

特深科学钻探的关键问题

王达, 张伟 and 贾军

Citation: [科学通报](#) ; doi: 10.1360/N972017-01369

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972017-01369>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[南海大洋钻探研究新进展](#)

科学通报 **47**, 640 (2002);

[南海北部深水区油气成藏与勘探](#)

科学通报 **57**, 1833 (2012);

[第一届深海研究与地球系统科学学术研讨会在沪召开](#)

科学通报 **55**, 2164 (2010);

[大洋钻探计划\(ODP\)的初步成果](#)

科学通报 **44**, 672 (1999);

[第二届深海研究与地球系统科学学术研讨会在沪召开](#)

科学通报 **57**, 2041 (2012);

特深科学钻探的关键问题

王达, 张伟, 贾军

中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037

摘要: 特深科学钻探是当今世界各大国竞相开展的大型科学探索活动, 是体现国家整体科学技术实力的代表性工程, 也是“上天、下海、入地、登极”四大人类科学梦想中难度最大, 迄今进展最慢的科学工程。由于岩石圈的阻隔, 想要观测地球内部的信息十分困难, 目前多采用地球物理、地球化学等方法, 尽管有快速、简便的优点, 但是获取的信息是间接的、推断的, 具有多解性。而科学钻探能够直接获取地下的实物、构造和信息, 据此还能够修正地球物理的解释结果, 因此成为了地球科学取得重大突破的必然选择。然而囿于技术与经济的困难, 目前人类仅仅在少数地点钻探至十公里左右, 只有岩石圈的十分之一, 更谈不到观测上地幔、下地幔了。人类要想更深入地了解我们的脚下, 必须不断钻探得越来越深。万米以上特深钻探工程的实施, 将及大地推动钻探技术的发展, 同时带动钻探设备仪器和钻井工艺技术研发的巨大进步, 进而促进材料、电子器件在极限使用条件下应用水平的提高。在技术上特深钻探工程面临着必须克服的三大关键问题——高温、高压、高地应力, 目前还没有成熟的技术来攻克这道难关。这是一项耗资巨大、时间漫长、风险极高的工程。为此本文提出几个原则性的对策, 以及一些在工程实施过程中还应当关注的研究方向。

关键词: 地球深部探测, 科学钻探, 特深钻, 超深钻, 大科学工程

上世纪末国际上美、俄、德等国竞相开展了深部科学钻探活动。美国于 1974 年在俄克拉荷马州钻成了罗杰斯 1 井, 井深 9583m, 创造了当时世界最深井的记录; 前苏联在一些主要的地震剖面的交点处, 完成了 11 个科学超深孔和深孔, **СГ-3** 井达到 12262m 孔深, 成为当今世界最深的钻孔, 并已成为世界第一个深部实验室; 德国实施了举世闻名的“联邦德国大陆深钻计划 (KTB)”, 在海西缝合带的结晶地块中先后钻了一个 4000.1m 深孔和一个 9101m 的超深孔; 此外, 英、法、意、日、瑞典、墨西哥等国也开展过陆壳深部科学钻探。

最令人瞩目的是海洋科学钻探, 从深海钻探 DSDP 到大洋钻探 ODP, 再到综合大洋钻探 IODP 和国际大洋发现计划 IODP, 几十年来大陆与海洋科学钻探就均取得了一系列重大发现。

我国科学家从上世纪 70 年代开始, 就一直呼吁开展中国大陆科学钻探。进入新世纪后终于得到国家的批准。

2000 年至 2007 年, 我国实施了中国大陆科学钻探工程 (CCSD), 这是国家“九五”重大科学工程项目之一, 也是国际大陆科学钻探计划 (ICDP) 重点项目。在具有全球地学意义的大别—苏鲁超高压变质带东部 (江苏省东海县) 实施了中国第一口 5158 m 科学深钻。该工程建成了亚洲第一个深部地质作用长期观测实验基地, 也是亚洲第一个大陆科学钻探和地球物理遥测数据信息库, 亚洲第一个研究地幔物质的标本岩心馆和配套实验室, 使我国超高压变质带和地幔物质研究达到国际领先水平。

2008 至 2015 年实施了汶川地震科学钻工程。

2008 年国土资源部启动了深部探测技术与实验研究 (SinoProbe) 专项, 截止到 2012 年历时 5 年, 完成了国际上规模最大、多学科联合的地球深部探测计划。实验了地壳与地幔深部探测的一系列技术方法, 积累了丰富经验, 大大提高了我国深部探测的水平。期间施工了西藏罗布莎、金川、腾冲、庐枞、铜陵、南岭等科学钻探工程。

此外, 还有研究古气候与古环境的松辽盆地科学钻、青海湖环境科学钻以及铀矿科学钻等

工程。

2006年国务院颁布《国务院关于加强地质工作的决定》，决定中明确提出：“实施地壳探测工程，提高地球认知、资源勘查和灾害预警水平”。

国务院《“十三五”国家科技创新规划》将“深地科学研究”列为“战略性前瞻性重大科学问题”之一，并将“地球系统过程与资源、环境和灾害效应”列入“面向国家重大战略任务重点部署的基础研究”之中。我国拟启动一批“面向2030国家重大科技项目”，其中地球深部探测作为“深地”的主题即将展开。专项的初步计划是我国将在深地结构探测以及深部固体矿产、油气、地热、地下水、地下空间等资源的探测与规划等方面展开大量的研究，同时实施一批典型示范工程，提出绿色利用的方案，这必将极大地提高我国地球科学在国际中的地位，为我国今后经济发展提供宝贵的资源基地。

专项中拟安排施工一口13000m世界最深的特深钻孔，以及数口万米左右的超深钻孔。这不仅是钻探界的重大事件，将成为现代钻探技术发展的里程碑，也是整个科学界的重大工程，由此也会促进我国材料、机械、电子等工业技术水平的极大提升，其意义绝不亚于人类登上外太空的星球。

毫无疑问，13000m特深钻将是整个专项中难度最大、花费最多、耗时最长的特大型工程，必须发挥“举国之力”的优势才有可能完成。从我们多年从事科学钻探的经验来看，以下几点是特别要强调的。

1. 科学钻探是地球科学重大突破的必然选择

特深科学钻探是当今世界各大国竞相开展的大型科学探索活动，是体现国家整体科学技术实力的代表性工程，也是“上天、下海、入地、登极”四大人类科学梦想中难度最大，迄今进展最慢的科学工程。

13000m特深科学钻探工程将超过俄罗斯将近30年前创下的世界纪录，完成世界最深的钻井，将我国对深部资源和信息的勘查能力从5、6000m深度级别提高到10000m以上，会显著提高我国勘探和开发深部资源的能力，提高我国深部地质研究的水平和国际地位。

可以说“没有对地球深部的探测就没有地球科学理论的进步”^[1]，没有深部科学钻探就不能真正地、准确地获取深部探测信息。地球科学的未来——在于地下望远镜，深部钻探同地球物理遥测结合起来的相互反馈系统，便构成了伸入地球内部的望远镜。

迄今为止，地球物理方法是研究地壳的一种重要和常用的方法。它包括重力法，电法，磁法和地震法等。其中，最重要的是测量地震波速的方法，尤其是反射地震法。它比其它直接的地质勘查手段具有快速、经济的优点，已被各系统各部门广泛采用，并成为一种不可缺少的重要手段。但是，由于地球物理测量结果的多解性，它不是直接观测地质构造或岩土介质本身，是采用间接的方法，获得的信息分辨率也不高^[2]，数据还可能被干扰。所以，能够获取地下实物样品与信息的最准确的只有科学钻探方法。

总而言之，可将大陆科学钻探计划的目的归结为“为更好地了解大陆地壳内部结构的动力学和演变而进行的关于地壳深处的物理状态和化学状态以及过程的基本研究。”³

为什么要花费巨资开展万米以上的特深科学钻探呢？

首先，这是地球科学研究的需要。人类对地球认知少之又少，尽管近年来通过大洋和大陆科学钻探以及地质地球物理的研究获得了很多新理论、新认识，但是还有太多的未解之谜。探测地球深部结构、物质组成和深部行为的“深地科学”与探测技术，已经成为发达国家优先部署的国家战略。在技术上正在从探测转向观测和监测，从对地静态的结构探测向地球内部运动变化动态过程的实时观测和监测方向发展。而最能抗干扰的观测点在地下深处，要埋设长观仪器，建立深地观测网，就必须打造通往地球深部的通道。

其次，可以带动深部能源、资源勘查。中国工程院曾做过研究，我国矿产勘查深度若能

从平均 500m 增加的 2000m，金属资源量可以翻一番。以塔里木油田为例，勘查深度到了 8000 多米，确实还有十分可观的油气资源。地热是一种清洁绿色能源，我国有优良的地质禀赋，如果能利用好 3-10 千米深的地热资源，可以大量替代化石能源，解决大气污染的问题。

第三，研发一套成熟、快速、廉价的超深钻探体系，为更多的深部钻探提供技术支持。只要完成第一口特深钻施工，我们就能获得十分宝贵的经验，开发出一整套装备与技术体系，在今后更多的超深、特深钻施工中发挥出作用，经过逐步完善就会形成一套成熟的技术体系，使今后的特深钻施工取样更多、速度更快、成本更低，从而也就能在更多的关键地址上打出越来越深的钻孔，取得更丰富的资料。

2. 特深科学钻探面临的重大难题

在技术上我们面临着必须克服的三大关键问题（高温、高压、高地应力）以及井斜、取心、超长钻杆柱、装备等难题。

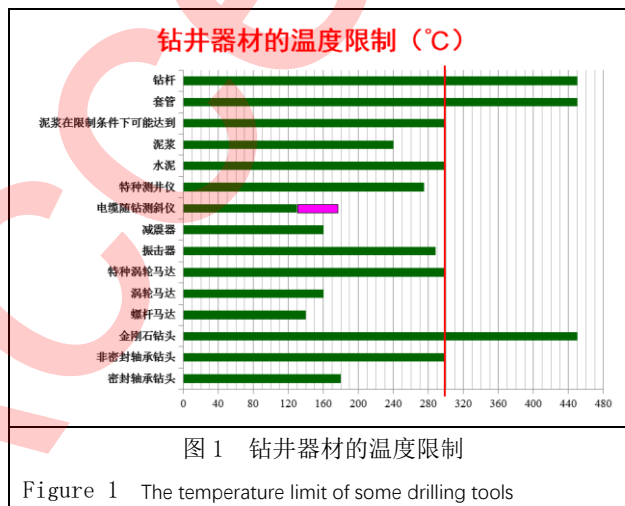
2.1 高温

预计 1.3 万米将达到 300℃ 以上，这种温度下将使孔底马达、震击器、减振器、仪器、轴承密封等失效，但实质上是这些工具、器具使用的绝缘材料、电器元件、传感器、橡胶密封件的耐温性不足。

对于钻井泥浆和固井水泥来说，温度超过一定极限后，其流变性就要变坏，携带岩屑的能力降低、水泥强度蜕化。实质上还是浆液材料、处理剂及其配比工艺的问题。

在高地温钻井及循环过程中，热交换造成的地层温度变化，使地层产生热胀冷缩效应，从而在井壁围岩中产生附加热应力，对井壁的稳定产生重大影响。

德国在 KTB 项目中曾做过一些研究，对主要钻井工具的温度和相应孔深限制提出如下数据（图 1、表 1）^{[3], [4]}：



2.2 高压

井下测量仪器只能耐压 140—170MPa。对于 13000m 的钻孔来说，若泥浆密度为 1.1-1.2 g/cm³，泥浆液柱静压力将达到 143-156Mpa，若超过这个压力，这些仪器便不能使用。对于大多数测量仪器而言，由于耐压不够而不可用，尤其是高温伴随下的高压力，这涉及到井下器具的密封、强度等问题。

表 1 一些钻进工具和材料的温度限制和相应的孔深限制

Table 1 The temperature and borehole depth limit of some drilling tools and materials

工 具 和 材 料	温度限制 (°C)	相应的孔深 (m)
金刚石钻头	450	15000
钻杆	450	15000
套管	450	15000
特种涡轮马达	300	10000
非密封轴承钻头	300	10000
泥浆在限制条件下可能达	300	10000
水泥	300	10000
振击器	288	9600
特种电缆随钻测斜仪	275	9000
泥浆	240	8000
密封轴承钻头	180	6000
涡轮马达	160	5300
减震器	160	5300
螺杆马达	140 (200)	4600 (7000)
电缆随钻测斜仪	130	4300

注：括弧中为当今技术的指标

2.3 高地应力

地应力是造成井壁岩石产生剪切和拉伸破坏的根本原因^[5]，高地应力会诱发井壁失稳导致井壁垮塌、缩径、漏失、卡钻等一系列复杂情况。在高应力井段取心钻进，会出现明显的岩心片化（图2）^[6]。

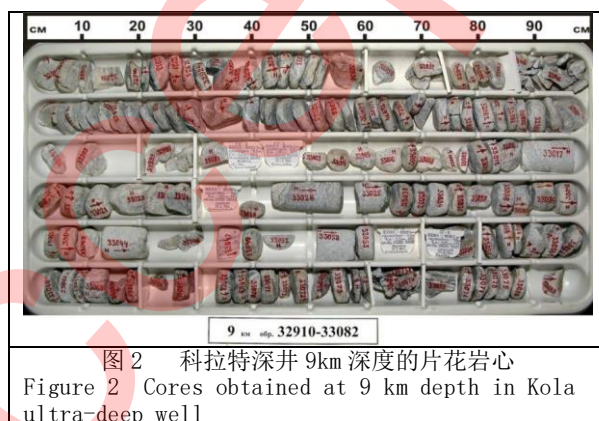


图2 科拉特深井 9km 深度的片花岗岩心
Figure 2 Cores obtained at 9 km depth in Kola ultra-deep well

地应力随着井深加大而增高。或者说，井越深，地应力水平越高，井眼产生后岩心片化和井壁失稳的可能性也越大。

在岩心片化发生的井段，其井壁也会发生相应的破坏，会产生裂纹，严重时会导致井壁岩石剥落。井壁的岩石破裂后，破裂的岩块会从井壁上剥落下来，掉入井内，可能导致卡钻。另一方面，井壁岩石的剥落造成井眼直径扩大，可能导致钻具折断和砂桥卡钻事故。从CCSD-1井在高应力井段获取的岩心（图3）和进行井径测量（图4）的结果可以得出结论：岩心片化和井眼的扩径是密切相关的^[7]。



图3 CCSD-1井3478-3524m井段的岩心片化现象
Figure 3 Disced cores obtained in 3478-3524m section of CCSD-1 well

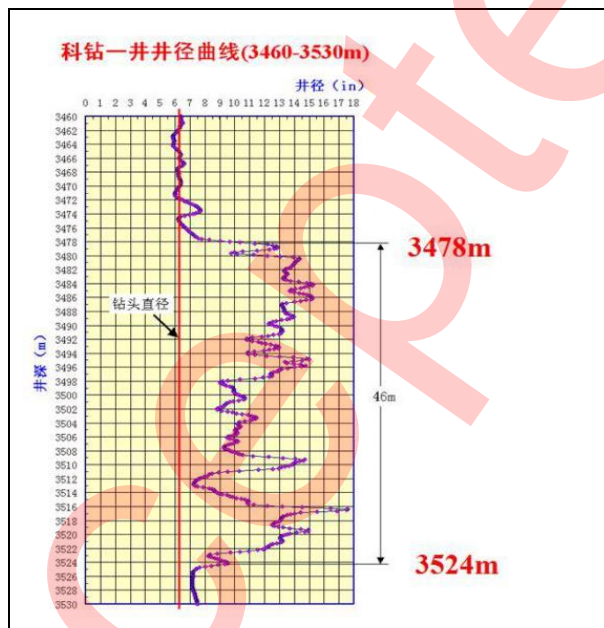


图4 CCSD-1井3478-3524m井段的扩径情况
Figure 4 Enlarged borehole in 3478-3524m section of CCSD-1 well

2.4 井斜

无论进行何种钻进施工，井斜总是难免的。影响井斜的因素是多方面的，如有岩石的各向异性、地层的层状和产状以及井底钻具组合和钻进参数等。井斜加大后，会给钻井施工带来很多困难，诸如：

- 过高的磨阻和扭矩；
- 起、下钻具和测量仪器遇阻；
- 下套管遇阻；
- 钻具容易疲劳断裂；
- 套管及钻具、特别是稳定器及钻头出现严重的磨损。

井斜增大到一定程度后，必须采取措施纠斜，否则钻进施工难以正常进行。德国 KTB 先导孔钻进过程中进行了三次纠斜，中国大陆科学钻探工程 CCSD-1 井施工中进行了两次侧钻纠斜。纠斜施工会耗费大量的时间和费用。此外，纠斜会导致钻井的某些部位产生较大狗腿，给后续施工带来困难。侧钻部位的狗腿度一般远大于其它部位，使钻进施工中摩阻和扭矩加大，钻具断裂的可能性加大。

2.5 取心

特深井施工的取心问题分成两大类：第一类是特深井段的取心技术难题；第二类是由取心施工带来的技术和经济方面的负面影响问题。

(1) 特深井段的取心技术难题

理论与实践的结果都表明，随着井深加大，地应力相应加大，井壁岩石崩落和岩心片化的现象加剧。在特深井段，岩心产生后马上破裂成薄如饼干的岩片(图 5)^[6]。在这种岩心极其破碎的情况下钻进，岩心采取率会显著降低，还极易发生岩心堵塞，使回次进尺长度和钻进施工效率受到明显影响。

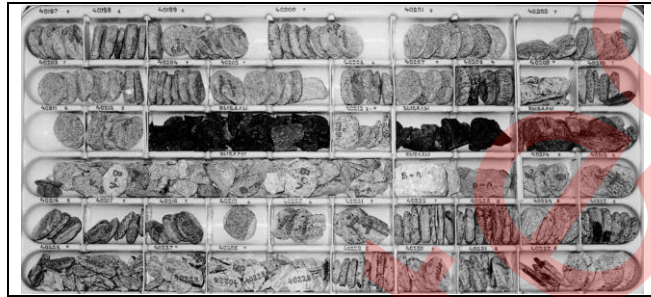


图 5 科拉超深井万米以上井段的岩心
Figure 5 Cores obtained at deeper than 10 km depth in Kola ultra-deep well

(2) 由取心施工带来的经济和技术方面的负面影响

取心钻进对经济性的影响。由于取心钻进回次进尺短，施工时需要频繁提钻，每米进尺所需的施工时间比全面钻进明显要多。随着井深加大，全面钻进的每米进尺时间虽有增加，但不明显。而取心钻进的每米进尺随井深变化十分明显(图 6)。

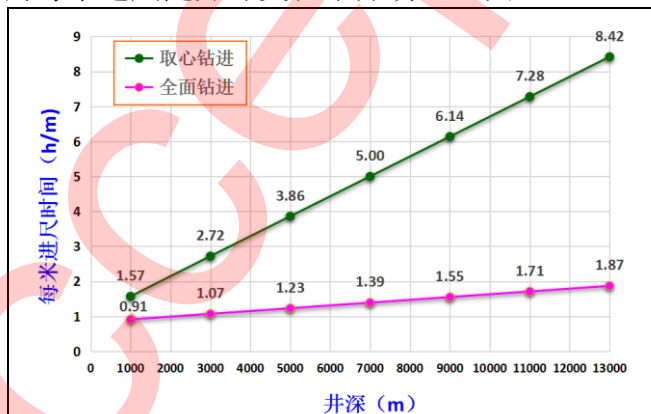


图 6 取心钻进与全面钻进每米进尺时间比较
Figure 6 Time per meter footage of core drilling compared with non-core drilling

分析结果表明，特深井施工的取心钻进比率（取心钻进进尺与总进尺之比）对钻进施工时间有着显著的影响作用，钻进施工时间随着取心钻进比率增加而线性地上升(图 7)。钻进施工成本与钻进施工时间密切相关。超长的钻进施工时间意味着巨额的钻进施工成本。

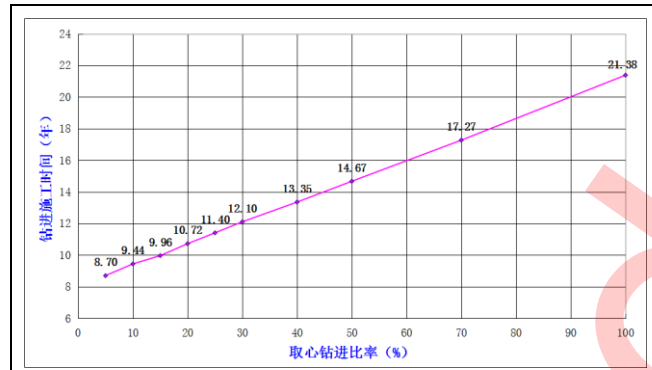


图 7 13000m 特深井钻进施工时间与取心钻进比率的关系
Figure 7 The relationship between time needed for drilling a 13000m ultra-deep well and core drilling percentage

取心钻进对井壁稳定性的影响。由于取心钻进回次进尺短，进行取心钻进施工时需要频繁的起下钻。起下钻时，钻柱在充满泥浆的井内上下运动会产生波动压力，上提钻柱产生的抽吸压力使井底有效压力降低，下放钻柱产生的激动压力使井内压力增大。这两种压力变化都不利于钻井作业的顺利进行，严重时会造成井壁坍塌或破裂。

2.6 超长钻杆柱

钻杆柱用于传递钻压、扭矩和流通钻井液，是钻探施工中的一个非常关键的环节。钻杆柱在钻进中要承受拉伸、弯曲、扭转、振动等各项载荷和温度载荷的复合作用，工作条件十分恶劣。常规钻杆柱主要采用高强度合金钢为材料。但钢的密度较高，当钻井超过某一深度后，即使采用目前强度最高的钢级 V150，钢钻杆柱的自重仍然可能将钻杆柱自己拉断。

铝合金的密度为 2.8g/cm^3 ，比钢的密度 (7.8g/cm^3) 低得多，铝合金钻柱中由其自重产生的应力比钢钻柱中的也小得多。所以尽管铝合金的屈服强度比钢的要低，但铝合金钻柱比钢钻柱显示出更强的钻深能力。前苏联在施工科拉超深井时采用铝合金钻杆创造了深度 12262m 的世界纪录。不过，现有的铝合金钻杆耐温能力不足，只能在低于 220°C 的条件下使用。

根据技术的现状，采用常规钻杆柱的方案显然不能满足特深科学钻井施工要求。

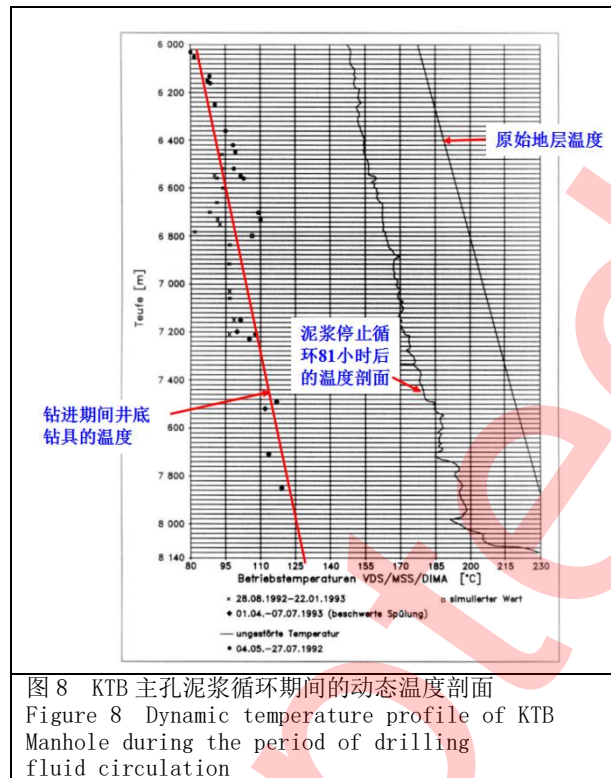
3. 对策与展望

3.1 高温对策

(1) 研制耐高温材料与替代办法。金属材料对于 300°C 的高温不成问题，关键是橡胶、尼龙、泥浆原料等有机材料，如螺杆马达的定子、各类钻具密封件、泥浆与水泥的处理剂等。对策首先是研究出更耐高温的橡胶、聚氨酯，其次是研究出替代耐温能力仍然达不到要求的办法，例如采用金属密封件、金属定子的螺杆马达或全金属的低速大扭矩涡轮马达用于井底动力钻具。

(2) 研制更耐高温的电子器件。随着现代钻井信息化、智能化的程度越来越高，电子器件用于井下器具日益增多，例如钻孔定向的检测与控制、井下信息的传输、测井仪器的日益多等。晶体管、电阻、电容等原件的最高使用温度是 $175^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ （最新技术到 225°C ），印刷电路的最高使用温度是 300°C ，普通绝缘层在 $150\sim 200^\circ\text{C}$ 变得失效。应对的办法是研究出更耐高温的电子器件，从 200°C 提升至 250°C 将会使仪器工作深度提升至 10000m 左右，如果耐温提升至 300°C ，将可满足 13000m 特深钻的基本需求。

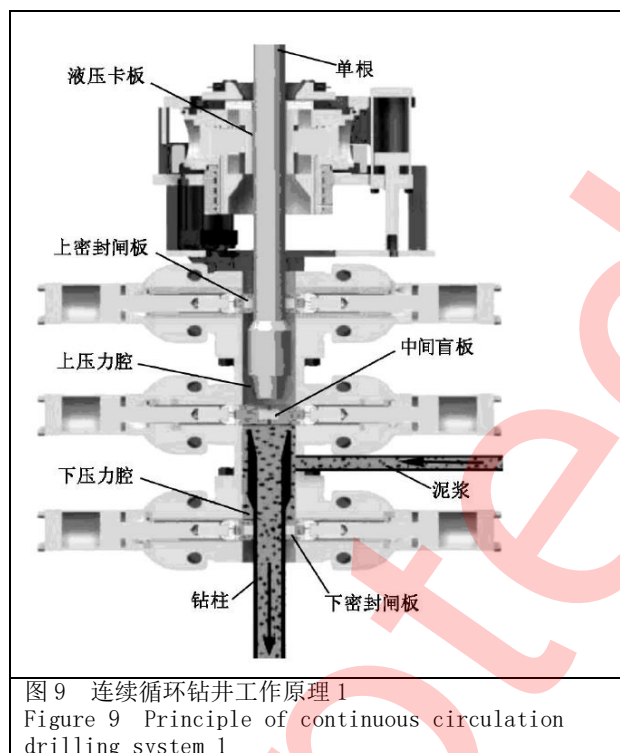
(3) 降温。当上面的对策暂时还不能实现，或者仍不能满足要求时，可以采用降温的办法。即通过泥浆的循环降低钻具内部的温度，而泥浆可通过地面冷却来降低温度，因此连续循环钻井和起下钻装备成了降低井下事故、提高钻进效率的最新技术。KTB 主孔的施工经验表明，在 8000m 井深条件下，循环可使井底钻具内的温度降低 $80\sim 100^\circ\text{C}$ （图 8）^[8]。



在起下钻时如何循环泥浆呢？可采用业已研发成功但仍需逐步改进的“连续循环钻井技术”（图9）^[9]，即在下钻过程中不中断井中泥浆的循环，以使下部钻具始终处于温度较低的状态。应对的办法之二是应用制冷、隔热措施。从热力学原理可知，在高温高压的环境里采用制冷机几乎是不可能的，杜瓦瓶隔热措施也只能维持很短时间，没有实用价值。使用半导体制冷器、利用热泵原理也只能是设想，能否在特深井中发明出专用的制冷机将是科学与工程界的极大难题。

(4) 应解决高温泥浆、防高温蜕化的固井水泥和高温防腐的研究。

(5) 选址。除了采用物理方法抗温、降温以外，还有一个重要渠道是尽量选择地温梯度低的地点来实施特深钻。俄罗斯 C Γ-3 井之所以能钻进到 12262m 深度，在很大程度上是得益于井位选在了低地温梯度区域。C Γ-3 井深度小于 3000m 地温梯度只有 1°C/100m，井深大于 3000m 后地温梯度为 1.8-2°C/100m，10909m 井底最高温度达仅 185°C。相反，德国 KTB 主孔的温度梯度为 2.76°C/100m，9101m 的温度约为 267°C。由于高温的限制，KTB 主孔 9000m 后的钻进施工变得十分困难^[8]。



3.2 高压对策

着重解决入井钻具、仪器的密封问题及保证外壳的承压能力；解决高密度钻井液体系在高压及高温工况下的稳定性、流变性问题。

3.3 高地应力对策

(1)多下套管。在高应力条件下井壁岩石会产生破裂，在其后的施工过程中，井壁坍塌和掉块的情况随时可能发生，可能导致井内的钻具被卡或被埋，导致钻进施工无法正常进行。为了减少卡钻或埋钻的几率，应采取多下套管，减少裸眼井段长度的措施。多下套管的结果是，套管层次较多，钻井的直径较大，钻井成本较高。但是如果考虑到可以降低井内事故发生的可能性，这样的付出是值得的。前苏联科拉特深井施工时裸眼井段长度曾经超过了 10000m（裸眼井段从 2000m 至 12066m）。表面看来，这会大大降低钻进施工成本。可是在井深 12066m 起钻至钻头位置 7850m 时发生掉块卡钻事故，处理无效后，从 7010m 处侧钻。侧钻进尺 5056m，处理事故总时间 1193 天（1984 年 9 月 27 日至 1988 年 1 月 2 日）。此次事故造成了巨大的时间和经费的损失。该卡钻事故是由于距井底很远处的裸露井壁上的掉块所造成的。

(2)采用封堵性好的钻井液体系。借助于钻井液体系的造壁和封堵效果，在井壁形成韧性较强的网络，并使细粒的惰性矿物充填于此网络和井壁岩石的裂隙之中，将破裂的岩石结合成一体，避免碎岩块向井中掉落。此外，可酌情适当加大钻井液密度。提高钻井液密度对改善高应力造成的井壁失稳有一定的效果，但效果有限。

(3)采用膨胀套管技术。连续采用同一种规格的膨胀套管，实现真正的一径到底，将会极大简化井身结构。但目前技术上还不成熟，这正是攻克关键技术主题之一^[10]。

(3)减少取心进尺和起下钻次数。起钻过程中的抽吸作用和下钻过程中的压力激动作用，会加剧井壁失稳。因此，应该尽量减少起下钻次数。而前提是，应该减少取心钻进的工作量。

3.4 井斜的对策

一是采用主动式防斜技术——自动垂钻系统。由于自动垂钻系统中采用了电子元器件，该系统的耐温能力很难超过 200℃。与起下钻连续循环的措施相结合，该系统可用于更大的

井深。在自动垂钻系统由于温度限制而停用后，可采用机械式的自动垂钻系统。该系统中没有电子元器件和橡胶元件，完全采用机械机构在钻进过程中进行测斜和纠斜，耐高温能力可达300℃^[11]。

二是应用被动式防斜技术——井底马达+液动锤。经过东海科钻一井的实践，证明这种方法在一度程度上是有效的。

三是的传统防斜技术进行改进。

3.5 取心对策

为解决极破碎地层岩心采取率低的问题，应改进取心钻具，采用井底局部反循环的取心方法。科拉超深井的实践证明了该措施的有效性^[12]。

此外需严控取心比率；为满足地学信息获取的要求，可采取取心钻进和全面钻进交替进行的策略，即每进行全面钻进100-200m后，进行一次取心钻进。或者在钻达目标层之前基本不取心，钻达目标层之后再加强取心。

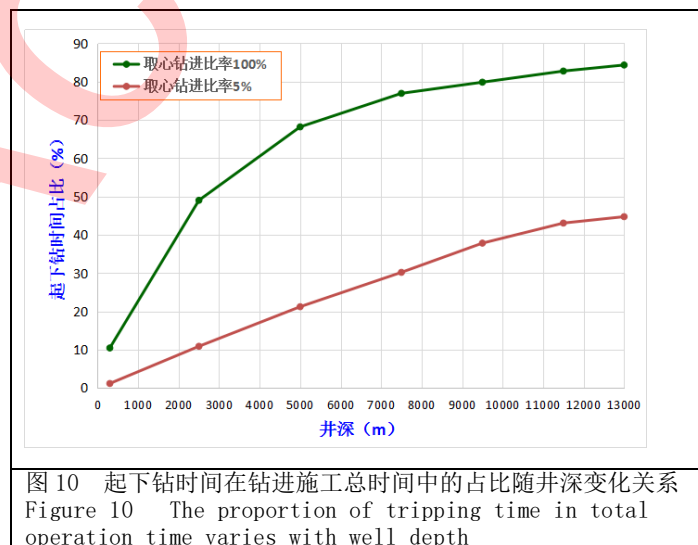
3.6 超长钻柱问题对策。

由于钢钻杆强度不足以及铝合金钻杆耐高温能力不够，常规钻杆不能满足超万米特深科学钻井施工的要求。一个比较可行的解决方案是采用钛合金钻杆。据资料介绍，目前已有的钛合金材料为Ti-6Al-4V，最低屈服强度为130ksi，密度仅为钢材的56%，具有耐腐蚀、耐高温、抗疲劳、重量轻、弹性好、强度高的优点。国外已有在钻进施工中成功应用的实例。采用钛合金钻杆柱，可提高钻杆柱的抗拉强度，加大特深井施工中钻杆柱的安全性。此外还因为钻杆柱重量减轻而带来一系列的其他优点：(1)降低对钻机的载荷要求，减小钻机研制难度，降低钻机研制费用，减少研制时间；(2)降低钻机运行期间的能耗；(3)提高起下钻速度，减少施工时间并进一步降低施工成本^[13]。

3.7 开展关键装备的攻关研发

首先是特深井施工的地面成套装备，作为装备主体的钻机，其能力并非难题，主要是高效率的配套。

特深井取心钻进最耗费时间和费用的是起下钻。分析结果表明，随着井深加大，连续取心钻进施工的起下钻时间在总时间的占比不断加大，井深超过10000m，起下钻时间的占比将超过80%（图10）。即使采取比较低的取心钻进比率，起下钻施工时间在施工总时间中也有较大的比例。



如果能够采取技术措施，加速起下钻施工过程，将对明显降低钻进施工时间和成本。针对

科学钻探要求取心较多，起下钻操作占用时间比例高的特点，应当重点研发提高起下钻速度，缩短施工时间的装备技术，例如采取长立柱设计；研制到效率的管柱自动化处理系统，解决拧卸、移摆的钻台操作系统等措施。此外，采用轻合金钻杆柱也是提高起下钻的有效措施。由于铝合金钻杆耐温能力不足，我国施工特深科学钻井最佳方案是采取钛合金钻杆。钛合金钻杆柱更耐腐蚀，重量比钢钻杆轻得多，起下钻速度也会更快。

3.8 其他关键工艺技术的研发

根据前期预研的成果，除了上述装备与重点技术外，还应当开展 12 个方面 60 余项关键技术的攻关（详见“科学超深井钻探技术方案预研究专题成果报告”^[4]）。

4. 关于工程管理模式

万米及万米以上特深钻工程（含依托深孔组建的深地观测网络）本质上属于大科学工程，我国大科学工程项目全部是政府投资类公益性项目，承接单位都是中科院、各部委及其下属的研究单位，早期的管理模式主要有基建处模式、工程指挥部模式等，后来也引入市场经济的因素，有项目法人制、政府主导+法人参与型、官产学研联合研究制、近年来采用“行政+技术”举国制、集散联合项目制等模式。

未来将要开展的万米以上特深科学钻探工程规模更大、技术更复杂、工期多达 10 年以上，投资在几十亿元，涉及的部门、单位、地方、企业众多，关系十分复杂，既有特种装备的研制，又有专用钻探技术的研发，更有极具多种难题的钻井工程施工和创新性地球科学研究。因此对其管理模式应该展开仔细的规划和研讨，以期能高效组织和实施这项高科技工程。

根据以往科学钻探工程管理的经验与问题，建议本项特深钻工程施工现场的管理模式应具有如下要点：

- 基本模式：采用项目法人（甲方）负责制，负责总体任务中所有项目的管理；
- 现场成立指挥部代行法人职责；
- 指挥部设正副指挥长，设立三总师（总地质师、总工程师、总会计师）；
- 统一管理人、财、物；
- 聘请工程监理（公司）和法律顾问（执业律师事务所）；
- 总体设计由甲方负责，钻井工程施工由甲方直接指挥，可采取劳务外包方式；
- 各子工程设计及其他部分工程施工采取外包方式，分别以合同形式约束双方；
- 注重原始信息资料的及时采集和汇总；
- 自始至终关注成果及全程档案的管理。

参考文献

- 1 Dong S W, Li T D, Gao R, Chen X H. The opening chapter of China's exploration of earth's deep interior(in Chinese). Science Shanghai, 2009,61(4):30-33 [董树文, 李廷栋, 高锐, 陈宣华. 地球深部探测与实验研究. 科学上海, 2009,61(4):30-33]
- 2 Gao X Z. Discussion on vertical resolution of well logging(in Chinese). Logging technologies, 11993, 17(4):54-59 [高效曾. 测井垂直分辨率的探讨. 测井技术, 1993, 17(4):54-59]
- 3 Zhang W. The implementation of German continental scientific drilling program(in Chinese). Foreign geological exploration technology, 1998(3):44-46 [张伟. 德国大陆深钻计划实施情况介绍. 国外地质勘探技术, 1998(3):44-46]
- 4 Zhang J C at al.. Pre research report of scientific super deep well drilling project(in Chinese). Beijing: Geological publishing house, 2016 [张金昌等. 科学超深井钻探技术方案预研究专题成果报告. 北京:地质出版社, 2016]
- 5 Yin G Q at al.. The affecting factors analysis of borehole wall stability in petroleum drilling(in Chinese). Journal of Changchun Institute of Technology(Natural Sciences Edition), 2016, 17(3):89-93 [尹国庆等. 石油钻井中影响井壁稳定性因素分析. 长春工程学院学报, 2016, 17(3):89-93]
- 6 kozlowski E A. Supper deep well of Kola Peninsula(volume2)(in Chinese). Beijing: Geological publishing house, 1989 [科兹洛夫斯基. 科拉超深井(下). 北京:地质出版社, 1989]
- 7 Wang D, Zhang W, Zhang X X at al. Drilling engineering and technologies of Chinese continental scientific drilling project(in Chinese). Beijing: Science press, 2007 [王达, 张伟, 张晓西等. 中国大陆科学钻探工程科钻一井钻探工程技术[M]. 北京:科学出版社, 2007]
- 8 B. Engeser and L. Wohlgemuth. Das Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland—KTB Bohrtechnische Dokumentation KTB REPORT 95-4. Niedersaechsischen Landeamt fuer Bodenforschung, 1996
- 9 Qiu Y L at al. Development and field test of a foreign continuous circulation system. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(2):101-103 [邱亚玲等. 国外连续循环系统的研制及现场试验. 石油钻探技术, 2009, 37(2):101-103]
- 10 Xu B G at al. Overview of mono-hole drilling technology(in Chinese). Oil drilling and production technology, 2011, 33(2):12-15 [徐炳贵等. 等井径钻井技术概述. 石油钻采工艺, 2011, 33(2):12-15]
- 11 Han L J at al. Development of mechanical automatic vertical drilling tool(in Chinese). Journal of petroleum, 2008, 29(5):766-768 [韩来聚等. 机械式自动垂直钻井工具的研制. 石油学报, 2008, 29(5):766-768]
- 12 Wang D, Zhang W at al. General situation and characteristics of Russian scientific deep drilling—one of a series of technical investigation reports(in Chinese). Exploration engineering, 1995(1):53-57 [王达、张伟等. 俄罗斯科学深钻技术概况和特点—技术考察系列报道之一. 探矿工程, 1995(1):53-57]
- 13 Wei C X at al. Performance and application of a new type of high strength drill rod(in Chinese). Journal of Chongqing University of Science and Technology:Natural Science Edition, 2008, 10(4):33-34 [魏存祥等. 新型高强度钻杆性能及应用. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2008, 10(4):33-34]

The Key Problems of Ultra-deep Drilling Engineering

Da WANG, Wei ZHANG & Jun JIA

Deep Earth Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China

Abstract:

Ultra-deep scientific drilling, a large scale scientific research project successively implemented by the major countries all over the world, is a typical representative project which reflects the entire scientific and technological strength of a country, also the most difficult and slowly developed scientific project among the four great scientific dreams of the mankind, i. e. going up to the outer space, reaching the interior Earth, entering into the deep sea and probing into the north and the south poles. Due to the isolation by lithosphere, it is very hard to observe the information of the interior earth. At present, geophysical and geochemical methods are mainly employed for this purpose, though fast and simple, with the information obtained of indirect, deduced and multi-interpreted. As scientific drilling can directly obtain underground materials, structure and information, based upon which the geophysical interpretation result can be corrected, it becomes an inevitable way to obtain a great breakthrough for earth science. However, hampered by lack of well-developed technique and of economic reasons, drilling to approximately 10 km deep is only realized in few areas at present, with the drilling depth only one tenth of the lithosphere thickness, far inferior to the requirement for observing the upper and the lower mantles.

To deeply understand the earth, drilling must penetrate into the earth deeper and deeper. The implementation of ultra-deep scientific drilling project over 10000 meters will greatly promote the development of drilling equipment, instruments and drilling technologies, thus help to improve the application level of the related materials and electronic elements under the extreme conditions.

Technically, ultra-deep scientific drilling engineering will face three key problems, namely high temperature, high pressure and high crustal stress, which cannot be resolved as yet by using the existing well developed technique, and to solve these key problems will cost huge, expend long time and face high risk.

For this reason, this paper puts forward several principal countermeasures and some research areas, to which attention should be paid during the implementation of the engineering construction.

Keyword: Deep earth detection scientific drilling extra-deep drilling ultra-deep drilling large scientific engineering