrak Curve 旋转导向系统

Fig. 11 AutoTrak Curve rotary steering system

应力定理反映非正常超压非微观机制的分析方法。在井壁稳定性控制方面，需要形成结合井身结构优化设计、环空ECD精准预测与监测、精细控压钻井和堵漏等提高薄弱地层承压能力的配套工艺技术对策，并发展智能化井筒安全控制钻井技术。

### (3) 井身结构设计技术

井身结构技术应不断向定向井和水平井方向发展，且形成更为先进、安全、精简、高效的井身结构技术；不断的提高相关器具耐高温耐高压耐腐蚀的极限；优化套管尺寸和钻头尺寸的选择，套管与井眼间隙的配合；配套工具的研发应该软硬结合，达到更高的稳定性和测量精度，形成智能化井身结构设计技术体系。

### (4) 控压钻井技术

研制更为精密、先进且适用于国内油田地层特征的配套设备，尤其是高压级别的防喷器、井口连续循环装置等；研究更多适用于高温高压地层控压钻井的配套技术；对多相流流动规律进行深入，研发控压钻井技术相关的水力学计算软件；加大对精细控压钻井技术与自动化控压钻井技术的研究<sup>[80]</sup>。

### (5) 抗高温钻井液技术

注重低成本以及天然的材料开发，注重天然高分子的物质活化以及氧化处理；加大对抗高温钻井液以及抗高温钻井液处理剂的研究力度，以满足极端环境下的钻井需求；注重大位移井以及水平井的钻井液技术开发。

### (6) 钻头与高效破岩技术

加强对前沿破岩技术的研究；加大对新型钻头与

辅助破岩技术的研发力度；研究出新型的钻头与辅助破岩工具的优选方法。

### (7) 钻井新工具(随钻测量、导向工具)

进一步加强对随钻测井仪器数据传输速率、耐高温、耐高压、稳定性等方面的研发力度，提高随钻测量技术的高可靠性和稳定性；加大对高端随钻工具与仪器的开发；发展无线传输钻井、全方位探测、近钻头测量等方面的新技术。

## 4 结论

高温高压钻井除了要面临高温高压的挑战，还要克服地层压力预测难、井控难、钻井事故频发、井身结构复杂、钻井液流变性差、机械钻速低、钻井设备使用寿命短等一系列难题。如何实现高温高压井安全高效的钻进，仍是国内外共同需要努力的方向。虽然目前国内外高温高压井的钻井技术取得了一定成果，但是仍受到许多限制，而且对于高温高压非常规井的钻井技术研究也十分缺乏。因此，仍要加大对高温高压钻井技术的研究力度，特别是国内，有些技术与国外有着较大的差距，国内应继续跟踪加强研究，以满足日益苛刻的钻井需求。相信随着技术与装备的不断完善和市场的不断推动，高温高压钻井技术也将稳步攀升。总的来说，过去10年高温高压钻井技术得到了快速的发展，取得了很大的成就；但是，随着深层、深水等高温高压油气藏开发环境变得日益苛刻，高温高压钻井面临着越来越多的挑战与机遇。

## 参考文献

- [1] 方勇. 高温高压井地层测试技术在牛东潜山的应用[D]. 东北石油大学, 2016. [FANG Y. Application of high temperature and high pressure well formation testing technology in Niudong buried hill[D]. Northeast Petroleum University, 2016.]
- [2] YIN Q S, YANG J. Operational designs and applications of MPD in offshore Ultra-HTHP exploration wells[C]. IADC/SPE-191060-MS, 2018.

- [3] 王永生. 深井超高温钻井液技术综述[J]. 中国高新技术企业, 2012(Z2): 129–131. [WANG Y S. Summary of ultra-high temperature drilling fluid technology in deep wells[J]. China High Technology Enterprises, 2012(Z2): 129–131.]
- [4] 吴海东. 高温条件下金刚石钻头钻进实验研究[D]. 吉林大学, 2017. [WU H D. Experimental study on diamond bit drilling under high temperature[D]. Jilin University, 2017.]
- [5] HUANG Y, LUO M, LI W T, et al. Application of formation pressure while drilling prediction technology in offshore HTHP wells[C]. ARMA-CUPB-19-6386, 2019.
- [6] 徐路. 碳酸盐岩地层压力预测研究[D]. 中国石油大学, 2011. [XU L. Prediction of carbonate formation pressure[D]. China University of Petroleum, 2011.]
- [7] DUTTA N C. Shale compaction, burial diagenesis, and geopressures[A]: A dynamic model, results and some results[C]. In: J. Burrus(Ed). Thermal Modeling in Sedimentary Basins, 1986.
- [8] LEE S, REILLY J, LOWE R, et al. Accurate pore pressure and fracture pressure prediction using seismic velocities—An aid to deep water exploration and drilling design[J]. SEG Annual meeting, Expanded abstracts. 1997, 2013~2016.
- [9] 蔡军. 基于三维地质建模的地层压力预测方法及应用研究[D]. 中国石油大学, 2011. [CAI J. Formation pressure prediction method based on 3D geological modeling and its application[D]. China University of Petroleum, 2011.]
- [10] 樊建华, 李瑞娟, 赵清平, 等. 基于地震的地层压力预测在渤中凹陷西南地区的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(05): 571–575. [FAN J H, LI R J, ZHAO Q P, et al. Application of formation pressure prediction based on earthquake in southwest area of Bozhong depression[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(05): 571–575.]
- [11] 刘爱群, 周家雄, 范彩伟, 等. 莺琼盆地高温超压地层钻前压力预测面临的问题与对策[J]. 天然气工业, 2015, 35(02): 21–26. [LIU A Q, ZHOU J X, FAN C W, et al. Problems and countermeasures of pre drilling pressure prediction in high temperature and overpressure formation in Yingqiong Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(02): 21–26.]
- [12] 屈大鹏, 陈超, 王明飞, 等. 川东南地区基于海相泥页岩地层的压力系数预测——以丁山区块为例[J]. 物探与化探, 2016, 40(02): 349–352+389. [QU D P, CHEN C, WANG M F, et al. Prediction of pressure coefficient based on marine shale formation in Southeast Sichuan: A case study of Dingshan block[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(02): 349–352+389.]
- [13] 于四海. 地层压力预测技术现状及发展趋势[J]. 化工管理, 2016(14): 134. [YU S H. Present situation and development trend of formation pressure prediction technology. Chemical Enterprise Management, 2016 (14): 134.]
- [14] 彭海龙, 刘兵, 赫建伟, 等. 深水盆地高温高压环境下的地层压力预测方法[J]. 天然气工业, 2018, 38(03): 24–30. [PENG H L, LIU B, HAO J W, et al. Formation pressure prediction method under high temperature and high pressure in deep water basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(03): 24–30.]
- [15] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油藏效益勘探开发的必由之路[J]. 中国石油探, 2017, 22(1): 1–5. [HU W R. Geology-engineering integration a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1–5.]
- [16] 张辉, 杨海军, 尹国庆, 等. 地质工程一体化关键技术克拉苏构造带高效开发中的应用实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(02): 120–132. [ZHANG H, YANG H J, YIN G Q, et al. Application of key technologies of geological engineering integration in high efficiency development of Kelasu structural belt[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(02): 120–132.]
- [17] 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(02): 142–154. [LIAO G L, GUO S S, HU Y T, et al. Practice of geological engineering integration concept in high temperature and high pressure wells in South China Sea[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(02): 142–154.]
- [18] ZHANG H, QIU K B, FULLER J, et al. Geomechanical-evaluation enabled successful stimulation of a high-pressure/high-temperature tight gas reservoir in Western China[J]. SPE Drill & Compl, 2015, 30 (04): 274–294.
- [19] 王斌. 缅甸X区块高陡构造漏失规律及预测方法研究[D]. 中国地质大学(北京), 2010. [WANG B. Study on leakage law and prediction method of high steep structure in block X of Myanmar[D]. China University of Geosciences, Beijing, 2010.]
- [20] 秦疆, 杨顺辉, 宋战培, 等. 沙特B区块高温高压深气井配套钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(05): 51–55. [QIN J, YANG S H, SONG Z P, et al. Matching drilling technology for HTHP deep gas wells in Block B of Saudi Arabia[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(05): 51–55.]
- [21] 罗鸣, 韩成, 陈浩东, 等. 南海西部高温高压井堵漏技术[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(06): 801–804. [LUO M, HAN C, CHEN H D, et al. Lost circulation technology for high temperature and high pressure wells in western South China Sea[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(06): 801–804.]
- [22] 孙金声, 雷少飞, 白英睿, 等. 智能材料在钻井液堵漏领域研究进展和应用展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(04): 100–110. [SUN J S, LEI S F, BAI Y R, et al. Research progress and application prospect of intelligent materials in lost circulation field of drilling fluid[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2020, 44(04): 100–110.]
- [23] DASGUPTA D, SUYAN K, BANERJEE S, et al. Successful casing cementation in total loss conditions-Case histories[C]. SPE-125660-MS, 2009.

- [24] LI L, ALEGRIA A, DOAN A A, et al. Application of a novel cement spacer with biodegradable polymer to improve zonal isolation in HTHP wells[C]. OTC-27048-MS, 2016.
- [25] BRANDL A, BRAY S, MAGELKY C, et al. An innovative cement spacer with biodegradable components effectively sealing sever lost circulation zones[C]. OMC-2011-067, 2011.
- [26] JIANG T W, XIAN C G, YANG X T, et al. A geoengineering long march to success: An overview of the development of Keshen Gas Field in Kucha Foreland Basin[C]. IPTC-19483-MS, 2019.
- [27] 葛鹏飞, 马庆涛, 张栋. 元坝地区超深井井身结构优化及应用[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4): 83-86. [GE P F, MA Q T, CHANG D. Optimization and application of ultra deep well casing structure in Yuanba area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(4): 83-86.]
- [28] 李楠. 南方海相地区非常规井身结构设计研究[D]. 中国石油大学, 2010. [LI N. Study on unconventional well structure design in marine area of South China[D]. China University of Petroleum, 2011.]
- [29] GUO Y B, LI X C, FENG S B, et al. Cementing practices to solve well integrity challenges of ultra deep high temperature wells in Western China[C]. SPE-182967-MS, 2016.
- [30] 余荣华, 袁鹏斌. 随钻扩眼技术研究进展[J]. 石油机械, 2016, 44(08): 6-10. [YU R H, YUAN P B. Development of reaming while drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(08): 6-10.]
- [31] 吴江, 李炎军, 罗鸣, 等. 南海莺—琼盆地复杂压力层系井身结构优化设计[J]. 中国海上油气, 2018, 30(02): 126-131. [WU J, LI Y J, LUO M, et al. Optimization design of wellbore structure for complex pressure strata in Ying Qiong basin, South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(02): 126-131.]
- [32] 王佑林. 国外精确控压钻井技术进展研究[J]. 江汉石油科技, 2019, 29(03): 49-52. [WANG Y L. Research on development of precision pressure control drilling technology abroad[J]. Jianghan Petroleum Science and Technology, 2019, 29(03): 49-52.]
- [33] LAU C, PRASETIA A K, YUN L, et al. Hydrostatically underbalanced managed pressure cementing enables zonal isolation in narrow-margin HPHT exploration well[C]. SPE-186981-MS, 2017.
- [34] FICETTI S, ALMAGRO S B, ALDANA S, et al. Innovative techniques for unconventional reservoirs: Managed pressure cementing application in Western Argentina Shale Formations[C]. SPE-179716-MS, 2016.
- [35] ROSTAMI S A, MIRRAJABI M, STOIAN E, et al. Managed cressure cementing in HPHT utilizing real time pressure estimation and control software - A case study[C]. OTC-27919-MS, 2017.
- [36] WAHID F, TAJALIE A F A, TAOUTAOU S, et al. Successful cementing of ultra HTHP wells under managed pressure drilling technique[C]. IPTC-17749-MS, 2014.
- [37] 周英操, 刘伟. PCDS精细控压钻井技术新进展[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(03): 68-74. [ZHOU Y C, LIU W. New development of PCDS precision pressure control drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(03): 68-74.]
- [38] 孙海芳, 冯京海, 肖新宇, 等. 川庆钻探工程公司精细控压钻井系统研发及应用[J]. 钻采工艺, 2012, 35(02): 1-4+6. [SUN H F, FENG J H, XIAO X Y, et al. Development and application of fine pressure control drilling system in Chuanqing drilling engineering company[J]. Drilling & Production Technology, 2012, 35(02): 1-4+6.]
- [39] 张利生, 宋周成, 白登相, 等. 注气控压钻井技术在塔里木油田的应用[J]. 长江大学学报(自然科学版)理工卷, 2008, 5(03): 168-170. [ZHANG L S, SONG Z C, BAI D X, et al. Application of gas injection pressure control drilling technology in Tarim Oilfield[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) SCI & ENG, 2008, 5(03): 168-170.]
- [40] 毛惠. 超高温超高密度水基钻井液技术研究[D]. 中国石油大学(华东), 2017. [MAO H. Research on ultra high temperature and ultra high density water based drilling fluid technology[D]. China University of Petroleum, 2017.]
- [41] 李斌. 抗高温钻井液技术研究与应[D]. 山东大学, 2008. [LI B. Research and application of high temperature resistant drilling fluid technology[D]. Shandong University, 2008.]
- [42] 蒲亮春. 抗高温高密度水基钻井液体系的应用研究[D]. 西南石油大学, 2014. [PU C L. Application of high temperature and high density water based drilling fluid system[D]. Southwest Petroleum University, 2014.]
- [43] 刘亚. 高温高密度油基钻井液配方研究[D]. 重庆科技学院, 2016. [LIU Y. Study on formulation of high temperature and high density oil based drilling fluid[D]. Chongqing University of Science and Technology, 2016.]
- [44] 李建成, 杨鹏, 关键, 等. 新型全油基钻井液体系[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(4): 490-496. [LI J C, YANG P, GUAN J, et al. New all oil based drilling fluid system[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(4): 490-496.]
- [45] 李哲. 抗高温油基钻井液体系的研制[D]. 中国石油大学, 2011. [LI Z. Development of high temperature resistant oil based drilling fluid system[D]. China University of Petroleum, 2011.]
- [46] 可点. 环保型气制油合成基钻井液体系研究[D]. 中国石油大学(北京), 2017. [KE D. Study on environment friendly synthetic drilling fluid system[D]. China University of Petroleum, Beijing, 2017.]
- [47] 江安, 孙红瑛, 斯旭, 等. 高温高压钻完井液多功能智能工作平台[J]. 化学工程与装备, 2015(04): 136-137+129. [JIANG A, SUN H Y, SI X, et al. Multifunctional intelligent working platform for HTHP drilling and completion fluid[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015(04): 136-137+129.]

- [48] ISKANDAR F F, FANTI D, LIANG T T. Innovative conical diamond element bits deliver superior performance drilling a geothermal well in the Philippines[C]. OTC-26421-MS, 2016.
- [49] HUSSEIN A, AL-ANEZI N A, AL-SARRAF A Q, et al. Thermally stable cutter technology advances PDC performance in hard and abrasive formations, Kuwait[C]. IPTC-16424-MS, 2013.
- [50] 兰雪梅. 贝克休斯公司发布第一款自适应钻头[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(03): 127. [LAN X M. Baker hughes released the first adaptive bit[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2017, 40(03): 127.]
- [51] 李根生, 宋先知, 田守增. 智能钻井技术研究现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(01): 1-8. [LI G S, SONG X Z, TIAN S Z. Research status and development trend of intelligent drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(01): 1-8.]
- [52] ZHANG H Y, CHEN H C, LIU F, et al. New PDC bit with hollowed cutters: with increased ROP and longer service life[C]. SPE-197771-MS, 2019.
- [53] 朱海燕, 邓金根, 王墨翟, 等. 涡流钻头降压机制及设计原则[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 64-69. [ZHU H Y, DENG J G, WANG M Y, et al. Depressurization mechanism and design principle of vortex bit[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014, 38(1): 64-69.]
- [54] 朱海燕, 邓金根, 何玉发, 等. 水力射流降低井底压差技术[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(02): 50-56. [ZHU H Y, DENG J G, HE Y F, et al. Technology of reducing bottom hole pressure difference by hydraulic jet[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2013, 37(02): 50-56.]
- [55] ZHU H Y, DENG J G, XIE Y H, et al. Rock mechanics characteristic of complex formation and faster drilling techniques in Western South China Sea oilfields[J]. Ocean Engineering, 2012, 39(44): 33-45.
- [56] 赵金昌. 高温高压条件下冲击一切削钻孔破岩实验研究[D]. 太原理工大学, 2010. [ZHAO J C. Experimental study on rock breaking by impact cutting drilling under high temperature and high pressure[D]. Taiyuan University of Technology, 2010.]
- [57] 胡群爱, 孙连忠, 张进双, 等. 硬地层稳压稳扭钻井提速技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(03): 107-112. [HU Q A, SUN L Z, ZHANG J S, et al. Speed increasing technology of stable pressure and torsion drilling in hard formation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(03): 107-112.]
- [58] LIU Z. Drilling technology of HTHP ultradeep well and the crucial technique application[C]. SPE-131799-MS, 2010.
- [59] CHOWDHURY A R, CALLAIS R, ROTHE M, et al. Mitigating salt and sub-salt drilling challenges using hybrid bit technology in deepwater, gulf of Mexico[C]. SPE-180342-MS, 2016.
- [60] GUO S S, GAO Y D, CHEN M, et al. The first application of seismic while drilling technology in HTHP offshore exploration well of South China Sea[C]. SPE-192120-MS, 2018.
- [61] IMAI R, ENDO T, TULETT J, et al. High-pressure, high-temperature tool for borehole seismic acquisition. Society of petrophysicists and well-log analysts[C]. SPWLA-JFES-2013-C, 2013.
- [62] AKBAR D, SIMANJUNTAK T M, KRISTIANAWATIE N. The successful planning and implementation of high angle deviated HPHT well testing in the sour naturally fractured gas reservoir: Case study of S-3 well[C]. SPE-146978-MS, 2011.
- [63] SL-SALALI Y Z, AL-BADER H, DUGGIRALA V S, et al. Challenges in testing and completion of highly sour HPHT reservoir in the State of Kuwait[C]. SPE-167647-MS, 2013.
- [64] FOSSA A, MACKENZIE D W, NILSSON C, et al. HPHT gas-condensate well testing for shell's onyx SW prospect[C]. SPE-108665-MS, 2007.
- [65] LABBASSEN N, AL-MARZOUQI A M M, SLATEWALA H S S, et al. First time offshore Abu Dhabi-Successful appraisal drill stem testing operations in extreme sour environment - A case study[C]. SPE-183371-MS, 2016.
- [66] SALGUERO A, ALMANZA E A, HADDAD J R. Challenging well-Testing operations in high-temperature environments-worldwide experiences and best practices learned[C]. OTC-21060-MS, 2010.
- [67] LBRAHIM A M, AYYAVOO M M, SUBBAN P, et al. A paradigm shift in testing and completion of deep HPHT exploration wells - Polished Bore Receptacle (PBR) improves results and operational flexibility[C]. IPTC-14913-MS, 2011.
- [68] PONTES T. Case study: Downhole testing tools for formation evaluation in high-pressure and high-temperature environments[C]. SPE-128965-MS, 2010.
- [69] STOLBOUSHKIN E, ZUKLIC S, FUXA J. Design and development of an HPHT drillstem testing valve: A case study in HPHT tool design[C]. OTC-25844-MS, 2015.
- [70] 朱礼斌, 王元龙, 贾文义, 等. 超高温高压井测试工具研制与应用[J]. 油气井测试, 2014(3): 64-65. [ZHU L B, WANG Y L, JIA W Y, et al. Development and application of testing tools for ultra high temperature and high pressure wells[J]. Well Testing, 2014(3): 64-65.]
- [71] 刘洪涛, 黎丽丽, 吴军, 等. 库车山前高温高压气井测试管柱优化配置与应用[J]. 钻采工艺, 2016(5): 42-45. [LIU H T, PAN L L, WU J, et al. Optimized configuration and application of testing string in high temperature and high pressure gas well in Kuqa mountain front[J]. Drilling & Production Technology, 2016(5): 42-45.]
- [72] LI A Z, LI C W, CHEN S J, et al. Imaging, high resistivity carbonate reservoir delineation and well placement - Application of a new HTHP



- resistivity imaging while drilling tool in China[C]. SPWLA-2019-AAAAA, 2019.
- [73] GAO W K, LIU K, JIA H T, HONG D F, TENG X M. Challenge of temperature control for downhole instruments in HTHP reservoir[C]. SPE-195712-MS, 2019.
- [74] 蒋宏伟, 周英操, 石林, 等. 深井钻录、测试技术和配套装备创新进展及应用[J]. 石油科技论坛, 2017, 36(02): 32-37. [JIANG H W, ZHOU Y C, SHI L, et al. Deep well drilling and logging, testing technology and supporting equipment innovation progress and application[J]. Oil Forum, 2017, 36(02): 32-37.]
- [75] 石钻. 斯伦贝谢公司推出智能电缆测井测试平台[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(06): 39. [SHI Z. Schlumberger launches smart cable logging test platform[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(06): 39.]
- [76] 余海峰. Power Drive Archer旋转导向系统在页岩气水平井的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(16): 103-104. [YU H F. Application of power drive Archer rotary steering system in shale gas horizontal wells[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(16): 103-104.]
- [77] 刘鹏飞, 和鹏飞, 李凡, 等. Power Drive Archer型旋转导向系统在绥中油田应用[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(06): 65-68. [LIU P F, HE P F, LI F, et al. Application of power drive Archer rotary steering system in Suizhong Oilfield[J]. Oil Field Equipment, 2014, 43(06): 65-68.]
- [78] 郑鹏, 张港生, 吴冬凤. AutoTrak旋转导向工具现场应用分析[J]. 中国石油石化, 2016(24): 31-32. [ZHENG P, ZHANG G S, WU D F. Field application analysis of autotrak rotary guide tool[J]. China Oil, Gas & Petrochemicals, 2016(24): 31-32.]
- [79] 张飞. AutoTrak旋转导向闭环钻井系统在赵东平台的应用[J]. 石化技术, 2017, 24(09): 43+54. [ZHANG F. Application of autotrak rotary steering closed loop drilling system in Zhaodong platform[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(09): 43+54.]
- [80] 魏耀奇. 控压钻井技术发展现状[J]. 石化技术, 2017, 24(03): 295. [WEI Y Q. Development status of pressure control drilling technology [J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(03): 295.]

(责任编辑 林伯韬 编辑 马桂霞)