

21 世纪地质钻探技术应用与发展趋势

耿瑞伦¹, 张林霞², 冉恒谦², 李常茂³, 冯国强²

(1. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100083; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;

3. 国土资源部 老干部局, 北京 100812)

摘要:回顾了 20 世纪钻探技术在推动地球科学进步、矿产资源勘查、工程地质勘察、地下水勘察和环境工程等方面的不可取代的巨大作用。论述了面对 21 世纪的新形势下钻探工作将是任重道远; 并提出了钻探技术目前存在的若干有待研究和提高的关键技术问题。

关键词:地球科学; 地质勘查; 钻探关键技术

中图分类号: P634 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-3746(2001)S1-0009-05

1 20 世纪地质钻探技术应用回顾

20 世纪举世地质勘查工作经历百年实践与发展, 对人类社会作出了巨大贡献。地质勘查技术本身, 发展包括地质、物化探、遥感、钻探与坑探、测试等多学科, 综合性很强的多工种集成作业, 技术不断进步, 已是公认的与人类生存和发展的一门不可缺少的基础科学, 也是一门技术。在美国将钻探与采掘归为“基础类技术”。20 世纪后期国内外很多地质学界将传统地质学名称改为地球科学是有道理的。正因为当今地质勘查应用面越来越宽广, 其重要性亦越来越明显, 1996 年 8 月在我国北京举行的第 30 届国际地质大会曾唱起一支“永恒的事业——ETERNAL UNDERTAKING”令人难忘的赞歌。

(1) 20 世纪地质勘查的首要贡献是通过地质矿产调查发现并保障了人类社会发所必需的矿产资源和能源的供给, 对社会进步与物质文明起了直接推动作用。不少矿产资源优势国家和地区、甚至是骑在马背上的国家和无人烟的荒漠, 就由于地质矿产调查特别是采用钻探发现地下矿产资源, 跨越时空一跃而成为经济繁荣的国家。例如:

澳大利亚的矿产品占出口总额的 60%, 达 365 亿美元/年。1967 年以来通过发展矿业新建 25 座城市、12 个港口、20 个航空港和 1900 km 铁路。其钻探技术水平居世界前列。

俄罗斯国家生产总值的 50% 是由矿产联合公司完成的, 其出口额的 70% 是直接或间接源自矿业

和与矿业相关的加工工业。依靠矿业可保障其国民经济发展速度不低于 4%~6%。

前苏联是世界拥有钻机和地质钻探工作量投入最多的国家。

美国 20 世纪的繁荣自称多半是由于矿产资源的充足供应。以 1975 年为例, 其人均年消耗油气 538 kg、煤炭 2361 kg、钢铁 454 kg、铝 21 kg、铜 7.26 kg、铅 5 kg、锌 6.36 kg、铀 0.065 kg、盐 195 kg、水泥 204 kg。其固体矿产直接与间接产值达 5240 亿美元, 可见矿产资源对其经济产生的支柱作用。因此, 美国 20 世纪一直居地质钻探技术领先地位。

加拿大、南非亦属矿产丰富的国家。20 多种主要矿产的年产值分别达 114 和 170 亿美元。加拿大钻探技术平美国水平; 南非是世界固体矿产(金矿)钻探深度最深的国家, 1987 年用金刚石绳索取心孔深达 5424 m。

20 世纪几度廉价石油商机曾促进全球经济腾飞, 特别是产油国和石油输出国无疑得天独厚。拥有和占有矿产资源量已直接关系到国家实力与社会稳定。

(2) 20 世纪地质勘查第二大贡献是通过水文地质调查和水井钻探工程在全球范围内勘探和开发了大量地下水资源, 为众多尤其是干旱缺水的国家和地区解决了生活和生产用水难题。例如:

非洲、中东许多干旱沙漠国家和地区, 除了像石油输出国的沙特不惜巨资兴建海水淡化设施外,

收稿日期: 2001-08-30

基金项目: 中国地质大调查“勘查技术方法应用现状与发展对策研究”项目(20002010004136)

作者简介: 耿瑞伦(1928-), 男(汉族), 江苏江阴人, 中国地质调查局教授级高级工程师, 中国地质学会探矿工程专业委员会副主任委员, 《探矿工程(岩土钻掘工程)》杂志顾问, 北京市海淀区学院路 31 号; 张林霞(1960-), 女(汉族), 安徽凤台人, 中国地质科学院勘探技术研究所高级工程师, 中国地质学会探矿工程专业委员会专职副秘书长, 河北省廊坊市金光道 77 号, (0316)2096827。

主要依赖钻采地下水。世界众多国家钻井公司都涉足这些地区。但迄今非洲仍然有许多地区深受干旱缺水之苦。我国西部地区同样存在这种现象。

美国是世界最发达国家,人口 2.53 亿,日耗水总量 341 BGD(Billion Gallon Per Day),相当于 12.9 亿 m^3 /天,人均 5.16 m^3 /天。除充分利用地表水外,亦大量开发利用地下水。情况是:总用水量的 22% 是地下水。农业用水占地下水总量的 64.14% (农业用水最多的 6 个州灌溉用机井达 51600 眼);城市和住宅占 24.14%;工矿占 6.75%;其它占 2%。美国有公共供水井 28.2 万眼;私人家用井 1346 万眼;地热交换井 3 万眼(正迅速增多)。美国是世界水井和地热井钻探技术最先进的国家,亦是拥有水井钻机制造和承包商最多的国家。

世界水井从早先的钻采第四系孔隙水为主发展到大量钻采深层岩层孔裂隙水和岩溶水。水井和地热井深度从几十米到三四千米甚至更深。

在勘察地下水的同时,世界范围内也大量勘察利于人体健康的天然饮用矿泉水。

勘察地热是从水井和油气井派生出来的一大分支。从早期用于生活疗养发展到用于养殖、种植、住宅“热泵”取暖、冷热空调、工业加工制造业和地热发电等。已受到举世关注被视为无污染的能源,在很多国家和地区已形成“地热热”。除利用地热异常外,同时利用常规地温差率打 1000~4000 m 甚至更深的深部地热井和干热岩井。

全球钻探工程界钻机开动数量、完成钻井数量、从事钻机生产厂商和钻探承包商中服务于水井的均居前列。

(3)20 世纪地质勘查第三项重要贡献是通过工程地质调查和钻探为百年来全球营造的现代化城市、交通、水利、工矿与环境建设工程作出了历史性贡献。如查明和优选超大型水库坝址、港口堤防、机场、核电站、铁路、公路、桥梁、涵隧、摩天楼、厂矿、地下空间开发和有害废弃物贮埋库址等地下基础条件提供依据。全球服务于工程地质勘查的钻机数量和承包商队伍仅次于水文水井。我国在建青藏铁路中开动的钻机达 80 余台即为一例。

(4)20 世纪地质勘查第四项划时代的贡献是通过科学钻探,伴随地球物理、地球化学、遥感与测试技术,促进了传统地质学向地球科学迈进。最明显的例子是通过大洋和大陆科学钻探,对极地冰层、洋脊、湖海沉积、火山口、地震带、地热异常区、陨石坑、构造碰撞带、深厚沉积盆地和古老变质岩系等钻探

取样观察、分析测试和物探测井,才开始揭开许多地球科学的奥秘。如全球地壳运动、板块学说、生物圈、环境历史变迁、灾害地质、深部矿产、油气生成和地热能源与流体等,都在认识与理论上有了新的飞跃。由此观之,地球科学的形成某种意义上是科学钻探的结果。以往若干地质学臆想与推测的学说与模式,乃至物探异常推断,只有被钻探证实后才有其实际价值。

(5)20 世纪钻探技术有了长足进步。由于应用领域的扩大和地质勘查新的要求不断出现,加上相关技术的进步,钻探技术工艺与装备亦不断变革与创新,诸如碎岩工具从凿形冲击钻、铁砂、手镶钻石,发展到牙轮钻、硬质合金、金刚石和人造金刚石及其聚晶复合超硬材料;钻机动力从手摆钻、蒸气机发展到内燃机、电动机以及液力和压缩空气驱动;并发展了涡轮钻、螺杆钻和电钻等井底动力钻具;钻进工艺方法包括高精度定向钻在内已采用的、能对付各种岩层和工况的 20 多种;钻探技术装备从原始的绳式冲击钻、散装的转盘和机械立轴钻机,发展到包括自行式、空吊式多种装载型式以及长行程顶驱式钻机,并发展了多种用途和特殊条件下用的钻探装备,诸如地质调查填图取样钻机、物探震源孔钻机、砂矿钻机、矿产勘探和工程地质勘查钻机、水文水井和地热钻探钻机、坑道内用钻机、干旱沙漠地区用钻机、水域钻探用钻机、油气井和科学钻探用钻机以及地质灾害防治专用钻机等。世界科学钻探最大钻孔深度在陆上达 12262 m;在水域水深最大达 6247 m,并向洋底钻进 1412 m;石油大位移井水平位移距离接近 1 万 m。

2 21 世纪地质钻探技术应用发展趋势

21 世纪作为人类社会可持续发展的三大制约因素是人口、资源与环境。与之最紧密相关的地球科学研究与应用将受到举世重视与关注。许多国家均把人口、资源、环境视为国策,并实行资源与环境并重的方针。钻探技术将一如既往地发展地球科学特别在资源与环境方面发挥其重要作用。

(1)21 世纪矿产资源勘查任重道远。矿产资源是不可再生的宝贵自然财富,是人类生存与发展的物质基础。能源和工业原料绝大多数依赖自然矿产资源,在我国分别占 95% 和 80%。如今矿产资源探明可采储量(不是资源量)锐减与人口增长和消耗水平的提高之间的矛盾日益突出,如 1975 年美国人均年耗油气 538 kg,而今达 3000 kg。2000 年 8 月在

巴西举行的主题为“地质学与可持续发展:第3个千年的挑战”的第31届世界地质大会奏出了重视矿产资源的最强音,提出到2050年需要开采的金属将是目前的5倍,预警在讲公益性地质工作的同时,切勿忽视为勘探矿产资源服务的方向。新的动向是:

地质工作目前的主流是资源与环境并重。固体矿产、石油与天然气、铀矿和水资源是21世纪国民经济发展的重要支柱。要对资源实行合理开发利用与保护。若干发达国家早已着手对有战略意义的资源作战略保护与贮存。

资源全球化倾向已使地质矿产勘查和矿业工程界把目光投向以往尚未达到的和可能存有大量矿藏但勘探程度尚低的发展中国家和地区,以及若干难进入地区和深部域,旨在打开新的矿产资源宝库。这一形势下必然在世界范围内带来矿产资源勘探和占有权益的竞争。

21世纪海洋被视为人类生存所需矿产资源重要领地,其矿产资源包括多金属结核和天然气水合物等将进入大规模勘探与开发的新时期。发达国家已经起步并取得丰硕成果。英国石油公司称未来待发现的油气主要在深水海域和北极高纬度区带。

由于采掘、选冶和利用技术的提高,许多新型、非传统矿产能源的勘探利用已引起重视,如低品位矿、共生矿、难选冶矿、超常规深度矿床和严寒及难进入地区矿床等。德国煤田埋深达5~74 km即为一例。

(2)21世纪“淡水荒”将是全球性严峻问题,并将直接影响社会经济发展与稳定。我国同样缺水,西部地区尤甚。唯一解决途径是开源节流。从全球看仍然要大力合理勘探利用地下水资源。据联合国环境规划组织提供的资料,全球淡水容积占水体的2.53%。而淡水中不可使用的(冰山、冰川、永冻层)占1.76%;可使用的占0.76%,其中98.68%为地下水。有将地下水称作“自然界隐埋的大海”(Natural Hidden Sea)和“大自然的水库”(Natural Reservoirs),并为人类生命之所系。美国有资料估计其全国地下水资源达125万 km^3 ,据目前耗量2.89亿 $\text{m}^3/\text{天}$ 计可使用7900年。而地球地下水循环周期为1400年。这也许是举世重视合理勘探利用地下水的原由。水文地质调查和钻采地下水的深度将向深层基岩水发展。在单井出水量方面严重缺水的非洲,若干地区为解决饮用水即使达到1 $\text{m}^3/\text{天}$ 的水井亦可成井,此时钻井用循环介质和工艺决不能堵塞微小出水孔裂隙。

(3)21世纪世界城市化倾向和现代化基础设施建设步伐将更快,规模将更大,特别是现代化交通、水利和城市建设以及地下空间开发利用量大类聚。若干世界意义的环境与沙漠改造工程、跨海、国际与洲际交通工程都在倡议之中。因此,工程地质与钻探取样等超前勘察工程量甚大。钻探深度将比以往30~50 m更深,取样(取完整非扰动样品)测试要求更高。如闻名国内外的青藏高原铁路长1100 km,要经过沙海、盐湖、沼泽、草原和严寒冰冻层即为一例。日本矿研公司的具3层取心管、单根钻杆长1 m的钻深100 m绳索取心全套自动化控制钻探系统即专门为复杂地层钻探和取样而研制的。

(4)21世纪地球科学强调资源与环境并重和入地关系协调发展。其背景是人口膨胀、环境恶化与自然灾害频繁。就保护改善环境来说,主动的途径是大力防止自然环境继续恶化;被动的途径是对已恶化的环境进行工程修治。钻探在这一领域将大有可为。如勘查与治理滑坡、监测与治理地下水污染、监测与预警地震、监测和防治地陷与地面沉降、监测与防止海水入侵、改良盐碱性土壤、煤炭地下灭火、加固古建筑基础和库岸堤防、在多地地方病地区勘探卫生饮用水等。以上都离不开钻探技术。

(5)21世纪多目的科学钻探将是地球科学关注的热点。人类生活在地球数千年,迄今对地球的认识远远不够。唯一的途径是要采取科学钻探才能揭示尚未被认识的地质体。即从科学的意义出发,采用科学的钻探与测井、测试技术,达到认识地球的科学目的。20世纪60年代兴起的洋脊扩张和板块学说及大陆动力学主要源自大洋和大陆科学钻探的成果。继承与发展20世纪成就,未来多目的科学钻探无疑会在地球科学发展、勘探矿产能源、研究全球变化和自然灾害等方面继续起到推动作用。我国大洋和大陆科学钻探已经起步。地球科学与包括钻探在内的勘查技术紧密结合已是历史的必然。

3 21世纪钻探关键技术

21世纪钻探技术要适应应用领域的发展,特别是全球经济一体化和矿产资源全球化势不可挡,钻探技术本身亦势必有新的变革与提高。

3.1 美国“NADET”研究计划

美国20世纪90年代(1994~2000)实施的一项举世闻名的“国家先进钻探与采掘技术研究计划”(National Advanced Drilling and Excavation Techniques,简称NADET),是由美国政府直接组织运作

的一项被视为技术政策性重大科研项目,很有代表性并值得重视。其旨在全球人口与消费增长、矿产资源供需日益严峻与资源全球化的形势下,为保持其在钻探与采掘技术的领先地位,进而占有乃至战略储备更多的矿产资源和能源,并直接增强其国际间的竞争能力;也可为国民创造更多的就业机会。此项计划总投资 2.5 亿美元,政府投资 1.34 亿,相关工业界投资 1.16 亿。参加 NADET 研究计划的单位有美国联邦政府中 9 个部委的 20 个机构、国家科学基金会、内政部的矿业局和地质调查局,以及众多的大学和工业企业界。研究计划选择有带动性项目举例如下。

3.1.1 高速、精确定向钻进系统

研究内容与成果应用涉及:

- (1)海(陆)上平台丛式定向井、水平井和大位移井;
- (2)采煤井巷超前排放瓦斯;
- (3)煤炭(不适合井巷开采)原地气化;
- (4)油页岩经济开发;
- (5)实现若干矿产用钻孔法采矿(可水溶、热融、化学浸析、水力破碎);
- (6)老矿山的扩展与延深;
- (7)非开挖铺设地下管线等。

3.1.2 革命性深部钻进系统

研究内容与成果应用涉及:

- (1)降低深钻成本(变成本与深度的指数关系为近线性关系);
- (2)促进深部科学钻探与地球科学发展;
- (3)使勘探深部油气(含非生物源油气)、矿产成为可能;
- (4)勘探利用深部地热能等。

3.1.3 多用途隧道掘进系统

研究内容与成果应用涉及:

- (1)连续、安稳、可靠地掘进各种岩层;
- (2)安全施工全支护的地下硐室,开创经济利用地下空间新时代;
- (3)降低基础设施建造与扩建成本;
- (4)提供治理环境用装备,降低废物安全埋放费用;
- (5)减少掘进给环境带来的负面影响等。

3.1.4 几项具体研究课题举例

- (1)高温地热钻探硬岩钻进耐高温涡轮钻具。由 Naurer 公司承担。
- (2)高温地热钻探热稳定性(TSP)聚晶金刚石

钻头 and 聚晶金刚石翼状钻头。由国际技术公司、科罗拉多矿院和 Sandia 国家实验室承担。

(3)喷射式复合片(PDC)钻头。由 Sandia 国家实验室承担。

(4)钻进过程防止漏失与孔壁失稳的连续跟套管系统。由 Sandia 国家实验室和 Livesay 公司负责。

3.2 我国“十五”期间钻探关键技术

3.2.1 钻探工作的任务

面对国内外地质勘查形势,特别是遵循国家和国土资源部的“十五”计划纲要所涉及的诸多任务,当今钻探工作的任务是艰巨的。可举例的如:

- (1)十大矿产资源集中区和 20 多处有突破前景的矿产地勘查与开发工程;
- (2)西部大开发资源与环境工程;
- (3)西北地区人畜饮用地下水紧急勘查工程;
- (4)国外矿产资源勘查开发工程;
- (5)南沙油气与西气东输沿线天然气和煤层气勘查工程;
- (6)海洋资源和国际海底区域矿产资源以及天然气水合物勘查评价工程;
- (7)地下水和长江三峡库区等地质灾害动态监测与防治工程;
- (8)已有矿区周边和深部矿产勘查工程;
- (9)实施大陆科学钻探工程;
- (10)研究开发先进、实用、配套的高新技术等。

3.2.2 钻探关键技术

根据上述任务,谨提出以下我国进入 21 世纪特别是“十五”期间钻探关键性技术,供领导部门和相关产、学、研部门参考。其目的是引起重视,并促进我国钻探技术在“十五”期间能承担上述任务的同时,在技术水平方面获得新的提高与发展。

(1)地质调查综合钻探取样技术。在点多、面广、分散、对地层不了解的条件下为保证顺利钻进和取心(样)质量的多工艺综合钻探方法与取样器具,便于随机应用。

(2)各种复杂和难进入地区地质钻探技术与装备及运载工具。如深切割地形、高山、严寒、冰冻、荒漠戈壁、森林、盐湖和沼泽地区等。

(3)西部干旱缺水地区节水型钻探技术。含各类矿产勘探采用多工艺空气钻进技术;深厚第四系和黄土覆盖区、岩溶(含隐伏)地区深层(~4000 m)地下水(含热水)钻井与完井技术;特别是采用节水型空气泡沫循环和气举反循环钻进技术。

(4)多用途精密定向钻进技术。含精密测斜仪、随钻测量、井底螺杆钻、电钻、涡轮钻和造斜纠斜技术等,应用于陡斜岩矿层、地形构造复杂勘区、盐矿开采、水井和地热井、煤层地下灭火和气化等。

(5)硬岩高效优质钻探技术。含高效长寿命金刚石钻头;高强度钻杆和高可靠性绳索取心系统;大功率长寿命深孔(1000~2000 m)用孔底液动和气动冲击器等。

(6)各种地层和复杂条件下钻孔(井)循环液系统。如不稳定和易冲蚀水解岩矿层、漏失层、高温和压力异常地层等。特别是符合环保要求、能护壁和保护岩矿心的钻井液系统。

(7)海底矿产勘查技术。含海底含矿软泥、多金属锰结核以及天然气水合物钻探与取样技术;滨海砂矿钻探取样技术等。

(8)科学钻探技术。在我国“十五”期间主要是深度2000~5000 m 结晶岩钻探取样技术。技术关键是:高效长寿命金刚石钻头;绳索取心和岩心定向系统;钻孔防斜;钻井液护壁和保证测井作业等。另外还有高原冰层(川)、湖底沉积和盐湖钻探取样技术等。

(9)地质灾害监测防治技术。包括将钻探技术应用于滑坡(含长江三峡库区)、地震(含水库诱发地震)、地陷与地面沉降、堤防加固、地下水污染的监测与防治等。

(10)新型钻探技术装备系列。更新已落后的各类用途的钻探设备,研制新型先进实用的不同装载型式的(散装、拖车装和自行式)和不同用途的如矿产钻探、工程地质勘察、水文水井钻探、普查填图取样、物探震源孔等钻探设备。首先发展机械化、自动化程度较高的液压或电力顶驱动钻机。钻机性能参数和钻具规格系列尺寸,宜采用世界多数国家通用的标准系列,以利出口与国际交流。

4 结语

(1)20 世纪钻探技术在矿产资源、能源、水资源勘探开发与推动地球科学进步方面起了无可取代的历史作用,最明显的例子是在专业词汇里增加了“科

学钻探——Scientific Drilling”并成立了 ODP 和 ICDP 国际性组织。上述作用 21 世纪仍然不可取代。

(2)21 世纪举世面临资源储量短缺和消费增长的严峻挑战,中国亦不例外。许多国家今日又再度重视矿产地质并且将目光注重到发展中国家和勘探程度低的地区、海洋和深部域以及非传统矿产资源,而最终能发现并查明可采储量(非资源量)的唯一技术方法仍然是钻探。

(3)美国一项政府行为批准并在经费上予以支持实施的“NADET”计划,并肯定“钻探与采掘技术是基础类技术”,并强调“今日矿产储量日趋枯竭,环境问题日增,其未来状况取决于钻探和采掘技术的领先程度”。其目的与做法值得国人深思。

(4)我国近若干年来钻探技术处于停滞不前境地,与世界先进水平比差距明显。投入勘探工作量少,而每年矿产进口额上百亿元。我国目前矿山企业能投入风险勘探者无几。确有希望的紧缺矿产地勘探仍需重点支持。既解决后备矿产储量,乃至拯救面临闭坑的矿山,同时亦促进钻探技术发展。

(5)为全面提高钻探技术整体水平,要针对若干关键技术组织产、学、研联合攻关。并希望在“十五”期间取得进展,缩短与世界先进水平的差距,提高竞争力。

(6)我国是世界矿产资源大国之一,但还不是世界矿业及矿产品加工业强国。进入 21 世纪,除了有正确远见卓识的资源政策和战略外,不可少的要建立保有一支精干的钻探技术队伍,包括科研、制造和施工队伍,特别是能走向世界的勘探队伍。有关院校无疑在培养人才特别是高层次人才方面要作出新贡献。

参考文献:

- [1] 赵鹏大. 非传统矿产资源研究:可持续发展的重要课题[J]. 中国地质, 2001, (5).
- [2] 蒋承霖. 21 世纪初地质工作的若干思考[J]. 中国地质, 2001, (7).
- [3] 耿瑞伦, 李常茂, 张林霞, 等. 西进! 21 世纪岩土钻掘工程主战场[J]. 探矿工程, 2001, (3).