

旋转式井壁取心技术发展现状与展望

史芳玉¹, 宁伏龙^{1,2,3*}, 李维^{1,2}, 刘志超^{1,2}, 胡晨¹, 孙雨轩¹, 刘志辉¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 科技部地球深部钻探与深地资源开发国际联合研究中心, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 井壁取心是对钻进取心的重要补充, 而传统旋转式井壁取心技术在高温、高压及高地应力环境下易发生岩心丢失、破碎或取心失败等问题, 难以满足深井及非常规储层的高质高效取心需求。针对以上问题, 本文系统回顾了国内外典型旋转式井壁取心工具的技术进展, 对其结构参数与取心原理进行对比分析; 深入探讨了地层条件、取心器性能、井斜情况、滤饼质量、钻井液性能及操作失误等因素对井壁取心质量的影响机制; 基于现场应用数据, 对各类井壁取心工具在岩心采取率、完整性和岩心分析适用性与可靠性等方面进行综合评估。研究表明: 旋转式井壁取心技术在复杂地层中具备显著优势, 可为深层与超深层储层评价提供可靠的物性与地质参数支撑, 而大尺寸旋转式井壁取心技术显著提升了样品代表性; 国产化井壁取心工具在常规储层已趋成熟, 但在核心部件寿命、信号采集与控制精度等方面仍存在差距; 未来技术升级应聚焦于耐高温材料、密封与抗污染设计及多参数自适应控制体系等关键方向, 以提升作业精度与环境适应性, 为复杂地层岩心获取提供更高效的工程解决方案。

关键词: 井壁取心技术; 旋转式井壁取心工具; 岩心采取率; 高温高压; 非常规储层; 地层适应性; 超深井钻探

中图分类号: P634; TE244 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)02-0013-12

Development status and prospects of rotary sidewall coring technology

SHI Fangyu¹, NING Fulong^{1,2,3*}, LI Wei^{1,2}, LIU Zhichao^{1,2}, HU Chen¹, SUN Yuxuan¹, LIU Zhihui¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. National Center for International Research on Deep Earth Drilling and Resource Development, Ministry of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China; 3. School of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Sidewall coring serves as a vital supplement to conventional coring. However, traditional rotary sidewall coring technology is prone to core loss, fragmentation, or coring failure under high-temperature, high-pressure, and high ground stress conditions, making it difficult to meet the demand for high-quality and efficient coring in deep wells and unconventional reservoirs. To address these challenges, this paper systematically reviews the technological progress of typical rotary sidewall coring tools both domestically and internationally, conducting a comparative analysis of their structural parameters and coring principles. It further delves into the influence mechanisms of factors such as formation conditions, coring tool performance, well deviation, filter cake quality, drilling fluid properties, and operational errors on sidewall coring quality. Based on field application data, a comprehensive evaluation is performed on various sidewall coring tools in terms of core recovery rate, integrity, suitability for core analysis, and reliability. The findings indicate that rotary sidewall coring technology holds significant advantages in complex formations and can

收稿日期: 2025-11-10; 修回日期: 2026-01-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.002

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题“钻头与岩石作用机制及井壁稳定研究”(编号: 2024ZD1000907); 国家自然科学基金杰出青年基金(编号: 42225207)

第一作者: 史芳玉, 女, 汉族, 1999年生, 地质工程专业, 博士研究生, 研究方向为非常规能源勘探与开发、油气钻探, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, sfy123@cug.edu.cn。

通信作者: 宁伏龙, 男, 汉族, 1977年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要从事非常规能源勘探与开发、海洋科学及油气钻探、地质工程等方面的研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, nflzx@cug.edu.cn。

引用格式: 史芳玉, 宁伏龙, 李维, 等. 旋转式井壁取心技术发展现状与展望[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 13-24.

SHI Fangyu, NING Fulong, LI Wei, et al. Development status and prospects of rotary sidewall coring technology [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 13-24.

provide reliable support in terms of petrophysical and geological parameters for the evaluation of deep and ultra-deep reservoirs, while large-size rotary sidewall coring technology markedly enhances sample representativeness. Domestic sidewall coring tools have reached maturity in conventional reservoirs but still have gaps in the lifespan of critical tool components, signal acquisition, and control accuracy. Future technological advancements should focus on key areas such as high-temperature-resistant materials, sealing and anti-contamination design, and multi-parameter adaptive control systems to improve operational precision and environmental adaptability, thereby offering more efficient engineering solutions for core acquisition in complex formations.

Key words: sidewall coring technology; rotary sidewall coring tools; core recovery rate; high temperature and high pressure; unconventional reservoir; formation adaptability; ultra-deep well drilling

0 引言

钻探取心是揭示地下地质构造与岩石性质的重要方法,主要分为钻进取心(全岩心采集)与井壁取心(局部岩心采集)两类。传统钻进取心主要依靠金刚石或复合片钻头进行连续取心,但需多次起下钻,作业周期长、成本高,难以满足深井、超深井及深水等高成本场景的快速取心需求^[1]。在资源勘探开发向深层、非常规和海上复杂环境加速推进的背景下,该类取心方式的适用性受到明显限制。

在传统取心效率与经济性难以同步满足勘探要求的背景下,旋转式井壁取心技术凭借其作业灵活、取心精确及针对特定井段的定向定位能力,成为钻进取心的重要补充,并在油气勘探和地热开发中得到广泛应用^[2]。通过井壁局部钻削获取的原位岩心样品,可用于油气显示识别、孔隙充填特征分析及含油饱和度评价,同时支撑孔隙度、渗透率等物性测试^[3]。在页岩气、致密砂岩油气与煤层气等非均质性强的非常规储层中,应用旋转式井壁取心技术能够显著提升对储层的精细表征能力^[4-6]。此外,井壁岩心在测井资料解释中也具有重要价值,可用于修正岩性判别结果,校正砂泥互层测井响应,并降低盐水基钻井液和浅层淡水砂岩等工况下测井曲线失真的程度,从而提高储层识别精度^[7-9]。

尽管旋转式井壁取心技术在多数井段表现良好,但在松散破碎层、高压差井段及高温高压高应力(HPHT)的深井环境中,仍面临岩心破碎、掉心、岩心采取率波动等工程问题。深井的井下温度通常超过 150 ℃,地层压力达 100~120 MPa,对取心器的结构强度、密封性能、材料稳定性及电气控制系统可靠性提出了更高要求^[10-11]。目前国内外研究虽在切削机构、驱动方式和结构设计等方面取得了一定进展^[12-16],但对于复杂地质条件下取心过程中的岩心破碎机理、钻井参数耦合效应及 HPHT 条件下

材料性能退化与控制系统稳定性的研究仍相对不足,限制了该技术在深部与超深部井段的应用^[17]。

针对上述问题,本文系统梳理国内外旋转式井壁取心技术的发展现状,总结典型工具的结构参数与工作原理;分析地层条件、取心器性能、井斜角度、滤饼质量、钻井液性能及操作失误等因素对岩心采取率和样品完整性的影响机制;结合现场应用实例,对旋转式井壁取心技术在深井及非常规储层应用的可靠性进行评估。在此基础上,提出从材料选型与电气控制元件设计两方面进行技术升级,旨在实现取心过程的精确控制,提高工具在复杂地层和 HPHT 条件下的环境适应性,为深井与超深井旋转式井壁取心技术的优化与工程应用提供理论依据与工程指导。

1 旋转式井壁取心工具技术原理

旋转式井壁取心技术是一种结合了传统钻孔取心与冲击式井壁取心优点的新型取心方法,可在不中断正常钻进或显著减少起下钻次数的条件下,从井壁特定位置获取局部岩心样品。该技术有效弥补了两种方法在复杂地层条件下取心效率低、岩心完整性差等问题^[18]。

典型旋转式井壁取心系统由地面与井下两部分组成:地面采用多芯电缆配合升降装置实现取心工具的下放与回收,并通过控制面板进行操作控制;电能与控制信号经电缆传输至井下取心单元,实现远程精确操控。井下取心装置结构相对复杂,通常包含电动机、推靠定位装置、钻进取心机构、岩心卡断机构、岩心转移装置、密封系统及岩心储存装置等部分。取心过程中,推靠机构将钻头稳固压靠在井壁,实现取心点的定向与定点定位;电动机提供稳定扭矩驱动钻头旋转切削井壁岩石,形成规则的圆柱状岩心。钻削结束后,卡断机构将岩心从

母岩中分离,并通过传输装置将其送入内部储心筒,实现多次连续取心;同时可借助分隔片与岩心检测手段,实现岩心分段存储与归位^[19-20]。由于工具总体尺寸较大,其适用井径一般不小于170 mm,这在一定程度上限制了其应用^[21]。

旋转式井壁取心工具所用钻头是常规金刚石钻头的微型化版本,具有高硬度、高耐磨损和精细切削等特性^[21]。旋转式井壁取心技术本质是基于电缆供电的井下定点取心系统,通过对钻头转速、推靠力及轴向进给量等参数的精确控制,可实现取心位置的精准定位与取心过程动力学的稳定调控。

在传统旋转式井壁取心技术的基础上,为提高单次取心的岩心体积并增强样品代表性,发展出了大尺寸旋转式井壁取心技术(Large-Size Rotary Sidewall Coring Technology, LSWC),可获取体积约为常规旋转式井壁取心工具4倍甚至更多的岩心样品,为储层物性、岩石力学和特殊岩心分析(Special Core Analysis, SCAL)提供了更充足的样品材料。较大的取心直径不仅提升了目标层段的代表性,还允许在单块岩心上沿层理面的多个方向切取亚样本(图1^[22]),有助于精细刻画岩性变化与储层非均质性。在力学方面,大尺寸钻头破岩过程的扭矩需求、推靠载荷和钻压稳定性均显著高于常规旋转式井壁取心工具,因此LSWC工具通常配备高功率电机和更高效的传动机构,并采用抗冲击的结构布置,以适应硬脆性岩层和HPHT环境。目前大尺寸井壁岩心已在常规与非常规油气勘探评价中得到广泛应用,成为获取关键储层参数的重要手段之一。

典型旋转式井壁取心工具的组成和工作原理如图2^[23]所示,表1^[18,24-31]、表2^[14-16,32-40]列举了国内外代表性旋转式井壁取心工具的主要技术参数。

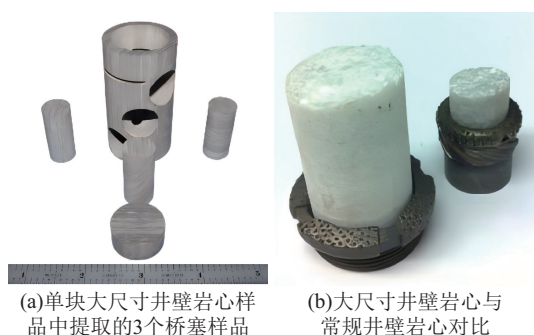


图1 大尺寸井壁取心工具采取的岩心

Fig.1 The samples taken from an LSWC tool

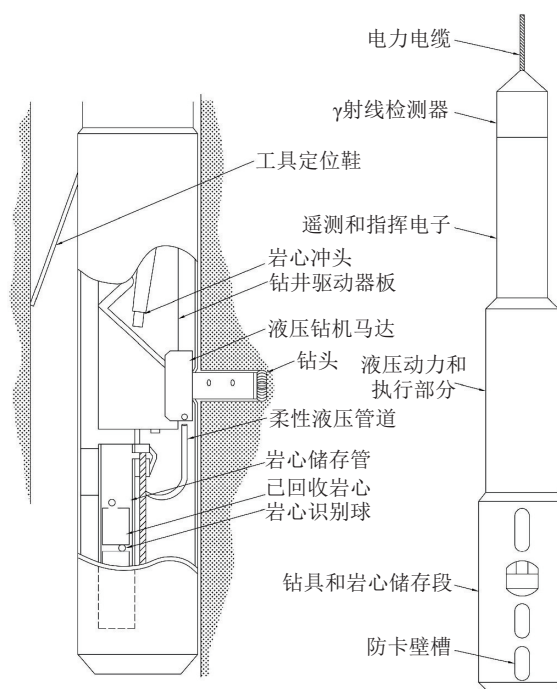


图2 典型旋转式井壁取心工具结构示意图

Fig.2 Generalized diagram of typical rotary sidewall coring tool

2 国内外旋转式井壁取心技术发展现状与趋势

2.1 早期的机械井壁取心技术

井壁取心技术的发展可追溯至20世纪20年代。1927年,Schlumberger公司在井筒内安装表面电极,首次实现井中电阻率测量与连续记录,其成果后来被概括为“电取心”,并在此基础上逐步发展形成现代电缆测井体系。1928年诞生首套机械井壁取心系统,依靠工具自重及井下震击器实现冲击式破岩获取岩心样品。1936年推出的冲击式取心枪在取心效率上虽有提升,但强冲击作用易破坏岩石结构,对岩心物理性质影响明显^[41]。

1967年,Lane-Wells公司开发的Tricore[®]取心工具(图3^[42]),首次采用井下切割的方式获取高质量的井壁岩心,岩心质量明显优于冲击式工具。但该工具在切割岩心时需整体压向地层,在压差较高或井壁稳定性较差的条件下易诱发卡钻并导致工具损毁,最终退出工程应用^[42]。综上,早期机械井壁取心技术在井下切割方式、结构形式和作业工艺等方面奠定了重要基础,但在岩心完整性、井下安全性和深井适应性方面均存在明显不足,只能在有限工况下使用。这些经验为后续旋转式井壁取心技术的形成与发展提供了技术储备和工程启示。

表 1 国外代表性旋转式井壁取心工具技术参数

Table 1 Technical parameters of representative rotary sidewall coring tools abroad

公司/国别	名 称	岩心直径/ in	岩心长度/ in	耐 温/℃	耐压/ MPa	取心数量/ 颗	适用井径/ mm	动力系统
Halliburton	CoreVault®RFP ^[24]	1.5	2.4	163	172	10	174~444.5	电动机
	Xaminer™ ^[25]	1.5	2.4	204	241	80	174~444.5	电动机
Baker Hughes	PowerCOR™ ^[26]	1.0	1.8	204	172	60	149.2~431.8	电动机
	MaxCOR™ ^[27]	1.5	2.5	204	172	60	190.5~355.6	电动机
Schlumberger	MSCT ^[28]	0.92	1.5~1.75	218	172	20/75	127~482.6	液压马达
	CST ^[29]			232	138	30/60	104.8~635	液压马达
	XL-Rock ^[30]	1.5	2.5	177	207	50	190.5~495.3	液压马达
	SureRock ^[31]	1.5	3.0	177	207	75	190.5~495.3	
前苏联 ^[18]	RSCT	0.92	1.7	149	138	25	159~483	液压马达
	CKO-8-9	0.87	1.2~1.77			1~3	196~214	电动机
	CKM-8-9	0.87	0.79~1.77			10	196~214	电动机
	CKT-1	0.98	0.98~1.97	150	98	1~12	196、214、243	电动机

注：1 in=25.4 mm，下同。

表 2 国内代表性旋转式井壁取心工具技术参数

Table 2 Technical parameters of representative rotary sidewall coring tools in China

名 称	岩心直径/in	岩心长度/in	耐温/℃	耐压/MPa	取心数量/颗	适用井径/mm	动力系统
HH-1 ^[32]	0.94	1.97	150	80	26	160~320	液压马达
HH-2 ^[33]	0.98	1.89	150	100	26	160~320	液压马达
FCT-2 ^[34]	0.98	1.97	175	140	30	160~340	液压马达
SRCT6701 ^[35]	0.98	1.97	175	140	26	160~390	液压马达
SRCT6702 ^[36]	0.98	1.97	175	170	26/60	160~390	液压马达
SRCT6703 ^[37]	1.5	2.56	175	170	26/60	190~390	液压马达
ESCT ^[15]	0.98	1.97	175	138	75	160~360	电动机
ERSC-Ⅱ ^[38]	0.94	1.97	175	140	26	165~419	液压马达
MRCT ^[16]	1.5	2.56	150	140	30	190.5~432	电动机
MRCT-HT ^[39]	1.5	2.76	205	140	60	152~432	液压马达
LRCT ^[14]	1.5	2.48	175	138	30/60	178~483	电动机
MRCT-dumpy ^[40]	1.5	2.15	205	140	60	152.4~444.5	液压马达

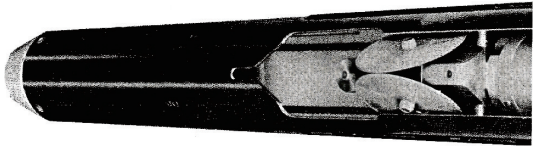


图 3 Tricore®工具

Fig.3 Tricore® tools

2.2 常规旋转式井壁取心技术

为解决高压深井环境下取心质量不足的问题，1977 年 Schreyer 教授在德国大陆科学探钻项目 (KTB) 中提出旋转式井壁取心技术思路，通过在

6000~10000 m 超深井段开展取心研究，揭示中欧华力西造山带深部地壳的物理化学过程，验证了旋转式井壁取心技术在超深井条件下的可行性^[43]。

1985 年，Gearhart Industries 将旋转式井壁取心工具引入油气行业，其机械钻头盒结构显著改善了岩心成型质量^[23]。1988 年该公司被 Halliburton 收购后，后者将硬岩取样工具 (HRCT®) 应用于旋转式井壁取心，实现了切削过程中保持岩心塞完整的目标。该工具在胶结良好的硬岩层中效果理想，但在高孔渗脆性岩层及压差较高的环境下取心仍较困难。随

后, Schlumberger 推出 0.92 in 旋转式井壁取心工具, Western Atlas 将其改进为 1 in 岩心塞, 小尺寸工具由此成为行业标准^[44]。

随着国外旋转式井壁取心技术的工程化应用逐步推进, 我国自 20 世纪 80 年代末开始开展旋转式井壁取心技术研究。1986 年, 河南油田测井公司等单位启动技术攻关, 并于 1994 年研制出首台国产三推靠臂 HH-1 型取心工具, 实现了从无到有的突破^[32]。在此基础上, 国内多家企业和科研机构相继开展系列化产品研制, 形成了具有代表性的产品系列。其中, 北京华能通达公司的 FCT 系列采用双液压泵系统(大泵供钻压、小泵控扭矩), 提升了地层适应性与取心效率, 实现了首次国产化工程应用^[45]; 大庆钻探公司 ESCT 型工具则集成便携机箱、大功率无刷电机及数字电磁阀技术, 在常规井况下显著提高了工具可靠性和岩心采取率^[15]。

总体来看, 常规旋转式井壁取心技术已形成相对成熟的产品体系, 能够满足多数常规油气藏与部分非常规储层的基础岩心需求。但受限于岩心体积、样品在 SCAL 和岩石力学测试中存在测量不确定性较高、代表性不足等问题^[44,46-47], 特别是在页岩气、致密油气等非常规储层及深井超深井的精细评价中局限性更加突出, 这也明确指引了大尺寸井壁取心技术的发展方向。

2.3 大尺寸旋转式井壁取心技术

为满足非常规油气和复杂储层评价中对大体积、高完整性岩心样品的需求, 国内外陆续发展了 LSWC 技术。大直径旋转式井壁取心工具是在常规旋转式井壁取心工具基础上, 通过增大取心直径和储存岩心样品的空间来提高单次取心体积和样品代表性的改进型工具^[22]。

国际上, Schlumberger 公司的 XL-Rock、MSCT, Baker Hughes 公司的 MaxCOR 及 Halliburton 公司的 Xaminer、HRSCT 等 LSWC 工具, 普遍采用高功率电机驱动、大直径金刚石空心钻头与强化储心单元组合设计, 在直径 1.5 in 及以上的大尺寸井壁岩心获取方面形成了成熟的工程化服务体系^[22,46-47]。相关现场实践表明, 大尺寸井壁岩心在 SCAL 及岩石力学试验中显著降低了测量不确定性, 并在非常规油藏与 HPHT 井段储层评价中发挥了重要作用。

在此基础上, 国内围绕 LSWC 开展了多项针对

性研究与工程实践。中海油服^[16,48]研制并应用了模块式大直径旋转井壁取心仪(MRCT), 采用液压驱动大直径金刚石空心钻头取心, 现场应用结果表明岩心完整性和代表性明显优于常规井壁取心, 在部分工况下可部分替代钻进取心作业, 提高了勘探开发效率。针对传统液压驱动工具存在的扭矩不足和岩心采取率偏低问题, 牛延吉等^[14]提出了直流电机驱动的大直径旋转井壁取心仪, 最大输出扭矩显著提高, 多区块现场试验中岩心采取率稳定在 90% 以上, 显著改善了硬地层和高压差条件下的取心效果。随着勘探开发向深水、高温和小井眼方向拓展, 刘铁民等^[40]在此基础上研制了适用于高温小井眼的大直径旋转井壁取心仪, 通过紧凑的电液一体化设计和高效隔热结构, 实现了在小井眼中获取大直径井壁岩心的能力, 现场试验最高工作温度接近 170 °C, 岩心采取率超过 95%, 有效拓展了 LSWC 技术在高温小井眼和深部井段的应用范围。

综上, LSWC 已形成较为成熟的产品与实验体系, 能在多种工况下稳定获取大体积、高完整性的井壁岩心(表 3), 显著提升非常规储层和 HPHT 井段的评价精度。但在 HPHT 环境下的长期稳定性、极端井况下的岩心完整性以及工具寿命与经济性等方面, LSWC 仍存在进一步提升空间, 这也对材料选型、结构可靠性与环境适应性优化提出了更高要求, 并为旋转式井壁取心技术向更高温、更深层及更智能方向演进指明了重点突破方向。

表 3 目前部分大尺寸岩心规格
Table 3 Current specifications of large-diameter core samples

名 称	直径/in	长度/in
Xaminer Core	1.5	2.4
Xaminer Dual-Coring	1.5	2.4
HRSCT-B	1.5	2.4
MaxCOR Tool	1.5	2.5
XL-Rock Tool	1.5	3.5
LRCT	1.5	2.5
MRCT	1.5	2.8

2.4 面向 HPHT 和复杂井况的旋转式井壁取心技术

随着钻探深度和井下环境复杂度不断提高, 旋转式井壁取心技术逐渐向 HPHT 适应性和智能化

控制方向发展。国际上, Halliburton 的 Xaminer 系列采用耐高温高压材料, 配备全自动取心控制系统及大容量储心筒, 显著提高工具寿命与取心效率^[49]; Baker Hughes 的 MaxCOR 系统以无刷直流电机驱动和钻头水力结构优化为核心, 实现了钻速与岩心采取率的同步提升^[50]; Schlumberger 的 XL-Rock 和 MSCT 系列则采用简化的液压滑道机构, 仅需单个液压缸即可完成钻进、旋转与折断岩心等动作, 体现了结构紧凑与控制高效的设计趋势^[51]。此外, Halliburton 推出的 CoreVault® 系统利用金属密封容器实现岩心原生流体的完整封存, 显著提高储层产能评价的可靠性^[24]。

国内方面, 中石油 SRCT 系列引入了智能变频技术, 可实现电流电压自动调节, 降低电缆过流风险, 并取消地面预热环节, 提高了作业时效性^[35]; 中海油服 ERSC-II 型融合伽马校深与液压自反馈技术, 提高复杂井段的取心精度与作业效率^[38]; 中海油服 MRCT-HT 仪器集成了取心、热管理与解卡等功能模块, 采用双动力与模块化结构设计, 工作耐温 150 °C、耐压 140 MPa, 体现了国产工具面向 HPHT 工况的系统化升级方向^[52]; 航天十二所 HT-1 型基于 PCF80C552 单片机, 采用微控通信与嵌入式控制设计, 增强了系统的灵敏度与可操作性^[53]; 朱维兵等^[54]提出的行星与锥齿轮复合传动爬行机构, 也为旋转式井壁取心工具提供了新的驱动思路。这些工作标志着国产旋转式井壁取心技术在 HPHT 适应性、智能控制和系统集成方面已取得重要进展, 为深层与非常规地质能源钻采工程提供了更加可靠的岩心获取手段。

2.5 国产化进展与关键技术瓶颈

综合上述发展历程可以看出, 国外旋转式井壁取心技术起步早、体系完善, 技术路线已从机械驱动逐步向 HPHT 适应性、自动化和智能化方向演进。以 Halliburton、Baker Hughes 和 Schlumberger 为代表的公司, 依托先进的材料科学、传感与控制技术, 实现了取心工具在 HPHT 环境下的长期稳定运行, 并形成系列化、标准化产品体系。其核心特征为模块化创新与系统集成优化, 通过高精度传感控制、无刷电机驱动及封闭式液压系统的耦合设计, 显著提升工具可靠性与岩心采取率, 同时建立了涵盖岩心分析、现场运维及数据处理的商业化配套服务体系^[22, 44, 46-47, 49, 51]。但在复杂地层条件下的取

心完整性与经济性仍存在改进空间。这些工程实践经验为国内相关技术发展提供了重要参考与借鉴。

我国旋转式井壁取心技术虽起步较晚, 但发展迅速, 经过引进、消化与再创新, 已在结构设计、驱动控制及材料工艺方面取得多项突破。国产设备在耐温性、作业时效性及智能控制等方面已接近国际水平^[55]。但与国外成熟体系相比, 国内技术仍存在核心部件寿命短、信号采集与控制精度不足、标准化程度不高及高端应用验证有限等问题, 导致在超深井和复杂井况下, 特别是深层与非常规地质能源勘探开发中的工程可靠性与推广应用仍受制约^[45, 54, 56-59]。

从国家层面看, 加快实施万米级超深科学钻探工程, 是我国能源与战略矿产资源勘探的重要战略需求^[60-61]。旋转式井壁取心技术凭借其作业灵活性和多方位岩心直接获取能力, 被视为保障超深井钻探顺利实施的重要技术支撑^[13, 62]。因此, 全面提升工具的 HPHT 适应性、结构可靠性与智能化水平, 是当前国产化工作中亟需解决的关键问题。

3 旋转式井壁取心技术应用现状

旋转式井壁取心技术已在多个油气田实现工程化应用, 岩心采取率普遍达到预期指标, 整体作业效果良好。该技术在 HPHT 井段表现出较强的环境适应性和系统稳定性, 显著提升了复杂地层下的取心效率与数据质量, 同时具备良好的工程经济性。

3.1 国外应用

(1) 在巴西近海 Santos 盆地, 新型大直径旋转式井壁取心技术首次实现工程化应用, 累计获取 126 个岩心样本, 其中 96 个 (占 76%) 长度超过 2.0 in, 最长可达 2.5 in。作业结果显示, 岩心长度受地层冲蚀、滤饼厚度、岩性及裂隙走向等因素影响显著^[63]。该技术在样本数量、长度控制与单位钻井时间对应的取心效率方面均表现优异, 验证了其在巴西 Santos 盆地深水井 (井深大于 2500 m) 中应用的稳定性与高效性。

(2) 在 Campos 盆地的深水油田, 应用 MaxCOR 旋转式井壁取心服务开展现场测试。计划取心 90 个岩心, 实际回收 94 个, 单个样品平均钻取时间为 4.6 min, 最大长度 2.5 in, 平均长度约 2 in。在该盆

地的后续作业中,两趟钻共完成 52 个岩心采集任务。长期应用结果显示,该工具整体岩心采取率高达 97%^[50]。与常规尺寸样本相比,大尺寸的样本可有效增强储层岩石物性与流体性质分析的准确性,在复杂储层中表现出较高的成熟度。

(3)在中东某高孔隙度碳酸盐岩储层,旋转式井壁取心结果表明常规测井解释存在较大不确定性。该类储层孔隙结构非均质且连通性差,常规测井解释往往需要调整胶结指数才能匹配响应曲线,但胶结指数选取不当易引发油气显示误判^[12]。旋转式井壁取心技术可在目标层位实现定点短时取心,获取真实岩心,并通过开展实验室分析揭示非连通孔隙系统与储层微观结构特征,使得地质解释的精度显著提高,进而更准确判别储层流体性质,减少不必要的补充钻探,节约作业时间与成本。

(4)在某深水 HPHT 预盐层井中,Xaminer 旋转式井壁取心工具及配套 CoreVault®系统实现了多段取心的自动化控制。系统通过井下传感器实时监测取心过程,对钻压、转速和取心时间等参数进行自动优化调节,并利用金属密封容器在高温高压条件下对岩心及孔隙流体进行一体化封存^[24-25]。现场应用结果表明,该系统在 HPHT 井段能够保持较高的岩心采取率和原状流体保存能力,为后续岩石物性和流体相态分析提供了可靠样品。

总体来看,国外旋转式井壁取心技术在大直径取心、自动化控制及在 HPHT 井段应用方面已形成较为成熟的技术体系。上述深水、碳酸盐岩和预盐层取心实例表明,该类工具能在复杂地层条件下保持较高的岩心采取率与样品完整性,为非常规油气、深层储层及高温高压井段的精细评价提供了坚实基础。

3.2 国内应用

旋转式井壁取心技术已在河南、大庆、江苏、渤海及南海等油田得到广泛应用,覆盖陆上与海上多种井况,见表 4^[39,56,64-66]。从表中可见,多数井次的岩心采取率达到或超过 90%,其中渤海与南海多口井实现 100% 回收,说明即使在井温较高、井径不规则且井壁稳定性挑战更大的海上环境中,该技术仍能维持稳定的性能与作业时效性^[56]。在部分陆上深井和复杂井段(如河南部分井至 4000 m)观察到回收率存在阶段性波动,结合同区块其他井次的高水平表现,可以认为这些波动更可能由局部破碎带、

弱胶结层或滤饼质量波动造成,而不完全由工具本体性能这一单一因素决定^[64]。

表 4 旋转式井壁取心器现场取心统计
Table 4 On site coring statistics of rotary corers

位 置	油井深度/m	设计数量/颗	实际数量/颗	岩心采取率/%
河南油田 ^[56]	4000	15	13	87
	2800	23	22	95.5
	550	22	22	100
	2600	8	8	100
	1978	22	22	100
	3300	10	10	100
	3500	32	32	100
大庆油田 ^[56]	2000	15	14	93.3
渤海 ^[56,64]	3430	12	12	100
	2410	25	25	100
南海 ^[39,65]	3772	18	18	100
	2575	44	44	100
	2717	49	48	98
福山油田 ^[66]	3600	60	58	96.7

结合现场记录,取心质量主要受地层条件、取心器性能、井斜角度、滤饼质量、钻井液性能及操作失误等因素影响。现场经验表明,在深井高差压井段采用高转速、慢进给的磨削式切削,同时适度提高推靠力并优化钻头粒度与岩性匹配,可明显减少半截心与掉心现象^[39];在滤饼厚或井壁稳定性较差井段,通过短时预循环、微量堵漏或基质强化措施可有效增强岩心保持能力。大量工程实践表明,国产旋转式井壁取心技术在多类复杂井况下具有良好的可重复性和较高的工程可靠性,能够提供满足物性测试、岩石学研究和地球化学分析需求的高质量岩心,为深部储层与非常规地质能源评价提供了重要实物基础。

4 影响旋转式井壁取心质量的主要因素

尽管旋转式井壁取心技术已形成较为成熟的技术体系,但在 HPHT 井段其环境适应性和系统可靠性仍然受限。随着井下温度、压力及介质条件的恶化,取心器内部电子元件与执行机构的稳定性会显著下降^[67-68]。在破碎或弱胶结地层及高差压环境中,常出现钻头动力不足、地层匹配性差等问题,导

致岩心采取率降低并影响岩心完整性^[69]。相较于现代钻探技术,井壁取心在科学钻探及深井、超深井领域的应用规模和成熟度仍有差距,尚未形成统一的规模化作业体系。常规与超深井取心中存在的岩心采取率波动、工具失效等问题,在井壁取心中亦普遍存在。总体而言,影响超深井井壁取心质量的主要因素包括地层条件、取心器性能、井斜情况、井眼几何形态、滤饼质量、卡钻风险、钻井液性能及操作规范性等多种耦合效应。

4.1 地层因素

地层特征主要通过岩石胶结性、地层可钻性、井眼扩径及温度场的综合作用影响岩心采取率。胶结强度与可钻性直接决定岩心完整性及钻头切削效率^[70];井眼扩径会削弱推靠稳定性并降低定位精度。在深部致密坚硬地层的高温高压差工况下,高温易引发液压系统热稳定性下降,导致密封件老化和油液黏温特性改变,进而出现压力波动、控制失准及效率下降^[71];同时,高压差吸附会显著增大钻头旋转阻力,表现为电机电流上升、转速下降,导致岩屑不易排出而出现间歇性蹩钻,进一步降低取心效率并增加过载与卡钻风险^[72]。因此,在设计阶段应结合测井与岩石力学参数开展层位筛选与参数窗预设,优化钻头与岩性的匹配关系,改进热管理及密封结构设计。作业中可通过缩短单次取心时间、采用分段取心等措施减轻热力耦合效应对岩心完整性的影响。

4.2 取心器因素

井壁取心器在井下需长期承受空间狭小、HPHT及钻井液、岩屑污染等复杂工况。工程统计表明,液压系统故障中有相当比例源于油液污染^[73],其后果包括阀件卡滞、磨损及控制滞后;此外,还会引起传感器信号失真、通信干扰及保护监测器误触发等问题^[53,74],进而导致执行机构疲劳甚至结构性损伤。针对这些问题,HPHT工况下的工具设计应着重提升抗污染能力(如高效过滤、旁路净化与密封防护)、抗干扰能力(信号调理、屏蔽与冗余测量)及安全冗余设计(多级过载、过温与过流保护),并优化功率密度与散热路径,保证推靠力、钻进扭矩及控制精度的稳定性,从而提升岩心采取率与样品完整性。

4.3 其他因素

除地层与工具本身外,井斜情况、井眼几何形

态、滤饼质量、卡钻风险及钻井液性能同样对取心稳定性影响显著^[75]。井斜过大时,推靠臂难以稳定贴靠井壁,取心点易偏移并诱发卡阻,造成半截心或掉心现象,岩心采取率明显下降^[76]。滤饼质量决定井壁力学稳定性,致密、均匀的高质量滤饼能增强井壁承托能力,为长段岩心的完整提取提供支撑^[77]。卡钻风险主要来源于井眼几何形态异常(如井径不规则或局部垮塌)以及地层非均质性(胶结差或夹层含砾等),这些因素会导致取心器运行受阻,严重时导致取心失败^[78]。钻井液性能也是关键因素:高黏度会引发工具与井壁吸附,高密度则会增加液压马达负载并阻碍岩屑运移;同时钻头与岩心界面产生的摩擦热还可能诱发局部凝胶化与卡滞,最终降低岩心采取率并增加非计划井时^[79]。因此,实际作业需在井斜控制、滤饼质量及钻井液配方间取得平衡,并通过监测电流、扭矩与推靠力等参数的异常波动,及时调整作业方案,使作业始终处于安全高效的操作窗口。

5 结论

(1)本文对旋转式井壁取心技术的发展历程与应用现状进行了系统梳理。结果表明,该技术在HPHT地层下具备优于常规取心的作业灵活性与样品保存能力,是深井与超深井高效取心的重要技术手段之一。国外在模块化设计、材料耐高温性能与自动化控制方面已形成成熟的技术体系;国内通过引进、消化与再创新,在结构、电控与作业可靠性方面取得明显进步。但总体而言,该技术在HPHT长期适应性与标准化作业体系方面仍有提升空间。

(2)旋转式井壁取心的效率与岩心样品完整性受地层条件、取心器性能、井斜情况、井眼几何形态、滤饼质量、卡钻风险、钻井液性能及操作规范性等多因素耦合影响。针对上述影响,开展层位筛选、参数窗预设与工艺优化,是在HPHT和复杂井况下提升岩心采取率与岩心样品代表性的有效路径。

(3)在HPHT工况下,技术改进应从材料、工艺与控制三方面入手。选用耐高温密封件和高温合金材料,配合高效过滤与抗污染设计,可有效提高工具在高温高压介质中的稳定性;在取心过程中实施毫米级间隔的分段短时切削与快速密封转运,可降低岩心污染与热损伤风险;建立以推靠力、扭矩、

电流和振动为核心的多参数自适应控制体系,可实现取心过程的实时稳态运行与风险预警,为旋转式井壁取心技术向智能化方向发展奠定基础。

(4)受资料来源限制,本文分析主要基于公开文献与典型案例,对跨盆地、跨岩性与多井况条件下的系统验证仍显不足。后续研究应结合现场试验,构建统一的HPHT工具评价与实验平台,量化材料、结构与控制方案对取心率和样品完整性的影响,完善评价指标与技术规范,进一步提升复杂井况下的工程适应性与应用可靠性,为深层与非常规能源钻采提供更加可靠的岩心与流体样品支撑。

致谢:感谢谭松成副教授在本文写作过程中的指导与宝贵建议,其专业意见和细致斧正对本文的顺利完成起到了至关重要的作用。

参考文献(References):

- [1] 王新杰. 旋转式井壁取心器的设计与机构运动仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
WANG Xinjie. Study on the design and kinematic simulation of the rotary sidewall coring tool[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [2] Arora A, Bihani A D, Padalkar C M, et al. Side-wall coring: advanced in-situ freeze core technique[C]//International Petroleum Technology Conference. Bangkok: International Petroleum Technology Conference, 2011: IPTC-14669-MS.
- [3] Koepf E H, Granberry R J. The use of sidewall core analysis in formation evaluation [J]. Journal of Petroleum Technology, 1961,13(5):419-424.
- [4] 张荣虎,金武弟,智凤琴,等.超深层致密砂岩储层甜点特征及其对油气富集的意义——以库车坳陷迪北地区侏罗系为例[J].海相油气地质,2025,30(4):356-369.
ZHANG Ronghu, JIN Wudi, ZHI Fengqin, et al. Sweet spot characteristics of ultra-deep tight sandstone reservoir and its significance for oil and gas enrichment: a case study of the Jurassic Ahe Formation in Dibe area of Kuqa Depression[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2025,30(4):356-369.
- [5] 张亚飞,张松航,邓志宇,等.基于层次分析灰色定权聚类的煤层气开发甜点预测方法——以柿庄北区块为例[J].煤炭科学技术,2024,52(5):166-175.
ZHANG Yafei, ZHANG Songhang, DENG Zhiyu, et al. A prediction method for coalbed methane development sweet spots based on hierarchical analysis and grey fixed-weight clustering: taking Shizhuangbei Block as an example[J]. Coal Science and Technology, 2024,52(5):166-175.
- [6] 蒋廷学,卞晓冰.页岩气储层评价新技术——甜度评价方法[J].石油钻探技术,2016,44(4):1-6.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing. The novel technology of shale gas play evaluation-sweetness calculation method[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016,44(4):1-6.
- [7] 马德华,耿长喜,韩景江.应用井壁取心分析资料辅助判断气层方法探讨[J].大庆石油地质与开发,2008,27(2):36-38.
MA Dehua, GENG Changxi, HAN Jingjiang. Method of applying sidewall coring data to gas layer identification[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27 (2) : 36-38.
- [8] 邱玉娥.应用井壁取心资料评价北二区西部剩余油分布规律[J].大庆石油地质与开发,2007,26(1):18-21.
QIU Yue. Evaluation of remaining oil distribution rules in the western Bei II area with the application of sidewall coring analysis data[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007,26(1):18-21.
- [9] Xu C G, Wu K Q, Pei J X, et al. Enrichment mechanisms and accumulation model of ultra-deep water and ultra-shallow gas: A case study of Lingshui 36-1 gas field in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025,52(1):50-63.
- [10] 罗鸣,冯永存,桂云,等.高温高压钻井关键技术发展现状及展望[J].石油科学通报,2021,6(2):228-244.
LUO Ming, FENG Yongcun, GUI Yun, et al. Development status and prospect of key technologies for high temperature and high pressure drilling [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021,6(2):228-244.
- [11] Peng J L, Tian Z B, Deng C, et al. Durable and reliable thermal management system with superior temperature uniformity for sidewall coring tool in extreme thermal environments [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024,51:102635.
- [12] Rourke M, Torne J. A new wireline rotary coring tool: development overview and experience from the Middle East [C]//SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition. Al-Khobar: Society of Petroleum Engineers, 2011: SPE-149128-MS.
- [13] Funato A, Ito T. A new method of diametrical core deformation analysis for in-situ stress measurements [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 91: 112-118.
- [14] 牛延吉,刘先平,嵇成高,等.大直径旋转井壁取心仪研制与应用[J].测井技术,2018,42(2):235-237.
NIU Yanji, LIU Xianping, JI Chenggao, et al. Development and application of the large diameter rotary sidewall coring tool [J]. Well Logging Technology, 2018,42(2):235-237.
- [15] 陆敬武,曹扬,杨帆,等.新型旋转井壁取心仪在大庆油田的应用[J].测井技术,2016,40(6):761-764.
LU Jingwu, CAO Yang, YANG Fan, et al. Application of enhanced rotary sidewall coring logging tool in Daqing Oilfield [J]. Well Logging Technology, 2016,40(6):761-764.
- [16] 常毓强.大直径旋转井壁取心测井技术及临兴气田应用[J].当代化工研究,2022(8):115-117.
CHANG Yuqiang. Large-diameter rotating borehole core logging technology and its application in Linxing Gas Field [J]. Modern Chemical Research, 2022(8):115-117.
- [17] 孙友宏,徐良,薛启龙,等.海洋深层钻井关键理论与技术发展现状及展望[J].石油钻探技术,2025,53(3):1-10.
SUN Youhong, XU Liang, XUE Qilong, et al. Current status and prospects of key theories and technologies for marine deep

- drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2025, 53(3):1-10.
- [18] 曲亚明. 科学钻探超深孔侧壁取样技术方案研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- QU Yaming. Study on the sidewall coring technical proposal of scientific drilling superdeep borehole[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [19] 刘铁民, 田志宾, 金亚, 等. 大直径电缆井壁取心仪岩心分隔片机构设计[J]. *石油矿场机械*, 2023, 52(3):61-67.
- LIU Tiemin, TIAN Zhibin, JIN Ya, et al. Design of large diameter cable wall core separator[J]. *Oil Field Equipment*, 2023, 52(3):61-67.
- [20] 李广帅, 刘铁民. 旋转井壁取心测井壁心归位技术及方法[J]. *设备管理与维修*, 2025(14):126-129.
- LI Guangshuai, LIU Tiemin. Rotary wall core retrieval logging and core reorientation technology and methods[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2025(14):126-129.
- [21] 王晋. 旋转式井壁取心地面系统设计与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- WANG Jin. Design and implementation of surface system for rotary sidewall coring[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [22] Mahmoud G, Snaineh B A, Steiner S, et al. Successful implementation of sidewall coring: 1st trial in UAE[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers, 2015: SPE-177576-MS.
- [23] Hashmy K H, Robinson K A, Rojas J M, et al. Wireline coring device aids evaluations of complex geologic areas[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Las Vegas: Society of Petroleum Engineers, 1985: SPE-14299-MS.
- [24] Halliburton. CoreVault®rock-fluid-pressure (RFP) sampling service[EB/OL]. [2024-11-22]. <https://assets2.brandfolder.io/bf-boulder-prod/2jt4jphkqjwpcnvht6qtrh3x/v/42490462/original/H011158%20CoreVault.pdf>.
- [25] Halliburton. Xaminer®coring tool[EB/OL]. [2025-11-22]. <https://cdn.brandfolder.io/IO6U2Z0D/at/q1bw10-40y1jc-6uv067/Xaminer-Coring-Tool.pdf>.
- [26] Baker Hughes. PowerCOR service for advanced sidewall coring: improve high-quality core delivery[EB/OL]. [2024-01-04]. <https://dam.bakerhughes.com/m/38e9906d5a38787d/original/PowerCOR-service.pdf>.
- [27] Baker Hughes. MaxCOR service: enhanced large diameter sidewall coring technology[EB/OL]. [2024-11-22]. <https://www.bakerhughes.com/sites/bakerhughes/files/2020-10/Baker%20Hughes%20MaxCOR%20Sheet.PDF>.
- [28] Schlumberger. MSCT mechanical sidewall coring tool[EB/OL]. [2024-01-04]. <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/reservoir-characterization/surface-and-downhole-logging/wireline-openhole-logging/sidewall-coring/mechanical-sidewall-coring-tool>.
- [29] Schlumberger. CST chronological sample taker[EB/OL]. [2024-11-22]. <https://www.slb.com/-/media/files/fe/product-sheet/cst-ps.pdf>.
- [30] Schlumberger. Large-volume rotary sidewall coring service[EB/OL]. [2024-11-22]. <https://www.slb.com/-/media/files/fe/brochure/xl-rock-br.pdf>.
- [31] Schlumberger. SureRock enhanced sidewall coring solution[EB/OL]. [2024-11-02]. <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/reservoir-characterization/surface-and-downhole-logging/wireline-openhole-logging/sidewall-coring/surrock-enhanced-sidewall-coring-solution>.
- [32] 田学信. HH-1型钻进式井壁取心器的研制与推广应用[J]. *测井技术*, 2000, 24(4):307-310.
- TIAN Xuexin. Development of HH-1 type of rotary sidewall coring tool and its application[J]. *Well Logging Technology*, 2000, 24(4):307-310.
- [33] 卢晓丽, 范继香. HH-2钻进式井壁取心器的研制[J]. *石油仪器*, 2004, 18(2):50-51.
- LU Xiaoli, FAN Jixiang. Development of HH-2 rotary sidewall coring tools[J]. *Petroleum Instruments*, 2004, 18(2):50-51.
- [34] 王健. FCT-2旋转式井壁取心收获率影响因素浅析[J]. *石油管材与仪器*, 2020, 6(1):94-97.
- WANG Jian. Influencing factors analysis on FCT-2 rotary sidewall coring recovery rate[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2020, 6(1):94-97.
- [35] 郭英才, 颜紫荆, 刘国权, 等. SRCT6701钻进式井壁取心器[J]. *石油科技论坛*, 2014, 33(2):56-58.
- GUO Yingcai, YAN Zijing, LIU Guoquan, et al. SRCT6701 rotary sidewall coring tool[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2014, 33(2):56-58.
- [36] 徐国超. 页岩气旋转式井壁取心机器人液压系统设计与研究[D]. 成都: 西华大学, 2021.
- XU Guochao. Design and research on the hydraulic system of shale gas rotary sidewall coring robot[D]. Chengdu: Xihua University, 2021.
- [37] 王丽忱, 甄鉴, 张露. 钻井取心技术现状及进展[J]. *石油科技论坛*, 2015, 34(2):44-50.
- WANG Lichen, ZHEN Jian, ZHANG Lu. Present conditions and progress of coring technology[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2015, 34(2):44-50.
- [38] 邓强, 谭忠建, 尚锁贵, 等. 新型旋转井壁取心工具在渤海油田的应用[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(1):157-160.
- DENG Qiang, TAN Zhongjian, SHANG Suogui, et al. The application of a new rotary wall coring tool in BoHai Oilfield[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34(1):157-160.
- [39] 魏赞庆, 田志宾, 杨庚佳, 等. 高温液压旋转井壁取心仪的研制与应用[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(3):73-82.
- WEI Zhanqing, TIAN Zhibin, YANG Gengjia, et al. Design and application of a hydraulic rotary sidewall coring tool at high temperatures[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(3):73-82.
- [40] 刘铁民, 田志宾, 黄琳, 等. 高温小井眼大直径岩心旋转井壁取心仪研制及应用[J]. *石油机械*, 2024, 52(3):48-53.
- LIU Tiemin, TIAN Zhibin, HUANG Lin, et al. Development and application of rotary sidewall coring tool for major diameter core of high-temperature slim hole[J]. *China Petroleum Machinery*, 2024, 52(3):48-53.
- [41] Leonardon E G, Mccann D C. Exploring drill holes by sample-taking bullets[J]. *Transactions of the AIME*, 1939, 132(1):85-99.

- [42] Akin T B, Watt H B. Tricore a continuous sidewall core cutter [C]//SPWLA 8th Annual Logging Symposium. Denver: Society of Petrophysicists & Well Log Analysts, 1967: SPWLA-1967-U.
- [43] 李锦轶. 德国大陆深钻项目(KTB)——成就、经验和教训[J]. 国外地质勘探技术, 1998(3):32-43.
LI Jinyi. German continental deep drilling project (KTB) — achievements, experiences and lessons learned [J]. Foreign Geoexploration Technology, 1998(3):32-43.
- [44] Jackson C. Tutorial: a century of sidewall coring evolution and challenges, from shallow land to deep water[J]. Petrophysics, 2021,62(3):230-243.
- [45] 黄玉科, 张付明. 提高FCT型旋转式井壁取心器收获率工艺探讨[J]. 石油仪器, 2010,24(4):56-58.
HUANG Yuke, ZHANG Fuming. A craft study to raise the efficiency of FCT rotary sidewall coring tool[J]. Petroleum Instruments, 2010,24(4):56-58.
- [46] 杨兴琴, 余迎. 国外3种大直径旋转井壁取心器性能对比[J]. 测井技术, 2012,36(6):610.
YANG Xingqin, YU Ying. Performance comparison of three foreign large diameter rotary sidewall coring tools [J]. Well Logging Technology, 2012,36(6):610.
- [47] Laronga R, Tevis C, Lake P, et al. Field test results of a new-generation large-bore rotary coring tool [C]//SPWLA 52nd Annual Logging Symposium. Colorado Springs: SPWLA, 2011: SPWLA-2011-TTT.
- [48] 田志宾, 刘铁民, 魏赞庆, 等. 模块式大直径岩心旋转井壁取心仪的研制[J]. 石油管材与仪器, 2022,8(3):6-10.
TIAN Zhibin, LIU Tiemin, WEI Zhanqing, et al. Development of maximum rotary sidewall coring tool [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2022,8(3):6-10.
- [49] 田志宾, 冯永仁, 魏赞庆, 等. 国内外大直径岩心旋转井壁取心技术现状及发展趋势[J]. 国外测井技术, 2019,40(5):33-36.
TIAN Zhibin, FENG Yongren, WEI Zhanqing, et al. Present situation and development trend of rotating sidewall coring technology for large diameter cores at home and abroad [J]. World Well Logging Technology, 2019,40(5):33-36.
- [50] Staff J. MaxCOR technology improves accuracy of rock and fluid analysis[J]. Journal of Petroleum Technology, 2013,65(2):36-37.
- [51] Jackson C. Rotary sidewall coring advancements for deep water, including a coring background overview [C]//SPWLA 61st Annual Logging Symposium. Online: SPWLA, 2020: SPWLA-5002.
- [52] 顾玉洋, 夏竹君, 罗鹏, 等. MRCT-HT 旋转井壁取心技术在南海东部A井中的应用[J]. 石油和化工设备, 2024,27(4):110-112,103.
GU Yuyang, XIA Zhujun, LUO Peng, et al. Application of MRCT-HT rotary wall coring technology in well in eastern south [J]. Petro-Chemical Equipment, 2024, 27 (4) : 110-112,103.
- [53] 陈小东. HT-1型旋转式井壁取心器应用中的典型干扰探讨[J]. 内江科技, 2008,29(2):113-114.
CHEN Xiaodong. Discussion on typical interferences in the application of HT-1 rotary sidewall coring tool [J]. Nei Jiang Science & Technology, 2008,29(2):113-114.
- [54] 朱维兵, 张朝界, 庞青松. 页岩气井旋转式井壁取心器爬行机构设计与优化[J]. 石油钻探技术, 2021,49(3):100-104.
ZHU Weibing, ZHANG Chaojie, PANG Qingsong. Design and optimization of the crawling mechanism of rotary sidewall coring device in shale gas wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021,49(3):100-104.
- [55] 李清林, 张全柱, 李昕禹, 等. 基于DSP的井壁取心高频电源可控整流器系统设计[J]. 电子产品世界, 2025,32(2):38-42.
LI Qinglin, ZHANG Quanzhu, LI Xinyu, et al. Design of DSP based high-frequency power controllable rectifier system for wellbore coring [J]. Electronic Engineering & Product World, 2025,32(2):38-42.
- [56] 郝桂青, 庞希顺, 欧阳剑. 增强型旋转式井壁取心器技术及应用[J]. 石油仪器, 2011,25(5):22-24.
HAO Guiqing, PANG Xishun, OUYANG Jian. Enhanced rotary sidewall coring tool technology and its application [J]. Petroleum Instruments, 2011,25(5):22-24.
- [57] 陈小东. HT-1旋转式井壁取心仪微控系统配置及通信控制技术[J]. 科技信息(学术研究), 2008(5):275-279.
CHEN Xiaodong. Microcontroller system configuration and communication control technology of HT-1 rotary sidewall coring instrument [J]. Science & Technology Information, 2008 (5):275-279.
- [58] Zhang T Z, Zhang Q Z, Lei Y M. Development of dual phase motor driving power supply for sidewall coring [C]//2022 Asia Power and Electrical Technology Conference (APET). Shanghai: IEEE, 2022: 236-239.
- [59] 李昕禹, 邓永红, 李清林, 等. 油田井壁取心供电电源研究[J]. 电子产品世界, 2025,32(1):24-28.
LI Xinyu, DENG Yonghong, LI Qinglin, et al. Research on power supply for oilfield well wall coring [J]. Electronic Engineering & Product World, 2025,32(1):24-28.
- [60] Wu X Z, Wan F L, Chen Z, et al. Drilling and completion technologies for deep carbonate rocks in the Sichuan Basin: practices and prospects [J]. Natural Gas Industry B, 2020,7(5):547-556.
- [61] 孙金声, 刘伟, 王庆, 等. 万米超深层油气钻完井关键技术面临挑战与发展展望[J]. 钻采工艺, 2024,47(2):1-9.
SUN Jinsheng, LIU Wei, WANG Qing, et al. Challenges and development prospects of oil and gas drilling and completion in myriametric deep formation in China [J]. Drilling & Production Technology, 2024,47(2):1-9.
- [62] 方国庆, 商连南, 潘德元, 等. 一种超深钻孔侧壁取样装置: CN202320143264.7[P]. 2023-01-17.
FANG Guoqing, SHANG Liannan, PAN Deyuan, et al. An ultra-deep borehole sidewall sampling device: CN20232014326 4.7[P]. 2023-01-17.
- [63] Romero P, Lofts J J, Lovera O, et al. A new generation of core-sampling options for deepwater environments. Experiences from Brazil [C]//SPWLA 52nd Annual Logging Symposium. Colorado Springs: SPWLA, 2011: SPWLA-2011-QQQ.
- [64] 王荣飞, 张国强, 李鸿鹏, 等. 渤海油田旋转井壁取心质效提升技术[J]. 石化技术, 2024,31(2):98-100.

- WANG Rongfei, ZHANG Guoqiang, LI Hongpeng, et al. Technology for improving the quality and efficiency of rotary wall coring in Bohai Oilfield[J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(2):98-100.
- [65] 余坦平. 大直径旋转井壁取心技术在油基泥浆中的应用[J]. 大众标准化, 2025(20):146-148.
- YU Tanping. Application of large-diameter rotary sidewall coring technology in oil-based mud[J]. Popular Standardization, 2025(20):146-148.
- [66] 王爱新, 葛海娅, 方旭红, 等. SRCT6702 钻进式井壁取心器在海南福山油田应用[J]. 科技创新与应用, 2017(16):130.
- WANG Aixin, GE Haiya, FANG Xuhong, et al. Application of the SRCT6702 drilling-type sidewall coring tool in the Fushan Oilfield, Hainan[J]. Technology Innovation and Application, 2017(16):130.
- [67] 杨庚佳, 田志宾, 魏赞庆, 等. 超高温旋转井壁取心仪电子节的优化设计与应用[J]. 石油钻探技术, 2025, 53(5):160-169.
- YANG Gengjia, TIAN Zhibin, WEI Zhanqing, et al. Optimization design and application of electronic module for ultra-high-temperature rotary wellbore coring instrument[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(5):160-169.
- [68] 田志宾, 彭嘉乐, 杨庚佳, 等. 高温井壁取心仪热管理系统温度实时预测模型[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2025, 40(5):79-85.
- TIAN Zhibin, PENG Jiale, YANG Gengjia, et al. Real-time temperature prediction model for thermal management system of high-temperature wellbore coring tool[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science), 2025, 40(5):79-85.
- [69] 魏赞庆, 彭嘉乐, 田志宾, 等. 旋转井壁取心仪热管理系统设计及应用[J]. 测井技术, 2022, 46(3):251-256.
- WEI Zhanqing, PENG Jiale, TIAN Zhibin, et al. Design and application of thermal management system for rotary sidewall coring tool[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(3):251-256.
- [70] 尹腾飞, 涂春赵, 马杰, 等. 提高非常规井眼井壁取心收获率技术探讨[J]. 海洋石油, 2025, 45(1):75-79.
- YIN Tengfei, TU Chunzhao, MA Jie, et al. Discussion on techniques to improve sidewall coring recovery rate in unconventional wellbore[J]. Offshore Oil, 2025, 45(1):75-79.
- [71] 谭伟雄, 尚锁贵, 毛敏. 旋转式井壁取心收获率影响因素分析[J]. 录井工程, 2009, 20(4):44-47.
- TAN Weixiong, SHANG Suogui, MAO Min. The influence factor analysis of rotary sidewall coring recovery rate[J]. Mud Logging Engineering, 2009, 20(4):44-47.
- [72] 杨杰, 门光德, 陈聪, 等. 大直径旋转井壁取心仪在高温高压差致密地层中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(24):127-129.
- YANG Jie, MEN Guangde, CHEN Cong, et al. Application of a large-diameter rotary sidewall coring tool in high-temperature, high differential pressure tight formations[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(24):127-129.
- [73] 唐德威, 罗昌杰, 邓宗全. 旋转式井壁取芯器钻头的齿轮液压马达设计[J]. 机械设计, 2007, 24(1):54-56.
- TANG Dewei, LUO Changjie, DENG Zongquan. Geared hydraulic motor design for drill bit of rotary well wall coring utensil[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(1):54-56.
- [74] 李清林, 张全柱, 李昕禹, 等. 海油井壁取芯直流无刷电机驱动控制系统的研制[J]. 电子质量, 2025(6):13-19.
- LI Qinglin, ZHANG Quanzhu, LI Xinyu, et al. Development of brushless DC motor drive control system for sidewall coring in offshore oil field[J]. Electronics Quality, 2025(6):13-19.
- [75] 苏鹤成, 苑仁国. 有效提高旋转井壁取心收获率的工艺探讨[J]. 化工管理, 2014(33):187, 189.
- SU Hecheng, YUAN Renguo. Discussion on techniques for effectively improving rotary sidewall coring recovery rate[J]. Chemical Enterprise Management, 2014(33):187, 189.
- [76] 王世圻. 钻进式井壁取心器推靠方法的分析[J]. 航天控制, 1998, 16(2):77-80.
- WANG Shiqi. Analysis of leaning-against method for drilling type sidewall coring Tool[J]. Aerospace Control, 1998, 16(2):77-80.
- [77] 孙文化, 楼一珊, 李忠慧, 等. 水化应力和滤饼质量对地层坍塌压力的影响分析[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(1):28-29.
- SUN Wenhua, LOU Yishan, LI Zhonghui, et al. Effects of hydration stress and filtration cake on formation collapsing pressure[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1):28-29.
- [78] 程林峰, 马林, 吴凤秋. 完善旋转式井壁取心器的综合性能[J]. 石油仪器, 2000(3):12-15, 60.
- CHENG Linfeng, MA Lin, WU Fengqiu. Improvement of synthetic property for rotary side-wall coring tool[J]. Petroleum Instruments, 2000(3):12-15, 60.
- [79] 范光兵, 陈秋生. 旋转井壁取心仪器介绍及现场应用[J]. 科技信息, 2013(4):435.
- FAN Guangbin, CHEN Qiusheng. Introduction and field application of rotating sidewall coring instrument[J]. Science & Technology Information, 2013(4):435.

(编辑 王跃伟)