中国深地，突破万米

本报记者 **赵征南**

一片沙、一群人、一口井、一个梦、一万米。

“9999.97，9999.98，9999.99……”3月4日下午，中国石油塔里木油田深地塔科1井电子屏幕上的数字以厘米计上升。14点48分，当“10000.00”出现时，现场的喜悦溢于言表。

作为我国首口设计井深超万米的科学探索井，深地塔科1井成为世界陆上第二口、亚洲第一口垂直深度超万米井，刷新了世界万米深井钻探用时最短纪录。这标志着我国自主攻克了万米级特深井钻探技术瓶颈，深地油气钻探能力及配套技术跻身国际先进水平。

回望20世纪60年代，中国钻成第一口深井——4718.77米深的大庆油田松基6井。“从4700米钻到1万米，我国石油工业经历了近60年的实践。”此刻，中国石油塔里木油田企业首席专家、深地塔科1井井长王春生激动不已。

与深空、深海等探索大自然的壮举相比，人类对地球内部的直接观测一直十分有限。而科学钻探是获取地球深部物质和了解地球内部信息的最直接、最有效、最可靠的方法。近年来，我国多次刷新深地开发纪录，为入地万米提供了充分的基础条件、技术储备和经验积累。

“超深层已成为我国油气资源增储上产的主阵地，向地球深部挺进是保障我国能源安全的重大战略任务，是端稳端牢能源饭碗的重大战略选择。”中国工程院院士孙金声表示。万米深地科探工程不仅是我国加快实现高水平科技自立自强、打造超深油气原创技术策源地的迫切需要，更在探索地壳深部结构及大陆演化、发现油气资源方面具有重要意义。

目前，深地塔科1井正向着1.1万米的地球更深处挺进。

深地塔科1井（无人机照片）。 新华社发

深地塔科1井突破万米现场。 （受访者供图）

钻机轰鸣、泥浆飞溅，中国石油人加快钻井步伐。 王成凯 摄

垂深万米有多困难

四“超”三“高”两“多”与“9977惊魂”

新疆塔克拉玛干沙漠腹地，约20层楼高的井架笔直矗立。钻机旁，排列着10多套昔日“铁齿钢牙”的“金刚钻”，它们可并不简单，是我国科研人员从钻头切削齿选型、布齿优化设计、表面处理工艺等方面，持续迭代升级兼备攻击性、抗冲击、抗研磨的新型混合布齿钻。如今，齐刷刷在“地宫”中磨平了棱角。

深地塔科1井于2023年5月30日开钻。从地表钻到8000米，用了约5个月；然而，随着钻探深度的增加，钻探的难度也会成几何倍数增加，从8000米到1万米，足足用了4个多月。这四个月，竟然先后更换了15枚钻头。目前的这枚，能经受8万个大气压的压强，相当于8头大象站在一个指甲盖上。

一深带万难！

迄今为止，人类探索到的最大垂直深度为12262米，也就是苏联科拉SG-3井的深度，钻探历时23年。而设计深度1.1万米的深地塔科1井同样困难重重，自上而下要穿透13套地层，面临超深、超高温、超高压、超长裸眼段，高应力、高研磨、高盐，多套压力体系、多种复杂岩性等，四“超”三“高”两“多”挑战。

以复杂地层带来的复杂岩性为例，4200米左右时，遇到了地球深部岩浆侵入地壳产生的火成岩，硬度非常大，考验了钻头的研磨性；6300米左右，遇到了奥陶系的泥岩，水基钻井液一泡，就像饼干放到牛奶中泡软了；到了9000米之后，间断发育的燧石地层与石膏地层交替出现……每一次岩性变化，几乎都要更换钻头，并调整钻井液的配比。

“最后一公里”，可谓难上加难。井下温度超过200℃，钻工具所受压力更是高达130多兆帕，相当于在指甲盖的面积上停着一辆1.4吨重的汽车，金属材料、橡胶材料、电子元器件极可能失效。

根据原先的预测，1万米的最后50米，每小时掘进约0.5米。所以当2月17日上午钻进至9968米时，很多人认为旦夕之间便能突破万米，但这32米却等待了16天，每天只钻进2米。

究竟为什么这么慢？

“万米钻探最大一个特点就是未知性。”中国工程院院士赵文智表示，有未知性就充满风险，就像进入无人区一样，你不知道下一步会遇到什么样的地质或工程风险，这是最具挑战性的领域之一。

2月17日这天下午，深地塔科1井便遇到了“未知性”的当头一棒，步步惊心。

连接钻头和钻机的是近1200根钢制钻杆，仅重量就达到400余吨。还要将2500多根套管一段一段分别送入地下，整个过程就像在10公里的长度上拧麻花。超高载荷、超长距离及井下强烈震动，运动受力状态特别复杂，能量传递极其困难。

当钻头钻至9977.06米时，钻杆突然断裂，长达8417米的钻具掉落井下。经过三天三夜的“急救”，技术人员终于接通了断裂的钻杆，可又发现井下泥浆没有返出，钻具水眼发生了憋堵。当他们还在解决憋堵问题时，卡钻情况又冒了出来，中国石油塔里木油田勘探事业部副经理张志回忆，他们先后用震击器震击了39次才艰难解卡。危机解除后，很多技术人员激动得跳了起来。

279个日夜，29枚钻头，1060多根钻杆，10多套地层……为了打成这口万米深井，我国一代代科技工作者不懈努力铸就了新的“中国深度”。

中国石油人正查看从近万米深地取出的钻头。 金添 摄

从地底深处取上来的岩屑。 新华社发

用显微镜研究岩屑。 新华社发

大国重器怎么炼成

材料、装备国产化率达90%

工欲善其事必先利其器。中国石油攻克了超高钻台大载荷提升系统、智能控制一体化平台集成技术等关键技术难题，联合成功研制了全球首台具有自主知识产权的12000万米特深井自动化钻机。

“与普通钻机相比，这台钻机载重提升能力由三四百吨提高到900吨，有效解决了1200多节上下相连的钻杆与其他钻具带来的高负荷难题。”中国石油宝鸡石油机械公司一级工程师李亚辉说。

万米深井还与国内多家单位合作，采用了我国自主研制的套管、井下工器具等近200项国内顶尖装备，推动了钻采装备产业链迭代升级。

以中国宝武宝钢股份BG155V高强高韧石油套管的研制为例，在此次钻进过程中，宝钢股份从一开始就参与这口万米井的钻井方案论证、井身结构设计及配套套管选材，通过和高等院校、科研机构等合作，开发出具有完全知识产权的全球首套无缝钢管在线控制冷却装备和关键核心技术，极大地推动了我国无缝钢管绿色高效制造的技术引领示范和产品持续的迭代升级。

“套管的钢级、抗挤毁能力、密封能力等关键性能指标均高出最高钢级（国际通用标准）21%以上，而且套管的各项性能指标在220℃高温环境下基本保持不变。”宝钢股份钢管条钢事业部产品设计技术首席工程师卢小庆说，“相当于完全抛开了国际标准，为特深井量身定制多个具有个性化特点的非标油套管产品，无论是外径、壁厚还是构型，都有极强的针对性。”

团队克服了尺寸精度、理化性能、特殊接头等难题，形成了稳定可靠的全流程一贯制生产制造技术，先后完成产品试制、现场认证、产品首发等工作。最终以极高标准和极严要求，在开展了上百次严密试验的基础上，有针对性地开发出目前国内强度最大的高强高韧非标套管。

“对于高端装备，国产化非常重要。早期我们没有自己的套管，只能从日本、德国甚至阿根廷进口。但国外装备价格高、制作周期长，还要按着他们的标准。万米钻井对套管的抗粘扣、抗外挤、抗内压性能和高连接强度的要求非常严格，国际上没有同类产品可以借鉴。即便有，还可能‘卡脖子’不给你用。”卢小庆亲眼见证了这些年的变化，由其团队研制的多种高端套管已经在国内多个特深井中得到应用，特别是近五年来，8588米、8882米、9010米、9026米……每一次亚洲深井纪录的诞生，其团队均参与其中。“从8000米到1万米，不是一蹴而就的，而是一步一个脚印，参与钻井的各个部门都在进步。”

万米超深井钻井是一项系统工程，代表着一个国家的钻井最高水平，更是综合国力的集中体现。在钻进过程中，塔里木油田打破传统钻井组织形式，搭建跨学科工作平台，集合地质、工程、装备等精锐力量，组建了9个技术支撑组，在井斜、井径、测井等关键质量指标方面均达到100%的合格率，形成抗特高温水基钻井液、大吨位长裸眼下套管及固井配套技术等7类21项阶段成果，使用的材料、装备国产化率达90%。

目前，在塔克拉玛干沙漠腹地及其周边，我国已钻成200多口超8000米超深井。“随着超深钻井技术和超深地质理论的进步，以前我们要花好几年打一口8000米井，现在只需约130天。”张志说。

入地望远有何“洞天”

破译璀璨“地球密码”到深部找油气

作为探索地球深部的“望远镜”，深地塔科1井肩负着深入探索地球内部结构和演化规律、完善万米深层油气成藏理论双重任务。

钻穿万米，洞察万米，取芯万米，突破万米仅是深地勘探三部曲的开始，中国石油将在国际上首次开展万米物理测井、万米取芯等一系列科学探索工作。通过对深地进行取芯分析，可以揭示大陆地壳的物质组成与结构，探索地球深部流体系统、地热结构，并解决地球演化的一系列重大基础科学问题。

深地塔科1井在入地过程中，取出了很多岩石样品。其中，来自地下9500米到9900米的岩石，是我国首次获得的。这些沉睡了数亿年的岩石（屑）在显微镜下色彩形态各异：如璀璨星云一般的硅质岩，美丽且坚硬；像一块多彩画布的矿物集合体，色彩斑斓；还有黄金一样闪耀的石英。它们能向科研人员提供岩石沉积演化信息，乃至5亿年前的“塔里木海”经历了怎样的沧海桑田。

目前，科研人员分批次对不同深度的岩石进行采样，并对样品的地质特征完成了刻画描述，首次绘制出我国首份万米深层地质剖面图。

深地塔科1井的另一个目标是能源。

最新一轮资源评价结果显示，世界新增油气储量的60%来自深部地层，我国83%的深地油气仍有待探明开发。深地塔科1井所处的塔里木盆地，是我国最大的深地油气富集区。随着勘探技术的不断进步和超深地质理论的完善，塔里木盆地的油气勘探持续向超深地层推进。

曾经，有世界油气勘探开发专家认为，在8000米以深的高温高压环境中，埋藏数亿年的液态烃（即轻质石油）早就烧干了。但是，塔里木油田富满10亿吨级大油气田的发现和一批超深探井的接连告捷，将原油成藏“死亡线”变成增储上产的“生命线”。

“现阶段我们对万米深层油气藏的形成的基本理论认识还处在假设阶段，经过这次钻探以后，我们获取的第一手资料，有些假设会被肯定，有些假设会被修改，甚至有些假设会被改变，这对中国万米深层石油地质理论的进步和发展无疑是非常重要的一个探索。”赵文智说。

入地万米相当于只打穿了塔里木盆地地壳厚度的四分之一，仅为地球半径的1/637。如果地球是一个鸡蛋，我们仅钻穿了鸡蛋壳的1/4。接下来，深地塔科1井的钻头将钻穿塔里木盆地第13套地层，探秘神秘世界的宝藏与谜题。

专家访谈

我国瞄准形成自立自强的『入地』系统能力

——访南京大学教授、自然资源部深地实验室首席科学家董树文

文汇报：我们为什么要执着地向深地挺进？

董树文：主要是基于以下理由：(1)深地，也就是地球深部，是地球科学的“最后前沿”。人类对地球深部的认识还远远不够，而“深地探测为人类认识自然不断拓展新的视野”。(2)地球深部是人类远远没有进行有效开发利用的巨大资源宝库，是关系可持续发展和国家安全的战略领域。“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题。”(3)地球深部是地表过程的“策源地”。越来越多的证据表明，地球表层发生的现象，其根子在深部；缺了深部，地球系统就无法理解。深部过程是理解成山、成盆、成岩、成矿、成藏、成储和成灾等过程成因的核心。地球演化为宜居星球，其驱动力也在深部。(4)深部地下空间也是国防安全的重要保障。

文汇报：在油气勘探领域，我国的超深井不断涌现。去地下万米找油找气，意义何在？

董树文：去地下万米找油找气，向深部拓展资源能源领域，是保障我国资源能源安全的重要举措。理论研究与勘探实践表明，油气保存的深度，已远远突破传统石油地质理论的油气“死亡线”和储层“致密线”；深层－超深层已成为国内外油气资源开发的最重要领域之一，发展潜力巨大。

文汇报：有人说，与“上天”“下海”相比，我国的“入地”工程似乎落在了后面，情况是这样吗？目前，我国的深地探测能力几何？

董树文：“入地”相对于“上天”“下海”而言，是落后了。不仅我国如此，美国等西方发达国家也是如此。所以“上天不易，入地更难”。

就我国“入地”现状而言，从直接入地能力看，以钻探深度（垂深）作为指标，达到上世纪苏联80年代和欧洲90年代水准。不过，在万米钻探工艺和材料等各个方面，我国目前的水平已远远超过当时。

间接入地探测能力还处在“跟跑”与“并跑”阶段，表现在：(1)在深地探测主要技术装备的研发方面仍存在差距，如反射地震观测装备、宽频带地震仪和超长周期大地电磁仪等研发滞后。(2)在深地资源勘查领域，我国目前仍缺乏对深部地质构造等岩石圈成矿背景和条件的系统认识和研究，探测程度较低，系统的深部成矿理论体系尚未建立，深部矿体定位预测技术和装备相对薄弱，深部矿产预测与勘查能力尚需提升。(3)与国外深部热能探测与利用相比较，我国深部地热资源勘探开发、地热成井与热储改造等关键技术储备还处于起步阶段，尚无成熟的“找热”技术体系与评价方法；缺乏规模化效益化的“取热”技术，以及地面高效可持续的“用热”技术，多项技术亟须进一步攻克。

文汇报：我国深地工程将瞄准哪些目标？未来将构建怎样的地球深部探测体系？

董树文：未来，我国将瞄准形成自立自强的“入地”系统能力。(1)发展深地探测技术与装备体系，实施大陆岩石圈深部结构与物质组成探测、大陆特深科学钻探工程，形成“透视地球”的能力。(2)创新大陆成岩成矿、成藏成储系统理论，深探资源，发现深部能源“新区”，开辟深部找矿“新空间”。(3)创新发展深地资源绿色利用技术，推动建立深地产业新业态，探索深部地下空间利用新方式。(4)创立“深地科学”理论体系，在地球科学理论创新的国际合作与竞争中，占领未来高地。

构建未来深部探测体系方面，我国将自主研发深地探测关键核心与前沿技术及关键装备，形成空天—地面—井中大深度高精度深地资源探测技术装备体系；建立对地球深部“二维、三维和四维”探测—观测系统，在四维观测领域实现实时监测、深部过程连续观测、动态监测与实验模拟；此外，将构建形成万米深度资源供给与储备空间，形成一系列大型资源基地，提高深地资源勘查水平与保障程度。