

世界上最深的钻井

THE WORLD'S DEEPEST WELL

编者按 大陆地壳深部构造研究是当代地球科学的前沿课题之一,它不仅对地球科学基础理论的发展具有重要意义,而且还能为矿产资源预测评价、地热开发和地震预报提供很有价值的资料。长期以来,研究地壳深部构造的主要手段是地球物理方法,特别是地震方法。随着科学技术的发展,地球物理方法不断改进,提供了越来越丰富的资料,其作用是不容低估的。但是,地球物理方法毕竟属于间接研究方法,不能直接解决地下深处岩石的成分和地质年龄等问题。此外,由于对地下物质的物理性质往往难于精确估计,因而会使地球物理观测数据的解释出现不确定性。在这种情况下,采用深度达数公里甚至十余公里的深井和超深井直接探测地壳内部就显得十分必要了。

深部钻探的意义在于,它可以直接从地壳深处取出样品供人们研究,还可以在钻井中直接测量各种地球物理参数和地球化学参数。这样,就能够直接了解地壳深部的结构、物质成分及其演化历史,还可以研究目前正在地下深处发生的地质作用,这些优点是其他任何方法都无法比拟的。正因为如此,苏联和美国等发达国家在最近一、二十年以来投入了很大力量,竞相从事这项耗资巨大的工作。在大陆地壳深部钻探方面,苏联的起步较早,目前居于明显的领先地位。美国也不甘落后,正在急起直追。此外,联邦德国和法国等欧洲国家也在积极筹划以科学研究为宗旨的大陆深部钻探工作。本刊这一期里编发了两篇编译文章,分别介绍苏、美两国的有关情况。这两个国家的大陆钻探计划各具特色,总括起来大致可以反映这一前沿领域的发展概况。编译这两篇文章的主要参考资料是本刊美方编委王其允教授推荐并提供的。

1970年5月的一天,巨型钻机的轰鸣声打破了极地荒原的沉静,这是在苏联科拉半岛西北部的贝辰加地区,位于北极圈以北250公里处。在这里开始钻进的是当今世界上最深的一口钻井,它的预定深度是15 000米,比一般用来探矿的钻井要深得多。这口“超深”井是苏联地壳和上地幔综合研究计划的重要组成部分,它标志着人类对地球内部的探测进入了一个新的阶段——直接对地下十几公里的深处进行观测。

十七年过去了,如今的井深已经超过12 000米,尽管美国和某些欧洲国家也相继开展了大陆深

部钻探工作,但12 000米仍然是目前的世界最高纪录。十七年的辛勤探索获得了累累硕果,为深入地地了解地壳的结构和成分提供了宝贵的资料,为在地壳深部寻找各种矿产开辟了新的前景。此外,“超深”井的钻进所显示出的高超的钻井技术也引起了世人的瞩目。

超深井钻探计划由来已久

早在卫国战争以前,苏联地质学家就提出了进行深部钻探的设想,打算建立由4至5公里深的钻井构成的地壳基准剖面网,并且沿这些剖面进行系统的地球物理勘

测。战后,为了有计划地开展区域性的深部地质构造研究和石油及天然气普查,从1947年起开始执行“基准钻计划”。当时在苏联的欧洲部分和西西伯利亚地区布置了一系列基准钻井,同时还开展了相应的地质和地球物理调查工作。从1947年至1969年共打了244口钻井,井深477米至6 806米,总进尺达56万米之多。通过这项计划的执行,建立了油气区沉积岩系的标准剖面,大大促进了苏联的石油和天然气普查工作,而且为用超深钻揭露地壳深部结构提供了必要的经验。

从60年代初开始,苏联的地

壳深部研究进入了一个新的阶段。这时,苏联的一些地质学家、地球物理学家和矿业工程师开始讨论超深钻探计划,认为当时的技术水平已经允许设计12至15公里深的钻井。在详细研究地质和地球物理资料的基础上,推出了大陆地壳超深钻计划草案。为了领导和协调苏联全国的深部地质研究工作,苏联国家科委设立了“地球深部研究和超深钻探”问题的跨部门委员会,该委员会由苏联科学院、苏联地质部、石油工业部、各加盟共和国科学院以及其他有关部门的科研和生产单位的200多位专家组成。委员会的第一任主席是A. C. 季莫菲耶夫教授,从1973年起,委员会主席改由苏联地质部现任部长E. A. 科兹洛夫斯基担任。

整个计划分三个阶段实施,60年代是第一阶段,主要是提出任务,进行科学准备,研制超深钻探设备和深井(10~15公里)地质—地球物理观测仪器。第二阶段是70年代,在此阶段开始了科拉半岛超深井和巴库油田萨特雷超深井的试钻工作,对一些地区进行了深部地球物理调查。第三阶段开始于1981年,此时转入了有计划地对苏联领土内的上部地壳和上幔的综合研究工作,其中深井和超深井的钻探工作是一项重要的内容。

苏联之所以投入巨大的人力、物力和财力来实施这项庞大的计划,除了地质科学基础研究方面的考虑以外,更重要的是为了满足国民经济的发展对矿产资源的不断增长的需求。为了寻找矿物原料的新来源,人类的开发领域已经从陆地延伸到海洋。在陆地上,矿床的勘探和开采深度不断增大,油气田的探采深度已达5至6公里,少数金矿的开采深度超过了3公里,甚至某些铁矿的开采深度也达到1公里,近年来发现的矿物原料资源绝大部分为未出露于地表的隐

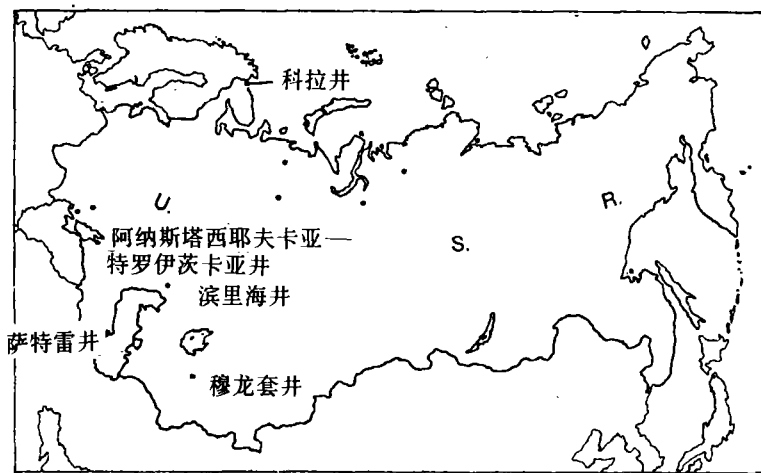


图1 作为地壳综合研究,苏联选择的钻井位置

伏矿床。因此,研究地壳的深部结构就成为一项十分迫切的任务。

目前,人类已经拥有许多种手段来研究地壳的深部结构。地质学家研究地表的地质现象,然后利用所收集到的资料来推断地壳上部数公里深度内的地质结构。地球物理学家采用各种现代化的仪器来探测地球内部,近年来还广泛利用航空和航天技术来观测地球的重力场和电磁场。当然,以上这些方法都是非常重要的,都能够提供有价值的信息,但它们毕竟是间接的研究方法,不能直接回答地下深处岩石的成分和地质年龄问题。采用超深钻探这一有力的手段可以直接观察地壳深部的物质,并且能够对目前正在地下深处发生的地质作用进行研究,这些优点是其他任何方法都无法比拟的。

但是,打超深钻井并不是一件简单的事情,它的施工周期长,技术复杂,耗资巨大。据估算,在古老的结晶岩区打一口12至15公里深的钻井,需投资1 800~2 000万卢布。因此,苏联在选择超深井的井位时十分慎重,经过多方面的考虑和对几个地区的对比分析,最后才选定科拉半岛西北部地区作为第一口超深井的井位。与此同时,还对超深钻探的技术、工艺、费用和最佳深度作了技术经济论证,并且作了部门间的分工。按照预

定的分工,苏联石油工业部的有关科研和设计单位承担了巨型钻探机组的设计、制造和钻进工艺的研究工作,苏联地质部所属的科拉地质勘探大队负责超深井的井场建设、钻探施工和系统观测。

丰硕的科学成果

科拉超深井就象是一座巨大的地下实验室,它使人们有可能对从地表到地下十几公里的深部直接进行连续观测,从而提供一系列极为重要的地质和地球物理信息。通过直接研究独一无二的岩芯资料 and 进行井中地球物理观测,建立了一个典型地质剖面,对钻井所在的波罗的古老地盾区的深部结构有了切合实际的认识。苏联科学家认为,波罗的地盾可以作为印度、北美、南部非洲、澳大利亚西部、南极洲和格陵兰的古老大陆板块的代表。

从整个地球来看,地壳并不算太厚,地球半径约为6 000公里,而地壳的平均厚度只不过35公里。地震资料和其他间接证据似乎证实了英国地球物理学家在1926年提出的假设——大陆地壳具有三层结构:最上部是沉积岩层,中间是花岗岩层,下部是玄武岩层。把实验室测定的岩石样品密度与野外测定的地震波速联系起来看,沉积岩的密度为每立方厘

米1.8~2.5克,地震波速约为每秒5公里。在花岗岩中,密度增高至每立方厘米2.5~2.75克,波速为每秒5~6公里。在所谓的“康拉德不连续面”上,地震波速增大到每秒6~7公里,人们一直把这个“界面”视为花岗岩层过渡为玄武岩层的标志,后者的密度为每立方厘米2.75~3克。由氧、硅和铝等轻元素组成的花岗岩层形成于距今25亿年之前的太古代,广泛地发育在各个大陆的表面。山区的大陆地壳可以增厚到70或75公里,而大洋地壳的厚度只有5~10公里。一般认为,大洋地壳是由被薄薄的一层沉积岩所覆盖的玄武岩层构成的,中间不存在花岗岩层。

位于大陆和大洋地壳下面的是“莫霍罗维奇不连续面”,简称“莫霍面”。这也是一个地震波速的突变面,据推测相当于地幔的顶部。在此界面处,地震波速突然增高到每秒7.8公里。地幔可以分为上、中、下三部分,其深度范围分别是35~300公里、300~950公里和950~2 900公里。从上地幔到下地幔,地震波速跃升至每秒13.6公里。根据火山岩所提供的直接证据以及由陨石、地球物理资料和天文学资料所提供的间接证据,人们推测地幔的中、上部(深度下限1 100公里)是由镁和铁的硅酸盐组成的。地幔下部的主要成分是铁、铜、锌、铅、汞、铋和铀的硫化物和氧化物,还含有硒、碲、金、银和其他一些比较重的金属。上地幔的温度范围是1 000~1 500°C,相应的压力为10万大气压。

以上就是根据间接证据归纳出来的地壳结构概貌,为了检验和发展对地壳结构的认识,地质学家们早就渴望着有朝一日能够将钻井打到康拉德面和莫霍面以下,直接探测地壳深部,科拉超深井的钻进就是实现这一梦想的第一步。这口超深井的井位处在古老的波

罗的大陆地盾区,在地表出露的是元古代岩石,根据地球物理资料,在地下3~4公里深处应当出现更古老的太古代岩石,其地质年龄为25~27亿年。科拉钻井的一个主要目的是打穿地壳上部的花岗岩层而进入玄武岩层,也就是说,要打穿康拉德不连续面。地震探测资料表明,这个“界面”位于地下9 000米深处。此外,钻井的井位还处在贝辰加铜镍硫化物矿区的范围内,从而有可能为矿化延深范围和矿床成因的研究提供宝贵的资料。

在科拉半岛进行的超深钻探取得了一系列出人意料科学成果。

首先,与地理物理预测不同,元古代岩层并不是延深到3~4公里,而是下延到6 842米的深度。这套岩层由交替出现的火山岩(辉绿岩、安山岩、粗面安山岩)和沉积岩(砂岩、泥岩)组成,岩石都遭受了变质作用,变质程度随深度而加大。从6 842米起到12 000米深的井底,钻井穿过的都是太古代的岩层,其组成岩石包括斜长石片麻岩、花岗片麻岩和角闪岩。总的来看,这些岩石属于二氧化硅含量中等的“中性”岩石,在9 000米以下并没有出现真正的“玄武岩层”。但是,随着深度增大,角闪岩夹层的数量增多,在7公里深处约占10%,在10公里深处增加到约占30%。这种变化显然属于渐变性质,与原先根据地震波速的变化所推断的“花岗岩层”与“玄武岩层”之间的截然分界大相径庭。根据科拉超深井的资料和直接在太古代岩层中钻进的其他深井的资料,苏联地质学家推断,科拉半岛原始地壳的成分相当于花岗闪长岩——二氧化硅含量比花岗岩略低的一种火成岩。

在科拉钻井所在地区,元古代岩层在地表的倾斜角为45°到60°。钻井前进行的地震探测表明,相应的地震学界面以同样的角

度延深到大约4公里的深度,再往下,全部界面都变为近水平状态。但是,井中实际测量结果表明,所有岩层的倾斜角直到十余公里深的井底都与地表所见的相同。如果说地震学界面与地质体界面不一致,那么,地震学界面为什么会在深部变缓呢?苏联科学家认为,这种现象是由于平缓破碎带的存在所引起的。

从地表以下4 500米起,科拉超深井就进入了一个由破裂的变质岩构成的异常带。在这个异常带以上,赋存在造岩矿物晶体结构中的“结合水”的含量为4%。进入异常带以后,岩石本身所含的结合水降低到2.1%。但是,异常带内的岩石发育了无数条显微裂隙,使其孔隙度增大到上覆岩石孔隙度的3~4倍,相应地,岩石的密度从每立方厘米3.1克降低到2.9克。在这些缝隙中充满了从岩石中析出的富含矿物质的高温水溶液,被称为“变质水”,是岩石在元古代变质作用期间析出的。当钻井在异常带内钻进时,有大量的变质水涌入井筒。变质成因的水溶液对于许多矿床的形成具有重要意义,在通常的情况下,这种水溶液可以离开深部的变质岩层并且把所含的矿物质沉淀到地壳的较浅部位。但是,在科拉半岛,变质水由于受到两公里厚的不透水火成岩层的阻挡而被迫滞留在其析出的部位。如果要把这些水溶液“挤回”岩石,所需要的压力只有在地壳深部甚至上地幔内才能达到。由于变质水的水压超过了岩石的抗张强度,因而导致了无数条微裂隙的形成。变质岩的这种水压破裂现象以前从没有见到过,它在大陆的构造中可能占有相当重要的地位。

上述压碎带的下界面位于9 000米深处,其标志是地震波速的增高。在这种情况下,地震波速变化所意味的当然不是以前推测的从“花岗岩层”变为“玄武岩层”的

“康拉德不连续面”。弹性波速度的增高仅仅意味着到达了水压破碎带的底部,在此以下,岩石恢复到其正常密度,热水也不再涌入井筒。

以上概述的新发现充分证明了直接观察地壳内部的重要性。变质岩的水压破裂现象或许也可以解释在世界其他地方的地壳上部(深度达15或20公里)所观测到的地震学界面的地质性质。此外,这种现象的发现必定会大大改变人们对大陆地壳内部水循环情况和地下水圈性质的认识。

科拉超深井为地壳深部的矿化情况提供了极为宝贵的线索。在1 500~1 800米井段打到了具有工业价值的铜镍矿体,它产在以前不了解的含矿层位,从而扩大了贝辰加铜镍硫化物矿床的远景。根据这一发现,已经在超深井周围布署了深部普查工作。在钻进过程中大量涌入井筒的高度矿化的裂隙水和气流,表明深处的结晶岩石中正在发生气—水作用,这就相应地提高了在这样的深度上发现新矿床的远景。在科拉钻井所打到的破碎带中,发现了被铜、镍、铁、锌和钴的硫化物所胶结的岩石碎屑,从而为破碎带内的矿物沉淀作用提供了证据。这些硫化物的形成温度较低,硫同位素组成类似于陨石,说明这些硫化物来源于地幔。由此可见,形成热液矿床的有利条件不仅存在于大陆地壳的浅部,而且也存在于地下深处。考虑到科拉超深井所揭示的破碎带具有巨大的延深,从中涌出了大量富含矿物质的热水流,再加上所发现的矿物沉淀的证据,有理由认为,人类在以往的探矿活动中所触及到的仅仅是地下宝库的皮毛,在更深的部位还蕴藏着极为丰富的尚待开发的矿藏。

在科拉超深井所穿透的所有层位中都有天然气流显示,还发现了沥青包体。据鉴定,气体中含有氮、氢、氨、甲烷和其他烃类,还含

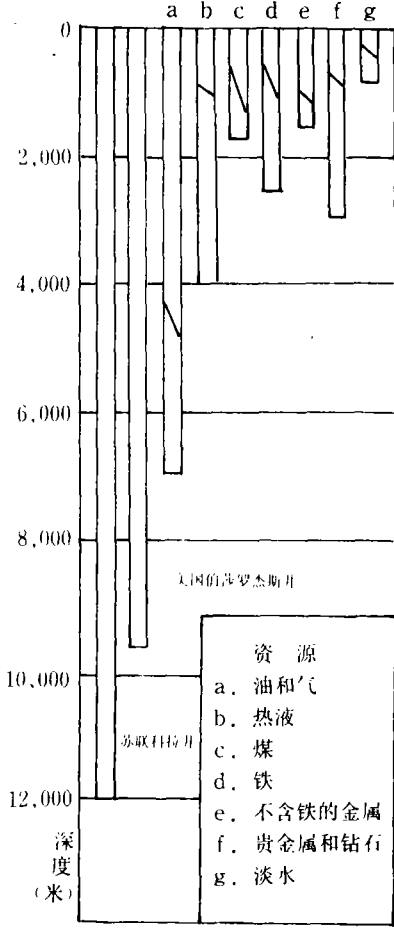


图2 随探测资源的不同井和主轴深度的变化

有二氧化碳。二氧化碳的碳同位素分析数据以及其他证据表明,这些气体中的化学元素可能有两种来源,其中有一部分是岩石在遭受变质作用的过程中析出的,与矿化热水是“孪生兄弟”,另外一部分则是生物成因的。还有一些苏联科学家认为,这些气体来自地幔的排气作用。在古老结晶岩区地下深处发现天然气这一事实本身就具有重大意义,它必然会对油气成因理论研究乃至油气普查方向的确立产生影响。

科拉超深井的钻进也为地热研究提供了极好的条件,在井中直接进行的地温测量使人们不得不修正关于地热分布及地球内部热流的一些认识。人们一直认为,在波罗的地盾这样的地质构造稳定区内,地温仅仅缓慢地随深度而增

高:在7 000米深处达到50℃,在10 000米深处上升到100℃,相应的地热增温率为每百米1℃。但是,直接测定结果表明,以前推断的地热增温率只适用于从地表到3 000米深度的区间。再往下,地热增温率变为每百米2.5℃,在10 000米深处,温度达到180℃。钻进过程中泵入井底的数百立方米冷泥浆,在返回地表时被加热到45℃。一般认为,地壳中的热流有两种来源,其一是地壳中的放射性生热元素,其二是地幔热流。由于科拉钻井所穿过的岩石只具有很弱的放射性,对地壳热流的影响不大,因此,地幔显然是主要的供热者。

除此以外,还进行了其他许多有意义的观测,其结果正在整理之中。

目前,钻井正在继续加深,将会提供更多的关于地壳深部层位

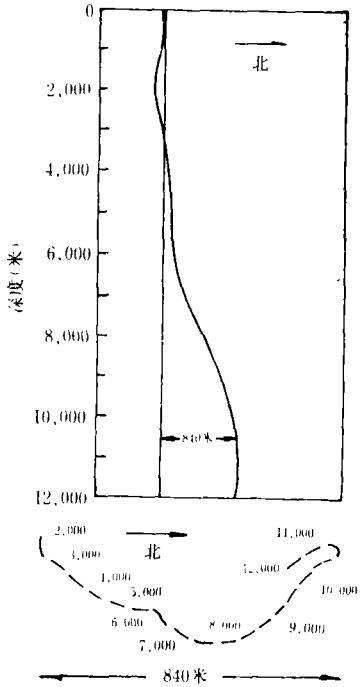


图3 钻头轨迹, 上图为纵断面, 下图为平面图, 最大偏度840米, 该处深度为10,500米

的资料。科拉半岛的地壳厚度约40公里,按当前的技术水平还不可能全部打穿。但是,该区经历了数亿年的风化作用和冰川侵蚀,地壳上部的花岗岩层已经被剥去了5 000至15 000米之多。如果钻井达到了15 000米的预定深度,就相当于揭露了古老陆壳厚度的一半左右,这将澄清有关地壳成分和结构的许多猜测。

钻井技术的革新

科拉超深井的深度是前所未有的,因而对钻井技术提出了一系列新的要求。传统的石油钻井采用转盘式钻机,这种钻机通过井口的转盘来驱动整套钻杆,从而带动井底的钻头。但是,在井深超过万米的情况下,传统的回转式钻进将会遇到无法克服的困难。由一节一节无缝钢管连接而成的整套钻杆重达800至900吨,这样重的钻杆会使钻塔承受巨大的负荷,钻杆本身要承受很大的应力,而且在高速旋转时会遇到很大的摩擦阻力。为了避开这个问题,科拉超深井采用了特制的井底涡轮式钻机,利用高压的钻探泥浆流来驱动安装在钻杆下部的涡轮机,进而带动钻头。在钻进过程中,钻杆完全不旋转,或者以2~4转/分的低转速旋转,以防止卡钻。

在普通的钻井中,钻探泥浆由泥浆泵送入钻杆内部并达到井底,而后再沿着钻杆与井壁之间的环状空隙返回地表。在这种情况下,泥浆的作用是冷却钻头和清除钻屑,同时还起到使井壁免于坍塌的作用。在科拉超深井,泥浆除了起上述作用外,还起着驱动井底涡轮机的动力作用。泥浆以250大气压的高压被泵入涡轮机并使之高速旋转,安装在涡轮机与钻头之间的齿轮减速器使钻头转速降低到80~150转/分的最佳转速,相当于普通钻机转速的1/3至1/4,因而增大了回转力矩。泥浆泵系统中配有专用的液压反馈装置,它以

1500米/秒的速度传送压力脉冲,用来监控涡轮机和钻杆的旋转,从而也控制钻头的转速和回转力矩。

所使用的钻杆是由高强度铝合金制成的,其总重量仅400~500吨,比钢质钻杆轻一半。这种铝合金钻杆不仅减轻了钻塔的负荷,大大方便了更换钻头和回收岩芯时的升降钻具作业——这种操作在整个钻进过程中要进行数百次之多,而且也减少了钻杆本身的磨损以及在升降钻具的过程中对护井套管和井壁的磨损。这种磨损可能是相当严重的,因为在钻进过程中不可避免会出现井筒偏离铅垂线的情况。科拉钻井的平均偏斜度为5°,最大偏斜(17°)出现在10 000至10 500米井段,在此部位,钻头偏离井口铅垂线的距离达840米。

在科拉超深井的设计阶段和施工初期,对于地下的钻进条件可能出现的变化不完全了解,因此采用了套管护井措施。在2 000米深度以下则采用了“裸井”钻探工艺,不再用套管护井,一直钻进到12 000米的深度。

为了从如此大的深度把岩芯回收到地表,需要解决一系列技术问题。这样做是完全必要的,因为从地下深处取出的每一块岩石都很有价值。在井深较浅的情况下,空心的钻头切削井底岩石,直径为60~80毫米的圆柱状岩芯随之缓缓进入钻头上面的岩芯管内。当钻进了一定深度以后,就可以把整套钻具连同岩芯一起提升到地表。然而,随着井深的加大,取芯的困难也逐渐加大。在一定深度以下,由于上覆岩层的压力很大,当井底岩石被钻头切断时会释放出巨大的内部应力,从而使岩芯出现“爆裂”现象。在这种情况下,如果采用一般的取芯设备,爆裂的岩芯就会把岩芯管的进口堵住,使下面的岩芯无法进入。这样,90~95%的岩芯就会被研磨成粉

末而进入泥浆。为了解决这个问题,研制出一种新型的附有泥浆分流装置的取芯工具,它可以卡住爆裂岩芯的碎片并将其送入一个专门的容器,这样就可以使岩芯管的进口保持通畅。

在科拉超深井成功地运用了上述钻井技术,从而为钻进到15至17公里深度创造了条件。然而,还必须预料到一些新的问题。普通的铝合金在110~150°C的条件下就会丧失其应有的强度,为了能在地下深处的高温条件下正常钻进,苏联技术人员已经成功地研制出能够耐受230~250°C高温的合金。采用粉末冶金技术可以使铝合金在270~300°C的温度条件下,保持稳定——当钻井向深部延伸时必定会遇到这样高的温度。如果钻井进一步加深,还可以采用钛合金钻杆,其耐受温度可达400°C。

除了要克服高温所带来的困难以外,超深井钻进还会遇到一系列其他问题:高达3 000大气压的压力,高矿化水的化学腐蚀效应,钻井周围岩石丧失稳定性的问题,井筒偏斜问题,等等。随着井深的加大,把岩芯回收到地表的操作变得越来越棘手。为了解决这个问题,必须设计出一种特殊的装置,它既能用于采取岩芯又能输送封装在密闭容器内的样品。这种密闭容器可以原封不动地保持井底的条件,其中包括井底岩石与天然气和热水的饱和程度。目前,正在实验室内研制一种压力容器,以便模拟15~20公里深处的条件,相应的温度是300~400°C,压力为2 000~3 000大气压。还准备研制一种空心的井底涡轮机,以便采用绳索取芯设备,做到了这一点就能够大大减少为了回收岩芯而频繁地升降钻具的操作。

未来的展望

科拉超深井所取得的成功经验有力地证明,用超深钻探来研究

地壳深部是一种十分有效的手段,是其他方法所无法取代的。因此,在苏联国家科委最近通过的1986~1990年和至2000年期间的地球深部综合研究远景计划中,系统地在苏联领土范围内开展深钻和超深钻工作是一项重要的内容。该计划确定了大约20处布置7~12公里深的超深井的地点,其中的半数钻井用来研究固体矿产远景区的深部构造,其余钻井则布置在石油和天然气远景区。按照计划,钻井的布置应当能揭露不同类型地质构造的深部,使所研究各段剖面的地层时代彼此衔接,这样就能够研究总厚度约60公里、时代跨度超过30亿年的地层的实际地质剖面。

这些钻井都布置在地震勘测剖面网的交叉点处,井位的选择充分地体现了在过去十年内大规模实施的深部地震勘测项目的成果。反过来看,这些超深井的施工将会大大改善地震数据的解释工作。通过直接观测井下的各种条件以及从地下深处采集岩芯样品,可以在地壳和上地幔内的地球动力学界面与所观测到的地质构造和岩石成分界面之间建立可靠的相关关系。这项工作还有助于提高地震勘测的分辨率和精确度,进而增大从间接的地球物理观测中所能获取的信息量。

继科拉超深井之后,位于里海西岸的萨特雷超深井也于1977年开始施工。这口钻井的主要目的是研究巴库油气区中生代和古生代沉积岩系的油气远景,原来的设计井深是11 000米,后来又加大到15 000米,目前已打到8 500米深度。进入80年代以来,又有六口超深井开始施工,截止到1986年的钻井井深为:第聂伯—顿涅茨井4 655米(设计井深8 000米),滨里海井3 585米(设计井深7 000米),克里沃罗格井1 970米(设计井深12 000米),穆龙套井1 020米(设计井深7 000米),

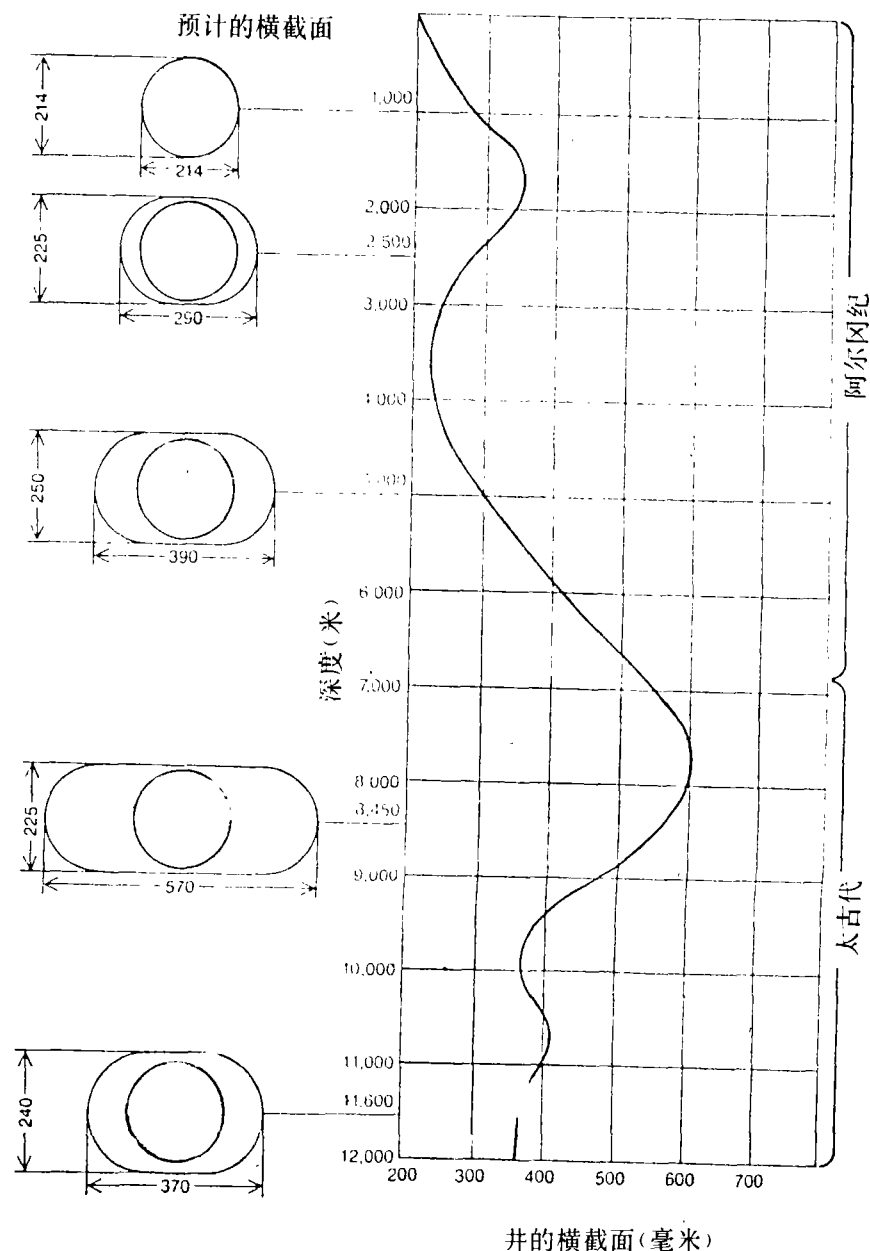


图4 钻孔横截面随深度的变化,一般孔呈椭圆形。

季曼—朝伯拉井1 616米(设计井深7 000米),乌拉尔井2 553米(设计井深15 000米)。这样,已经开始施工的超深井已达八口之多。按照预定的计划,这八口超深井都将继续向设计深度钻进,它们将作为巨大的天然实验室,供人们从事地壳的“生理学”和“解剖学”研究。今后,还要利用已完成的钻井建立长期观测站,从钻井中直接获得多学科观测数据,从而为研究地壳深部正在发生的地球动力学作用提供独一无二的资料。

除了超深井以外,还要布置一系列深井(设计深度3~5公里),主要用于矿区的深部研究。与此同时,将继续对地壳和上地幔进行区域性的地质——地球物理——地球化学综合研究。通过这一系列工作,不仅要回答大陆地壳结构方面的基本问题,而且还要对苏联主要大地构造单元的地下资源作出远景评价,为矿产资源的深部预测和普查工作提供科学基础。

(石宏仁 编译)