基于电磁锁紧原理的蛟龙号钻头更换装置设计

任玉刚[1,2] 张晓宇[2*] 李 超[1] 史先鹏[1] 丁忠军[1]
1.国家深海基地管理中心,青岛,266237
2.山东科技大学海洋科学与工程学院,青岛,266590

摘要:为解决潜水器每次下潜仅能单根取芯、钻头更换困难、传统换头机构不适配等问题,提出基于电磁原理和力平衡理论的钻头更换装置设计方法,创新设计电磁锁紧钻头更换机构,通过虚拟样机快速完成机械构型,经ANSYS仿真优化制动销轴等关键件,缩短研制周期。按7000 m级工作目标完成工程样机研制与深海压力试验,2025年3月参航蛟龙号专项设备海试航次,在南海2000 m级深海完成海试验证,实测电磁锁紧力150 N、定位精度±0.2 mm、单次换头时间t_1≤5 min,为深潜装备精细化、高价值取芯提供可靠技术支撑。

关键词:蛟龙号;岩芯取样;钻头更换机构;电磁锁紧
中图分类号:P751;TH122
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.030 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Design of the Jiaolong Drill Bit Replacement Device Based on Electromagnetic Locking Principle

REN Yugang[1,2] ZHANG Xiaoyu[2*] LI Chao[1] SHI Xianpeng[1] DING Zhongjun[1]
1.National Deep Sea Base Management Center, Qingdao, Shandong, 266237
2.College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong, 266590

Abstract: To address limitations such as single-core sampling per dive, difficulty in drill bit replacement, and incompatibility of conventional head-changing mechanisms, a design methodology for drill bit replacement devices was proposed based on electromagnetic principles and force equilibrium theory. An innovative electromagnetic locking drill bit replacement mechanism was designed, and the mechanical configuration was rapidly completed through virtual prototyping. Key components, such as the brake pin shaft, were optimized via ANSYS simulation, which shortened the development cycle. According to the 7000 m-class working target, engineering prototypes were developed and subjected to deep-sea pressure testing. In March 2025, the device was deployed in the Jiaolong specialized equipment sea trial voyage, and sea trial validation was completed at 2000 m-class depths in the South China Sea. The measured electromagnetic locking force was 150 N, with a positioning accuracy of ±0.2 mm and a single head replacement time of ≤ 5 min. This provides reliable technical support for precise, high-value coring in deep-diving equipment.

Key words: Jiaolong submersible; core sampling; drill bit replacement mechanism; electromagnetic locking

0 引言

深海蕴含着丰富的矿产、油气和生物资源,是支撑国家持续发展的战略性新领域。深潜器精细高效钻探是揭示地球演变过程、资源开发的重要手段,肩负深海安全保障战略使命[1-2]。在中国大洋科考任务需求牵引下,依托国家重点研发计划项目,已开展了蛟龙号载人潜水器岩心取样技术攻关,并初步构建形成了蛟龙号岩心取样成套作业工具,然而,受载人潜水器空间载重的限制,现有钻头更换技术操作精度欠佳、设备通用性差、结构体积庞大,存在一次下潜仅能完成单次取芯、钻头更换困难、传统换头机构无法适配等问题,制约了深海精细化勘探作业效率[3-4]。

当前,深海钻头更换技术处于发展阶段。美国国民油井华高(NOV)研发了移动自更换牙轮钻头,在深海油气开发中采用先进的智能传感技术监测钻头状态,精准地把握更换时机,但整体可靠性和稳定性仍有待提高。欧洲国家着重研发高精度、高可靠性的换钻机械臂,然而受水下视觉衰减、通信延迟及机械臂定位精度不足(误差大于5 mm)等因素制约,钻头安装松动、拆卸卡顿等问题依旧频繁出现[5-6]。国内也在积极推进深海钻

收稿日期:2025-08-28
基金项目:国家重点研发计划(2022YFC2805200);泰山学者工程(tsqn202408291);国家自然科学基金(52671420,62273165)

头更换技术研究。中国地质调查局北京探矿工程研究所研发的深海钻探用可抛弃式取心钻头及其配合工具的组合结构，能利用钻井液压力和活塞配合实现快速脱离，减少起钻次数，但在通用性和精细化操作方面还有进步空间。

此外，国内一些研究机构针对传统多钻头库液压式钻机进行改良，不过其设备兼容性欠佳、液压系统体积质量大（单套大于80 kg），在适配载人潜水器作业空间时依旧问题突出。当前深海钻头更换主要有传统转盘式更换和机械手操作更换。机械手更换受水下复杂环境影响，稳定性差；传统多钻头库液压式钻机虽有自动换钻功能，但其专用化设计和较大的体积质量难以契合载人潜水器的严苛作业要求。同时，传统机械锁紧方式在深海腐蚀环境下容易卡滞失效，增加作业风险[7-10]。

针对上述问题，为提高蛟龙号载人潜水器深海岩心取样作业效率，本文提出了一种基于电磁原理和力平衡理论的钻头更换装置设计方法，创新性设计了电磁锁紧钻头更换机构。通过设计阶梯圆筒限位结构与制动销齿轮啮合锁紧技术，解决深海高压环境下钻头组件的轴向与径向精准定位难题；集成电动升降装置、弹簧卡紧机构及传感器监测系统，实现钻头从夹持、对接、锁紧到拆卸的全流程控制。配套钻机采用螺纹连接的可拆卸钻头组件，结合多功能机械手协同作业，兼具小型化（整体尺寸不大于400 mm×300 mm×500 mm）、轻量化（总质量小于30 kg）及高通用性（兼容多类型钻头）优势[11-12]。

1　方案设计与钻头更换原理

深海载人潜水器电磁锁紧钻头更换装置是面向7000 m级深海复杂地形勘探需求，针对蛟龙号载人潜水器作业空间狭小（载重受限、安装空间不大于400 mm×300 mm×500 mm）、作业环境苛刻（高压、强腐蚀、视觉衰减）、作业要求精细化（定位误差不大于2 mm、支持多类型钻头适配）的使用场景研发的关键装备。

1.1　设计方案确定

蛟龙号载人潜水器的作业场景具有以下典型约束与需求，直接决定了钻头更换装置的设计边界条件。

1）空间载重约束。潜水器作业舱内可利用安装空间有限（长×宽×高不大于500 mm×400 mm×600 mm），设备总质量需控制在30 kg以内，传统液压式换钻机构（单套大于80 kg）无法适配。

2）环境适应性需求。作业深度覆盖0～7000 m，需承受最大70 MPa静水压力，且海水强腐蚀环境要求机构具备长期可靠性，避免传统机械锁紧的卡滞失效问题。

3）作业精度要求。单次下潜需完成多根岩心取样（不少于3根），钻头更换定位误差需不大于2 mm，解决传统机械手更换（误差大于5 mm）导致的安装松动问题。

基于上述场景约束，确定装置的核心设计目标为小型化、轻量化、高通用性、高可靠性、高精度自动化换钻。为此，提出融合电磁锁紧技术、模块化设计及多机构协同控制的整体方案。

1）锁紧方式。采用电磁锁紧替代传统液压/机械锁紧，简化传动结构，减小体积质量，同时提高腐蚀环境下的稳定性。

2）装卸方式。通过电机驱动螺纹副实现钻具轴向连接，配合阶梯圆筒限位结构保障定位精度。

3）结构设计。采用模块化布局，将驱动单元、锁紧单元、传感单元集成一体，控制整体尺寸不大于400 mm×300 mm×500 mm，总质量小于30 kg。

1.2　钻头组件装卸原理

钻机本体与钻头组件的连接与分离采用直流减速电机驱动梯形螺纹副的传动方案，其核心原理是通过螺旋运动转换实现轴向力与旋转运动，兼顾传动效率与结构紧凑性，适配潜水器狭小作业空间。螺纹副的螺距为P，中径为d_2，螺旋升角为λ，需满足

$$\lambda=\arctan\left(\frac{P}{\pi d_2}\right) \tag{1}$$

当电机正向旋转时，输出轴输出扭矩T通过螺纹副将旋转运动转化为轴向进给运动，实现钻具的刚性连接；当电机反向旋转时，螺纹副将反向旋转运动转化为反向轴向运动，完成钻具的拆卸[13-14]。扭矩与轴向驱动力F_a的关系由螺纹副受力平衡方程决定：

$$T=F_a\frac{d_2}{2}\left(\tan\lambda+\tan\rho_v\right) \tag{2}$$

其中，ρ_v为当量摩擦角，反映螺纹副接触面的摩擦特性。进给速度v与电机转速n_L的关系为

$$v=n_L P \tag{3}$$

此外，升降装置可实现钻头组件的高度补偿。升降装置的直流电机通过齿轮皮带传动驱动升降台运动，升降台速度v_L与电机转速n_L及传动比i满足如下关系：

$$v_L=n_L D/i \tag{4}$$

其中，D为皮带轮直径。通过调整n_L实现钻头组件的高度补偿，位置传感器反馈升降台实时高度，

控制电机转速，确保钻头组件与钻杆连接件的同轴度误差不大于0.2 mm。

1.3 电磁装置锁紧原理

电磁锁紧模块是适配7000 m深海高压（最大70 MPa）、强腐蚀环境的核心功能单元，其设计目标是实现钻头组件的可靠锁紧与快速解锁。该模块结合深海工程约束，通过磁路优化、力学参数匹配及闭环控制，确保锁紧性能与环境相适应。

直流式电磁铁线圈通电后产生磁势，形成磁通，使工作气隙两端的极靴与衔铁产生异性磁极。异性磁极相吸产生电磁吸力，当该吸力形成的转矩超过反力弹簧的反作用力转矩时，衔铁就会被吸向铁芯。当线圈电流减小或中断时，铁芯中的磁通随之变小，电磁吸力也跟着减小。一旦吸力小于反力弹簧的反力，衔铁便在弹簧作用下回到初始位置。图1所示为直流式电磁铁工作原理。

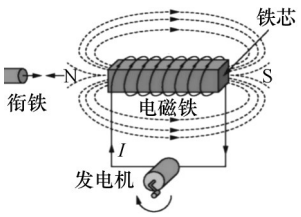


图1 直流式电磁铁工作原理

Fig.1 Working principle of a direct current electromagnet

钻头组件的电磁锁紧通过安培力驱动的磁吸耦合来实现，其磁感应强度B在气隙处的分布由线圈参数决定：

$$B=\frac{\mu_0\mu_r NI}{l_g+\mu_r l_m} \tag{5}$$

式中：μ_0为真空磁导率；μ_r为吸贴片相对磁导率；N为线圈匝数；I为线圈电流；l_g为气隙长度；l_m为磁路平均长度。

电磁铁对应的电磁吸力F_m为

$$F_m=\frac{B^2A}{2\mu_0} \tag{6}$$

式中：A为磁极面积。

制动销与钻头组件的齿轮啮合时，径向锁紧力F_r需满足载荷平衡条件：

$$F_r=F_m\geqslant F_L+F_C=F_L+m\omega^2 r \tag{7}$$

式中：F_L为复位弹簧力；F_C为离心力；m为制动销质量；ω为钻探角速度；r为啮合半径。

钻头组件的可靠锁紧依赖电磁力、机械反力及环境载荷的动态平衡，该平衡过程通过传感反馈与闭环控制实现，其核心逻辑基于电磁力学的线性特性。当电磁铁通电后，制动销随电磁吸力伸出，位移传感器实时监测啮合深度；若未达到设计值（3 mm），控制器通过PID算法调整线圈电流，根据式（5）中电流与磁感应强度的线性关系，修正电磁吸力，直至锁紧位移稳定，与制动齿轮完全啮合。这种策略以电磁力学原理为基础，通过电流-磁感应强度-锁紧力的线性映射，实现精准锁紧，解决了深海视觉衰减、通信延迟导致的手动控制难题[15-17]。图2所示为电磁锁紧装置制动销受力，清晰呈现了电磁吸力、复位弹簧力及离心力的关系，直观反映了电磁力学原理在结构设计中的具体应用。

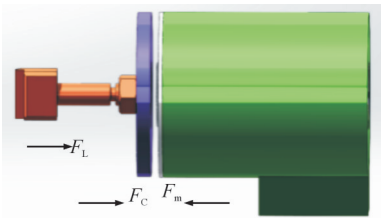


图2 电磁锁紧装置制动销受力

Fig.2 The force acting on the brake pin of the electromagnetic locking device

1.4 钻头更换过程机理分析

钻头更换过程是定位夹紧、驱动连接、电磁锁紧、传感反馈及升降辅助等多模块的协同作业过程，涉及机械、电控、传感多学科交叉耦合，全程自动化完成，适配水下视觉衰减、通信延迟的复杂环境，其机理可分为三个阶段，如图3所示，其中，V为钻筒运动方向。

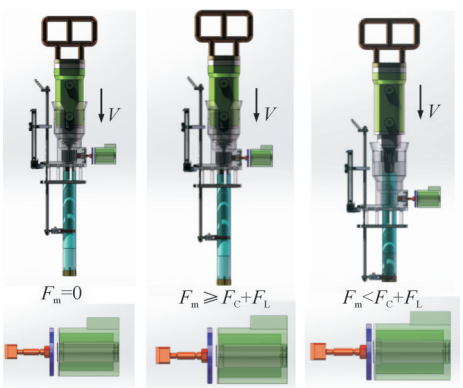


图3 钻头更换过程机理分析

Fig.3 Mechanism analysis of drill bit replacement process

1）定位夹紧阶段（图3a）。蛟龙号多功能机械手结合视觉定位系统与位置传感器反馈，将钻头组件移送至钻机定位装置的阶梯圆筒孔内。阶梯孔采用直径梯度设计，与钻头组件的台阶结构形成径向间隙限位，限制径向窜动；同时，钻头组件的U形槽与钻机本体凸出柱嵌合，实现轴向定位。定位完成后，夹持机械爪抱紧钻头组件，压力传感器实时监测夹紧力，若未达到设定阈值，系统发出报警信号并重新夹紧，确保定位可靠。

2)连接锁紧阶段(图3b)。电磁铁线圈通电,驱动制动销径向伸出,与制动齿轮完全啮合;啮合完成后钻机控制器发出驱动指令,直流减速电机按设定转速正向旋转,通过梯形螺纹副将钻杆连接件旋入钻头组件螺纹孔;为避免螺纹咬死,采用“低速启动-匀速进给-减速贴合”的转速控制策略,形成“螺纹连接+电磁锁紧”的双重固定结构,即螺纹连接承担轴向载荷,电磁锁紧抑制周向扭转,满足深海钻探作业的力学需求。

3)断电解锁阶段(图3c)。钻头连接完成的反馈信号被控制器接收后,系统立即控制电磁铁断电解锁,即电磁吸力在断电瞬间消失,制动销在复位弹簧的预紧力作用下径向缩回,解除对钻头组件的周向约束;随后升降辅助装置启动,齿轮-皮带传动机构驱动升降台平稳上升,直至钻头组件露出不小于80 mm的安全抓取空间,避免机械手作业时发生干涉。蛟龙号多功能机械手依据位置传感器的实时反馈数据,精准抓取钻机并移送至深海取样作业指定位置。

钻机在蛟龙号多功能机械手的稳定夹持下,执行深海岩心取样作业;取样完成后,机械手首先将钻机移送回钻头更换装置,完成旧钻头的拆卸操作;随后,机械手将新钻头组件精准放入阶梯定位筒内完成预定位,确保钻头组件与装置的同轴度误差不大于0.5 mm;之后机械手将钻机重新安放至该装置,依次重复定位夹紧、连接锁紧、断电解锁的自动化作业流程,最终完成新钻头的更换。

2　钻头更换装置整体设计

2.1　整体结构设计

针对7000 m级深海环境的特殊要求,装置采用模块化的设计理念,通过耐压结构、锁紧机构与传动系统协同,实现钻头更换作业的可靠性与高效性。整体结构分为钻具支撑固定底座、电磁锁紧装置、升降传动机构、钻具卡紧装置四大模块。钻头更换装置整体结构见图4。

钻头更换装置整体呈轴对称布局,高420 mm,质量28 kg,满足潜水器搭载的空间与载重限制。核心组件沿中心轴分层布置:上层钻具固定装置,利用阶梯孔与U形槽实现钻具限位;中层电磁锁紧执行机构,包含制动销、电磁铁与复位弹簧,实现钻头的快速锁紧与解锁;下层升降传动系统,由步进电机驱动丝杠,带动钻头组件完成0～200 mm行程的升降调节。基于深海环境的耐高压、耐腐蚀与轻量化需求,关键部件材料参数如表1所示。

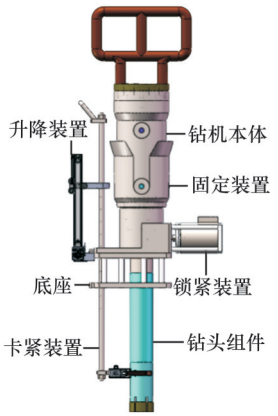


图4　钻头更换装置整体结构

Fig.4　The overall structure of the drill bit replacement device

表1　关键部件材料参数

Tab.1　Material parameters of key components

部件	材料	性能指标	环境适应措施
电磁铁壳体	TC4钛合金	抗拉强度950 MPa	表面阳极氧化处理
制动销	TC4钛合金	抗拉强度950 MPa	表面阳极氧化处理
传动丝杠	316L不锈钢	屈服强度210 MPa	钝化处理+润滑脂填充

电磁铁锁紧装置由电磁铁、电磁铁壳体、电磁铁固定板、电磁铁支撑立柱、电磁铁吸贴片、制动销及连接轴组成,电磁铁吸贴片与电磁铁平行安装于电磁铁立柱内部。电磁铁的铁芯外部缠绕与其功率相匹配的导电绕组,通有电流的线圈具有磁性,将电磁铁制成圆柱状,以使铁芯更易磁化。壳体采用低磁导率材料,与高磁导率的衔铁配合形成闭合磁路,减少磁力损耗;线圈选用耐高低温绝缘线材,经特殊工艺处理确保绝缘性能稳定;制动销与连接轴刚性连接,在复位弹簧作用下实现预定行程的动作。电磁铁锁紧装置结构见图5。

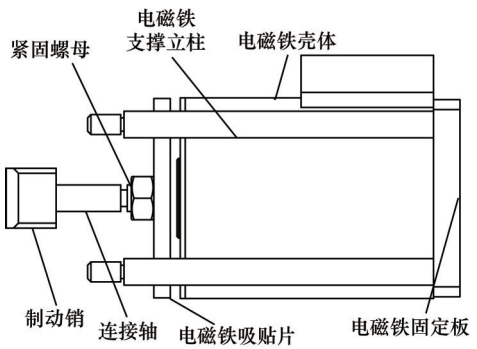


图5　电磁铁锁紧装置结构

Fig.5　Electromagnetic lock structure

2.2　控制模块设计

控制模块(图6)作为装置的“神经中枢”,承担状态感知、指令运算与执行控制的核心功能,其可靠性直接决定深海作业的安全性与稳定性。模

块核心为钛合金(TC4)圆柱形耐压控制舱,针对7000 m级深海极端环境设计。舱体高250 mm、内径100 mm、外径140 mm,上下端盖采用8 mm厚TC4钛合金整体锻造,通过6颗M6钛合金螺栓周向均匀紧固,端面密封采用氟橡胶O形圈,经70 MPa静态水压测试无渗漏。

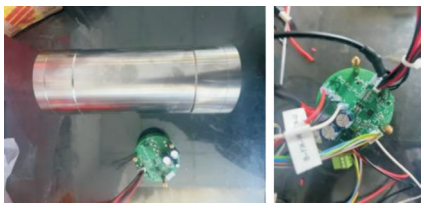


图6 控制模块示意图

Fig.6 Control module schematic diagram

控制系统采用"主控制器+分布式执行模块"架构。主控制器负责多传感器数据融合、作业逻辑运算与故障诊断,PLC控制器通过脉冲宽度调制(PWM)驱动步进电机与电磁铁,两者经CAN总线高速互联(数据传输速率1 Mbit/s),确保指令响应时间短于10 ms。针对深海电磁干扰环境,电路设计采用多级滤波与光电隔离技术,电磁兼容性能满足GB/T 17626.2—2018标准要求。

2.3 基于有限元理论的力学性能分析

为验证关键部件在深海作业载荷下的力学性能,采用ANSYS Workbench建立精细化有限元模型,对制动销、底座等核心构件进行强度与变形校核[18-19]。模型几何结构基于三维设计模型直接导入,采用四面体单元进行网格划分,关键接触区域(如制动销与锁孔配合面)网格加密至0.1 mm,单元质量达标率不小于95%。材料属性按TC4钛合金实测参数赋值(表2),接触类型设置为绑定与摩擦接触组合,以模拟实际装配关系。

表2 TC4钛合金材料参数

Tab.2 TC4 titanium alloy material parameters

物理参数	数值	测试标准
密度ρ	4.43 g/cm^3	GB/T 1033.1—2008
抗拉强度R_m	950 MPa	GB/T 228.1—2021
屈服强度R_g	850 MPa	GB/T 228.1—2021
剪切强度τ_b	550 MPa	GB/T 23935—2009
抗压强度σ_c	1100 MPa	GB/T 7314—2017
弹性模量E	114 GPa	GB/T 22315—2008
泊松比μ	0.33	GB/T 22315—2008

2.3.1 电磁铁锁紧装置可靠性分析

1)锁紧状态(额定载荷)。在锁紧状态下,制动销齿形结构与钻头组件齿轮全啮合,承受80 N·m的最大扭矩,同时电磁力(150 N)使销体与锁孔形成0.05 mm过盈配合,尾部施加固定约束且扭矩沿齿面啮合面法向均匀分布。有限元分析结果如图7所示,可见,TC4钛合金制动销最大von Mises应力$\sigma_{max}=797$ MPa,基于屈服强度的安全系数为

$$S=R_g/\sigma_{max}\approx 1.07 \tag{8}$$

应力集中于齿根,向中部梯度递减,中段应力不大于550 MPa,远低于屈服极限。安全系数略大于1,表明齿形设计合理,可满足深潜器岩心取样钻头组件锁紧需求。

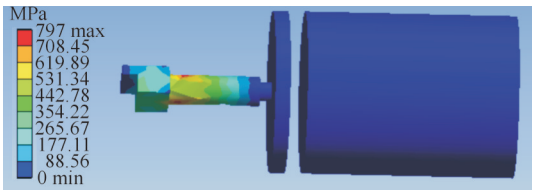


图7 制动销锁紧状态的应力分布

Fig.7 Stress distribution in the locked state of the brake pin

2)解锁过渡状态(剪切载荷)。解锁过渡时,电磁铁断电后,复位弹簧(预紧力80 N)推动制动销沿轴向退出锁孔,当销体与孔壁接触长度减至30%时,同步承受1.2倍额定扭矩(96 N·m)的动态剪切作用,剪切力沿接触区域均匀分布,且销体前端保持部分导向约束。有限元分析结果如图8和图9所示,可见,销体最大剪切应力$\tau_{max}=516.96$ MPa,剪切安全系数为

$$S_\tau=\tau_b/\tau_{max}\approx 1.06 \tag{9}$$

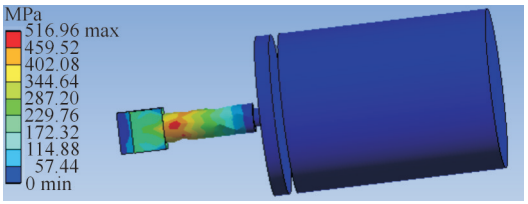


图8 制动销解锁过渡状态的剪切应力分布

Fig.8 Shear stress distribution during the transition state of brake pin unlocking

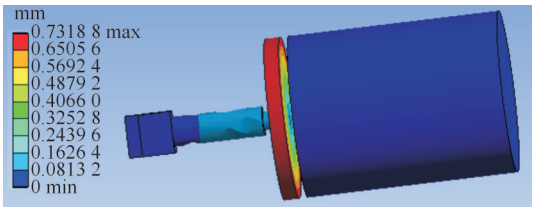


图9 制动销解锁过渡状态的变形分布

Fig.9 Deformation distribution during the transition state of brake pin unlocking

最大变形量$\delta_{max}=0.731$ mm,变形小于配合间隙(1.2 mm),满足

$$\frac{\delta_{max}}{\delta_{gap}}=\frac{0.731}{1.2}\approx 60.9\%<100\% \tag{10}$$

制动销保留6.01%强度余量,变形未超配合间隙,可确保顺利退出,应力分布与变形均符合解锁

条件。制动销能可靠承受动态载荷作用，保障钻头更换机构快速解锁。

3）解锁完成状态（复位载荷）。解锁完成时，制动销完全退出锁孔，压缩弹簧处于最大形变位置，销体受80 N轴向弹簧力。有限元分析结果如图10所示，可见，叠加最大轴向弹簧力（0.196 MPa）与深海静水压力（70 MPa）后，销体最大法向压应力$\sigma_{c,max}$＝70.196 MPa，抗压安全系数为

$$S_c=\sigma_c/\sigma_{c,max}\approx 15.67 \tag{11}$$

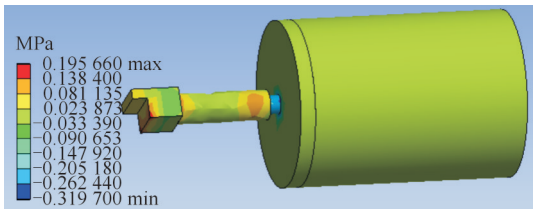


图10　制动销解锁完成状态的法向应力分布

Fig.10　Normal stress distribution in the unlocked state of the brake pin

根据压杆稳定理论，临界压力公式为

$$F_{cr}=\frac{\pi^2 EI_s}{(\mu L)^2} \tag{12}$$

其中，μ为长度系数；L为压杆计算长度；I_s为惯性矩。计算得临界压力（大于10 kN）远大于实际载荷，应力仅为TC4抗压强度的5.47%，无塑性变形风险，结构在弹簧力作用下保持稳定，完全满足深海7000 m作业环境的使用要求。

2.3.2　底座耐压性能分析

底座作为装置与潜水器的连接基础，需承受7000 m水深对应的70 MPa静水压力，外表面施加均匀压力且底部与潜水器作业篮连接面设为固定约束，内部腔体保持常压（0 MPa）。有限元分析结果如图11、图12所示，可见，上支撑板最大变形量δ_L＝0.65 mm，满足平面度要求（≤1 mm），即

$$\frac{\delta_L}{[\delta]}=\frac{0.65}{1}=65\%\leqslant 100\% \tag{13}$$

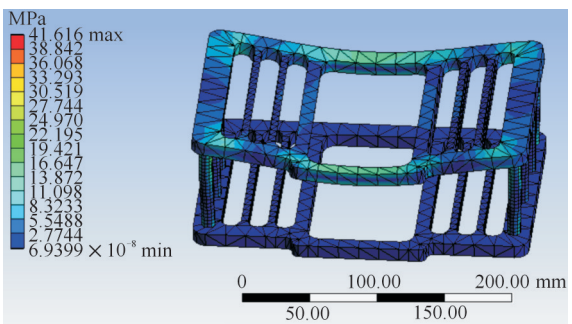


图11　底座应力分布

Fig.11　Stress distribution of the base

连接杆最大应力σ_L＝41 MPa，屈服安全系数为

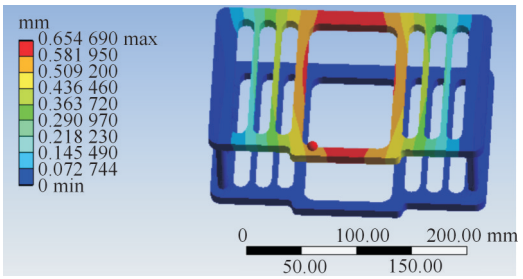


图12　底座形变示意图

Fig.12　Schematic diagram of base deformation

$$S_L=\frac{R_g}{\sigma_L}=\frac{850}{41}\approx 20.73 \tag{14}$$

底座变形量和应力值均处于安全范围，TC4钛合金保留充足强度余量，结构设计可靠承受7000 m水深极端压力。

3　样机试验及深海应用

3.1　实验室测试

1）机械性能测试。为验证弹簧-电磁协同驱动机制的动态响应性能，采用500 N拉力传感器对销体进行响应测试，记录解锁过程中销体位移变化及响应时间。解锁响应测试如下：电磁铁断电瞬间触发计时器，通过图像识别销体从锁紧位置移动至解锁位置（位移10 mm）的时间，计算平均响应速度。解锁响应时间均值为38 ms，最大偏差不大于5 ms，验证了弹簧-电磁协同驱动的快速性。图13为解锁过程制动销位移-时间曲线。

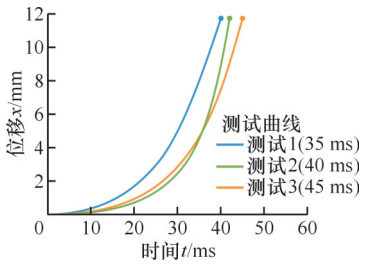
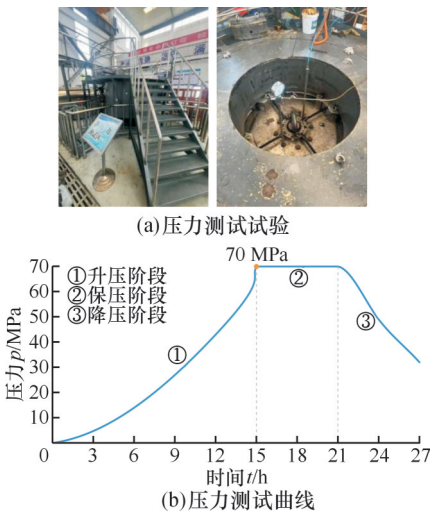


图13　解锁过程制动销位移-时间曲线

Fig.13　Unlocking process brake pin displacement-time curve

2）7000 m级打压测试。将装置整体放入高压试验舱，模拟7000 m水深的压力环境（70 MPa），保持24 h（图14）。试验过程中，监测装置各部件的密封性能与结构完整性，重点检测电磁铁壳体、底座密封连接处等关键部位。试验后，测量装置的绝缘电阻，电磁铁线圈绝缘电阻仍保持在100 MΩ以上，证明装置在高压环境下的密封与绝缘性能良好。对处于高压环境下的装置进行功能测试，验证电机、传感器、电磁换向阀等部件的工作状态。结果显示，在70 MPa压力下，升降装置

运行平稳，传感器数据采集正常，电磁铁锁紧与释放功能可靠，表明装置具备良好的深海环境适应性。



(a)压力测试试验　(b)压力测试曲线

图14　7000 m级深海环境下压力测试

Fig.14　Pressure testing in a 7000-metre deep sea environment

3)与蛟龙号的联调测试。将钻头更换装置安装至蛟龙号载人潜水器前端工作台，进行系统联调测试，完成3次更换头循环，单次耗时不大于5 min。装置通过4个钛合金螺栓固定于蛟龙号前作业篮，安装基准面平面度不大于0.1 mm，与机械臂作业半径重合，并采用总线建立通信。预校验结果显示，升降系统定位精度为±0.1 mm，电磁锁紧响应不大于40 ms，各子系统状态正常。换钻过程包含拆卸与安装两个阶段：旧钻头拆卸时，蛟龙号机械手缓慢抓取钻机，制动销接收解锁指令后，在38 ms内完成解锁，机械手提高钻机完成脱离，耗时约90 s；新钻头安装中，蛟龙号机械手存旧取新，移送对位后下放钻机，制动销锁紧至预紧力150 N，耗时约180 s。换钻3次成功率100%，验证了各机构协同作业可靠性。图15所示为蛟龙号的联调测试。



图15　与蛟龙号联调测试

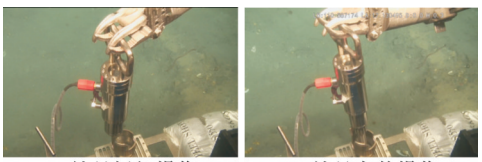
Fig.15　Interoperability testing with the Jiaolong submersible

3.2　深海试验应用

2025年3月，在南海海马冷泉附近海域，深海电磁换头装置搭载“蛟龙号”HOV的361、362潜次下潜至1200 m、2100 m深处，开展两个潜次的换头测试与深海钻探。海试采用舱内人员控制的方式，电磁上电后预紧力为150 N，蛟龙号机械手操纵力为300～500 N，在5 min内完成钻头更换动作，验证了理论与仿真结果的正确性。

第361潜次于2025年3月6日07:00-17:00执行，作业水深1200 m。该潜次搭载本课题研制的电磁锁紧钻头更换装置，水下连续开机运行10 h，通过机械臂夹持钻头更换装置，成功完成多次钻头更换作业。整个试验过程中，电磁锁紧钻头更换装置布放与回收操作无异常，系统整体结构完好无损伤，水下数据采集连续稳定，各项性能指标均满足设计要求，验证了装置在1200 m水深环境下的可靠性。

第362潜次在南海2000 m级海域完成了2次深海试验验证，如图16所示，蛟龙号载人潜水器搭载电磁换头装置下潜至指定深度，潜航员通过主控台启动钻头更换装置，完成了4组钻头更换作业，平均更换时间为5 min，满足设计要求。作业过程中，螺纹副连接可靠，每次对接均能达到80 N·m的预紧扭矩；电磁铁锁紧装置工作稳定，未出现锁紧失效或制动销卡死现象。采集的传感器数据显示，在钻探作业过程中，钻头组件的径向位移始终小于0.2 mm，轴向载荷与扭矩波动在设计允许范围内，证明装置能够有效保障钻探作业的稳定性。



(a)钻具拆卸操作　(b)钻具安装操作

图16　蛟龙号在2000 m级水下完成钻头更换

Fig.16　The Jiaolong submersible completes a drill bit replacement at a depth of 2000 metres

4　结论

1)聚焦国家重大任务实施需求，为提高蛟龙号等深海运载器岩心取样作业效能，提出了一种基于电磁原理和力平衡理论的钻头更换装置设计方法，开展了基于电磁力驱动的作业装置设计，研制了适用于7000 m级深海运载器钻探的电磁锁紧钻头更换装置，研制了样机，并完成了深海真实环境下功能测试，具备工程化应用前景。

2)针对深海极端工况条件，为确保装置工作稳定性，提出了“螺纹副＋电磁齿”双重锁紧设计方法，突破传统机械传动理论在极端工况下的应用限制，通过钛合金轻量化耐压结构设计，有效解

决了深海高压下的精准对接难题。

3)仿真分析及深海验证得出,电磁换头装置电磁预紧扭矩在80 N·m下,可实现多组钻头更换的目标,通过潜航员舱内控制及机械手操作综合实践,可实现5 min内的钻头更换作业,该研究成果有效提高了蛟龙号载人潜水器水下岩心取样作业效率,实现了"一次下潜,多芯取样"的目标,有效弥补了深潜器的小钻压、大深度、精细化、高稳定岩心取样技术方法体系的不足,为后续支撑中国大洋科考任务实施提供了重要工程应用支撑。

参考文献:

[1] 郑森. 基于深海运载器的小型取芯钻头设计及钻进工艺参数研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2021.
ZHENG Sen. Design of Small Coring Bit Based on Deep-sea Vehicle and Study on Drilling Process Parameters[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2021.

[2] 赵尔信,方啸虎. 深海深地钻探用复合片钻头的现状和展望[J]. 超硬材料工程,2023,35(6):45-50.
ZHAO Erxin, FANG Xiaohu. Current Status and Prospects of Composite Sheet Drill Bits for Deep Sea and Deep Earth Drilling[J]. Superhard Material Engineering, 2023, 35(6): 45-50.

[3] 张涵淇. 浅析可更换钻头套管钻井工具的主要工艺[J]. 化工管理,2016(6):126.
ZHANG Hanqi. Analysis on the Main Technology of Drilling Tools with Replaceable Bit Casing[J]. Chemical Enterprise Management, 2016(6): 126.

[4] McINROY D. Twenty Years of MSPs: Technologies and Perspectives[J]. Marine Geology, 2024, 477: 107403.

[5] WEN Y F, ZHANG G Q, XIE H P, et al. Design and Dynamic Analysis of the Wire-line Coring Robot for Deep Lunar Rocks[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1722.

[6] LIU J B, YE M H, XU J C, et al. A Multi-string and Wireline-coring Drilling Robot for planetary Regolith Sampling[J]. Advances in Space Research, 2025, 75(7): 5736-5756.

[7] WANG F, ZHAO M, FU R, et al. Replaceable Drill Bit with Compound Step and Sawtooth Structures for Damages and Drilling-cost Reduction of CFRP Composite[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 81: 1018-1027.

[8] 吴雨,焦慧锋,张康,等. ROV工具库对接锁紧机构的设计与分析[J]. 海洋工程装备与技术,2018,5(4):232-236.
WU Yu, JIAO Huifeng, ZHANG Kang, et al. Design and Analysis for the Butt Locking Mechanism of ROV Tool Library[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2018, 5(4): 232-236.

[9] UGURLU O F, KUMRAL M. Optimization of Drill Bit Replacement Time in Open-cast Coal Mines[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2019, 6(3): 399-407.

[10] WU N H, GAO M Z, ZHU L Y, et al. Pressure Control Method and Device Innovative Design for Deep Oil In-situ Exploration and Coring[J]. Petroleum Science, 2023, 20(2): 1169-1182.

[11] YE X, XU X, WEN T, et al. Design and Optimization of Repeatable Locking/Unlocking Device for Magnetically Suspended Control Moment GYRO[J]. Acta Astronautica, 2021, 186: 24-32.

[12] LEE S S, KIM K Y, SEO J W. Development of a Trip Time for Bit Exchange Simulator for Drilling Time Estimation[J]. Geothermics, 2018, 71: 24-33.

[13] 梁亮,陈慧志,卞笑康. 电机正反转及变频调速控制方案设计及优化[J]. 化工生产与技术,2024,30(2):44-46.
LIANG Liang, CHEN Huizhi, BIAN Xiaokang. Design and Optimization of Motor Forward and Reverse Rotation and Variable Frequency Speed Control Scheme[J]. Chemical Production and Technology, 2024, 30(2): 44-46.

[14] 王钰中,王国中. 一种电机切换装置在牵引设备中的应用设计[J]. 电工技术,2025(4):23-25.
WANG Yuzhong, WANG Guozhong. Design and Application of a Motor Switching Device in Traction Equipment[J]. Electric Engineering, 2025(4): 23-25.

[15] 黄龙,李旭鹏,张文会. 电磁触发锁紧释放机构设计与试验研究[J]. 机械设计,2024,41(4):102-109.
HUANG Long, LI Xupeng, ZHANG Wenhui. Design and Experimental Research of Electromagnetic Hold down and Release Mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(4): 102-109.

[16] 呼烨,徐明旭,曹勇,等. 电磁锁紧式数控双轴回转台的研究与开发[J]. 吉林工程技术师范学院学报,2018,34(5):91-93.
HU Ye, XU Mingxu, CAO Yong, et al. Research and Development of an Electromagnetic Locking Numerical Control Biaxial Rotary Bed[J]. Journal of Jilin Teachers Institute of Engineering and Technology, 2018, 34(5): 91-93.

[17] 韩邦成,刘强. 基于自锁原理的磁悬浮飞轮电磁锁紧机构[J]. 光学精密工程,2009,17(10):2456-2464.
HAN Bangcheng, LIU Qiang. Electromagnetic Locking Device Based on Self-locking for Magnetic Suspended Flywheel[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10): 2456-2464.

[18] 蒋皓宇,王友仁,刘维团,等. 基于Ansys Workbench的齿根疲劳裂纹扩展静力学分析[J]. 机械制造与自动化,2025,54(2):32-36.
JIANG Haoyu, WANG Youren, LIU Weituan, et al. Statics Analysis of Fatigue Crack Propagation of Gear Root Based on Ansys Workbench[J]. Machine Building & Automation, 2025, 54(2): 32-36.

[19] 孟玮. 基于ANSYS Workbench的某航空电子设备结构设计[J]. 现代信息科技,2024,8(14):168-171.
MENG Wei. Structure Design of an Avionics Based on ANSYS Workbench[J]. Modern Information Technology, 2024, 8(14): 168-171.

(编辑　袁兴玲)

作者简介:任玉刚,男,1987年生,博士、正高级工程师。研究方向为深海运载器作业技术。E-mail:ytrenyugang@163.com。**张晓宇***(通信作者),男,1999年生,硕士。研究方向为基于深潜器的钻探应用技术。E-mail:2336933194@qq.com。

本文引用格式:

任玉刚,张晓宇,李超,等. 基于电磁锁紧原理的蛟龙号钻头更换装置设计[J]. 中国机械工程,2026,37(10):2676-2683.

REN Yugang, ZHANG Xiaoyu, LI Chao, et al. Design of the Jiaolong Drill Bit Replacement Device Based on Electromagnetic Locking Principle[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(10):2676-2683.