

万米科学超深井钻完井现状与展望

王志刚¹, 王稳石¹, 张立焯², 席正², 安迪², 尹浩¹, 王文¹, 闫家¹

1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 廊坊 065000

2. 河北省地质环境监测院, 石家庄 050011

摘要 概述了美国、苏联、德国、日本、冰岛、中国及其他国家科学钻探工程项目情况, 指出了万米科学超深井钻完井存在的难题, 主要包括地质条件复杂、地层温度高、钻井周期长、井斜控制难、井身结构设计困难、超长钻杆柱适应性等问题。针对存在的难题, 分析了地质工程一体化技术、高效破岩技术、高温钻井液技术、高温固井技术、井身结构设计优化技术、精细控压钻井技术、复合钻柱设计技术、膨胀套管技术、井斜控制技术、激光钻进技术、钻井工程自动化及信息集成技术、钻井工程智能化技术、钻井工程无人化等关键技术, 在万米科学超深井钻完井中应用的发展趋势。

关键词 万米; 科学超深井; 钻完井; 破岩工具; 智能化

人类的生存离不开地球, 但是人类对地球的了解却并不多。随着社会经济的快速发展, 人类社会在资源、灾害、环境等方面所面临的问题日益突出, 而地球内部可利用的成矿空间分布在从地表到地下的万米空间之内, 通过数千米甚至是超万米的大陆科学钻探, 不仅可以为深部矿产资源评价提供科技支撑, 储备深部资源开发技术, 提高国家能源安全水平, 同时还可以揭露地球深部流体结构、地热结构和地震活动, 研究气候变化及环境变迁, 提升防灾减灾能力, 对于解决当前面临的资源、灾害和环境问题具有重要意义^[1-5]。

习近平总书记提出: “向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”, 在中国“十三五”规划中将深地探测列入科技创新的总体布局中, 不过随着科学钻探深度的不断加深, 尤其是万米科学钻探, 地层可钻性差、高温、高压、高地应力、易井斜、取心难、钻杆强度不足、施工周期长等问题越发明显, 因此万米科学超深井钻完井是世界上最为艰难的科学工程之一, 它的组织实施需要集中国家经济、科技、人才和工业等各方面的优势力量。万米科学超深井钻完井投资大、风险大, 因此安全高效钻完井的挑战更大, 只有不断打造工程技术利器,

收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-05-10

基金项目: 2019年度自然资源部科技创新人才培养工程青年人才资助项目; 中国地质调查局地质调查项目(DD20211337)

作者简介: 王志刚, 工程师, 研究方向为水合物、页岩气、干热岩、科学超深井钻井与开发, 电子信箱: 1036821833@qq.com

引用格式: 王志刚, 王稳石, 张立焯, 等. 万米科学超深井钻完井现状与展望[J]. 科技导报, 2022, 40(13): 27-35; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.

2022.13.003

才能为工程的实施提供更好的保障和支撑。本研究通过调研分析当前科学钻探的发展现状,阐述万米科学超深井钻完井面临的挑战,并展望可能适用于万米科学超深井钻完井的关键技术。

1 科学钻探钻完井现状

美国、苏联、德国、中国、日本、墨西哥等国家都先后开展过科学钻探项目,其中苏联的科拉超深井钻探项目深度达到了12262 m,这是目前全世界最深的钻探钻井记录,起初计划钻深为15000 m,但是在高温、高压、高地应力等多种因素的影响下,井下事故频发,不得不停止钻进。德国的KTB项目主井完钻井身为9101 m,中国的松科2井科学钻探项目完井深度为7018 m,虽然这2口井最终顺利完钻,但是整个钻井过程并不顺利,钻井周期较长。其余国家的科学钻探项目完井深度大部分都在5000 m以下,下面将对各个国家科学钻探的实施情况进行具体的介绍。

1.1 中国科学钻探项目钻完井现状

1.1.1 中国大陆科学钻探工程

中国在2001年开始实施中国大陆科学钻探工程,历经4年时间,实施了1口5158 m深的连续取心钻井,该工程实施的目的是对大别-苏鲁超高压变质带的折返机制进行研究,地层以坚硬、脆性的榴辉岩、片麻岩、角闪岩为主,采用的是螺杆+液动锤井底驱动取心钻井工艺,该项目由中国地质调查局组织实施,取得了重要的创新性成果,建立了中国第1口科学钻探井5000 m的系列“金柱子”,揭示了井区附近精细的地壳结构,研发了针对硬岩的深孔钻探技术体系。中国大陆科学钻探工程极大的推动了我国科学钻探工程技术的进步,推动了地质各个领域科学技术的进步^[6]。

1.1.2 青海湖环境科学钻探工程

青海湖环境科学钻探工程不仅是中国环境科学钻探工程的重要组成部分,同时还是国际大陆科学钻探项目^[7]。青海湖环境科学钻探工程实施的目的是为研究青海湖地区环境的形成演化、生态环境的退化治理与重建、环境承载能力提高和未来环境

预测提供重要的数据和理论。该项目在实施的过程中租用了美国湖泊钻探公司的钻探系统,正式施工时间是2005年7月21日,结束时间是9月5日,共计钻探324回次,累计钻深547.855 m,取心长度323.255 m。由于湖上钻探存在一定的不足,在2005年10月于青海湖南岸的二郎剑地区进行了陆上钻探,共计获取648 m的岩心。

1.1.3 汶川地震断裂带科学钻探工程

2008年汶川地震给当地造成了巨大的人员和财产损失。在汶川地震断裂带上实施科学钻探,特别是在发生大地震之后,可以通过钻探来精确测量温度、地震波速度和发震断层渗透性,进而获取渗透性、流体作用、地震愈合和破裂周期、地震摩擦热、岩脉填充以及应力状态方面的数据,为解决地震的物理化学和地震机制的根本问题提供支撑^[8]。2008年10月,中国在汶川地区组织实施了5口科学钻探井,井号分别是WFSD-1、WFSD-2、WFSD-3、WFSD-3-P、WFSD-4,施工地点在龙门山断裂带,最浅钻井深度为551.54 m,最深钻井深度为2338.77 m,龙门山断裂带曾发生过多地地震,地层极度破碎、无胶结或者弱胶结,取心困难。5口钻虽然所处的位置不同,钻遇的岩层也不相同,但所遇到的情况基本相同,从开钻到完钻基本是在破碎地层中钻进,遭遇了井壁缩径、断钻具、施工周期长、钻井速度慢等问题,钻进施工异常艰难,远远超出预期^[9]。

1.1.4 松辽盆地资源与环境科学钻探工程

松辽盆地资源与环境科学钻探工程主要包含2个项目,分别是“松科1井项目”和“松科2井项目”。松科1井项目共实施了2口钻井,深度分别是1810、1915 m^[10]。松科2井于2014年4月13日开钻,设计井深6400 m,历时4年时间,完钻井深7018 m,采用的是超前裸眼钻进方法,松科二井在长钻程技术上实现了突破,将连续取心的长度扩展到了30 m,并研发了 $\Phi 311$ mm口径同径取心钻进工艺,为之后超深井工程的开展提供了技术支撑^[11]。松科2井的完成揭示了松辽盆地深部地质构造特征,发现了古大洋板块俯冲、聚合的深部证据,为松辽盆地成因及对深层油气勘探的再认识提供了理论指导。

1.2 国外科学钻探项目钻完井现状

1.2.1 美国

美国是第1个提出“莫霍面钻探计划”的国家,1966年6月美国实施了“深海钻探计划”(DSDP,1968—1983年),使用“格洛玛挑战者号”科学钻探船在世界大洋中完成了1092口科学钻孔,累计取得岩心超过9500 m。该项计划取得了一系列的成果。最初只有美国单独执行,后来陆续又有11个国家加入,海洋科学钻探的开展为深海资源勘探开发、环境预测和防震减灾工作的开展提供了重要的支撑,虽然取得了可喜的成绩,但是花费也是巨大的,可能是出于经济方面的考虑,美国的莫霍计划没有继续开展下去^[6]。在此之后美国陆续开展了多项大陆科学钻探项目,比如卡洪山口项目,设计钻深为5000 m,主要目的是对断层的热流和地应力之间的关系和断层动力学进行研究,该项科学钻探采用的是全面钻进,点取心的方式,完井深度为3510 m。美国夏威夷科学钻探项目,设计钻深为4419.6 m,主要分3个阶段完成,第1阶段钻至井深1828.8 m,第2阶段从1828.8 m钻至3352.8 m,第3阶段由3352.8 m钻至设计深度4419.6 m,要求为全井连续取心,目前第1和第2阶段已经完成,但是在第3阶段钻井中由于遇到井下复杂问题后不得不暂停施工。此外还实施了几个泊科学钻探项目,采用的大多都是绳索取芯工艺^[12]。

1.2.2 苏联

苏联是世界上开展科学钻探活动最早的国家之一,在美国的“莫霍面钻探计划”彻底搁浅之后,苏联实施了举世瞩目的科拉超深井钻井项目^[13-15]。科拉超深井位于穆尔曼斯克的科拉半岛,设计井深15000 m,从1965年开始设计,1968年确定井位,1970年5月正式开钻,该井采用的是超前裸眼钻进方法,在开钻钻至稳定基岩层后,下入第1层套管进行固井,然后在其内部下入1层可以回收的活动套管,继续下一开次的钻进,这样可以在最佳技术经济指标的直径(一般是215.9 mm)下钻出所谓的“超前孔”,在钻进的过程中如果遇到井下复杂情况不得不进行下套管处理时,可以将活动套管拔出,在扩孔之后下入对应套管进行固井,根据刚下入套

管的直径和钻井深度,可以在其内部再下入一层活动套管继续钻进。这样的钻井方式可以更好地应对井下复杂问题,有利于控制整体的施工成本。但是科拉超深井由于受到高温、高压、高地应力等因素的影响,出现了多次钻具断裂等井下事故,于1991年被迫停止,1992年,钻井工作全面停止,井深12262 m,这是目前世界上最深的科学钻探井。除了科拉超深井以外,苏联还实施了乌拉尔超深井、萨阿特雷超深井、秋明超深井、克里沃罗格超深井等,不过这些科学超深井的深度都未达到科拉超深井的深度。

1.2.3 德国

联邦德国实施的大陆深钻计划(KTB)目的是通过科学超深井来获得相关地学信息,对地壳较深部位的物理、化学状态和过程进行基础性调查和评价,以了解内陆地壳的结构、成分、动力学和演变。KTB计划采用的是先导井和主井双施工方案,先导井井深4000 m,主井井深9101 m,先导井参照了苏联科学钻探采用的“超前裸眼钻进方法”,也就是在较大的套管(219 mm)内,悬挂1层活动套管(177.8 mm),然后以较小口径(152.4 mm)钻进,如果地层稳定,则可以钻至设计井深,如果地层不稳定,可以回收活动套管,扩孔之后下入套管护壁^[11]。主井为了保证井眼的垂直度,使用了自动垂直钻井系统,采用的是全面钻进,点取心的方式,共取心40个回次。由于井眼垂直度较好,虽然井眼和套管之间的间隙较小(12.7 mm),但是套管下入却十分顺利,没有出现太大的问题。

1.2.4 日本

日本从1792年开始多次发生火山喷发及火山引起的海啸事故,造成了大量的人员伤亡和财产损失,为了了解火山结构、成长历史和岩浆的喷出机制,日本联合美国的科学家共同申请了综合大洋钻探计划(ICDP)项目,该项目于1999年开始,2005年结束,共进行了2期科学钻探,第1期科学钻探钻深为1800 m,并未钻到预想的岩浆通道。第2期科学钻探钻深为1995 m,在深度1500 m处钻遇了岩浆通道,实测井底温度为155℃,远低于科学家们预测的温度,科学家们给出的解释是地下流体的剧烈活

动使火山通道快速冷却^[6]。

1.2.5 冰岛

冰岛科学钻探项目 (IDDP) 计划钻进深度是 4000~5000 m, 由政府和公司共同出资, 在钻至 2104 m 时, 发现了玻璃质物质和深色的黑曜岩, 通过分析得出这些玻璃物质是钻井液同地下高温岩浆急速淬火产生的。依据地球物理分析结果可知, 地下岩浆的深度超过 4000 m, 因此不得不停止钻进。IDDP 计划对该处的地热能进行了利用, 通过向井内注入冷水的方式来获取岩浆的热量, 同时对此井同周围其他井的连通性进行了检验, 虽然没有钻至预期的深度, 但是为研究活的岩浆提供了独特的机遇^[6]。

1.2.6 其他国家

国外除了上述国家开展了科学钻探活动以外, 加拿大开展了气水化合物钻探项目, 墨西哥开展了 Chicxulub 陨石坑科学钻探, 西非开展了 Bosumtwi 湖科学钻探, 以色列开展了死海科学钻探项目, 捷克开展了 Eger 裂谷科学钻探项目, 北欧开展了 Collisional Orogeny in the Scandinavian Caledonides (COSC) 项目, 法国开展了留尼汪岛 Fournaise 火山深部地热科学钻探, 芬兰开展了 Outokumpu 科学钻探^[16-17]。

从国内外科学钻探项目钻完井现状可以得出, 世界有许多国家都开展了科学钻探工程, 但是超过万米的目前只有前苏联的科拉钻井工程, 并且钻进深度并未达到预期的 15000 m, 因为各种复杂情况的影响不得不终止, 而中国虽然顺利实施了松科 2 井项目 (7018 m), 但是在未来实施万米科学钻探过程中可以学习和借鉴的钻井工艺技术、钻井设备研发、事故处理等方面的经验并不是很多, 面临着许多的挑战, 需要针对万米科学超深井钻完井面临的挑战, 针对性开展技术攻关研究。

2 万米科学超深井钻完井面临的挑战

在深地、深海、深空探测方面, 后两者已经基本实现, 但是深地探测确是最为困难的工程。随着钻井深度的不断加深, 不仅对钻探设备和钻井工艺的要求提高, 同时面临的地质条件复杂、高温、高压、

高地应力等问题将更加的突出, 而这些因素是制约钻井深度的关键因素, 由此引发万米科学超深井钻完井面临一系列的困难, 这些困难的存在对万米科学超深井钻完井能否顺利实施发挥着决定性的影响作用。

2.1 地质条件复杂

万米超深井科学钻探在钻进的过程中可能钻遇到山前构造、高陡构造、复合盐膏层、强造斜地层、巨厚砾石层、多压力系统、高温高压及不稳定地层等复杂情况, 将会出现应力集中、井壁坍塌、井壁缩颈、地层漏失、地层压力异常、地层硫化氢和矿化度浓度高等问题, 这不仅增加了设计合理井身结构的困难程度, 同时还需要解决钻进过程中出现的机械钻速不高, 井眼稳定性差, 钻井液大量漏失、井下复杂情况频发和井眼轨迹控制难等一系列难题。复杂的地质条件不仅增加了钻井难度, 同时增加了钻井风险, 使得万米超深钻成为难度和风险最大的钻井工程项目。

2.2 地层温度高

正常情况下, 地温梯度为 3℃/100 m, 再加上可能钻遇干热岩层等高温地层的影响, 万米科学超深井的井底温度预计将超过 300℃, 在高温环境下许多钻井工具的稳定性和寿命都会受到影响, 比如牙轮钻头、井下动力工具、随钻测量系统、垂钻系统等。此外在高温的影响下, 钻井液的密度、流变性和稳定性也会发生改变, 携岩能力和护壁能力将明显降低。高温还会对固井质量造成严重的影响, 容易诱发套管挤毁事故。从目前的钻井技术水平来看, 高温钻井施工难度很大, 许多钻井器材都无法满足要求, 这是制约中国科学超深井钻探能否顺利实施的关键因素。

2.3 钻井周期长

万米科学超深井钻井地层复杂, 井下情况多变, 施工难度大, 存在许多影响钻井效率和施工周期的因素, 首先是上部井眼尺寸大、井段长, 可选钻头类型较少, 造成钻井效率低; 其次是深部地层岩性致密, 硬度高, 研磨性强, 可钻性差, 尤其是片麻岩、花岗岩和角闪岩地层, 钻井效率非常低, 在该地层当中现有的常规牙轮钻头和聚晶金刚石复合片钻头 (PDC) 都无法实现快速钻进; 再有就是受

到高温的限制,井下动力工具的使用受到了限制,虽然可以选择涡轮钻具进行提速增效,但其扭矩小、寿命低,无法进行长时间使用,且使用费用很高。此外地层漏失、坍塌、卡钻等现象也会对钻进周期造成很大的影响。这些因素的存在使得万米科学超深井钻井周期将会很长,苏联科拉超深井科学钻井就是很好的证明,因此万米科学超深井钻井施工需要迎接巨大的挑战。

2.4 井斜控制难

井斜问题一直是深部钻井非常关注的问题,随着钻井深度的不断增加,井斜会不可避免地增大,井斜增大后,会给钻井施工带来许多的困难,比如造成钻头、稳定器、钻具和套管磨损严重,影响套管、钻具和测量仪器顺利下入井内,影响固井质量等,为了控制井斜,通常采用防斜钻具组合和井下动力钻具进行防斜和纠斜,采取轻压掉打的方式钻进,有一定的防斜效果,但钻进速度慢、周期长,需要反复进行滑动钻进纠斜,井眼轨迹控制不理想。

2.5 超长钻杆柱适应性问题

钻杆柱是钻井施工最为关键的部分,在钻井过程中受到多种载荷的复合作用,对于万米科学超深井钻井而言,如果使用单一的钢钻杆可能因为自重就会发生拉断问题,此外还要承受多种载荷、高温以及酸性流体的腐蚀作用,因此万米科学超深井钻探钻杆柱设计是非常关键的一环。

2.6 井身结构设计困难

万米科学超深井钻井钻遇地层压力体系多,无法对地层层序和压力进行准确预测,同时存在易漏失、易垮塌、异常高压、破碎带等地质复杂情况,必封点多,钻井液密度窗口窄,井身结构设计和安全钻进难度大,容易发生井喷、井漏、卡钻等多种井下事故,使得井身结构设计无法符合实际钻井要求,无法应对井下复杂情况,造成钻井周期长或者是无法实现地质目的。

3 万米科学超深井钻完井关键技术展望

针对万米科学超深井钻完井面临的挑战,中国必须做好技术储备研究工作,尤其是在地质工程一

体化技术、高温破岩技术、高温钻井液技术、高温固井技术、井身结构设计优化技术、精细控压钻井技术、复合钻柱设计、膨胀套管技术、井斜控制技术、激光钻井技术、钻井工程自动化及信息集成技术、钻井工程智能化技术、钻井工程无人化技术等方面要加大科研攻关力度。

3.1 地质工程一体化钻井技术

万米科学超深井钻井是一个复杂的系统工程,需要将地质与工程结合在一起,以地质研究为基础,明确可能带来工程复杂和困难的地质条件,建立不同尺度和维度的地质和地质力学模型,根据万米科学超深井钻井施工过程中钻遇的地层,对钻井方案及时进行调整和优化,主要调整优化的内容有井眼轨迹、钻具组合、高效钻头、井身结构、井壁稳定与强化举措、人工智能辅助和钻井液密度与性能,通过将地质模型与钻柱-井壁-钻头-岩石系统动力学行为、岩石破碎机理、高效钻头研发、钻井参数智能化控制等相结合,实现高效钻井;将地质模型与储层岩石力学特征、钻柱-井壁系统动力学行为、井眼轨迹、井壁稳定和强化举措、钻井液密度和性能相融合,实现安全钻井;同时应用测井、录井、钻井参数等数据对地质模型进行修正,最终形成地质工程一体化安全高效钻井方案,为万米科学超深井钻井的顺利实施提供保障^[18-20]。

3.2 高效破岩技术

钻头是直接碎岩的工具,针对万米科学超深井钻井地层温度高、可钻性差、可选钻头类型少的问题,加快研发高适应性超硬、热稳定性钻头成为必由之路。国外在高温、高适应性钻头研究方面取得了一定的进展,如斯伦贝谢研发的锥型齿 PDC 钻头、Kymera Mach 4 钻头和 Dynamus 钻头,ReedHycalog 推出的超硬热稳定性钻头,史密斯公司研发的 Kinetic 孕镶金刚石钻头。此外许多新的材料被应用到了钻头设计中,如通过陶瓷涂层来提升钻头的耐温性能,通过纤维材料来提高钻头的耐冲击性。同时还应该加强非标钻头的研发设计工作,进而为处理地层复杂情况下入多层套管留下余地,确保万米科学超深井钻井工程的顺利实施^[21-22]。

井下动力钻具是提速增效必不可少的工具,主要包含螺杆钻具、涡轮钻具、液动锤、旋转导向钻

具、扭力冲击器等,其中螺杆钻具、液动锤、旋转导向钻具、随钻测量系统耐温能力都未超过200℃,涡轮钻具和扭力冲击器虽然耐温能力可以达到300℃,但是现场应用少,因此常规井下动力钻具在万米科学超深井深部钻井过程中是无法使用的,必须加大“高温钻头+高温随钻测量系统+高温井下动力钻具”的研究力度。

3.3 高温钻井液技术

钻井液主要包含2种类型:水基钻井液和油基钻井液。目前水基钻井液的最高耐温能力在240~260℃,油基钻井液的最高耐温能力在265℃^[23-27]。在高温的影响下,钻井液的性能会发生改变,为了满足万米科学超深井钻井的需求,可从2方面入手解决钻井液耐温能力问题:一是继续研发耐温能力更强的油基和水基钻井液体系,使其在高温环境下仍然保持良好的性能,进而为万米科学超深井钻井的顺利实施提供支撑;二是采用钻井液强制冷却技术降低循环钻井液温度,维持钻井液性能。该项技术在陆域冻土天然气水合物钻探和青海干热岩钻探中得到了成功的应用,取得了良好的效果。

3.4 高温固井技术

高温固井也是万米科学超深井钻井需要解决的难题,在温度的影响下,固井水泥和套管的性能将会发生改变,进而对固井质量产生影响。目前国内外的水泥浆体系耐温能力普遍不高于260℃,为此在固井方面首选需要研发耐温能力更强的水泥浆体系,其次还需要加大固井套管材料的研发力度,提升套管的各项性能,进而满足高温固井需求。另外还要加大固井工艺技术的研究,比如精细控压固井技术、预应力固井技术、预压固井技术、震动固井技术、多压力系统一次上返固井技术、尾管正反注固井技术^[28]。

3.5 井身结构设计优化技术

针对万米科学超深井钻井不确定地质因素较多,无法准确预测地层压力和流体性质,存在多个工程地质问题,可能出现设计与实钻不符,钻井复杂和井下事故频发,危害钻井安全等问题。如果采用常规的井身结构设计无法对可能预见的复杂层段进行完全的封隔,超前裸眼钻进井身结构设计方

法可以最大限度的保障深部钻井的安全性。采用该方法可以在上部井段采用非标准钻头进行小井眼钻进,在遇到复杂情况时采用非标准扩孔钻头进行扩孔,下入套管护壁,进而增加了套管层序,实现了井身结构优化设计,解决了套管层次不足问题,提高了钻井的安全性。

3.6 精细控压钻井技术

精细控压钻井技术是依靠控压钻井系统实现对井口回压进行全过程自动调控的钻井技术,控压精度可以达到0.2 MPa,在高压窄口地层应用具有很大的成效,通过对井口压力的控制实现欠平衡钻井,进而有效降低井壁坍塌、井涌和井漏的问题,在一定程度上提高钻井速度,控制钻井成本。根据精细控压钻井技术的优点,可以将该技术作为一个重要的技术措施应用到万米科学超深井钻井过程中,该技术目前在石油钻井中应用较为广泛,并且已经发展形成了钻-测-固-完全过程精细控压钻井完井设计、钻进、起下钻、电测、固井、完井等技术^[29-31]。

3.7 复合钻柱设计

钻杆柱设计是万米科学超深井钻井非常关键的一环,根据前苏联科拉超深井施工经验,单纯使用单一的钢钻杆无法完成万米超深井钻井工作,需要对钻柱进行复合设计,不仅要使用不同规格、不同壁厚和不同钢级的钢钻杆,同时还要使用铝合金钻杆以减轻重量,但考虑到铝合金钻杆耐温能力和耐腐蚀性不强,未来需要大力开发耐温、耐腐蚀、质量更轻、强度更高的钛合金钻杆,多类型钻杆复合设计使用,进而满足万米科学超深井钻井需求。

3.8 膨胀套管技术

万米科学超深井钻井过程中不可避免地需要解决井壁坍塌掉块、地层裂缝性漏失问题,受到温度、裂隙大小和地下水的影响,泥浆护壁堵漏效果无法保障。套管护壁堵漏是非常有效的一种技术举措,但是受到井身结构设计和钻井深度的限制,常规套管护壁堵漏并不能得到广泛的应用。膨胀套管成为了最好的选择,膨胀套管不仅可以解决泥浆护壁堵漏的耐温问题,同时在此基础上还可以实现等井径钻进,不仅减少了大直径套管的下入,降低了钻井费用,同时提高了作业安全性。

3.9 井斜控制技术

自动垂直钻井系统是防斜快打非常有效的技术手段,主要包含电源系统、测控系统和执行系统,是集成电液一体化的井下闭环系统,可在井下自动控制井斜,在大倾角地层能够把井斜控制在几乎垂直的状态,受到耐高温能力的限制,在万米科学超深井上部井段钻井过程可使用该系统,以提高井眼垂直度,未来需要加大科研攻关力度,进一步提升其抗高温能力;旋转导向系统可以全过程实现复合钻进,进而及时进行纠斜,但其使用费用较高;预弯曲动力学防斜快打技术可以实现滑动导向钻进和旋转钻进的结合,通过增加钻头的降斜力大小,达到降斜的目的,这3种井斜控制技术可以根据万米科学超深井钻井实际情况进行选择性的使用。

3.10 激光钻井技术

激光钻井技术具有高速度、低成本、高安全和低伤害等优点,主要是通过利用高能激光直接作用于岩石,使岩石发生爆裂和碎化进行钻井^[32]。该技术通过实验验证是可行的,但商业化应用还需要加大科研攻关力度,如果未来能够在万米科学超深井钻完井中得到应用,将给钻完井工程带来一次深刻的革命。

3.11 钻井工程自动化及信息集成技术

围绕万米科学超深井打成打快打好的原则,需要重点研发深井自动化、智能化钻机和配套装置,攻关智能识别和判断井下故障装置、井下多参数实时测量和智能控制装置、数字化智能建井技术、井下信息高速传输技术、随钻前探技术、随钻成像测井技术、电动钻具钻井系统等^[33-34]。同时提升钻井工程软件及远程技术支持水平,建立一体化钻井数据库,将钻井工程设计和钻、测、录施工数据集成到统一平台,提高信息传输效率和信息数据的实时性,提供远程监督、技术分析和专家决策支持,实现万米科学超深井钻完井的实时决策作业,为万米科学超深井钻完井的顺利实施提供保障。

3.12 钻井工程智能化技术

钻井工程智能化是钻井技术发展的趋势,主要包含地面钻井设备智能化、井下智能化和智能钻井专家系统。(1) 地面钻井设备智能化,可实现不间

断钻进,无需停钻和停泵,作业效率显著提高,具备智能井控和智能控压钻井能力。(2) 井下智能化,研发超级钻头或者是智能钻头,不仅具有高效的破岩效率且可以对钻井工程参数、钻头工况和钻进的地层进行实时监测;研发智能钻井液系统,具备地层适应性更强,自主稳定护壁、堵漏等功能,可以更好的保护井壁;研发井下实时、高速、大容量信道,提高井下数据传输速率;研发井下智能导向钻井系统,实现三维导向钻井,可以自动引导钻头朝靶点钻进;(3) 智能钻井专家系统,具备高智能化的学习、记忆和自主决策能力,可实现远程智能控制钻井,大幅提高万米科学超深井钻井效率和安全性。

3.13 钻井工程无人化技术

随着机器人技术、智能信息技术、智能远程控制技术的发展,钻井工程将朝着无人化方向发展。钻井现场配备人工智能机器人,不仅具有自主学习、记忆和判断的能力,同时具有自主决策和自主操作等功能,可以完全替代现场人工操作,实现无人化钻井。同时结合人工智能技术,实现无人自主钻井优化设计、无人自主钻井参数优化、无人自主钻井井眼轨迹控制、无人自主井筒完整性监控、无人自主控制钻进、无人自主钻井风险识别、无人自主钻井程序决策及风险应对。钻井工程无人化技术的发展将为万米科学超深井安全、高效的完成提供支撑。

4 结论

1) 科学钻探是获得地球深部资料的唯一方法,是研究地球内部流体系统、地热结构、地震活动和环境变化的大科学工程,虽然目前取得了一定的成绩,但是万米科学超深井钻完井在实施的过程中却面临着地质条件复杂、岩体硬度高、研磨性强、钻井周期长的问题;面临着地层温度高,钻井工具、钻井液、水泥浆抗高温能力不足的问题;面临着井斜控制难、井身结构设计困难、单一钻杆柱适应性不足的问题;面临着井壁易坍塌、井漏和井涌的问题。

2) 针对万米科学超深井钻完井存在的问题,应加快研发地质工程一体化技术、高效破岩技术、高温钻井液技术、高温固井技术、井身结构优化技

术的步伐,并配套实施精细控压钻井技术、膨胀套管技术、井斜控制技术、激光钻井技术、钻井工程自动化及信息集成技术、钻井工程智能化技术、钻井工程无人化技术,提高万米科学超深井钻完井效率,降低万米科学超深井钻完井发生井壁坍塌掉块和漏失事故的概率,降低钻井成本。

3) 万米科学超深井钻完井目前在中国还处于筹备阶段,在前期预研的过程中必须要考虑周全,从实际情况出发,加大科技攻关力度,提前开展万米科学超深井钻完井装备体系研发工作,在高度集成化、智能化绿色钻井技术方面取得突破,为之后万米科学超深井钻完井的实施提供技术保障。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 张金昌, 刘秀美. 13000m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.
- [3] 董树文, 李延栋, 陈宣华, 等. 我国深部探测技术与实验研究进展综述[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 3884-3901.
- [4] 罗飞, 王大洲. 中国大陆科学钻探工程的历史考察[J]. 自然辩证法通讯, 2019, 41(8): 71-80.
- [5] 朱永宜, 王稳石, 张恒春, 等. 我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J]. 地质学报, 2018, 92(10): 1971-1984.
- [6] Marx C, Rischmüeller H. Drilling and coring techniques for hard rock[J]. *Erdoel Erdgas Kohle*, 1986(2): 51-57.
- [7] Elders W A, Dallimore S R. Continental scientific drilling [J]. *Natural resources*, 2007(2): 337-366.
- [8] 安芷生, 王平, 沈吉, 等. 青海湖湖底构造及沉积物分布的地球物理勘探研究[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(4): 332-341.
- [9] 许志琴, 李海兵, 吴忠良. 汶川地震和科学钻探[J]. 地质学报, 2008, 82(12): 1613-1621.
- [10] 张伟, 胡时友, 贾军, 等. 汶川地震断裂带科学钻探项目钻探工程实施总结[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9): 94-100.
- [11] 王成善, 冯志强, 吴河勇, 等. 中国白垩纪大陆科学钻探工程: 松科一井科学钻探工程的实施与初步进展[J]. 地质学报, 2008, 82(1): 9-20.
- [12] 苏德辰, 杨经绥. 国际大陆科学钻探(ICDP)进展[J]. 地质学报, 2010, 84(6): 873-885.
- [13] 汪品先. 大洋钻探与我国地球科学的发展[J]. 地球物理学进展, 1994, 9(4): 66-71.
- [14] 杨明清, 杨一鹏, 卞玮, 等. 俄罗斯超深井钻井进展及技术进步[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(1): 15-20.
- [15] Береснев П О, Зезюлин Д В, Тюгин Д Ю, et al. АРазработка группы мобильных роботов для мониторинга окружающей среды[J]. *Транспортные Системы*, 2018(2): 19-24.
- [16] Кравченко А В, Лосева К А. Газовый потенциал России и приоритеты развития газовой промышленности[J]. *Производственный Менеджмент: Теория, Методология, Практика*, 2016(8): 201-204.
- [17] 闫家, 王稳石, 张恒春, 等. 松科2井带涡轮钻具取心钻进探索[J]. 钻采工艺, 2019, 41(1): 31-34.
- [18] 吴奇, 梁兴, 鲜成钢, 等. 地质-工程一体化高效开发中国南方海相页岩气[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4): 1-23.
- [19] 刘乃震, 王国勇, 熊小林. 地质工程一体化技术在威远页岩气高效开发中的实践与展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(2): 59-67.
- [20] 刘清友, 朱海燕, 陈鹏举. 地质工程一体化钻井技术研究进展及攻关方向-以四川盆地深层页岩气储层为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 178-188.
- [21] 王志刚, 胡志兴, 李宽, 等. 干热岩钻完井的挑战及技术展望[J]. 科技导报, 2019, 37(19): 1-9.
- [22] 张伟. 高温岩体热能开发及钻进技术[J]. 探矿工程, 2016, 43(10): 219-224.
- [23] 颜磊, 蒋卓, 王大勇, 等. 干热岩抗高温钻井液体系研究[J]. 化学与生物工程, 2015, 32(7): 55-58.
- [24] 季科, 郭健翔, 毕学军, 等. 高温干热岩采热系统钻探技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 11900-11909.
- [25] 何森, 龚武镇, 许明标, 等. 干热岩开发技术研究现状与展望分析[J]. 可再生能源, 2021, 39(11): 1447-1454.
- [26] Sepehri S, Soleyman R, Varamesh A, et al. Effect of synthetic water-soluble polymers on the properties of the heavy water-based drilling fluid at high pressure-high temperature (HPHT) conditions[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 166: 850-856.
- [27] Pakdaman E, Osfouri S, Azin R, et al. Improving the rheology, lubricity, and differential sticking properties of water-based drilling muds at high temperatures using hydrophilic gilsonite nanoparticles[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 582: 1-9.
- [28] 丁志伟, 阳强, 李成全, 等. 超深井多压力系统一次上

- 返固井技术[J]. 钻采工艺, 2021, 44(6): 31-55.
- [29] 王海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
- [30] 苏义脑, 路保平, 刘岩生, 等. 中国陆上深井超深井钻井完井技术现状及攻关建议[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 527-542.
- [31] 闫光庆, 张金成. 中国石化超深井钻井技术现状与发
- 展建议[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 1-6.
- [32] 杨赟, 谭平, 韦孝忠, 等. 激光钻井技术现状与关键技术[J]. 钻采工艺, 2015, 38(1): 35-39.
- [33] 韩烈祥. 川渝地区超深井钻井完井技术新进展[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(5): 555-561.
- [34] 杨博仲, 汪瑶, 叶小科. 川西地区复杂超深井钻井技术[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 27-30.

Present situation and prospect of drilling and completion of 10000 meter scientific ultra deep wells

WANG Zhigang¹, WANG Wenshi¹, ZHANG Liye², XI Zheng², AN Di², YIN Hao¹, WANG Wen¹, YAN Jia¹

1. The Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

2. Hebei Geo-Environment Monitoring, Shijiazhuang 050011, China

Abstract Scientific drilling is an effective way for human beings to explore the interior of the earth, it is also an important means to solve major problems such as resources, disasters and the environment. Scientific drilling projects in the United States, the former Soviet Union, Germany, Japan, Iceland, China and other countries are summarized. The problems in drilling and completion of 10000-meter scientific ultra-deep wells are discussed, including complex geological conditions, high formation temperature, long drilling cycle, difficult well deviation control, etc.. Future applications of geology-engineering integration technology, high-efficiency rock breaking technology, high-temperature drilling fluid technology, and many others in the drilling and completion of 10000 meter scientific ultra deep wells are also prospected.

Keywords 10000 meters; scientific ultra deep well; drilling and completion; rock breaking tools; intellectualization ●



(责任编辑 刘志远)