

深水浅软层砂层保形取心钻具设计及应用

陈云龙^{1,2,3}, 赵义^{1,2,3*}, 阮海龙^{1,2,3}, 刘协鲁^{1,2,3}, 刘海龙^{1,2,3}, 索永兵^{1,2,3}

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国地质调查局海洋钻探技术重点实验室, 北京 100083; 3. 天然气水合物勘查开发国家工程研究中心, 广东 广州 511458)

摘要: 随着国家资源勘查逐步向深海进军, 获取深海地层岩心成为必需。目前, 针对海底沉积层、软硬交互等地层已有了成熟的取心钻具, 但是, 对于浅软层砂层还存在一些技术壁垒。在已有 TKP194-80 型密闭保压取心工具原理的基础上, 针对性设计了超前保形取心钻头、优化了球阀结构、增加了透明衬管以及单向阀机构, 形成了球阀翻转式保形取心钻具。该钻具具有对砂层扰动小、防堵等特点, 成功在我国南海 1500 m 以深的超深水油气浅软层砂层进行了试验, 取心进尺 5.50 m, 获取砂层岩心 5.00 m, 岩心采取率 90.91%。突破了超深水浅软层砂层取心的技术难点, 可为超深水油气资源勘探开发提供关键技术支持。

关键词: 球阀翻转式保形取心钻具; 浅软层; 砂层; 岩心采取率; 超深水油气

中图分类号: P634.4; P756.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)06-0086-05

Design and application of a conformal coring tool for shallow soft sand layer

CHEN Yunlong^{1,2,3}, ZHAO Yi^{1,2,3*}, RUAN Hailong^{1,2,3}, LIU Xielu^{1,2,3}, LIU Hailong^{1,2,3}, SUO Yongbing^{1,2,3}

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Marine Drilling Technology, CGS, Beijing 100083, China; 3. National Engineering Research Center for Gas Hydrate Exploration and Development, Guangzhou Guangdong 511458, China)

Abstract: With the development of national resources exploration into the deep sea, it is necessary to obtain the deep sea stratum core. At present, mature coring tools have been developed for seabed sediments, soft and hard alternating strata, etc. However, there are still some technical barriers for shallow soft sand layer. On the basis of the existing TKP194-80 sealed pressure holding principle, the projecting conformal core bit is designed specifically, the ball valve structure is optimized, transparent liner and a check valve are added, the ball valve turn-over conformal coring tool is formed. The coring tool has the characteristics of small disturbance to sand layer, blockage prevention, etc, the test was successfully carried out in the shallow soft sand layer of ultra-deepwater oil and gas at 1500m in the South China Sea, the coring footage was 5.50m, the recovered sand core length was 5.00m, and the core recovery rate reached 90.91%. It breaks through the technical difficulties of coring ultra-deepwater shallow soft sand layer, it can provide key technical support for the exploration and development of ultra-deepwater oil and gas resources.

Key words: ball valve turn-over conformal coring tool; shallow soft layer; sand layer; core recovery rate; ultra-deepwater oil and gas resources

收稿日期: 2024-12-18; 修回日期: 2025-04-20 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.06.010

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20221722)

第一作者: 陈云龙, 男, 汉族, 1985年生, 高级工程师, 核燃料循环与材料专业, 硕士, 主要从事深海钻探装备、器具研发及钻探工艺研究工作, 北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102400), cyunlong@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 赵义, 男, 汉族, 1985年生, 高级工程师, 机械设计及制造专业, 硕士, 主要从事地质钻探取心工具研究工作, 北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102400), bjie_zy@foxmail.com。

引用格式: 陈云龙, 赵义, 阮海龙, 等. 深水浅软层砂层保形取心钻具设计及应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 86-90.

CHEN Yunlong, ZHAO Yi, RUAN Hailong, et al. Design and application of a conformal coring tool for shallow soft sand layer[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 86-90.

0 引言

我国海域面积广阔,蕴藏着丰富而宝贵的巨大能源^[1-2]。在常规陆域石油与天然气资源日益衰竭的背景下,为保障国家能源安全,势必要加速对南海深水油气资源的开发。要进行资源开发,首先要开展资源勘查评估,目前最有效的办法就是通过钻探取样获取样品,样品是最直观、最可靠地反映岩层地质特征的第一手资料。然而,超深水浅软层砂层取心因地层强度低、含气不成形、作业工况复杂等因素,是海洋油气资源勘探过程中的难点。针对松软破碎地层取心,已有学者开展了相关研究,李兵等^[3]提出了应用全封闭取心技术提高松软破碎地层岩心采取率;杨玉坤等^[4-6]对松软地层取心工具加压机构工作状态进行了分析,并概括总结了一些国内外松软地层取心技术;吴金生等^[7]开展了针对破碎松软地层的取心钻头孔底流场数值模拟,讨论了钻头排水槽结构、泥浆性能和水力参数等的最佳组合方式;鲁金峰^[8]提出了利用密闭取心工具及工艺技术在陆域油田浅层松软地层进行取心;冯帆等^[9]针对海底松软地层开展了取心钻头的设计与结构优化,并进行了模拟验证;陈云龙等^[10]针对松软泥砂地层取心率低的问题,研究设计了内管超前底喷单动双管钻具,并成功进行了应用;陈浩东等^[11]针对超深水超浅层储层无隔水管钻井取心难点开展相关研究,形成了一套“双超”储层高效取心方案,并开展了试验。以上研究主要集中在针对松软地层取心的概括分析、方案模拟,有些在陆地以及海上开展了相关应用,也取得了一定的效果,但仍有优化空间。

因此,在上述已有技术基础上,本团队根据实际地质情况、取心技术要求等,从取心机构、钻头结构等多方面开展技术攻关,攻克了超深水浅软层砂层取心的技术难点,并在水深1500 m以深的目的层位高质量完成取心试验目标任务,可为今后超深水油气资源勘探开发提供关键技术支撑。

1 球阀翻转式保形取心钻具

针对超深水浅软层砂层特点,在已有TKP194-80型密闭保压取心工具原理^[12]的基础上,设计了超前保形取心钻头、优化了球阀结构、增加了透明衬管以及单向阀机构,形成了球阀翻转式保形取心钻具(如图1所示),由外管总成与内管总成组成。外

管总成包括上接头、外筒以及钻头,内管总成包括差动机构、单向阀机构、取心筒、滑套以及球阀等。取心钻进时,球阀处于打开状态,岩心通过球阀进入取心筒;钻取完岩心后,投球通过液压驱动差动机构,带动取心筒相对外筒做反向抬升运动,在此过程中,球阀密封装置被强制关闭,保护获取的岩心。

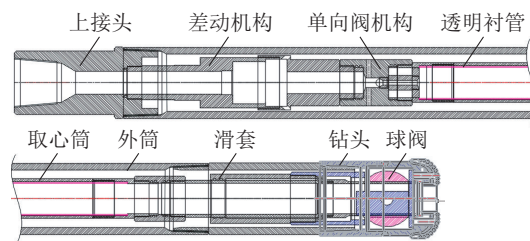


图1 球阀翻转式保形取心钻具

Fig.1 Ball valve turn-over conformal coring tool

1.1 超前保形取心钻头

为了先期尽可能不破坏砂层的原始状态,保形取心钻头采用超前底喷设计,如图2所示。取心钻头在触底时超前段快速破碎地层,保护易散的砂层;同时通过钻头底部隔水设计,使得大部分钻井液经钻头底喷眼流至井底。对保形取心钻头流道进行了模拟分析,如图3所示,可以看到,钻井液流速最高的地方集中在钻头底部超前保形段与主切削复合片胎体之间,超前保形段附近钻井液流速几乎为零,钻井液不会直接冲刷已经“被保护”起来的砂层岩心,从而保证岩心采取率。

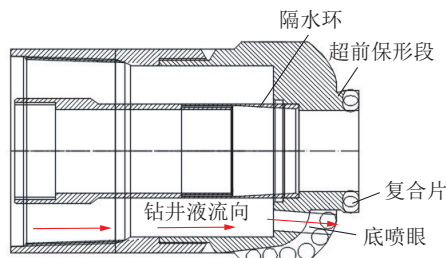


图2 超前保形取心钻头

Fig.2 Projecting conformal core bit

1.2 球阀结构优化

砂层取心完成后,通过球阀来封堵岩心筒,以保证岩心样品不掉落。在球阀翻转过程中,由于井底存在悬浮的沙砾,有影响球阀关闭的可能,因此,从以下两方面进行优化。

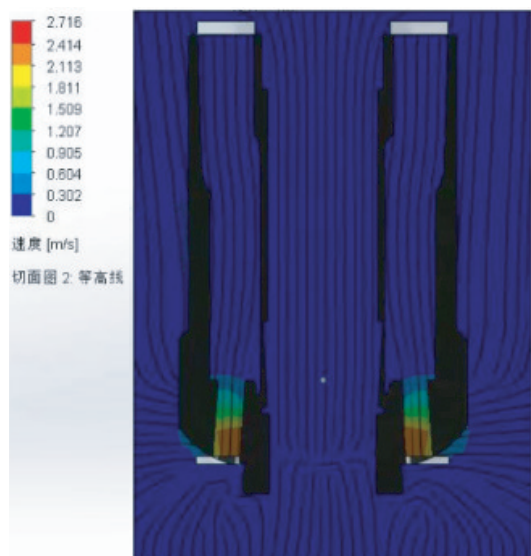


图3 钻井液流速模拟分析

Fig.3 Simulation analysis of drilling fluid flow rate

(1)采用合金钢镀层球体,降低球体表面摩擦系数,减弱悬浮沙砾在球体表面的附着能力。根据摩擦力计算公式 $f = \mu F_N$ (f 为摩擦力, μ 为摩擦系数, F_N 为正压力),即使有少量悬浮沙砾附着在球体表面,由于摩擦系数降低,减少对球阀翻转关闭的影响。

(2)采用导槽翻转设计,如图4所示,通过液压差动机构使球阀转轴沿着带有导向槽的外套筒强制球阀翻转 90° ,完成球阀关闭动作。球阀内部通道直径 $D=92\text{ mm}$,转轴直径 $d=23\text{ mm}$ 。球阀翻转过程中,转轴需要承受钻井液产生的最大压力 $P=20\text{ MPa}$ 的液压驱动力,因此,需要校核球阀转轴的剪切受力情况。

剪切应力:

$$\tau = F/A \leq [\tau] \quad (1)$$

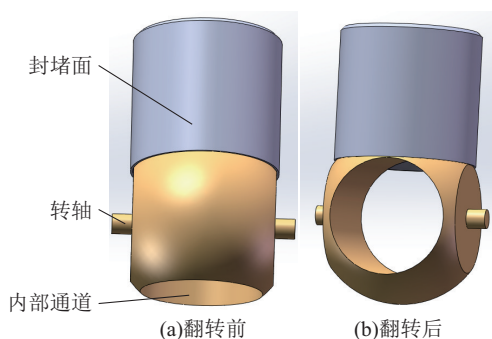


图4 球阀翻转封堵岩心

Fig.4 Ball valve turns over to seal the core

式中: F ——球阀翻转过程中的最大液压驱动力; A ——转轴的横截面面积; $[\tau]$ ——许用应力。

$$F = PS = P \cdot \pi D^2 / 4 = 132\text{ kN} \quad (2)$$

由于有两个转轴,则单个转轴上的力: $F_z = F/2 = 66\text{ kN}$ 。

由于受剪切的构件变形和受力比较复杂,剪切面上的应力分布规律很难用理论方法确定,一般采用实用计算方法来确定受剪切构件的应力,假设应力在剪切面内均匀分布。

$$\tau = F_z / A \quad (3)$$

转轴的横截面积 $A = \pi d^2 / 4 = 415.3\text{ mm}^2$,计算得 $\tau = 159\text{ MPa}$ 。

材料在剪切作用下所能承受的最大应力值称为剪切极限应力,标记为 τ_b 。查阅相关手册可知所用材料剪切极限应力为 $312 \sim 416\text{ MPa}$,安全系数 n 为 1.5 ,即得到许用应力:

$$[\tau] = \tau_b / n = 208 \sim 277\text{ MPa} \quad (4)$$

$\tau < [\tau]$,转轴满足设计要求。

1.3 取心筒优化

对于松软砂层,样品进入取心筒后容易出现堆积,导致样品与管壁的摩擦力增大,造成“桩效应”^[13-14],进而堵塞取心筒。堵塞发生后机械钻速不会出现明显变化,容易造成误判而继续钻进,最终导致岩心丢失,降低岩心采取率。如何提高取心率,在于优化回次取心长度。朱杰然^[15]认为只有增大取心筒内径或者减小摩擦系数,才能得到令人满意的岩心长度,从而保证岩心采取率。但是也不能忽略取样深度的影响,因为取样深度越深,海底压力越大,可能导致岩样进入取心筒困难甚至损坏取心筒。因此,在原有铝合金取心筒中增加具有轻质、高强、耐腐蚀、耐磨、内壁光洁的PC管作为内层衬管^[16](如图5所示)。根据“桩效应”临界条件公式 $s = 3d_c / \mu_k$ (s 为样品长度临界值, d_c 为内层衬管直径, μ_k 为沙砾与内层衬管间的摩擦系数),取内层衬管的摩擦系数 0.04 ,设计内层衬管内径为 80 mm ,可知样品长度不小于 6 m ,可达到降低砂层岩心进入阻力、提高岩心采取率的目的。同时,通过整体拉出衬管避免传统出心方法对获取松散岩心的破坏,可快速知悉岩心情况,提升岩心后处理效率。

1.4 单向阀机构

根据松散砂层岩心中的射流原理^[10],设计了新



图5 内层衬管

Fig.5 Inner liner

型射流机构,如图6所示。钻井液经过通道1流经通道2和3,引导取心筒中的钻井液顶开单向阀经过通道4和5流出,减少样品进入取心筒的阻力,提高岩心采取率,同时,阻隔泥浆倒灌取心筒,不会对进入取心筒的岩心造成扰动。

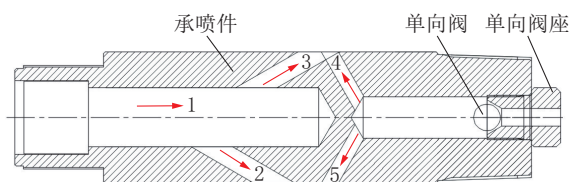


图6 单向阀机构

Fig.6 The structure of check valve

2 浅软层砂层取心工艺

2.1 钻进取心

根据浅软层砂层松散的特点,泵量不宜过大、转速不宜过高,按照泵量 150~200 L/min、钻压 50~60 kN、转速 30~50 r/min 的工艺进行取心钻进,钻进过程中注意钻进速度,如钻速 < 20 m/h,适当调整排量和钻压,直至钻完所需取心长度。过程中要时刻注意泥浆泵压力,若出现堵心现象,及时终止取心作业。

2.2 投球割心

钻进取心完成后,停钻、停泵,钻柱不提离井底(保持钻压),卸开顶驱球阀,投入直径 50 mm 钢球,打开泥浆泵(泵量约 900 L/min)将钢球送到相应位置,待泵压升高又降低并平稳后(该泵压比正常钻进大 0.5~1 MPa),表明球阀已经关闭。如果泵压一直升高,说明球阀未完全关闭,这时可考虑“干烧”(排量约 10 L/min)封堵岩心。

2.3 起钻出心

取心钻具提至甲板后,将内管总成从外管总成中提出,拆卸球阀取出装有岩心的内层衬管,按要求进行切割与封装,清理钻具后组装。

3 超深水浅软层砂层取心实践

优化形成的球阀翻转式保形取心钻具搭载某钻井平台在水深 1500 m、埋深约 200 m 的目的层位开展取心实践,共取心试验 1 回次,获得砂层岩心 5 m,岩心直径 80 mm,岩心采取率 90.91%。由于地层含气,内层衬管抽出后可以看到气体逸出后衬管中的岩心出现明显的裂隙,样品完整度较高,如图 7 所示,高质量完成了取心试验目标任务。



图7 获取的超深水砂层岩心

Fig.7 Obtained ultra-deepwater sand core

4 结论

(1)设计的超前保形取心钻头可有效保护松散砂层岩心,保证岩心质量;优化的导槽球阀翻转结构,结合稳定的液压驱动,提升了球阀翻转可靠性,保证岩心卡取;采用透明衬管以及单向阀设计,解决了砂层岩心堵塞问题,保证岩心采取率。

(2)通过海上现场试验验证了保形取心器具砂层钻进取心稳定性及球阀翻转可靠性,表明球阀翻转式保形取心器具优化设计合理,可为南海超深水浅软层砂层取心提供新的解决方案。

参考文献(References):

- [1] 吴必豪,马开义,陈邦彦.西太平洋天然气水合物矿藏找矿远景刍议[J].矿床地质,1998,17(S1):741-744.
WU Bihao, MA Kaiyi, CHEN Bangyan. Discussion on prospecting of gas hydrate resources in the Western Pacific[J]. Mineral Deposits, 1998,17(S1):741-744.
- [2] 王淑红,宋海斌,颜文.全球与区域天然气水合物中天然气资源量估算[J].地球物理学进展,2005,20(4):1145-1154.
WANG Shuhong, SONG Haibin, YAN Wen. The global and regional estimation of gas resource quantity in gas hydrates[J]. Progress in Geophysics, 2005,20(4):1145-1154.
- [3] 李兵,吴尚利.应用全封闭取心技术提高松软破碎地层岩心收获率[J].钻采工艺,1994,17(1):11-14.
LI Bing, WU Shangli. The application of completely enclosed coring technology to improve the core yield in soft and broken formation[J]. Drilling & Production Technology, 1994,17(1):11-14.

- [4] 杨玉坤,成伟,孔凡亮,等.松软地层取心工具加压机构工作状态分析[J].钻采机械,2001,24(1):50-52.
YANG Yukun, CHENG Wei, KONG Fanliang, et al. Analysis of working status of pressurization mechanism for coring tool in unconsolidated formation[J]. Drilling & Production Technology, 2001,24(1):50-52.
- [5] 杨玉坤,成伟.我国松软地层取心技术浅谈[J].石油机械,2003,31(S1):107-109.
YANG Yukun, CHENG Wei. Discussion on coring technology of soft stratum in China[J]. China Petroleum Machinery, 2003, 31(S1):107-109.
- [6] 杨玉坤,成伟.国外松软地层取心技术浅谈[J].石油机械,2002,30(10):65-67.
YANG Yukun, CHENG Wei. Discussion on foreign soft stratum coring technology[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(10):65-67.
- [7] 吴金生,陈礼仪,张伟.破碎松软地层取心钻头孔底流场数值模拟及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013(7):107-110.
WU Jinsheng, CHEN Liyi, ZHANG Wei. Numerical stimulation of Bottom flow field of core bit in broken Soft formation and the application[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013(7):107-110.
- [8] 鲁金峰.胜利松软地层密闭取心技术在盘2-检1井的应用[J].科技创新与应用,2013(11):2-3.
LU Jinfeng. Application of shengli soft formation closed coring technology in well Pan 2[J]. Technology Innovation and Application, 2013(11):2-3.
- [9] 冯帆,万步炎,黄筱军.海底松软地层取心钻头的设计与结构优化[J].机械设计,2016,33(7):21-26.
FENG Fan, WAN Buyan, HUANG Xiaojun. Structure design and optimization of coring bit for soft sea Bottom[J]. Journal of Machine Design, 2016,33(7):21-26.
- [10] 陈云龙,阮海龙,朱慈广,等.松软泥砂地层取心钻具的设计及应用[J].地质装备,2018,19(6):26-28,25.
CHEN Yunlong, RUAN Hailong, ZHU Ciguang, et al. Design and application of core drilling tool in soft mud sand stratum[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2018, 19(6):26-28,25.
- [11] 陈浩东,吴艳辉,马传华,等.超深水超浅层储层无隔水管钻井取心难点与对策[J].钻探工程,2024,51(6):119-124.
CHEN Haodong, WU Yanhui, MA Chuanhua, et al. Difficulties and countermeasures of core drilling without riser in ultra-deep water and ultra-shallow reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2024,51(6):119-124.
- [12] 赵义,刘海龙,蔡家品,等.TKP194-80型密闭保压取心工具的研制与应用[J].钻探工程,2023,50(4):77-83.
ZHAO Yi, LIU Hailong, CAI Jiapin, et al. Development and application of TKP194-80 sealed pressure-holding coring tool[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):77-83.
- [13] 刘军,庞雄,颜承志,等.南海北部陆坡白云深水区深水沉积结构要素[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(4):992-998.
LIU Jun, PANG Xiong, YAN Chengzhi, et al. Deepwater depositional elements in baiyun deepwater area of the northern continental slope, South China sea[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011,41(4):992-998.
- [14] 魏巍.南海中沙天然气水合物资源远景区海底沉积物的物理力学性质研究[J].海岸工程,2006,25(3):33-38.
WEI Wei. Study on physicommechanical properties of Bottom sediments from the zhongsha natural gas hydrate prospective area of the South China sea[J]. Coastal Engineering, 2006, 25(3):33-38.
- [15] 朱杰然.深海天然气水合物钻探取样中的“桩效应”分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):18-21.
ZHU Jieran. Study on the “Pile Effect” in gas hydrate sample coring in deep sea[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(8):18-21.
- [16] 阮海龙,陈云龙,蔡家品,等.南海超深水钻探取样钻具优化及应用[J].中国海上油气,2017,29(1):105-109.
RUAN Hailong, CHEN Yunlong, CAI Jiapin, et al. Optimization and application of a sampling drilling tool for ultra-deepwater drilling in South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017,29(1):105-109.

(编辑 王跃伟)