

## 德国钻探技术发展现状

屠厚泽

(中国地质大学·北京)



钻探技术

1991年9月,笔者应德方邀请,作了为期3个月的学术性研究访问,对柏林工业大学、克劳司塔尔(Clausthal)大学深钻所和德国大陆科学超深钻(简称KTB)进行了考察,并讨论了中德双方共同培养博士生在对方进行专题研究及其进程问题。

由于采矿行业在许多国家面临萧条,而在西方又没有独立的地质勘探(包括探矿工程)专门机构,大学探矿工程专业大多设在采矿系或石油系,所以在德国许多从事采矿和深钻研究的机构,除了与KTB有关的项目外,很难再拿到其他科研资助。许多采矿和深钻所,开辟了有关环境保护方面的科学研究,如柏林工业大学采矿系,研究如何利用废弃坑道储存垃圾和核废料,等等。

为了国内同行了解目前欧洲主要工业国家正在从事的钻井工程方面的研究方向和具体课题,现将这次参观过的几所大学和公司,以1991年国际钻探会议和1992年研究的课题所收集的资料综合汇报如下。

### 1. 柏林工业大学采矿系

该系承担了超深井钻进时岩屑携带问题的研究任务。该课题由中国留德博士生承担,并为此在校园内建立了一个45m高的模拟装置。

顺利地 将岩屑携带出井外,是能否继续

钻进的先决条件,这是一个十分复杂的固、液两相液流的问题。对携带出来的岩粉进行综合分析,是研究所钻地层的重要原始资料,又是判层和确定钻进效果的信息源。尤其是超深钻井,如能把携带上来的岩粉和破碎岩块加以回收,就可代替或减少取心工作。

该实验装置安装在柏林工业大学的主楼内,为减少模拟误差,其尺寸与KTB实际钻孔有相同的比例。它可以模拟钻具在其中回转和在孔内回转时的偏心,以及变更钻具口径,用以对比实际钻具组的变化对岩粉携带的影响。其主要参数由电算控制,它主要用于测试岩屑在钻孔内的流动速度。所用仪器为激光多谱勒仪,其原理是利用激光多谱勒效应,利用两束激光交错后产生阴暗相间的光的条纹,亦即测试空间;当颗粒通过这一条纹区时引起反射光的频率改变,通过滤波信息处理,可精确得到测试点的速度,也可同时测定在某一定不同方向的速度,可以监测流场的状态。这是目前流体力学研究中最先进的仪器。由于岩粉速度在很大程度上与冲洗介质的性能有关,该实验室采用了不同种类的冲洗液,其中包括KTB正在使用的钻井液,混在冲洗液中的岩屑也是KTB实钻所得的岩屑,以便所得数据可以对比。KTB采用的钻井液是由一种白色的人造粘土配成,名叫H.T.Dehydrill钻井液,具有很高的剪切稀释性能和静触变性,能抗250℃左右的

高温。笔者在克劳斯塔尔深钻所泥浆实验室观察过这种钻井液，剪切稀释后，其粘度接近清水，清澈透明，静止2~3分钟后即成透明凝胶，粗大的岩屑颗粒全部“孕育”在凝胶中。稍加搅拌又能恢复成清水状态。

上面提到的用于测定岩屑流场状态的装置，除配有激光多谱勒仪外，还有电磁感应流速仪，用于测定固、液两相的流量，用高速摄影机观测岩屑流动的轨迹，用放射性密度计测定流体密度，但测试的重点则重于检测岩屑和携带岩屑的载体（即冲洗液本身）之间的速度差。

柏林工大采矿系在环保研究方面，除考虑利用已形成的采矿空场处理垃圾外，还研究人工在地下营造空间，如在钾盐矿中人造溶洞，重点是研究储存后的安全性和可靠性，防止污染、扩散。如在钾盐矿中建造水泥墙，水泥作为埋藏垃圾的最外层保护，通过现场取心，一半岩心为水泥，一半岩心为钾盐。在强度试验机上确定水泥与钾盐间的接合强度，以确定其可靠性。另一方案是通过冻结粘土，使其产生一层冻土隔离层用以处理垃圾。研究粘土在低温条件下各种力学物理性能，为了检验隔离层强度，有的项目建立了模拟装置，用来模拟垃圾场内堆积的状态及对场区产生的压力等参数。

## 2. 克劳司塔尔大学深钻所

该所是个专门研究深钻技术的机构，其管材实验室向国际开放，日本、法国、英国等钻具或钢材公司均来此作各种强度试验。它可以作各种油气田的管材及其接头在常温或高温下的拉、压、弯、扭等试验，还包括对管材及接头的水、气密封性能试验、螺纹结构检测，等等。

该所在设备和工具研究方面目前进行的项目，有Cyphyllly冲击器性能研究。这种冲击器用于大口径钻孔，单次冲击功为148J，为阀式正作用，结构很简单，滑动摩擦面及部件很少，对泥浆的净化要求也不高，

它是由瑞士Cyphyllly工程师设计的。

对液动冲击器的设计数学计算机模拟研究，由中德合作培养的中国留德博士生负责，按常规的发展和优化某种类型的冲击器，通常要经过设计—制造—试验—改进设计—再制造—再试验等一系列的反复过程，周期长、投资多，而用计算机数学模拟就可将过程缩短。前苏联学者在这方面作过大量的、有益的工作，但存在某些局限性，如将冲锤在冲击器内复杂的运动过程通过若干假设和数学解析方法，用一个或多个显函数形式表达。但事实上，冲击锤的运动轨迹与冲击器结构参数和液流参数之间是非线性的隐函数。人为地制定若干假设，将隐函数转化为显函数，必定会导致许多误差，使得到的结果不准确，阻碍了液动冲击器理论研究的发展。而上述研究则是通过数学模拟方式对冲锤在冲击器内的运动进行分析，建立冲锤活动的隐函数解，建立冲击器计算机模拟器，可以使人们在任意更改冲击器的结构后，迅速得到更改后的冲击器之模拟实验结果，从而使优化冲击器的工作能在短期内完成。

该所研究中的优势课题是，关于深井冲洗液和固井用水泥的研究。主要课题有以下几方面：

（1）膨胀水泥性能的研究 该项目是由下萨克森州地矿局委托，主要研究内容是揭示膨胀水泥在高温高压的井下条件与孔壁间的作用机理及其本身的机械物理性能，如抗压强度，孔隙率，对水、气的渗透率。膨胀水泥可提供较高的孔壁界面压力，但它本身具有较大的孔隙率和对水、气的渗透率，大的孔隙率降低了膨胀水泥本身的强度，对水、气有较高的渗透率，不能满足完全隔离油气层的要求，而这两个性质均与膨胀水泥的配方和烧结工艺密切相关。本课题正是为了解决上述工艺关系的。

（2）非垂直孔中钻屑携带问题研究

这个问题在深钻和石油钻井中受到很大关注,因为在深钻与超深钻中,钻孔环状间隙大,其中循环介质的流速就小,使携带岩屑的能力降低,尤其在非垂直孔内,诸如斜孔、水平孔、分枝孔情况就更突出。为研究本课题,实验室建立了室内模拟液力传输井筒装置,用以研究不同泥浆性质、泵送速度、钻杆组合结构及其回转参数对钻孔环空间隙流速、流场及岩屑传输的影响。该试验装置的角度是可调的。

(3) 泥浆对地层损害问题的研究 在钻进中,泥浆虽然起着保证顺利钻进的重要作用,但终孔后,尤其是在油、气井和水井作业中会留下一些后遗症,甚至影响油、气和水资源的开发。因为井壁的泥皮和渗入井壁周围泥浆中的固相,对油、气、水的流径造成封堵。井壁上的泥皮,可以通过各种机械和物化方法清除掉,但渗入地层孔隙或数十米半径周围的,因固相颗粒难以清除,而减少了油、气、水的产出。该项研究,是建立不同性质的模拟地层,使不同性能的泥浆在该地层中循环流动,在室温常压条件下所形成的泥皮厚度和其他性能,剖析泥浆滤液在地层中渗透率的数值,泥浆固相在地层孔隙内传输的距离、封堵的形态等,以便能根据不同地层条件来正确选择泥浆。

(4) 岩石破碎及破碎工具的研究 正在研究的内容是,球状切削具在孔底高轴压条件下冲击破岩过程,目的在于探讨深井条件下的冲击破岩机理和效率,对比球形硬质合金切削具和表面涂敷金刚石层的球形切削具的破岩效果。

此外还对破岩模型进行研究,利用微机进行图形显示,以便进行程控钻头设计等。

### 3. 德国大陆科学超深钻(KTB)技术

KTB计划是德国国家级第一个大规模地学研究计划。其总目的是进行地壳较深部位的物理、化学状态演变过程的基础调查和评价,以了解内陆地壳的结构成分、动力学及

其演变。钻孔预计深度为1万m,计划到1994年结束,总投资为5亿马克。钻进的场址确定在巴伐利亚西北部的上普代尔茨,是在华西里西褶皱带内部区域的两个主要基岩单元 Moldanubian(MO)和 Saxothuringian(ST) 界线以南数公里处,是MO和ST两个板块碰撞结合的部位。这个部位地质结构受到了扰动,扰乱作用一直波及到上地幔,是研究大陆地壳演变最理想的场所。此外从钻进技术上考虑,该地区地温按先导孔的地温梯度推算,当井深1万m时,约为300℃。在这个温度下,大多数测斜仪器和其他测井仪器均不能有效地工作。由于它们中的电子原件和橡胶密封系统都不能承受这样高温。从目前的技术水平看,泥浆在300℃时,大部分功能被破坏,不能再满足钻进和地质上的要求。地温300℃,目前已是地学研究施工追求的目标,因为在这个温度下,岩石的脆性—塑性过渡开始发生,表明岩石抵抗变形和力学特性已达到界限。据推测,这个界限也是大陆地壳中地震活动的下限,从岩石力学和地球化学角度看,也有特殊意义,有可能在这种温度条件下直接观察到岩石与地层流体之间的相互作用。从研究流体来说,在300℃范围内,许多混合流体可能正好在这时出现一些临界现象,因此钻超深孔有可能钻入超临界混合流体存在的岩层,因而KTB主孔的位置选在这个地点。

KTB所采用的钻进设备是专门委托设计制造的,是由众多著名公司联合生产,主要的三家是:德国深钻有限公司(DEUTAG)、德国建井与深钻有限公司(DST)和国际深钻公司(ITAG)。

#### ① 科学深钻用的钻探设备主要规格:

钻机型号为UTB-1、GH-300EG;塔高83m,净高53m;大钩最大负荷8000kN;转盘允许载荷8000kN;绞车型号为GH-3000EG;单绳最大拉力750kN;最高绳速20m/s;给进速度0~30m/h;滚筒直径1030mm,最大输入功率2200kW;泥浆主泵

之泵组数 2，工作压力 35MPa，最大输入功率  $2 \times 1240\text{kW}$ ；辅助泵组数 1；最大输入功率  $620\text{kW}$ ；动力供电系统，高压配电设备  $2 \times 20\text{kV}/7000\text{kVA}$ ，直流供电 SCR（可控硅整流），直流电机 9 台，最大输出功率  $740\text{kW}$ /台（有 9 台变频配电设备供 9 台交流马达），交流配电设备为  $600\text{V}/380/220\text{V}$   $50\text{Hz}$ ，此外还有应急供电  $20\text{kV}$ 。

辅助设备有：防喷器（耐压  $70\text{MPa}$ ）；主移拧管器及辅助移摆管器；泥浆循环系统；钻杆支架和钻杆检测中心及长期测井站。

上述整套设备的特点是，有先进的冲洗介质固相控制系统；有自动移摆管和大钩脱钩系统；在起、下钻具过程中有连续检测钻杆系统；有先进的钻井仪表系统；除转盘和移摆管系统靠交流电驱动外，其他设备均以直流电驱动。图 1 为钻场外貌。

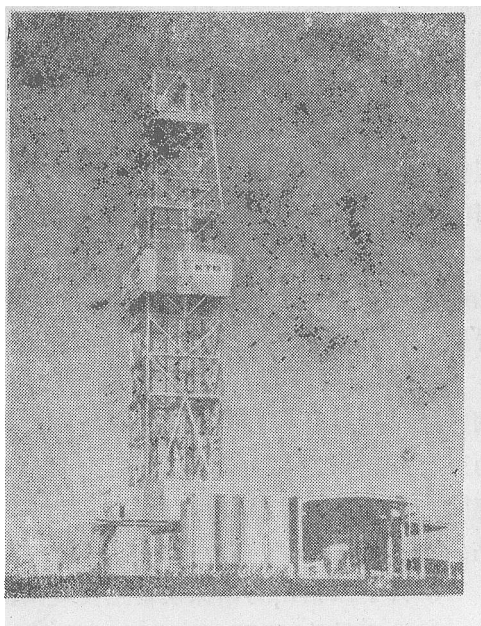


图 1 KTB 钻场外貌照片

②KTB 主孔采用的钻进工艺：

开孔直径为  $28''$ ，下  $24\frac{1}{2}''$  套管至  $305\text{m}$ ，

用  $14\frac{3}{4}''$  钻头钻至  $6000\text{m}$ ，终孔直径为  $8\frac{1}{2}''$ 。

由于已进行过先导孔钻进  $4000\text{m}$ ，并取得了地质资料，所以主孔  $4149\text{m}$  以前为不取心钻进。以后为间断取心，通过钻屑录井补充地质资料，按计划  $4149 \sim 10000\text{m}$  取心比例为  $30\%$  左右， $5000\text{m}$  以上一直用牙轮取心，深于  $6000\text{m}$  后，用薄壁金刚石钻头取心。

钻杆柱为  $5\frac{1}{2}''$ ，其材质用高强度的  $36\text{Cr}/\text{Ni}/\text{Mo}$  4—135 及  $36\text{Cr}/\text{Ni}/\text{Mo}$  8—170 合金钢。由于配有随起下钻检测钻杆的探伤仪，截至目前在主孔钻进中未发生过钻杆孔内事故。

主孔钻进时采用了具有良好性能的自动垂孔钻进系统（ZBE），该自动定向钻进系统是由德国埃森采矿研究院和什威恩液压电子技术公司联合研制的。两个垂直安放的加速度计（顶角传感器）可测出  $1/60$  度的顶角孔斜。通过电子元件将信号放大后控制液电伺服系统工作，使离钻头很近处的控制条块伸出支于井壁，从而改变钻头轴线，使钻头回到垂直方向。控制条块共有 4 块，以十字交叉安放。系统为闭合回路，液压介质为油。该系统在主孔使用前，曾在煤矿钻井中使用过，效果良好，在主孔应用前又做了某些改进（图 2）。

使用这种自动垂孔钻进系统，主孔目前的孔斜率列于下表。

KTB 主孔顶角随孔深变化情况表 表 1

| 孔深<br>(m) | 1265 | 1721 | 2400 | 3609   | 4251   | 4512 | 4848 | 5253 |
|-----------|------|------|------|--------|--------|------|------|------|
| 顶角<br>(度) | 0.3  | 0.7  | 0.25 | $<0.5$ | $<0.5$ | 0.4  | 0.5  | 0.3  |

从上表可以反映出该系统的优越性能。如果孔深超过  $6000\text{m}$ ，地温上升到仪器中电子元件所容许的极限，则采用常规的被动式垂孔钻进系统，如钻键组合或用涡轮组即将 2 或 3 个涡轮并在一起，除了涡轮马达回

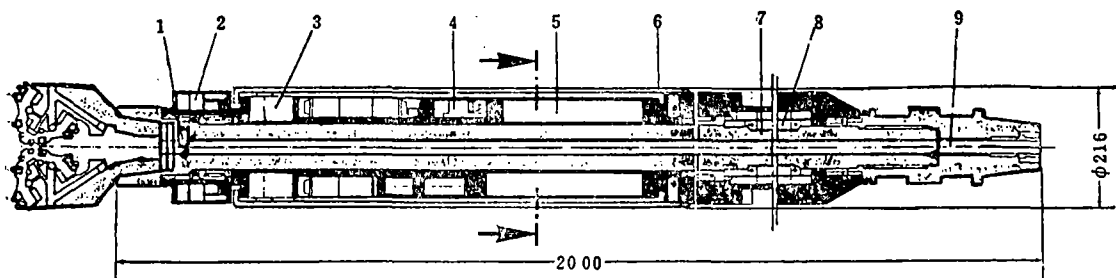


图 2 自动定向钻进系统结构示意图

1—脉冲发生器；2—液压泵；3—控制油缸；4—顶角传感器；5—控制电路；6—控制条块；7—转轴；  
8—发电机；9—冲洗通道

转外，整个钻柱也缓慢回转，从而形成圆截面的钻孔。

循环介质在6000m左右，采用耐200℃以上高温的人造粘土钻井液，预计更深时将换用一种油基冲洗液。

KTB现场配有一个完善的对岩心、岩屑、气体、液体分析的实验室，对从井内获得的物质进行系统、全面的分析，以获取大量的地质信息。

目前，截至本文脱稿时，主孔深度已达到6300m。

#### 4. 90年代国外正在研究的钻探项目

(1) 钻孔质量控制 ①深井垂直钻进自动系统1/1000精度；②随钻测量技术及其应用信息传递方法的改善及硬件支持；③磁场对水平钻进方向测量的影响。

(2) 冲洗液及完井 ①油基泥浆中岩屑的分离技术；②抗300℃左右的高温泥浆；③页岩稳定性与钻孔稳定性的研究；④水平井段水泥固井技术；⑤长井筒大角度下套管技术；⑥用酸除掉水泥的系统（有助于油气层的开发）。

(3) 钻探设备及工具 ①准备研制下一代钻机；②锚杆钻进的工业实践及锚杆钻

进在水平孔条件下的应用；③自动化钻机设计；④在野外条件下自动控制钻进；⑤钻机驱动（电、液）的比较和选择；⑥钻杆的疲劳寿命控制，钻杆断裂的判据；⑦钻杆螺纹结构与接头结构的改进。

(4) 钻头 ①超高压射流辅助钻进系统；②反旋式（Antiwhirl）PDC钻头；③PDC钻头的动力学；④双中心钻头的研究；⑤牙轮钻头独特喷嘴设计。

(5) 钻进工艺 ①钻进时振动的地表测量及钻进最优化；②井底钻具动态模拟及动态响应；③钻具扭振的控制；④用可调式井下控制器以克服井底钻压不足的限制；⑤用于早期检测粘钻的先进系统；⑥钻进系统智能控制；⑦钻进作业的经济环境的管理。

(6) 钻进安全技术 ①钻井废液、废渣的处理；②用微生物可以分解的反相乳液；③机场噪声的降低措施；④钻机设计中工人安全操作作业规划；⑤油气井机场废物的微生物分解。

编写本文时，留德博士研究生孔建和方国球二位先生提供了许多信息，地矿部勘察设计院，王达和张伟先生也提供了许多有关KTB的资料，谨此一并致谢。

#### Status Quo of the Development of Drilling Technology in Germany

Tu Houze