

# 非常规地质能源钻探取心技术研究综述

郭威<sup>1,2</sup>, 贾瑞<sup>1,2</sup>, 王元<sup>1,2\*</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

**摘要:** 在全球能源转型与我国“双碳”目标深入推进的背景下, 非常规地质能源已成为核心接替资源, 钻探取心是获取其储层精准物性参数的重要手段。针对非常规储层的复杂物性特征、不同能源的专属取心挑战, 以及现有研究往往按能源类型分类、缺乏技术共性梳理的现状, 本文以技术方法为核心, 系统梳理保压取心、保形取心、大直径取心、密闭取心、孔底冷冻取心五大技术, 阐述各技术的核心原理、国内外技术应用现状。分析表明, 我国已形成具有自主知识产权的取心技术装备体系, 在深海深地等领域实现工程突破, 但现有技术仍存在单一技术适配性有限、极端环境应对能力不足、效率与成本难以兼顾等难题。本文进一步剖析技术发展的核心挑战, 提出技术融合、智能升级、环境适配、绿色高效、原位测试的发展方向, 为该领域的技术创新与工程实践提供系统性参考。

**关键词:** 非常规地质能源; 钻探取心技术; 保压取心; 保压保形; 密闭取心; 孔底冷冻取心

**中图分类号:** P634; TE244 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)02-0001-12

## A review of coring technology for unconventional geological energy

GUO Wei<sup>1,2</sup>, JIA Rui<sup>1,2</sup>, WANG Yuan<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory of Complex Condition Drilling and Exploitation Technology, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** Against the backdrop of the global energy transition and the in-depth advancement of China's carbon peaking and carbon neutrality goals, unconventional geological energy has become a core alternative resource, and drilling coring is an important means to obtain accurate physical property parameters of its reservoirs. In view of the complex physical properties of unconventional reservoirs, the specific coring challenges associated with different energy types, and the current situation of existing studies—most of which are classified by energy type and lack a systematic summary of technical commonalities—this paper focuses on technical methodologies, systematically sorting out five major technologies: pressure-retaining coring, shape-preserving coring, large-diameter coring, sealed coring, and downhole freezing coring. The core principles and the current status of domestic and foreign technical applications of each technology are elaborated. The study shows that China has established a coring technology and equipment system with independent intellectual property rights and achieved engineering breakthroughs in scenarios such as deep sea and deep earth. However, the existing technologies still have some challenges, including limited adaptability of a single technology, insufficient capability in responding to extreme environments, and difficulty in balancing efficiency and cost. This paper further analyzes the core challenges in technological development and puts forward the development directions of technical integration, intelligent upgrading, environmental adaptation, green and high efficiency, and in-situ testing providing a systematic reference for technological innovation and engineering practice in this field.

收稿日期: 2026-02-10; 修回日期: 2026-02-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.001

基金项目: 深地国家科技重大专项课题“高温泥浆智能调控系统”(编号: 2024ZD1000803)

第一作者: 郭威, 男, 汉族, 1979年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要从事非常规地质能源钻采理论与技术装备研发工作, 吉林省长春市西民主大街938号, guowei6981@jlu.edu.cn。

通信作者: 王元, 男, 汉族, 1988年生, 系副主任, 教授, 地质工程专业, 博士, 主要从事非常规地质能源钻采理论与技术装备研发工作, 吉林省长春市西民主大街938号, wy2019@jlu.edu.cn。

引用格式: 郭威, 贾瑞, 王元. 非常规地质能源钻探取心技术研究综述[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 1-12.

GUO Wei, JIA Rui, WANG Yuan. A review of coring technology for unconventional geological energy [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 1-12.

**Key words:** unconventional geological energy; drilling coring technology; pressure-retaining coring; pressure and shape preservation; sealed coring; downhole freezing coring

## 0 引言

在全球能源转型加速与我国“双碳”目标深入推进的背景下,传统化石能源(石油、常规天然气、煤炭)的开采利用面临资源递减与环保约束双重压力,能源结构优化转型已成为必然趋势。非常规地质能源凭借其巨大的资源潜力、清洁低碳的利用特性,成为我国能源安全战略的核心接替资源与能源结构转型的重要载体。非常规地质能源是指赋存状态、成藏机理或开采方式显著区别于常规油气的能源类型,主要包括油页岩、天然气水合物、页岩

气、煤层气、致密油气、地热及油砂等,其资源总量远超常规能源,是保障国家能源安全、推动绿色低碳发展的战略资源<sup>[1-2]</sup>。钻探取心是精准获取非常规储层原位物性、结构特征等核心参数的重要手段,其技术水平直接决定储层评价的准确性、开发方案的科学性与工程实施的经济性<sup>[3-4]</sup>。非常规地质能源储层的共性特征是低孔低渗、非均质性强、脆性矿物占比高,部分类型兼具疏松、易破碎、温压敏感等特殊属性,具体物性参数与关键特征见表1<sup>[5-12]</sup>。

表1 非常规能源钻探取心挑战  
Table 1 Coring challenges in unconventional energy drilling

能源类型	典型地层岩性	钻探取心挑战
油页岩/页岩油	暗色页岩/粉砂质页岩	超深层高温高压、轻质组分易逸散
页岩气	富有机质页岩	层理发育、易断裂、气体组分易逸散
煤层气	烟煤/无烟煤	强度低、易解吸、易破碎
致密气	长石石英砂岩	非均质性强、裂缝发育
致密油	细砂岩/粉砂岩	岩心易堵塞、完整性差
天然气水合物	粉砂质黏土/砂岩	温压敏感、易分解、疏松易碎
油砂	疏松砂岩	岩心易松散、脱落

因此,非常规地质能源开发对钻探取样技术提出了三大核心需求:一是“保真性”,需最大限度保留岩心、流体的原位压力、温度、含气性、流体相态等关键参数;二是“环境适配性”,需适配深层高压、深海、高温、永久冻土等极端环境;三是“高效经济性”,需考虑缩短取样周期、降低作业成本等工程需求。

当前,国内外关于非常规钻探取样技术的研究多按能源类型分类,如分别阐述页岩气取样技术、煤层气取样技术等,虽能聚焦单一能源的取样需求,但难以体现不同能源取样技术的共性原理与跨能源应用价值,不利于技术的交叉融合与整体创新。因此,本文以技术方法为核心维度,系统梳理非常规钻探取样技术的核心原理、创新突破与多能源应用,为技术研发与工程实践提供系统性参考。

## 1 非常规地质能源钻探取心技术体系

针对非常规地质能源储层特性及钻探取样核

心需求,系统总结了保压取心、保形取心、大直径取心、密闭取心、孔底冷冻取心五大技术的原理与其在不同能源领域中的应用,各技术与非常规地质能源的适配关系见表2,技术对比见表3。

### 1.1 保压取心技术

保压取心技术的核心目标是突破常规取心技术在压力敏感型地层和高精度测试中的局限性,技术核心思路在于“以压力保原始、以密封控逸散”,通过保压取心获取的岩心能够保持原始地层压力,保留更完整的流体赋存状态和岩石孔隙结构,为实验室相态模拟、高压渗透率测试等提供高质量样本。

国际上针对天然气水合物赋存的深海低温高压环境及不同地层特性,已研发多代保压取样钻具并实现工程应用,保压功能的实现有球阀式和翻板阀式两大类。美国主导的深海钻探计划(Deep Sea Drilling Program, DSDP)最早开展球阀式保压取样钻具系统性研究,针对深海沉积地层研发保压取样

表 2 钻探取心技术与非常规地质能源适配度量化  
Table 2 Drilling coring technologies for unconventional geological energy

能源类型	保压取心	保形取心	大直径取心	密闭取心	冷冻取心
油页岩/页岩油	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★	★★
页岩气	★★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★
煤层气	★★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★
致密气	★★★★★	★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★
致密油	★★★	★★★★	★★★★★	★★★★	★★
天然气水合物	★★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★	★★★★★
油砂	★★	★★★★★	★★★★	★★★★★	★★

注:评定依据为能源储层特性、取心技术适配性及工程需求,★★★★★表示适配度为极高,★★★★★为高,★★★★为中等,★★为低。

表 3 非常规地质能源钻探取心技术对比  
Table 3 Comparison of drilling coring technologies for unconventional geological energy

取心技术	核 心 优 势	主 要 局 限 性	适用核心场景	技术复杂度	作业成本	取心效率
保压取心	保留原位压力,流体赋存状态完整;适配压力敏感地层	结构复杂,密封性敏感;保压成功率不稳定;取样直径受限	页岩气、煤层气、天然气水合物、页岩油	高	高	中
保形取心	岩心形态/微观结构完整;适配疏松、破碎、软塑性地层	钻具加工/维护成本高;极端高温需特殊材料;易受冲洗液影响	油砂、天然气水合物、煤层气、页岩气	中高	中高	中
大直径取心	岩心结构完整,减少钻井液侵蚀;钻具结构相对简单;适配多类型力学实验	扭矩/间隙控制难,易卡钻;孔斜控制难度大;复杂地层易漏失/缩径	致密油、页岩油/气、煤层气、岩盐	中	中	中高
密闭取心	规避钻井液污染,保留岩心原始物化性质;适配多井型、多地层	作业周期长;极松散地层适配性有限;传统密闭液有污染风险	页岩油/气、煤层气、油砂、常规油气拓展	中	中高	中
冷冻取心	适配温度敏感地层;结构简单,故障率低;抑制挥发性物质逸散	冷源保冷难度大;样品后处理复杂,需全程低温;成本高	天然气水合物、页岩气、煤层气、致密气	中	高	中

筒 (Pressure Core Barrel, PCB), 基于绳索保压取心结构设计, 底部设直径 58 mm 球阀, 上部集成取样机构、排气孔、减压阀及浮动活塞蓄压器, 通过球阀式密封+主动补偿式保压, 取心完成后球阀关闭实现初级密封, 浮动活塞蓄压器在起钻过程中主动补充压力, 维持岩心筒内压力基本不变, 排气孔与减压阀用于压力微调<sup>[13]</sup>。1982 年, PCB 在布莱克外海岭水深 3184 m 处成功应用, 获取原位压力 10.3~32.3 MPa 的岩心样品, 为早期资源评估提供关键依据, 后续在白令海东南部、黑海等区域部署, 验证了其在深海软质沉积地层的适应性, 但存在岩心采取率低、无法带压转移分析的局限<sup>[14]</sup>。国际大洋钻探计划 (Ocean Drilling Program, ODP) 在 PCB 基础

上, 针对中深层水合物储层研发保压取样器 (Pressure Core Sampler, PCS), 该钻具最大工作压力 69 MPa, 可获取长度 860 mm、直径 42 mm 的岩心<sup>[15]</sup>, PCS 在多个航次大规模应用, Leg204 航次 39 次取心平均采取率达 98.1%, 获得高饱和度水合物岩心<sup>[16-17]</sup>。日本针对南海海槽深水砂质水合物储层, 委托美国 Aumann & Associates 公司研发了保温保压取样器 (Pressure-Temperature Core Sampler, PTCS) 及混合保压取样系统 (Hybrid Pressure-Coring System, Hybrid PCS)。PTCS 采用球阀式密封+主动补偿式保压, 实现密封和压力补偿, 并增设保温层与液氮冷却系统, 通过保温层隔热与液氮冷却将岩心温度控制在 2 °C 以下, 最大

工作压力 24 MPa, 1999—2000 年在南海海槽航次累计取心 203.5 m, 保压回收率 79.3%<sup>[18]</sup>。Hybrid PCS(图 1<sup>[19]</sup>)融合温度控制与高压补偿能力, 工作压力提升至 35 MPa, 2012 年在 Expedition 802 航次应用中岩心采取率达 69%, 实现全程温压监控, 为日本 2013 年水合物试采提供参数支撑<sup>[19]</sup>。翻板阀式保压取样钻具最有代表性的是欧盟针对软泥、砂层至硬质页岩等不同岩性地层研发的冲击式(Fugro Pressure Corer, FPC)与旋转式(HYACE Rotary Corer, HRC)两套保压钻具, 均采用翻板阀密封。

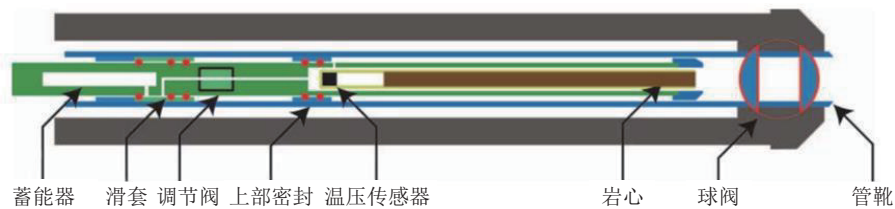


图 1 Hybrid PCS 结构

Fig.1 Schematic diagram of Hybrid PCS

国内在天然气水合物及深地油气保压取样钻具领域持续攻关, 形成了多款具有自主知识产权的装备与技术, 覆盖深海、陆地超深层等多类场景。国内翻板阀式保压取样钻具方面, 四川大学与深圳大学提出深部岩石原位“五保”取心概念, 研发了深部原位保真取心系统, 包含“随钻随成膜”密封模块、原位温压传感器、翻板阀密封结构及高压蓄能补偿系统等核心机构, 技术原理为复合密封+高精度主动补偿式保压, 通过“随钻随成膜”技术在岩心表面形成保护膜, 配合蓄能补偿系统实现压力保持。该系统于 2022 年搭载“深海勇士”号在南海海马冷泉 1370 m 水深处获取了 13.8 MPa、6.51 °C 的可燃冰样品, 2023 年搭载“奋斗者”号在 1385 m 水深处获取了保压 14.5 MPa 的含水合物沉积物样品<sup>[23-24]</sup>。北京探矿工程研究所研发的 TKP-1 型压入式板阀保温保压取样钻具(图 2<sup>[25]</sup>), 采用压入式取心, 通过翻板阀式密封+补偿式保压+被动保温实现保温保压功能, 适用于软—中硬地层, 2015 年在南海天

FPC 以钻井液驱动水下冲击锤贯入地层获取岩心, 适用于松散地层, HRC 通过井下螺杆马达驱动钻头旋转取心, 适用于硬质或层理发育地层, FPC 与 HRC 在多个航次及油田应用中岩心采取率分别达 79.9% 与 97.3%<sup>[20-21]</sup>。为适配 MeBo200 水下钻机, 德国研发了水下钻机适配保压取样器(MeBo Druckkern Probennehmer, MDP), 靠蓄压器维持 20 MPa 压力, 突破对钻探船的依赖, 2011 年在尼日利亚三角洲航次成功取心, 为偏远海域低成本勘探提供方案<sup>[14, 22]</sup>。

然气水合物富集层位进行了 18 回次取样作业, 钻探进尺 18 m, 总计获得岩心长度 >9.85 m, 岩心采取率 >54.7%, 保压成功率达到 77.7%; 在 TKP-1 型钻具的基础上还研发了 TKP-2 型钻具, 采用回转式取心, 通过球阀式密封+补偿式保压+被动保温实现保温保压功能, 适用于中硬—硬地层, 2019 年在南海共进行了 7 个回次取样作业, 样品直径为 51 mm, 球阀关闭率 100%, 采样过程失压率 <10%, 保压成功率 100%, 岩心采取率 77%, 达到了预期的试验效果<sup>[25]</sup>。湖南科技大学研发的“海牛 II 号”海底钻机, 在 2060 m 水深创造了 231 m 的钻探深度纪录, 配套保压系统采用“液压驱动密封阀+压力补偿器”技术, 保压范围 0~50 MPa, 岩心直径 50 mm, 可精准获取硬岩、软岩地层可燃冰样品, 填补我国海底钻机深海百米级保压取心装备空白<sup>[26-27]</sup>。中国石油新疆油田公司及大庆钻探工程有限公司, 主要针对页岩油藏和常规油藏保压取心技术攻关, 研发了球阀式保压取样钻具, 取得了较好的保压取心效果<sup>[28-29]</sup>。



图 2 TKP-1 型压入式板阀保温保压取样钻具结构

Fig.2 Structural diagram of the press-in plate valve pressure-temperature core sampler (TKP-1)

保压取心技术的核心优势是带压取心,可避免岩心内流体逸散与应力释放,真实反映地层原始状态,能有效应对高压、易挥发、水合物等复杂地层,应用价值突出。但该技术存在局限性:机械保压机构结构复杂、操作难度大,密封性敏感易致取心失败,取心直径受限且质量不稳;受地层复杂性、操作规范性及孔内温压变化影响,保压成功率不稳定,难以持续高效取心。

## 1.2 保形取心技术

保形取心技术的核心技术思路在于“以约束固形态、以防护减损伤”,该技术通过针对性设计的约束与防护结构,减少取心过程中岩心的挤压变形、溃散破碎及环境侵蚀,最大限度保留岩心原始几何形态和微观结构完整性。

国外保形取心技术起步早、体系成熟,贝克休斯(Baker Hughes)、哈里伯顿(Halliburton)、Security DBS等大型石油公司引领技术发展,形成了以低摩阻衬筒、高效岩心固定及复杂工况适配为核心的技术路线<sup>[30-31]</sup>。贝克休斯作为早期推动者,其研发的玻璃钢衬筒保形取心工具采用低摩阻玻璃钢作为内筒衬管材料,配套抓式岩心爪可在取心结束后快速收缩封闭内筒,该钻具在墨西哥湾疏松砂岩地层应用时,岩心采取率稳定在90%以上<sup>[30,32]</sup>。Security DBS公司的Posiclose全封闭式取心工具采用隐藏式岩心爪+双密封衬筒结构,岩心爪在取心过程中不与岩心接触,避免扰动,该工具在渤海石油现场应用中平均岩心采取率82.93%,较

常规海洋取心工具提高了48%<sup>[33]</sup>。

国内保形取心技术经多年攻关,逐步形成了具有自主知识产权和本土化适配优势的技术体系<sup>[31,34]</sup>。胜利油田研发的Rb-215-100型保形取心工具采用双瓣组合式铝合金衬筒,通过锥度卡箍连接固定,岩心出筒后无需拆解内筒即可直接切割冷冻,配套导向式岩心爪在取心过程中不与岩心接触,有效避免松散岩心破碎,该工具在胜利油田单家寺极疏松稠油藏应用中,平均岩心采取率76.1%~94.4%<sup>[32]</sup>,其后续技术在南海LD22-1、LD8-1构造8口井应用中,采用尼龙衬筒与防冲刷PDC钻头,累计取心进尺超500 m,平均岩心采取率94.6%,单筒取心进尺8.01 m<sup>[34]</sup>。川庆钻探工程公司针对四川盆地碳酸盐岩破碎地层,形成多类型衬筒+涂层减阻的川式保形取心技术,开发了PVC衬筒(适用井温 $\leq 80^{\circ}\text{C}$ )、玻璃钢衬筒(适用井温 $\leq 120^{\circ}\text{C}$ )、铝合金内筒(耐温无限制)三类衬筒以适配不同井深与地层温度,同时对钢制内筒表面喷涂聚四氟乙烯涂层,将摩擦系数降至0.05,该技术在川东北罗家寨气田裂缝性灰岩地层取心中,岩心采取率从58%提升至89%<sup>[31,35]</sup>。中国石油大学(华东)将保温保压取样技术与保形技术相结合,研发了煤层气保温保压保形取心工具(图3<sup>[36]</sup>),设计了复合式煤层气保温取心内筒,采用随动保形胶膜直接对入筒煤心进行全包裹,阻隔钻井液与煤心直接接触,避免钻井液浸泡、污染导致煤心软化、溃散<sup>[36]</sup>。

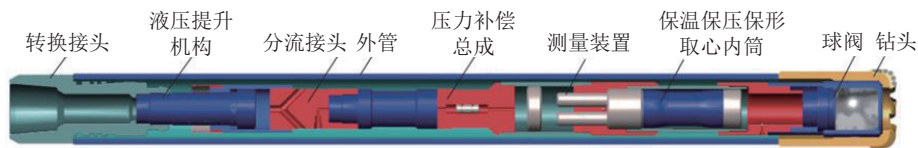


图3 保温保压保形取心工具结构

Fig.3 Structure diagram of coring tool with pressure maintenance, thermal insulation and shape preservation

保形取心技术优势显著,岩心形态保真度高,可完整保留原始几何形态、微观结构及裂缝、层理等地质特征,适配微观分析等高精度研究,且适应范围广,能应对软塑性、疏松未胶结等常规取心技术难以处理的地层。但该技术也存在局限性:钻具结构复杂、加工及维护成本高,取心效率偏低,极端高温地层需用特殊材料,疏松地层若冲洗液控制不当还易出现岩心溃散。

## 1.3 大直径取心技术

大直径钻探取心技术的核心技术思路是“以直径换质量、以结构控扰动”,取心直径通常 $\geq 60\text{ mm}$ ,通过增大岩心直径减少钻井液对岩心内部的侵蚀,完整保留岩层结构与原始物理化学特征,为实验室力学实验、气体解析等提供高质量样本。

该技术的核心优势是钻具结构和施工工艺较为简单,美国页岩气区(Marcellus、Eagle Ford、

Bakken)与加拿大 Athabasca 油砂区所进行的钻探取样工作岩心直径普遍大于 100 mm,旨在完整保留储层的天然裂缝、沥青脉与层理结构,解决小样本所引发的非均质性表征偏差、渗透率尺度效应及裂缝网络建模失真等问题<sup>[37-40]</sup>。

国内在岩盐、煤层气、页岩气、天然气水合物及水文地质钻探等领域采用该技术成效显著<sup>[41-46]</sup>。其中,安徽省地质矿产勘查局研发的大直径加重管组合绳索取心钻具(图 4<sup>[41]</sup>)采用  $\Phi 114$  mm 绳索取心钻杆与  $\Phi 140$  mm 加重管组合设计,创新实现孔底加压模式,搭配交替式底喷、螺旋阶梯式底喷等专用金刚石钻头,有效优化钻具稳定性与冲洗液循环效率,该钻具在浙江临安页岩气生产试验中表现优异,岩心直径为 80.5 mm,在 2328.18 m 孔深条件下平均岩心采取率达 98.55%<sup>[41-42]</sup>。针对深部成盐盆地地层,河南省地热能开发利用有限公司等研发改

进的 S95-SF 绳索取心钻具,创新采用“上部非取心孔段石油钻井工艺+下部绳索取心工艺”,终孔口径达 120.6 mm,采用的大环空绳索取心技术及工艺达国际先进水平<sup>[43]</sup>。江苏煤炭地质局针对含盐地层,采用 215.9 mm 钻头搭配大口径绳索取心钻具,在丰县岩盐井 12-6 井 520~735.6 m 井段应用,纯钻效 0.96 m/h、岩心采取率 83.3%,效率较普通取心工艺提升 65%<sup>[44]</sup>。针对页岩油勘探中的致密泥岩地层,中国地质科学院勘探技术研究所研制的 KT-194 型大口径常规取心钻具,在松辽盆地松页油 2 井 8 个回次取心进尺 133.37 m,平均岩心采取率 99.1%<sup>[47]</sup>。甘肃煤田地质局一四五队针对天然气水合物勘探中高海拔、破碎地层等难题,选用  $\Phi 127$  mm 绳索取心钻具配套专用设备,采用“少钻勤提、快取速冷”工艺及定制泥浆体系,在青海乌丽地区 907 m 深井施工中岩心采取率保持 95% 以上<sup>[48]</sup>。

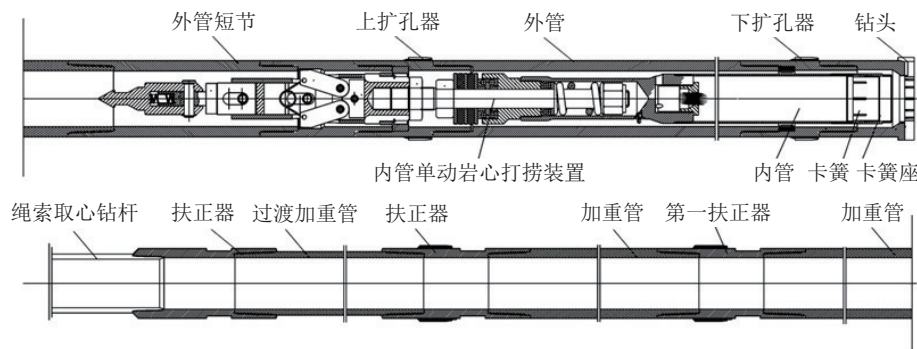


图 4 大直径加重管组合绳索取心钻具结构

Fig.4 Structure diagram of combined large-diameter wire line drilling tool with a heavy pipe

大直径取心技术取心直径通常  $\geq 60$  mm,可有效降低钻井液侵蚀影响,保障岩心结构与理化特征的完整性,且能适配煤系地层、盐岩层等多种非常规勘探场景。但该技术的钻具设计需满足高强度、高精度配合要求,外管扭矩承载与内外管间隙控制难度较高,易引发卡钻、打捞受阻等问题;同时,在复杂地层中孔斜控制难度大,水敏地层易缩径,松散砂层易漏失,需频繁调整钻井液性能或进行随钻堵漏,对钻进连续性与效率造成影响。

#### 1.4 密闭取心技术

密闭取心技术作为精准获取储层原始参数的核心技术,其原理是通过取心工具密封结构与专用密闭液的协同作用,在岩心进入取心筒后迅速形成密闭环境,避免钻井液污染和流体逸散,该技术已

广泛应用于常规油气田钻探,并逐步拓展至煤层气、页岩气、页岩油等非常规能源勘探领域。

国际深海钻探计划(DSDP)研发的保压取样筒 PCB 是早期密闭取心与保压技术结合的典型代表,该工具采用双管单动式结构,通过预先填充非侵蚀性胶体密闭液包裹岩心,配合球阀密封实现保压功能<sup>[13]</sup>,其压力补偿系统通过高压氮气储气室和压力调节器,在起钻过程中恒定向内筒补充压力,维持岩心筒内压力基本不变,避免天然气逸散,该工具在 DSDP Leg42、Leg62、Leg76 等航次中应用于天然气水合物取样,但受限于海域软地层特性,取心率较低,后续国际大洋钻探计划(ODP)研发的保压取心器 PCS 因地层适应性问题未延续密闭液包裹技术路线<sup>[3,13]</sup>。斯伦贝谢研发的胶体取心技术

通过预装在内筒中的胶体材料保护岩心,该胶体材质是高分子聚丙烯化合物,根据不同的耐温、地层属性需求,斯伦贝谢开发了多种不同属性的胶体材料,最高抗温达232.2℃,可应用于超深井胶体取心作业<sup>[49]</sup>。

国内以“川式”密闭取心系列工具为代表,经历了多代技术升级。初代ZMQ180-105工具设计了高压密闭液腔、单动式密封内筒及快速注液模块,通过密闭液快速填充+单动式密封实现密闭取心,在鄂尔多斯盆地苏X井实现岩心采取率近100%、密闭率87.3%的应用效果。后续优化的MQX194-120深井密闭取心工具采用了深井耐高温密闭液,设计了强化型密封腔、长距离密闭保压结构,采用

深井专用密闭液+多级密封的技术方案实现深井密闭取心,在塔里木东河X井5690.50~5839.58 m井段取心21筒次,平均岩心采取率97.43%、密闭率92.3%<sup>[50]</sup>。针对大斜度井取心难题,渤海油田采用YLRmb-8100型密闭取心工具,创新设计了连续密闭液补给系统,采用大斜度井专用密封结合防斜取心钻头,在B27S1井实现9回次取心采取率和密闭率双100%的效果<sup>[51]</sup>。中国地质调查局研发的TKP194-80型密闭保压取心工具(图5<sup>[52]</sup>),采用密闭液封堵+主动保压+球阀密封的复合技术方案,实现密闭与保压的双重效果,在山西晋中煤层气探井应用中,8回次取心总进尺37.51 m,岩心采取率84.4%,保压成功率87.5%<sup>[52]</sup>。

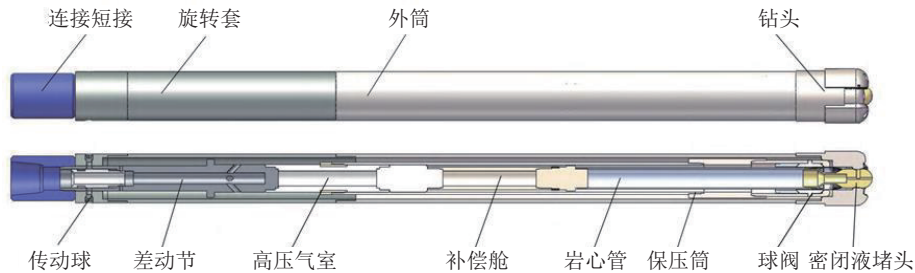


图5 TKP194-80A型保压密闭取心钻具结构

Fig.5 Structure diagram of the TKP194-80A pressure maintaining sealed coring tool

密闭取心技术保真效果突出,可最大限度维持岩心原始物化性质与含油、含气状态,规避钻井液污染和流体逸散,为储层评价提供精准原始数据。该技术适用范围广,适配常规油气田、煤层气等多类能源领域,直井、水平井等不同井型,以及高温高压、松散破碎等复杂地层,但存在作业成本高、周期长、极松散高破碎地层适应性有限、传统密闭液有污染风险等不足。

### 1.5 冷冻取心技术

冷冻取心技术的核心目标是突破常规取心技术在低温敏感型地层和高精度测试中的局限性,其技术核心思路在于“以低温保稳定、以冷冻控分解”。通过外部冷源在孔底冷冻取心,获取保持低温冷冻状态的岩心,抑制样品中挥发性物质逸散、避免颗粒迁移,从而获取高质量的未扰动样品。该技术在煤田勘探、水文地质、海洋沉积物调查等多领域得到广泛应用。

国外冷冻取心技术的研究起步较早,应用场景

更为广泛,涵盖河流沉积物、湖泊沉积物、海洋沉积物及冻土等。德国波茨坦地球研究中心开发了适用于数百米水深的冷冻取样器,该装置以乙醇为冷却介质,在瑞士楚格湖200 m水深的试验中成功获取了75 cm长的层理沉积物岩心<sup>[53]</sup>。加拿大阿尔伯塔大学研发了一种液氮原位冷冻技术用于获取松散砂层的未扰动样品,通过径向冷冻形成直径2 m、长度10 m的冷冻砂柱,再利用干钻技术回收样品,避免了传统取样导致的样品扰动<sup>[54]</sup>。加拿大不列颠哥伦比亚大学设计了一种活塞式冷冻取心钻具,利用液态二氧化碳作为冷冻剂,在取样器底部形成冷冻塞以密封样品,该装置在弗雷泽河的应用中实现了75%的平均岩心采取率,能有效保持沉积物与孔隙水的原始化学特性<sup>[55]</sup>。

国内对冷冻取心技术的研究主要聚焦于煤瓦斯含量测定、深部地质取心等工程需求,重点解决取心过程中气体损失、样品扰动等关键问题。河南理工大学提出一种煤层冻结取心方法,通过自行研

发的取心模拟装置,对含气煤层岩心开展冷冻试验,发现与常规取心相比,其解吸抑制率为40%~46%<sup>[56-58]</sup>。吉林大学提出了一种基于冷冻岩心阀的海底沉积物压力取样技术,该技术利用原位沉积物冷冻形成密封结构,避免了传统机械阀密封失效的问题,实验表明直径58 mm、长度80 mm、冷冻温度-40℃的冷冻岩心阀可承受43 MPa压力,适用于海洋天然气水合物取样<sup>[59]</sup>。吉林大学针对天然气

水合物取样过程易因温度变化发生分解的问题,提出了孔底冷冻取样法(图6),旨在通过外部冷源快速降低水合物岩心温度进而抑制水合物分解,研发了对流传热、相变传热、相变对流传热等多种制冷方式及配套冷源,以及基于提钻式和绳索式多个型号的钻具,最低可将岩心温度降至-30℃以下,并通过大量实验验证其能满足陆地及海域水合物勘探需求<sup>[60-64]</sup>。

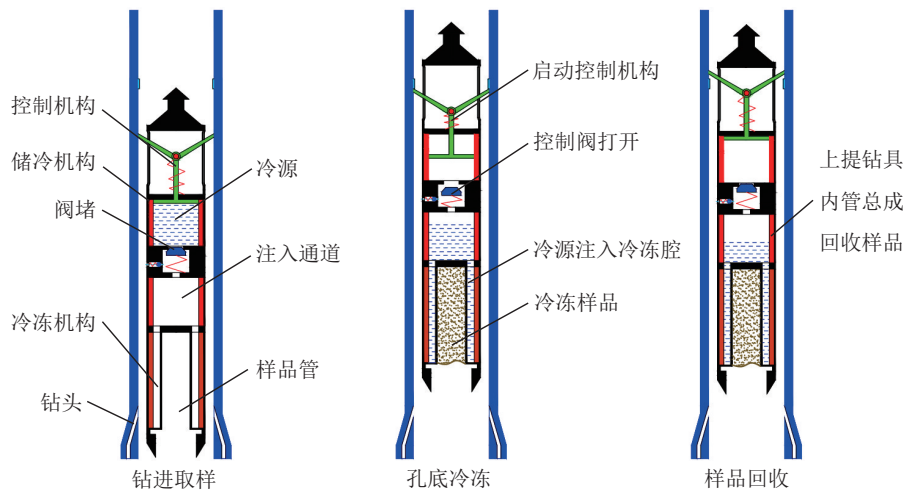


图6 孔底冷冻绳索取样钻具工作原理

Fig.6 Principle diagram of hole-bottom freezing wireline sampling drilling tool

孔底冷冻取心技术具备突出应用优势,可通过主动降低岩心温度有效适配温度敏感地层,同时该技术结构相对简单,核心部件为冷源存储和控制机构,相比保压取心的复杂球阀密封、压力补偿系统,操作维护更便捷,机械故障率也更低。但该技术冷源保冷难度大,受环境影响显著,且样品后处理复杂,冷冻岩心从取心到实验需全程维持低温,需专用冷藏、运输设备,增加了样品管理成本。

## 2 核心挑战与未来发展方向

### 2.1 核心挑战

尽管我国非常规地质能源钻探取心技术已取得显著进展,形成了系列化工具与相应工艺,但面对日益复杂的勘探开发环境(深层、超深层、深海、极地)与更高的技术要求(高保真、高效率、低成本),仍面临以下核心挑战。

(1)由储层自身特性带来的取样难题。非常规储层普遍具有低孔低渗、非均质性强的特点,且不同类型能源各具专属挑战,如天然气水合物温压敏

感易分解、煤层气强度低易破碎、页岩油气含气/轻质组分易逸散,对取样的保真性、完整性要求严苛。

(2)现有技术存在固有短板,单一技术难以满足多场景的需求。大直径取心钻具扭矩承载与间隙控制难度高,易卡钻且孔斜控制难;保压取心机构复杂、密封性敏感,保压成功率不稳定;保形与密闭取心加工维护成本高、取心效率偏低;孔底冷冻取心冷源保冷难,样品后处理成本高。

(3)极端勘探环境与工程经济性的双重要求。深层高温高压、深海、永久冻土等环境对技术环境适配性提出较高要求,而非常规地质能源大规模开发则需要技术兼顾取样效率与作业成本,现有技术难以同时满足。

### 2.2 未来发展方向

(1)技术融合:推进多保真技术交叉融合,将保压、保形、冷冻、密闭等技术结合,研发一体化保真取心系统,解决单一技术的局限性,提升跨能源类型的适配能力。

(2)智能升级:实现智能化与精准化升级,融入

随钻监测、智能控压、自动密封等技术<sup>[65-66]</sup>,实时监测岩心温压与结构状态,提高保压、保形成功率。

(3)环境适配:强化极端环境适配能力,针对超深层、深海、极地等场景,研发耐高温高压、抗低温的专用取心装备,突破环境制约。

(4)绿色高效:研发环保型密闭液、钻井液,降低取样过程的环境污染<sup>[67-69]</sup>,同时简化样品后处理流程,减少成本损耗,推动绿色发展。

(5)原位测试:研发孔底原位测试与分析一体化技术,实现岩心物性参数的孔底原位快速测试,避免样品二次扰动,提升测试数据的准确性与时效性;开发便携式原位测试设备,实现现场快速分析,缩短勘探周期。

### 3 结论

非常规地质能源勘探开发高度依赖钻探取心技术,其创新发展是推动非常规能源高效开发的关键支撑。本文系统梳理了保压、保形、大直径、密闭、孔底冷冻五大核心取心技术,量化分析了各取心技术对不同非常规地质能源类型的重要程度与敏感程度,完成了各技术的横向对比,明确了保压取心、冷冻取心对天然气水合物、页岩气、煤层气等压力/温度敏感型能源的核心适配性,以及保形取心、密闭取心对油砂、疏松砂岩等易溃散地层的关键作用。我国已形成具有自主知识产权的非常规地质能源钻探取心技术装备体系,在天然气水合物、页岩油、页岩气等领域实现了工程突破,为我国非常规能源勘探开发提供了重要技术支撑,但受非常规储层特殊物性(低孔低渗、非均质性强、温压敏感等)、深层深海等极端勘探环境的制约,现有技术仍存在单一技术适配性有限、极端环境应对能力不足、效率与成本难以兼顾、原位测试能力缺失、智能化与绿色化技术发展滞后等核心问题,单一技术难以满足非常规储层的复杂勘探需求。

非常规地质能源钻探取心技术需以解决工程实际问题为核心,以满足储层保真、环境适配、工程经济三大核心需求为目标,重点推进技术交叉融合,融入智能技术实现精准化与自动化升级,强化极端环境适配能力,研发绿色环保型材料与工艺,突破孔底原位测试与分析一体化技术,同时加强跨学科协同创新,持续提升技术综合性能。唯有通过多维度技术创新,才能满足我国非常规能源大规模勘探开发

需求,为国家能源安全与能源结构转型提供坚实的技术支撑,推动全球能源转型与“双碳”目标实现。

### 参考文献(References):

- [1] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.  
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(2):129-136.
- [2] 贾承造,庞雄奇,宋岩.论非常规油气成藏机理:油气自封闭作用与分子间作用力[J].石油勘探与开发,2021,48(3):437-452.  
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021,48(3):437-452.
- [3] 梁涛,阮海龙,赵义,等.非常规能源资源取心技术进展[J].地质装备,2024,25(S1):23-30.  
LIANG Tao, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. The progress of coring technology for unconventional energy resource[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2024,25(S1):23-30.
- [4] 张强,战启帅,张文良,等.页岩气地质调查井小口径绳索取心钻探技术分析[J].钻探工程,2022,49(5):72-79.  
ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, ZHANG Wenliang, et al. Application of small diameter wire-line core drilling in shale gas geological wells[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):72-79.
- [5] 蒋国盛,王荣璟.页岩气勘探开发关键技术综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(1):3-8.  
JIANG Guosheng, WANG Rongjing. Review of key technology for shale gas exploration and development[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(1):3-8.
- [6] 郭旭升,赵培荣,张宇,等.中国陆相页岩油分类分级评价的现状、挑战与发展趋势[J].石油与天然气地质,2025,46(6):1745-1761.  
GUO Xusheng, ZHAO Peirong, ZHANG Yu, et al. Current status, challenges, and future trends of the classification and grading evaluation of lacustrine shale oil in China[J]. Oil & Gas Geology, 2025,46(6):1745-1761.
- [7] 唐杰.煤层气资源勘探中高效保压取芯技术优化研究[J].山东煤炭科技,2025,43(9):75-78,87.  
TANG Jie. Optimization research on efficient pressure preservation and coring technology in coalbed methane resource exploration[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2025,43(9):75-78,87.
- [8] 朱如凯,李国欣,崔景伟,等.中国致密油气形成地质条件与勘探前景[J].石油学报,2025,46(1):17-32.  
ZHU Rukai, LI Guoxin, CUI Jingwei, et al. Geological accumulation conditions and exploration prospects of tight oil and gas in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025,46(1):17-32.
- [9] 陶士振,胡素云,王建,等.中国陆相致密油形成条件、富集规律与资源潜力[J].石油学报,2023,44(8):1222-1239.  
TAO Shizhen, HU Suyun, WANG Jian, et al. Forming conditions, enrichment regularities and resource potentials of continen-

- tal tight oil in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44 (8) : 1222-1239.
- [10] 李清平,周守为,赵佳飞,等.天然气水合物开采技术研究现状与展望[J].*中国工程科学*,2022,24(3):214-224.  
LI Qingping, ZHOU Shouwei, ZHAO Jiafei, et al. Research status and prospects of natural gas hydrate exploitation technology[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(3):214-224.
- [11] 季科,郭健翔,毕学军,等.高温干热岩采热系统钻探技术研究进展[J].*科学技术与工程*,2021,21(28):11900-11909.  
JI Ke, GUO Jianxiang, BI Xuejun, et al. Research progress on drilling technology of high-temperature hot dry rock mining heat system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21 (28):11900-11909.
- [12] 张家强,毕彩芹,徐银波,等.非常规油气地质调查工程进展与主要成果[J].*中国地质调查*,2023,10(1):1-19.  
ZHANG Jiaqiang, BI Caiqin, XU Yinbo, et al. Progresses and main achievements on unconventional oil and gas geological survey[J]. *Geological Survey of China*, 2023, 10(1):1-19.
- [13] Kvenvolden K A, Barnard L A, Cameron D H. Pressure core barrel: application to the study of gas hydrates, deep sea drilling project site 533, leg 76 [R]. Washington D.C: Initial Reports DSDP, 1982.
- [14] Abid K, Spagnoli G, Teodoriu C, et al. Review of pressure coring systems for offshore gas hydrates research[J]. *Underwater Technology*, 2015, 33(1):19-30.
- [15] Dickens G R, Schroeder D, Hinrichs K U. The pressure core sampler (PCS) on ODP leg 201: general operations and gas release [C]//D'Hondt S L, Jørgensen B B, Miller D J, et al, Proceedings of the Ocean Drilling Program. Online: Ocean Drilling Program, 2003:1-22.
- [16] 戴金岭,许俊良,宋淑玲,等.天然气水合物钻探取样技术现状与实施研究[J].*西部探矿工程*,2011,23(1):89-92.  
DAI Jinling, XU Junliang, SONG Shuling, et al. Current status and implementation research on drilling and sampling technology for natural gas hydrates[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2011, 23(1):89-92.
- [17] 许俊良,任红.天然气水合物钻探取样技术现状与研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2012,39(11):4-9.  
XU Junliang, REN Hong. Status of gas hydrate sampling technology and the research[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2012, 39(11):4-9.
- [18] Fujii T, Nakamizu M, Tsuji Y, et al. Methane-Hydrate Occurrence and Saturation Confirmed from Core Samples, Eastern Nankai Trough, Japan[M]//Collett T, Johnson A, Knapp C, et al. *Natural Gas Hydrates—Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2009:385-400.
- [19] Kubo Y, Mizuguchi Y, Inagaki F, et al. A new hybrid pressure-coring system for the drilling vessel Chikyū[J]. *Scientific Drilling*, 2014, 17:37-43.
- [20] Schultheiss P, Holland M, Humphrey G. Wireline coring and analysis under pressure: recent use and future development of HYACINTH system[J]. *Scientific Drilling*, 2009, 7:44-50.
- [21] Ryu B J, Collett T S, Riedel M, et al. Scientific results of the second gas hydrate drilling expedition in the Ulleung Basin (UBGH2)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47:1-20.
- [22] Bohrmann G. Report and Preliminary Results of RV MARIA S. MERIAN cruise MSM 15/2, Istanbul (Turkey)-Piraeus (Greece), 10 May-2 June 2010. Origin and Structure of Methane, Gas Hydrates and Fluid Flows in the Black Sea[M]. Bremen: Department of Geosciences, Bremen University, 2013.
- [23] Fu C H, Zhao L, Chen L, et al. In-situ temperature-and pressure-preserved sampler for marine natural gas hydrates: principles, techniques, and field application [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2025, 35 (12) : 2073-2088.
- [24] Liu G P, Jiang S Q, Jin Y P, et al. Mechanism of low-disturbance and high-pressure-retaining sampling of seafloor sediments at 10000-meter depth and its laboratory experiment and on-site sea trials [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2025, 35(11):1871-1884.
- [25] 刘协鲁,阮海龙,赵义,等.海域天然气水合物保温保压取样钻具研究与应用进展[J].*钻探工程*,2021,48(7):33-39.  
LIU Xielu, RUAN Hailong, ZHAO Yi, et al. Progress in research and application of the pressure-temperature core sampler for marine natural gas hydrate[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(7):33-39.
- [26] 彭奋飞,王佳亮,万步炎,等.适用于海底钻机的保压绳索取心钻具设计[J].*钻探工程*,2021,48(4):97-103.  
PENG Fenfei, WANG Jialiang, WAN Buyan, et al. Design of the pressure-coring tool for underwater drilling rig[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(4):97-103.
- [27] Wang J L, Hu Y J, Sun Y, et al. Sealing performance analysis of pressure controller in pressure core sampling for seafloor drill [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 240:213060.
- [28] 中新网新疆.刷新全球保压取心最深纪录 新疆油田实现5296米超深层、超高压页岩油保压取心作业[EB/OL]. (2025-08-22) [2026-02-02]. <http://www.xj.chinanews.com.cn/dizhou/2025-08-22/detail-iheukvkw8325769.shtml>.  
China News Network Xinjiang. Breaking the world's deepest record for pressure-preserving coring: Xinjiang oilfield realizes pressure-preserving coring operation of shale oil in the 5296-meter ultra-deep and ultra-high pressure formation [EB/OL]. (2025-08-22) [2026-02-02]. <http://www.xj.chinanews.com.cn/dizhou/2025-08-22/detail-iheukvkw8325769.shtml>.
- [29] 中国石油天然气集团有限公司.大庆钻探:自研工具两创取心历史[EB/OL]. (2024-11-13) [2026-02-02]. <https://www.cnpc.com.cn/cnpc/jtxw/202411/c8ec32205c7c4153bd44339f20e9e530.shtml>.  
China National Petroleum Corporation. Daqing drilling engineering company: self-developed tools set two coring records [EB/OL]. (2024-11-13) [2026-02-02]. <https://www.cnpc.com.cn/cnpc/jtxw/202411/c8ec32205c7c4153bd44339f20e9e530.shtml>.
- [30] 施山山,闫家,李宽,等.破碎地层取心钻具研究现状及展望[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2020,47(7):56-61.  
SHI Shanshan, YAN Jia, LI Kuan, et al. Research status and prospects of coring tools for broken formation[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47 (7):56-61.

- [31] 周刚,刘彬,邹强,等.川式保形取心技术的发展及应用[J].钻采工艺,2009,32(1):17-18,112.  
ZHOU Gang, LIU Bin, ZOU Qiang, et al. Development & application of Chuan-type form-keeping coring technique [J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(1): 17-18, 112.
- [32] 杨玉坤,孔凡亮,许俊良.Rb-215-100型保形取心工具[J].石油机械,1992,20(8):50-52,58.  
YANG Yukun, KONG Fanliang, XU Junliang. Rb-215-100 conformal coring tool [J]. China Petroleum Machinery, 1992, 20(8): 50-52, 58.
- [33] 姜伟,徐学翔.全关闭取心工艺在渤海湾的应用[J].石油钻采工艺,1997(3):40-44,107-108.  
JIANG Wei, XU Xuexiang. Application of posiclose coring technology in Bohai golf [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1997(3): 40-44, 107-108.
- [34] 刘丽黎,陈燕霞,蒋庆祥,等.胜利保形取心技术在南海油田应用[J].钻采工艺,1999,22(6):90-92.  
LIU Lili, CHEN Yanxia, JIANG Qingxiang, et al. Application of Shengli conformal coring technology in oilfields of the South China Sea [J]. Drilling & Production Technology, 1999, 22(6): 90-92.
- [35] 李伟成,陈晓彬,陈立,等.提高碳酸盐岩破碎地层取心收获率技术[J].钻采工艺,2007,30(2):37-38.  
LI Weicheng, CHEN Xiaobin, CHEN Li, et al. Coring technology of improving core recovery in the fractured carbonate formation [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(2): 37-38.
- [36] 王西贵,邹德永,杨立文,等.煤层气保温保压保形取心工具研制及现场应用[J].石油钻探技术,2021,49(3):94-99.  
WANG Xigui, ZOU Deyong, YANG Liwen, et al. Development and field application of a coalbed methane coring tool with pressure maintenance, thermal insulation, and shape preservation capabilities [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 94-99.
- [37] Walls D J, Diaz E, Derzhi N, et al. Eagle Ford shale reservoir properties from digital rock physics [J]. First Break, 2011, 29: 97-101.
- [38] Dieterich M, Kutchko B, Goodman A. Characterization of Marcellus Shale and Huntersville Chert before and after exposure to hydraulic fracturing fluid via feature relocation using field-emission scanning electron microscopy [J]. Fuel, 2016, 182: 227-235.
- [39] Li W X, Jin Z F, Cusatis G. Characterization of Marcellus shale fracture properties through size effect tests and computations [R]. Evanston: McCormick School of Engineering and Applied Science, 2017.
- [40] Bellows L A, Bohme V E. Athabasca oil sands [J]. Journal of Petroleum Technology, 1963, 15(5): 479-483.
- [41] 朱恒银,王强,田波,等.大直径加重管组合绳索取心钻具研究与应用[J].地质与勘探,2016,52(6):1159-1166.  
ZHU Hengyin, WANG Qiang, TIAN Bo, et al. Research and application of a combined large-diameter wireline drilling tool with a heavy pipe [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(6): 1159-1166.
- [42] 朱恒银,王强,张正,等.大直径加重管绳索取心技术在页岩气勘探中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):160-164.  
ZHU Hengyin, WANG Qiang, ZHANG Zheng, et al. Application research on large diameter weighted combined wire-line coring technology for shale gas exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10): 160-164.
- [43] 陈莹.“大口径绳索取心技术在深部成盐盆地中的试验研究”通过鉴定[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(2):43.  
CHEN Ying. Large-diameter wireline coring technology: experimental research and appraisal in deep salt-forming basins [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(2): 43.
- [44] 蔡卫明.大口径绳索取心工艺在丰县岩盐井勘探中的应用研究[C]//第十七届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.南昌:中国地质学会探矿工程专业委员会,2013: 207-209.  
CAI Weiming. Application research of large-diameter wireline coring process in the exploration of Fengxian Rock Salt Well [C]//Proceedings of the 17th National Academic Exchange Annual Conference on Exploration Engineering (Rock and Soil Drilling and Tunneling Engineering). Nanchang: Exploration Engineering Professional Committee of the Geological Society of China, 2013: 207-209.
- [45] 姚彤宝,张春林,刘晓刚.大口径绳索取心钻具在特厚软煤中的取心应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(12): 25-28.  
YAO Tongbao, ZHANG Chunlin, LIU Xiaogang. Application of large-diameter wire-line coring barrel in thick soft coal [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(12): 25-28.
- [46] 李晓晖,程林,李艳丽,等.深孔及松软地层大口径绳索取心钻具的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014(12): 49-52.  
LI Xiaohui, CHENG Lin, LI Yanli, et al. Study on large diameter wire-line coring tool in deep hole and soft formation drilling and the application [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014(12): 49-52.
- [47] 朱芝同,伍晓龙,董向宇,等.松辽盆地页岩油勘探大口径取心技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):45-50.  
ZHU Zhitong, WU Xiaolong, DONG Xiangyu, et al. Large diameter coring technology for shale oil exploration in Songliao Basin [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(1): 45-50.
- [48] 贡建林.大口径绳索取心钻进技术在天然气水合物勘探中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(4):20-23.  
YUAN Jianlin. Application of large diameter wire-line coring drilling technology in the gas hydrate exploration [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(4): 20-23.
- [49] 杨柳青,陈文才,曾欣.深层超深层取心技术进展与未来解决方案[J].钻采工艺,2024,47(2):113-120.  
YANG Liuqing, CHEN Wencai, ZENG Xin. Progress and future solutions of deep and ultra-deep coring technology [J]. Drilling & Production Technology, 2024, 47(2): 113-120.

- [50] 刘彬,付晓平.“川式”密闭取心技术的发展及应用[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(17):157-158.  
LIU Bin, FU Xiaoping. Development and application of Sichuan-style sealed coring technology [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021,41(17):157-158.
- [51] 蔡润峰,李文博.渤海油田大斜度井连续密闭取心技术[J].天津化工,2023,37(1):98-101.  
CAI Runfeng, LI Wenbo. Continuous sealed coring technology for highly deviated wells in Bohai Oilfield[J]. Tianjin Chemical Industry, 2023,37(1):98-101.
- [52] 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.
- [53] Kulbe T, Niederreiter R. Freeze coring of soft surface sediments at a water depth of several hundred meters[J]. Journal of Paleolimnology, 2003,29(2):257-263.
- [54] Hofmann B A, Segó D C, Robertson P K. In situ ground freezing to obtain undisturbed samples of loose sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(11):979-989.
- [55] Bianchin M, Smith L, Beckie R. Freeze shoe sampler for the collection of hyporheic zone sediments and porewater [J]. Ground Water, 2015,53(2):328-334.
- [56] Li S J, Wang L G, Wang Z F, et al. Study on the optimal dry ice dosage for coal seam freezing coring at different coring depths: experiment and modeling[J]. Results in Engineering, 2025,27:106677.
- [57] Wang L, Wang Z F, Qi C J, et al. Physical simulation of temperature and pressure evolution in coal by different refrigeration modes for freezing coring[J]. ACS Omega, 2019,4(23):20178-20187.
- [58] Wang L, Deng Z F, Wang Z F, et al. Simulated test of gas loss calculation during the freezing coring process in underground coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025,53(5):174-185.
- [59] Wu D Y, Peng J M, Sun M Z, et al. Experimental study on a pressure-coring technology based on a freeze-core valve for marine hydrate-bearing sediment sampling [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016,33:135-142.
- [60] Sun Y H, Wang Y, Guo W, et al. Hole-bottom freezing technique based on phase change heat transfer for gas-hydrates sampling: efficiency optimization of refrigeration change of phase [J]. Applied Thermal Engineering, 2018,130:722-734.
- [61] Wang Y, Xu T F, Zhang P Y, et al. Experimental investigation of coolant selection and energy efficiency analysis during gas hydrate-bearing sediment freeze-sampling [J]. International Journal of Refrigeration, 2020,120:221-236.
- [62] 郭威,孙友宏,陈晨,等.干冰升华式天然气水合物孔底冷冻取样器的研制[J].机械设计与制造,2011(2):99-101.  
GUO Wei, SUN Youhong, CHEN Chen, et al. The development of sample for gas hydrates by hole bottom freezing with dry ice sublimate [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(2):99-101.
- [63] 郭威,孙友宏,陈晨,等.陆地天然气水合物孔底冷冻取样方法[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(4):1116-1120.  
GUO Wei, SUN Youhong, CHEN Chen, et al. Sampling for land gas hydrates by hole bottom freezing [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011,41(4):1116-1120.
- [64] 孙友宏,刘大军,郭威,等.天然气水合物孔底冷冻取样技术及冷冻方式[J].哈尔滨工程大学学报,2013(11):1460-1464.  
SUN Youhong, LIU Dajun, GUO Wei, et al. The research on a sampling technology for gas hydrates by borehole bottom freezing and its freezing method [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013(11):1460-1464.
- [65] 李中,吴怡,李辉,等.海洋智能钻井井下工程参数实时测量技术及工具研发[J].钻采工艺,2025,48(1):63-69.  
LI Zhong, WU Yi, LI Hui, et al. Research and development of real-time measurement technology and tools for downhole engineering parameters in intelligent offshore drilling [J]. Drilling & Production Technology, 2025,48(1):63-69.
- [66] 陈龙.基于随钻测量设备的煤矿井下钻探智能监测系统架构与实践[J].煤矿机械,2025,46(8):171-173.  
CHEN Long. Architecture and practice of intelligent monitoring system for underground coal mine drilling based on measurement while drilling equipment [J]. Coal Mine Machinery, 2025,46(8):171-173.
- [67] 蒋炳,王猛,张之武,等.地质岩心钻探泥浆设备智能化研究现状及发展趋势[J].钻探工程,2025,52(S1):16-21.  
JIANG Bing, WANG Meng, ZHANG Zhiwu, et al. Research status and development trends of intelligent drilling fluid equipment for geological core drilling [J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):16-21.
- [68] 刘蓓,杨可,张雄.国内绿色勘查地质岩心钻探装备进展与发展建议[J/OL].地质与勘探,2026;1-20(2026-01-21) [2026-02-02].<https://link.cnki.net/urlid/11.2043.P.20260121.1642.002>.  
LIU Bei, YANG Ke, ZHANG Xiong. Progress and development suggestions of geological core drilling equipment for green exploration in China [J/OL]. Geology and Exploration, 2026; 1-20(2026-01-21) [2026-02-02].<https://link.cnki.net/urlid/11.2043.P.20260121.1642.002>.
- [69] 张平松,李圣林,时元玲.地面浅层智能型钻探物探一体化技术与装备分析[J/OL].地球物理学进展,2025;1-17(2025-06-26) [2026-02-02].<https://link.cnki.net/urlid/11.2982.p.20250626.1558.038>.  
ZHANG Pingsong, LI Shenglin, SHI Yuanling. Analysis of intelligent drilling and geophysical exploration integration technology and equipment for shallow surface [J/OL]. Progress in Geophysics, 2025; 1-17(2025-06-26) [2026-02-02].<https://link.cnki.net/urlid/11.2982.p.20250626.1558.038>.

(编辑 王跃伟)