

科学超深井钻探技术国内外现状

张金昌, 谢文卫

中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊, 065000

内容提要: 文章阐述了实施科学钻探的必要性, 简要回顾了科学钻探技术发展历程。以前苏联科拉科学超深井钻探技术, 联邦德国大陆深钻计划(KTB), 中国大陆科学钻探工程(CCSO), 美国卡洪山口项目钻探技术, 美国夏威夷项目钻探技术, 湖泊科学钻探技术等为例, 介绍了世界各国在实施科学钻探工程过程中形成的特色技术以及取得的技术成就。论述了实施科学钻探工程前, 进行人才队伍培养和关键技术准备的必要性。

关键词: 科学钻探; 超深井钻探技术; 深海钻探计划

随着社会经济长期快速发展, 我国面临日益突出的资源、能源、环境问题, 急需发展深部探测及相关技术, 为深部矿产资源评价与减灾防灾提供必要的科技支撑。世界各国近百年地球科学观测实践表明, 要想揭开大陆地壳演化奥秘, 更加有效的寻找资源、保护环境、减轻灾害, 必须提高对地球深部的认识水平。很多发达国家自上世纪70年代以来, 陆续启动了深部探测和超深钻探计划, 通过“揭开”地表覆盖层, 把视线延伸到地壳深部, 获得了重大成果。目前, 世界主要发达国家都已经将“地壳探测”计划作为实现可持续发展的国家科技发展战略。

我国要开展地壳探测工程, 首先必须要攻克科学超深井钻探技术, 探索开发一整套适用于高温高压高应力地层的科学超深井钻探技术, 包括钻进设备、机具及工艺技术, 为将来开展的科学超深井钻探工程奠定技术基础。

科学超深井钻探技术是配合地球深部探测科学研究而形成并发展起来的一门新兴技术领域, 其作用是地学研究提供真实而丰富的地下实物资料、信息测试通道和地球物理解释标尺, 是进行地球科学研究必不可少的重要手段, 对地球科学研究目标能否实现起到决定性作用(周国荣等, 2000)。

但是由于坚硬地壳的阻隔和地球深部高温高压的环境条件, 使得科学超深井钻探成为世界上最为艰难的大科学工程之一, 它是一个国家经济实力、科技实力、人才实力和工业基础的集中体现, 世界上只

有发达国家进行过这项大科技工程的探索。科学超深井钻探是为特定的目标尽最大的努力而实施的, 是对当时钻探技术和工业技术的一次综合实力的反映, 其难度堪比人类的外太空探索(张伟, 1999)。

科学超深井钻探也是投资巨大、风险巨大的实体工程技术, 其工程设计必须要结合具体的项目目标和实施条件方能完成, 不可能一开始就投入巨大的人力物力进行实物的研究制造, 在工程尚没有最终落实的情况下, 应当首先对国内外已有的各种科学超深井钻探技术进行对比研究, 结合我国国情提出一整套具有普适性的施工方案, 并对其中部分关键技术进行必要的室内实验研究, 以指导方案设计。

1 国外现状

第一个科学钻探计划是美国的“莫霍钻探计划”, 始于20世纪50年代, 目的是要钻透莫霍面(地壳和地幔的界面), 实现地学研究的重大突破。该计划由于技术难度大且费用高昂, 只在海底钻进了315 m, 于1966年告终(王达等, 2007)。

1966年6月, 美国开始实施一项以揭示洋底上部地壳为目标的长期钻探计划, 即“深海钻探计划”(DSDP, 1968~1983年), 采用“格洛玛·挑战者号”科学钻探船在世界各大洋施工数量较多但深度较浅的钻孔, 广泛地采集沉积层样品和岩芯。在世界各大洋完成钻孔1092口, 取得岩芯超过9500 m。科学家通过研究, 验证了大陆漂移和海底扩张假说; 创建了

注: 本文为国家专项“深部探测技术与实验研究”(编号 SinoProbe-05-06)资助成果。

收稿日期: 2010-01-14; 改回日期: 2010-04-12; 责任编辑: 周健。

作者简介: 张金昌, 男, 1959年生。教授级高级工程师, 现任中国地质科学院勘探技术研究所副所长, 总工程师, 兼任中国地质学会探矿工程专业委员会副主任委员, 主要从事固体矿产钻探、水文水井钻探及工程施工钻探设备设计和钻探工艺研究。Email: jinchang@cniect.com。

板块构造理论;创立了古海洋学;揭示了洋壳结构和海底高原的形成;证实了气候演变的轨道周期和地球环境的突变事件;分析了汇聚大陆边缘深部流体的作用;发现了海底深部生物圈和天然气水合物;导致地球科学一次又一次的重大突破。该计划起初由美国单独执行,后逐渐发展成有多国参加的国际性计划。该计划于1983年11月结束。它与“人类登月计划”被誉为人类在20世纪60年代的两大壮举。

1985年1月,以美国为首的12个国家又开始了“大洋钻探计划”(ODP, 1985~2003年)的序幕。该计划采用技术能力更强的“JOIDES(决心号)”钻探船。该计划持续到2003年,在世界各大洋669处1797个钻孔中采取了35万个岩石样品,累计岩芯长度222 km。参与该计划的最初有美国、德国、法国、日本、英国、加拿大、澳大利亚和代表12个国家的欧洲科学基金会,我国于1998年春天作为“参与成员”加入。

大洋钻探计划(ODP)于2003年10月转入“综合大洋钻探计划(IODP)”的新阶段。综合大洋钻探以“地球系统科学”思想为指导,计划打穿大洋壳,揭示地震机理;查明深部生物圈和天然气水合物;理解极端气候和快速气候变化的过程;为国际学术界构筑起新世纪地球系统科学研究的平台;同时为深海新资源勘探开发、环境预测和防震减灾等实际目标服务。IODP的钻探范围将扩大到全球所有海区(包括陆架浅海和极地海区),研究领域从地球科学扩大到生命科学,手段从钻探扩大到海底深部观测网和井下试验。美、日等国的投入有重大增加。IODP的年度总预算将达到16000万美元,是ODP的3倍。

大陆地壳远比洋壳古老,隐藏有更多的地球奥秘,大陆还是人类直接居住、获取主要矿产资源以及遭受地质灾害威胁最大的地方,因此人们迫切希望通过大陆科学钻探来更多和更深入地了解大陆。大陆科学钻探实际始于20世纪70年代,许多国家实施(或参与了)科学钻探计划。前苏联实施了10多口深孔和科学超深井,其中的科拉科学超深井深达12262 m,为当今世界最深的钻孔,并已成为世界第一个深部实验室(观测站)。

继第一口大陆科学深钻之后,前苏联、德国、美国等13个国家先后钻探了50个用于科学研究的钻井。德国实施了举世闻名的KTB计划,在华力西缝合带的结晶地块中先后钻了一口4000 m先导孔和一口9101 m的科学超深井。美国已实施了10多

个科学钻探项目,钻孔深度都较浅,目前正实施夏威夷科学钻探项目和圣-安德列斯科学钻探项目。法国及加拿大等国均制定了大陆科学钻探计划,开展浅孔科学钻探工作。日本拟在太平洋、菲律宾及亚洲板块结合带上打科学超深井,进行地震研究。墨西哥在世界上著名的Chicxulub陨石坑进行科学钻探,研究65 Ma前发生在墨西哥尤卡坦半岛的陨石撞击地球事件与地球生物的大灭绝的关系。欧洲国家和美国分别在格陵兰岛实施了冰芯钻探,研究巨厚的冰盖中完整保存着的过去漫长的地质年代中地球气候和环境变化的历史记载,并先后于1992年7月和1993年7月钻透了厚度超过3000 m的200 ka积雪冰盖至基岩。瑞典、瑞士和英国分别实施了以核废料储埋点勘察为目的的科学钻探,钻孔深度一般为1000~2000 m,最大为2500 m。

1992年11月,在经济合作与发展组织(OECD)的大科学论坛上,鉴于深海和大洋钻探的成功经验,以通过全球大陆深钻取得直接证据来认识地球内部的方法逐渐成为共识。同时,也为了协调世界范围内的大陆科学钻探活动,减轻各国在实施该项活动时的成本和风险,实现成果共享,最终促进大陆科学钻探在地学研究中的推广应用,有人建议成立“国际大陆科学钻探组织”(ICDP)。经过3年多的筹备工作,1996年2月由德国、美国和中国3个发起国成立了“国际大陆科学钻探计划(ICDP)”,其总部设在位于德国波茨坦的德国地学研究中心。至今已有13个国家和团体加入了该计划。该计划从启动以来,已资助了大量科学钻探项目。

世界上已有不少国家开展过或正开展大陆科学钻探活动。各国在科学深钻实践中,根据本国钻探技术水平和科学深钻项目的具体情况,采取了不同的钻探技术体系。典型的科学超深井钻探项目技术体系主要有科拉科学超深井钻探和德国的KTB钻探计划,其基本情况总结如下。

1.1 科拉科学超深井钻探技术

前苏联是世界上最早和最大规模地进行科学钻探的国家之一,该国在结晶岩中施工了大量的取芯科学深孔和科学超深井,如有科拉科学超深井、乌拉尔科学超深井、萨阿特雷科学超深井、迪尔劳兹深孔和沃罗季洛夫深孔等。他们在施工这类钻孔时,基本上都采用连续取芯,并几乎毫无例外地采用了统一的钻探技术体系(钻进工艺方法、钻探设备和器具)以及钻孔结构和套管程序设计原则,形成了具有鲜明特色的俄罗斯(前苏联)结晶岩科学深钻技术(王达等,

1995)。

前苏联在结晶岩中施工科学深孔和科学超深井采用的钻孔结构、套管程序和钻进施工程序,遵循的设计原则是“超长孔裸眼钻进方法(Advanced Open Borehole Method)”。设计时先不确定整个钻孔的钻孔结构和套管程序,而仅考虑钻孔的上部,一般来说仅确定第一层(有时到第二层)套管的深度,因为上部的地质和地球物理资料还是比较可信的。

开孔、钻穿松散层并进入稳固的基岩后,下入孔口管并用水泥固结。在固定套管内下一层可回收的活动套管,然后以较小的直径,即能获得最佳技术经济指标的直径(一般是 215.9 mm)往下钻所谓的“超长裸孔”。如果遇到复杂情况必须下套管护孔时,将活动套管拔出,扩孔钻进穿过不稳定层,并下套管和固井,然后继续往下钻。根据套管直径和钻孔深度情况,可能在新下的技术套管内再悬挂一层活动套管。图 1 是科拉科学超深井钻井现场。



图 1 科拉科学超深井现场

Fig.1 Drillsite of Kola ultra-deep well

这种施工方法的特点是:钻孔结构和套管程序设计留有余地,可应付复杂情况。如果岩层稳定,可尽量采用裸眼和小尺寸钻头钻进。这样一则可保证较高的钻进效率;二则可简化孔身结构,减少下套管的数量,最终降低施工成本。前苏联在结晶岩中施工的所有科学钻孔都采用了这种施工方法,其有效性得到了充分的证实。

科拉超深钻施工是连续取芯钻进,采用 $\varphi 215.9 \times 60$ mm 牙轮取芯钻头(图 2)以及涡轮马达孔底驱动,通过提钻回收岩芯(科兹洛夫斯基,1989)。

钻杆柱是钻探施工中非常关键的一个环节,对于超深钻施工更是如此。钻杆柱在钻进中要承受自



图 2 科拉科学超深井用的牙轮取芯钻头

Fig.2 The roller cone core bit used in Kola ultra-deep well

重、扭矩、振动、摩擦引起的附加阻力和温度等多项载荷的复合作用,工作条件十分恶劣。当钻孔超过某一深度后,单是钻杆柱的自重就会使钻杆柱发生破坏。目前最好的钢钻杆也只能用到 10000 m 的深度(表 1)。科拉超深钻的设计孔深是 15000 m,采用钢钻杆柱显然不能满足施工要求。

表 1 不同钢级的钻杆可下入的孔深

Table 1 The depth of different grade steel rod can be used

钢级	D-55	E-75	G-105	S-135	V-150	U-170
最低屈服强度(MPa)	379	517	724	931	1034	1172
可下入孔深(m)	3444	4663	6523	8382	9327	10577

前苏联在施工科学超深井时广泛采用了铝合金钻杆柱。表 2 是几种科学超深井施工常用的铝合金钻杆材料,它们具有不同的机械性能和耐高温能力,施工时可分别用于不同的孔段。

表 2 用于前苏联科学超深井钻进的铝合金材料

Table 2 The physical property of aluminum alloy rod used in Kola ultra-deep well

合金牌号	合金类型	屈服极限(MPa)	耐高温能力(°C)
01953	Al-Zn-Mg-Cu	490	100
Л16Т	Al-Cu-Mg	300	150
AK4-1	Al-Cu-Mg-Fe-Ni	280	200

尽管铝合金的强度比钢的要低,但钢钻柱的重量为铝合金钻柱重量的 2.5 倍,铝合金钻柱中由于钻柱自重引起的应力比钢钻柱的小得多,特别是在泥浆中浮力比钢钻柱大,因此铝合金钻柱显示出更大的钻深潜力。铝合金钻柱具有对钻机负荷要求要

小,可节省起下钻时间等优点。

科拉科学超深井的取芯钻进技术、经济指标见表3。

表3 科拉科学超深井的取芯钻进技术、经济指标

Table 3 The core-drilling performance in Kola ultra-deep well

孔段(m)	取芯回次	取芯进尺 (m)	岩芯长度 (m)	岩芯采取 率(%)	回次进尺 长度(m)
0~4673	612	4186	2239	53	6.8
4673~7263	240	1844	410	22	7.7
7263~9008	144	1034	414	40	7.2
9008~11500	221	2172	637	29	9.8
合计	1217	9235	3700	40	7.6

1.2 德国 KTB

(1)先导孔: 联邦德国大陆深钻计划(KTB)是德国第一个大规模地学研究计划。KTB计划的目的是通过施工科学超深井获取地学信息,进行关于地壳较深部位的物理、化学状态和过程的基础性调查和评价,以了解内陆地壳的结构、成分、动力学和演变。KTB计划总计耗资6亿多马克,执行时间是1985~1994年。项目的钻探施工包括两个钻孔,即4000 m深的KTB先导孔和9101 m深的KTB主孔。施工先导孔主要是为了减轻主孔施工在技术和经济方面的风险,施工经验可为主孔施工技术方案的精确设计提供依据。先导孔钻进的地层为片麻岩和角闪岩,采用连续取芯方法施工(Marx et al., 1986)。KTB先导孔施工采用了“组合式”钻探技术,即在石油转盘钻机上加装一套高速回转的顶驱系统,并采用金刚石绳索取芯钻进工艺方法。科学深孔和科学超深井的终孔直径一般都较大(由于受测井仪器直径的限制),现有的岩芯钻探设备因其承载能力太低而不堪此重任,通常的解决方法是采用石油转盘钻机。石油钻机的转盘转速太低,不能满足金刚石钻进的要求,为此须在转盘钻机上加装一套高速回转的顶驱系统。KTB先导孔施工采用了一套液压顶驱系统。KTB先导孔参照了前苏联科学钻探施工常用的“超长孔裸眼钻进方法”,即在较大的套管(219 mm)内,悬挂一层活动套管(177.8 mm),然后以较小口径(152.4 mm)钻进(Rischmüller et al., 1990)。若岩层稳定,可一直钻至终孔深度。若岩层不稳定,需要下套管护壁,则可回收活动套管,以225.4 mm口径扩孔,钻穿过不稳定层后,再下177.8 mm套管。KTB先导孔钻进技术、经济指标见表4。

表4 KTB先导孔钻进技术、经济指标

Table 4 The core-drilling performance in KTB pilot hole

	牙轮取芯钻头 ($\varphi 269.9/101.6$ mm)	金刚石取芯钻头 ($\varphi 152/94$ mm)	
		表镶钻头	孕镶钻头
使用钻头个数	9	9	62
钻头寿命(m)	42.5	36.5	47.9
机械钻速(m/h)	1.25	1.7	
取芯回次长度(m)	6.2	3.6	
岩芯采取率(%)	42.8	97	

(2)KTB主孔: 主孔距先导孔200 m,其完钻深度为9101 m。因为先导孔取芯钻进了接近4000 m深度,所以主孔4000 m以上未进行取芯。主孔中采取“点取芯”的方式取芯钻进,从孔深4138.2 m到8100 m左右,总共完成了40个回次的取芯工作,取芯钻进总进尺189.6 m,采取岩芯总长83.42 m^①。图3是KTB主孔现场。

KTB主孔取芯钻进的技术、经济指标见表5。



图3 德国大陆深钻计划(KTB)主孔

Fig. 3 The KTB main hole

1.3 其他科学钻探

(1)美国卡洪山口项目钻探技术: 美国于1986~1988年在加利福尼亚州的圣安德列斯断层施工了一个3510 m的科学钻孔,目的是研究断层的热流和地应力之间的关系和断层动力学,并通过在钻孔中安放仪器进行地震监测。该项目的钻进施工分阶段实施,钻孔原设计终孔深度5000 m,目前的孔深3510 m是第二阶段达到的深度。钻进的岩层为砂岩、花岗闪长岩、花岗岩和片麻岩。项目的钻探承包商是Parker钻探公司。钻孔设计时,考虑到缺乏适用于5000 m深度和 $\varphi 155.6$ mm(61/8in)钻孔直径的金刚石绳索取芯钻进系统和相应的钻探设备,所以采用了接近于石油钻井的钻探技术体系。采用No193转盘钻

机,全面钻进方法为主,采用点取芯,取芯钻进比率仅为 5%左右。为在硬岩中获得较好的钻进技术指标,取芯钻进主要采用孕镶金刚石钻头,少量采用表

镶金刚石钻头,并采用螺杆马达或涡轮马达来驱动金刚石钻头(Brittenham, 1982)。卡洪山口科学钻孔取芯钻进的技术指标如表 6。

表 5 KTB 主孔取芯钻进结果

Table 5 The core-drilling performance in KTB main hole

钻进阶段	取芯钻进系统	取芯回次数	取芯进尺(m)	岩芯长度(m)	岩芯采取率(%)	平均钻速(m/h)	平均钻头寿命(m)
14 ³ / ₄ "	牙轮钻头取芯钻具	20	140.7	54.79	38.9	0.87	20.1
	超前式取芯钻具	4	0.5	0	0		
	矿山金刚石取芯钻具	1	1.9	0	0		
	合计	25	143.1	54.79	38.9		
12 ¹ / ₄ "	牙轮钻头取芯钻具	6	25	12.8	51.2	0.82	6.25
	薄壁金刚石钻头取芯钻具	8	21.5	15.83	73.6	0.42	5.38
	合计	14	46.5	28.63	61.6		
8 ¹ / ₂ "	未进行取芯钻进	0					
6 ¹ / ₂ "	标准金刚石钻头取芯钻具	1	0	0	0		
总计		40	189.6	83.42	44		

表 6 美国卡洪山口科学钻孔取芯钻进的主要技术指标

Table 6 The core-drilling performance in the San Andreas fault observatory at depth

钻头类型	回次数	岩石类型	取芯段长(m)	平均回次进尺(m)	平均机械钻速(m/h)	平均岩芯采取率(%)
SS-6	11	砂岩、花岗岩	39.2	3.56	3.56	76
SS-8	3	花岗岩	8.7	2.9	0.49	95
IMP-6	12	片麻岩、花岗岩	32.1	2.68	1.22	71
IMP-8	8	花岗岩	26.2	3.28	0.88	94
合计	34		106.2	3.12	1.06	80.5

注:SS-6— $\varphi 165.1 \text{ mm}(6\frac{1}{2} \text{ in}) \times \varphi 101.6 \text{ mm}(4 \text{ in})$ 表镶金刚石钻头;SS-8— $\varphi 215.9 \text{ mm}(8\frac{1}{2} \text{ in}) \times \varphi 149.2 \text{ mm}(5\frac{7}{8} \text{ in})$ 表镶金刚石钻头;IMP-6— $\varphi 165.1 \text{ mm}(6\frac{1}{2} \text{ in}) \times \varphi 101.6 \text{ mm}(4 \text{ in})$ 孕镶金刚石钻头;IMP-8— $\varphi 215.9 \text{ mm}(8\frac{1}{2} \text{ in}) \times \varphi 149.2 \text{ mm}(5\frac{7}{8} \text{ in})$ 孕镶金刚石钻头。

(2)美国夏威夷项目钻探技术:夏威夷科学钻孔的目的是钻穿形成 Mauna Kea 火山的熔岩层,研究该火山形成的机制和火山深处的地下水的运动(张伟, 1999)。钻孔的设计孔深为 4419.6 m,要求全孔连续取芯,取芯钻进的钻孔直径为 98.4 mm(37/8 in)。所钻的地层是火山喷出的玄武岩,岩层中气孔较多,属于相对比较好钻的岩层。地层比较破碎,要求下较多套管保护孔壁。地层的页理或片理不发育,各向同性好,钻进时不易产生孔斜。由于有地下水循环,岩层的地温梯度低(1000 m 先导孔的地温梯度为负值),有利于钻进施工。为完成以上条件下的钻探施工,采用了一种组合式的钻探技术,即在常规的石油转盘钻机上加上一套取芯钻进系统,形成一套能在深孔和硬岩中进行取芯钻进的钻探设备。其中,转盘钻机用于扩孔、下套管、固井和起下钻具,取芯钻进系统用于取芯。采用的组合式取芯钻进系统是由 DOSECC(地球陆壳钻进、观察和取样组织)专门为科学钻探中的深孔取芯钻进研制的。由于大直径取芯钻进成本高、效率低,采用的钻进施工程序是:采用组合式取芯钻进

系统进行小直径取芯钻进(全孔的取芯钻进孔径统一为 $\varphi 98.4 \text{ mm}$),然后通过扩孔来加大孔径。若需要扩孔的直径较大,可通过两次扩孔来完成。钻孔施工按设计分为 3 个阶段:第一阶段从开钻到孔深 1828.8 m(6000 英尺);第二阶段从 1828.8 m 钻进到 3352.8 m(11000 英尺);第三阶段从 3352.8 m 钻进到终孔深度 4419.6 m(14500 英尺)。现已完成第一和第二阶段的施工,在第三阶段遇到孔内复杂问题后已暂停施工。该项目的第一和第二阶段达到了以下钻进施工技术经济指标:① $\varphi 98.4 \text{ mm}$ 取芯钻进的平均钻进速度(包括回收岩芯)为 2.35 m/h,平均钻头寿命为 297 m;② $\varphi 98.4 \text{ mm}$ 扩到 $\varphi 311.1 \text{ mm}(12\frac{1}{4} \text{ in})$ 时的扩孔钻进速度平均为 2.22 m/h;③ 从 $\varphi 311.1 \text{ mm}$ 扩到 $\varphi 444.5 \text{ mm}(17\frac{1}{2} \text{ in})$ 时的扩孔钻进速度平均为 2.30 m/h。

(3)湖泊科学钻探技术:至今已经实施了几个 ICDP 湖泊钻探项目,还有一些新项目正准备实施。实施这些项目所需的钻探设备和技术,通过执行 ICDP 的设备共享计划来实现。根据该计划,ICDP 将为每个经过批准的湖泊钻探项目提供所需的钻探设

备、取芯工具和技术服务,实施该项目的国家须支付使用费。ICDP 现有的湖泊钻探设备型号为 GLD800,是美国提供的,该设备由积木式驳船和钻机组成。钻机采用克里斯坦森公司的改进型 CS-1500 金刚石取芯钻机,其主要技术参数为:① 取芯钻进深度:HQM 绳索取芯 1200 m,DLS 绳索取芯 800 m;② 钻机和水泵全液压驱动,柴油机功率 128.7 kW(175 hp);③ 转速在 130~1300 r/min 范围内分 4 档无级调节;④ 给进行程 3.5 m。该套设备配有不同的取芯工具,将根据地层情况予以应用,这些工具包括在软层中使用的压入式取样器、液压活塞取样器;在软、硬交变地层中使用的超前式取芯钻具以及在坚硬地层中使用的矿山金刚石取芯钻具,它们都是绳索取芯钻具。取芯钻头直径为 $\phi 139.7$ mm,岩芯直径 $\phi 60$ mm 左右,根据方法不同有所差异。

2 我国大陆科学钻探

中国大陆科学钻探工程(CCS D)是“九五”立项的国家重大科学工程项目,总项目分为钻探、钻孔地质、分析测试、测井、地球物理和信息五大子工程。其中钻探是技术难度最大,耗用投资最多的子工程。该地区属超高压变质带,结晶岩层,岩石坚硬、钻孔易斜,科学研究要求全孔取芯、取样。类似的钻探工程在我国没有先例,在国际上也十分少见,钻探技术遇到了空前的挑战。图 4 是中国大陆科学钻探工程现场。

在借鉴国际大陆科学钻探技术经验的基础上,通过我国自主研究、开发,并在科钻一井中实施,最终形成了一整套新型钻井施工技术,形成了独具中国特色的科学钻探钻井技术体系。这套技术体系主要由总体技术战略与施工方案、井底动力驱动的冲击回转取芯钻探系统(螺杆马达+液动锤+金刚石提钻取芯钻探技术)、大直径孕镶金刚石钻头、硬岩大直径长井段扩孔钻进技术、强致斜坚硬地层井斜控制技术、性能优良的 LBM-SD 泥浆技术、小间隙固井及活动套管应用技术、孔内事故预防处理技术、钻探数据采集处理技术等组成。

应用该技术体系优质、高效和低成本地完成了中国大陆科学钻探工程钻井施工任务。科钻一井终孔井深 5158 m,各种钻进施工累计总进尺为 9177.71 m(不含钻水泥塞和扩孔钻进中的磨推进尺)。从 2001 年 6 月 25 日开钻,至 2005 年 1 月 24 日钻进至 5118.2 m(5118.2~5158 m 进行钻具试验,试验进尺 39.8 m),完成全部施工任务,施工总

时间 1310 d,平均日进尺 6.99 m,平均机械钻速为 0.95 m/h,其中取芯钻进 1071 回次、平均机械钻速 1.01 m/h、平均岩芯采取率 85.7%,扩孔钻进 89 回次、平均机械钻速 1.07 m/h。

我国新型科学钻探钻井技术体系包括以下方面:

(1) 科学钻探总体施工战略与方案的研究获得新的突破。将大型石油钻井设备与地质勘探取芯钻进工艺有机结合在一起,形成一种新型的“组合式钻探技术”;采用了一种根据先导孔施工质量来决定是否另外施工主孔或将两孔合一的“灵活的双孔方案”(图 5);进行了超前孔小直径裸眼取芯钻进施工程序。这 3 个战略层面的施工方案,是整个工程实现高效、安全、经济施工的最关键、最核心的技术战略。根据这套技术方案而进行的详细的初步设计是整个钻探工程顺利实施的技术基础。

(2) 研制的螺杆马达液动锤金刚石取芯钻进技术系统属世界首创。这项技术用于硬岩深井取芯钻进具有机械钻速高、回次进尺长、取芯效果好、钻柱磨损小、功耗低以及钻柱对井壁扰动小等优点,是一项新型的复合式取芯钻探技术,已申请国家发明专利(申请号 200510098275.4)。采用该项技术,可提高机械钻速 50%~100%,提高回次取芯进尺长度一倍以上。在此基础上研制成功了世界第一台可绳索取芯的螺杆马达液动锤三合一钻具(图 6),并获国家发明专利(专利号 200410080343.X)。该方法研发成功,是取芯钻探技术的重大突破。

(3) 以整体式导向扩孔牙轮钻头为主要碎岩工具的硬岩扩孔钻进技术,解决了地层坚硬、扩孔钻进效率低、钻头和钻具磨损严重等一系列问题,在国内首次完成了坚硬结晶岩 3429 m 的长井段扩孔钻进。

(4) 以刚直满重井底钻具组合和金刚石钻头异径侧钻降斜技术为主的井斜控制与造斜钻进技术,攻克了易斜地层的难关,并在主孔中成功进行了纠斜钻进和侧钻绕障,这是在我国没有类似先例的技术背景下进行的探索与实践,为我国今后大口径深孔硬岩侧钻提供有益的示范;发明了螺杆马达驱动连续造斜器,实现了钻探人员多年追求的同径造斜、边造斜边取芯的设想,并获国家实用新型专利(专利号 200320114700.0)。

(5) 低粘度、低切力、低密度、低失水及润滑性优良为特征的泥浆技术在施工中取得良好应用效果,该泥浆体系既适用于取芯钻进,又适用于全面钻进及扩孔钻进,满足了科学钻探的苛刻要求,泥浆性能



图 4 中国大陆科学钻探工程现场
Fig. 4 The drill-site of CCSD

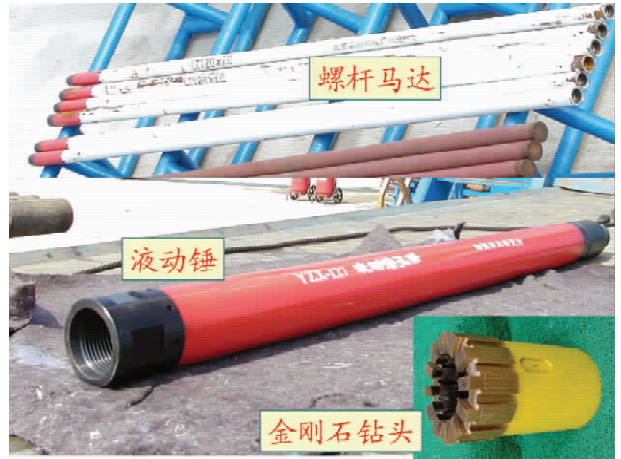


图 6 三合一提钻取芯钻具
Fig. 6 The three in one down-hole coring tool used in CCSD

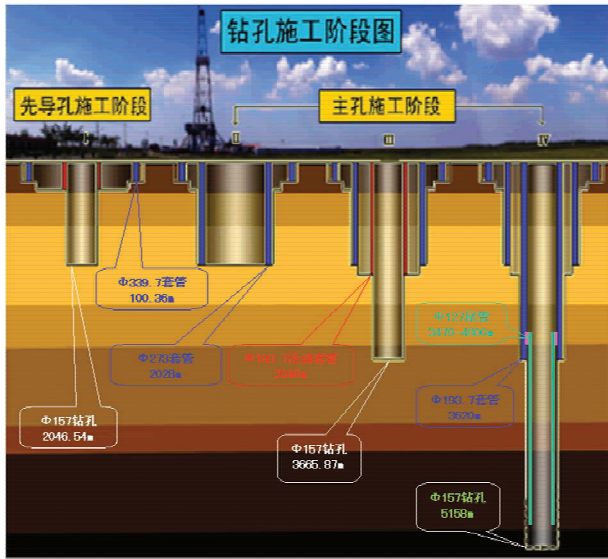


图 5 中国大陆科学钻探施工方案
Fig. 5 The drilling strategy of CCSD

在岩石坚硬和自然造斜强度高的结晶岩地层中解决了大直径、连续取芯、长井段扩孔等一系列技术难题,优质、高效、安全、低成本地完成了五千多米深井科学钻探施工任务。

3 小结

通常各个国家都是根据各自不同目标和工程实际情况选择科学超深井钻探技术施工方案,因此各具特色。但是仍然具有一定的共同特点:即以科学研究为目的,对取样有较高的要求;钻孔深度大、施工周期长、投入高;钻遇的地层环境有大量未知因素,具有很大的风险性;施工的手段以安全为先,以确保工程目标的实现;工程目标高,实际并不是都能完成:如前苏联的科拉深井原定的目标在 15000 m,德国的 KTB 工程的目标最初超过 12000 m,其设备是按照 14000 m 钻进深度进行设计准备的,但在工程进行过程中都由于技术措施未能克服深度和地质环境因素制约而提前终止,因此,必需对科学超深井钻进技术及早期进行研究,进行反复的论证,准备的越充分对科学钻探的实施越有利。同时,科学超深井钻探技术需要组合当代最新的钻探前沿技术,为特定的目标尽最大的努力而实施,是对当时钻探技术和工业技术的一次综合实力的反映。通过工程实施可培养造就一批跨世纪的地质研究与管理人才,促进地球科学与物理学、化学、生物学、工程学、经济学和管理科学的联合与交叉,为发展新学科生长点提供机遇,从而为我国经济和社会发展带来巨大效益。科学超深井钻探技术将会获得新的地学基础理论和钻探技术知识,将为建立地球科学知识创新系统、技术创新系统、知识传播系统和知

能长期保持稳定,对环境无污染,对录井无干扰,具有良好的性能价格比。

(6) 在科钻一井中进行了小间隙套管固井获得成功,有效地解决了活动套管的悬挂和防反扣问题,在国内首次成功实现了 2019 m 长井段活动套管的安装和回收。

(7) 采用了独特的钻探数据采集与处理技术等一列钻探施工新技术。

(8) 在科钻一井实施过程中还采用了一种特殊形式的适用于科学钻探的管理模式和一整套管理方法。

这一整套技术经受住了苏鲁超高压变质带坚硬岩石和复杂地层的严峻考验,取得了辉煌的成绩。

识应用系统做出重大贡献。可喜的是我国已经启动了地球深部探测计划,并着手超深钻技术方案的研究(董树文等,2009)。

注 释

① Engeser B. 1996. 联邦德国大陆钻探计划 KTB 钻探技术报告. 杨志豪,张伟译. 内部资料.

参 考 文 献

董树文,李廷栋. 2009. SinoProbe——中国深部探测实验. 地质学报,83(7):895~909.

科兹洛夫斯基 E A. 1989. 科拉超深钻井(下). 张秋生等译. 北京:地质出版社.

王达,张伟,张晓西,等. 2007. 中国大陆科学钻探工程科钻一井钻探工程技术. 北京:科学出版社.

王达,张伟,汤松然. 1995. 俄罗斯科学深钻技术概况和特点. 探矿工程,(1):53~55.

张伟. 1999. 21 世纪大陆科学深钻技术发展展望. 探矿工程,(增刊):169~171.

张伟. 1999. 夏威夷科学钻探项目的钻探技术和施工情况. 探矿工程,(4):52~53.

周国荣,戴智长. 2000. 刘广志探矿(钻掘)工程文选. 北京:中国物价出版社.

Brittenham T L. 1982. Directional drilling equipment and techniques for deep hot granite well. Journal of Petroleum Technology,(7):1421~1430.

Marx C, Rischmüeller H. 1986. Drilling and coring techniques for hard rock. Erdoel Erdgas Kohle,(2):51~57.

Rischmüeller H, Juergens R. 1990. New strategies for ultradeep coring in crystalline bedrock. KTB Report 90-7:203~239.

Status of Scientific Drilling Technology for Ultra-Deep Well

ZHANG Jinchang, XIE Wenwei

The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang, Hebei, 065000

Abstract

This study briefly discussed the importance and necessity of conducting the scientific drilling program and reviewed the history of the scientific drilling development. Taking the previous Soviet Union SG—3, Germany KTB, China CCSD, American San Andreas Fault Observatory at Depth and Hawaii drilling program, lake scientific drilling projects for examples, we introduced the key technology and achievements produced during implementing scientific drilling. It is finally concluded that training of research team and preparation of key drilling technologies have been played important role in the preparation stage of a scientific drilling program.

Key words: scientific drilling; ultra-deep well drilling technology; deep sea drilling program