

耐高温井下动力钻具测试技术方案研究

崔哲瑜^{1,2}, 王 瑜^{1,2*}, 孔令镨^{1,2}, 高玉林^{1,2}

(1. 深部探测与成像全国重点实验室, 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 矿山钻探救援应急管理部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 深井、超深井及高温地热井等复杂工况对井下动力钻具的高温适应性、输出稳定性与服役可靠性提出了苛刻要求, 地面模拟环境测试成为钻具入井前的关键环节, 当前针对 300 °C 高温和高压条件下井下动力钻具动态测试的条件缺失, 成为深地钻探工程必须解决的关键问题。本文首先调研对比分析了国内外相关动力钻具测试系统技术特点和存在的主要技术问题; 针对千米特深井科学钻探工程需求, 提出了耐高温井下动力钻具测试初步技术方案: 采用耐高温螺杆泵串联驱动、整体保温、集中冷却分布式动密封等建立高温高压钻井液闭式循环, 通过驱动-负载能量回馈和状态监测降低功率消耗实现长周期测试, 集成模拟负载和实钻碎岩等方式实现对井下动力钻具工作特性、钻进工艺、取心工艺的测试, 为后续开展耐高温井下动力钻具试验平台研制提供方案支撑。

关键词: 高温高压; 井下动力钻具; 动态测试; 工作特性; 取心工艺; 特深科学钻探

中图分类号: P634.4; TE921⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0070-10

Research on technology scheme for high-temperature downhole-motor test

CUI Zheyu^{1,2}, WANG Yu^{1,2*}, KONG Lingrong^{1,2}, GAO Yulin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Mine Drilling and Rescue, Ministry of Emergency Management, Beijing 100083, China)

Abstract: The complex operating conditions encountered in deep, ultra-deep, and high-temperature geothermal wells impose stringent requirements on the high-temperature adaptability, output stability, and service reliability of downhole motors. The test in the ground simulation environment becomes the key link before the drilling tool enters the well. However, facilities capable of dynamically testing downhole-motor at temperatures of up to 300 °C under high-pressure conditions remain unavailable, constituting a key technical challenge, which must be addressed in deep-earth drilling projects. In this study, surveys and comparative analysis are firstly made including the technical characteristics and major limitations of representative downhole-motor testing systems developed in China and abroad. To meet the requirements of scientific drilling in 10000 m-class ultra-deep wells, a preliminary testing scheme for high-temperature downhole-motor is then proposed. A closed-loop circulation system for high-temperature, high-pressure drilling fluid is established using multiple high-temperature screw pumps connected in series, whole-system thermal insulation, and centrally cooled distributed rotary seals. Drive-load regenerative energy feedback and condition monitoring are incorporated to reduce power consumption and support extended-duration testing. Simulated loading and actual rock-drilling modules are integrated to evaluate the operating characteristics of downhole-motor as well as their adaptability to drilling and coring processes. The proposed scheme provides a technical basis for the subsequent

收稿日期: 2026-07-31; 修回日期: 2026-08-17 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.008

基金项目: 国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1000903); 国家自然科学基金面上项目(编号: 42172343); 余姚重点研发计划项目(编号: 20251JH03010004)

第一作者: 崔哲瑜, 男, 汉族, 2000 年生, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, 研究方向为地质装备工程, 北京市海淀区学院路 29 号, zoe_y_cui2018@126.com。

通信作者: 王瑜, 男, 汉族, 1979 年生, 教授, 博士生导师, 地质资源与地质工程专业, 博士, 研究方向为高温钻探技术, 北京市海淀区学院路 29 号, wangyu203@cugb.edu.cn。

引用格式: 崔哲瑜, 王瑜, 孔令镨, 等. 耐高温井下动力钻具测试技术方案研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 70-79.

CUI Zheyu, WANG Yu, KONG Lingrong, et al. Research on technology scheme for high-temperature downhole-motor test[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 70-79.

development of a high-temperature downhole-motor test platform.

Key words: high-temperature and high-pressure; downhole-motor; dynamic testing; operating characteristics; coring process; extra-deep scientific drilling

0 引言

深地、深海资源勘查开发是保障国家能源资源安全和提升高端钻探装备自主能力的重要方向。近年来,随着深地国家科技重大专项以及深海关键技术与装备等相关任务的推进,油气、地热、矿产和海洋资源勘探逐渐向更深部、更复杂和更极端环境拓展。深井、超深井、深海和高温地热井对钻探工艺器具提出了更高要求,井下工具需要长期承受高温、高压、高地应力、复杂介质、强振动和交变载荷等多因素耦合作用,其服役可靠性直接影响钻井效率、作业安全和工程成本^[1-2]。

现场试验可还原真实井下工况,但存在成本高、周期长、风险大和井下数据获取困难等问题,同时由于钻井过程的复杂性较高,现场试验通常是多种因素共同作用的综合效果,不能直接反映地层参数对钻具的影响^[3]。因此,在下井前通过地面试验台开展性能测试、工况模拟和可靠性评价,是提高动力钻具设计水平和降低现场应用风险的重要手段。

目前,国内外已建成多类井下动力钻具测试试验平台,为钻具性能测试和井下工具可靠性评价提供了基础。然而,现有平台在高温介质循环、高温动密封、负载模拟、长周期连续运行等方面仍存在不足,难以完全满足深部复杂工况下动力钻具测试需求。基于此,本文围绕井下动力钻具高温测试试验台的应用需求、发展现状、关键技术和发展趋势进行综述,并在此基础上提出耐高温动力钻具双模式测试方案构想,以期对相关试验装置设计和评价方法研究提供参考。

1 耐高温井下动力钻具概述

深部科学钻探和深部资源勘查不断向万米级及更深地层拓展,井底温度、压力和地应力随钻探深度增加,井下动力钻具的服役条件日趋严苛。其中,地层温度为149~204℃或地层压力为68.9~137.9 MPa的工况可划入高温高压范围;温度达到204~260℃或压力达到137.9~206.8 MPa时进入超高温高压范围;当温度超过260℃或压力超过206.8

MPa时,则属于极端高温高压工况^[4]。因此,耐高温井下动力钻具逐渐成为深部钻探工艺器具的重要发展方向。在现有井下动力钻具中,螺杆钻具和涡轮钻具属于工程应用最为广泛的两种钻具,并均具有较为明确的耐高温技术发展路径。

1.1 螺杆钻具

螺杆钻具属于容积式井下动力钻具,主要由旁通阀总成、防掉总成、马达总成、万向轴总成和传动轴总成组成^[5](见图1)。钻井液进入马达后,在定子与转子形成的密闭腔内产生压力差,推动转子作行星运动,并通过万向轴和传动轴将动力传递至钻头,具有低转速、大扭矩和工况适应性较强等特点,广泛应用于定向钻进、复合钻进及取心作业。根据定子材料和密封方式,螺杆钻具可分为橡胶定子螺杆钻具和全金属螺杆钻具。

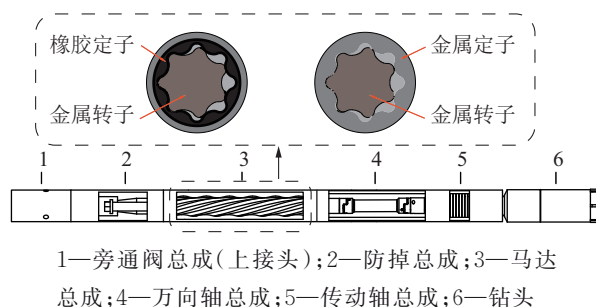


图1 螺杆钻具结构示意图

橡胶螺杆钻具采用金属转子与橡胶定子构成共轭啮合副,并依靠橡胶弹性变形形成过盈配合和连续密封腔。该结构密封性能较好,能够获得较高的容积效率和输出扭矩,是目前应用最广泛的螺杆钻具。但传统橡胶受高温影响较大,容易出现老化、溶胀、脱胶导致马达泄漏过大,进而导致马达失效。因此,近年来耐高温氢化丁腈橡胶等弹性体、等壁厚定子结构及定转子配合优化成为主要发展方向,可减弱厚壁橡胶的热滞后和不均匀变形,拓展橡胶定子螺杆钻具的高温适用范围^[6]。但其性能仍受温度、介质作用和长期交变载荷的共同影响,高温条件下的密封保持、输出稳定性及服役寿命仍需通过动态试验进行评价。

全金属螺杆钻具以金属定子替代橡胶定子,定子与转子均采用耐高温金属材料,可避免橡胶在高温条件下老化失效,因而具有更高的耐温潜力。由于金属定子之间不能依靠弹性过盈形成密封,其工作性能对型线精度、配合间隙和热变形更加敏感。近年来,全金属螺杆钻具主要通过定子型线与间隙优化、耐磨耐蚀涂层及材料匹配等途径改善高温条件下的密封和运行稳定性^[7-9]。因此,高温作用下的间隙变化、泄漏特性、输出衰减及长期磨损过程,是全金属螺杆钻具测试评价的主要内容。

1.2 涡轮钻具

涡轮钻具属于透平式井下动力钻具,主要由多级涡轮、主轴、轴承和传动部件组成(见图2)。钻井液流经定子叶片后改变流动方向并获得一定速度,随后作用于转子叶片,将流体的压力能和动能转化为主轴的旋转机械能,驱动钻头进行破岩^[10]。涡轮钻具通常具有转速高、输出平稳和轴向尺寸较长等特点,其输出性能主要受钻井液流量、涡轮级数、叶片结构及外部负载影响,同时由于钻具以金属构件为主,具有较好的耐温适应性。

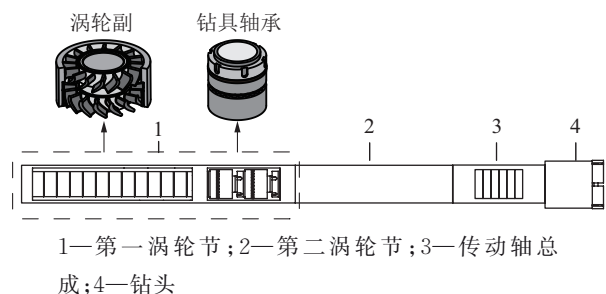


图2 涡轮钻具结构示意图

然而,涡轮钻具主要依靠高转速获得输出功率,存在输出扭矩相对较小、高效运行区间较窄以及变载时转速波动较大等问题。近年来,相关研究主要通过叶栅型线与流道优化、大扭矩涡轮级设计及减速器设计等途径改善其能量转换效率和带载能力^[11]。因此,高温介质条件下的压降-转速-扭矩关系、效率特性、负载适应性及长周期运行稳定性,是耐高温涡轮钻具测试评价的主要内容。

1.3 工作特性测试评价需求

螺杆钻具和涡轮钻具的结构形式及高温失效形式不同,但测试需求具有共性,现场试验虽然能够反映钻具的工程应用效果,但试验成本高、周期

长,井下参数获取困难,无法单独分析各因素对钻具的影响。因此,有必要通过地面试验对耐高温动力钻具进行系统测试,测试需求与评价内容主要包括以下几个方面:

(1)高温与介质适应性:高温、外部压力及循环介质共同作用下钻具各部件的材料性能、结构配合、密封状态和运行状态的变化,确定钻具与钻井液的适用温压范围。

(2)动力特性:测试不同温度、流量、工作压差和负载条件下钻具的转速、扭矩、功率及效率,分析输入参数、环境条件与输出特性之间的关系,并评价启动、带载及负载变化过程中的运行稳定性。

(3)钻进工艺:结合常规钻进、定向钻进及中空动力钻具取心等作业需求,模拟不同钻压、给进速度、流量、工作压差及负载波动条件,评价钻进效率、工况稳定性,以及取心进尺、岩心采取率和岩心完整性,为钻具结构优化和工艺参数选择提供依据。

2 井下动力钻具测试技术分析

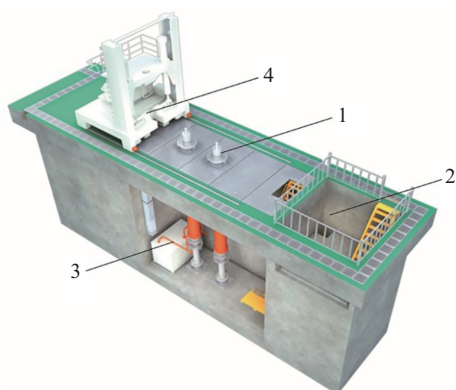
上述评价需求涉及钻具工作环境、动力介质及工艺等多个层面,现有装置通常仅覆盖其中部分功能。本文依据测试对象的工作状态和评价目标,将相关装置归为静态高温高压环境测试、动态模拟测试和动态实钻测试三类,并比较其环境参数、介质循环、加载方式及可实现测试功能。

2.1 静态环境测试

静态环境测试最初主要面向封隔器、承压壳体、钻头等井下工具,用于评价工具材料老化、结构承压能力、密封保持能力等,具有温压条件清晰、控制精度高和试验风险相对可控等特点^[12-14]。随着动力钻具长度和结构复杂度增加,测试对象逐步扩展至长尺寸井下工具整机,相应装置也发展为可容纳完整工具的承压井筒。此类装置通常由承压筒体、加热保温系统、增压系统、介质循环或注入系统以及安全泄压装置组成,可开展井下工具整体耐温耐压验证。

现有长尺寸井下工具试验系统已能够实现温度、压力与静态力学载荷的联合施加。DTTS-200-140 高温高压井下工具试验系统可在 200℃、140 MPa 条件下施加拉压和扭转载荷,用于评价长尺寸工具在温压环境下的结构强度、连接可靠性和密封

性能(见图3)。中海油服井下工具浅井筒功能检测试验装备可实现最高350℃、140 MPa条件下对井下工具或管柱进行载荷施加,具有模拟钻井、完井介质循环基本功能。张蔚红等^[15]研制的高温高压直井模拟装置采用中频电磁感应加热,并集成加压、拉压、扭转载荷及介质循环功能,提高了长尺寸工具温压环境与静态载荷联合模拟能力。虽然此类装置最初并非全部面向动力钻具研制,但其承压井筒、长尺寸安装、温压控制和组合加载方式,可直接用于动力钻具壳体、传动部件和密封结构的静态环境验证。



1—超高压试验井筒;2—压力试验系统与低压供气系统;3—加热保温系统;4—力加载试验机

图3 中石油高温高压井下工具试验系统结构示意图^[16]

总体来看,静态环境测试在高温高压边界构建、长尺寸工具容纳和静态载荷施加方面已较为成熟,能够确定动力钻具材料、部件和整机的基本环境适应范围。但动力钻具处于静止或准静态状态时,无法反映高温介质流经内部流道后的热响应,也不能获得钻具在旋转过程中转速、扭矩、效率、振动和泄漏等参数,因此测试技术进一步向高温动态模拟发展。

2.2 动态模拟测试

动态模拟测试将螺杆钻具、涡轮钻具或其动力总成安装在试验台架上,通过循环介质驱动钻具运行,并采用制动器、测功机或负载电机对输出端施加可控载荷,以获得不同温度、流量、压差和负载条件下的转速、扭矩、功率、效率及运行稳定性。与静态环境测试相比,该类试验能够直接评价动力钻具在高温条件下的能量转换和输出性能。

常规动力钻具试验台已形成较完整的测试流

程。德州联合石油机械有限公司的LZSY系列钻具试验台由主机、动力系统、循环系统、液压控制系统、冷却系统和测试系统组成(见图4),可覆盖 $\varnothing 43\sim\varnothing 305$ mm规格的动力钻具;平台可调节流量和加载扭矩,同步采集转速、扭矩、工作压差、流量及温度等参数,并输出动力钻具性能曲线^[17-18]。

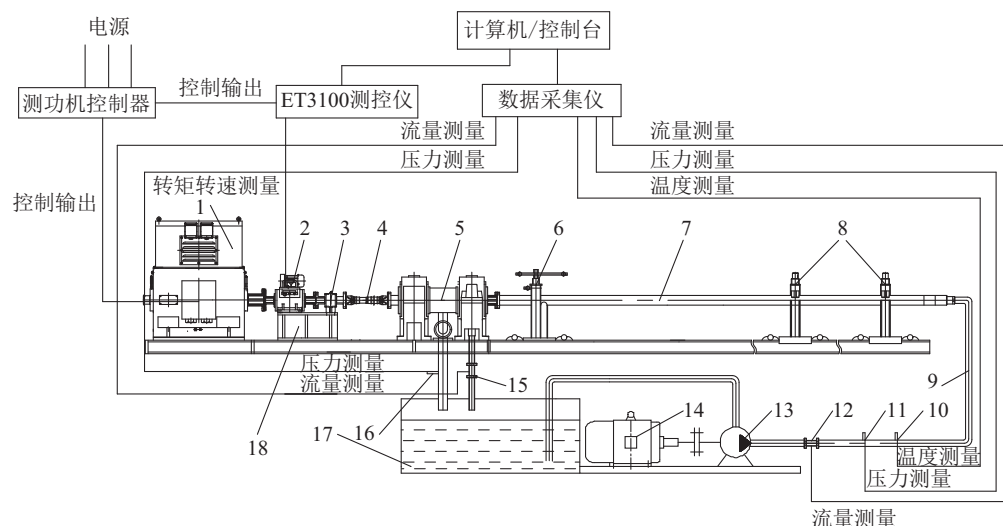


图4 德州联合石油机械有限公司整机试验台

面向高温工况,现有研究主要通过外部加热、分段加热和高温介质循环构建钻具运行环境。王耀斌^[19]提出在螺杆钻具外部设置加热套管,并在输出端配置测功装置,使钻具在受热状态下运行并测量输出扭矩,初步实现了温度环境与动力性能测试的结合。陆洪智等^[20]进一步采用多个独立加温箱对长尺寸螺杆钻具进行分段加热,并集成分水传动、扭矩测量、减速和制动装置,改善了钻具轴向温度控制及长距离高温介质输送造成的热量损失问题。徐军军等^[21]将介质循环、温度控制、分水传动、输出加载以及流量、压力、转速和扭矩测量集成于同一平台,可在250℃条件下开展 $\varnothing 89$ mm井下动力钻具的工作特性测试(见图5)。上述装置表明,高温动态模拟测试已由单纯的外部加热和扭矩测量,逐步发展为温度控制、介质循环、动力输出和多参数采集相结合的整机测试系统。

面向更高温度条件,贝克休斯开展了目标耐温300℃的定向钻井系统研发,通过介质循环系统和测功机对 $6\frac{3}{4}$ in(1 in=25.4 mm,下同)全金属螺杆马达开展性能及耐久试验,测试内容包括压差-扭矩关系、转速、效率、磨损和运行稳定性,马达整体效率约为30%^[22]。同时为测试高温对钻具的影响,研制了适用于 $4\frac{3}{4}$ in缩比的高温动态模拟试验台(见图6),但由于260℃以上的技术难度较大,试验温度最终限制于250℃^[23]。

总体来看,高温动态模拟测试已具备动力钻具基本输出特性和部分耐久性的评价能力,但公开报



1—负载测功机;2—转速扭矩传感仪;3—轴承座;4—联轴器;5—分水传动机构;6、8—钳座;7—涡轮钻具;9—高压软管;10—温度传感器;11—入口压力传感器;12—入口流量传感器;13—多级离心泵;14—交流电机;15—出口流量传感器;16—出口压力传感器;17—水箱;18—整体台架

图5 涡轮钻具试验台原理示意^[21]



图6 贝克西斯高温循环测试台系统

道的实际测试温度仍以200~250℃为主。面向我国万米深井及高温地热井的300℃级测试需求,现有测试平台仍难以满足。此外,测试台预设载荷难以充分反映钻压变化、岩性转换及钻头破岩引起的动态响应,因此仍需结合高温动态实钻测试,评价动力钻具在实际钻进工况下的适应性。

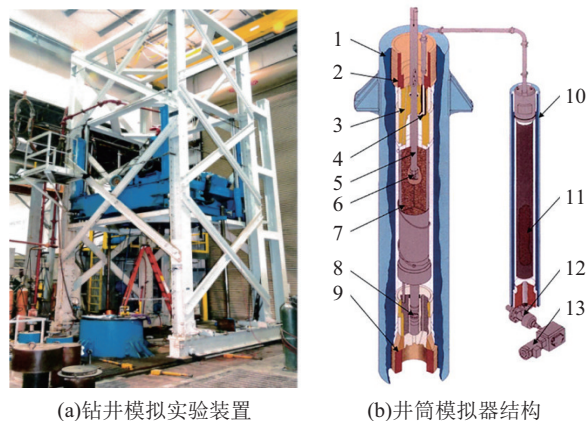
2.3 动态实钻测试

动态实钻测试在高温动态运行的基础上配置钻头、岩样夹持装置、钻压加载机构和排屑循环系统,使动力钻具直接驱动钻头破碎岩石。该类测试可同步获取流量、压差、钻压、转速、扭矩、机械钻速、振动和钻头磨损等参数,能够反映动力钻具、钻头、岩石和循环介质之间的耦合作用。与台架测功相比,实钻负载更接近井底实际状态,但岩样非均质性、钻头磨损和岩屑排出会降低试验重复性。

Terra Tek 钻井模拟试验装置是较典型的全尺

寸钻井模拟平台。该装置由钻机、井眼模拟器、钻井液循环系统、岩样采集加工系统、井下工具试验容器和井眼稳定试验装置等组成(见图7),可模拟高温、上覆压、围压、孔隙压和井底液柱压力等井下条件^[24-26]。其主要优势在于能够将现场难以直接观测的井底钻进过程转化为实验室可控试验,用于钻头性能、井眼稳定、钻井液体系和井下工具测试等研究。

在此基础上,斯伦贝谢剑桥研究中心进一步强



(a) 钻井模拟实验装置

(b) 井筒模拟器结构

1—模拟井筒;2—顶部活塞;3—浮动活塞;4—井眼模拟器;5—动力钻具;6—钻头;7—岩石标本;8—轴向推力装置;9—底座;10—泥浆过滤筒;11—岩屑;12—振动筛;13—驱动马达

图7 Terra Tek 钻井模拟试验装置^[26]

化了钻进区域的温度控制,模拟井底温度可达 200℃,钻井液温度可达 170℃^[27]。日本石油公团石油开发技术研究所通过可移动承压井筒和多套液压泵分别控制岩样加载与钻井液循环,用于深井条件下的岩石可钻性、钻进参数和工具响应研究,并针对地热钻井还发展了最高 400℃的高温钻进试验方案。大庆石油管理局钻井工程技术研究院研制了全尺寸钻井综合模拟装置,其配套的 6000 m 深井高温高压模拟井筒可同时构建上覆压、围压、孔隙压力及温度边界,可开展全尺寸钻头地层钻进、钻柱力学、井下工具检测和钻井液循环等试验^[28]。俄罗斯钻井技术研究院别尔姆分院的装置将潜没式电机、循环泵、井下动力钻具、钻头和岩样共同布置于长尺寸封闭压力室内,并通过加热及轴向、侧向加载构建温度、地层压力和钻压条件。循环介质在承压空间内驱动动力钻具直接完成岩样钻进,使动力钻具在高温高压条件下直接参与岩样钻进(见图 8)。内部循环和力学封闭结构避免了旋转动密封的难题,但也增加了参数测量、岩屑排出、试样更换和设备维护的难度。

除全面钻进外,取心钻进也是动态实钻测试的重要工况,Li 等^[29]研制了深部岩石原位保真取心标定平台,采用分段式模拟取心试验舱、自紧式密封结构和快速拆装结构,对取心工具的原位环境适应性、密封性能及取心过程开展测试。取心舱可在

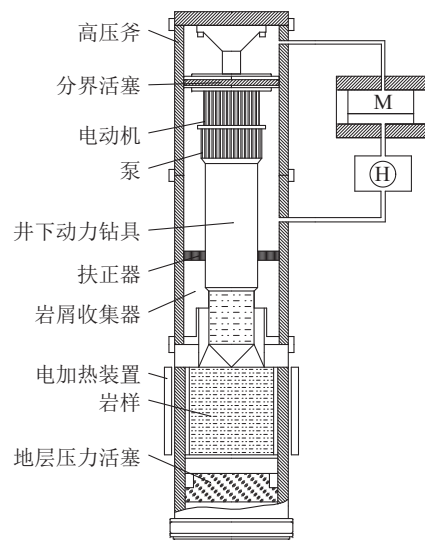


图 8 俄罗斯钻井技术研究院压力釜示意^[28]

150℃条件下承受 190 MPa 压力,旋转驱动模块在 140 MPa 密封压力下可稳定提供 150 r/min 转速,可为取心工具提供稳定测试环境^[29-30]。

总体来看,现有平台已能够较完整地构建高温岩样、高温介质、地层压力和真实钻进负载,并获得真实的钻头端负载和钻进响应,代表性测试装置对比见表 1。但能够在统一高温高压环境内,使动力钻具连续实钻运行并同步测量其输出性能、钻进响应和性能衰减的综合平台仍然较少。

表 1 代表性测试装置对比

序号	代表性装置	测试温度	测试类型	可实现的测试功能
1	Terra Tek 全尺寸钻井模拟试验装置		动态测试	多压力边界下的全尺寸岩样钻进、钻头性能、钻井液循环、井下动力钻具测试和井眼稳定试验
2	贝克休斯全金属螺杆钻具测试系统	250℃	动态测试	高温条件下全金属螺杆钻具输出性能、磨损状态、运行稳定性及带载耐久试验
3	斯伦贝谢剑桥研究院钻井实验室	岩石温度 200℃; 钻井液温度 170℃	动态测试	高温岩样与高温钻井液条件下的钻头破岩、钻进参数及井底响应测试
4	俄罗斯钻井技术研究院别尔姆分院高温高压模拟井筒	350℃	动态测试	高温高压条件下动力钻具直接驱动钻头破岩及带载运行试验
5	中海油服油田技术研究院高温高压实验舱	Ø250 mm: 245℃; Ø480 mm: 180℃	静态测试	井下仪器、工具及部件的高温高压环境适应性、承压和密封可靠性试验
6	中国石油集团测井有限公司高温高压试验装置	最高工作温度: 250℃; 平均工作温度 175℃	静态测试	高温高压承压、轴向拉压与扭转载荷下的密封和工具功能试验
7	大庆石油管理局钻井工程技术研究院钻井综合实验室	岩石温度 210℃; 钻井液温度 160℃	动态测试	多压力边界下的全尺寸钻进、钻头端载荷、机械钻速及钻柱力学响应试验
8	德州联合 LZSY 系列螺杆钻具试验台	0~100℃	动态测试	螺杆钻具流量-转速、工作压差-扭矩、功率及效率等输出性能测试

3 耐高温井下动力钻具测试关键技术

面向耐高温井下动力钻具的测试需求,现有测试装置功能实现能力主要受高温介质循环、旋转动密封和负载模拟技术制约。

3.1 高温介质循环技术

高温介质循环系统既为动力钻具提供液力能,又用于构建钻具内部的热环境。系统需要在较大流量条件下维持入口温度、压力和流量稳定,以避免介质状态波动对转速、扭矩、压降和效率测试结果产生干扰。

全尺寸动力钻具流量大、循环管路长,介质及管路具有较大的热容量。介质由储液罐输送至钻具入口的过程中,泵体、阀组、管路接头和长距离管路均会产生热损失,若单纯通过提高加热器功率补偿损失,不仅会显著增加系统功率,还可能造成升温时间过长、温度波动和局部过热。因此,高温循环系统宜采用储液预热、分区加热、入口补热和全流程保温相结合的方式,并通过缩短高温管路、降低无效循环体积和利用回流余热减少热量损耗。对于长周期试验,还需维持储液罐内介质组分和温度均匀,防止固相沉降、局部介质结块和过滤堵塞。

高温与高压之间存在明显耦合关系。温度升高会改变钻井液的黏度、密度和流变性能,并提高水基介质的汽化风险^[31-32];维持介质液相稳定通常需施加相应压力,但压力提高又会增加循环泵、加热器、阀组、管路和密封结构的设计负荷。因此,高温介质循环技术的关键不只是获得较高温度,而是在规定温压条件下持续提供状态稳定的循环介质。应同时关注钻具入口温度与流量波动、进出口压力、沿程热损失、介质物性变化、过滤能力和连续运行稳定性。

3.2 高温动密封技术

静态环境试验主要依靠端盖、法兰和管路接头处的静密封维持温度与压力环境,而动力钻具动态测试需要将传动轴引出并与外部负载连接。旋转构件穿过高温高压边界后,密封界面之间存在持续相对运动,形成旋转动密封问题。动密封的可靠性直接影响压力保持、介质循环、输出测量和长周期试验安全。

高温、高压、旋转运动和含固相介质的共同作用使动密封面临多重失效风险。温度升高会引起密封材料软化、老化、热膨胀和预紧力变化^[33-34];高

压差会增大密封接触应力和泄漏^[35];轴系偏摆、振动和安装误差会破坏密封面的稳定接触;钻井液中的固相颗粒还会产生冲蚀和磨粒磨损,使单级密封难以同时满足耐温、承压和长寿命要求。

高温高压动密封应从整个承压旋转边界进行设计,可采用多级组合密封和中间泄压结构分担压差,已有组合旋转动密封结构实现200℃、150 MPa工况下的密封,验证了多级组合密封在高压旋转条件下的可行性^[30]。同时,通过减小旋转穿越轴径、将密封区布置于相对低温位置,以及设置介质密封或冷却结构均有望降低密封副热负荷^[36-37]。密封材料与摩擦副还需兼顾耐温、耐压和耐磨性能,可根据工况采用耐高温复合材料、柔性石墨以及金属或陶瓷密封副。

长周期试验中还应对动密封状态进行连续监测,应记录泄漏量、密封区温度、冷却介质状态和轴系振动等,并设置泄漏监测、分级泄压和异常停机装置,保证动力钻具在高温高压条件下持续旋转并稳定输出。

3.3 负载模拟技术

负载模拟系统用于在规定温度、压力和循环介质条件下,对动力钻具输出端施加与实际钻进相匹配的负载,并测量转速、扭矩、功率和效率等参数。根据负载形成方式,现有方法可分为等效加载和实钻加载两类。

等效加载是高温动力钻具性能测试中应用较多的方法,通常采用制动器、测功机或负载电机在输出端施加反扭矩,可获得流量-转速、压差-扭矩及效率-负载等特性曲线,该方法加载条件明确、重复性较好,适于比较不同温度、流量和压差下的输出特性^[38-39]。但现有测试多采用恒定或分级载荷,难以反映钻进过程中由岩性变化、钻头破岩和钻柱振动引起的扭矩波动、冲击及短时卡滞。尤其在高温条件下,介质物性变化会改变钻具输出特性,岩石强度和破碎方式的变化又会改变钻头端载荷,因此常温稳态载荷难以代表目标井底工况。

实钻加载通过配置岩样、钻头、钻压加载和循环排屑系统,使动力钻具直接驱动钻头破岩,可同步评价机械钻速、扭矩波动、振动和钻头磨损等响应,反映了动力钻具-钻头-岩石的耦合作用,但岩样非均质性、钻头磨损及岩屑运移均会影响试验结果的重复性。因而,实钻加载的主要作用在于获取目标温

石破碎或取心工具评价,针对耐高温动力钻具整机性能的综合测试仍较少。

针对上述问题,本方案设置实钻取心测试支路,使动力钻具直接驱动钻头完成岩样钻进与取心过程,实现动力钻具-钻头-岩石-循环介质之间的耦合作用模拟。通过调节岩性、钻压及钻进参数,可获取不同工况下动力钻具的输出响应和载荷变化特征,并评价其钻进适应性与取心性能。考虑到长尺寸钻具组合对空间和操作条件的要求,系统采用卧式模块化布局,兼顾钻具安装、岩样更换及取心操作需求。实钻试验获得的典型载荷特征可进一步用于模拟加载参数标定,将真实钻进过程转化为可重复的等效加载条件,从而结合长周期试验开展动力钻具性能衰减和可靠性评价,实现真实工况获取与可控性能测试的结合。

4.4 长周期试验与安全监测

耐高温动力钻具的性能衰减通常是在长期高温、高压、循环介质及交变载荷共同作用下逐渐产生,短时间性能测试难以反映密封磨损、定转子间隙变化及输出能力衰减等长期服役特征。然而,完全依赖实钻取心开展长周期试验,不仅试验成本较高,而且受到岩样尺寸、钻进时间及岩性重复性的限制,难以满足系统化性能评价需求。

针对上述问题,本方案采用实钻测试与模拟测试相结合的双模式测试方法。通过实钻取心支路获取不同岩性、钻压及钻进参数下动力钻具的转速、扭矩等响应特征,建立实际钻进工况与加载参数之间的对应关系,并将实钻载荷转化为模拟加载条件。随后利用模拟加载支路开展长时间连续运行试验,在保持典型钻进载荷特征的基础上,减少岩样消耗,提高试验过程的可重复性和持续运行能力。

在长周期运行过程中,测试系统需同步监测温度、压力、流量、转速、扭矩等关键参数,分析动力钻具性能随运行时间的变化规律,并结合试后关键部件的磨损状态,揭示高温复杂工况下的性能衰减与失效机制。同时,针对长期高温运行过程中的密封泄漏、压力异常和轴系振动等风险,设置相应的状态监测与安全保护措施,保证试验过程稳定可靠。

5 结论

(1)现有井下工具测试装置在高温高压静态环

境构建、整机承压及静态载荷施加等方面已形成较成熟的技术基础,能够开展材料、密封结构和长尺寸工具的环境适应性验证。动力钻具动态测试已具备介质循环、输出加载和参数测量能力,但试验温度主要集中在200~250℃,面向300℃的高温动态测试需求,高温介质的稳定循环、高温旋转动密封及长周期动态加载等关键技术仍有待进一步突破。

(2)现有动力钻具测试功能主要集中于转速、扭矩、功率和效率等基本工作特性评价,部分实钻平台能够开展岩样钻进、钻头性能及钻进参数测试,但相关功能多分布于不同装置。能够在统一高温环境下同时评价动力钻具工作特性、钻进工艺适应性和取心工艺适应性的综合平台仍较少,尤其缺乏动力钻具与钻头、岩石、岩心筒及循环介质协同作用下的整机测试能力。

(3)针对高温动态测试能力不足、功能分散及实钻试验难以连续开展等问题,提出耐高温井下动力钻具双模式测试方案。该方案采用耐高温螺杆泵串联驱动,构建高温钻井液闭式循环系统,并通过分区保温与局部冷却相结合的方式实现关键部件的温度控制与稳定运行;同时设置模拟加载与实钻取心双测试支路。在测试过程中,通过有限实钻试验获取载荷响应,并将其反演为电机加载参数,以减少岩样消耗并提高长周期试验的稳定性。此外,结合能量回馈与状态监测,实现动力钻具工作特性与钻进取心性能的动态综合评价。

参考文献:

- [1] 谢和平,张茹,张泽天,等.深地科学与深地工程技术探索与思考[J].煤炭学报,2023,48(11):3959-3978.
- [2] 张正,冉恒谦,张毅,等.特深科学钻探装备技术现状与发展建议[J].钻探工程,2024,51(4):14-22.
- [3] Dvoynikov M, Sidorkin D, Yurtayev S, et al. Drilling of deep and ultra-deep wells for prospecting and exploration of new raw mineral fields [J]. Journal of Mining Institute, 2022, 258: 945-955.
- [4] Shadravan A, Amani M. HPHT 101-what every engineer or geoscientist should know about high pressure high temperature wells[C]//SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition. SPE, 2012:SPE-163376-MS.
- [5] 刘璐,王瑜,王镇全,等.全金属螺杆钻具研究现状与关键技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):24-30.
- [6] 李胜.等壁厚螺杆钻具定子衬套力学性能分析及线型优化[D].成都:西南石油大学,2025.
- [7] Lu J X, Kong L R, Wang Y, et al. Optimized parameters of

- downhole all-metal PDM based on genetic algorithm[J]. *Petroleum Science*, 2024, 21(4):2663-2676.
- [8] Fang X, Zhang C, Li C, et al. Structural design and numerical analysis of an all-metal screw motor for drilling applications in high-temperature and high-pressure environments in ultra-deep wells[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(15):8630.
- [9] Liang C, Zhang K, Wang Y, et al. Particle size effect on abrasive wear behavior of all-metal positive displacement motor and abrasive particles control[J]. *Journal of Tribology*, 2025, 147(7):071702.
- [10] Mokaramian A, Rasouli V, Cavanoug H G. Turbodrill design and performance analysis[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2015, 8(3):377-390.
- [11] Gao Y, Kong L, Wang Y, et al. Optimised design of down-hole turbodrills with bending-torsional tilting blade[J]. *Geoen-ergy Science and Engineering*, 2024, 234:212661.
- [12] 庞东晓, 王志敏, 潘登, 等. 井下工具高温高压实验装置研制[J]. *油气井测试*, 2017, 26(4):45-48.
- [13] 吕芳蕾, 伊伟锴, 衣晓光, 等. 高温高压封隔器性能试验装置研制与应用[J]. *石油矿场机械*, 2014, 43(7):77-80.
- [14] Lyons K D, Honeygan S, Mroz T. NETL extreme drilling laboratory studies high pressure high temperature drilling phenomena[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2008, 130(4):043102.
- [15] 张蔚红, 张海涛, 王伟鹏. 石油井下工具高温高压直井模拟试验装置研制[J]. *机械设计与制造工程*, 2020, 49(7):30-34.
- [16] 项佰川, 宋鹏涛. 高温高压井下工具试验系统的研究及实际应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2020, 40(6):151-152.
- [17] 宫兆玲, 杨成永, 孙京峰, 等. 泥浆泵及螺杆钻具综合试验台架: CN202326156U[P]. 2012-07-11.
- [18] 宫兆玲, 孙伟. 螺杆钻具整机试验台的组合减振装置: CN203241231U[P]. 2013-10-16.
- [19] 王耀斌. 一种螺杆钻具测试装置: CN102914428A[P]. 2013-02-06.
- [20] 陆洪智, 吴翔, 蒋国盛, 等. 一种高温螺杆钻具试验台: CN105910810B[P]. 2019-07-23.
- [21] 徐军军, 张德龙, 赵志涛, 等. 新型高温高速涡轮钻具测试系统研制[J]. *钻采工艺*, 2018, 41(5):81-84.
- [22] Chatterjee K, Macpherson J, Dick A, et al. Development of a directional drilling system for operation at 300 °C for geothermal applications[C]//Geothermal Resources Council Transactions. Davis: Geothermal Resources Council, 2016, 40:213-218.
- [23] Chatterjee K, Dick A, Grimmer H, et al. High-temperature, 300 °C directional drilling system including drill bit, steerable motor, and drilling fluid[C]//Geothermal Resources Council Transactions. Davis: Geothermal Resources Council, 2014, 38:245-248.
- [24] 西德尼·格林. 全尺寸深井钻并模拟装置对钻井技术发展的影响(英文)[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(3):1-5.
- [25] Black A D, Green S J, Rogers L A. Full-scale Laboratory Drilling Tests on Sandstone and Dolomite[M]. US Department of Energy, Technical Information Center, 1977.
- [26] 张鹏, 李继康. 能对井下钻具组合进行直接检验的俄罗斯试验装置[J]. *国外石油机械*, 1999(3):21, 36.
- [27] Cooper G A, Peltier B. Advanced techniques for laboratory full-scale drilling tests [C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. SPE, 1986: SPE-14783-MS.
- [28] 王述德, 张爱林. 钻井全尺寸综合模拟试验装置的原理及井架部分结构分析[J]. *大庆石油学院学报*, 1994(2):53-59.
- [29] Li Y, Xie H, Zhang R, et al. Design and development of the deep-rock in-situ condition-preserved coring calibration platform [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(11):1377-1395.
- [30] Huang W, Feng G, He H L, et al. Development of an ultra-high-pressure rotary combined dynamic seal and experimental study on its sealing performance in deep energy mining conditions[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(3):1305-1321.
- [31] Mohamed A, Salehi S, Ahmed R. Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: A review [J]. *Geothermics*, 2021, 93:102066.
- [32] Erge O, Sakaoglu K, Sonmez A, et al. Overview and design principles of drilling fluids systems for geothermal wells in Turkey[J]. *Geothermics*, 2020, 88:101897.
- [33] Chen L, Ren J, Wang Y. Predictive modeling and degradation mechanisms of rubber sealing materials under stress-thermal oxidative aging for long-term sealing performance[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2025, 23:04949.
- [34] Mckee M, Gordaninejad F. Reciprocating shaft seals for high-temperature and high-pressure applications: A review[J]. *Journal of Tribology*, 2018, 140(3):032202.
- [35] 张晓诚, 王昆剑, 余涵, 等. 高温高压下旋转导向系统动密封性能[J]. *润滑与密封*, 2022, 47(7):177-182.
- [36] 张有华, 王威, 伍娜, 等. 用于高温高压旋转机械的密封装置: CN105351521A[P]. 2017-10-03.
- [37] 张泽天, 张茹, 谢和平, 等. 一种高温高压旋转动密封机构: CN112963539A[P]. 2022-02-01.
- [38] 徐珺, 吴翔, 陆洪智, 等. 一种评价高温高压状态下螺杆钻具输出性能的方法: 201911084026.8[P]. 2020-10-30.
- [39] Huang M X, Wang Y, Liu B L, et al. Development of down-hole motor drilling test platform [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 73:71-77.

(编辑 王文)