 DOI: https://doi.org/10.12349/mit.v3i1.10710

# Performance Optimization Analysis of Key Components of Deep and Ultra-Deep Well Drilling and Production Equipment

**Peng Yang**

Shandong Gaoyuan Oil and Gas Equipment Co., Ltd., Dongying, Shandong, 257091, China

**Abstract**

To ensure energy security, deep and ultra-deep well drilling is becoming increasingly important. However, the extreme conditions in ultra-deep layers, such as high temperature, high pressure, high corrosion, and complex stress, cause the performance of key components of drilling and production equipment to deteriorate and fail, seriously hindering drilling efficiency and operational safety. This paper reviews the relevant research progress, analyzes the failure mechanism of the drill string system under the coupling of vibration and buckling, and proposes vibration reduction measures combining active and passive methods; summarizes the efficient rock-breaking theory and the design methods of speed-increasing tools (PDC bits, downhole power drilling tools); summarizes the composition design and heat treatment innovation of high-temperature and H2S corrosion-resistant materials, as well as surface engineering protection technologies; and summarizes the technological innovations of intelligent equipment such as automated drilling rigs and rotary steering systems. Through investigation and research, it is found that the optimization of key components has now developed into a "material-structure-operating condition" coordinated system engineering, but still faces many problems, such as the performance degradation of ultra-high-temperature materials, unclear multi-field coupling failure mechanisms, and insufficient intelligence. Therefore, in the future, it is necessary to strengthen the basic theory, break through key technologies such as ultra-high-temperature materials, intelligent diagnosis, and adaptive control, and construct a full-cycle performance optimization system.

**Keywords**

deep wells and ultra-deep wells; drilling and production equipment; key components performance optimization

# 深井超深井钻采设备关键部件性能优化分析

杨鹏

山东高原油气装备有限公司，中国 · 山东 东营 257091

**摘　要**

为保证能源安全，深井超深井钻探越来越重要，但是超深层高温、高压、高腐蚀、复杂应力等极端环境，造成钻采设备关键部件性能变坏、失效，严重阻碍钻井效率和作业安全。本文对相关研究进展进行综述，分析钻柱系统在振动和屈曲耦合时的失效机理，提出主动和被动相结合的减振措施；整理高效破岩理论及提速工具（PDC钻头、井下动力钻具）的设计方法；总结抗高温、抗H2S腐蚀材料的成分设计及热处理革新，表面工程防护技术；归纳出自动化钻机、旋转导向系统等智能装备的技术革新。经调查研究发现，目前关键部件优化已发展为“材料-结构-工况”协同的系统工程，但仍面临诸多问题，如：超高温材料性能衰减、多场耦合失效机理不清、智能化不足等。因此，未来需将基础理论加强，将耐超高温材料、智能诊断与自适应控制等关键技术打破，对全身吗周期性能优化体系进行构建。

**关键词**

深井超深井；钻采设备；关键部件；性能优化

## 1 引言

近年来，全球油气勘探开发向深层、超深层发展，我国超深层油气资源占比约为 34%，对未来增储上产具有重要作用。目前我国超深井钻井技术已获得良好进展，实现 8000 米井深常态化作业，并逐渐发展为 9000 米及万米特深地层，但是，超深层环境具有高温（≥200℃）、高压（>130MPa）、高腐蚀（$H_2S/CO_2$）及复杂地质构造的特点，以上极端工况对钻采设备关键部件的要求较高，导致性能劣化与失效，对钻井效率与安全造成直接制约。研究表明，钻柱需承受巨大悬重与交变载荷，易有振动疲劳发生；钻头与井下动力钻具对超硬地层高效破岩提出高要求；材料需有高强度、高韧性及抗腐蚀性；密封连接件需对高温高压下的密封性充分保证。现场实践说明，导致井下复杂情况、延长钻井周期、增加作业成本的主要原因之一为关键部件性能劣化，频繁发生钻柱断裂、钻头寿命短、钻具腐蚀开裂等问题，增加经济成本。因此，本文探讨深井超深井钻采设备关键部件性能优化，对目前存在的问题分析，展望未来发展，旨在为深井超深井安全高效钻探提供理论支撑与工程指导 [1]。

【作者简介】程多麦（1986—），男，中国河南焦作人，本科，从事项目前后期管理研究。

## 2 钻柱系统动力学特征与减振优化

### 2.1 超深井钻柱动力学行为特征

钻柱是地面与井下钻头间唯一的连接装置，钻柱的动力学性能好坏会直接决定钻井的速度及安全，超深井钻柱长度可达 8000 ~ 10000m，细长比很高，属于典型的非线性动力学特点。钻柱在井筒内同时受着轴向、扭转、横向这三个方向的交变载荷的作用，这三种振动模式互相耦合，造成复杂的振动形态。钻柱振动是引起井下失效的主要因素，轴向振动出现跳跃现象，严重时会使得钻头瞬间脱离井底，降低破岩效率，扭转振动中的粘滑振动（stick-slip）具有更高的危害性，钻头周期性卡滞和释放，扭矩波动幅度可达平均值的数倍，不但降低钻头寿命，还会造成钻柱螺纹接头过载失效；横向振动引起的涡动会使钻柱和井壁剧烈碰撞，加快套管磨损和钻柱疲劳。研究结果表明，钻柱的屈曲现象也不能忽视，随着井深的增加，当轴向压力达到临界值，钻柱会从正弦屈曲转变为螺旋屈曲，从而引起摩阻扭矩突然增加，严重时会出现“锁死”的现象，即无法再继续钻进。高德利团队系统地发展了钻柱力学理论，此理论中明确指出：考虑建立井眼轨迹、钻柱结构、边界条件的动态摩阻扭矩评价方法，给钻柱设计提供理论基础。

### 2.2 振动控制与减振技术进展

国内外学者、工程技术人员，已经形成了以被动减振和主动控制相结合的钻柱振动技术体系，其中被动减振主要是利用钻柱内部的减振装置来达到目的，扭矩冲击器属于缓解粘滑振动的典型工具，其依靠钻井液水力能量、产生高频低幅的扭转冲击，给钻头赋予连续稳定的切削扭矩，研究表明，该类工具可使机械钻速提高 30% 到 50%，并且可大大减小钻柱扭转振动的幅度。另外，减震接头、轴向振荡器等工具分别对轴向、横向振动进行抑制，形成一套多维减振工具。

智能控压钻井技术、地面主动干预策略属于近几年来智能控压钻井技术研究的热点，利用实时监测井下振动参数，结合地面顶驱的扭摆控制算法，可主动调节钻进参数避开共振区间。中国石油开发的钻柱动力学仿真系统，根据各种数据可对井下振动状态进行预警、给出优化参数，在许多超深井项目中取得了很好的效果。全井钻柱动力学评价同主被动减振技术相结合是未来的发展趋向，某研究结果认为，把钻柱振动分析同疲劳寿命预估融合起来，进而达成振动和疲劳的协同控制，可明显改善钻具的安全性，这样一种评价、预警、控制一体化的技术思路，是钻柱动力学研究由被动响应转向主动预防的范式转变 [2]。

## 3 高效破岩理论与提速工具优化

### 3.1 深部硬岩破岩机理与钻头技术

超深层岩石受高应力压实影响，具有硬度大、研磨性好、塑性高的特点，传统的破碎理论认为，硬脆性岩石在钻头切削的作用下，是以脆性破碎为主，但深部高围压的环境下，岩石表现出明显的塑性特征，破岩效率急剧下降。因此部分学者明确提出：“塑 - 脆性临界”为基础的高效破岩理论，该理论认为，当切削深度、切削角度达到一定的程度时，岩石会处于塑性状态，在这种情况下会突然出现“脆性失稳”，产生大体积的破碎，进而冲破塑性耗能的效率天花板。

PDC（聚晶金刚石复合片）钻头是超深井钻井的主流破岩工具，其性能改善主要从切削齿材料、布齿构造、力平衡设计这三个方面入手，新型非平面界面 PDC 齿、热稳定聚晶金刚石齿等产品的使用提高了切削齿的抗冲击性、耐磨性。从结构上讲，用双排齿、三牙轮 PDC 混合布齿等新的设计，在不同的地层间可实现平稳过渡，减小振动的风险。经过研究可知，按照本地区岩性特点设计钻头可提高钻进效率，单个钻头的进尺比普通的钻头超过 40%。

### 3.2 井下动力钻具与提速工具

超深井中地面驱动能量沿钻柱传递有较大的损耗，井下动力钻具是提高井底破岩能量的重要装备，螺杆钻具是目前使用最广泛的井下动力工具，但其核心部件定子橡胶在高温环境下（>150℃）易出现热老化降解现象，造成输出扭矩下降或者失效。为了克服上述问题，某学者研制了耐高温橡胶配方、金属定子技术，使工作温度上限从原来的 100℃提高到 200℃以上。涡轮钻具属于另一种重要的井下动力方式，全金属结构、耐高温，但是高转速特性给 PDC 钻头带来了适应性问题。

近几年来，减速涡轮钻具的开发使转速、钻头的最佳工作区间得到较好的匹配，扩大涡轮钻具的应用范围，冲击类提速工具近几年来成为研究热点，扭力冲击器、旋冲钻具等工具用高频冲击载荷的作用来促使岩石裂纹的延伸，以达到减小破碎能耗的目的。某研究团队从冲击加速裂纹扩展、振荡减阻两方面入手，对一系列提速钻具进行研制工作，并且创建起以 CAE 数值计算为基础的分析评价方法。在塔里木、四川等盆地超深井上使用这些工具，取得明显提速的效果，机械钻速提高 30% ~ 80%。

## 4 关键材料性能优化与表面防护技术

### 4.1 抗高温抗腐蚀材料研发

超深井环境材料因受到高温、高压、H2S/CO2 腐蚀、交变应力等因素的影响，易受到破坏。传统的低合金钢钻具在高 $H_2S$ 的环境下，易产生硫化物应力腐蚀开裂（SSC），提高强度会加重氢脆敏感性，造成高强度、高韧性、抗硫化氢三者间的矛盾。就该瓶颈来说，国内的钢铁企业开展大量材料创新，南京钢铁摒弃传统的成分设计思路，以 Mo 合金为主、微量合金为辅的多元成分设计，研制出 125ksi 钢级的高强韧抗硫化氢钻具用钢，该材料的创新之处在于利用微合金复合强化细化热处理后得到的微观组织，用高纯净冶炼技术控制夹杂物的形态，达到高强度（屈服强度

≥862MPa）、高韧性（-20℃冲击功≥140J）、抗硫化物应力腐蚀性能三者协同的效果，该材料已被用在“川深 1 井”（设计井深 8690 米）等国家重点超深井工程。

对于万米级特深井，常规钢材在 200℃以上的环境里性能衰减的问题更加严重，中国科学院宁波材料所利用材料智能设计平台，研发出新型金属陶瓷复合材料，力学性能和摩擦学性能比现役材料提高 15% 到 30%，该材料已经应用到“深地川科 1 井”井下动力钻具的轴承、万向轴等重要的承载部件，给万米深井钻探提供有力支持 [3]。

### 4.2 表面工程与防护涂层

表面工程是提高关键部件服役性能的经济有效的方法，利用物理气相沉积、化学镀、激光熔覆等工艺，在基体材料表面制备耐磨、耐腐蚀、减摩等功能涂层。

钻具接头、套管防磨用硬质合金堆焊技术已经成熟，但是超深井高温环境给涂层与基体的结合强度带来更高的要求，研究者研制出梯度涂层设计、激光熔覆原位合金化等新技术，很好地解决了涂层和基体之间热膨胀系数不匹配的问题。另外，仿生表面织构技术即在密封面或摩擦副表面加工微纳结构，储存润滑介质或者捕获磨屑，具有改善密封性能、降低摩擦系数的潜力，目前还处在实验室研究向工程应用的转化阶段。

## 5 智能装备关键部位技术突破

### 5.1 自动化钻机与井下工具

钻机装备是钻采系统的主体，中国已经成功研制出 12000m、15000m 的自动化钻机，并且配备有 70MPa 高压五缸钻井泵，使钻台面 80% 的重体力劳动得以机械化代替。自动化钻机的重要部分顶驱装置、管柱处理系统、铁钻工等依靠集成传感器与控制系统来完成管柱输送、连接、上卸扣等工作的自动化操作，极大地提高了作业的安全性以及效率。井下工具上应用最多的就是旋转导向系统 (RSS)。中海油服自主研发的“璇玑”旋转导向系统，首次提出高动态状态最优估计算法和斜向正交阵列天线测井方法，在 6018m 井深、158℃井温条件下成功完成作业，标志着我国自主旋转导向技术正式进入超深井作业领域，该系统具有随钻测井的功能，可实时地识别出储层的边界，并且可调整井眼的轨迹，对提高超深复杂油气藏的钻遇率有着十分重要的意义。

### 5.2 智能诊断与寿命预测技术

伴随着传感器技术及人工智能算法的不断发展，钻采设备关键部件状态监测和寿命预测技术也得到很大的发展。利用井下近钻头多参数传感器（振动、扭矩、温度、压力等）的实时采集，再用大数据分析平台进行分析，可对钻头磨损、钻具疲劳、井下工况异常等进行预警。中国石油开发的多源数据为基础的钻柱故障预警、钻柱动力学仿真系统，把地面、井下数据融合起来，可对钻柱振动状态实施可视化的评价，并且可进行疲劳寿命的预测。数字孪生技术思路是建立关键部件的数字模型，并且实时同步物理实体的状态，给性能优化提供一种新的范式，即从事后失效分析转向事前状态预警。

## 6 问题与展望

综上所述，虽然深井超深井钻采设备的关键部件性能有了明显提升，但仍然存在许多亟待解决的问题。从基础理论上来讲，超高温高压下多场耦合（力、热、流、化）的失效机理还不清楚，现有的材料性能数据库大多以地面或者浅层条件的测试为基础，不能很好地外推到超深层极端环境下。加强极端工况下岩石力学、材料学、摩擦学的基础研究，建立面向深井超深井的材料、结构、工况协同设计理论体系，耐超高温（>240℃）的井下工具及电子元器件属于公认的“卡脖子”技术。目前随钻测量系统耐温极限为 175~200℃，远低于万米深井的温度要求（>260℃），重点攻克高温电子封装、高温密封、新型耐热材料等关键工艺技术。在技术集成层面，单一部件优化难以解决系统性问题。

未来要发展钻柱、钻头、地层一体化的优化设计方法，把机械、材料、流体、控制等各方面的知识结合起来，推进人工智能在智能钻机、自适应控制、故障诊断等领域深入应用，由自动化迈向智能化，从工程应用角度来说，要尽快创建起“设计、制造、检测、维护”全过程的性能控制体系。建立超深井钻采设备关键部件的服役性能数据库及评价标准，促进高端装备的国产化更新换代，为保证国家能源安全提供强效的有力技术支持。

### 参考文献

[1] 冯美贵,刘一静,朱丽娜,等.钻井液离心机关键部件内部流场及冲蚀磨损特性研究[J].钻探工程,2025,52(5):51-60.

[2] 席文奎,张轩,汪雄雄,等.小井眼钻井液脉冲器工作性能分析及参数优化[J].石油机械,2025,53(1):37-45.

[3] 曾兴昌,董亮亮,王亚丽,等.QDP-3000U钻井泵橇装结构振动特性及减振技术研究[J].石油机械,2025,53(4):9-16.