钻井下套管工具 CRT 国内外应用的调研

刘　巍

中石化中原石油工程公司塔里木分公司安全环保管理中心　新疆　库尔勒　841600

摘　要：随着油气勘探开发向复杂地层与极端工况持续延伸，CRT 顶驱下套管工具的应用优化对提升作业效率、防控井下风险至关重要。梳理了 CRT 工具的核心分类、性能参数与应用价值，系统对比了国内外工具在场景适配、技术逻辑、操作规范及配套体系的应用差异，明确了不同技术路径的优劣势，为该工具的本土化技术迭代与规范化推广提供核心参考。

关键词：CRT 下套管工具；下套管作业；油气开发；应用对比

引言：油气勘探开发领域的持续拓展，使得大位移井、水平井、超深井等复杂井型占比不断提升，常规下套管工艺频繁出现遇阻卡滞、套管螺纹损伤、作业时效偏低等问题，已无法适配复杂地层的作业需求。CRT 顶驱下套管工具凭借旋转下放与循环一体化的核心优势，成为破解复杂井型下套管难题的关键装备，其应用体系建设与国内外发展差异，已成为油气工程领域的重点研究方向。

1 CRT 下套管工具应用概述

CRT 即顶驱下套管工具，是地面下套管核心装备，与吊卡、动力钳等辅助工具互补，负责套管柱旋转下放与循环，辅助工具承担上扣、传输等工序。其按夹持方式分为内胀式、外夹式、复合式，驱动形式分液压与机械，功能分常规下入型、旋转循环一体化型。核心性能参数：适配套管尺寸 4-1/2in~20in，井深 3000m ~ 7000m（超深井可达 9000m 以深），额定载荷 100t ~ 1500t，工作扭矩 10kN·m~80kN·m，耐温 120℃（常规）、180℃（高温），耐压 35MPa~70MPa。作业核心控制参数为下放速度、旋转扭矩等六大类，决定作业安全与效率。该工具依托顶驱快速建立循环通道，解决复杂井遇阻难题，作业时效提升 25%以上，适配油气勘探、地热开发等场景，技术迭代以模块化设计为核心，降低运维与作业成本[1]。

2 国外 CRT 下套管工具应用体系

2.1 国外工具核心应用场景界定

国外 CRT 下套管工具核心应用场景聚焦复杂地质与极端环境的精准作业，规模化应用于北美墨西哥湾深海油气区、欧洲北海高承压油气藏、中东波斯湾超深井油气田及俄罗斯极地陆上油气开发区块。工具优化机械结构与材料性能，可适配深海、极地等极端套管下放任务，其高精度定位系统能实现毫米级误差控制，保障井眼轨迹精准匹配，降低井下事故风险；采用耐腐蚀合金与复合涂层，增强在含硫化氢、二氧化碳等腐蚀性介质中的耐久性，延长作业周期。动态监测模块实时采集温压、振动数据，通过智能算法优化下放参数提升效率，应用场景同时覆盖陆地非常规油气藏、地热能勘探等领域，适配不同地质与工程需求。

2.2 国外工具应用技术适配标准

国外 CRT 下套管工具应用技术适配标准，聚焦机械性能与环境适应性协同优化，形成全参数覆盖的规范化体系。该标准明确各类工具核心性能指标，针对深海、超深井等极端工况，规定高强度合金材料的疲劳寿命、耐蚀性及抗冲击阈值，通过复合涂层技术提升工具耐高温、高压及抗腐蚀能力，保障极端地质条件下稳定作业。结构设计采用模块化理念，明确接口通用标准，可快速更换关键部件以适配不同井眼尺寸与地质构造；动态监测系统集成多参数传感器，规定数据采集精度与响应时效，通过智能算法优化下放参数，保障作业精度与安全。标准强调极限工况模拟验证与全生命周期测试，推动接口标准化，促进设备互操作性，为跨国能源项目提供技术支撑[2]。

2.3 国外工具应用操作核心规范

国外 CRT 下套管工具操作核心规范，聚焦作业流程标准化与安全控制精细化，形成全流程可追溯体系。操作前需完成设备全维度检测，包括机械部件磨损检测、传感器校准、液压系统密封性验证及极限工况性能模拟，确保工具处于最佳状态。下放过程采用六大核心参数全自动闭环调控：下放速度 0.1 ~ 1.5m/min（遇阻

降至 0.05m/min 以下），旋转扭矩为套管抗扭强度 40%~60%（超阈值停转），旋转转速 5~20r/min（随井眼曲率调整），循环泵压≤ 地层破裂压力 70%，悬重载荷波动≤ 额定载荷 10%，工具夹持力为套管屈服强度 30%~50%。通过智能算法自动调参，规避井壁刮蹭、套管卡阻风险；安全规范明确作业人员技能考核与应急要求，操作记录留存参数曲线、异常处理及维护日志，为作业优化提供支撑，推动流程智能化、可追溯。

2.4 国外工具应用配套支撑体系

国外 CRT 下套管工具应用配套支撑体系，聚焦技术研发、设备维护、人员培训与数据管理多维度协同，形成成熟技术生态闭环。技术研发侧重高强度材料、智能传感与自适应算法迭代，持续提升工具耐腐蚀性、作业精度及极端工况适应性；设备维护采用定期检测与预测性维护结合策略，通过实时状态监测预判故障，延长部件寿命、保障作业连续。人员培训采用模拟训练与实操考核结合模式，强化操作与应急处理能力；数据管理系统集成作业全周期参数与维护记录，通过大数据优化流程，同时搭建国际技术交流平台，推动标准统一与经验共享，为全球工具应用提供坚实保障。

3 国内 CRT 下套管工具应用现状

3.1 国内工具应用落地基础条件

国内 CRT 下套管工具已实现规模化应用，核心应用区域覆盖国内主要油气产区与地热开发区块。塔里木盆地超深井区块大量应用大载荷、耐高温型 CRT 工具，完成多口 8000m 以深超深井套管下放；四川盆地页岩气田采用旋转循环一体化 CRT 工具，解决水平井长水平段岩屑床清除与遇阻问题；鄂尔多斯盆地致密油气藏应用模块化 CRT 工具，提升致密油气开发作业效率；渤海湾盆地、松辽盆地地热开发区块也逐步推广应用，成效良好。国内核心生产厂家包括中石化石油机械股份有限公司、中石油宝鸡石油机械有限责任公司、中海油能源发展股份有限公司、山东科瑞控股集团与杰瑞石油服务集团股份有限公司，各厂家均实现 CRT 工具核心部件自主研产，形成全系列规格产品体系[3]。

3.2 国内工具应用技术适配特点

国内 CRT 下套管工具技术适配聚焦本土地质特征与作业需求，具备高适配性、高性价比特点。材料研发端针对复杂地层优化高强度复合材料配方，提升耐腐蚀性与抗疲劳性能，可适应高温、高压及含腐蚀性介质环境，满足高强度作业需求；机械结构采用模块化理念，优化主流井眼尺寸与套管规格的部件接口，实现关键部件快速更换，适配不同井眼与地质构造，提升作业灵活性；智能算法集成动态参数调控系统，实时优化下放速度、扭矩及旋转角度，针对大位移井、水平井等复杂井型优化控制逻辑，保障作业精度与安全；同时注重与国内现有顶驱、钻井系统兼容，通过标准化接口实现快速适配，降低技术升级成本，推动工具在多类作业场景快速落地。

3.3 国内工具应用操作核心流程

国内 CRT 下套管工具应用操作，已形成适配国内主流场景与设备的作业全周期精准控制标准化流程。操作前需完成设备全状态核验，包括机械部件磨损检测、传感器校准、液压系统密封性验证及地面联机调试，确保工具处于最佳状态。下放过程采用人工监控与智能辅助结合的参数调控模式，核心控制参数及范围：下放速度 0.2~1.2m/min，由作业人员按井况微调；旋转扭矩为套管抗扭强度 35%~55%，超阈值声光预警；旋转转速 8~15r/min，适配国内多数顶驱；循环泵压≤ 地层破裂压力 65%，悬重载荷波动≤ 额定载荷 12%，工具夹持力为套管屈服强度 25%~45%。针对国内复杂地层，建立分级异常处理机制，参数异常自动预警并启动干预方案；操作记录留存参数曲线、异常处理及维护日志，通过数据追溯优化策略，提升作业效率与可靠性。

3.4 国内工具应用配套保障体系

国内 CRT 下套管工具应用配套保障体系，聚焦技术研发迭代、设备全周期管理、人员专业能力提升及数据智能分析四维协同，形成本土化闭环保障网络。研发端优化高强度材料与智能调控算法，提升工具在复杂地质环境中的耐腐蚀性与作业精度；设备管理采用预测性维护策略，通过传感器实时监测机械状态，结合历史数据预判故障，提前维护延长设备寿命。人员培训强化操作与应急能力，依托模拟仿真平台开展复杂工况实操演练；数据系统集成作业全周期参数与异常、维护记录，运用大数据优化流程，实现过程可追溯与策略动态调整，为工具规模化、规范化应用提供全面保障[4]。

4 国内外 CRT 工具应用核心差异分析

4.1 应用场景适配维度差异

国内外 CRT 工具在应用场景适配维度的核心差异，体现为地质环境复杂性与技术需求匹配度的不同。国外工具侧重适配深海、极地、超深井等极端地质条件，针对高温高压、强腐蚀、大位移等极限工况优化材料性能与结构设计，强化极端环境下的稳定性与可靠性，以满足全球各类高难度作业区块的开发需求。国内工具则聚

焦陆地常规油气田、页岩油气藏、中深层地热开发等本土主流场景，针对国内地层特征与井型特点优化机械结构与控制逻辑，通过模块化设计提升不同井眼尺寸、地质构造下的作业灵活性，实现快速部件更换与动态参数调控。两者技术路径差异化明显：国外强调极端工况适应性突破，国内则注重常规复杂场景下的效率提升与成本优化。

4.2 技术应用逻辑核心差异

国内外 CRT 工具技术应用逻辑的核心差异，在于研发方向与技术集成模式不同。国外以极限性能突破为核心，侧重材料创新与智能算法深度融合，通过高强度耐蚀合金、新型复合涂层研发，强化极端工况下的材料性能上限，集成多参数传感、自适应闭环控制等智能技术，实现作业参数全自动动态优化与风险预判。国内以本土化适配与规模化推广为导向，聚焦常规复杂场景的效率提升与成本优化，在现有材料体系上优化机械结构，通过模块化设计实现多场景快速适配，将智能算法应用于动态参数调控与异常预警，适配国内现有作业体系，形成实用、经济性核心的技术迭代路径，与国外技术形成互补发展格局。

4.3 操作应用规范流程差异

国内外 CRT 工具操作应用规范流程的核心差异，体现在作业管控模式与智能干预程度不同。国外侧重全流程实时智能监控与算法自动干预：通过高密度传感器阵列采集井下全参数，结合自适应算法实现下放速度、扭矩、旋转角度的全自动闭环调控，无需人工频繁干预；异常事件采用全自动预警与备用方案自动触发机制，保障极端工况作业稳定性。国内注重模块化操作与标准化流程结合：核心环节采用人工监控加智能辅助调控模式，以标准化步骤规范流程，依托模块化设计实现工具快速拆装与部件更换，适配国内作业队伍技术水平与设备条件，在保障安全精度的同时，提升流程灵活性与可推广性，形成适配本土、兼具实用与规范的操作体系。

4.4 配套应用体系建设差异

国内外 CRT 工具配套应用体系建设的核心差异，体现在技术研发路径与资源整合模式的不同。国外侧重跨领域技术融合与全球资源整合，联合多领域研发机构协同创新，搭建全球统一技术标准与服务网络，实现工具在全球范围的标准化应用与技术支持，形成全球化技术生态闭环。国内聚焦本土化产业链协同与技术落地，依托本土机械制造优势，实现核心部件自主研产，搭建研发、制造、培训及服务一体化本土体系，强化与国内钻井设备、作业流程的适配性，构建全流程本土产业链，凭借成本控制、快速响应与本土化服务的独特优势，推动工具在国内核心油气产区及地热开发领域快速推广[5]。

结束语：CRT 下套管工具是复杂油气藏高效开发的核心配套装备，国外已形成成熟的极端工况应用体系与标准化规范，国内则构建了适配本土场景的国产化技术及配套保障网络，应用前景广阔。国内油气勘探向超深井、页岩油气藏延伸及地热开发拓展，推动其市场需求攀升，南海东部等区块应用已验证其适配性。依托本土产业链优势，核心技术持续突破，未来通过智能化迭代与标准完善，将实现规模化推广，助力油气开发降本提效，为国家能源安全提供支撑。

参考文献

[1] 孟令峰. 顶驱下套管装置检测系统的研制 [J]. 石油管材与仪器,2025,11(3):68-72.

[2] 黄飞宇, 莫康荣, 邓文彪, 等.CRT 下套管技术及在海上现场应用 [J]. 内江科技,2024,45(12):10-12.

[3] 张庆斌, 豆乔, 梁海青, 等. 基于有限元的顶驱下套管装置密封胶筒设计 [J]. 石油矿场机械,2024,53(6):49-55.

[4] 刘士岩, 张宁, 王坤青, 等. 一种液压驱动顶驱下套管装置的研制与应用 [J]. 内蒙古石油化工,2024,50(3):116-119.

[5] 邓荣, 董毅军, 王德贵, 等. 外夹式顶驱下套管装置的研制及应用 [J]. 机械工程师,2024(4):105-108.