

# 非常规油气田的钻井技术分析

刘建兵

中石化中原石油工程有限公司钻井二公司 河南 濮阳 457000

**摘要:** 沙特非常规油气田钻井面临复杂地质条件挑战。本文分析气藏分布与储层属性, 阐述岩石力学特性对钻井约束及地质条件引发的适配需求。介绍长水平段水平井等核心技术体系, 剖析关键技术难点, 提出地质工程一体化等优化路径。探讨智能化、绿色高效、深层突破及技术集成化协同化等发展方向, 为沙特非常规油气田开发提供技术参考。

**关键词:** 沙特非常规油气田; 钻井技术; 技术难点; 优化路径; 发展方向

引言: 沙特能源战略布局中, 非常规天然气资源占据重要地位。其非常规气藏分布格局独特, 北部盆地与东部凹陷带地质特征差异显著, 储层岩石力学性质复杂多变。复杂地质条件对钻井技术提出严苛要求, 传统钻井技术难以满足开发需求。在此背景下, 深入分析沙特非常规油气田钻井技术, 探索适合其地质特点的钻井技术体系与优化路径, 对提升开发效率、保障能源安全具有重要意义。

## 1 沙特非常规气藏地质特征与钻井适配要求

### 1.1 沙特主要非常规气藏分布及核心储层属性

沙特非常规天然气资源分布广泛, 集中于北部盆地与东部凹陷带两大区域, 这一分布格局深刻影响着沙特能源战略布局与钻井技术选择<sup>[1]</sup>。北部盆地以深层致密砂岩气藏为主, 储层埋深普遍超过4000米, 单层厚度较薄但横向延展性强, 非均质性特征显著。该区域储层孔隙度与渗透率常处于超低水平, 属于典型的超低渗透储集体。东部凹陷带则以页岩气与浅层致密气共存为特征, 页岩层系发育有机质丰度较高的暗色泥岩, 成熟度适中, 具备良好生气条件。储集空间以微裂缝与纳米级孔喉为主, 天然气赋存状态复杂, 需兼顾解吸效率与渗流能力开发。

### 1.2 储层岩石力学特性对钻井技术的约束

沙特非常规气藏储层岩石力学性质差异明显, 对钻井工具与参数控制提出严苛要求。这种差异源于不同的地质沉积环境与成岩作用, 深刻影响着钻井作业的效率与安全。致密砂岩段抗压强度普遍高于80MPa, 研磨性强, 钻头切削齿易磨损, 需采用高耐磨复合片与强化保径结构。页岩层段各向异性显著, 水平层理发育导致钻进时井壁易剥落, 需严格控制钻压波动幅度以维持井眼稳定。碳酸盐岩储层脆性指数较高, 裂缝发育区易引发井漏, 需优化钻井液密度窗口, 避免压裂地层导致复杂

事故。深层高温环境加剧岩石力学特性变化, 温度升高会直接造成岩石抗压强度下降, 钻井液性能需同步调整以维持井壁力学平衡。

### 1.3 地质条件引发的钻井关键适配需求

复杂地质条件推动钻井技术向精细化方向演进。随着沙特非常规气藏开发不断深入, 对钻井技术的精细化要求愈发凸显, 以满足复杂地质条件下的开发需求。针对多层系叠置特征, 需采用多级套管程序与精准井身结构设计, 确保各层段封隔有效性。为提高储层钻遇率, 旋转导向系统与近钻头地质导向工具成为核心装备, 通过实时调整井斜与方位角, 实现井眼轨迹在目标层内的精准延伸。钻井液体系需兼顾强抑制性与环保性, 既要有效抑制页岩水化膨胀, 又要满足沙漠地区水资源保护要求。长水平段钻井过程中, 摩阻扭矩控制成为关键, 需通过优化钻具组合与流变参数, 降低滑动钻进时的粘附效应。此外, 高温环境对井下仪器可靠性提出挑战, 电子元件需采用耐温等级超过150°C的特种材料, 确保测量数据准确性。

## 2 沙特非常规气井钻井核心技术体系

### 2.1 长水平段水平井钻井技术

沙特非常规气藏开发中, 长水平段水平井技术是提升单井产量的核心手段。该技术对于提高沙特非常规气藏的开发效率与经济效益具有关键作用, 是当前钻井技术发展的重点方向。针对储层埋深大、非均质强的特点, 这一技术对钻具组合的抗扭能力与井眼清洁效率提出严苛要求。为降低摩阻扭矩, 常采用混合钻头配合高效螺杆钻具, 通过优化钻头冠部形状与切削齿布局, 提升破岩效率的同时减少钻柱振动。井眼轨迹控制方面, 旋转导向系统通过实时调整钻头姿态, 确保井眼在目标层内平滑延伸, 避免频繁起下钻调整。此外, 钻井液流变性能的精准调控至关重要, 需通过调整动切力与塑性粘度,

实现岩屑高效携带与井壁稳定之间的平衡,防止长水平段出现岩屑床堆积或井壁失稳。

## 2.2 随钻地层探测与轨迹精准控制技术

随钻地层探测技术是优化钻井决策的关键支撑。在沙特非常规气井开发中,精确的地层探测与轨迹控制是确保钻井成功的关键因素,对于提高资源利用率意义重大。近钻头地质导向工具集成多参数测量模块,可实时获取地层电阻率、自然伽马及岩石力学参数,结合地质模型动态修正井眼轨迹。当探测到储层边界时,系统自动调整钻进方向,确保井眼始终位于高含气区。旋转导向系统的闭环控制模式进一步提升了轨迹精度,通过井下电机驱动钻头偏置机构,实现井斜与方位角的连续调整,避免传统滑动导向方式导致的托压问题。为应对深层高温环境,测量仪器采用耐温等级超过150℃的特种传感器,确保数据传输稳定性。

## 2.3 针对性钻井液与固井技术

沙特非常规气井钻井液体系需兼顾强抑制性与环保性。鉴于沙特特殊的地质环境与环保要求,钻井液与固井技术的针对性研发成为保障钻井顺利进行的重要环节<sup>[2]</sup>。针对页岩段易水化膨胀的特点,开发合成基钻井液,通过引入纳米级封堵剂填充微裂缝,形成致密泥饼,有效抑制井壁失稳。在高温高压条件下,钻井液需具备优异的抗温性能,通过添加高温稳定剂与降滤失剂,维持流变参数稳定,防止井漏或井涌。固井环节则采用低密度水泥浆体系,通过减轻水泥石密度降低对脆弱地层的压力,同时优化水泥浆配方提升早期强度,确保层间封隔有效性。针对多级套管程序,采用膨胀管技术扩大井眼直径,为后续作业提供更大操作空间。

## 2.4 多类型钻机协同作业技术

沙特非常规气井开发常采用模块化钻机与自动化装备协同作业模式。这种协同作业模式是适应沙特大规模、高效开发非常规气井的必然选择,有助于提高开发效率与降低成本。陆地钻机配备顶驱与自动化猫道,实现钻杆输送与上扣的无人化操作,大幅缩短非生产时间。针对沙漠地区极端环境,钻机底盘采用宽履带设计,增强地形适应能力。此外,连续管钻机与常规钻机联合部署,前者完成浅层井段钻进,后者接续深层复杂井段作业,通过工序衔接优化提升整体效率。远程操控系统的应用进一步减少了现场人员需求,钻井参数与设备状态通过云端实时监控,技术人员可在控制中心完成决策调整,提升作业安全性与响应速度。

# 3 沙特非常规气井钻井关键技术难点

## 3.1 复杂地层井壁稳定控制难题

沙特非常规气藏地质条件复杂,井壁失稳问题贯穿钻井全过程。复杂的地质构造与岩石特性使得井壁稳定控制成为沙特非常规气井钻井面临的首要难题,严重影响钻井进度与安全。部分井段埋深超过4000米,地层压力系数波动大,呈现异常高压特征,钻井液密度窗口狭窄,稍有不慎即引发井漏或井涌。东部凹陷带页岩层段因水平层理发育,钻进时井壁易沿层理面剥落,形成不规则井眼,导致钻柱振动加剧与测井仪器下放困难。碳酸盐岩储层钻遇裂缝带时钻井液漏失情况严重,常规堵漏材料难以在高温高压条件下形成有效封堵层。此外,深层高温环境加剧岩石力学性质变化,井壁稳定性进一步弱化,需动态调整钻井液性能以维持力学平衡。

## 3.2 长水平段施工中的扭矩与卡钻风险

长水平段钻井过程中,扭矩与摩阻控制是制约作业效率的核心因素。长水平段钻井的特殊工况使得扭矩与卡钻风险成为影响钻井作业顺利进行的关键因素,需要采取有效措施加以应对。当水平段延伸至较长距离时,钻柱与井壁接触面积显著增加,滑动钻进阶段摩阻大幅上升,导致钻压传递效率降低,甚至出现钻柱托压现象。旋转钻进时,钻柱旋转产生的离心力与井壁摩擦力耦合作用,易引发钻柱屈曲变形,形成螺旋锁死状态,增加卡钻风险。高温环境进一步加剧问题复杂性,钻井液粘度随温度升高而降低,岩屑携带能力下降,长水平段易形成岩屑床堆积,导致钻柱活动阻力骤增。此外,钻头切削齿磨损不均会引发钻柱偏心旋转,加剧井眼不规则程度,形成恶性循环。

## 3.3 储层保护与钻井效率的平衡难题

非常规气藏开发需兼顾储层保护与钻井效率,二者存在天然矛盾。储层保护与钻井效率的平衡是沙特非常规气井开发中亟待解决的重要问题,关系到气井的长期生产效益。为保护储层渗透率,钻井液需采用低伤害配方,通过添加纳米级封堵剂填充微裂缝,减少滤液侵入对孔隙结构的破坏。然而,低伤害钻井液流变性能调控难度大,动切力不足易导致岩屑携带效率低下,延长钻井周期。若为提升钻井效率增加钻井液排量或调整流变参数,又可能引发井壁失稳或储层污染。此外,长水平段钻井需频繁调整钻井液密度以应对地层压力变化,密度波动范围需严格控制在极小区间内,否则易造成压裂地层或井漏事故,进一步压缩储层保护措施的实施空间。

## 3.4 特殊地质条件下的钻井工具适配难题

沙特非常规气井特殊地质条件对钻井工具性能提出严苛要求。特殊的地质条件使得常规钻井工具难以满足需求,钻井工具的适配性成为影响钻井效果的关键因素。

致密砂岩段研磨性强, 常规钻头切削齿磨损速率快, 单只钻头进尺有限, 需频繁起下钻更换钻头, 增加非生产时间。页岩层段各向异性显著, 需采用抗冲击性能优化的PDC钻头, 通过调整切削齿后倾角与布齿密度, 提升破岩效率的同时降低钻头振动<sup>[3]</sup>。碳酸盐岩储层硬度高, 需配备混合钻头, 通过金刚石复合片与牙轮结构协同作用, 实现高效破岩。深层高温环境则要求钻井工具具备耐温等级超过150°C的电子元件与密封材料, 否则易出现测量数据失真或工具失效问题。此外, 旋转导向系统需在高温高压条件下保持精准导向能力, 其内部电机与传感器需采用特种材料封装, 技术门槛较高。

#### 4 沙特非常规气井钻井技术优化路径

##### 4.1 地质工程一体化钻井方案优化

地质工程一体化是提升钻井决策科学性的核心路径。地质工程一体化理念为沙特非常规气井钻井提供了全新的思路与方法, 有助于实现钻井效益的最大化。通过构建三维地质模型与钻井工程模拟系统, 将地层岩性、压力系数、岩石力学参数等数据与钻井轨迹设计深度融合, 实现钻井方案动态优化。在方案制定阶段, 利用地震反演技术识别储层边界与裂缝发育带, 结合地质导向工具实时测量数据, 动态调整井眼轨迹, 确保钻头始终位于高含气区。针对复杂地层, 采用多级套管程序与井身结构优化设计, 根据地层压力系数变化分段设置套管下深, 平衡封隔需求与钻井成本。此外, 将钻井液性能参数纳入地质模型, 通过模拟不同流变参数下的井壁稳定状态, 提前制定应对措施, 减少非生产时间。

##### 4.2 分段提速与接力作业模式优化

分段提速技术通过分解钻井工序实现效率跃升。分段提速与接力作业模式是提高沙特非常规气井钻井效率的有效手段, 能够充分发挥各钻井环节的优势。浅层井段采用高速钻头配合大排量钻井液, 利用钻压与转速协同控制提升机械钻速, 缩短钻井周期。进入深层复杂井段后, 切换至混合钻头与旋转导向系统, 通过优化钻具组合与水力参数, 在保障井眼质量的同时维持较高钻速。接力作业模式则通过多钻机协同实现工序无缝衔接, 连续管钻机完成浅层钻进后, 常规钻机立即接续深层作业, 避免设备闲置。此外, 采用模块化钻机设计, 关键部件实现快速更换与调试, 减少设备搬迁时间。钻井液体系也需根据不同井段需求切换, 浅层采用常规体系降低成本, 深层切换至高性能合成基钻井液, 匹配地层性能需求。

##### 4.3 钻井设备与地层特性的精准匹配优化

设备适配性优化需立足地层特性展开。精准匹配钻井设备与地层特性是保障沙特非常规气井钻井顺利进行

的物质基础, 能够提高钻井作业的针对性与有效性。针对致密砂岩段高研磨性特征, 钻头选型侧重耐磨性与抗冲击性, 通过增加切削齿后倾角与布齿密度, 延长单只钻头进尺。页岩层段则采用抗各向异性钻头, 优化切削齿排列方式以降低钻柱振动。旋转导向系统需根据地层倾角调整导向力输出, 确保井眼轨迹平滑延伸。钻机选型方面, 沙漠地区采用宽履带底盘与高功率顶驱, 增强地形适应能力与钻柱扭矩传递效率。高温环境要求钻井设备配备耐温等级超过150°C的电子元件与密封材料, 例如采用陶瓷封装传感器与特种橡胶密封圈, 保障测量数据准确性与设备可靠性。

##### 4.4 动态调整的钻井参数优化策略

钻井参数动态调整是应对地层变化的灵活手段。通过实时监测钻压、转速、扭矩、钻速等参数, 结合地层岩性反馈, 构建参数优化模型。当钻遇裂缝带时, 系统自动降低钻井液排量以减少漏失风险, 同时调整钻压与转速平衡破岩效率与井壁稳定。长水平段钻进中, 根据摩阻扭矩变化动态优化钻具组合, 通过增加稳定器数量或调整安装位置, 降低钻柱屈曲风险。此外, 利用机器学习算法分析历史钻井数据, 预测不同地层条件下的最优参数组合, 为实时决策提供数据支撑。参数调整频率需与地层变化速率匹配, 在非均质性强井段缩短调整周期, 确保钻井过程始终处于高效状态。

#### 5 非常规油气钻井技术发展方向

##### 5.1 智能化钻井技术在沙特气藏的应用潜力

智能化钻井技术正逐步重塑沙特非常规气藏开发模式。通过部署井下智能传感器网络, 可实时采集钻头位置、地层压力、温度梯度等多维度数据, 结合边缘计算模块实现数据本地化处理, 减少信号传输延迟。旋转导向系统与智能钻头协同作业, 可根据地层岩性变化自动调整钻进方向与切削参数, 在致密砂岩段增强钻压, 在页岩层段降低振动频率, 提升破岩效率的同时延长钻具寿命<sup>[4]</sup>。地面控制中心通过数字孪生技术构建虚拟钻井模型, 模拟不同参数组合下的钻井效果, 为现场决策提供可视化支撑。此外, 智能钻井液系统可动态调节流变性能, 根据井眼清洁需求自动调整粘度与切力, 降低摩阻扭矩的同时减少岩屑床形成风险。

##### 5.2 绿色高效钻井技术升级方向

绿色高效钻井技术聚焦降低环境影响与提升资源利用率。水基钻井液体系升级方向包括开发可降解基液与环保型添加剂, 通过引入生物聚合物与纳米材料, 在保持性能的同时减少重金属污染。钻井液循环利用技术通过多级固控设备与在线监测系统, 实现钻井液性能实时

调控与有害物质分离,大幅减少单井钻井液用量。能源利用效率提升方面,钻机动力系统逐步向混合动力转型,结合太阳能发电与储能装置,减少柴油消耗与碳排放。此外,钻井废弃物处理技术向资源化利用发展,将岩屑转化为建筑材料或路基材料,实现废弃物零填埋目标。

### 5.3 深层非常规气藏钻井技术突破方向

深层非常规气藏开发需突破高温高压与复杂地质双重挑战。高温钻井工具研发聚焦耐温等级提升,通过采用陶瓷基复合材料与特种合金,将电子元件与密封件耐温性大幅提高,保障测量数据准确性与设备可靠性。高压环境适应性优化包括开发高压井口装置与防喷器系统,提升承压能力,满足深层气藏开发需求。复杂地质条件应对技术涵盖抗冲击钻头设计与智能导向系统升级,在裂缝发育带采用自适应切削齿布局,降低钻具卡滞风险。此外,深层钻井液体系需兼顾强抑制性与抗高温性能,通过引入高温稳定剂与纳米封堵剂,形成致密泥饼以抑制井壁失稳。

### 5.4 技术集成化与协同化发展趋势

技术集成化与协同化是提升钻井综合效益的关键路径。地质工程一体化平台整合地震勘探、测井数据与钻井工程参数,构建三维地质模型与钻井仿真系统,实现钻井方案动态优化与风险预警。钻井装备协同化发展包括旋转导向系统与智能钻杆深度融合,通过无线传输技术实现井下数据实时回传与指令下发,提升轨迹控制精

度。此外,多学科团队协同模式逐步普及,地质学家、钻井工程师与数据分析师共同参与决策,通过跨领域知识融合解决复杂问题。技术标准化建设同样重要,通过制定统一的数据接口与操作规范,促进不同厂商设备互联互通,降低集成成本与运维难度。

### 结束语

沙特非常规气井钻井技术发展需持续创新,以应对复杂地质条件带来的挑战。通过地质工程一体化、分段提速等优化路径,以及智能化、绿色高效等发展方向的探索,不断提升钻井技术水平。各技术环节紧密配合,多学科团队协同作战,有助于实现沙特非常规气藏的高效开发,为能源产业发展注入新动力,推动行业技术进步。

### 参考文献

- [1]韩冬,毕璇,万盈,等.非常规油气田开发含油岩屑环保无害化处理技术[J].当代化工,2024,53(5):1170-1173.
- [2]张静峰.非常规油气田中的钻井技术分析[J].丝路视野,2023(4):160-162.
- [3]肖啟福,王锐,范生林,等.非常规油气丛式井平台靶点自动匹配及引导式智能绕障方法[J].石油钻采工艺,2024,46(3):280-291.
- [4]白建,肖雲,伍晓玮,等.非常规气钻完井工程投资管控风险专项审计创新初探[J].天然气技术与经济,2023,17(5):74-80.