

高造斜定向钻进试验平台设计与应用

戴裕集^{1,2}, 张德龙¹, 杨鹏^{1*}, 卢彤¹, 王贺千^{1,2}, 马鹏程^{1,2}

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 现有钻井试验台架空间受限、稳定性差及自动化程度低, 无法满足高造斜井下钻具试验需要。本文研发了一套高造斜定向钻进试验平台。该平台采用模块化结构(钻机区、岩样区、模拟井筒、钻具固定区、循环系统、数据管理系统), 通过两侧三角支架增强抗倾覆性能, 并利用对称槽钢导轨实现承载与快速定位。导向管支撑采用三角桁架结构, 配合底部固定板保障了运行过程中的同轴度。钻机动力头桅杆倾转角度 $0\sim 90^\circ$, 可动态调整给进压力、扭矩、转速等钻进参数; 模拟井筒安装压力、扭矩传感器可实时采集钻头处钻压、扭矩、振动等关键参数。基于该平台开展了高造斜定向柔性钻柱实钻与力学测试试验和柔性动力钻具定向造斜实钻试验。结果表明该试验平台结构设计合理、运行平稳, 可有效模拟高造斜定向钻具实际钻进工况, 为高造斜定向井下钻具测试及钻进工艺研究提供了可靠的试验手段。

关键词: 柔性钻具; 高造斜定向钻进; 试验平台; 分段式结构; 槽钢导轨; 导向管支撑; 钻进试验

中图分类号: P634.3; TE92 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0198-09

Design and application of high-build-rate directional drilling test platform

DAI Yuji^{1,2}, ZHANG Delong¹, YANG Peng^{1*}, LU Tong¹, WANG Heqian^{1,2}, MA Pengcheng^{1,2}

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The existing drilling test rigs are constrained by limited space, poor stability, and low automation, making them inadequate for testing downhole tools in high-build-rate directional drilling. To address these challenges, a novel test platform for high-build-rate directional drilling was developed. The platform adopts a modular structure consisting of rig zone, rock sample zone, simulated wellbore, tool fixing zone, circulation system, and data management system. Stability against overturning is enhanced via triangular brackets on both sides, while structural load-bearing and rapid positioning are achieved using symmetrical channel-steel guide rails. The support for the guide pipe utilizes a triangular truss structure, which works in conjunction with a bottom fixing plate to ensure coaxiality during operation. The power head mast of the drilling rig can tilt from 0 to 90° , enabling the dynamic adjustment of drilling parameters such as feed pressure, torque, and rotational speed. Moreover, the simulated wellbore is equipped with pressure and torque sensors to collect key real-time parameters at the bit, including weight on bit (WOB), torque, and vibration. Based on this platform, real-drilling and mechanical testing experiments were conducted on flexible drill strings, alongside directional side-tracking using flexible downhole power tools. The results indicate that the test platform features a rational structural design and operates smoothly. It can effectively simulate actual drilling conditions for high-build-rate directional tools, thereby providing a reliable experimental means for testing downhole tools and researching drilling technologies in high-build-rate directional wells.

收稿日期: 2026-07-10; 修回日期: 2026-07-29 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.023

基金项目: 国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1003107)

第一作者: 戴裕集, 男, 汉族, 2003年生, 硕士研究生, 机械工程专业, 研究方向为钻具以及联轴器设计, 北京市海淀区学院路29号, 17815826850@163.com。

通信作者: 杨鹏, 男, 汉族, 1980年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事钻探机具的设计研发工作, 北京市海淀区学院路29号, penguin2541@163.com。

引用格式: 戴裕集, 张德龙, 杨鹏, 等. 高造斜定向钻进试验平台设计与应用[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 198-206.

DAI Yuji, ZHANG Delong, YANG Peng, et al. Design and application of high-build-rate directional drilling test platform[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 198-206.

Key words: flexible drilling tools; high-build-rate directional drilling; test platform; segmented structure; channel-steel guide rails; guide pipe support; drilling experiment

0 引言

我国油气田开发已进入中后期,老井剩余油挖潜、薄差储层与非常规油气高效动用成为增储上产的关键方向,高造斜定向钻进技术具有重要作用,且因为超深井、短半径井和大位移井钻探数量的逐渐增多,这项技术越来越被人们所关注^[1]。高造斜定向钻进技术因造斜率高、曲率半径小、施工成本低等优势在老井侧钻、薄层开采、多分支井改造中广泛应用,是破解层间干扰、提升单井产能的核心技术,尤其在侧钻方面具有扩大单井控制面积缩短工期的作用。柔性钻具作为该技术的核心部件,可在极小曲率井眼中实现高造斜率钻进并且可以可靠地传递钻压与扭矩,有效解决了传统刚性钻具无法适应小曲率井段、轨迹调控困难等问题^[2]。目前国内外在高造斜定向钻井工艺、钻具结构设计、材料选型及现场应用方面取得了显著进展,国内在大庆油田、中海油多个油田实现成功应用,但仍存在钻具疲劳寿命不足、轨迹控制能力有限、长距离延伸困难等问题,围绕国家油气资源对装备的需求开展高造斜定向钻进实钻试验研究,对提升高造斜定向钻井水平、提高钻井效率具有重要的理论价值与工程意义^[3]。

在钻井装备定向钻进技术与自动化方面,前人的研究已取得显著进展。高志锋^[4]系统开展了定向钻进在煤矿地质勘查中的应用研究,通过测量放样、分段成孔及随钻测量实时纠偏,实现了对断层与含水层的精确探查;陈金涛^[5]针对远距离老空水探测难题,应用大功率定向钻机完成单孔500 m长距离施工;杨冬冬等^[6]系统综述了煤矿井下定向钻进轨迹控制的关键技术,详细介绍了随钻测量(MWD)系统(泥浆脉冲/电磁波)、工程参数随钻测量系统(可实时采集孔底钻压、扭矩、振动及内外环空压力)以及旋转定向钻进系统的研发与应用进展,指出了轨迹控制正朝着“感知-决策-执行”一体化的自动化与智能化深度融合方向发展。现有一些钻机、钻具试验平台,如张文举等^[7]研制了ZST型钻机试验台,通过磁粉制动器模拟负载,配合计算机测试系统,实现了对钻机输出扭矩、转速及给进起拔力的自动化精密检测。张锐尧等^[8]为研究多梯度钻井机理,搭建

了室内模拟试验系统,通过调控泵排量与阀门开度,实现了对模拟井筒内压力梯度的实时高频采集与闭环控制。刘峰等^[9]研制了钻杆疲劳试验台。颜岁娜等^[10]为了对深水管柱处理设备和深水钻机关键装备等技术研究进行成果转化,研制了多功能双井口钻井设备试验台,是试验平台的一大突破性进展。但现有的测试台架普遍缺乏全尺寸、模块化、可动态调角的空间布局,且系统自动化与数据集成度低,难以形成“钻机进给-高曲率导向管-柔性动力钻具-试样岩石”的全系统实钻交互环境,尤其无法在闭环泥浆循环工况下,实时、高频地捕获钻头破岩处的动态交变载荷与多维动力学响应。这些瓶颈严重制约了柔性钻具综合轨迹控制能力与钻进工艺参数的科学制定。

为了解决上述问题,突破高造斜定向柔性钻具实钻测试的技术瓶颈,本文研发了一套新型高造斜定向钻进试验平台。该平台围绕学术测试需求,攻克了非对称重载下的抗倾覆、分段式高精度定位、导向管三角桁架保同轴度等关键技术。平台动力头桅杆可实现0~90°倾转,能够动态调整给进压力、扭矩与转速;同时,模拟井筒与岩样区配备高精度多维传感器,实现了对钻头处实钻参数与动力学响应的实时高频采集。利用该平台,本文深入开展了 $\varnothing 127$ mm 柔性钻柱的动力传导力学测试以及 $\varnothing 105$ mm 柔性动力钻具的定向造斜实钻试验,验证了平台运行的稳定性与数据采集的可靠性,为高造斜定向井下钻具的学术研究与工业应用提供了先进的试验手段。

1 试验平台设计需求与技术分析

1.1 设计需求

高造斜定向钻进试验平台的设计主要受到岩块与钻机的尺寸与质量,钻具的弯曲角度,进行试验时的工作方式,以及安装与运输的便捷性这几个方面的影响。试验台架设计需在满足设备整体布局、安装空间的前提下^[11-12],尽量做到布局合理、操作方便、空间适宜且设备配合流畅,同时在设计中满足如下基本要求:

(1)满足钻机的固定要求,能够有可靠的固定

方式,保证钻机在回转钻进与定向造斜工况下不发生位移、倾覆与振动超标。

(2)满足钻具钻进过程中的稳定性,必须安装相应的支撑架进行固定防止在试验过程中掉落造成安全隐患,支撑架与钻具间采用低摩擦导向结构,兼顾导向精度与钻进顺畅性,符合试验台架的安全设计准则。

(3)导向管支架需匹配试样尺寸,以避免误穿岩样导致试验失效;同时支架底部增设脚撑固定结构,旨在抑制钻进过程中的高频振动。

(4)外侧网状架需要在提供支撑的前提下能够较好地观测到设备的运行状况,网状架兼具防护隔离功能,防止碎屑飞溅与人员误触,兼顾操作安全与试验观测需求。

(5)设计防水装置以抑制试验过程中液体的飞溅,避免环境污染并保障电气设备安全。满足钻探试验的清洁与环保要求。

(6)导轨焊在网状架上作为主梁进行有效的固定,以及在导轨上打孔进行各个部件的定位,实现钻机、支撑架、导向架等部件的精准定位与快速装调,提升试验平台组装精度与重复使用一致性。

1.2 技术分析

重载钻机在倾斜钻进时具有强烈的动力输出,传统台架受力不均,极易发生侧向倾覆。因此将整体框架采用功能模块化分段设计(钻机区、岩样区、模拟井筒、钻具固定区),并在主体框架两侧对称布置多组高强度合金钢三角支架辅助固定。三角支架通过地脚螺栓将侧向倾覆力矩安全传递至地面,从而抑制高频振动并增强结构抗倾覆刚度。

高造斜钻具在空间高速旋转并造斜破岩时,会产生巨大的径向摆动与反作用力矩,若导向管支撑刚度不足,轻则导致试验件变形失稳、误穿岩样,重则造成重大安全隐患。因此设计一种与下方主承重导轨滑动副耦合的“三角桁架式”导向管支撑机构。利用三角形的几何稳定性,将自重与摩阻转化为杆件轴向拉压力,相比普通矩形框架抗振性能提升约50%;配合半环形抱箍支座与对称斜撑筋板,从根本上保障运行过程中的同轴度。

不同尺寸的柔性钻具,其试验长度与空间边界各异,要求台架各部件具备快速定位和位置可调性;同时,学术研究要求高精度捕捉钻头破岩处的动态轴向力与旋转扭矩波动。因此采用“槽钢主

体+框体对称焊接+分段拆分”的导轨系统作为核心承载部件,利用标准槽钢内侧加工的光滑导向工作面实现水平方向承载;在腹部均匀按等间距加工精密螺栓定位孔,确保部件重复装配偏差 ≤ 0.5 mm。在传感器的选择上,采用了具备150%过载能力的轮辐式压力传感器与静态扭矩传感器,通过高速数据采集卡对实钻信号进行同步高频采集。

2 试验平台具体设计

2.1 整体框架设计

针对重载倾斜钻进时台架易产生侧向倾覆力矩、且长尺寸支架受限运输与现场装配灵活性的难题,本文采用分段式设计。将框架划分为岩样放置区、导向管支架放置区、固定钻具支架放置区及钻机放置区四个功能模块(图1),并在试验台架两侧放置了三角支架辅助固定结构,在实现框架分段运输的同时,保障了钻进试验过程中所需的结构稳定性与功能的精准性,支架两侧配备对称的矩形加强框,在提供标准化接口的同时,显著提升了分段连接处的结构强度与抗变形能力。

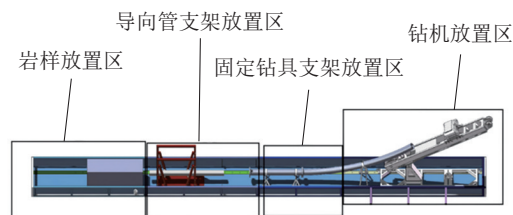


图1 高造斜定向钻进试验平台

为了解决分段支架在钻进试验中的侧向稳定性问题,在支架两侧对称布置三组三角支架,作为辅助支撑结构。三角支架采用的是高强度合金钢材质,通过焊接与主体支架连接,适配不同地面工况的支撑需求;三角支架的底部配备有防滑底座与地脚螺栓孔,可通过膨胀螺栓与试验地面形成固定,以此来增强支架与地面的连接强度。

从受力角度分析,钻进过程中钻机的钻进动力、钻具与岩样之间的摩擦阻力,会使支架产生侧向的倾覆力矩,三角支架通过提供反向支撑力,将侧向载荷传递至地面,能够有效抵消倾覆趋势;同时,三角支架与主体支架的焊接结构,可适应试验过程中微小的结构变形,避免刚性连接导致的支架

应力集中,提升整体结构的抗疲劳性能。

在节和节之间的连接选择中,采用螺栓固定结构,两侧各等间距添加两个螺栓,保证了结构的牢固性,不会因为在工作过程中受不住载荷而出现两个部分之间断开的情况。

导轨作为试验支架的核心承载与导向构件,承担了钻具、导向管支撑机构、钻机及岩样的水平方向的定位、刚性的承载能力以及精准的定位这三大核心功能。结合分段式运输与拼装需求,导轨系统采用槽钢主体+框体对称焊接+分段式拆分的设计方案,既保证导轨自身的结构强度与导向精度,又适配支架分段运输的现场装配要求,能够为钻进试验提供稳定的运动基准与安装基准。

如图2所示导轨主体采用了标准槽钢作为核心型材^[13],其结构优势与设计依据如下:

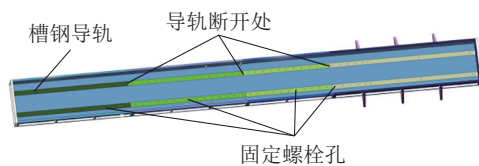


图2 导轨整体

(1)力学性能适配:槽钢截面具有合理的抗弯、抗扭刚度,可以有效分散钻具给进、钻机加载等工况下的垂直载荷与侧向弯矩,避免导轨发生弯曲变形或失效等问题,满足了主承重梁的强度要求。

(2)导向面适配:槽钢的内侧可直接加工为光滑导向工作面,无需额外增设导向滑轨,简化结构工艺,还同时保证导向面的直线度与耐磨性。

(3)安装兼容性:槽钢的两侧可便捷实现与支架框体的焊接连接,腹部预留了螺栓孔来实现与支撑部件的可拆卸固定,这种设计满足了“焊接承载+螺栓定位”的双重功能需求,具有高加工强度、高定位精度的特点。

另外,装配尺寸链的建立也十分关键,其准确性直接影响了各部位安装时位置公差准确性。本文设计在导轨主体上均匀加工定位孔,实现各功能部件的快速、精准安装,定位孔设计遵循以下原则:

孔位布局:沿导轨长度方向按等间距加工螺栓定位孔,孔位间距根据支撑机构(如导向管三角桁架、钻具固定架、钻机底座)的安装间距确定,同时兼顾分段拼接时的接口定位需求,限定三角桁架以

及钻具固定架定位孔之间的距离为200 mm。钻机部分按照钻机底座螺栓孔位置进行设计具体尺寸,因此设计了三个间距为1030 mm的孔位。

定位精度:定位孔的直径为20 mm,并在每个孔位后面都加装了M18的螺母来进行安装,能有效确保螺栓安装后部件的位置偏差 ≤ 0.5 mm,满足钻具与岩样的同轴度要求。

功能适配:定位孔可直接用于导向管支撑机构、钻机底座、岩样夹具等部件的螺栓固定,实现了以导轨为基准,部件能够快速装拆的模块化安装要求,同时为分段导轨拼接时的接口对中提供定位基准,避免分段拼接后可能会出现轴线偏差的问题。

2.2 钻机放置区

2.2.1 钻机参数

如图1所示,第四部分为钻机放置区,长度为3.75 m,此区域为钻机的核心安装区,承担了钻机的固定、动力接入与钻进驱动的功能。区域内部预留了钻机安装基准面,通过高强度螺栓将钻机底座与导轨进行刚性连接,以此来保证钻机工作时的动力输出稳定性;支架框架采用加厚型钢结构设计,以抵御钻机钻进过程中产生的竖向与横向的冲击力。

表1为钻机的主要参数。

表1 钻机主要参数

参 数	参数值
钻孔角度范围/(°)	0~90
动力头最大输出扭矩/(N·m)	3600
输出转速/(r·min ⁻¹)	0~150
动力头最大加载力/kN	60
提升速度/(m·min ⁻¹)	0~0.7
给进速度/(m·min ⁻¹)	0~1.4
动力头行程/mm	1800
主电机功率/kW	22
辅助电机功率/kW	1.5
外形尺寸/mm	3045×1370×3060

2.2.2 钻机控制区

为满足高造斜工况下0~90°不同倾角的钻进需求,并克服传统手动控制界面操作分散、参数调节滞后的缺点^[14-16]。本试验钻机采用集中式液压控制台设计,通过手动换向阀组、调速旋钮与压力表来实现钻进过程的集中控制与状态监测,操作界面清晰直观,可在同一控制平面完成钻进、夹持、提升、

卸扣等全流程动作控制,其功能分区与操作逻辑如下(图3):

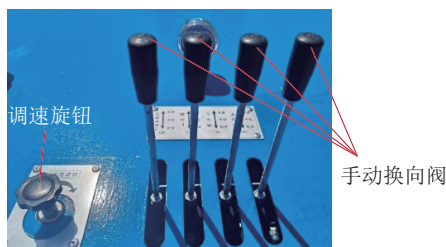


图3 手动换向阀

液压手动换向阀组:面板上的黑色手柄为手动换向阀,通过前后推动实现方向控制,所有阀组均带有中位停止功能,保障操作的安全性。

调速旋钮:面板左侧的旋钮为流量调速阀,用于控制液压系统的输出流量,实现钻机回转、提升等动作的无级调速。

图4为耐震压力表,面板中央的压力表用于实时监测系统工作压力,量程0~40 MPa,可直观反映钻进负载、夹持力等关键工况参数,为操作提供了安全预警。

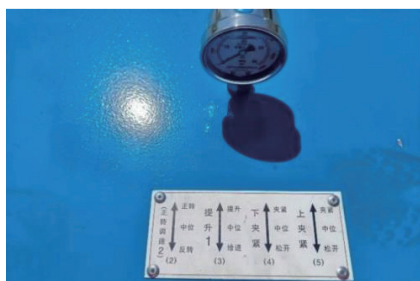


图4 压力表

这样设计控制台的特点与优势如下:

- (1)集中式布局,操作逻辑非常清晰;
- (2)控制台将所有控制元件集中布置在同一面板上,操作手柄按钻进流程顺序排列,操作人员可在同一位置完成所有动作控制,无需频繁移动位置,大幅提升操作效率与安全性;
- (3)中位安全设计,防止误操作;
- (4)所有换向阀均带有中位停止功能,手柄回到中位时液压回路卸荷,执行机构保持当前状态,可有效防止误触导致的意外动作,保障试验人员与设备安全;
- (5)状态可视化,便于工况判断;
- (6)压力表与调速旋钮配合,可实时监测系统

压力与流量,操作人员可根据压力变化判断钻进负载、夹持力是否正常,及时调整操作参数,避免设备过载损坏;

(7)模块化控制,动作独立可调;

(8)各执行机构的控制回路相互独立,可单独调节某一动作的速度与方向,实现钻进过程的精细化控制,满足不同试验工况的操作需求。

2.3 岩样放置区

岩样放置区长度为3 m,用来放置试验所需的岩样,承担了岩样的固定与定位功能。为保障钻具在钻进过程中与岩样始终保持物理同轴,避免因岩样位置偏移导致的试验失效。区域内预留岩样夹具安装槽位,且与导向管轴线保持同轴度,确保钻进过程中钻具能够以预定的位置钻入岩样。从结构布局来看,该段支架框架是由矩形钢结构焊接而成,且内侧设置了水平导向滑轨,能够用来调节岩样的水平位置,可以满足不同尺寸岩样的试验适配需求。

2.4 模拟井筒

导向管是钻具钻进过程中最为关键的导向部件,导向管支撑结构的刚度与定位精度直接决定了钻具在钻进过程中的同轴度与钻进轨迹的稳定性。为满足导向精度需求,设计了与导轨滑动副耦合的三角桁架支撑机构,在确保高稳定性支撑的同时,实现了精密轴向定位。

2.4.1 三角桁架式支撑的力学优势

这是本平台克服柔性钻具高速旋转时径向摆动的核心设计。传统框架在重载下易发生弯曲变形,导致导向管同轴度丧失,引发干扰与误钻。针对此难题,导向管的主支撑框架采用了对称式的三角桁架结构如图5所示,由三部分焊接而成,分别是水平主梁、斜向支撑杆与垂直立柱,这样就形成多个稳定的三角形受力单元,能够起到很好的支撑作用^[17-18]。

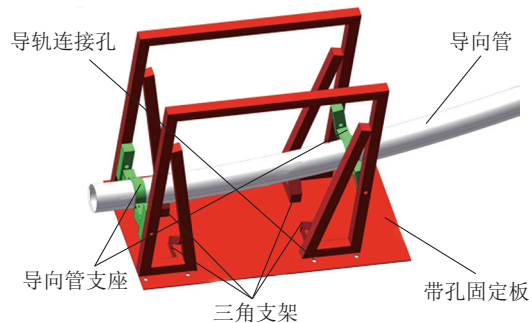


图5 导向管支架

三角形结构具有天然的几何稳定性,而且可以将导向管的自重载荷、钻具与管壁的摩擦阻力转化为桁架杆件的轴向拉压力,有效降低了框架发生弯曲变形的可能性,还在较大程度上提升支撑机构的整体刚度。

同时斜向支撑杆的设置有效抑制了导向管在水平方向上的位移与扭转,抑制钻进过程中的偏摆与晃动。在钻具的钻进过程中,较高的钻速会产生较大的振动载荷,但这种三角桁架支撑机构的抗振性能和普通矩形框架相比能够提升约50%,避免导向管因为振动而发生偏移的情况产生。

此外,桁架式结构在保证强度的前提下实现了轻量化设计,有效降低了系统负载,提升了支撑机构在导轨上的调节灵活性。

2.4.2 导轨式滑动与固定机构设计

支撑机构底部与主装置导轨之间,本台架的设计采用了带孔板与导轨进行定位的连接形式:

支撑机构底部设置带圆孔的连接钢板,可通过螺栓与导轨上的定位孔进行连接从而实现刚性固定,将支撑机构与主装置导轨形成一体化结构,能够防止导向管在钻进过程中发生轴向位移。

导轨式连接同时赋予支撑机构位置可调性,可根据试验需求沿导轨轴向移动支撑机构的位置,适配不同长度导向管的安装需求,提升了装置的通用性。

导轨上的圆孔设计可实现支撑机构的快速定位与锁紧,安装与拆卸过程无需额外工装,便于试验前后的装置调试与维护,节约了人力与时间。

2.4.3 导向管支座的结构设计

导向管抱箍支座是三角桁架与导向管直接连接的部件,承担了导向管的径向支撑、定位与载荷传递功能。本设计采用对称式半环抱箍+斜撑加强的一体化结构,结合两侧连接板实现与导轨的刚性固定如图6所示,其结构设计与功能优势如下:

支座主体为半环形抱箍,这样的结构设计可实现对导向管的三点支撑接触,将导向管的自重、钻具摩擦载荷均匀分布到抱箍上,避免局部应力集中导致的导向管变形。同时抱箍内表面可根据需求加工耐磨衬层,以此来降低导向管往复运动时的磨损,延长部件使用寿命,同时半环开口设计便于导向管的安装与拆卸,无需将支座整体拆除。

抱箍两侧对称设置斜向加强筋板,与抱箍、连

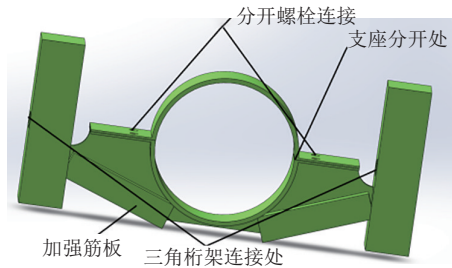


图6 导向管支座

接板形成稳定的三角形受力单元;斜撑筋板可有效传递导向管受到的侧向载荷与扭矩,将载荷分解为筋板的轴向拉力与压力,大幅提升了支座的抗侧刚度与抗扭性能,避免抱箍在钻具振动下发生变形或偏移。筋板与抱箍、连接板采用焊接一体化成型,消除了连接间隙,保证载荷传递的连续性,提升支座的整体结构强度。

支座两端设置带孔连接板,通过螺栓与支撑框架实现刚性固定,连接板上的螺栓孔可实现与三角桁架的快速定位与锁紧,防止导向管在钻进过程中发生轴向抖动。对称布置的连接板保证了支座受力的对称性,避免单侧受力导致的抱箍偏斜,确保导向管中心轴线与主装置基准轴线的同轴度。

2.5 钻具固定区

固定钻具支架放置区主要用于试验钻具的固定与摆放,同时作为钻进过程中钻具辅助支撑的过渡区域。为保证试验准备阶段钻具的平稳过渡,避免因悬空导致的自然挠曲变形,支架框架内设置了钻具固定所需的孔位以及相应的支撑装置,可根据钻具直径与长度,灵活调整,避免钻具在试验准备阶段发生位移或倾倒;同时,该区域与第二段导向管区域无缝衔接,保证钻具从导向管穿出后,能够平稳过渡至岩样钻进区,减少了钻具偏斜风险。

2.6 循环系统

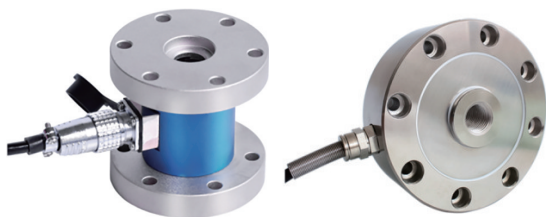
为满足高造斜定向钻进工艺中柔性动力钻具的动力需求及排屑要求,本文依托试验平台搭建了成套泥浆循环系统。该系统旨在实现钻井液的高压输送及循环利用。系统主要由F-500型泥浆泵、动力驱动模块及监控仪表、循环罐组成。

其循环流动过程为:钻井液经F-500泥浆泵加压后,通过高压软管输送至钻机水龙头,经动力头输送至钻具内部,驱动动力钻具旋转;钻井液经循环槽回流至循环罐完成闭环循环。

本系统选用F-500型高压泥浆泵作为核心动力源。该泵具有结构紧凑、输出压力平稳的特点,能够提供稳定的水功率以驱动柔性动力钻具工作。本循环系统实现了试验平台上钻机进给、钻具导向与载荷采集的高效协同,为高造斜定向钻进试验平台的实用性提供了坚实的试验保障。

2.7 数据管理系统

高造斜钻具在井底破岩时受到复杂的动态交变载荷,传统单一信号采集无法捕捉钻头处的瞬态响应。为解决这一“感知盲区”难题,在试验系统的感知层设计中,本文集成了高精度的载荷监测模块。系统选用静态扭矩传感器与轮辐式压力传感器(图7),分别用于实时监测钻进过程中的旋转扭矩与轴向载荷。这两类传感器均具备优异的线性度($\leq 0.3\%$ F.S.)与灵敏度,且高达150%的过载能力确保了在复杂破岩工况下数据采集的连续性与安全性。通过将传感器信号接入高速数据采集卡,系统能够精准捕捉钻头破岩时的受力波动,为后续柔性钻具的力学特性研究提供可靠的原始数据支撑。



(a)静态扭矩传感器 (b)轮辐式压力传感器
图7 静态扭矩传感器与轮辐式压力传感器

3 试验应用

3.1 $\varnothing 127$ mm 柔性钻柱动力传导试验

本文依托上述试验平台,开展了轴向钻进压力与旋转切削扭矩测试的试验,获取了钻头在典型试样材料下的载荷变化规律,验证试验台架的承载能力、结构稳定性与数据采集系统可靠性,为钻进过程中的力学响应研究、台架优化设计及钻进参数研究提供了基础数据。

为获得钻进时施加不同压力和扭矩时钻头所产生的力变化曲线,以及钻具的传递效率,分别设置了两类典型试验工况^[19-20]:

轴向压力测试:以花岗岩为钻进对象,钻头在轴向给进过程中破岩,传感器实时采集轴向钻进压

力随时间的变化曲线。

扭矩测试:以聚氨酯为切削对象,钻头旋转接触并切削试样,传感器采集旋转切削过程中的扭矩变化曲线。

图8为钻进试验的现场工况,本次试验采用 $\varnothing 127$ mm 柔性钻杆,测试旋转钻进过程中柔性钻杆轴向压力、扭矩传递与变化情况。应用测试系统对钻进过程中的扭矩与钻压信号进行同步采集,如图9、图10所示两组试验的加载参数分别为:转速3 r/min、设定扭矩200 N·m、设定钻压600 kg(1 kg=10 N,下同),泵压挡位均为4.5级。试验结果表明,扭矩信号在154~222 N·m范围内周期性波动,平均扭矩为189.72 N·m,以峰值222 N·m为基准计算,扭矩沿程损失约为32.28 N·m,占比约14.5%;钻压信号在398~512 kg范围内同步波动,平均钻压为45 kg,以设定钻压600 kg为基准计算,钻压沿程损失约为150 kg,占比约25%。扭矩与钻压的波动周期一致,反映了钻头切削破岩过程中轴向力与扭矩的耦合作用特征,其中钻压沿程损失显著高于扭矩损失,表明钻压传递过程中需克服钻杆自重与井壁摩擦等阻力,而扭矩传递受扭转摩擦与机械传动损失影响较小。整体来看,两组试验信号稳定、波动规律清晰,可有效反映该工况下的钻进力传递特性与沿程消耗规律。



图8 钻进试验现场工况

测试结果表明,该试验平台整体结构稳定、功能配置完善、运行安全可靠。台架能够稳定实现钻机进给、钻具导向、试样装夹、载荷采集等全部预期功能,各模块衔接顺畅,分段式结构与三角支撑设计有效保证了钻进过程中的整体刚度与抗倾覆能力;导轨、支撑、连接及传感器安装位置均满足试验要求,压力与扭矩信号采集稳定、数据曲线清晰连续,未出现明显振动、偏移或数据异常现象。试验

过程中台架各部件工作状态良好,能够完整复现钻进载荷变化过程,充分验证了试验平台功能完备、

设计合理,可满足后续各类钻进力学特性试验的开展需求。

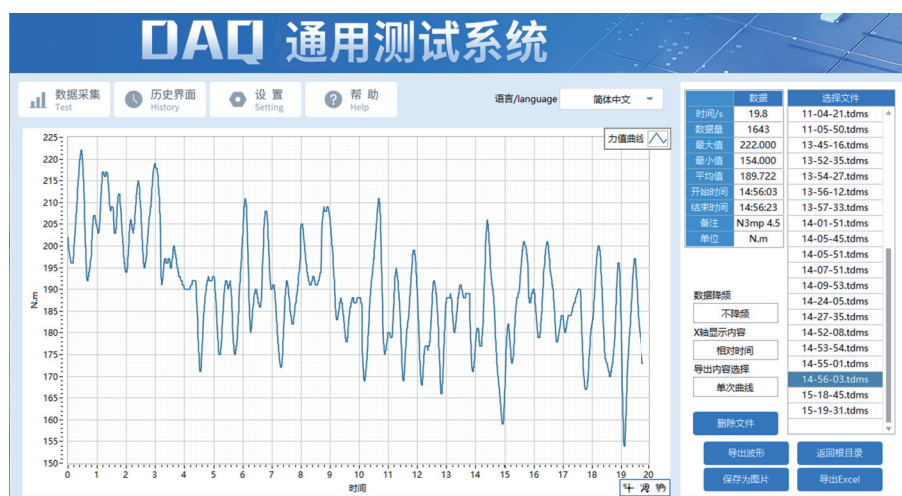


图9 扭矩变化

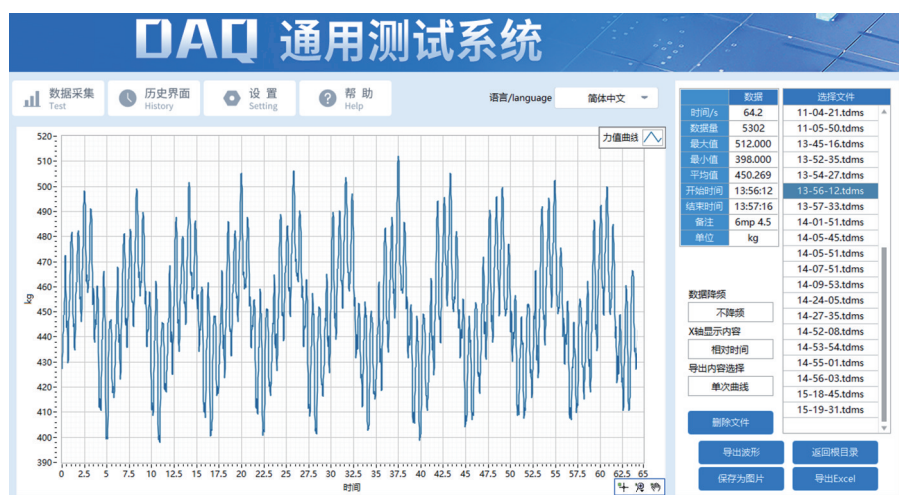


图10 压力变化

3.2 $\varnothing 105$ mm 柔性动力钻具实钻试验

本文依托上述试验平台,开展了不同排量、钻压及转速组合下的水平与复合钻进测试试验。通过获取柔性钻具在典型工况下的载荷及进尺变化规律,验证了试验平台的多功能性、承载能力与结构稳定性,为钻进轨迹控制、台架优化设计及钻进参数研究提供了基础数据。

为了获得柔性钻具在钻进时的各项参数,评估其动力传递的平稳性,本次试验分别设置了两类典型试验工况:

定向滑动钻进试验:在钻压恒定的情况下,改变流量大小,测试系统滑动钻进试验能力。

复合钻进试验:在变转速和压力条件下,测试柔性动力钻具复合钻进扭矩稳定性与变化特征。

本次试验采用的是 $\varnothing 105$ mm 柔性动力钻具,并应用测试系统对钻进过程中的多项参数进行了同步采集与分析。在滑动钻进试验中,设定钻压在 $2.0 \sim 2.8$ t ($1 \text{ t} = 10 \text{ kN}$,下同)之间波动。试验结果表明,随着流量从 700 L/min 增大到 900 L/min ,系统泵压呈现出明显的上升趋势,由最初的 1.8 MPa 提升至最高 3.7 MPa 。在此过程中,当流量处于 $800 \sim 900 \text{ L/min}$ 的区间时,进尺表现相对稳定,机械钻速为 0.6 m/h 。

在复合钻进试验中,首先将给进压力保持为 3

t,测试不同转速条件下钻进的特征。初期动力头转速设定为10 r/min时,进尺速度较快;随着转速提升至20和30 r/min,机械钻速稳定在0.24 m/h。在此转速条件下,扭矩始终稳定在0.3 kN·m左右,说明柔性钻具在复合钻进过程中动力的传递较为平稳。随后,在固定转速为10 r/min的条件下,将给进压力从3 t逐步增加至6 t,机械钻速也相应从0.24 m/h增加至0.48 m/h。

测试结果表明,本文研制的高造斜定向钻进试验平台整体结构稳定、运行安全可靠,成功模拟了不同排量、钻压及转速组合下的进尺状态,验证了其在柔性钻具测试中具有多功能性。试验过程中各项参数采集稳定,能够完整复现钻进载荷与轨迹变化过程,充分验证了本试验平台功能完备,可满足后续各类钻进力学特性与轨迹控制试验的开展需求。

4 结论

(1)针对重载抗倾覆需求,成功实现了台架的模块化稳态设计:深入分析了重载导致的侧向失稳隐患,提出了四段功能模块化框架搭配两侧三组对称合金钢三角支架的闭环受力方案。应用表明,该结构安全、平稳地将强烈的实钻倾覆力矩导向地面,有效抑制了整体共振,彻底解决了传统线性台架安装空间受限、稳定性差的缺陷。

(2)针对高造斜动态保形与同轴度需求,成功研制了高刚度三角桁架导向机构:针对柔性钻具剧烈接触偏摆与径向交变剪切应力难题,设计了与槽钢导轨滑动副耦合的三角桁架导向管支撑机构。该结构利用三角形的几何稳定性将复杂交变载荷转化为杆件轴向力,抗振性能比标准矩形框架提升约50%;配合精密定位孔,实现了部件重复装配位置偏差 ≤ 0.5 mm,在实钻多维冲击下保障了导向轴线的同轴度。

(3)针对多参数链条同步动态感知需求,成功建立了多维精密感知与控制系统:针对井底破岩受力特征精细化研究的要求,在模拟底部集成配备了具备150%过载能力的静态扭矩与轮辐式压力传感器,并配套了0~90°动态调角钻机及F-500型闭环泥浆循环系统。系统信号稳定、数据曲线连续清晰,成功捕捉了复杂破岩工况下动态载荷的非线性特征,实现了测试参数的精细化调控与感知。

(4)通过全系统多工况实钻试验,复现了高造斜定向钻进试验的真实力学消耗规律:基于本平台顺利开展了 $\varnothing 127$ mm柔性钻柱动力传导与 $\varnothing 105$ mm柔性动力钻具实钻测试。本平台的研制成功,为高造斜定向钻进钻具的学术研究、结构优化及实钻工艺参数的科学制定提供了最直接、可靠的物理试验手段。

参考文献:

- [1] 于洪波.复杂地质条件下S形定向井的井身结构优化及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(6):28-31,35.
- [2] 郭强,张德龙,杨鹏,等.柔性马达载荷传递中挠刚度特性研究[J].钻探工程,2025,52(1):78-83.
- [3] 李云峰,耿建国,袁志坚.陕北浅层石油定向井钻进工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2003,30(S1):264-265,269.
- [4] 高志锋.定向钻进技术在煤矿地质勘查中的应用研究[J].煤炭新视界,2026(1):258-260.
- [5] 陈金涛.定向钻进技术在井下远距离老空水探测中的应用[J].煤炭与化工,2026,49(5):59-62,67.
- [6] 杨冬冬,张幼振,李泉新,等.我国煤矿区定向钻进轨迹控制关键技术与发展趋势[J].煤炭科学技术,2026,54(2):60-78.
- [7] 张文举,宋丽娜,高杉,等.钻机试验台的研制和应用[J].地质装备,2015,16(1):11-14,42.
- [8] 张锐尧,李军,叶道辉,等.多梯度控压钻井可行性室内模拟试验[J].石油机械,2023,51(5):41-46.
- [9] 刘峰,宋志彬,杨大根,等.ZP-1型钻杆疲劳试验台[J].探矿工程(岩土钻掘工程),1997,24(4):25-27.
- [10] 颜岁娜,张志伟,刘维国,等.多功能双井口钻井设备试验台的研制[J].石油机械,2017,45(7):6-10.
- [11] 葛字家,张书磊,张恒春,等.隧洞勘察定向钻进连续取心钻具性能验证试验[J].钻探工程,2026,53(1):85-90.
- [12] 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.
- [13] 陈金游.电梯井道内槽钢辅助固定法探析[J].市场监管与质量技术研究,2022(1):28-30.
- [14] 罗诗伟,王平安,白宁博,等.MG-20S型隧道锚杆钻机的研制与应用[J].钻探工程,2023,50(S1):431-436.
- [15] 徐松,牛民,林培.非开挖钻机智能化控制研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(12):56-61.
- [16] 张楠,孙友宏.基于组态软件的液压钻机自动检测控制系统[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):54-59.
- [17] 吕春明,李文胜,盘丹丽,等.某乐园建筑大跨度三角桁架结构设计[J].建筑技术,2024,55(14):1683-1687.
- [18] 刘统一.“一体式三角桁架”在斜底板现浇箱梁中的设计与应用[J].安徽建筑,2016,23(5):199-201.
- [19] 邵保平,赵阳升,张昌锁,等.高温高压下花岗岩中钻孔变形规律实验研究[J].岩土工程学报,2010,32(2):253-258.
- [20] 周波,汪海阁,张富成,等.温度压力对岩石可钻性和破岩效率影响实验[J].石油钻采工艺,2020,42(5):547-552.

(编辑 王文)