



# 世界科学深钻最新成果综述

刘广志

自1960年美国提出“国际上地幔计划”，将深部地质学研究推进到一个新时期。30年来各种深部科学钻探计划，诸如莫霍钻探计划、苏联的超深孔钻探计划、美国先后领导实施的深海钻探计划(DSDP)、大洋钻探计划(ODP)以及大陆科学深钻(CSD)相继执行。在此期间，由国际岩石圈计划(ILP)中的CC—4组(大陆钻探)在有关国家的支持与协助下，先后召开了五届国际科学深钻学术会议。

1987年在瑞典召开的第三届科学深钻学术会议之前，由于对取得的地质信息的研究程度不足，公布与交流的科研成果比较分散，但取得了重要的共识：①将含义不清的“超深孔钻探”更名为“科学钻探”(Scientific Drilling)。因为经过大量钻探证明，为解决深部地壳的某个特定问题，不一定非钻超深孔不可，即钻孔深度达7 000~10 000 m。②将科学钻探的主要目的明确为通过钻探观察陆壳(Observation of the Continental Crust through Drilling)。这种认识上的提高对推动今后科学钻探工作深入发展将起重要促进作用。

1988年8月在苏联召开了第四届科学钻探国际学术会议，公布了苏联科学钻探科研成果40项中的大部分成就，引起了世界关注与赞扬，推动了科学深钻在世界范围的广泛交流与促进。现将最新成果综述如下：

## 一、苏联科拉半岛СГ—3孔

该孔位于科拉半岛一大型铜镍矿的采空区，均为结晶岩。1970年5月开钻，1980年钻深到10 800m，打破了美国自1974年保持的9 583m的最深钻孔记录(Bertha Rogers NO:1井)。1985年达12 300m，1991年预计深达12 400m。取得以下技术效

果：①全部采用国产设备；②采用钛铝合金钻杆，使井架总负荷(应为大钩总负荷)仅达250 t；③开孔直径800mm，此后仅下入1层套管至2 000m深处；④用井下涡轮取心钻具。

在取得科研成果40大项中，其中具有重要意义的是：①第一次贯穿了元古代地层(0~6 842m)和太古代地层(6 842~11 662m)，绘制出以科学深孔资料为基础的第一幅前寒武纪地质剖面图和地球化学剖面图。查明地层pH值变化，岩石形成与地质作用的关系与规律。②否定了原深部地震大剖面折射资料对三层古地层的错误推断。原推断“沉积—火成岩成因层”>4 700m，花岗岩层7 000m，玄武岩层>7 000m。③在3千巴压力下，在11 500m深处发现裂隙，为地下流体提供循环通道。(a)采取了甲烷(CH<sub>4</sub>)及其它碳氢气体、H<sub>2</sub>、He等，其中H<sub>2</sub>与He气随深度增加而增多，碳化氢气体则随深度增加而减少。(b)第一次发现矿化裂隙水，随深度变化从氯化钙(CaCl<sub>2</sub>)转化为碳酸钠(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)型。矿化水中含溴(Br)，碘(I)及重金属。

(c)钻孔深入到找矿与成矿前所未达到的禁区。在1 540~1 800m见可采价值的硫化矿，在4 500~4 600m、6 000~6 500m深部压碎岩带中发现低温热液矿化现象；9 000m以深仍发现少量磁铁矿、金云母、白云母、硫化物，11 000m曾发现金矿。上述情况证明地壳热矿化现象不仅在垂直深度内有利于形成，在地壳深部更利于形成。④矿物分布：0~4 586m为硫化矿物；4 586~5 642m为氧化矿(原译文如此)，磁黄铁矿已消失，有磁铁矿、赤铁矿；5 642m以深磁铁矿、磁黄铁矿均不多见；7 000m以深

仍发现蚀变、矿化现象。⑤地温梯度随深度加深而增高，元古代为 $1.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ；太古代为 $2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，预计深度 $10\ 000\text{m}$ ，地温为 $180^{\circ}\text{C}$ ， $15\ 000\text{m}$ 高达 $300^{\circ}\text{C}$ ；⑥岩石可钻性在 $6\ 000\sim 10\ 000\text{m}$ 处比 $0\sim 6\ 000\text{m}$ 处要增高 $0.5\sim 1.0$ 倍。

## 二、德国深钻计划(KTB)

该计划是采用双孔方案，即先施工 $1$ 口 $4\ 000\text{m}$ 深的先导孔，进行全孔取心和大量测井，然后再钻万米超深孔。先导孔自1988年9月开始到1990年4月结束，孔深 $4\ 000.1\text{m}$ ，取心 $3\ 594\text{m}$ ，平均岩心采取率 $89.6\%$ ，初战告捷。先导孔取得了以下主要成果：①采用了 $\text{EC } 5\ 1/2''$  (O. D.  $140\text{mm}$ )型绳索取心金刚石钻探，钻头外径 $6''$  ( $152\text{mm}$ )，取心效果很好。孔内进行 $393$ 个回次，累计 $1\ 670\text{km}$ 的孔内测井，对改进型和新开发的仪器工具作了 $64$ 台次的孔内试验。在孔位周围作了地球物理和三维地震测量。确定主孔今后只取心 $20\%$ 和测井项目。②首先采用Baroid公司开发的Dehydril钻井液系统，是一种含锂的钠、镁硅酸盐，具有良好的润滑性与触变性，不污染环境。③每钻 $1\text{m}$ 采一次岩粉样，立即分析评估，作到边钻边获取岩石的化学组分与矿物成分。全自动气体质谱仪每 $3$ 分钟测完从冲洗液中释放出的 $10$ 种气体( $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{Ar}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{He}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ )组分，对含流体层起及时指示作用。在 $3\ 400\text{m}$ 深处发现被流体充填的开放型裂隙，含饱和高盐、富气卤水(含盐量达 $60\text{g/L}$ )，证明这些卤水来自古海洋。用螺杆泵从孔底 $4\ 000\text{m}$ 深处作抽水试验，抽出层间流体总量达 $7$ 万 $\text{m}^3$ ， $118^{\circ}\text{C}$ 的强矿化水和 $3.5$ 万 $\text{m}^3$ 的基底净卤水，一般认为结晶岩如此深度已不具有渗透性。④深部断裂带中有来自 $\text{CH}_4$ 与 $\text{CO}_2$ 作用生成的石墨析出；⑤钻孔地温剖面测定表明，孔底 $4\ 000.1\text{m}$ 处温度 $118.2^{\circ}\text{C}$ ，比预计的高 $30^{\circ}\text{C}$ ，地温梯度 $<600\text{m}$ 为 $2.2^{\circ}\text{C}/$

$100\text{m}$ ， $>600\text{m}$ 增为 $2.9^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。⑥先导孔是在未预料到的岩层陡斜情况下施工的，对修正主孔设计提供了信息。例如主孔在 $5\ 000\text{m}$ 以内要强制防斜，必须打笔直孔；要下入 $5$ 层(原设计 $3$ 层)；提高钻具耐高温性等，以保证主孔深度达到 $12\ 000\text{m}$ 。

主孔在先导孔以东 $200\text{m}$ 处，按照先导孔取得的实际资料对原设计作了一些修改，孔深从 $14\ 000\text{m}$ 减到 $12\ 000\text{m}$ ，1990年10月6日举行了隆重的开钻典礼，待1994年钻到 $10\ 000\text{m}$ 时，再根据地温情况确定钻到 $12\ 000\text{m}$ 在技术上是否可行。

## 三、大洋钻探计划顺利执行

自“决心号”钻探船(JOIDES Resolution)于1983年底建成，1985年1月始航，预计1991年完成第一次环球航行钻探计划，在北极圈以北，南极圈以南进行了 $122$ 个航次，选择 $144$ 个现场，钻了 $330$ 个钻孔，共取岩心 $37\ 000\text{m}$ 。执行任务中有 $20$ 个国家(含欧共体 $12$ 国，苏联、日本、澳大利亚等)的 $500$ 多名地质、岩矿、物化探、钻探、测试专家参加随钻多学科科研工作、分享科研成果。

## 四、大陆漂移量已经测得

利用日本宇宙地球卫星，以激光锁模器向科学钻孔所设基准标志发射激光，用条纹照像机以超高速测量技术(其单位称飞秒 $\text{fs}=10^{-15}$ )测得大陆漂移量：日本向澳大利亚漂移 $38.76\text{cm}/\text{年}$ ，美国向日本漂移 $11\text{cm}/\text{年}$ ；夏威夷向日本漂移 $39\text{cm}/\text{年}$ 。

## 五、美国“干热岩”(HDR)地热发电已成功

美国洛丝·阿拉莫斯研究所(Los Alamos Lab.)在卡尔德拉(Caldera)的芬登山(Fenden Hill)执行的以勘探与开发所谓非枯竭性地热能源为目的的科学钻探计划，自1979年4月开始，经过 $4$ 年的努力，于1984年6月已顺利完成其钻探任务，并开始从EE-2孔灌注冷水，另一钻孔产出到地

面为 200℃ 的蒸汽，直接进入地热发电站发电，其发电容量已提高到 10Mwe，这一突破性进展对人类开发“干热岩”能源指出了方向，并提供了成功经验。所施工钻孔深度及孔底温度见表 1。3 个孔施工中用过涡轮钻与螺杆钻，贯通孔钻成后，用水力压裂法将干热岩体压出无数裂隙，形成裂隙通道与人工热储，地面冷水一次灌入 21 300m<sup>3</sup>，形成孔底循环，迅速将冷水变为高温、高压蒸汽，到达地面为 200℃ 干蒸汽，可以直接进入电机发电。钻进中用海泡石配制的抗高温、抗高盐的钻探冲洗液。

表 1

钻孔孔号	深度 (m)	孔底温度 (℃)
EE-2	4,660	320
EE-3	4,247	280
EE-3 A	前 2 孔之间的贯通孔，用 PDM (螺杆钻) 钻成。	

## 六、美国索尔顿湖科学钻探 (SSSDP) 中靶居世界之冠

美国大陆科学钻探计划中的第一个钻孔是以勘探高温地热为主要目的。孔位选在科罗拉多 (Colorado) 三角洲的最北端，有 5 国 35 位科学家参加此项工作，共进行了 40 项课题的科研工作。由于施工前作了极为周密的地质选址工作，钻孔中靶效果极佳，钻成了世界第一个最高温度的地热孔。设计孔深 3 000m，储层温度 365℃。1985 年 10 月 23 日开钻到 1986 年 3 月 17 日成井，实际孔深 3 200m，储层温度 353℃。设计深度与储层温度均相差无几，表明了地质、物探工作精度很高，钻探效果也好，卤水浓度 25%，含硼、锰、铁、锂、锌、铅、银等金属元素。热能发电量可供一座 500 名住民的城镇使用 100 年。

## 七、瑞士 NAGRA 深井处理核废料钻探计划试验成功

钻探计划实施后证明：①对高、中、低强度放射性物质均可安全安置在完整的结晶岩中，不会洩露，这一处理方案是可行的；②选址、勘查、施工可同时进行；③孔洞施工完毕后即可放入核废料。

## 八、深部碳氢化合物钻探结果，为人类寻找非生物油气资源带来初步希望

自苏联科拉半岛 CF-3 孔在地壳深部取得碳氢样品后，引起全世界地球科学界瞩目，掀起了寻找宇宙开发的下一目标——来自地壳深部（抑或上地幔）的非生物油气资源的热潮。

瑞典于 1986 年 7 月 1 日在距斯德哥尔摩 300 km 的巨大陨石坑东北侧锡利扬 (Silyan) 选定了 Graveberg No. 1 号钻孔，设计孔深 9 000m。这是世界上首口以寻找非生物油气的科学深孔，其目的是探索①油气是否存在于上地幔；②证明碳氢化合物来源的新观点；③钻孔计划具有巨大的开拓性和风险性。锡利扬陨石坑直径约 40km，据科学家估计在 0.36 亿年前陨石以 250°~350℃ 高温，10<sup>21-22</sup> 焦耳的巨大冲击能量冲击而成，钻孔选在此处的要点之一是地表就是结晶岩。钻孔 1986 年 7 月 2 日开钻到 1987 年 9 月上旬，孔深达到 6 350m 以后暂停施工。施工中对岩心、岩屑、孔底油气样、冲洗液中分离出的油气样作了大量测试，证明含有甲烷、乙烷和乙烯等等。通过地质学家们探讨认为：①气体来自上地幔裂隙；②裂隙是由陨石冲击巨大能量诱发的；③气体合成过程有待进一步研究。

## 九、美国大地震带卡洪 (Cajon Pass) 科学钻探计划

钻孔处于圣安德列斯断层带北部边缘，设计深度 5 000m，自 1986 年 12 月 8 日至 1987 年 4 月 4 日钻孔深度第一阶段达 2 115 m。钻孔的目的是要解决①断裂带形成机理；②测量 5km 以下至 15km 的巨大剪切应力（地面测量为 100 MPa）；③探索深 10

km 深处之热流量与地应力关系；④探索太平洋板块俯冲于北美板块之下，其移动量对地震产生与预报的影响；⑤断层带地应力的大小与方位。目前所取得以下成果：①对热流量与地应力关系获新见解；②为开发新的模型、预报地震提供大量数据；③作了地震波、孔隙液体压力和应力场现场测量，获大量数据。

#### 十、金刚石绳索取心钻探孔深创世界新纪录

加拿大的Heath and Sherwood钻探公司是一个专门施工小口径金刚石钻探深孔的公司，它有自行开发的独特设备和钻探工具，1987年与其姊妹公司Universal Drillers合作为南非金矿钻成一口深度为5 424 m (17 791 ft) 的超深金矿床的勘查钻孔，施工这深孔的重要意义在于：①再创金刚石小口径绳索取心钻探孔深世界新纪录。为用金刚石钻探设备（钻机、泵、钻塔、钻具等）施工科学深孔（先导孔）创出一条新路；②将南非富金矿床的控矿深度延伸到5 424 m。施工这深孔的技术特点是：①HS-150型钻机由绞车、回转器、绳索取心绞车、泵、控制盘和动力组六大部件组成，均由液压马达驱动，用1台225马力柴油机带2台液压泵。它具有高度机动性，几大部件重量轻，用积木式组合简而易行；②钻塔高27.4m，提升18m的立根，用四股绳时提升能力为100 t，属2级折叠式，用在绞车竖立；③钻杆有2种规格，尺寸代号分别为Super-H (O、D、89 mm) Super-N (O、D、70mm)，主钻杆由铝合金制成，配带合金铜接头。另配一部分同规格铜钻杆作钻挺给钻头加压；④隔级绳索取心钻具，规格代号分别为HNQ(外管O、D、89 mm，内管O、D、70mm，岩心O、D、47.6mm)，NBQ(外管O、D、70mm，内管O、D、56mm，岩心O、D、36.5mm)，其优点是加大了外管之间环状间隙（HNQ为22.2 mm，NBQ

·地质之窗·

## 英国的自然环境研究 委员会及其地球科学计划

杨培英

英国的自然环境委员会（NERC）是英国教育和科学部直属的五个委员会之一，建立于1965年。其主要任务是主管规划和促进与自然环境有关的地球科学和生物科学的发展并代表政府把资金拨给地球科学和环境科学的研究者和学生，这主要涉及固体地球、海洋、内陆水体、大陆环境和大气圈等五个科学领域的调查研究工作。

因此，NERC的总目标是提高对自然环境及其变化过程的认识，并预测其未来的变化。为此，NERC必须：①通过自己的实验室和高等教育组织（HEIS）支持环境科学中的基础和战略研究；②进行环境调查和长期监测；③资助大学研究院的培训工作；④向国内外的政府部门和有关机构提供不带偏见的专家咨询；⑤传播NERC所属机构的调查研究成果；⑥完成国内外的合同研究工作。

NERC的经费主要来自国家的科学预算，同时也接受来自政府部门和其他有关单位的委托研究经费。如1989/90年度，英国的能源部（出资572.9万英镑）、环境部（544.6万英镑）、海外开发署（468.2万英  
~~~~~  
为17.5mm）降低泵压有利于钻深孔；⑤超径金刚石钻头，例如表镶钻头外径，HNQ的加大到101mm、NBQ的加大到80mm，扩孔器外径分别为101.5 mm和80.5mm。

总之，近年来，科学钻探进展很快，成果累累，对提高与发展地质科学起了重大促进作用。

（地矿部高咨中心）