

宋刚, 崔淑英, 谢文卫, 等. 钻孔重入与跟管钻进技术研究与应用[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(7): 75-85.

SONG Gang, CUI Shuying, XIE Wenwei, et al. Research and application of reentry cone and drilling-in casing[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(7): 75-85.

钻孔重入与跟管钻进技术研究与应用

宋刚^{1,2}, 崔淑英^{1,2*}, 谢文卫^{1,2,3}, 牛庆磊^{1,2}, 赵明², 韩泽龙²

(1 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458; 2 中国地质调查局勘探技术研究所, 河北廊坊 065000;

3 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 517000)

摘要:大洋钻探在海底泥面钻孔, 需要解决钻探过程泥面坍塌和钻具反复重入钻孔的问题。重入锥是大洋钻探钻孔重入的专用装置, 可采用自由落体和跟管钻进 2 种方式部署。自由落体式重入锥是一种临时性重入井口, 用于支撑短期内钻孔重入, 而采用跟管钻进工艺部署的重入锥井口, 可作为一种永久性的海底装置, 支撑现阶段乃至以后多航次的钻孔重入。笔者介绍了钻孔重入和跟管钻进技术的原理、关键器具和工艺流程, 并总结了首次浅海试验情况。通过浅海试验验证了重入锥与跟管钻进同步部署工艺流程的可行性, 测试了自研套管送入工具及张敛式随钻扩孔器的功能性, 发现了送入工具在密封结构方面存在的不足, 为进一步开展深海复杂地层钻孔重入和跟管钻进技术研究奠定了理论和实践基础。

关键词:大洋钻探; 跟管钻进; 重入锥; 送入工具; 张敛式随钻扩孔器

中图分类号: P756.5; P634

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.233

0 引言

为探究地球深部生物圈, 发现环境变化过程与结果, 找寻固体地球循环与地球动力学形成规律, 自 20 世纪 60 年代开始实施大洋钻探。从 1968 年的深海钻探计划(DSDP), 到 1985 年的大洋钻探计划(ODP), 2003 年的综合海洋钻探计划(IODP), 再到 2013—2023 年的国际大洋发现计划(IODP), 大洋钻探已历经 50 多年, 中国也从 1998 年的最初参与成员, 发展到 2013 年的正式会员, 参与有限权利

的大洋钻探项目。2014 年, 中国 IODP 专家咨询委员会拟定了“三步走”战略目标: 第 1 步实现 2~3 个以中国为主的 CPP 航次; 第 2 步争取成为 IODP 又一个“平台提供者”; 第 3 步, 建造世界第 3 代大洋钻探船^[1]。通过 IODP-CPP 项目, 中国科学家主导完成了 349、367、368 和 368X 多个钻探航次, 并通过钻探和取样开展了关于南海张裂-破裂-扩张发育历史和南海生命史等方面的研究^[2]。2019 年, 中国正式启动万米钻探船建造, 即将开启由中国主导的大洋钻探。同期, 中国地质调查局成立科技攻关小组, 开展深海钻探工艺和器具研发, 多项深海钻探配套技术列入研究课题, 其中, 钻孔重入及跟管钻进技术为首批急需攻关的课题之一。

大洋钻探开孔位置位于海底, 无论是提钻换钻头, 还是钻孔后下测井仪器测井, 均涉及重入钻孔问题。受海浪、洋流的作用, 重入钻孔时钻杆会发生偏斜, 无法准确入孔。大洋钻探采用重入锥技术引导钻具重入钻孔。重入锥是一个类似喇叭形状的大型导向锥, 导向锥的锥沿处或锥体周边布设声呐信标或浮球, 在水下机器人(ROV)或水下电视系统(VIT)的引导下, 通过钻探船的动力定位(DP)功能调整钻具位置, 使钻具移至导向锥的喇叭口上端,

收稿日期: 2021-08-30

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“天然气水合物钻采船单井及大洋钻探技术研究”(GML2019ZD0504); 中国地质调查局项目“深海钻探技术与工程支撑”(DD20190585), “XXX 先导试验区试采实施”(中国地质科学院勘探技术研究所)(DD20190227), “XXX 先导试验区资源评价与试采”(中国地质科学院勘探技术研究所)(DD20211349)

作者简介: 宋刚(1971—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事地质钻探、海域天然气水合物钻探工艺器具、海工装备等方面的研究工作。E-mail: 379012534@qq.com

* 通讯作者: 崔淑英(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事深海钻探工艺与器具等方面的研究工作。E-mail: 306011322@qq.com

钻具沿着锥面下移可进入原钻孔(图1)。重入锥可通过自由落体的方式下放,也可与套管连接到一起,通过跟管钻进工艺下放。为解决软泥中的孔壁稳定问题,一般通过先钻孔后下套管的方式进行护壁,但大洋钻探日费用极其高昂,为实现高效稳定钻进,引入了跟管钻进工艺,边钻孔边下套管,一趟钻完成钻孔及护壁,既可避免孔壁长期裸露发生缩颈或坍塌,还能大大提高施工效率。2017年在中国南海实施的IODP367航次,在U1499B和U1500B钻孔内采用跟管钻进工艺,分别下入长度为651 m和842 m的套管柱,钻孔尺寸为 $12\frac{3}{4}$ in,套管尺寸为 $10\frac{3}{4}$ in^[3-5]。

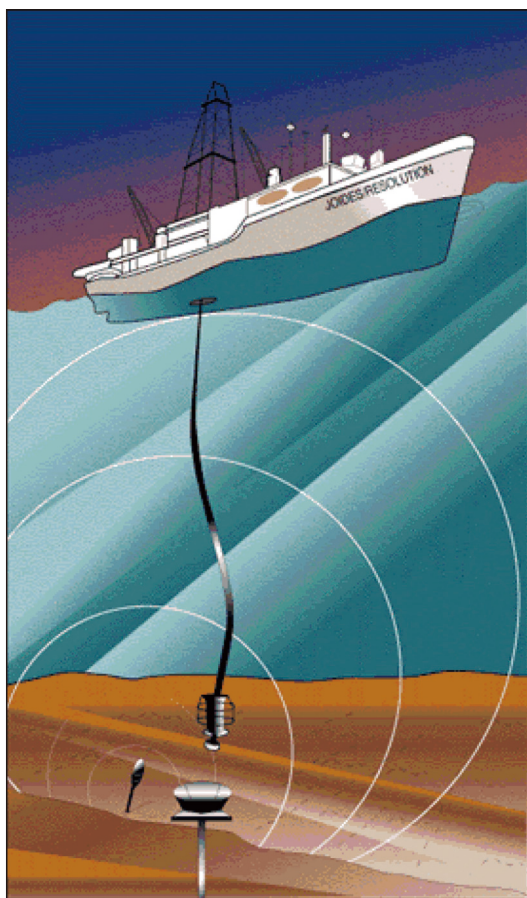


图1 重入钻孔示意图^[6]

Fig.1 Schematic diagram of reentry drilling^[6]

1 钻孔重入技术

在大洋钻探过程中,当钻头使用寿命无法完成钻孔目标深度必须提钻更换钻头,或钻孔完成后需下入测井仪器时,均需要进行钻孔重入。对于大洋钻探而言,如果没有专门的仪器装备进行辅助,很难快速准确地实现钻孔重入。目前,大洋钻探主要依靠重入锥和VIT系统(或ROV)实现钻孔重入。

1.1 重入锥

1.1.1 标准重入锥

标准重入锥通常由重入漏斗、泥垫、过渡管和壳体组成(图2)。重入漏斗是一个上大下小的喇叭形状,喇叭口可引导钻具进入钻孔。漏斗有圆锥形或多边形2种结构形式,图3为大洋钻探U1499B孔部署的圆锥形重入锥和U1440B孔部署的8边形重入锥,一般采用现场焊接形成一个完整的漏斗。泥垫位于漏斗下方,形状为方形或圆形,可以支撑在泥面上,防止重入锥陷入泥面。过渡管上端与泥垫连接,下端与壳体连接,壳体内安装套管挂,根据需求最多可安装4级套管柱。漏斗大端直径和泥垫最大尺寸需依据钻探船月池允许通过的尺寸而定。漏斗内部喷涂同心圆环,颜色以深浅交替进行,以便VIT或ROV能够清晰地观察到重入锥位置。“乔迪斯·决心号”大洋钻探船的月池直径为7 m,故其应用的标准重入锥最大直径为4 m,泥面以上高度为2.1 m,泥垫支撑区为 11.1 m^2 ^[7]。

1.1.2 自由落体重入锥

与标准重入锥类似,也为两半形式,由漏斗、泥垫和导管组成,不同之处在于导管下端无需悬挂套管(图4)。在漏斗上焊有穿绳环,释放时通过绳索和释放器配合,沿钻杆自由落体进入海底泥面(图5)。主要用于紧急或未计划钻孔重入的情况,例如标准重入锥填满岩屑无法进行重入、因各种原因改变一次性钻孔计划等情况。“乔迪斯·决心号”

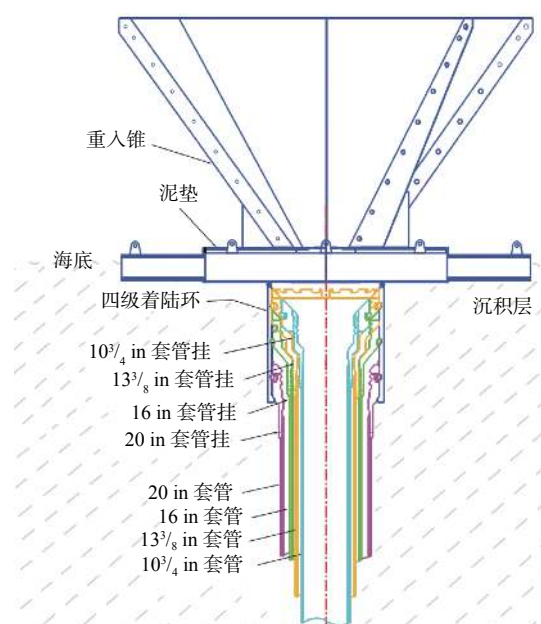


图2 标准重入锥示意图^[7]

Fig.2 Schematic diagram of reentry cone^[7]

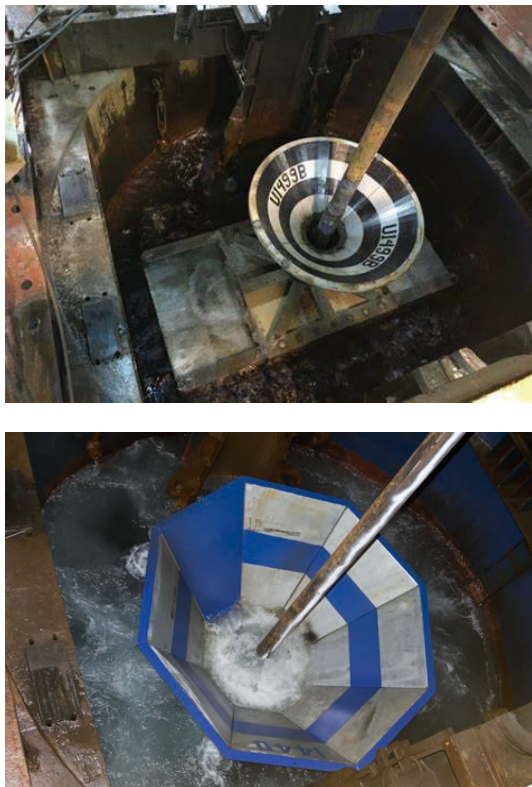


图 3 重入漏斗结构形式^[8-9]
Fig.3 Structure of reentry funnel^[8-9]



图 4 自由落体重入锥结构^[7]
Fig.4 Structure of free-fall funnel^[7]

大洋钻探船中应用的自由落体重入锥最大直径为 2.28 m, 泥面以上高度 1.02 m^[7]。



图 5 自由落体重入锥下放^[10]
Fig.5 Rigging down free-fall funnel

1.1.3 自研标准重入锥

开展钻孔重入与跟管钻进试验, 必须依托钻探船。“海洋地质十号”船作为中国地质调查局的一艘综合地质调查船, 在完成地质调查任务之余还承担着各类地质调查研究项目的海试任务。“海洋地质十号”船的月池为 3 m×3 m 的正方形, 为满足重入锥从月池中下放, 重入锥的尺寸设计不能直接参考“乔迪斯·决心号”, 需根据船的月池尺寸和套管尺寸进行设计。

自研重入锥由 4 部分组成: 重入漏斗、套管挂、泥垫和过渡管。最大尺寸为 $\Phi 2.5$ m, 泥面以上高度 2 m, 泥垫支撑区面积为 4.9 m²。两半漏斗的连接方式摒弃了惯用的焊接方式而通过螺栓连接。为保证漏斗强度, 在漏斗的母线方向及圆周方向焊接肋板加固。采用螺栓连接一方面可提高现场安装的进度, 另一方面可降低焊接不达标造成的安全隐患, 但同时对于螺栓强度和螺栓的拧紧力矩需严格把控。泥垫与重入漏斗之间为套管挂, 分别通过高强度螺栓连接, 过渡管一端为法兰端面, 法兰固定到泥垫上, 另一端为常规套管扣, 与套管串连接。套管挂与送入工具锁定, 实现套管柱与钻具组合的连接。自研标准重入锥的结构如图 6 所示。

1.2 水下电视系统

水下电视系统(VIT)(图 7)主要用于在现有井

甲板将套管柱组合和送入工具以下的内钻具组合进行连接, 然后通过加接钻杆将整体钻具下放到接近海底位置, 开泵后螺杆马达提供动力进行钻进、扩孔和套管跟进, 直至泥垫落到泥面。最后, 向钻杆内投球将送入工具与套管挂解锁, 上提钻杆将内钻具组合提出孔外, 套管柱组合留在孔内, 即完成了跟管钻进下放重入锥的整个流程。

2.2 跟管钻进关键器具

2.2.1 送入工具与套管挂

大洋钻探跟管钻进与深海油气钻井的水下井口系统安装类似。水下井口系统是一个复杂的系统, 主要由泥垫、低压井口头、高压井口头、套管挂、密封总成、耐磨补心及送入和回收工具组成^[12], 图 9 为 GE-Vetco 公司的 MS-700 HC-2 井口系统示意图。井口系统的所有部件均需要专用的送入工具, 以美国和挪威的 GE-Vetco、Dril-Quip、Cameron、FMC 和 Aker Kvaerner 为代表的几家公司在井口装备方面具有垄断地位^[13-15]。大洋钻探使用的套管挂和送入工具均来自海上油气钻采使用的常规工具, 以 Dril-Quip 公司的居多, 图 10 为 Dril-Quip 公司的套管挂及 CADA 送入工具, CADA 工具可以将套管送入到位后有选择地决定是否继续钻进, 如果继续钻进则省略了一次起下钻流程, 通常最后一级套管的下入采用无继续钻进功能的送入工具。

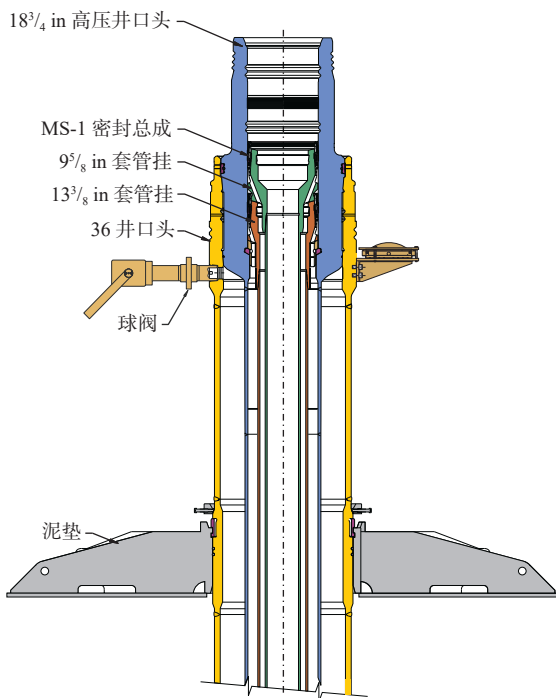


图 9 水下井口系统示意图^[16]

Fig.9 Structure of subsea wellhead systems^[16]

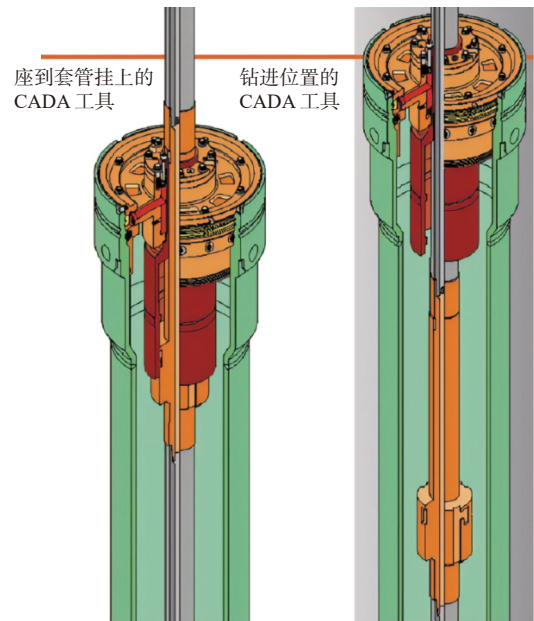


图 10 套管挂及送入工具示意图^[17]

Fig.10 Structure of casing hanger and running tool^[17]

2.2.2 自研送入工具及套管挂

在掌握跟管钻进工作原理的基础上, 依托项目支持研制了送入工具及套管挂样机。送入工具与套管挂是一个相互配合的系统, 需同时进行结构设计。送入工具的结构形式与解锁方式密切相关, 深海油气井所使用的送入工具解锁方式一般为旋转解锁, 结构形式较为复杂, 加工精度要求较高, 为简化结构, 自研送入工具采用投球剪断销钉的方式解锁。

(1) 结构组成

送入工具及套管挂的结构组成如图 11 所示, 主要由套管挂、送入接头、活塞、悬挂销、复位顶杆和剪切销组成。套管挂、重入漏斗、泥垫和过渡管组成一个标准的重入锥组件, 过渡管下端连接常规套管和套管鞋, 形成完整的套管柱组件。送入接头安装在套管挂内, 通过悬挂销将其与套管挂连接。活塞通过剪切销悬置在送入接头内部, 悬挂销和剪切销同时完成送入工具的锁定。送入接头下端与

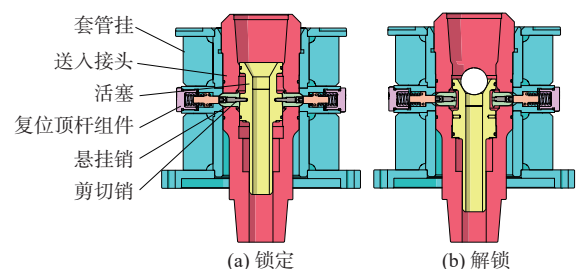


图 11 自研送入工具与套管挂示意图

Fig.11 The running tool and casing hanger we developed

孔底钻具组合连接, 上端与钻杆连接, 最终形成跟管钻进的整体钻具组合。

(2) 功能作用

送入工具的2个功能: ①安装锁定、到位解锁。通过悬挂销和剪切销将内钻具组合锁定到套管挂上, 到位后投球憋压将剪切销剪断, 实现解锁。②提供传扭力, 满足送入接头上下钻具的加接。钻具的加接一般借助孔口夹持装置完成, “海洋地质十号”调查船利用固定到月池盖板上的气动卡瓦辅助钻具上卸扣(图12)。跟管钻进下放重入锥套管柱组件先下放到海里, 泥垫落在原气动卡瓦的位置, 常规加接钻杆的方式在此工艺中已不适用, 因此在重入锥设计时需考虑内钻具组合的加接问题。将套管挂的上端面设计成法兰形式, 泥垫和套管挂安装到月池盖板后, 在套管挂上安装自研气动卡瓦座, 气动卡瓦座通过螺栓和键块与套管挂进行固定和传扭, 气动卡瓦安装到卡瓦座内通过四方传扭, 由此可形成一个传扭链, 钻杆-气动卡瓦-卡瓦座-套管挂-泥垫-月池盖板, 从而可完成孔底钻具组合上卸扣(图13)。送入接头及以下钻具加接完成后将气动卡瓦拆除, 利用送入接头与套管挂六方接触面传扭, 继续加接上部钻杆, 最后将两半重入锥安装到套管挂上, 即可打开月池盖下放整套钻具。

2.2.3 随钻扩孔器

跟管钻进关键技术之一为随钻扩孔。随钻扩孔器可满足多种钻探需求。例如, 采用随钻扩孔器将盐膏层孔径扩大, 可以抵消缩径位移带来的影响; 膨胀管护壁技术、套管钻进技术等各种新技术的实现也离不开随钻扩孔器, 特别是扩孔翼板可张敛的随钻扩孔器, 其孔径扩大率较高, 是国内外各大油

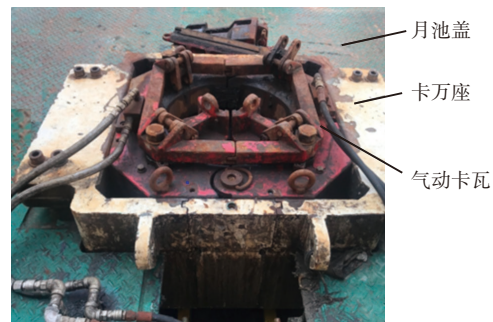


图12 原气动卡瓦安装位置

Fig.12 The previous installation position of pneumatic slip

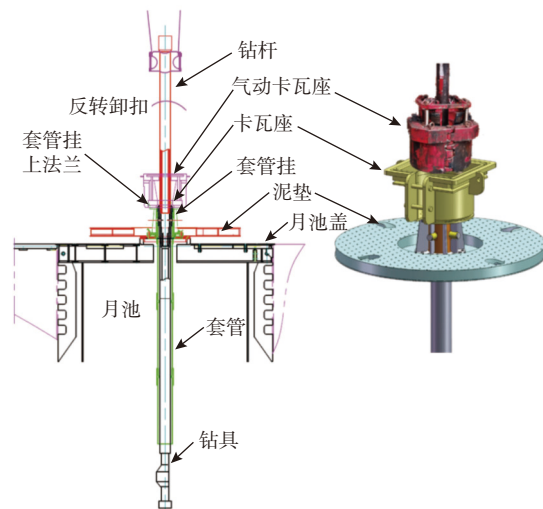


图13 改进气动卡瓦安装位置

Fig.13 The modified installation position of pneumatic slip

服公司重点研究的随钻扩孔器类型。表1列举了国外具有代表性的几种随钻扩孔器的结构特点, 扩孔刀翼的开合基本上通过3种方式驱动, 即投球、压差和射频识别, 其中压差和射频识别是刀翼控制的2个主要发展方向。

表1 代表性随钻扩孔器结构特点^[18-26]

Table 1 Structural features of reamer^[18-26]

扩孔器系列/型号	所属公司	刀翼类型	刀翼控制方式	刀翼移动方式
Rhino XS和XS2	Schlumberger	PDC	投球	滑移
XR TM	Halliburton	PDC	投球	连杆
GaugePro	BakerHughes	PDC	投球	滑移
RipTide	Weatherford	PDC	投球和射频	滑移
Anderreamer	NOV	PDC	压差或投球	滑移
Rhino XC	Schlumberger	PDC	压差	滑移
UR TM	Halliburton	PDC	压差	悬臂
Underreamer	Tesco	PDC	压差	悬臂
DrillingType Underreamer	HOC	牙轮	压差	悬臂
Gaugemaster Driller TM	Bakersfeild	牙轮	压差	悬臂

2.2.4 自研张敛式随钻扩孔器

(1) 整体结构组成

在掌握随钻扩孔器工作原理的基础上, 结合 IODP 应用经验, 确定使用液压压差控制悬臂式刀翼张敛的随钻扩孔器结构, 设计了适用于 $\Phi 244.5$ mm 套管跟管钻进的张敛式随钻扩孔器, 本体尺寸 $\Phi 216$ mm, 扩孔尺寸为 $\Phi 311$ mm。

张敛式随钻扩孔器安装在领眼钻头与螺杆马达之间, 其刀翼采用牙轮或 PDC, 具有张开限位和闭拢锁紧功能。结构如图 14 所示, 主要由上接头、主体、中心轴、限位块、弧座、凸块、扩孔刀翼下接

头、上侧喷孔和下侧喷孔组成。液压力作用在中心轴上, 中心轴上下面积差形成的压力差推动中心轴下移, 下移过程弹簧被压缩, 凸块将扩孔刀翼沿径向旋转推出, 直至与限位块接触。扩孔结束后停泵, 液压力逐渐降低, 弹簧携带中心轴和凸块复位, 凸块复位后与扩孔刀翼内部行程槽上端面接触, 将刀翼锁定在闭拢位置。上侧喷孔冲刷扩孔刀翼的行程槽防止钻渣堆积到行程槽内影响刀翼回收, 下侧喷孔冲刷扩孔刀翼的切削刃, 防止形成泥包从而影响扩孔效果和钻进效率。

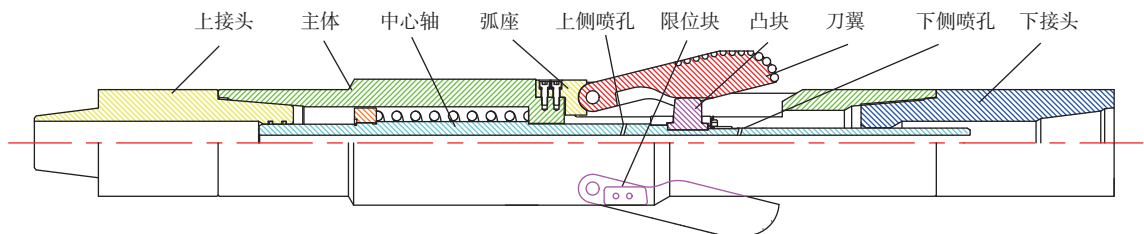


图 14 张敛式随钻扩孔器结构示意图

Fig.14 Structure of underreamer

(2) 刀翼结构

刀翼的张敛方式是随钻扩孔器结构设计的关键, 本随钻扩孔器刀翼采用铰接悬臂方式开合。刀翼结构分为外切削刃部分和内开合路径部分(图 15)。外切削刃选用 PDC 复合片, 可满足海底多样性沉积地层的扩孔钻进。切削刃分 3 段焊接 PDC, 3 段布齿可满足造台阶和正常扩孔钻进对孔壁的切削。圆周均布 3 个刀翼, 可进行圆周互补。内开合路径为设置在刀翼内侧的行程槽, 行程槽由上直段、中间过渡段和下直段组成。中心杆未受压时刀翼闭

拢, 凸块位于行程槽的上直段, 中心杆受液压力作用向下移动, 中心杆到达极限位置时, 凸块位于行程槽的下直段, 此时刀翼张开至最大尺寸。中间过渡段将上直段与下直段圆滑过渡, 此处为控制刀翼张开的关键路径, 需防止与凸块接触时卡死。刀翼侧面设置限位台, 张开后与布置在主体上的限位块接触, 限制扩孔最大外径; 凸块上移与闭拢锁定面接触, 对闭拢尺寸进行限制^[27]。

(3) 刀翼喷射孔布置

对张敛式随钻扩孔器刀翼进行有效冲刷既能保证扩孔直径, 又可提高切削效率。喷射孔圆周方向与刀翼相等数量均布, 轴向分为偏置式和后置式 2 种^[28]。偏置式喷射孔角度与钻进方向呈锐角, 径向上与刀翼中心呈偏心布置, 可保证扩孔刀翼张开最大时钻井液直接冲刷切削齿; 后置式喷射孔角度与钻进方向呈钝角, 位于扩孔刀翼下方, 钻井液自下而上冲刷切削齿。如图 16 所示, 偏置式布置钻井液分流角度与管内流体方向基本一致, 分流速度较大, 但喷出后流体与环空返浆方向相反; 后置式布置分流角度与管内流体方向相反, 分流速度减小, 但喷出后流体与环空返浆方向一致^[27]。本文随钻扩孔器选择偏置式布置, 通过对多种喷射角度和喷射直径的模拟分析, 优选了与轴向呈 70° 、孔径为 8 mm 的喷射孔。

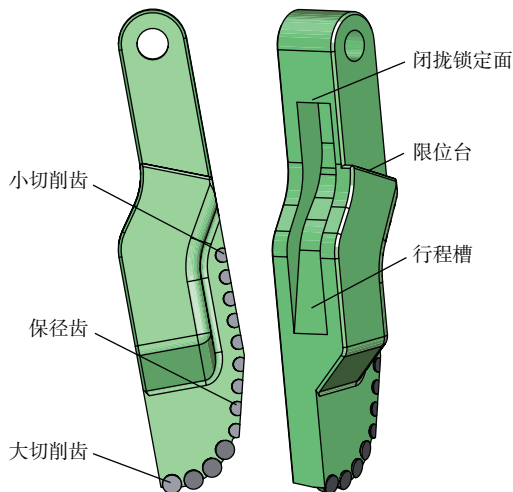


图 15 刀翼结构图

Fig.15 Blade structure

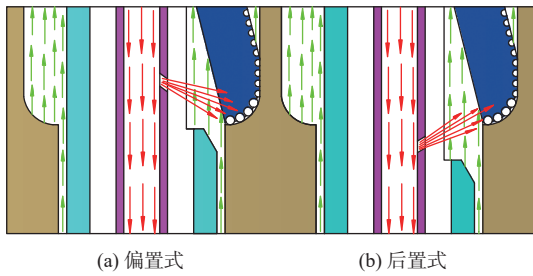


图 16 偏置式和后置式喷射液流方向示意图

Fig.16 Schematic diagram of jet flow direction in offset and postposition modes

3 跟管钻进工艺流程

(1) 钻具组合配长 套管柱长度由泥面至目的层深度决定,内钻具组合的长度必须与套管柱长度相匹配,匹配原则为螺杆马达下扶正器需在套管内,张敛式随钻扩孔器刀翼在套管鞋外,领眼钻头至泥垫长度小于海水深度。每次进行作业前均需根据跟管长度及海水深度进行内外钻具配长。

(2) 组装钻具 将套管柱与泥垫在井口组装,内钻具组合从套管柱中间穿过,送入工具将内钻具与套管挂锁定。

(3) 安装重入锥 重入锥和泥垫在甲板月池上部组装,本文设计的重入锥为两半形式,通过螺栓进行连接,IODP 上应用的其他重入锥有的在现场进行拼焊。

(4) 钻具整体下入 内钻具组合与套管柱下放至离泥面约 2 m 时,开泵,流量控制在 15~20 L/min,测悬重,慢速下放。

(5) 跟管钻进 钻头碰触海底,入泥 2 m 后,增大流量至 25~30 L/min,钻压不超过 20 kN 时,提高钻速,泵压不超过 1.5 倍正常立管压力。

(6) 解锁提钻 泥垫触底后,钻具上提 2 m,停泵,投球解锁,观察悬重有明显变化,将内钻具组合提出。

4 野外试验

本次试验的目的是进行跟管钻进下放重入锥及钻孔重入工艺全流程试验,检验工艺流程的可行性,并对钻具组合中的自研重入锥、送入工具、张敛式随钻扩孔器进行可行性和可靠性验证。浅海试验于 2020 年 12 月在南海的北部湾东方海域开展(图 17)。

4.1 试验参数

试验地点地质参数:试验地点选择北部湾东方

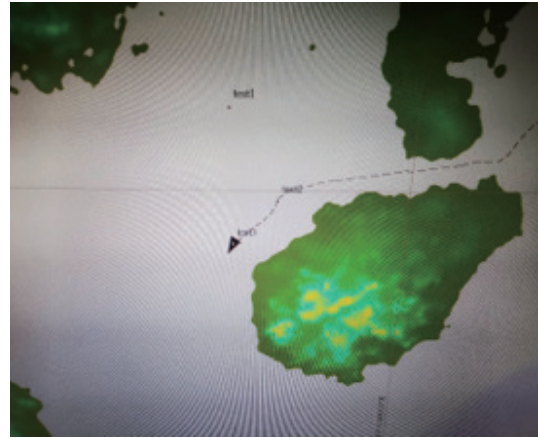


图 17 试验地点海域图

Fig.17 The sea area of test site

海域 test3 点位,该点位前期进行过地质勘测,其覆盖层深度 52.2 m,地层基本为泥砂混合,黏土较多,其次为细砂、粉砂,偶含粒径 30~80 mm 卵石或贝壳。试验用船舶采用“海洋地质十号”船,该船钻探系统见图 18,主要参数见表 2。试验钻具主要参数见表 3。

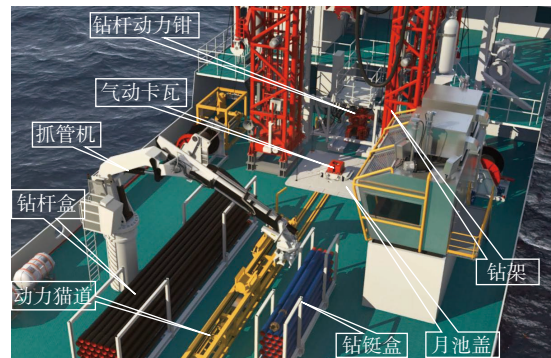


图 18 “海洋地质十号”船钻探系统布局

Fig.18 Drilling system layout onboard the “Marine Geology 10”

试验孔位及参数:① 2020HS-5 孔,水深 62.9 m,月池至泥面 65.4 m;② 2020HS-6 孔,水深 62.72 m,月池至泥面 65.22 m;③ 2020HS-7 孔,水深 62.58 m,月池至泥面 65.08 m。

4.2 试验过程

(1) 2020HS-5 孔跟管钻进下放重入锥第 1 次试验

套管柱组合:套管鞋+长套管 5 根+短套管 1 根+过渡套管 1 根=52.23 m。

内钻具组合:领眼钻头+张敛式随钻扩孔器+螺杆马达+变扣+钻铤 9 根+变扣接头+送入接头=54.55 m。

表 2 “海洋地质十号” 船钻探系统参数表

Table 2 Drilling system parameter on the "Marine Geology 10"

项目名称	参数
水深+钻深	≥600 m
最大地层钻深	400 m
钻柱中心通径	121 mm
井架有效高度(主甲板钻台面起算)	24 m
顶驱最大载荷	60 T
升沉补偿能力(有效补偿范围)	±1.5 m
提升方式	油缸举升
泥浆泵型号及台数	Gardner Denver Pump-160kW×2台
高压管汇	Φ114.3 mm(外径)×21 MPa
立管	Φ114.3 mm×17.12 mm(外径×壁厚)
泥浆池容量	约20 m ³ ×2
散料储存量	约25 T
输入电压(船体提供)	三相三线690 V±10%, 50 Hz±5%(800 kW) 三相三线380V±10%, 50Hz±5%(100kW)
气源压力	0.7~1.0 MPa

表 3 跟管钻进下放重入锥主要钻具参数

Table 3 Main drilling tool parameters of reentry cone and casing

项目名称	参数/mm	备注
重入锥漏斗大径	Φ2 500	自研
泥垫直径	Φ2 500	自研
套管规格	Φ244.5	常规
领眼钻头直径(主甲板钻台面起算)	Φ216	常规
张敛式随钻扩孔器扩孔尺寸	Φ216/Φ311	自研
螺杆马达(有效补偿范围)	Φ172	常规
钻杆规格	Φ127	常规

试验结果: 将套管柱组合和内钻具组合在甲板组装完毕后, 打开月池盖下放入海, 如图 19 所示。钻进至 39 m 处遇阻严重, 通过上下划眼、加大钻压和提高泵冲均无效果后, 将整体钻具上提, 泥垫提至月池盖后, 投球解锁, 压力憋至 8 MPa, 剪切销剪断, 继续提钻检查张敛式随钻扩孔器和领眼钻头, 二者均无磨损, 随钻扩孔刀翼能够顺利开合。

结果分析: 根据浅钻样岩芯记录, 36.89~40.19 m 的层段含砂量占 25%, 较其他层段含沙量增大 15%~20%, 影响钻进效率, 决定下一步试验减少跟管长度, 以较快的速度通过该层段。

(2) 2020HS-6 孔跟管钻进下放重入锥第 2 次试验

套管柱组合: 套管鞋+长套管 4 根+过渡套管 1 根=40.86 m。

内钻具组合: 领眼钻头+张敛式随钻扩孔器+螺



图 19 整体钻具下放

Fig.19 Rigging down the BHA (bottom-hole assembly)

杆马达+变扣+钻铤 4 根+钻杆 2 根+变扣接头+送入接头=43.48 m。

试验结果: 在钻深 39 m 处仍然遇阻, 加压 3 t, 反复短行程起下钻后钻穿, 最终套管下入深度 41.314 m, 泥垫接触泥面后悬重明显降低。打压至 8 MPa 泵压下降证明解锁成功, 上提钻杆, 发现悬重未下降, 说明内钻具组合与套管柱组合未分离, 经反复提下钻后悬重仍未下降, 遂将钻具组合整体提出至甲板面, 拆开后发现送入接头与套管挂之间挤入了大量细砂, 导致无法分离(图 20)。

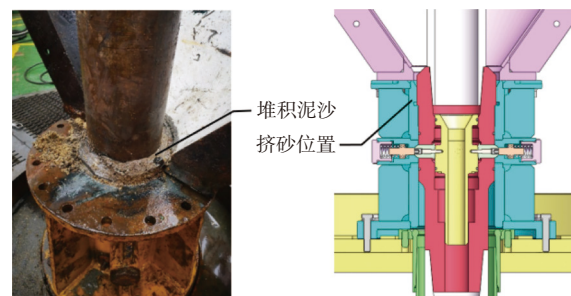


图 20 送入工具内挤入细砂

Fig.20 Sands entered the running tool

结果分析: 钻进过程随着泥浆上返将孔内泥砂携带出孔, 在钻孔周边形成由海水和返出泥砂组成的混合液体区, 随着重入锥接近泥面, 钻孔周边的混合液沿着重入锥漏斗外轮廓向周边向上流动, 由于泥砂等比重较大最终向下落至海底, 而部分则落到重入锥内, 加之海浪的升沉作用, 使部分细砂挤入接头与套管挂的接触面内, 细砂对送入接头和套管挂的接触面形成巨大的摩擦力, 导致二者不能分

离。36.89~40.19 m的层段含砂量较其他层段高15%~20%，为较好地验证跟管钻进工艺流程，决定避开该层段，在36.89 m以上再次进行试验。

(3) 2020HS-7孔跟管钻进下放重入锥第3次试验

套管柱组合：套管鞋+长套管2根+短套管1根+过渡套管1根=25.38 m。

内钻具组合：领眼钻头+张敛式随钻扩孔器+螺杆马达+变扣+钻铤2根+钻杆1根+变扣接头+送入接头=28.396 m。

试验结果：泥垫落到泥面后投球打压至8 MPa解锁，泵压降低，上提钻杆，悬重减轻2.5 t，信标显示泥垫下沉入泥1.3 m，上提内钻具组合，顺利完成跟管钻进下放重入锥。如图21所示，通过VIT可清楚看到重入锥。通过VIT引导及钻探船DP配合，多次完成钻孔重入。



图21 海底钻孔重入

Fig.21 Subsea borehole reentry

4.3 试验结论

通过3次跟管钻进下放重入锥试验，得出以下结论：① 制定的跟管钻进工艺流程具有可行性；② 自研重入锥采用螺栓连接的方式便捷可靠；③ 自研张敛式随钻扩孔器能够实现可靠扩孔，可满足黏土及含砂地层的扩孔，设计的刀翼喷射孔尺寸和角度可有效清洁刀翼；④ 自研送入工具的锁定和解锁功能可靠，但密封结构存在隐患，针对含砂量大的层段易发生砂体挤入，造成解锁后无法提钻，需要对其进行优化改进。

5 结语

钻孔重入技术是开展大洋钻探的必备技术，采用跟管钻进工艺下放重入锥可满足多航次钻孔的重入需求，是深孔大洋钻探不可或缺的海底装置。我国在大洋钻孔重入和跟管钻进技术方面的研究刚刚起步，还处于工艺摸索和器具研究试验阶段，

本次进行的浅海试验，初步验证了工艺流程和自研器具的可行性，并发现了器具存在的缺陷，为下一阶段器具的优化改进指明了方向，为进一步开展深海复杂地层跟管钻进技术研究打下了基础。

参考文献：

- [1] 翦知潜. 进军深海科学前沿：我国参与大洋钻探的进展[J]. 科学通报, 2018, 63(36): 3877-7882.
- [2] 孙珍, 林间, 汪品先, 等. 国际大洋发现计划IODP367/368/368X航次推动南海国际化海洋科考成果[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(6): 18-29.
- [3] 叶建良, 张伟, 谢文卫. 我国实施大洋钻探工程的初步设想[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(2): 1-8.
- [4] 熊亮, 谢文卫, 张伟, 等. 跟管钻进下套管技术在大洋钻探中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(7): 16-22, 35.
- [5] 熊亮, 谢文卫, 于彦江, 等. 大洋钻探随钻扩孔下套管关键技术[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(3): 74-80.
- [6] HERE S A G. JOIDES resolution tour 1985—2005[EB/OL]. [2022-04-26]. <https://iodp.tamu.edu/publicinfo/drillship.html>.
- [7] HUEY D P. IODP drilling and coring technology, past and present[R/OL]. [2022-04-26]. <http://www.mendeley.com/research/iodp-drilling-coring-technology-past-present/>.
- [8] Behind the Science – Adam’s Chronicle; searching for the reentry cone[EB/OL]//JOIDES Resolution.[2022-04-27]. <https://joidesresolution.org/behind-the-science-adams-chronicle-searching-for-the-reentry-cone/>.
- [9] Exp352-039[EB/OL]. [2022-04-27]. https://iodp.tamu.edu/science-ops/gallery/exp352/week2/pages/exp352_039.htm.
- [10] Leg 197 Weeks 4-5[EB/OL]. [2022-04-27]. <http://www.odp.tamu.edu/public/life/197/week4.html>.
- [11] IODP-USIO: Tools & Laboratories: Coring Tools: Vibration Isolated Television[EB/OL]. [2022-04-26]. <http://iodp.tamu.edu/tools/VIT.html>.
- [12] 李旭冉. 水下井口头套管挂和密封下放工具的研究与设计[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [13] 李旭冉, 肖文生, 杨祥祥. 海洋深水钻井井口头系统下放工具研究[J]. 石油机械, 2013, 41(5): 45-49.
- [14] 刘小卫, 王定亚, 陈雪娟, 等. 套管泥线悬挂系统技术分析与发展建议[J]. 石油机械, 2012, 40(8): 72-75.
- [15] 刘健, 张凯, 田书斌, 等. 水下套管挂和密封总成下放工具设计[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(9): 25-29.
- [16] NICO. Dual casing running for deep water spud in[EB/OL]. [2022-04-27]. <https://www.slideserve.com/nico/dual-casing-running-for-deep-water-spud-in>.
- [17] Marine drilling [EB/OL]. [2022-04-27]. <https://oilfieldteam.com/en/a/learning/Marine-Drilling>.
- [18] Schlumberger. Rhino XS2 11625 Series Full-Cycle Expandable Reamer[EB/OL]. [2022-04-27]. <https://www.slb.com/-/media/files/smith/product-sheets/rhino-xs2-11625-ps.ashx>
- [19] Halliburton. XR™ Reamer Hole Enlargement Tool[EB/OL]. [2022-04-27]. <https://www.halliburton.com/en/products/xr-rea>

- mer-hole-enlargement-tool.
- [20] Baker Hughes. GaugePro echo command digital reamer [EB/OL]. [2022-04-27]. <https://www.bakerhughes.com/drilling/directional-drilling-services/hole-enlargement-technology/gaugepro-echo-command-digital-reamer>.
- [21] Baker Hughes. GaugePro Echo enlarged slim hole to set liner and save well[EB/OL]. [2022-04-27]. <https://www.bakerhughes.com/sites/bakerhughes/files/2020-10/Gaugepro-echo-reamer-eliminated-rathole-trip-saved-36hrs-2m-gom-cs.pdf>.
- [22] Weatherford International. Enlarges borehole, saves 14+ hours of deepwater rig time valued at \$150, 000[EB/OL]. [2022-04-27]. [https://www.weatherford.com/real-results/drilling/riptide-rfid-underreamer-enlarges-borehole,-saves-14-hours-of-deepwater-rig-time-valued-at-\\$150,00/](https://www.weatherford.com/real-results/drilling/riptide-rfid-underreamer-enlarges-borehole,-saves-14-hours-of-deepwater-rig-time-valued-at-$150,00/).
- [23] NOV. Anderreamer 3D underreamer[EB/OL]. [2022-04-27]. <https://www.nov.com/products/anderreamer-3d-underreamer>.
- [24] Schlumberger. Rhino XC Hydraulically Actuated Reamer [EB/OL]. [2022-04-27]. <https://www.slb.com/drilling/bottom-hole-assemblies/reamers-and-stabilizers/rhino-integrated-bore-hole-enlargement-system/rhino-xc-on-demand-hydraulically-expandable-reamer>.
- [25] Schlumberger. Rhino XC On-Demand Hydraulically Expandable Reamer[EB/OL]. [2022-04-26]. <https://www.slb.com/drilling/bottomhole-assemblies/reamers-and-stabilizers/rhino-integrated-borehole-enlargement-system/rhino-xc-on-demand-hydraulically-expandable-reamer>.
- [26] Hole Opener Corporation. Drill Type Underreamer - DTU [EB/OL]. [2022-04-27]. <https://holeopener.com/product/drilling-type-underreamer-dtu/>.
- [27] 崔淑英, 宋刚, 田英英, 等. 扩张式随钻扩孔器扩孔机构流场分析与优化[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 25-33.
- [28] 赵旭东, 王定亚, 赵磊, 等. 基于CFD的随钻扩眼工具冲洗水眼设计[J]. 石油机械, 2012, 40(9): 1-4.

Research and application of reentry cone and drilling-in casing

SONG Gang^{1,2}, CUI Shuying^{1,2*}, XIE Wenwei^{1,2,3}, NIU Qinglei^{1,2}, ZHAO Ming², HAN Zelong²

(1 Southern Marine Science and Engineering GuangDong Laboratory(Guangdong), Guangzhou 511458, China; 2 The Institute of Exploration Technology, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China; 3 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 517000, China)

Abstract: It is necessary to solve the problems of mud surface collapse and drilling tool reentry in ocean drilling operation. Reentry cone is a special device for ocean drilling reentry, which can be deployed in two ways: Free-Fall Funnel (FFF) and Reentry Cone and Casing (RECC). The FFF is a temporary reentry wellhead designed to support reentry in a short term, while the RECC can be used as a permanent subsea device to support drilling reentry in the current and future voyaging. In this paper, we introduce the principle, key tools, and process of RECC, and summarize our first shallow sea test, in which the feasibility of simultaneous deployment process of reentry cone and casing was verified, and the functionality of our newly-developed running tool and underreamer-while-drilling was tested. The shortcomings of the running tool in sealing structure were found. This study lays a theoretical and practical foundation for further research on drilling reentry and drilling-in casing technology in complex deep-sea scenarios.

Key words: ocean drilling; drilling-in casing; reentry cone; running tool; underreamer while drilling