



探寻地球深部秘密的“手”

——深部科学钻探取心技术探秘

□ 文图 / 刘晓慧 张金昌

第一作者简介 刘晓慧，中国矿业报社记者，从事地学科普研究。

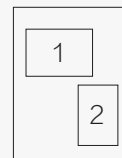
近年来，我国工业化、城镇化和农业现代化加快推进，使得我国矿产资源供需矛盾日益突出，这对地质工作提出了更高的要求。我国矿产资源勘查面临大量找矿难题。成矿预测、钻孔选址、复杂地层与深部连续取心亟待破题，急需运用先进的、高效的成矿理论和勘查技术方法指导。地质钻探技术是取得地下实物资料、建立测试通道、验证地下信息推断与解释，最终圈定矿体、计算储量及评估品位的工程技术手段。深部地质钻探技术离不开地质岩心钻探设备，有先进的设备才能使先进技术付诸实施。

地质岩心钻探设备的发展回顾

钻探是人类获取地球内部信息最有效、最直观的方法。20 世纪八九十年代西方发达国家就完成了从立轴式钻机到全液压动力头钻机的更新换代，绳索取心钻进技术得以普遍应用。据报道，世界大国纷纷开展各自的深部探测计划。其中，美国于 2003 年启动的“地球透镜计划”，15 年内将投入 200 亿美元；俄罗斯在 2005 年以前就在其欧洲部分和盛产能源的西西伯利亚实施了十多处超级钻探项目。但深部探测并不简单。截至目前，全球仅有前苏联的科拉超级钻达到过 1 万米的深度。我国曾于 2001 年在江苏省东海县启动了中国大陆科学钻探第一井，2005 年曾达到 5 100 多米

的深度。深部矿产资源勘探与开发是影响我国可持续发展能力的战略性科技问题。为解决日益严峻的资源短缺问题，应加强深部探测，使我国主要区域地下 4 000 米变得透明。

国内地质岩心钻探设备的发展，在改革开放前经历了以下 5 个阶段：第一阶段为 1949 年以前，国内钻探机械几乎全部由国外引进；第二阶段是 20 世纪 50 年代初，我国大量钻机是从前苏联引进的手把式钻机，这在当时来看并不先进；第三阶段为 20 世纪 50 年代中期，我国开始学习国外先进钻机制造技术，并仿制出一批高质量钻机；第四阶段为 20 世纪 60 年代，随着国内机械制造业迅速发展，我国已经开始自行设计钻机；第五阶段为 20 世纪 70 年代，我国开始全面推广金刚石钻进技术，促进了我国地质岩心钻机的研制与制造业的发展，并于 20 世纪 80 年代开始基本满足了国内地质矿产勘查的需要，甚至有部分机型还向外出口。改革开放之后，我国相继从美国、德国等国引进了多条名牌液压元件生产线，使国产液压元件的质量有了大幅度提高。进入 21 世纪后，国内研究机构及生产厂家先后研发出了全液压岩心钻机。这其中就包括中国地质科学院勘探技术研究所研发的 YDX 系列全液压岩心钻机，它具备了先进钻机的全液压化、给进行程长、无级调速和机械化程度高等优点，顺应国际钻探设备的发展趋势。



1 3 500 米全液压地质岩心钻机在金羊盆地油气调查(羊D1井)现场
2 3 500 米全液压地质岩心钻机在山东招远金矿勘探现场

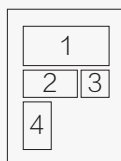
21 世纪初，我国仍在普遍使用对新工艺技术适应性差的立轴钻机，新一代全液压力头钻机需要花重金进口；国产绳索取心钻杆由于管材质量问题，只能满足 1 000 米以内的钻进，且钻杆折断事故频发；钻探器具也相对落后，硬岩地层钻进效率低；事故处理工具简单，复杂孔内事故处理能力差，常常导致整个钻孔报废。这种落后局面，严重制约了我国深部地质勘探工作的发展。

从两个项目说起

谈到深部科学钻探取心技术，就不能不提与此项技术体系息息相关的两项重大科学工程。2001 年以来，中国地质调查局组织实施了国家发改委重大科学工程“大别—苏鲁超高压变质带科学钻探”和国土资源部地质调查评价专项项目“松辽盆地资源与环境科学钻探”两项具有全球地学意义的深部科学钻探项目，项目的首要工程目标是获取高质量的深部地层岩心资料。

国家发改委重大科学工程“大别—苏鲁超高压变质带科学钻探”又称“中国大陆科学钻探——科





- 1 96 绳索取心液动潜孔锤
- 2 75 绳索取心液动潜孔锤
- 3 YZX 系列单体液动锤
- 4 三筒钻具满筒岩心出井

钻 1 井”。项目地处全球最大超高压变质带上的江苏省东海县，由中国大陆科学钻探工程中心于 2001 年 6 月至 2005 年 3 月间承担实施，完钻井深 5 158 米。该中心是以中国地质调查局直属单位为主组建的。“科钻 1 井”是我国第一口大陆科学钻探井，也是我国在 ICDP 框架下的首例大陆科学钻探工程。

项目的基本科学目的是研究巨量物质深部俯冲与折返机制。其核心的技术突破，是研发出了一套螺杆钻和液动锤井底复合驱动的大口径硬岩取心钻探技术体系。

研发与应用以井底动力复合驱动为核心的硬岩取心钻进技术体系，是“科钻 1 井”高效完钻的基

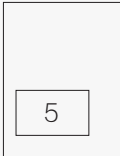
本技术保障。“科钻 1 井”进行了 7 种组合形式的钻进试验，唯硬岩井底动力复合驱动取心钻进技术体系打破了纯回转钻进在坚硬脆性地层中效率低、回次钻程短的瓶颈，体现了井内事故少、钻进能耗低、钻探管材耗损小的技术经济效果，形成了具有我国自主知识产权的创新成果，成为“科钻 1 井”及我国后续科学钻探工程的常规技术手段。工程成果分别获国家科学技术奖二等奖 1 项，国土资源部科学技术奖一等奖 2 项、二等奖 1 项。

国土资源部地质调查评价专项项目“松辽盆地资源与环境科学钻探”，又称“松科 2 井”，由中国地质科学院勘探技术研究所承担实施，中国地质调查局其他直属单位和国内多所院校参与。此项目是我国第 3 例 ICDP 框架下的、迄今为止亚洲地区最深的大陆科学钻探工程。项目的目的是建立全球首条厘定的陆相白垩系综合地质剖面。

松辽盆地大陆科学钻探工程是全球第一口通过连续取心钻穿陆相白垩系地层的大陆科学钻探工程，也是目前我国第一深的科学钻探工程。科学钻探工程将主要实现 4 大目标：一是研究距今 6 500 万年至 1.4 亿年间白垩纪地球温室气候和环境变化，为预测未来全球气候变化提供科学依据；二

是建立服务“百年大庆”目标和基础地质研究的“金柱子”，为松辽盆地及其类似盆地的地球物理勘探提供科学“标尺”；三是攻克高温钻井、固井、测井和超长井段连续取心等关键工程技术，为万米超深井科学钻探提供技术储备，促进我国深部勘查技术发展；四是搭建国际合作交流平台，培养具有国际视野的地球科学专家和人才，造就一支高水平的科学超深井钻探设备研制、工艺研发和工程管理队伍。

“松科 2 井”工程是松辽盆地资源与环境深部钻探工程实施的 4 项科学钻探井之一。该井设计井深为 6 400 米，2014 年 4 月 13 日开钻，计划于 2017 年 10 月终孔完钻。自“松科 2 井”三开于 2015 年 4 月 1 日以来，工作团队致力于大口径成套取心钻进技术的研究与攻关，成功研制出了具有自主知识产权的 KT-298 和 KT-194 两种分别用于 311 毫米和 216 毫米井径的大口径取心钻具，运用井底动力驱动技术在 $\phi 311$ 毫米井眼中超长井段连续取心作业。在三开 $\phi 311$ 毫米井段首次成功应用螺杆马达+液动锤驱动的 311 毫米大口径取心钻进技术，创新性地实现了 $\phi 311$ 毫米井段“同径取心、一径到底”的完钻程序。在此基础上，



5 “松科 2 井”施工现场



“松科2井”工作团队又逐步试验成功钻具双筒、三筒联装的单回次长钻程取心技术，单回次进尺最高超过30米，创造了超千米 $\phi 311$ 毫米同径连续取心和该口径单回次进尺超30米等2项取心钻探世界纪录，这2项技术的成功研发与应用，不仅为“松科2井”三开进度按计划完成提供了坚实可靠的技术支撑，而且使相同进尺提交的岩心总量达到了地质设计的5倍。

“松科2井”应用创新研发的大口径同径取心技术与钻具三筒联装长回次钻进技术实现了对科学钻探沿袭的工程施工路线的创新，使三开井段省略了活动套管起、下程序，取消了2套钻杆、2套井口工具和2套泥浆体系的配置，节约了1676米扩孔工作量，并规避了扩孔作业风险，多回次创造单回次进尺超30米的纪录。其成果的综合应用，为“松科2井”三开段压缩施工周期至少4个月，节约钻探成本超千万元。两项成果在后续延伸井段应用，将继续产生可观的时间效益和经济效益。

深部科学钻探取心技术探秘

钻探，是目前深部地下信息推断与解释的唯一验证手段，也是最终圈定矿体、计算储量、评估矿体品位的唯一技术方法。如何研发先进实用的深孔、超深孔岩心钻机？如何突破大深度软硬交互、复杂破碎地层连续取心的钻进技术和工艺？这些，都是实现深部找矿突破亟待解决的重大科技难题。

从严格意义上说，两个科学钻探工程应该是深部科学钻探取心技术研发的母体。如今，已经成型的“深部科学钻探取心技术体系”成果主要包括三部分。

其一，复合井底动力驱动的硬岩取心钻探技术体系的奥秘。

以螺杆钻和液动锤在井底提供周向回转和轴向震动的复合动力，驱动金刚石钻头以冲击回转方式破碎坚硬地层获取岩心，是我国首创的深部

大口径取心钻探技术方法。

该技术攻克了与金刚石高速回转碎岩要求相匹配的螺杆钻参数选择难题，在深井高背压环境下提高了液动锤工作的可靠性，适用于强研磨性坚硬地层，采用高效、长寿、耐冲击的金刚石取心钻头以及适应高速冲击回转工况的薄壁取心钻具，与低黏、低切、低密度、低失水、高润滑性的“四低一高”钻井液体系等五大关键技术相组合，在坚硬的脆性地层中，平均机械钻速1.13米，平均回次进尺超过6米，岩心直径95毫米，平均岩心采取率86%（地质要求80%）。

其二，大口径同径、长回次取心技术的奥秘。

KT-298取心钻具，攻克了大口径厚壁金刚石取心钻头水力结构和碎岩方式。岩心的卡具对粗大岩心拔断力、承托力合理分配。钻具三筒联装单回次长进尺钻进，以及钻进中加接单根、岩心解卡，以及超长钻具出、入井等5项关键技术及其组合，一举突破大口径取心井段“小径取心、大径扩孔”的完钻程序和单筒短回次钻进的技术套路。这在国际范围内首次成功实现了 $\phi 311$ 毫米口径井段“同径取心、一径完钻”技术路线。三筒联装的钻具单回次钻程突破30米，平均岩心采取率98%以上，岩心直径达214毫米，相同进尺提交的岩心总量为地质要求的5倍。

其三，粗大岩心原状出筒技术的奥秘。

常规的人工振击岩心出筒方法极易对岩心的原状造成人为破坏，不能满足科学钻探对岩心的高质量要求。对于大口径同径取心和单回次长钻程钻进，由于岩心与筒壁间存在极大的摩擦力，常规方法根本无法取出岩心。中国地质科学院勘探技术研究所研发的机械辅助岩心出筒方法，利用液压机械产生的静推力（对 $\phi 311$ 毫米口径段同径取出的岩心，推力通常需50千牛以上）将岩心完整地顶出岩心筒，理想地保证了出管岩心的原状结构。

深部科学钻探技术成果的研发及其应用，对高质量获取地学研究基础资料，深化我国地质基础理论研究，推出国际水平的学术成果提供了关键的技术支持。

深部科学钻探取心技术取得的成果对以获取深部地质资料为目的的各类科学钻探具有普遍的技术意义，对我国矿产与能源勘探的技术进步起到了重要的引领作用，对提升我国钻探工程的国际学术和技术地位起到了重要的推动作用，不仅保证了我国已开展的深部科学钻探工程优质、高效、安全顺利地完 成，还逐步向我国油页岩、页岩气、干热岩等资源勘探领域推广应用。

深部科学钻探取心技术展望

以钻探为主的探矿工程更是反映一个国家地质勘探技术的水平和实力。各种勘探技术手段和地球物理、地球化学调查研究一样齐头并进，才真正表明我国的地质调查在技术方面进入世界一流水平。

我国深部科学钻探取心技术成果在国际钻

探界产生了强烈影响。“科钻 1 井”被评选为 2002 年公众关注的中国十大科技事件、2005 年中国十大科技进展新闻；“松科 2 井”当选 2015 年中国地质调查局十大地质科技进展，《探矿工程》杂志 2015 年度十大钻探新闻，ICDP 网站首页中心位置以《深部钻探纪录》予以要闻报道。这研发过程所形成的钻具规格，尽管是针对依托项目具体的技术要求和工作环境而定的，但基于钻具的基本工作原理，可以扩展设计出多种形式、具有更广泛功能的钻具规格和组合形式，可以适应不同地质环境和工程技术的要求。在成果创新与应用过程中，研发团队培养的青年骨干队伍，将成为我国深部、超深部科学钻探的人才储备力量。■

第一作者单位：中国矿业报社

地质百科

• 复合井底动力驱动的硬岩取心钻探技术：

以螺杆钻和液动锤在井底提供轴向回转和轴向震动的复合动力，来驱动金刚石钻头以冲击回转方式破碎坚硬地层获取岩心，是我国首创的深部大口径取心钻探技术方法。

• 大口径同径、长回次取心技术：

运用 KT-298 取心钻具，攻克大口径厚壁金刚石取心钻头水力结构和碎岩方式难题，钻具对粗大岩心拔断力、承托力合理分配，钻具三筒联装单回次长进尺钻进，以及钻进中加接单根、岩心解卡和超长钻具出、入井等 5 项关键技术及其组合。

• 粗大岩心原状出筒技术：

利用液压机械产生的静推力（对 $\phi 311$ 毫米口径段同径取出的岩心，推力通常需 50 千牛以上）将岩心完整顶出岩心筒，保证了出筒岩心的原状结构。