近海勘探取样钻机及反循环钻探取样工艺的研究与应用试验

张永勤[1]，王汉宝[1]，屠德钢[2]，李瑾伟[2]，孙建华[1]，刘秀美[1]，梁　健[1]，宋卓力[3]
(1. 中国地质科学院勘探技术研究所，河北 廊坊 065000；2. 无锡探矿机械总厂有限公司，江苏 无锡 214026；3. 国家海洋局北海分局青岛环海海洋工程勘察研究院，山东 青岛 266033)

摘　要：近海海洋地质钻探施工环境比陆域复杂而困难，研发适合近海海洋钻探环境的高效钻机及取样工艺方法对加速我国近海海洋地质调查具有重要现实意义。论述了近海海洋地质调查取样施工环境、对取样施工钻机的要求；介绍了新型近海海洋地质调查钻机的结构性能，简易海浪升降补偿装置的原理、特点及水力反循环“实时”钻探技术的优点；展示了钻机及水力反循环“实时”取样技术的应用效果。

关键词：海洋地质；水力反循环；钻探取样；钻机；海浪升降补偿；施工效率
中图分类号：P634　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672－7428(2013)S1－0045－05

Research and Application of Offshore Exploration Rig and Reverse Circulation Sampling Technology/*ZHANG Yong-qin*[1], *WANG Han-bao*[1], *TU De-gang*[2], *LI Jin-wei*[2], *SUN Jian-hua*[1], *LIU Xiu-mei*[1], *LIANG Jian*[1], *SONG Zhuo-li*[3]

(1. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Wuxi Exploration Machinery Corporation, Wuxi Jiangsu 214026, China; 3. Qingdao Maritime Institute of Exploration and Research, Beihai Branch, State Oceanic Administration, Qingdao Shandong 266033, China)

Abstract: Offshore exploration drilling is more complicated and difficult than land drilling ; thus research and development of high efficient drilling rig and techniques suitable for offshore drilling is important for accelerating offshore geological survey of China. The offshore drilling condtitions are discussed with the requirements for the sampling. Descritpion is made of the performance and specifications of the new offshore drilling rig, the principle of the simple compensation mechanism for the ocean wave, and the “real-time” sampling advantages of the hydraulic reverse circulation drilling process.

Key words: oceanic geology; hydraulic reverse circulation; sampling; drilling rig; sea wave compensation; drilling efficiency

0　引言

随着陆地资源的不断开发利用，人类已经将未来发展生存的空间转向海洋。有科学家预测，未来世界将是海洋的世界，海洋将为人类提供一定的生存空间及必要的资源。大量的实践证明，海洋确实存在着大量人类所需的资源。勘探开发海洋资源、加强海洋区域地质、环境及工程地质的调查对促进沿海经济持续发展及环境保护具有十分重要的意义。2000 年召开的全国海洋工作会议上我国曾提出了 21 世纪中国要成为海洋强国的奋斗目标。时任国务院副总理的温家宝曾指出：“待开发的海洋资源更是经济社会可持续发展的新的希望所在”。我国是海洋大国，有 18000 多千米的海岸线。20 世纪 90 年代以来，我国把海洋资源开发作为国家发展战略的重要内容，把发展海洋经济作为振兴经济的重大措施之一。因此，在我国海洋经济发展纲要中明确指出：我国海洋区域地质、环境地质及工程地质调查程度较低、技术装备水平落后，对实施上述发展战略和振兴沿岸海洋经济具有较大不利影响。从目前海洋地质调查取样钻探设备、器具及工艺方法发展现状看，我国还没有专用系统的近海海洋区域地质调查、环境及工程地质调查取样钻探施工设备、器具及施工技术，无法满足日益增加的海洋地质调查取样钻探施工的需要。因此，开发研究海洋区域地质、环境及工程地质调查取样钻探设备、器具及钻探取样施工技术十分必要。

收稿日期：2013－06－30
基金项目：国土资源部 2008 年公益性行业科研专项资助科研项目(200811056)
作者简介：张永勤(1960－)，男(汉族)，江苏沛县人，中国地质科学院勘探技术研究所深部钻探室及水合物研究中心主任，吉林大学兼职教授，科技部项目及成果评审专家，二级教授，探矿工程专业，从事各类岩土钻掘及取心(样)技术、钻掘设备及器具、天然气水合物钻探取样技术及开采研究工作，河北省廊坊市金光道 77 号，zyqietfhb@ sina. com。

1 近海施工环境对钻探设备及钻探技术的要求

近海海洋地质调查钻探取样施工的一般水深在 150 m 之内,海底以下钻进深度在 300 m 以内,其主要目的是进行海洋海底浅层矿产资源调查、海洋环境取样、港口及海洋经济带基础设施建设工程地质调查取样等。由于要求海底钻探取样深度较浅、抗海浪的要求不是特别高,对设备的要求不像海洋石油钻井那种大型钻井平台或大型动力定位系统,因为这种大型深水海洋钻井设备的购置及使用成本对一般的地质勘探单位是难以承受的。由于我国近几年以来正在加速近海海洋地质矿产调查及海岸带经济和基础设施的建设,需要对沿海岸带的海底沉积层等进行详细了解,特别是基础设施的建设。因此,近海地质调查、海洋环境及工程地质调查钻探取样工作量越来越多。根据一些海洋地质调查施工的要求及我国现有近海海洋钻探取样钻机的现状,提出研发适合某些近海海洋条件的钻探取样设备及配套器具与施工技术,特别是要求钻探设备具有抗海浪干扰和具有随海浪升降自动补偿海底钻具功能,同时要求钻探取样技术具有较高效率和低耗的优点,以满足海洋地质调查施工风险大、成本高的特殊环境,为加速我国近海海洋地质调查和开发利用海洋资源提供技术支撑。针对近海施工环境及施工要求,制定了可与现有小型地质调查船配套,并具有简易补偿功能的液压驱动钻机方案,同时配套以海水作为循环介质的水力反循环实时快速取样技术的总体设备及施工技术方案。

2 近海勘探取样钻机的研制及特点

2.1 钻机的主要技术参数

由于近海地质钻探取样施工的地理环境不同于陆地,在近海水域施工,一般采用简易平台或小型船只来支撑钻探设备,这些简易平台或钻船都没有随海浪升降的深浅补偿装置及动力定位系统。因此,为了能够利用上述简易支撑平台在具有一定高度海浪的近海海洋区域实施地质调查取样钻探施工,中国地质科学院勘探技术研究针对当前海洋地质调查取样工作需要,提出了近海海洋地质调查钻探取样钻机及配套施工技术的研发项目。由于受到船载设备能力的限制及预定的应用范围,所以钻机的能力在满足大部分近海海洋矿产、环境及工程地质勘探取样钻孔和样品直径需要的前提下,钻深能力达到水深 150 m 以下 150 m。钻机的基本结构采用液压顶驱方式,其基本技术参数如下:

(1)回转速度 0 ~ 450 r/min;(2)最大扭矩 4000 N· m;(3)动力头提升能力 80 ~ 100 kN;(4)主卷扬提升能力 50 kN;(5)副卷扬提升能力 30 kN;(6)动力头通孔直径≮130 mm;(7)最低配用钻杆长度 3 m;(8)钻塔有效提升高度≮9 m;(9)配备动力 140 kW。

2.2 近海海洋地质调查取样钻机总体结构

由于是在海上实施海洋地质调查钻探取样施工,所以在研发钻机之前首先要确定钻机的载体——钻船。通过调研和联系,采用了国家海洋局北海分局勘察院的 600 t 级的海洋地质调查船。该船的配备动力为 180 kW,主要用于船只的行走及其他地质调查工作。从钻进深度及回转和提升所需动力的理论分析计算,在钻船定位实施钻探施工时,钻船配备的动力是可以满足钻机工作需要动力的。由于钻机自身的结构及钻探取样施工过程中所需要的空间和平面位置,考虑钻船的有限平面位置,初步确定钻杆的有效长度为 3 m。根据钻船的动力、甲板平面尺寸及位置、海洋钻探取样施工的特殊海况、取样要求等,决定钻机采用液压顶驱和控制方式,动力由钻船发电机组提供,通过电机驱动液压泵站,由液压泵站向钻机提供回转、提升和其他辅助动作的动力。为了克服一般液压顶驱钻机提下钻过程辅助时间长的缺点,钻机配备独立钻塔和卷扬机机构,在需要提下钻时,采用钻机后移让开孔口,利用卷扬机提下钻方式,提高了提下钻杆的速度,为避免一旦遇到海浪撤离赢得时间。因此,钻机的总体结构是采用液压顶驱钻进及液压控制方式,钻机主机可以移动让开孔口,以便采用卷扬机配合较高塔架进行钻杆的快速提升和下放,提升的钻杆平放在钻船甲板上。在海上实施钻探钻进过程中,不可避免的要遇到高低不等的海浪,随着海浪的上升和下降,钻船无疑会上升和下降,势必导致钻杆钻具的随时上升和下降,如果钻机没有随海浪升降的补偿机构,将会造成当海浪上升使钻具提离孔底一定高度,当海浪下降时,钻船下沉,钻具插向孔底,有可能将钻杆折断、钻头堵塞或沉积层采用反循环钻进时样品混淆。为了提高钻机在一定海浪环境下工作能力,确保海浪不论在上升或下降时,始终确保钻头处在孔底均匀的轴向压力和正常的切削状态下,降低施工过程中一些不必要的事故,该海洋钻机配备了随海浪升降的钻具上下补偿机构,以便使钻机在一定高度的海浪情况下能够较安全可靠地实施钻探取样作业。

2.3 简易海浪补偿机构组成及特点

海洋钻机钻进过程中在海浪的作用下,整个钻

船和钻机的给进系统随海浪上下带着钻具上下升沉,本补偿系统是借助于给进油缸下腔压力(P)的变化实现钻具升沉补偿的。海浪的上下浮动使给进油缸下腔压力 P 发生变化,直接影响设定的孔底钻压值,使其不能正常钻进,甚至压毁钻具造成事故。如果在钻具上下升沉时能保持压力 P 值不变,即可保持原设定钻压不变进行正常钻进。如何保持给进油缸下腔压力 P 值稳定不受海浪影响是实现钻具随海浪升沉补偿的技术关键。如果在液压给进系统中加入一个动力源和压力控制阀,当钻具随海浪下沉时 P 值减少,此时动力源及时给油缸下腔补油保持 P 的原值不变,即孔底钻压不变。当钻具随海浪上升时 P 值增加,此时增加的压力由压力控制阀泄掉保持 P 的原值不变,即孔底钻压不变,使钻进正常进行。其工作原理是 P 值是随海浪升沉而变化,再由动力源或压力控制阀被动的使 P 值保持不变。

本补偿机构由钻机的给进油缸和倍增机构组成给进系统及钻机动力头、液控换向阀、压力控制阀、动力源泵等部件构成,其液压系统为开式系统。该补偿机构仅增加动力源泵和液控换向阀,其他均为钻机给进系统的原部件,是一种简单的创新机构。该补偿机构具有以下特点:

(1)本补偿机构主要用于近海海洋沉积层浅海地质调查钻探取样施工,由于主要采用硬质合金或金刚石复合片钻头钻进,故钻进过程中的钻压控制精度一般低于金刚石钻头控制精度,给本机构设计和满足施工要求提供了有利条件。

(2)本机构设计简而易行,没有采用深海钻井船升沉补偿装置的设计思路,适应浅海地质钻机特点要求,更适合在空间狭小的钻机船上布局。

(3)升沉补偿机构能在小于 300 mm 的海浪下进行正常工作。

(4)升沉补偿精度近似于蓄能器升沉补偿装置的精度,远低于电子动力升沉补偿装置的精度,其精度能否满足金刚石钻进要求,还需进一步试钻验证。

(5)结构简单、操作方便、工作可靠、动力补偿能耗少、价格低廉是最大亮点。

(6)本机构在渤海试钻 7 个不同孔深钻孔时,能满足加减压钻进工艺要求,验证此机构是成功的。可填补在浅海 50 ~ 150 m 深度的钻探空白。液压浮动补偿控制说明与系统原理图及液压系统如图 1 所示。

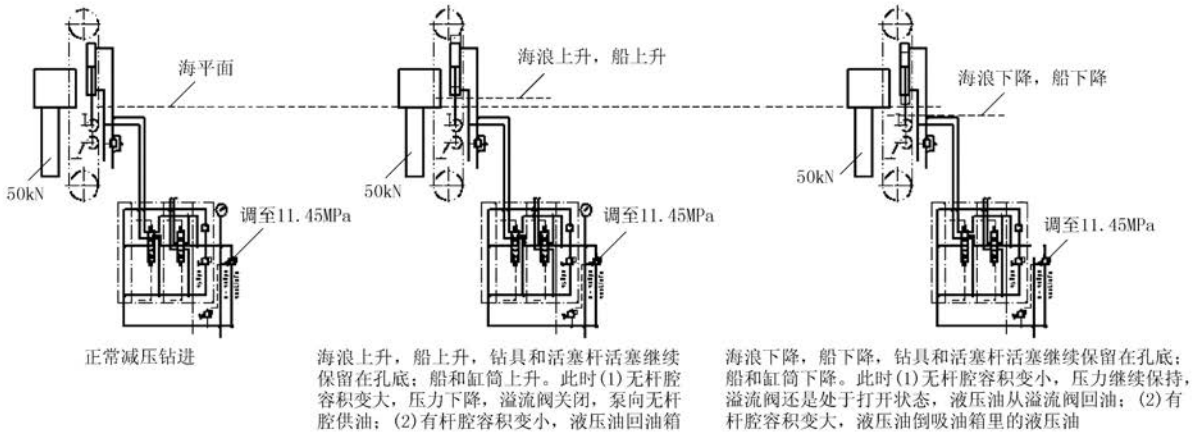

图 1　液压浮动补偿控制说明及系统原理图

3　反循环“实时”取样工艺的研究与应用

近海海洋矿产地质、环境地质、工程地质调查取样施工主要以沉积地层为主,但一些海洋工程地质调查取样的地层有时也涉及基岩层或砾石层。根据海洋地质调查施工的环境,海上施工的费用非常高,所以研发高效并适合海底各种地层的取样钻探工艺方法十分重要。通过分析,采用水力反循环连续“实时”取样钻探工艺方法非常适合海洋地质调查取样施工环境。水力反循环“实时”取样工艺的基本原理就是,利用液体(清水或泥浆)作为循环介质,采用双壁钻杆,循环介质通过水泵,经过高压胶管输送到双通道水龙头,经过双壁钻杆的内、外管环状间隙到达孔底钻头部位,在钻头上端一定高度喷射接头处,大部分液流进入双壁钻杆内管中心,随着钻进的进行,钻头所形成的岩心(样)进入内管,喷射接头的高速液流在钻头内部上端产生一定的负压,在高速液流及负压的作用下,岩心(样)经过内管中心被携带上升,经过双通道水龙头的排心(样)弯管、排心软管到达钻船甲板上的样品接收装置。其工作原理如图 2 所示。

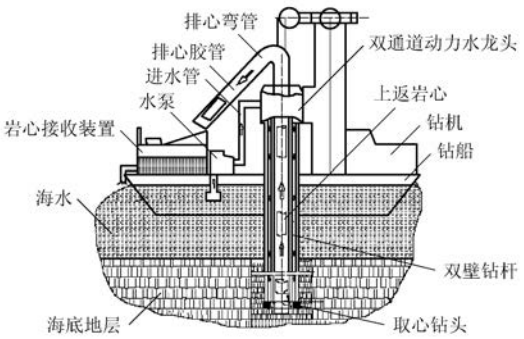

图 2 水力反循环“实时”取心(样)原理图

从水力反循环“实时”取心(样)钻进工艺原理可以看出,钻进过程中所形成的岩心(样)是通过液体的液动力和液压力随时携带至钻船甲板上的。为了满足地质钻探取样要求,首先,所形成的岩心(样)直径及数量要足够,同时要在岩心(样)形成后以更快的速度被携带至钻船甲板上的接收装置。岩心(样)在钻杆中心通道内的上升速度取决于冲洗液的速度、岩心与内管内径的环隙及样品的密度,为了以较低的动力消耗获得更准确的岩心(样),必须合理设计双壁钻杆内外管的环隙、内管内径、岩心直径、泵量等参数。通过理论计算及室内实验可知,冲洗液的上返速度及岩心和内管内径是决定岩心上返的主要因素。岩心直径和内管内径的间隙越小,“活塞效应”就越强,岩心上返的速度就越接近冲洗液的上返速度,但必须考虑岩心和内管内径之间有合理的间隙,以便减少岩心上返过程的堵塞。根据地质工程对岩样直径的特殊要求,设计岩心样品直径为 80 mm,初步设计双壁钻杆的内管中心通道直径为 88 mm,岩心直径及内管内径的尺寸既能满足工程地质进行样品土力学测试和其他地质要求,又能通过内管中心通道下放必要的海底探测仪器等。根据上述要求、计算和室内测试,初步选定所配备的水泵的流量为 800 L/min,压力为 10 MPa,这样可以使得内管中心通道的液流上返速度 > 2 m/s。根据岩心内管通道及岩心直径之比,初步计算岩心上返速度可达到液流上返速度的 85% 左右。实现水力反循环“实时”取样工艺的关键是双壁钻杆的结构参数,根据上述初步要求及参数,初步确定较优化的双壁钻杆主要技术参数如下:

双壁钻杆外管直径(OD/ID):127/114.4 mm;双壁钻杆内管直径(OD/ID):86/80 mm;接头外径:128 mm;钻杆长度:3000 mm;钻杆接头螺纹结构:5°特殊梯形螺纹。

4 钻机及取样工艺的试验及效果

4.1 陆地取心(样)试验

为了确保钻机及配套工艺方法海上施工安全可靠,在钻机试制组装调试后,首先在陆地进行了可行性钻进试验。陆地试验表明,钻机可以实现所设计的各项功能,并能满足水力反循环“实时”取样工艺要求。在陆地上完成了一个深度 70 m 的钻孔,样品采取率达到 100%。试验现场见图 3。

图 3 生产试验现场

4.2 海上生产试验及效果

在完成钻机、钻具、水泵辅助器具的试制和调试后,首先将钻机主机在陆地进行可行性及功能试验。在确定钻机功能及工艺方法的可行性及对个别问题进行改进后,将钻机、钻杆钻具及附属器具运输到青岛,进行钻船改装。根据钻船的性能、甲板剖面布置进行了钻机及辅助设备的安装。在完成安装调试后,准备结合海上施工任务对钻机、取心(样)工艺方法进行试验。

4.2.1 试验海况及地层

由于本钻船吨位较小,所以钻船适应海水深度和海浪是有限的。因此,为了安全起见,所有的生产试验都是在海水深度 50 m 左右的海域进行的,海浪高度 < 1000 mm。主要地层都是粗砂、粉砂、塑性粉质粘土、泥岩、小砾径砾石等沉积层。

4.2.2 海试情况及效果

在钻机船载安装后,2011 年 6 月 13 日在威海北部海域进行了首次钻探取样试验,本试验是结合海洋地质取样生产任务,首次试验钻孔深度 50 m。钻探取样结果符合工程地质勘察的基本要求,首次海试对钻机的总体性能进行了验证,基本取得成功。由于海试费用较高,风险较大,因此所有的海试工作最好都与生产任务相结合。所以后续的海试工作都是在确定了施工承包任务后,结合实际的生产任务实施的。

在完成首次试验后,钻机等待生产任务的下达,之后又在长岛及威海北部进行了生产试验。生产试

验中对钻机各个功能及动作和工艺方法都进行了试验。工艺方法主要包括水力反循环“实时”取样、冲击原状取样、工程地质标准贯入等。

在长岛海砂开采项目中,利用该钻机及工艺方法完成 9 个钻孔,作业区水深 15 ~ 20 m,实际工作量 154 m。施工的海底表层 1 ~ 2 m 为中粗砂,表层之下为可塑状态的粉质粘土。根据地质需要,进行了水力反循环取样和标贯等。对于 10 m 深钻孔,在需要 2 次标准贯入试验的情况下,完成时间大概为 1.5 h。

在威海北部 20 m 水深海域,进行了 1 个 50 m 深的钻孔试验,地层依次为淤泥质粉质粘土、中细砂、可塑至硬塑状态的粉质粘土、密实状态中粗砂等。对于 50 m 钻孔,完成时间大概为 5 h。

在葫芦岛海砂开采利用项目完成 22 个孔深 20 ~ 30 m 的钻孔,作业区水深 20 m,实际工作量 480 m,地层主要为中粗砂、粉质粘土互层。在不用取样器取样,进行 3 ~ 4 次标准贯入试验的情况下,完成时间大概为 4.5 h。

至此,HZ - 150 型海洋工程钻机在安装完成后,曾在以上 3 个海域进行钻探取样试验施工,施工的作业最差海况的浪高约为 1 m,船舶上下起伏不超过 20 cm。完成了 1 个 50 m 的钻机及工艺方法海试钻孔,之后承担了 2 个海域的工程施工任务,共完成了取样钻孔 31 个,总进尺达 684 m,取出的样品如图 4、图 5 所示。

图 4　海试取出的完整岩心样品

图 5　生产试验取出的松散地质样品

在进行了多海域和不同钻探取样施工目的应用试验后,对钻进施工中遇到的钻机及工艺问题进行了改进和完善,使得海洋取样钻机及水力反循环“实时”取样技术更加完善和优化,增加了双壁钻杆内水力静压原状取样钻具和施工技术,进一步提高近海海洋地质调查取样效率、扩大应用范围和降低施工成本。

5　结论

通过对所设计钻机的试制加工、组装调试及陆地和海上试验,证明钻机本身的结构性能及技术达到了设计要求,完全满足近海海洋地质调查取样施工要求,虽然没有钻进超过 150 m 深的钻孔,但室内对钻机的能力参数的测试,钻机的回转扭矩、提升能力、回转速度及各项动作和操控的可靠性都达到了设计要求。特别是钻机利用液压原理可实现随海浪升降而自动补偿功能,即在海浪升降高度达到 300 mm 以内时,钻船随海浪升降达到 300 mm,升降补偿机构能够使海底钻头及钻具始终稳定的与所钻地层正常接触,避免了没有海浪补偿可能造成在海浪下降时压断钻杆,或海浪上升时钻头提离孔底造成混样的可能。另外,所配套的利用海水作为循环介质的反循环“实时”取样钻进工艺具有较高的钻探取样施工效率,特别是对于松散沙砾层取样施工,较好的解决了常规取样方法很难获取满意的地质样品的难题。利用简易的液压压差实现钻机抵消海浪升降的补偿机构结合水力反循环“实时”取样技术,在国内外都属首创,对高费用、高风险近海海洋地质调查取样施工具有非常现实的经济技术效益,在未来近海海洋地质调查钻探取样施工中具较大的潜在应用前景。

参考文献:

[1]　张永勤,孙建华,刘秀美,等. 水力反循环连续取心(样)钻探在浅海砂矿勘查中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(6):15 - 18.

[2]　张永勤. 水力反循环连续取心钻探技术的发展与前瞻[J]. 探矿工程,1999,(S1):154 - 157.

[3]　张永勤,张晓西,靳玉生,等. 中硬岩石水力反循环连续取心钻探工艺的研究与应用[J]. 探矿工程,1997,(S1):104 - 106.

[4]　孙建华. 水力反循环实时取样技术在海上锆钛砂矿勘查中应用效果显著[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):94.

[5]　张永勤,孙建华,赵海涛,等. 近海及滩涂海洋地质调查快速取样技术的研究[A]. 海洋地质、矿产资源与环境学术研讨会论文摘要集[C]. 2006.

[6]　张永勤,刘辉,陈修星,等. 组合钻探工艺的试验研究[A]. 探矿工程(岩土钻掘工程)技术与可持续发展研讨会论文集[C]. 2003.