

连续循环系统在科学超深井中的需求分析

梁健, 李鑫森, 王汉宝, 孙建华

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 作为“入地”重要手段的科学深井、超深井工程是研究深部地质学的重要方法, 被誉为“伸入地壳的望远镜”。科学超深井井内超高温高压成为钻井作业中突出的技术难题之一, 其对钻井液、井底动力机具、井下检测仪器、铝合金钻柱提出了极为苛刻的要求, 致使工程难度增大、风险提高、工期加长。通过对科学超深井钻井工程特点的总结, 分析了钻井液连续循环对井眼稳定性和井底温度的影响, 得出了连续循环系统对于科学超深井钻井作业具有较强的技术需求的结论。对我国未来万米科学超深钻计划提供了技术支持。

关键词: 连续循环系统; 科学超深井; 超高温高压; 需求分析

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2015)04-0001-05

Requirement Analysis on Continuous Circulation System for Scientific Ultra-deep Drilling/LIANG Jian, LI Xin-miao, WANG Han-bao, SUN Jian-hua (The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: As the important means of “drilling down into deep earth”, scientific deep drilling and ultra-deep drilling become important methods, which are known as “telescope into the earth’s crust”. Ultra-high temperature and high pressure in scientific ultra-deep well is one of the most prominent technical difficulties in drilling operation, so rigorous standards were put forward to the drilling fluid, down-hole motor, aluminum alloy drill pipe and so on, the project becomes more difficult with higher risk and prolonged construction duration. This paper summarizes the characteristics of scientific ultra-deep drilling engineering and analyzes the effect of drilling fluid continuous circulation on borehole stability and downhole temperature, it is concluded that scientific ultra-deep well has strong technical demand for continuous circulation system and this system would provide technical support for future scientific ultra-deep drilling program in China.

Key words: continuous circulation system; scientific ultra-deep drilling; ultra-high temperature and high pressure; requirement analysis

0 引言

全球性、统一性的地球系统科学理念逐渐成为引领新世纪地球科学的发展方向, 地球科学研究的范围不断扩展, 形成了完整的“上天、入地、下海、登极”的研究体系。《国土资源“十二五”科学和技术发展规划》提出“在关键大地构造部位、重大含油气盆地、重要成矿区带和重点矿集区部署科学群钻和万米深钻, 为地壳深部探测建立直接的标尺”。科学深井、超深井工程作为研究深部地质学的重要方法之一, 是“入地”的重要手段, 是地壳深处的“人工观测点、实验站”, 被誉为“伸入地壳的望远镜”, 其理论研究和实施过程是一项超复杂的系统工程, 更是我国地质科学发展的重要里程碑^[1-6]。面对一项系统庞大的勘探工程, 须就其关键技术难题展开

攻关, 研究出切实可行的工艺技术体系和相应的钻井工具与设备。

井内超高温高压将成为钻井作业中最突出的技术难题之一, 是我们需要重点关注的问题, 超高温高压技术体系分类^[7]见图1。万米科学超深井井底地温将达到300~400℃, 压力最大可达200 MPa, 其对钻井液、井底动力机具、井下检测仪器、铝合金钻柱提出了极为苛刻的要求, 致使工程难度增大、风险提高、工期加长。连续循环钻井技术, 即在钻井各环节中实现钻井液的持续循环, 可在钻井施工各环节中稳定地降低钻井液温度、保持适合的钻井压力, 提高井壁的稳定性的同时, 还可放宽对钻井液、井底动力钻具和测井仪器的技术要求, 大幅降低工程成本、减小施工风险等。本文进行的连续循环钻井技术在

收稿日期: 2015-01-21; 修回日期: 2015-03-18

基金项目: 国土资源部深部地质钻探技术重点实验室开放课题“超深井连续循环钻进技术预研究”(编号: NLS201205); 中国地质调查局地质调查工作项目“地质勘查深孔用高强度铝合金钻杆开发应用”(编号: 12120113016600)

作者简介: 梁健, 男, 汉族, 1980年生, 高级工程师, 硕士, 从事与钻探工程有关的科研工作, 河北省廊坊市金光道77号, raul9942718@163.com。

科学超深井中的需求分析,期望对为我国正在实施的6400 m科钻深井“松辽盆地资源与环境深部钻井”工程提供理论支撑;同时,为满足我国《国土资源“十二五”科学和技术发展规划》中提出实施的万米科学深钻计划提供技术支持。

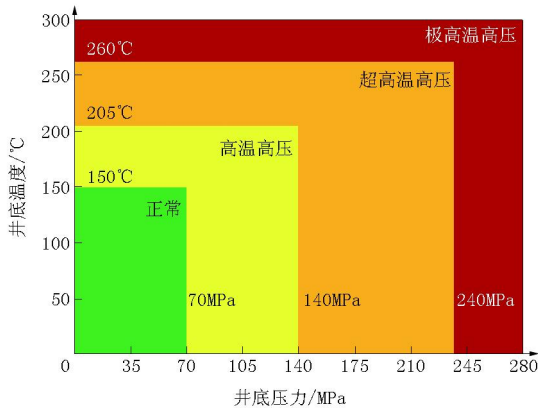


图1 高温高压井分类体系

1 科学超深井钻井工程特点

科学超深井钻井作业过程中,除地层条件复杂及不确定性外,预计将遇到的困难与挑战可概括为“热、高、长、大”,即“井温高、压力高、管柱长、井径大”。因此,必须重视和处理好耐高温高压稳定性好的优质钻井液,设计好合理的井身结构并坚持平衡钻井,做好超长钻柱设计及选材,处理好压力变化幅度等敏感问题^[8-12]。

1.1 地质条件的复杂性及不确定性

科学超深井钻井工程存在地层压力系统多、裸眼井段长、井壁稳定性差以及深部岩石可钻性差等特点;同时,山前构造、高陡构造、复杂难钻地层、各向地应力集中、地层压力异常、地层塑性流变、高矿化度及高硫化氢质量浓度等复杂地质条件将带来的一系列钻井技术难题;科学超深井钻井工程还具有地层压力、岩石力学特性、应力非均质性、地层状态及岩性、地层分层厚度和完井深度不确定性等特点,严重影响了工程总体设计的科学性、钻井技术措施的针对性与有效性,增大了事故预防与处理的难度。

1.2 超高温、超高压联合作用

正常的地温梯度为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,对于万米科学超深井来讲,其地温将达到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$;同时,按静水柱压力估算(设泥浆密度 $1.2\text{ g}/\text{cm}^3$),万米科学超深井底压力将达 120 MPa ,几大科学深井、超深井的井底温度^[11]及液柱压力见表1。如此,在超高温、超

高压联合作用下,地层孔隙压力接近破裂压力造成窄密度窗口问题,增加了钻井液设计和当量循环密度控制难度;其次,高温环境对钻井液中粘土和处理剂产生影响,引起钻井液性能变化。另外,超高温高压对螺杆马达、随钻测量系统等井下工具中脆弱的传感器及电子元件产生较大影响,导致工具使用寿命大幅降低;同时,超高温下橡胶密封件易受腐蚀和分解,造成钻井及井控设备工具的密封失效。

表1 科学深井、超深井井底温度及液柱压力

名称	井深/m	井底温度/°C	液柱压力/MPa	国别
科拉半岛 SG-3	12262	220	147.1	俄罗斯
KTB 主孔	9101	267	109.2	德国
松科二井 SK-2	6400	242~266	76.8	中国

目前,主要钻井器材的耐温能力及其发展潜力^[9,13],见图2。

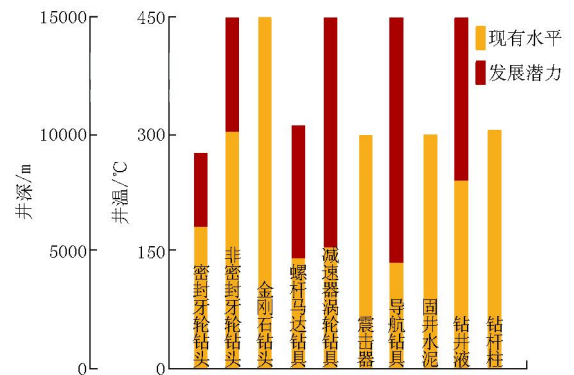


图2 现有主要钻进器材的耐温能力及发展潜力

2 科学超深井对连续循环系统的需求分析

2.1 连续循环钻井技术优越性

连续循环钻井系统作为机电液一体化钻井新装备(其系统技术参数见表2),主要是利用主机腔体总成闸板的开合,形成和控制主机上下密封腔室的连通与隔离;与分流管汇配合,完成密闭腔室内钻井液通道的分流切换,实现在接单根中钻井液的不间断循环;利用动力钳、平衡补偿装置和腔体背钳的协同动作,实现在密封腔室内钻杆的自动上卸扣操作^[14-15],其系统原理见图3。与停止钻井液井内循环加接钻杆单根相比,应用连续循环钻井系统具有以下技术优越性^[16-19]。

(1) 能够使钻头仍留在井底或接近井底,加接单根后,避免了钻头在进尺前对岩屑的重复切削;

(2) 消除了先要清除BHA(Bottom hole assembly)

表 2 连续循环钻井系统技术参数

研制单位	最大工作压力/MPa	循环排量/ (L·min ⁻¹)	适用钻杆 规格/mm	最大卸扣扭 矩/(kN·m)
MARIS 与 NOV	34.5	5455	88.9 ~ 149.2	96.8
中石油钻井院	35.0	3000	88.9 ~ 139.7	98.0

和钻铤周围环空岩屑的需要,并使岩屑在钻柱与孔壁间的环空间隙均匀分布,提高了井眼的清洁度;

(3)减少了所需钻井液的胶凝强度,即静切力,并可形成近稳态的钻井液循环条件;

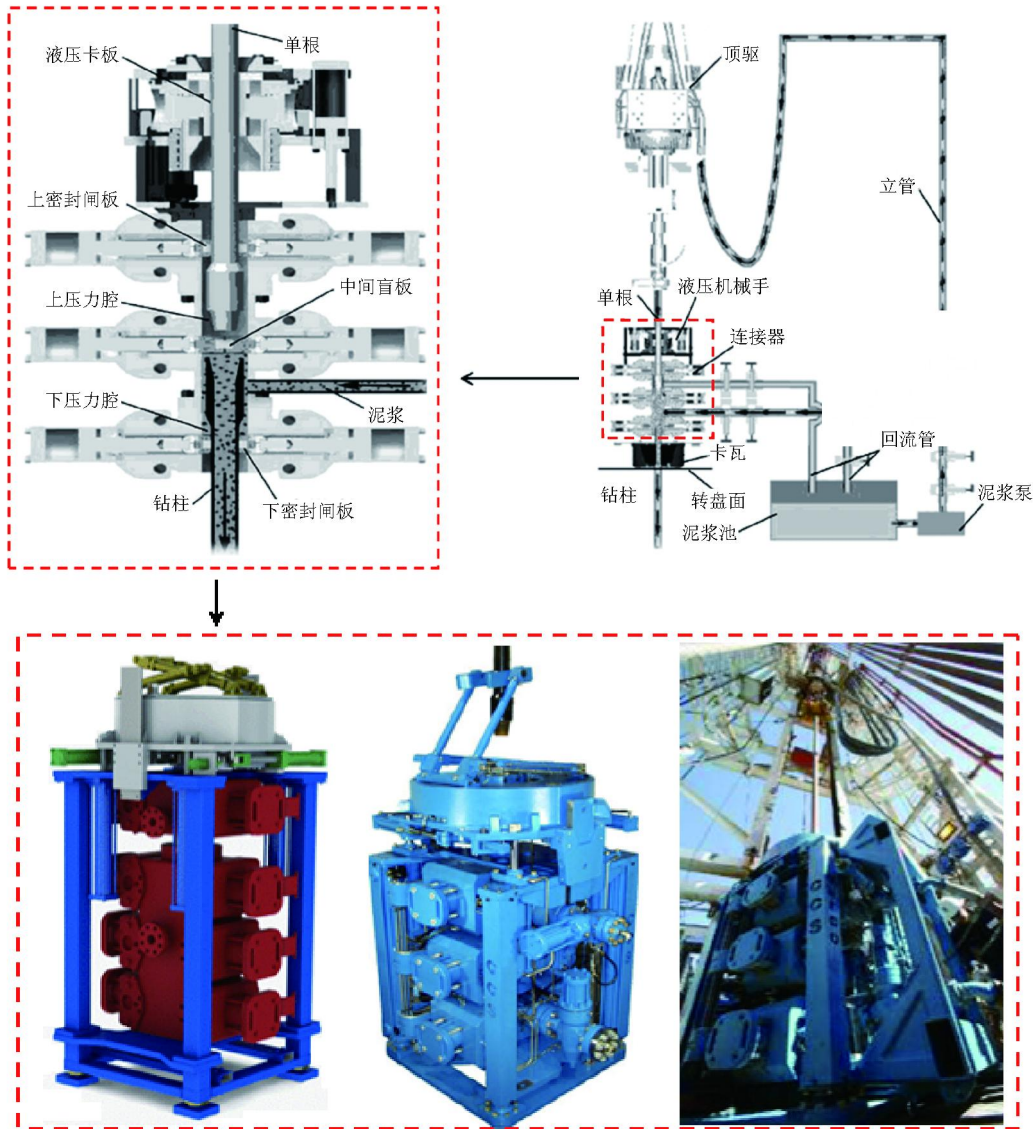


图 3 连续循环钻井系统原理

(4)降低了钻井液温度升高使其性能改变情况,保证了更加稳定的钻井液温度和性能,并保持井内温度的均匀梯度分布;

(5)减轻了由于突然停止钻井液井内循环所造成地层压力大于井筒压力致使井壁剥落或破裂,甚至进一步垮塌的现象,维持了井壁的稳定;

(6)避免了当重新建立循环时,井眼压力超过地层破裂压力致使井漏现象的发生;

(7)缩短了施工周期,提高了井眼质量及井控的安全性,有效地降低了工程成本。

2.2 钻井液连续循环对井眼稳定性的影响

在科学深井、超深井钻井作业过程中,加接钻杆单根时需停止钻井液的井内循环,常常会造成井下一些不良状况的发生。图 4 是一般钻进方式与连续循环钻进方式井内压力变化的比较,从图中可以看出,在一般停泵/开泵钻进方式时,停止钻井液的循

环将产生负压力“激动”,极易造成井底压力低于孔隙压力而导致井涌、井壁失稳和卡埋钻等事故;当启动钻井液循环时,将引起正压力激动使得井底压力高于正常循环压力,致使其超过地层破裂压力造成钻井液漏失及压差卡钻等事故;同时,利用连续循环钻进技术可消除压力波动(即压力变化范围值,其随井深增加而增大)对钻井安全的影响,以及避免环空压力梯度的改变,并改善当量循环密度控制。

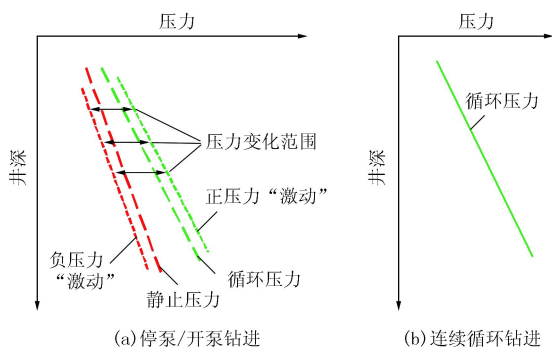


图4 不同钻井方式循环压力比较

ENI公司将第一套商用连续循环钻井系统应用于PFMD-1井,该井于2004年3月开钻,在钻至井深4244 m时,提前固井。该井工况复杂,在4000 m以深井段存在当量钻井液密度 $>2.0 \text{ g/cm}^3$ 的孔隙压力和破裂压力带^[20]。在钻井过程中,动态静液压力在当量钻井液相对密度和钻井液相对密度之间变化,波动量为 0.07 g/cm^3 。该井在使用连续循环钻井系统后重新开钻,连续循环钻井系统工作性能可靠,175 d的运转期内,进行了522次的连接作业,平均每次连接用时21 min,并成功钻遇储层,安全实现了勘探目标^[21]。

2.3 钻井液循环对井底温度的影响

对于科学超深井钻井工程来讲,井底一般存在3种温度状态,即原始地层温度、循环状态下井底温度(即“动态循环温度”)和循环状态后静止温度。表3是前苏联科拉超深井(SG-3井)井下温度测量数值^[23],结果表明,由于循环钻井液的冷却作用,使得原始地层温度 $>$ 循环状态下井底温度 $>$ 井底钻具内的温度。图5是采用有限元程序对KTB主孔深井阶段温度变化进行的模拟,试验结果表明,在钻井直径215.9 mm、钻井井深9000 m、水基泥浆、泵量1500 L/min的条件下,原始地层温度与动态循环温度的温差为65~75℃,如采用油基泥浆还可再降低20~25℃。综上所述,实现钻井液的连续循环将

大大降低井内环境温度,有利于保证更加稳定的钻井液性能,并保持井内温度的均匀梯度分布,地应力保持相对稳定状态;降低超高温对螺杆马达、随钻测量系统、橡胶密封件等高温失效、腐蚀和分解的程度。

表3 科拉超深井下温度测量结果

井深/m	静止时温度/℃	循环时温度/℃	备注
3960	56.8	43.0	动态时温度是以
6530	98.2	89.0	34 L/s的排量循
8230	131.0	123.0	环15~20 min
10909	181.0	147.6	后的温度
10909	185.4	156.0	停止12 h后

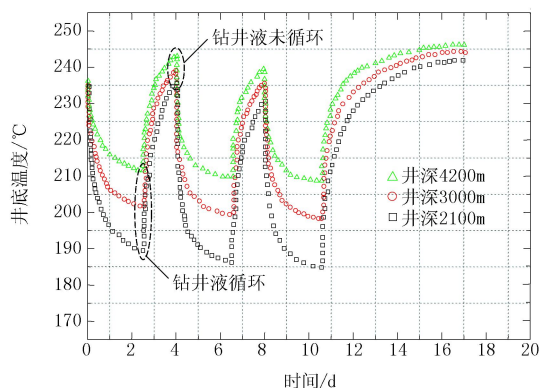


图5 钻井液井内循环与停止循环间井底温度变化

在PFMD-1井作业后,第二套商用连续循环钻井系统被运至挪威海上的Scarebeo-5井,并在该半潜式平台进行了安装及应用^[22]。试验井采用规格为 $\varnothing 127 \text{ mm}$ 的钻杆,钻遇5000 m以深的高温高压储层,其可靠性达到100%。

3 结论

本文通过对科学超深井钻井工程特点的总结,分析了连续循环系统在科学超深井中的需求,综合可以得到以下几点结论:

- (1)地质条件的复杂性及不确定性,加之超高温、超高压联合作用,是科学超深井钻井作业中最突出的技术难题之一;
- (2)连续循环钻井技术可消除科学超深井钻井作业中压力波动影响,降低当量循环密度控制难度,改善岩屑沉降影响,减轻气体聚集的影响;
- (3)连续循环钻井技术可降低井内环境温度,保证了更加稳定的钻井液性能,保持井内温度的均匀梯度分布,并保证地应力相对稳定状态;

(4) 连续循环钻井技术可降低高温高压对螺杆马达、随钻测量系统、橡胶密封件等高温失效、腐蚀和分解的程度;

(5) 连续循环钻井技术可提高井眼质量及井控的安全性,缩短施工周期,降低施工成本;

(6) 连续循环系对于科学超深井钻井作业,具有较强的技术需求。

参考文献:

- [1] 刘广志. 超深井钻探与深部地质学[J]. 地质评论, 1983, 29(1):75-80.
- [2] 张伟. 科学钻探——钻探技术发展的机遇和挑战[J]. 探矿工程, 1993, (2):32-35.
- [3] 刘振铎, 张洪叶, 孙昭伟. 刘广志文集[M]. 北京:地质出版社, 2003:228-234.
- [4] 刘广志. 刘广志论科学钻探[M]. 北京:地质出版社, 2005:5-7.
- [5] 王达, 张伟. 第五届国际科学钻探会议暨 KTB 主孔开工典礼侧记[A]. 王达. 中国大陆科学钻探工程钻探技术论文集[C]. 北京:地质出版社, 2007:40-59.
- [6] 张金昌, 谢文卫. 科学超深井钻探技术国内外现状[J]. 地质学报, 2010, 84(6):887-894.
- [7] 李万平, 郭晓霞. 高温高压钻完井技术进展[EB]. http://wenku.baidu.com/link?url=4cTZG3flQAua7fOKgRiqMUbZX1ZLoOrusPaEh-Uj0ZLiQXAZhB_VSZUi6fZodgWxp5WxfPIPG3vAZ5wivHJXgzowxO16wwLjai3geaThxC, 2014-11-18.
- [8] 李常茂. 超深井钻探的技术经济问题[J]. 国外地质勘探技术, 1984, (7):1-7.
- [9] 刘广志. 综谈科学深钻的一般程序与基本要求[J]. 国外地质勘探技术, 1991, (2):1-8.
- [10] 王达, 张伟, 汤松然. 俄罗斯科学钻探技术概况和特点[J]. 探矿工程, 1995, (1):1-4.
- [11] B. Engeser. KTB-REPORT 95-3 联邦德国大陆深钻计划钻探技术报告[R]. 杨志豪, 张伟, 译. 2008.
- [12] 张伟. 德国大陆深钻计划实施情况介绍[J]. 1996, (3):44-46.
- [13] 张伟. 科学钻孔的钻探技术特征[A]. 王达. 中国大陆科学钻探工程钻探技术论文集[C]. 北京:地质出版社, 2007:115-119.
- [14] 周爽. 连续循环钻井[J]. 国外油田工程, 2003, 19, (10):25-26.
- [15] 王瑜, 丁伟. 连续循环钻井技术及应用前景[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(11):94-97.
- [16] Ayling L, Jenner J W, Elkins H. Continuous Circulation Drilling[C]. 2002, OTC14269:56-63.
- [17] Jenner J W. The Continuous Circulation System: An Advance in Constant Pressure Drilling [J]. 2004, SPE 90702:1-14.
- [18] Jenner J W, Elkins H L, Lurie P G, et al. The continuous-circulation system: an advance in constant-pressure drilling [J]. 2004, SPE 90702:26-39.
- [19] 王增林, 曹钧合, 褚小兵. 国内外石油技术进展[M]. 北京:中国石化出版社, 2005:350-352.
- [20] Calderoni A, Chiura A, Valente P, et al. Balanced - pressure drilling with continuous circulation using jointed drill pipe [J]. Offshore Drilling and Completion, J P T, 2007, (4):62-65.
- [21] 邱亚玲, 杨德胜, 刘清友, 等. 国外连续循环系统的研制及现场试验[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(2):100-102.
- [22] 石俊江. 连续循环系统综述[J]. 钻采工艺, 2008, 31(1):60-62.
- [23] 汤凤林. 超深孔钻探的岩石力学性质和孔底温度[A]. 王达. 中国大陆科学钻探工程钻探技术论文集[C]. 北京:地质出版社, 2007:140-145.
- [24] 张金昌, 刘秀美. 13000 m 科学超深井钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9):1-6.