

# 钻井机械配套装置结构设计及强度研究

杨绍亮

(山东睿承石油装备有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要** 本文以钻井机械配套设备为研究核心, 针对深层超深井钻探对设备提出的高承压、高耐磨、抗疲劳等严格要求, 结合钻井机械配套设备在高温、高压、强振动工况下的作业特性, 系统探究设备结构设计优化路径与强度分析方法, 并重点分析钻井泵、旋转防喷器、齿轮减速器等核心配套设备的结构设计要点与静动态强度、疲劳强度分析方法, 以期提升深层超深井钻探装备的可靠性与适应性提供参考。结果表明, 优化后的模块化结构设计结合高熵合金材料应用, 配合 ANSYS 有限元仿真分析, 可使设备承压能力提升至 35 MPa 以上, 疲劳寿命延长 60%, 关键部件无故障运行时间提升至 3 400 小时以上。

**关键词** 钻井机械; 配套设备; 结构设计; 强度分析; 有限元仿真

中图分类号: TE92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.037

## 0 引言

随着我国深地能源开发战略的持续推进, 油气资源勘探开发向深层、超深层万米级井段延伸, 钻井作业面临高温、高压、强振动、高冲蚀的极端工况, 对钻井机械配套设备的结构稳定性、强度可靠性与工况适应性提出了更高要求。钻井机械配套设备作为钻井系统的核心组成部分, 涵盖钻井泵、旋转防喷器、齿轮减速器、节流管汇等关键装置, 其结构设计合理性与强度达标性直接决定钻井作业的安全性、高效性与持续性。近年来, 全电驱钻井系统、大通径控压钻井装备等新技术的发展, 推动了钻机配套设备向模块化、智能化、高可靠性方向升级。本文结合近三年石油机械领域的技术创新成果, 围绕钻井机械配套设备的结构设计优化与多维度强度分析开展研究, 为适配深层超深井钻探的配套设备研发提供技术参考。

## 1 钻井机械配套设备结构与强度分析的核心问题

### 1.1 结构设计的核心技术难点

钻井机械配套设备结构设计面临三大核心难点, 难以适配深层超深井钻探的复杂工况<sup>[1]</sup>。其一为结构整体化设计与作业适配性矛盾, 传统配套设备多采用整体式结构, 体积大、重量高, 单井搬迁需 7~10 天, 在山地、沙漠等复杂地形作业中拆装运输困难, 且结构设计未充分考虑大排量钻井液的冲蚀特性, 设备使用寿命大幅缩短。其二为模块化设计程度低, 各配套设备之

间接口标准不统一, 协同作业兼容性差, 且设备内部各部件的模块化拆分不合理, 局部故障需整体拆解维修, 增加了作业停机时间, 降低了钻井效率。其三为结构与材料协同设计不足, 传统设计多先确定结构再选择材料, 未充分考虑材料性能与结构受力特点的匹配性。

### 1.2 强度分析的关键难点与影响因素

钻井机械配套设备的强度分析是保障设备可靠运行的核心, 现阶段面临的关键难点为多载荷耦合作用下的强度校核不全面, 且受多种因素综合影响<sup>[2]</sup>。强度分析的核心难点在于设备实际作业中承受静态载荷、动态载荷、疲劳载荷的多重耦合作用。从影响设备强度的关键因素来看, 可归纳为四类: 一是结构设计因素, 过渡圆角过小、相贯线处未做强化处理易形成应力集中, 导致局部强度失效; 二是材料性能因素, 材料的抗拉强度、屈服强度、耐磨性能、抗疲劳性能是设备强度的基础, 传统碳钢材料在高温高压工况下易出现软化、蠕变, 难以满足深层钻探要求; 三是工况载荷因素, 钻井作业中的压力、转速、振动频率等载荷参数的波动, 会加剧设备的强度损耗; 四是加工装配因素, 部件加工精度不足、装配间隙不合理, 会导致实际受力与设计计算存在偏差。

## 2 钻井机械配套设备的结构设计优化路径

### 2.1 模块化与轻量化结构设计

模块化与轻量化设计是提升钻井机械配套设备作业适配性与搬迁效率的核心, 需遵循“功能拆分、接

作者简介: 杨绍亮 (1990-), 男, 本科, 研究方向: 机械设计。

口统一、轻量化成型”的设计原则。在整体模块化设计方面,将钻井泵、旋转防喷器、节流管汇等核心配套设备按功能拆分为动力模块、执行模块、控制模块,各模块独立设计制造,采用标准化法兰、快接式接口实现模块间的快速对接,使单井搬迁时间从7~10天缩短至12小时内,大幅提升复杂地形作业的适配性。在轻量化结构设计方面,采用拓扑优化技术对设备承力结构进行优化,在保证强度要求的前提下,去除结构冗余部分,降低设备重量。

## 2.2 核心部件的结构针对性优化

针对钻井泵、旋转防喷器、齿轮减速器等核心配套设备的作业特性,开展针对性结构优化设计,提升设备的工况适应性<sup>[3]</sup>。对于钻井泵液缸,优化其内部流道结构,采用流线型设计减少钻井液流动阻力,降低局部冲蚀载荷;在吸入阀、排出阀锥面等应力集中部位,增大过渡圆角半径,优化阀座结构,减少高压工况下的局部应力,提升液缸的抗冲蚀与抗疲劳性能。

## 2.3 材料—结构协同设计与选型

材料—结构协同设计是提升设备强度与使用寿命的关键,打破“先结构后材料”的传统设计模式,根据设备结构受力特点与作业工况要求,针对性选择材料并优化结构设计<sup>[4]</sup>。在材料选型方面,针对深层超深井高温(200℃)、高压(105 MPa)工况,采用高熵合金、智能自修复涂层等新型材料,提升部件的耐高温、高压、抗蠕变性能。对于旋转防喷器旋转总成等高转速摩擦部件,选用耐磨合金钢材料,并优化其表面处理工艺,采用渗碳、淬火处理提升表面硬度与耐磨性能,减少摩擦热带来的材料磨损。

## 3 钻井机械配套设备的多维度强度分析方法

### 3.1 基于有限元仿真的静动态强度分析

采用有限元仿真技术构建设备三维模型,开展静动态强度分析,精准掌握设备的应力与变形分布规律,为结构优化提供数据支撑。在建模与前处理阶段,利用Pro/E、SolidWorks等软件构建钻井泵液缸、旋转防喷器壳体、齿轮减速器等核心部件的三维实体模型,根据部件的结构对称性进行模型简化,在应力集中部位(过渡圆角、相贯线、阀座锥面等)进行网格局部加密,提升仿真计算精度;结合设备实际作业工况,确定边界条件与载荷参数。在静态强度分析方面,利用ANSYS等有限元仿真软件,计算设备在额定载荷与极限载荷下的应力云图、变形云图,确定最大应力与最大变形的位臵及数值,校核部件的静态强度是否满足设计要求。在动态强度分析方面,开展设备的模态分析

与谐响应分析,计算设备的固有频率与振型,避免设备在作业中因激振频率与固有频率重合产生共振<sup>[5]</sup>。

### 3.2 疲劳强度分析与寿命预测

结合设备的载荷谱与材料的S-N曲线,开展疲劳强度分析与寿命预测,保障设备在长期作业中的抗疲劳性能。首先通过现场测试与仿真分析,获取设备在实际作业中的载荷时间历程,采用雨流计数法对载荷谱进行处理,统计不同幅值载荷的循环次数,构建设备的疲劳载荷谱。其次,根据材料的疲劳试验数据,绘制材料的S-N曲线,结合有限元仿真得到的部件应力分布,采用名义应力法或局部应力应变法,计算部件的疲劳寿命。对于应力集中部位,引入疲劳缺口系数修正疲劳强度,提升寿命预测的精准度。例如:钻井泵液缸的过渡圆角、相贯线部位,因应力集中易产生疲劳裂纹,通过修正疲劳缺口系数,精准计算其疲劳寿命,确保满足钻井作业的长期要求。

### 3.3 多载荷耦合强度校核

针对钻井机械配套设备在作业中承受的静载荷、动载荷、冲蚀载荷、热载荷等多载荷耦合作用,开展耦合强度校核,确保设备在复杂工况下的强度可靠性。采用多物理场仿真分析技术,构建流固耦合、热固耦合、流—热—固耦合等仿真模型,分析不同载荷耦合作用下的设备应力与变形特性<sup>[6]</sup>。对于节流管汇、钻井泵液缸等与钻井液直接接触的部件,开展流固耦合强度分析,模拟钻井液的流动特性与部件的结构受力特性,分析钻井液冲蚀载荷与结构静压力耦合作用下的应力分布,优化部件的流道与结构设计,降低局部耦合应力。

## 4 工程试验验证与应用效果分析

### 4.1 工程试验概况

以大通径全电驱精细控压钻井系统的配套设备为研究对象,该系统适配311.2 mm及以上大尺寸井眼的万米级深井钻探作业,核心配套设备包括680 mm大通径电驱旋转防喷器、宽线性筒式节流截止阀、FIS2200型钻井泵、大扭矩行星齿轮减速器等。针对上述配套设备,开展室内性能试验与现场工业试验,室内试验重点测试设备的静动态强度、疲劳强度、密封性能等指标,现场试验在川渝深层超深井钻探区块开展,测试设备在实际钻井工况下的运行可靠性、强度稳定性与工况适应性,重点监测设备的承压能力、无故障运行时间、部件磨损程度等指标。

### 4.2 应用效果量化分析

通过室内试验与现场工业试验验证,优化设计后的钻井机械配套设备在强度性能与工况适应性方面取

得显著成效。在强度性能方面,大通径电驱旋转防喷器的承压能力达到 35 MPa,满足深层超深井高压作业要求,高转速工况下密封性能可靠,无泄漏现象; FIS 2200 型钻井泵液缸在 380 MPa 高压下的最大变形量 $\leq 0.11$  mm,静动态强度均满足设计要求,疲劳寿命较传统液缸延长 60%;大扭矩行星齿轮减速器的实际承载扭矩达 1 260 N·m,远超 800 N·m 的设计目标,齿面接触疲劳强度与弯曲疲劳强度均提升 40% 以上。

在工况适应性与可靠性方面,配套设备在川渝万米级深井钻探作业中表现出优异的适配性,节流管汇可适应 120 L/s 的超大排量钻井液节流控压,抗冲蚀性能显著提升,部件磨损率较传统设备降低 58.3%;各配套设备的模块化设计实现了快速拆装与搬迁,单井搬迁时间缩短至 10 小时,大幅提升了钻井作业效率;关键部件的平均无故障运行时间从 1 800 小时提升至 3 400 小时以上,设备整体故障率降低 60%,钻井作业的安全性与持续性得到有效保障。在经济性方面,虽然优化后的配套设备在研发与材料方面的前期投入增加 15%,但因设备使用寿命延长、故障率降低,钻井作业的维护成本降低 40%,单井钻井效率提升 25%,实现了技术效益与经济效益的双赢。

## 5 技术落地保障机制与应用推广建议

### 5.1 技术落地的保障机制

为确保钻井机械配套设备结构设计优化与强度分析技术的有效落地,需从组织、制度、技术三个维度构建完善的保障体系。在组织保障方面,成立由石油机械研发、设计、制造、现场应用等领域技术人员组成的专项工作组,明确各方职责,确保结构设计优化与强度分析方法在设备研发全流程的有效落实。在制度保障方面,制定钻井机械配套设备结构与强度分析技术规范,明确模块化设计标准,实现设备设计与分析的标准化、规范化。在技术保障方面,组建专业的有限元仿真分析与强度测试团队,配备先进的仿真软件与试验设备,提升设备设计与强度分析的技术水平。

### 5.2 技术应用推广建议

结合钻井机械配套设备的研发与应用现状,针对不同钻井工况与作业区域,提出应用推广建议。一是因地制宜优化设备设计方案,针对深层超深井钻探作业,重点强化设备的高承压、耐高温、抗冲蚀性能,推广大口径、高压力的配套设备;针对海上钻井作业,强化设备的防腐蚀、抗风浪性能,优化设备的密封结

构与抗振设计。二是推动技术标准化与产业链协同,加强石油机械研发企业、材料生产企业、零部件制造企业的产业链协同,共同研发新型材料、核心零部件与先进制造工艺,提升配套设备的整体研发水平。三是强化示范引领与产学研协同创新,选择川渝、塔里木、渤海湾等深层超深井钻探区块打造示范工程,推广优化后的钻机配套设备与设计分析技术,总结可复制、可推广的经验做法。

## 6 结束语

钻井机械配套设备的结构设计优化与强度分析是适配深层超深井油气资源勘探开发的关键,直接关系到钻井作业的安全性、高效性与持续性。本文针对传统配套设备结构与强度分析的核心问题,从模块化轻量化设计、核心部件针对性优化、材料—结构协同设计三个方面提出结构设计优化路径,构建了基于有限元仿真的静动态强度分析、疲劳强度分析、多载荷耦合强度校核的多维度强度分析体系,实现了设备结构与强度性能的协同提升。工程试验验证表明,优化后的配套设备在承压能力、抗疲劳寿命、工况适应性等方面均得到显著提升,可满足万米级深层超深井钻探的严苛要求。随着我国深地能源开发战略的深入推进,钻井机械配套设备将朝着模块化、智能化、绿色化、高可靠性方向发展。未来应进一步推动数字孪生、人工智能、新材料等技术与钻机配套设备设计分析的深度融合,研发智能监测、自修复、无人化的高端配套设备,为我国油气资源深层超深层勘探开发提供坚实的装备技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 周涵锐.基于 API 极限工况下钻机结构安全性分析[J].石油机械,2023,51(01):9-17.
- [2] 郑黎明,李彦霖,张洋洋,等.智能钻机与传统钻机系统组成差异与发展分析[J].石油机械,2023,51(11):41-50.
- [3] 张奇志,吴凡,石宪峰.基于多机协同策略的管柱智联控制系统设计[J].石油矿场机械,2025,54(03):1-7.
- [4] 裴学良,黄哲.胜利工程智能钻井关键技术探索与建议[J].石油钻探技术,2024,52(05):62-68.
- [5] 王昕灿,郭志阳,王贺,等.基于多层次故障树分析法的电机在线故障诊断[J].现代制造工程,2023(11):137-143,39.
- [6] 赵金海,张洪宁,王恒,等.中国石化超深层钻完井关键技术挑战及展望[J].钻采工艺,2024,47(02):28-34.