

井壁取心技术研究现状及发展建议

牛庆磊, 宋 刚, 崔淑英, 张 欣, 陈晓君, 陈根龙

(中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399)

摘要:井壁取心技术是油气储层评价与资源勘探中取心钻探的一种有效技术补救手段,其发展历经近百年,从早期冲击式取心逐步演进为高效、精准的旋转式井壁取心技术。本文系统梳理了该技术的演进脉络,重点聚焦旋转式井壁取心技术国内外研究进展与关键技术突破。通过对比分析国际油服公司与国内企业的技术参数及应用案例,发现国外在岩心尺寸控制、耐高温耐压性能、流体密闭采样及岩心数字化处理等方面具有领先优势;国内虽在机械结构优化、电动直驱技术、耐高温性能等方面取得显著进步,但在取心工具可靠性、复杂地层适应性及智能化水平上仍存在差距。基于当前技术瓶颈,并结合深地、深海勘探需求,本文提出井壁取心技术的未来研发方向。研究成果旨在推动我国井壁取心技术向高效化、智能化、数字化升级,为超深井及非常规油气勘探提供关键技术支撑。

关键词:井壁取心;旋转式取心;取心工具;耐高温高压;智能取心;数字岩心

中图分类号:P634;TE244 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)01-0013-09

Research status and development suggestions of sidewall coring technology

NIU Qinglei, SONG Gang, CUI Shuying, ZHANG Xin, CHEN Xiaojun, CHEN Genlong

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China)

Abstract: The sidewall coring technology is a remedial technical method for oil and gas reservoir evaluation and resource exploration. Its development has spanned nearly a century, gradually evolving from the early impact coring to the high-efficiency and precise rotary sidewall coring technology. This paper systematically reviews the evolution of the sidewall coring technology, focusing on the research progress and key technological breakthroughs of the rotary technology at home and abroad. By comparing and analyzing the technical parameters and application cases of international oilfield service giants and domestic enterprises, it reveals that foreign countries have a leading edge in aspects such as core size, temperature and pressure resistance, fluid-sealing sampling, and core digital processing. Although domestic enterprises have made remarkable progress in mechanical structure optimization, electric direct-drive technology, and temperature-resistant performance, there are still gaps in instrument reliability, adaptability to complex formations, and intelligence level. Based on the current technical bottlenecks and combining with the exploration needs of deep-earth and deep-sea areas, this paper proposes the future research and development directions of sidewall coring. The research results aim to promote the upgrading of Chinese sidewall coring technology towards high-efficiency, intelligence, and digitization, providing key technical support for ultra-deep well and unconventional oil and gas exploration.

Key words: sidewall coring; rotary coring; coring tool; high-temperature and high-pressure resistance; intelligent coring; digital core

0 引言

钻井取心是获取地质信息的重要手段,从地下

钻取岩心可获得所钻地层的岩性、矿物及油气含量等信息,同时能够分析得出地层的渗透率、孔隙度

收稿日期:2025-03-25;修回日期:2025-05-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.01.003

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“深海钻探工程关键技术支撑”(编号:DD20230400402)

第一作者:牛庆磊,男,汉族,1988年生,高级工程师,探矿工程专业,主要从事深海钻探技术研究工作,天津市东丽区锦鲤道23号,469294278@qq.com。

引用格式:牛庆磊,宋刚,崔淑英,等.井壁取心技术研究现状及发展建议[J].钻探工程,2026,53(1):13-21.

NIU Qinglei, SONG Gang, CUI Shuying, et al. Research status and development suggestions of sidewall coring technology[J]. Drilling Engineering, 2026,53(1):13-21.

等岩石物理参数,还能够了解地层构造、岩石强度、可钻性等指标,此类信息对矿产资源勘探及油气开发尤为重要^[1]。钻井取心方式大致可分为钻孔取心和井壁取心两种类型。

钻孔取心通常是在钻井过程中通过中空的钻头和岩心管将岩心提取至地表,历经数十年的研发,目前已发展出包括常规提钻取心、绳索取心^[2]、保压取心^[3]、密闭取心^[4]、定向取心^[5]等众多形式,以满足不同使用工况及不同地层的取心需求。通常情况下每钻满一根岩心管需要回收一次,绳索取心不需要提出孔内全部钻具获取岩心,然而随着取心钻头的磨损,也必须提出整套钻具来更换钻头。特别是对于科学钻探全孔取心而言,提钻占用大量作业时间,所以钻孔取心无疑是一项复杂、耗时、成本巨大的取心方式。但现阶段该方式仍是矿产和油气资源勘探领域最主要的取心方式。

井壁取心是指在已有的钻井中进行侧壁取心,按驱动动力不同,可分为冲击式井壁取心和回转式井壁取心两种。冲击式井壁取心是利用炸药爆炸冲击的原理取得井壁岩石样品,所获岩石样品体积小、形状不规则,并且由于冲击挤压力导致无法获得地层原位物理参数。旋转式井壁取心采用井底动力驱动中空钻头回转,从而在井壁上钻取岩心并予以储存,相比冲击式井壁取心能更好地保持岩石物性特征,是目前井壁取心应用最为广泛、发展潜力最大的取心方式^[6-7]。

本文通过系统梳理井壁取心技术的国内外发展历程,归纳出旋转式井壁取心关键技术研究进展及发展趋势,为未来研究提供方向。

1 井壁取心发展历程

国际上首个井壁取心工具诞生于1928年,属于一种纯机械式工具,一次下放可获得一个深度处的井壁样品。由于对岩心样品数量需求不断增加,开发出一次下钻可获得多个深度处井壁岩心的取心工具——冲击式井壁取心工具。随着对岩石物性和岩心质量需求的提高,又开发出了三角形连续切割井壁取心及旋转式井壁取心工具。井壁取心技术经历近百年的发展历程,始终围绕需求而发展和演变,已成为矿产和油气资源勘探过程中弥补钻孔取心不足的有效方法。

1.1 冲击式井壁取心

1939年,随着电子测井技术的普及应用,一种垂直于井壁获取岩心的技术应运而生,旨在弥补电子测井评价的不足^[8]。该工具采用空心子弹在特定深度水平发射,子弹通过电线激发炸药冲击地层一定深度,这种冲击式井壁取心方式至今仍在使用,原理上没有大的变化,仅是从最初的一次下钻激发6颗子弹,增加至超过100颗子弹,能够获得更多的岩心样品,如图1所示。该取心技术的优势在于具有较高的性价比,能够获得地层岩石主要成分等有效信息,其劣势是在取心过程中会严重影响岩石渗透率、孔隙度等参数,不利于地层物性的准确分析,在疏松地层使用效果较好,在坚硬地层中岩心采取率较低。

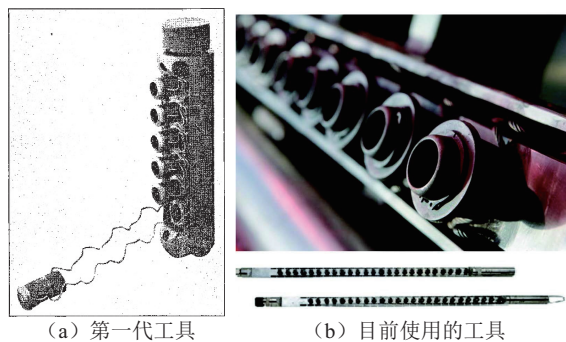


图1 冲击式井壁取心工具

Fig.1 Various percussion sidewall coring tools

1.2 三角形连续切割井壁取心

为了完整保存目标地层岩石物理参数,1967年,由Lane-Wells公司推出了一种电动井壁取样工具(如图2所示),采用2个呈60°的金刚石切割刀片,用于切割边长38 mm的近等边三角形岩样,最长可达1524 mm。切割样品时间通常为30~60 min,所设计的旋转式样品管,1次下钻最多可获得3个样品。然而,该工具受到钻孔泥饼厚度影响,特别是在水基泥浆中,实际获取的岩心尺寸小于设计尺寸。因此,该工具适用于低渗透性的硬岩地层,特别是在油基泥浆体系中使用效果更佳^[9]。但在切割岩心过程中本体会嵌入地层,在压差作用下卡钻的风险较高,随着时间推移这种工具已不再使用。

1.3 旋转式井壁取心

直至1985年,吉尔哈特(Gearhart)公司成功将具有现代意义的旋转式井壁取心工具引入石油行

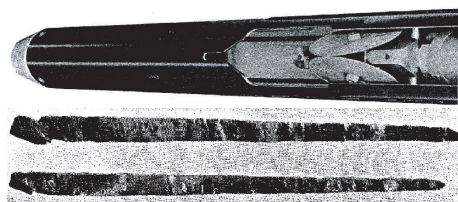


图2 三角形井壁取心工具及回收的岩心
Fig.2 Triangular sidewall coring tool and recovered core samples

业,在提高井壁取心质量方面迈出了重要一步。如图3所示,该工具切割岩心直径23.8 mm,长44.45 mm,所设计的取心钻头可通过液压马达驱动回转,转速可达2000 r/min,并且能够进行90°转向操作,伸出状态可从地层中切割岩心,切割完成后翻转缩回工具内部,在推心杆的推动下将岩心放入储心筒内,岩心顶部放置 $\varnothing 6.35$ mm的钢球或隔片隔离。一次下钻最多可采集12个岩心,储心筒集满后钻具通过电缆回收地面,并取出岩心样品。该工具的问世实现了获取未扰动岩心样品的目标,在胶结较好的硬岩中效果更好,但在孔隙度和渗透率较高的非固结岩层中很难获取岩心,因此,该工具被命名为硬岩取心工具(Hard Rock Coring Tool, HRCT)^[10]。1988年吉尔哈特公司被哈里伯顿公司收购,该工具被重新命名为旋转取心工具(Rotary Sidewall Coring Tool, RSCT)。

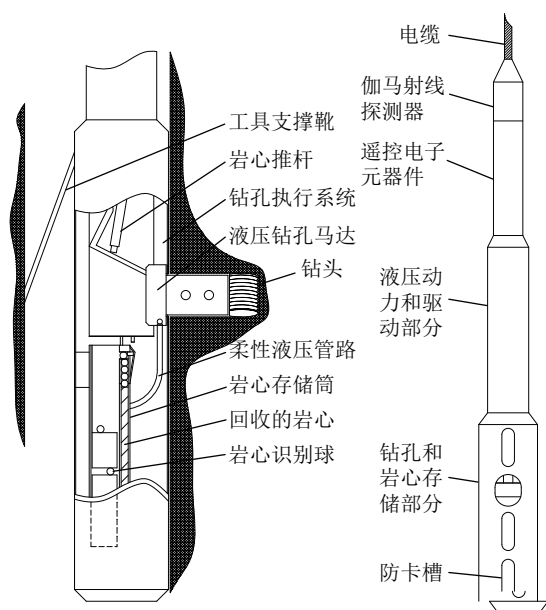


图3 HRCT旋转式井壁取心工具示意
Fig.3 The hard rock coring tool (HRCT) schematic

HRCT工具依然是当下所使用的旋转式井壁取心工具的原型机,该工具成功问世后,吸引了斯伦贝谢、西部阿特拉斯、贝克休斯等油服公司的目光,自1990年各大油服公司陆续推出了自己的旋转式井壁取心工具并提供技术服务,岩心直径均在25.4 mm左右。由于较大直径岩心用于岩石物理、力学性能测试可提供更多具有参考意义的分析结果,2008年巴西国家石油公司(Petrobras)要求服务公司开发可钻取 $\varnothing 38.1$ mm岩心的取心工具,以满足巴西近海油气勘探需求。

2009年贝克休斯公司在其 $\varnothing 25.4$ mm取心工具基础上开发了 $\varnothing 38.1$ mm取心工具(MaxCOR),哈里伯顿公司于2010年底推出了全新设计的 $\varnothing 38.1$ mm HRSCT取心工具,斯伦贝谢公司也于2011年推出新一代井壁取心工具XL-Rock^[11],能够钻取 $\varnothing 38.1$ mm $\times$ 63.5 mm的岩心。这些工具功能原理上与HRCT原始设计类似,但哈里伯顿公司采用更为稳固的电机直驱方案,取代了原始的液压马达驱动钻头的方案,而斯伦贝谢公司延续使用经过20多年验证的液压驱动方式。电机直驱系统可使取心钻头以更小的转速和更大的扭矩切割岩石,提升了钻头的切割能力。 $\varnothing 38.1$ mm取心工具在巴西及全球深水油气井的成功应用,标志着该规格成为了井壁取心的首选标准。

后续至今的研究主要集中在提升回转式井壁取心工具可靠性,增加岩心储存数量,提高耐温、耐压性能,以及针对非常规页岩油气区储层分析的流体采样等功能开发。经过近十几年的发展,该技术已逐步成熟,能够满足深地、深海等复杂工况取心需求。

2 旋转式井壁取心技术发展现状

2.1 国外发展现状

以哈里伯顿、斯伦贝谢和贝克休斯三大油服公司为首的研发团队在HRCT原型机的基础上开展了诸多研究,并依据现场使用情况进行了迭代升级,研发出2代、3代产品,为用户提供井壁取心及样品分析技术服务,主要参数对比见表1。

(1)哈里伯顿公司:目前主要提供3种侧壁取心服务,包括常规HRSCT、Xaminer和CoreVault。HRSCT只是在HRCT基础上将取心尺寸增大到 $\varnothing 38.1$ mm $\times$ 63.5 mm。Xaminer取心工具(见图4)主

表1 三大油服公司主要旋转式井壁取心工具对比

Table 1 Comparative analysis of leading RSCTs from top three oilfield service companies

公 司	型 号	岩心直径/mm	岩心长度/mm	适用井径/mm	岩心数量/个	驱动方式	适用环境
哈里伯顿	HRSCT	38.1	61	194~367	>80	交流电机驱动	204 ℃、172 MPa
	Xaminer	38.1	61	174~445	>80	交流电机驱动	204 ℃、241 MPa
	CoreVault	38.1	61	174~445	10	交流电机驱动	163 ℃、172 MPa
斯伦贝谢	MSCT	23.4	50.8	159~483	20~75	液压驱动	177 ℃、172 MPa
	XL-Rock	38.1	63.5	191~495	50	液压驱动	177 ℃、207 MPa
	SureRock	38.1	76.2	191~495	75	液压驱动	177 ℃、207 MPa
贝克休斯	PowerCOR	25.4	45.7	149.2~432	60	直流电机驱动	204 ℃、172 MPa
	MaxCOR	38.1	63.5	191~356	60	直流电机驱动	204 ℃、172 MPa

要针对深水环境的使用场景,可承受高达 204 ℃ 的温度和 241 MPa 的压力,该工具在巴西国家石油公司桑托斯盆地的一口深水勘探井(水深 2000 m,海底泥面下钻深 4300 m)中成功运行多次,创下了一次下钻回收 71 个大直径岩心的世界纪录^[12]。CoreVault 型增加了流体密闭取样功能,如图 5 所示,岩心储存筒增设了密封端盖,内置的氮气蓄能器可保持岩心的压力,在保存岩心样品的同时避免内部流体流失,有利于储层精确评价,最多可储存 10 个 $\varnothing 38.1 \text{ mm} \times 61 \text{ mm}$ 岩心。



图4 Xaminer井壁取心工具
Fig.4 Xaminer sidewall coring tool



图5 CoreVault井壁取心工具
Fig.5 CoreVault sidewall coring tool

(2) 斯伦贝谢公司:拥有 MSCT (Mechanical Sidewall Coring Tool)、XL-Rock、SureRock 3 个型号的旋转式井壁取心工具,采用了传统的液压马达

驱动钻头回转的方式,结构相对简单。前两款产品区别在于,MSCT 可钻取 $\varnothing 23.4 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm}$ 的岩心,最多容纳 75 个岩心,XL-Rock 可钻取 $\varnothing 38.1 \text{ mm} \times 63.5 \text{ mm}$ 的大直径岩心,最多容纳 50 个岩心。每个样本都采用隔离处理,甲板系统会记录每个岩心准确的深度和采集时间。井壁取心工具通过与伽马测井工具或电阻率成像测井工具(FMI)相结合,并与裸眼测井数据进行对比,可直观检测取样点是否代表了选定岩层区间。最新推出的 SureRock 增强型井壁取心系统(见图 6),极大地提高了系统的可控性和岩心收获率,可采集 $\varnothing 38.1 \text{ mm} \times 76.2 \text{ mm}$ 的大直径岩心,岩心符合斯伦贝谢公司数字岩心分析技术(digital SCAL)规范要求,能够提供更准确、全面的岩石流体分析结果,通过创建 3D 储层模型,更好地了解单井产出和整体油藏状况^[13-14]。

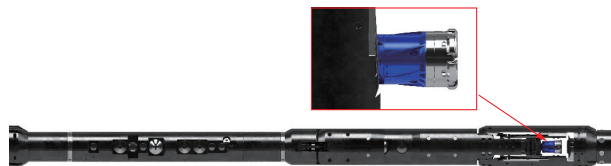


图6 SureRock井壁取心工具
Fig.6 SureRock sidewall coring tool

(3) 贝克休斯公司:开发了 PowerCOR 和 MaxCOR(见图 7) 2 种井壁取心工具,分别可钻取 $\varnothing 25.4 \text{ mm}$ 和 $\varnothing 38.1 \text{ mm}$ 岩心,取心数量均可达 60 个,同样采用直驱电机代替液压马达驱动钻头,优化了钻头结构,提高了钻头转速,确保了岩心收获率,系统耐温 204 ℃、耐压 172.4 MPa,能够满足深井恶劣井下环境使用要求。



图7 贝克休斯 MaxCOR 井壁取心工具

Fig.7 Baker Hughes MaxCOR sidewall coring tool

2.2 国内发展现状

我国旋转式井壁取心技术的研究始于20世纪80年代末,从最初的技术引进、消化吸收到自主研发,成功实现了国产化,打破了国外技术的垄断。

(1)HH-1型旋转式井壁取心工具:1986年,河南油田测井公司与航天部一院十二所开展了首个国产旋转式井壁取心工具技术攻关,历经8年成功研制首台样机HH-1型井壁取心工具。与哈里伯顿的RSCT取心工具类似,该工具也采用液压驱动钻头,最大可采集 $\varnothing 24\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 岩心,一次下井最多取心26个,耐温 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,耐压 80 MPa ^[15]。

(2)FCT系列旋转式井壁取心工具:北京华能通达能源科技有限公司开发的FCT(Formation Coring Tool)型井壁取心工具,能够采集 $\varnothing 24\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 岩心,一次下井可取岩心25个,耐温 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,耐压 100 MPa 。在长庆油田投入使用后存在故障较多、取心率低、取心质量差等问题,效果不理想^[16]。

北京捷威思特科技有限公司在FCT型基础上升级了FCT-L型取心工具(见图8),最大可采集 $\varnothing 38.1\text{ mm} \times 63.5\text{ mm}$ 岩心,最大取心数量50个,可满足 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 138 MPa 作业环境使用,配备了电缆张力计确保井壁取心作业安全。FCT-L型搭载伽马传感器和方向传感器,能够精确控制取心位置及方向。另一款LHFCT型是专门针对水平井设计的大直径井壁取心工具,采用钻杆下放方式,其他参数与FCT-L型一致^[17]。

(3)中石油SRCT系列旋转式井壁取心工具:中石油集团测井有限公司研制了SRCT6701、6702、6703三个系列旋转式井壁取心工具,采用了类似哈里伯顿RSCT系列设计方案,液压马达驱动钻头回转,SRCT6701、6702可取 $\varnothing 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 岩心,SRCT6703可取 $\varnothing 38\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ 岩心,一次下钻可取心26~60个^[18-19]。

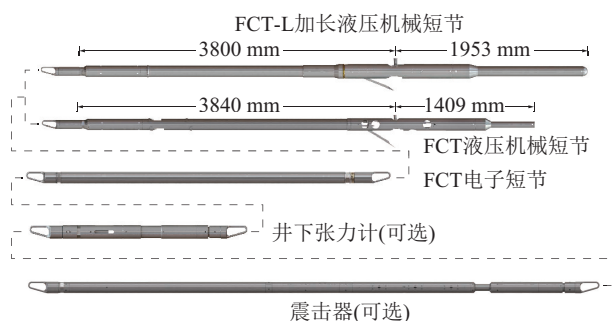


图8 FCT-L型旋转式井壁取心器组合

Fig.8 FCT-L type rotary sidewall coring tool assembly

(4)中海油服ERSC系列旋转式井壁取心工具:中海油服根据不同工况需求,研发了常规增强型旋转井壁取心仪(ERSC)、模块式大直径岩心旋转井壁取心仪(MRCT)、 $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温大直径旋转井壁取心仪(MRCT-HT)、 $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温常规旋转井壁取心仪(ERSC-HT)、 $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温小井眼大直径旋转井壁取心仪(MRCT-dumpy)共五款井壁取心仪器。最新产品采用了更为先进的电动直驱方式,设备可靠性、耐温性能、作业能力以及取心率、取心质量等方面均有大幅提升。

国内主要旋转式井侧壁取心工具具体参数见表2。

3 旋转式井壁取心关键技术研究进展

对比国内外旋转式井壁取心技术发展现状,国内仪器在取心尺寸、取心数量、驱动方式、环境适用性等方面均取得了显著进步,接近了国外同类产品水平,在仪器研发过程中,国内科研人员开展了大量技术攻关,取得了一定的进展。

3.1 系统结构设计

完整的井壁取心系统通常由地面系统和井下仪器两部分组成。地面系统主要由上位控制机、电源系统组成,地面系统与井下控制短节通常采用电力载波^[20]进行半双工模式通讯,接收井下控制采集电子节上传的数据,并将上位机指令输送给井下控制采集电子节。井下仪器则包含张力节(可选)、伽马仪短节(可选)、控制采集电子短节、液压控制短节及机械取心短节等,见图9。

朱维兵等^[21-22]开展了适用页岩气水平井的井壁取心工具研究,在井下仪器串上增加了井下爬行者短节及转向节,实现了井壁取心工具在长距离水平

表 2 国内主要旋转式井壁取心工具对比
Table 2 Comparison of major domestic rotary sidewall coring tools

公 司	型 号	岩心直径/mm	岩心长度/mm	适用井径/mm	岩心数量/个	驱动方式	适用环境
河南油测	HH-1	24	50	160~320	26	液压驱动	150 ℃、100 MPa
北京捷威	FCT	25.4	44.5	152~330	25	液压驱动	175 ℃、138 MPa
斯特	FCT-L	38.1	63.5	175~432	50	液压驱动	175 ℃、138 MPa
	SRCT6701	25	50	160~390	26	液压驱动	155 ℃、140 MPa
中油测井	SRCT6702	25	50	160~390	26~60	液压驱动	175 ℃、170 MPa
	SRCT6703	38	65	190~380	30~60	液压驱动	175 ℃、170 MPa
	ERSC	25	50	152~445	25~50	液压驱动	175 ℃、140 MPa
	ERSC-HT	25	50	152~445	25~51	液压驱动	205 ℃、140 MPa
中海油服	MRCT	38.1	70	190~445	30~80	直流电机驱动	175 ℃、140 MPa
	MRCT~HT	38.1	70	152~432	60	直流电机驱动	205 ℃、140 MPa
	MRCT-dumpy	38.1	54.6	152~445	60	直流电机驱动	205 ℃、140 MPa

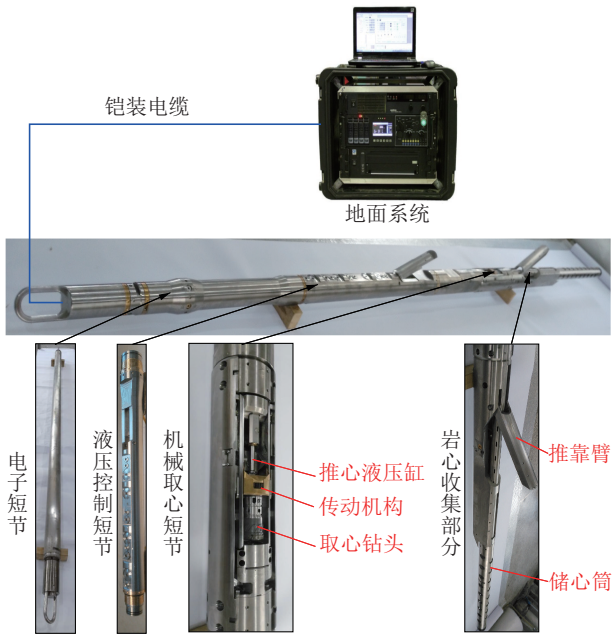


图 9 旋转式井壁取心工具基本组成

Fig.9 Basic components of the rotary sidewall coring tool

段自主行进。取心工具机械短节是整套器具的核心,主要包括推靠、钻进、折心、储心四大功能,取心钻进通常采用液压马达或电机直驱,其他动作采用凸轮或连杆结构,将液压缸的直线运动转换成推、弯、折、退等动作,见图 10。在有限的空间内实现上述功能,需开展结构力学及动作仿真分析,连杆结构强度校验、液压机构参数选择,通过运动仿真软件 ADAMS 验证机构合理性,防止发生干涉^[23-24]。

3.2 电动直驱井壁取心技术研究

随着大直径井壁取心标准的逐渐推广,自哈里

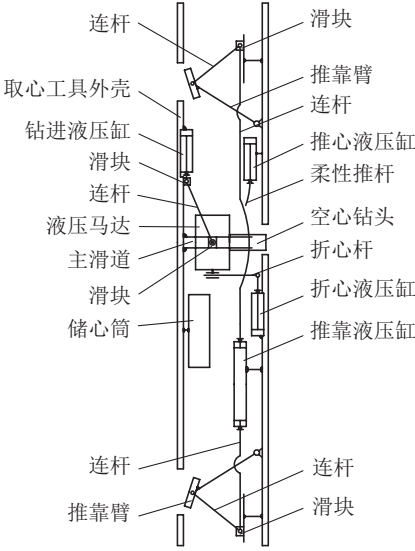


图 10 旋转式井壁取心工具运动简图

Fig.10 Schematic diagram of rotary sidewall coring tool motion

伯顿率先应用了电动直驱方式以来,贝克休斯、中油测井和中海油等油服公司也相继推出了电动直驱方案,有所不同的是,哈里伯顿采用 10 kV AC 与高强度电缆组合为井下电机提供动力,相比标准电缆具有更小的阻抗^[25]。贝克休斯 MaxCOR 采用了直流无刷电机配合多级减速器驱动钻头,钻头可在 0~1200 r/min 内无级调速。中海油服 MRCT 系列采用 1000 V DC 驱动取心电机,600 V DC 驱动液压动力源,取心电机转速达 2800 r/min,并可通过地面 10 kW 取心动力电源调节钻头转速。刘铁民等^[26]在二维有限元软件中建立电机仿真模型,计算空载磁

通密度,通过试验测出最大扭矩达 $10\text{ N}\cdot\text{m}$,满足大直径金刚石侧壁取心高效钻进需求。

3.3 取心工具热管理系统研究

近年来,深海油气与深地勘探项目呈现出日益增长的趋势,地层高温已然成为井壁取心作业面临的棘手问题。常规电子元器件耐温不超过 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,井下仪器长时间暴露在高温环境中,环境温度传递及元器件自身放热,很快会超过仪器耐温极限,导致仪器损坏甚至出现井内事故,所以必须对井下仪器采取热管理措施。魏赞庆等^[27]针对旋转式井壁取心工具 $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ 耐温目标,设计了一套分布式储热

热管理系统。如图11所示,采用一体式金属承压保温瓶加隔热塞对电路板进行热保护,隔绝径向和轴向环境漏热,隔热塞由PEEK外壳及纳米气凝胶内核组成,从而隔绝外部环境热量。同时,采用被动热管理系统,在电子节骨架各处布置了多个储热模块和内埋储热模块,用于存储电子元器件自身发热,储热材料为石墨纳米片-石蜡复合相变材料。采用这套热管理系统,大部分热量被模块吸收,模拟显示取心工具在 $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下工作 12 h ,内部热源最高温度维持在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,体现热管理系统具有良好的控温效果^[27-28]。

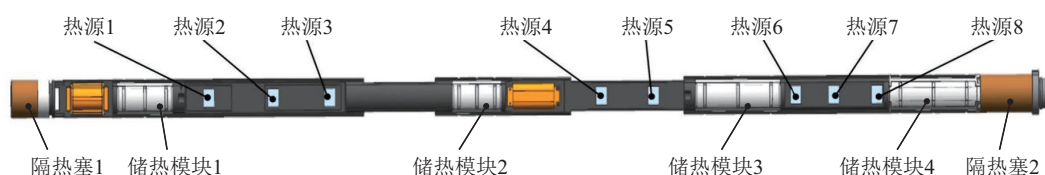


图11 旋转井壁取心热管理系统设计

Fig.11 Thermal management system design for rotary sidewall coring

3.4 解卡解堵技术

由于旋转式井壁取心通过电缆下放,没有单独的泥浆循环通道,在侧壁取心钻进过程中由于岩粉排出不畅,钻头容易卡在孔内,进而导致取心工具无法顺利回收。针对上述问题,魏赞庆等^[29]设计了主动解卡和被动解卡方式,即在井下器具钻头同方向上增加反推靠臂,实现主动解卡,在钻头滑块处和空心钻头加长杆处设计薄弱点,一旦发生卡钻可通过上提电缆拉断钻头,实现强制解卡。王荣飞等^[30]根据现场施工经验,采用“三进三退”的钻进方式,即将钻进长度分为三段,每钻进一段钻头后退一次,清理岩屑,降低卡钻风险。

4 我国井壁取心技术发展建议

纵观旋转式井壁取心仪器近十几年的发展,该技术正逐步朝着模块化、电动化、大直径岩心和数字化方向迈进。国内以中海油服为首的企业及高校对相关技术展开了持续研究,在生产应用中不断积累经验并进行技术改进。然而,与国外仪器参数相比仍存在一定差距,尤其是在器具可靠性、流体采样和岩心数字化等方面存在显著差距,建议开展以下研究:

(1)进一步开展耐高温、高压井壁取心器具攻

关。目前,我国已经完成的深地塔科1井(完钻深度 10910 m)和正在施工的深地川科1井(设计深度 10520 m)两口超万米的探井,井底最高温度达 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$,井底压力超 140 MPa ,在万米深度采用常规钻孔取心获取岩心,是一项极为艰巨的工作,一旦出现取心率不达标,将导致巨大的损失。针对这一问题,常规做法采用侧钻补心方式,但工艺复杂且耗资巨大^[31]。而旋转式井壁取心技术则可弥补这一损失。鉴于当前国产仪器在耐温与耐压性能上尚无法满足超深井井壁取心要求,建议着力研发耐高温新材料并优化热管理技术,以期实现耐温 $\geq 240\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、耐压 $\geq 172\text{ MPa}$ 的技术指标。

(2)流体密闭采样井壁取心技术研发。油气地层中所蕴藏的流体样品具有重要价值,因此,岩心采取率及保真性对分析评价地层中所蕴藏的流体性能至关重要。常规侧壁取心作业在降压过程中, $50\%\sim 70\%$ 流体会从岩心中逃逸出去,哈里伯顿 CoreVault 系统可在井下将流体密封在压力密封容器内,从而获得高质量岩心样品。目前国产仪器还不具备这一功能,需尽快开展攻关研究。

(3)一键智能取心技术研究。当前井壁取心仪器普遍存在操作复杂的问题,对工程师的经验和技术水平依赖性强,特别是在取心钻进的参数选择、

岩心解卡操作等方面。建议结合人工智能及大数据算法,开展智能取心技术研究,根据测井地层特征、器具类型自动匹配取心工艺参数,提高器具对不同地层的适应能力、岩心采取率及成功率。

(4)井壁取心融合数字岩心分析技术。与传统的钻井取心相比,井壁取心所获的岩心尺寸小、数量少,为更加精准描述地层信息,建议融合数字岩心技术,采用物理实验或数值模拟方法,构建反映岩石真实微观结构的3D数字岩心,经图像处理后的数字岩心数据进行岩石物理属性模拟,获得相对准确的渗透率、毛细管压力、饱和度等有关油气储层至关重要的参数^[32]。将岩心尺度得到的岩石物理参数转化为数字井筒和数字油藏,更好地服务于资源勘查评价及油气藏开发。

5 结论

(1)井壁取心技术经历了近一个世纪的发展,从最初的机械式单个取心发展到旋转式井壁取心,实现了电缆一次下放获取数十个岩心样品的目标,形成了一种高效、经济、实用的特种取心技术方式。

(2)对比国内外井壁取心技术发展现状,相比国内,国外产品从取心尺寸、数量到耐温、耐压性能方面均具有一定优势,流体密闭取样、岩心处理分析优势更为显著。

(3)目前国内在旋转式井壁取心技术研究上开展了大量的研究与攻关,突破了机械结构设计、井底液压动力系统、电动直驱及热管理系统等关键技术,创造性地提出了旋转式井壁取心和爬行器相结合的技术方法,实现了页岩气水平井井壁取心。

(4)展望旋转式井壁取心发展趋势,建议我国尽快开展耐高温、高压及流体密闭采样井壁取心器具研发,并融合智能化、数字化岩心等先进技术,进一步提升产品技术水平,更好地服务于深海、深地油气勘探开发。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 李鑫森,李宽,孙建华,等. 国内外绳索取心钻具研发应用概况及特深孔钻进问题分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(4): 15-23, 39.
- [3] 韩泽龙,李小洋,赵明,等. 保压取心钻具球阀工作动力学分析[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 32-38.
HAN Zelong, LI Xiaoyang, ZHAO Ming, et al. Analysis of working dynamics of ball valve with pressure core sampler [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 32-38.
- [4] 曹龙龙,张恒春,王稳石,等. 密闭取心钻头两相流流场CFD模拟研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(11): 35-41.
CAO Longlong, ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, et al. CFD simulation of the two phase flow field in the sealed coring bit [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(11): 35-41.
- [5] 韩泽龙,李小洋,施山山,等. 定向钻进连续取心钻具设计及取心参数仿真分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 39-46.
HAN Zelong, LI Xiaoyang, SHI Shanshan, et al. Design of drilling tool and simulation analysis of parameters for continuous coring in directional drilling [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 39-46.
- [6] 林彤. 侧壁取心新工具[J]. 地质与勘探, 1992(5): 58-59.
LIN Tong. New tool for sidewall coring [J]. Geology and Prospecting, 1992(5): 58-59.
- [7] 赵战航,张朝界,朱维兵,等. 页岩气旋转式井壁取心工具研究现状及发展[J]. 石油矿场机械, 2020, 49(3): 94-98.
ZHAO Zhanhang, ZHANG Zhaojie, ZHU Weibing, et al. Research status and development of shale gas rotary sidewall coring tools [J]. Oil Field Equipment, 2020, 49(3): 94-98.
- [8] Leonardon E G, McCann D C. Exploring drill holes by sample-taking bullets [J]. Transactions of the AIME, 1939, 132(1): 85-99.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Abhishek A, Laronga R, Walker L. Rotary sidewall coring-size matters [J]. Oilfield Review Winter, 2014, 25(4): 30-39.
- [12] Jackson C. Tutorial: a century of sidewall coring evolution and challenges, from shallow land to deep water [J]. Petrophysics, 2021, 62(3): 230-243.
- [13] SLB. SureRock enhanced sidewall coring solution [EB/OL]. [2024-12-23]. <https://www.slb.com/es/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/reservoir-characterization/surface-and-downhole-logging/wireline-openhole-logging/sidewall-coring/surerock-enhanced-sidewall-coring-solution>.
- [14] SLB. Digital rock analysis [EB/OL]. [2024-12-23]. <https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/reservoir-characterization/rock-and-fluid-analysis/core-analysis/digital-scal>.

- [15] 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 rotart sidewall coring Tool and its application[J]. Well Logging Technology, 2000, 24(4): 307-310.
- [16] 吴少威, 孙建伟, 贺红民, 等. FCT-2型钻进式井壁取心器在长庆油田的应用与分析[J]. 石油仪器, 2010, 24(5): 31-33.
WU Shaowei, SUN Jianmin, HE Hongmin, et al. Application of FCT-2 drilling type sidewall coring gun in Changqing Oil-field[J]. Petroleum Instruments, 2010, 24(5): 31-33.
- [17] 钻进式井壁取芯器(FCT)/大颗粒钻进式井壁取芯器(FCT-L) [EB/OL]. [2024-12-24]. <http://www.renhesun.com/index.php/Home/Product/details/id/200/lang/zn.html>
- [18] 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.
- [19] 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. SRCT6702 drilling-type well wall corer in Hainan Fushan oil field application [J]. Technology Innovation and Application, 2017 (16): 130.
- [20] 王莹. 直驱式井壁取心器电路的设计[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
WANG Ying. Circuit design for extended rotary sidewall coring tool [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [21] 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 Zhaojie, 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.
- [22] 朱维兵, 庞青松, 张朝界. 页岩气旋转式井壁取心器转向机构设计与优化[J]. 石油机械, 2021, 49(4): 51-57.
ZHU Weibing, PANG Qingsong, ZHANG Zhaojie. Design and optimization of steering device for shale gas rotary sidewall coring[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(4): 51-57.
- [23] 王新杰. 旋转式井壁取芯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.
- [24] 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.
- [25] Jackson C. Rotary sidewall coring advancements for deep water, including a coring background overview [C]//SPWLA 61st Annual Logging Symposium. Virtual Online Webinar: SPWLA Annual Logging Symposium, 2020: SPWLA-5002.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Pairors F, Nadeev A, Kirkman K, et al. Assessment of sidewall cores for routine and special core analyses [C]//the International Symposium of the Society of Core Analysts. Newfoundland: SCA, 2015: 1-7.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 张伟. 深孔岩心钻探技术问题探讨和发展展望[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(S1): 1-6.
ZHANG Wei. Discussion on the technical problems of deep hole core drilling and development prospects [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(S1): 1-6.
- [32] 赵建鹏, 陈惠, 李宁, 等. 三维数字岩心技术岩石物理应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(3): 1099-1108.
ZHAO Jianpeng, CHEN Hui, LI Ning, et al. Research advance of petrophysical application based on digital core technology [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(3): 1099-1108.

(编辑 王跃伟)