

活塞式双模超低损岩心取样钻具的研制与应用

孔卫开, 蒋清燕*, 段毅, 钟伦法, 林俊宇, 黄杨,
何坤鹏, 成周, 谭靖, 李佰璋, 贾万龙
(四川华锋钻探工程有限责任公司, 四川成都 610000)

摘要:针对ICDP湖泊钻探过程中,常钻遇流塑态湖相软泥(含水率 $>80\%$,贯入阻力 $<10\text{ kPa}$),小口径岩心钻探常规取样方法和钻进工艺对岩心质量扰动大、采取率低的技术难题,创新研制了 $\Phi 122.60\text{ mm}$ 小口径活塞式双模取样钻具,通过三管单动贯入式设计 with 液动控制技术应用,第二次青藏高原科考西藏纳木错湖泊钻探项目于水深101.70 m以下成功获取湖相软泥岩样共计58回次,累计长度127.40 m,扰动系数 $\eta < 0.15$ 、采取率 $>80\%$,实现低损取心的重大突破,其中CL-1G钻孔终孔深度510.20 m,刷新国内高海拔深水湖泊钻深纪录。该技术装置为重建青藏高原冰期-间冰期气候演变序列提供了关键的钻探岩心样本,对古环境重建与未来气候预测提供了宝贵资料。钻具的成功应用,显著提升湖泊沉积物尤其是超软弱塑性地层的取心质量与钻深极限,为全球深水湖泊古环境研究提供了可靠的技术装备支撑。

关键词:ICDP;青藏高原科考;湖泊钻探;湖相软泥;活塞式双模取样钻具;低损取心

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)S1-0215-05

Development and application of a piston-type dual-mode ultra-low disturbance core sampling drilling tool

KONG Weikai, JIANG Qingyan*, DUAN Yi, ZHONG Lunfa, LIN Junyu, HUANG Yang,
HE Kunpeng, CHENG Zhou, TAN Jing, LI Baizhang, JIA Wanlong
(Sichuan Huafeng Drilling Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000, China)

Abstract: To address the technical challenges encountered during ICDP lake drilling, specifically, frequent encounters with fluid-plastic lacustrine silt (water content $>80\%$, penetration resistance $<10\text{ kPa}$) where conventional coring methods and drilling techniques for small-diameter cores result in high core disturbance and low recovery rates, a $\Phi 122.60\text{ mm}$ small-diameter piston-type dual-mode sampler was innovatively developed. Utilizing a triple-tube, non-rotating penetration design and hydrostatic control technology, this system successfully recovered lacustrine silt core samples over 58 runs totaling 127.40m in length from the depths of below 101.70m water during the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition at Nam Co Lake, Tibet. The cores exhibited a disturbance coefficient η of less than 0.15 and a recovery rate of more than 80%, representing a major breakthrough in low-disturbance coring. The CL-1G borehole reached a final depth of 510.20m, setting a new domestic record for drilling depth in high-altitude deep-water lakes. This technology provides critical drill core samples for reconstructing the glacial-interglacial climate evolution sequence of the Tibetan Plateau, offering valuable data for paleoenvironmental reconstruction and future climate prediction. The successful application of this sampler significantly enhances core quality and achievable drilling depth limits in lake sediments, particularly in ultra-soft plastic formations, providing reliable technical equipment support for global paleoenvironmental

收稿日期:2025-09-09; 修回日期:2025-09-20 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.032

第一作者:孔卫开,男,汉族,1975年生,高级工程师,勘查技术与工程专业,硕士,主要从事小口径地质岩心钻探工艺技术研究工作,四川省成都市青羊区广富路218号青羊工业园总部基地G区8幢C座,kwk163@163.com。

通信作者:蒋清燕,男,汉族,1987年生,高级工程师,钻探技术专业,主要从事钻探项目管理与小口径地质岩心钻探工艺技术研究工作,四川省成都市青羊区广富路218号青羊工业园总部基地G区8幢C座,664947469@qq.com。

引用格式:孔卫开,蒋清燕,段毅,等.活塞式双模超低损岩心取样钻具的研制与应用[J].钻探工程,2025,52(S1):215-219.

KONG Weikai, JIANG Qingyan, DUAN Yi, et al. Development and application of a piston-type dual-mode ultra-low disturbance core sampling drilling tool[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1):215-219.

research in deep-water lakes.

Key words: ICDP; scientific expedition to the Qinghai-Tibet Plateau; lake drilling; lacustrine silt; piston-type dual-mode sampler; low-disturbance coring

0 引言

为研究青藏高原腹地地区百万年时间尺度的连续陆地沉积序列,为全球变化及未来气候变化科学进行分析和预测^[1],国际大陆科学钻探计划(ICDP)分别于2005年在青海湖、2020年在纳木错湖开展了两次国际环境科学钻探。青海湖科学钻探累计完成547.85 m进尺,获取岩心323.25 m,岩心采取率为59.00%,基于流塑态湖相软泥段岩心采取率低,对环境科学研究价值十分有限。纳木错湖科学钻探^[2],设计钻深300 m,实际钻深153.44 m,获取岩心144.79 m,因钻探平台位移动问题,致该钻孔施工最终未能达到设计孔深。从国际大陆科学钻探计划(ICDP)在我国高原湖泊内已实施的两次湖泊钻探任务中已获取岩样的研究分析看,势必还需要在西藏纳木错湖深度开展第二次青藏高原科考,通过获取更深更多的高质低损湖底岩样,进一步提升研究成果。我公司承接第二次青藏高原科考钻探任务后,在实施前多次开展流塑态湖相软泥取心技术研究,且在湖泊钻探实施过程中取得显著成效。

1 流塑态湖相软泥钻探取心难点

1.1 流塑态湖相软泥物理力学特性

流塑态湖相软泥含水量极高($>80\%$),接近极限,黏聚力低,孔隙比大,抗剪强度低,似高黏度的流体而非固体,在静止状态下表现出一定的表观强度^[3],钻探过程中的钻具接触、冲洗液冲刷、钻机振动等轻微的外力扰动足以破坏其结构,高触变性使其发生流动或变形,原始状态难以保持。同时富含有机质和胶体颗粒的流塑态湖相软泥黏性高,容易黏附钻头水口、钻具内壁、卡簧和环状间隙,阻碍心样进入内管或在提钻过程中造成心样与内管壁黏结、拉断甚至被刮落。

1.2 钻探中的扰动破坏作用

小口径湖泊钻探施工工艺中,钻头在切入和旋转时会对流塑态湖相软泥产生剪切和挤压,造成心样前端或侧壁的软泥被刮削和搅动;绳索取心钻进工艺施工中岩样进入内管过程受垂压与通水间隙影响,对软泥产生剧烈的剪切破坏;为冷却钻头、稳

定孔壁、携带岩粉所使用的冲洗液,其流速和液柱压力易冲刷掉取心管前端的软泥心样^[4],同时常规卡簧依靠心样与内管壁的摩擦力实现卡紧,但对于流塑态软泥,摩擦力极小,卡簧无法有效卡住心样,提钻取心时心样极易从内管底部滑落,若提升速度过快,会在取心管底端产生负压,形成抽吸效应,将松软的心样吸落。

1.3 心样自取心管到地表的保存难度

湖泊深部软泥承受着一定围压和孔隙水压力,在钻探提钻取心过程中,压力迅速释放,溶解于孔隙水中的溶解性气体析出膨胀,导致心样内部结构破坏、崩解、膨胀变形^[5],对于长柱状软泥心样,自身重量在无侧限状态下使下部心样发生挤压变形或压溃。长时间暴露在空气中后,心样表面水分蒸发,会导致心样收缩和开裂。

1.4 高原湖泊环境带来的特殊难度

高海拔低气压加速提钻过程中心样内溶解气体的膨胀析出,加剧心样破坏作用,低温气候影响冲洗液的性能、设备的运行效率以及流塑态湖相软泥本身的流变特性,加上钻探设备运输、就位、维护困难,对人员操作熟练度和设备可靠性要求更高,任何操作失误或设备故障都可能直接导致取心失败。湖水深度直接影响钻杆长度、泥浆循环压力控制,同时软弱的湖床无法提供良好的锚固^[6],导致钻机不稳,晃动会传递到孔底钻具,加剧扰动。

2 活塞式双模取样钻具研制

2.1 钻具设计思路

针对钻探施工中岩样扰动率与采取率低的双重瓶颈,通过工艺筛选与技术融合提出创新路径:(1)工艺筛选首先排除回转钻进和振动工艺技术,避免剪切作用对岩样的扰动损坏,其次排除冲洗液全通道正循环工艺,保护岩样不受水力和水压的冲刷或流失影响。(2)通过技术融合,利用冲洗液压力精准调控推送+活塞行程(低扰动贯入)+超前取心+双模钻头+透明独立护样方式设计活塞式双模取样钻具(见图1),研发出适用于高海拔深水湖泊钻遇流塑态湖相软泥钻探的工艺技术新路径。



图 1 活塞式双模取样钻具

2.2 钻具基本结构

以外管钻具+内置推进管+岩心护样管设计三管单动双模钻具,外管钻具为冲洗液定向供压渠道,连接独立的外管连续跟进钻头,内置推进管搭配活塞负压式封闭岩心护样管,联动搭配贯入式双模钻头。外管钻具内部凹嵌内置推进管垂直作用力的防反向位移阀。钻具总长度 4.50 m,质量 360 kg,成孔直径 122.60 mm,岩心直径 56.50 mm,详见表 1。

2.3 钻具控制作用原理

该钻具通过泥浆泵以无固相冲洗液为动力介质^[7],将内置推进管送入外管中的内置卡槽固定,根据电磁流量计实现压力精度控制,驱动内置推进管与钻头精准贯入地层,使用高频压力传感器(精度±0.02 MPa)控制贯入速度,当完成回次进尺后,同理泵入钢绳式内置推进管捞心装置,利用孔底负压,收缩封闭岩心护样管底端,完成贯入取样全流程,见图 2。

2.4 钻具主要技术特点

本研究所提出的活塞式双模钻探取样钻具在传统技术基础上进行了多项关键创新设计,其核心目标是在湖相流塑性软泥地层中最大限度的钻取

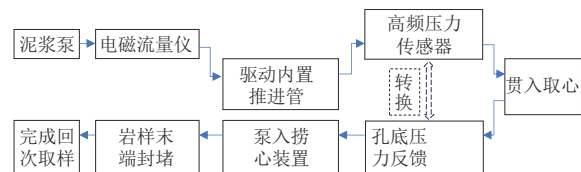


图 2 活塞式双模取样钻具贯入取心流程

高质量、超低损的原状地层样本。具有如下主要技术特点。

2.4.1 高效动态密封与负压取心

钻具核心在于其独特的内置推进活塞机构,活塞与岩心护样管内壁精密配合,形成初始密封,当钻具达到预定取样深度时,通过特定的液压控制触发机构,驱动捞心装置释放锁定机构,使岩心护样管快速向上回缩。活塞的快速上移使岩心护样管收回外管钻具内部,并在外管钻头底部形成瞬时负压区,负压效应降低对下方岩样的抽吸扰动,有效防止下部岩样在未进入岩心护样管时发生窜层。在设计上以单向阀控制钻具内部的流体补偿^[8],允许冲洗液在活塞回缩时补充进入活塞下部空间,避免形成较大的真空阻力或对活塞运动和孔壁稳定性造成阻碍和影响。

2.4.2 关键精密件的优化和创新

活塞与岩心护样管内壁采用低摩擦、高耐磨密封聚合物复合材料^[9],确保活塞高效运动过程中的可靠密封,降低泄漏和运动阻力。岩心护样管前端采用锥形薄壁、锋利刃口和利于低阻切入地层的几何形状,与外管联动形成防堵塞机制,液压蓄能回缩机构提供足够稳定的初始加速度,确保活塞快速回缩,形成有效负压。岩心护样管采用 Pasmot 特种透明材料^[10],具有耐高压、耐高温、强度高、韧度高、透明度高的特点,内壁光滑特性能减少岩样与管壁的摩擦和黏附,在回次取样完成后,两端采用螺纹式可膨胀橡胶盖帽,便于岩样的长期保存和 X-CT 检测研究。

2.4.3 可更换双模钻头结构

该结构内置岩心护样管,通过冲洗液控制实现

表 1 活塞式双模取样钻具主体件基本参数特性

钻具主体件	直径/mm	参 数 特 性	功 能 与 作 用
外管钻具	122.00	钛合金 TC4, 钻具壁厚 10 mm	耐压屏障, 承载<12 MPa 静水压力
内置推进管	89.00	内置液动推进装置, 行程 3100 mm	搭载贯入式与切削式双模钻头
岩心护样管	60.00	透明 PTFE 干膜润滑涂层+端头螺纹密封	岩样可视化诊断 CT

钻进模式切换,在湖相软泥等软弱地层可于旋转剪切^[11]与液动压入2种模式间灵活转换,也可针对不同钻进工艺需要对不同类型的钻头实施交叉搭配,同步钻进,包括复合片+复合片钻头、孕镶+表镶钻头、孕镶+全面钻头等(见图3)。在液动压入模式中钻头无旋转剪切作用,依靠冲洗液提供的轴向压力垂直贯入地层取心^[12],单回次取心深度可达3.10 m。该模式转换优势在于孔底实现传统回转钻进与液动压入式取心工艺的无缝切换,提升钻头对不同地层条件的适应性。



图3 配置复合片类双模钻头实物

3 纳木错湖泊钻探现场应用

3.1 纳木错湖泊钻探项目

西藏纳木错湖位于青藏高原腹地,湖水面海拔高度4718 m,水深度>90 m,东西长约70 km,南北宽约30 km,是世界海拔最高的大型湖泊。纳木错湖湖泊钻探任务是国际大陆科学钻探计划(ICDP)在中国实施的第二次青藏科考任务中获取湖底岩样品的关键环节之一,计划实施钻孔6个,累计孔深设计工作量≥970 m,最深钻孔设计深度>300 m(不含水深)。钻孔质量要求:终孔直径≥122 mm,岩心直径>56 mm,全孔岩心采取率>65%,钻孔弯曲度<2°/100 m,在冲洗液方面禁止使用有毒有害化学品材料。

该项目主要钻探设备配置:Boart Longyear LF230型液压钻机1台;康明斯发电机组1台;250型泥浆泵1台;封闭式防冲洗液外溢装置2台(自主

设计);170 m²箱式水上钻探平台1个(自主设计);平台锚式固定装置4套(自主设计)。钻探施工工艺:以绳索取心工艺为主,钻具组合:Ø122 mm活塞双模钻头+Ø89 mm液动推进管+Ø60 mm护样管+Ø110 mm钻杆。

本次在CL-1E、CL-1D、CL-1G钻孔开展现场技术应用,在高含水量湖相软泥沉积岩^[13]中面对取心难的独特挑战,创新性应用活塞式双模取样钻具。自2024年6月6日钻探平台进入湖面预定位置开始,历时42 d,完成钻探总进尺1413.37 m,取心段1181.99 m,获取岩心总长951.12 m,全孔平均岩心采取率85.72%,其中CL-1G钻孔最终钻深为510.20 m,创造国内高海拔深水湖泊钻探最新纪录。

3.2 活塞式双模取样钻具应用效果

3.2.1 超软弱地层取心性能突破

在流塑态湖相软泥层(0~43.50 m)施工中,采用液动贯入模式完成14个回次取心,累计获取岩心长度37.33 m,平均采取率达80.47%(最高单回次92.01%),较传统工艺提升1倍以上;扰动系数 η 实测范围0.09~0.14(均值0.11),远低于临界阈值0.15。X-CT扫描显示岩心层理连续完整,未出现气孔膨胀或剪切错动现象,具有研究价值,见图4。

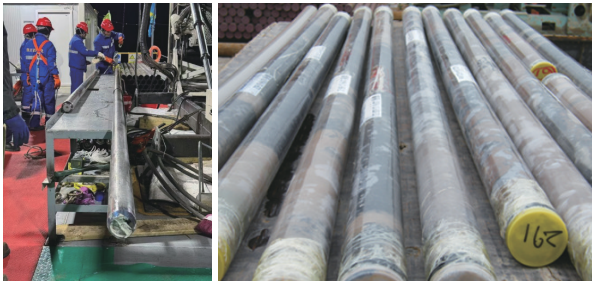


图4 钻探平台现场岩心取样

3.2.2 双模钻头高效切换机制

针对下部粉砂质黏土^[14]夹层(318.50~367.80 m),钻具切换至回转剪切模式,钻速提升至1.82 m/h,岩心直径保持56.50±0.3 mm,验证了“贯入-回转”双模钻头协同适应性,钻孔关键层位取心数据见表2。

表2 CL-1G钻孔关键层位取心数据

地层深度/m	岩 性	工作模式	回次/进尺/m	采取率/%	扰动系数
0~43.50	流塑态软泥	液动贯入	14/37.33	80.47	0.09~0.14
318.50~367.80	粉砂质黏土	回转剪切	9/41.20	89.15	0.08~0.13
502.10~510.20	钙质胶结砂层	回转剪切	3/8.10	93.83	0.08~0.13

3.2.3 护样管核心优势验证

PTFE涂层透明护样管实现:零接触取样,软泥与岩样管壁摩擦阻力下降76%(实测 ≤ 0.8 kPa);原位保压^[15]效果显著,提钻后8 h内岩心收缩率 $< 1.2\%$;无损检测兼容性优,98%岩样可直接进行X-CT扫描与微区化学分析,避免二次转移扰动。

3.2.4 深水钻探作业稳定性

在101.70 m水深处,钻具静水压力承载能力达11.5 MPa,负压控制误差 ± 0.018 MPa,孔斜控制在 $0.8^\circ/100$ m内,有效保障510.20 m深孔轨迹精度。

4 结论

本研究针对高海拔深水湖泊流塑态软泥取心难题,成功研发活塞式双模取样钻具并实现三大突破:

(1)首创“三管单动+液控负压”架构,通过外管钻具(抗压12 MPa)、内置推进管(行程3.10 m)与PTFE护样管($\varnothing 56.50$ mm)协同作用,在西藏纳木错湖101.70 m水深下实现 $\eta < 0.15$ 的超低扰动取心,流塑软泥段平均采取率提升至80.47%,攻克了含水率 $> 80\%$ 地层的原位取样技术瓶颈。

(2)双模钻头动态切换机制突破传统钻探工艺局限,液动贯入模式(取心速度0.46 m/min)与回转剪切模式(钻速1.82 m/h)的无缝转换,显著提升复杂地层的适应性,支撑CL-1G孔刷新国内高海拔深水湖钻深纪录(510.20 m)。

(3)透明护样管-X-CT原位诊断技术链实现“取样-护样-检测”全流程微扰动,岩心收缩率降至 $< 1.2\%$,层理完整度98%,为青藏高原冰期-间冰期气候序列重建提供厘米级分辨率的沉积证据。

该技术显著提升湖泊古环境研究的岩心质量

基准,推动湖泊钻探装备向“低扰动、深穿透”方向发展,对全球深水湖泊科学钻探具有示范价值。

参考文献:

- [1] 赵洪波,梁涛,何远信. ICDP湖泊科学钻探进展[J]. 地质科技通报, 2020, 39(2): 204-214.
- [2] 王君波. 纳木错百米岩芯:青藏高原古气候变化的新证据[J]. 科学通报, 2021, 73(3): 17-22.
- [3] 吴隆杰,杨风霞. 冲洗液处理剂胶体化学原理[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1992: 23-25.
- [4] 黄杨. 川藏铁路DZ-深02-1钻孔高密度冲洗液的研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(11): 5-10.
- [5] 鄢泰宁. 岩土钻掘工程学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2016: 61-62.
- [6] 孙友宏,郭威,王传留. 极地科学钻探装备技术现状与发展趋势[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(1): 1-8.
- [7] 刘光鼎,郝天珧. 中国大陆科学钻探工程进展与成果[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1839-1844.
- [8] 陈礼仪,黄润秋. 地质钻探学[M]. 北京:地质出版社, 2010.
- [9] Silva J B, Hollister C D. Mechanical properties of deep-sea sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1974, 79 (20): 2969-2977.
- [10] Driscoll N W. Piston corer design and operation [R]. Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report, 1986.
- [11] 王建,王苏民. 湖泊沉积与环境演变[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [12] 青海省地质调查院. 青藏高原北部中新统五道梁群湖相沉积碳氧同位素变化及古气候旋回[J]. 中国地质, 2009, 36(5): 1067-1076.
- [13] 何俊,秦川,王宏伟. 水泥-矿渣-粉煤灰固化淤泥的水分转化规律及其固化机理研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1213-1221.
- [14] 殷宗泽,朱俊高. 岩土材料流变特性研究进展[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 1-10.
- [15] 一种用于深水湖泊取心钻探的系统装置: CN202011251304.5 [P]. 2021-01-24.

(编辑 王文)