

# 控压钻井技术在深井和超深井中的应用

徐亚军

四川京川大正油田技术服务有限责任公司, 四川 成都 610074

DOI: 10.61369/SSSD.2026040025

**摘 要 :** 控压钻井是一种井控新技术, 在安全密度窗口窄、多套压力系统以及压力敏感性地层应用展现出了良好的效果。深井和超深井是保证能源供给的核心领域, 但因地质条件复杂、工况严苛, 使得钻井作业面临着严峻的挑战。控压钻井技术通过平衡地层压力与井筒压力, 可以有效解决深井超深井多压力系统、窄压力窗口、溢漏同存等困难。基于此, 本文阐明控压钻井技术的核心原理与特征, 分析其在控压钻井技术在深井和超深井中的关键应用, 并探讨其未来发展趋势, 期望为深部油气资源安全高效开发提供有益参考。

**关 键 词 :** 控压钻井技术; 深井; 超深井; 压力控制; 油气勘探开发

## Application of Managed Pressure Drilling Technology in Deep Wells and Ultra-Deep Wells

Xu Yajun

Sichuan Jingchuan Dazheng Oilfield Technical Services Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610074

**Abstract :** Managed pressure drilling (MPD) is a new well control technology, which has shown excellent performance in formations with narrow safe density windows, multiple pressure systems and pressure-sensitive characteristics. Deep wells and ultra-deep wells represent the core domain for ensuring energy supply. However, due to complex geological conditions and harsh operating conditions, drilling operations are confronted with severe challenges. By balancing formation pressure and wellbore pressure, managed pressure drilling technology can effectively resolve the difficulties in deep and ultra-deep well drilling, such as multiple pressure systems, narrow pressure windows, and the coexistence of well kicks and lost circulations. On this basis, this paper expounds the core principles and characteristics of managed pressure drilling technology, analyzes its key applications in deep wells and ultra-deep wells, and discusses its future development trends, aiming to provide useful references for the safe and efficient development of deep oil and gas resources.

**Keywords :** managed pressure drilling technology; deep wells; ultra-deep wells; pressure control; oil and gas exploration and development

## 引言

全球能源需求的持续增长推动油气勘探开发不断向深部拓展, 深井和超深井已成为我国油气增储上产的重点领域。但是, 深井和超深井的开发面临“深、陡、窄、厚、难、高”的极端地质条件, 同一裸眼井段多压力系统共存、压力窗口狭窄、超高温高压、高含硫等问题时常发生, 常规的技术难以应对。一旦引发井漏、溢流、卡钻等事故, 便会对勘探开发工作以及工作人员的安全造成严重威胁。因此, 探讨控压钻井技术在深井和超深井中的应用及未来发展趋势具有重要意义。

## 一、控压钻井技术原理

控压钻井技术通过控制井底压力来防范井喷、井漏等事故的发生。国际钻井承包商协会 (IADC) 将控压钻井 (MPD) 定义为“精确控制整个井眼环空压力剖面的自适应钻井过程, 其目标是确定井下压力环境界限, 通过调控井眼环空液柱压力实现安全钻进”。

控压钻井比常规钻井技术更有优势的地方在于能够主动调控, 控制井底压力、控制顶部压力和调节钻井液压力, 实现压力平衡<sup>[1]</sup>。这些调控手段可形成协同效应, 将井底压力严格约束在地层孔隙压力与破裂压力构成的安全窗口内, 避免因压力失衡导致井下事故的发生。该技术在应用中可以在不同地质条件、钻井深度和钻井环境下发挥着重要的作用。

以川中地区为例, 其四开裸眼井段常发育6套以上压力系数

1.50–2.40的地层，控压钻井通过多维度压力调控，这样一来可以有效防范“上漏下喷”现象的出现。这样的优势在复杂压力体系地层钻探中具有重要应用价值。

## 二、控压钻井技术在深井和超深井中的关键应用

### （一）压力窗口精准表征与多压力系统适配技术

深井超深井地层压力预测难度非常大，而且多压力系统叠加分布存在，控压钻井技术依托随钻测试与静态结合的压力窗口表征方法，对复杂压力系统进行精准适配<sup>[9]</sup>。该技术通过钻具搭载的压力传感器与流量监测设备，可以同步采集地层压力、环空压力等数据，通过对这些数据的综合分析，可以明确井筒压力变化趋势；静态测试中通过逐步调整环空压力，可检测出地层破裂压力与孔隙压力边界，动态测试可以模拟钻井过程压力波动，验证静态结果并评估钻井液性能影响，最终形成精准的压力窗口图<sup>[10]</sup>。

在川西北双鱼石构造应用中，通过建立三压力剖面，即地层压力、坍塌压力、漏失压力三压力剖面，优化井身结构设计，将四开241.3mm裸眼段长度缩短1600m，成功解决须家河组至栖霞组压力系数1.36–2.00的多压力系统适配难题，大大降低了作业中的故障率；同样，双鱼石构造Φ241.3mm井眼段钻至长兴组，因钻井液安全密度窗口窄出现“下漏上喷”难题，用常规方式难以解决，利用精细控压钻井技术，通过释放气层压力，扩大安全密度窗口，作业中精确控制当量循环密度等方式最终实现安全钻进至中完井深。

### （二）窄压力窗口溢漏协同控制技术

针对深井、超深井压力窗口狭窄甚至无密度窗口的极端情况，控压钻井技术可先小流量泄压、堵漏浆封堵再实时微调控，再进行协同处理<sup>[11]</sup>。小流量泄压主要通过精确控制环空回压，将井底压力逐步降至略低于地层压力，减缓高压流体侵入速度。堵漏浆根据漏失层地质特征定制配方，可精确的把控注入速度与压力，有效封堵漏失区域，增强地层承压能力；高精度传感器与智能调控系统支撑下，可持续监测环空压力、钻井液密度等参数，并根据参数调节钻井液流速、密度及环空回压，这样一来可以保证实现压力动态平衡<sup>[12]</sup>。在塔里木克深油田，针对安全窗口仅0.03g/cm<sup>3</sup>的高压盐水层，应用该技术实现“不漏不溢不吐”钻进，一趟钻完成170m进尺，较传统放水卸压技术可以缩短工期。

### （三）极端环境钻井液优化技术

深井超深井井底温度普遍超过150℃，部分井段可以达到190–235℃，且常存在膏盐层、高压盐水层等污染源，控压钻井技术配套研发了抗高温、抗污染、变密度的系列钻井液体系<sup>[13]</sup>。抗190℃超高温水基钻井液通过优选抗高温处理剂，在密度1.25–2.20g/cm<sup>3</sup>范围内保持稳定性能，抗盐膏污染能力突出，在ST6井、SYX133井应用中，可以有效应对超高温与膏盐层污染问题；抗220℃油基钻井液采用3#白油+复合乳化剂+降滤失剂配方，可以解决超深井阻卡难题，在X131井应用中，钻进扭矩与摩阻较水基钻井液分别有效降低。

变密度控压技术可在不同井段采用差异化密度钻井液，并结

合实时压力进行调整，使井底压力始终处于安全窗口内<sup>[14]</sup>。例如，青海碱探1井超高温（235℃）工况下，应用抗高温有机盐聚胺水基钻井液，支撑井眼加深543m并顺利完钻，取全取准地质资料。

### （四）微流量控制与恒压排气技术

深井超深井中，高压地层气体常以微小流量侵入，需要高精度的压力传感器和流量监测设备捕捉井筒内的微小压力波动，而传统的设备难以捕捉早期信号。控压钻井技术则突破了微流量早期监测与恒压排气技术瓶颈。微流量控制技术通过高精度流量传感器，捕捉进出口流量微小差异（≤0.1m<sup>3</sup>/min），提早进行预警，为应急处理预留时间；恒压排气技术通过建立流量差与排气量的数学模型，精准调控环空回压，可以使井筒压力逐步恢复平衡，防止因为排气过快而产生压力波动。

在双鱼001-X3井3765–7623m多压力系统井段，钻至7351.6m茅口组时发生溢漏复杂，循环排气最大瞬时气量1200m<sup>3</sup>/h，通过19次恒压排气降压，将气层压力从1.98g/cm<sup>3</sup>降至1.87g/cm<sup>3</sup>，成功建立1.87–1.97g/cm<sup>3</sup>的安全密度窗口，全井漏失量仅180.9m<sup>3</sup>，较常规钻井减少82.32%，复杂处理时间降低87.14%。

### （五）智能化控压装备与一体化技术

经过多年的持续研究，国内外井筒压力控制技术装备自动化水平已经较高，在参数优化、压力控制、远程操作等方面已经引入智能方法，使得控压钻井装备进入智能化阶段，是解决深井与超深井钻井中窄密度窗口、高温高压等复杂难题的关键。

我国自主研发的PCDS系列精细控压钻井成套装备，已形成从Ⅰ型到Ⅲ型及海洋专用型号的完整产品体系，具备自动节流控制、回压补偿、实时监测与智能控制等功能，支持9种工况、4种控制模式切换及13种应急转化，压力控制精度达±0.2MPa，优于国际同类产品。例如，在塔里木油田塔中某2井，碳酸盐岩储层应用裂缝溶洞型碳酸盐岩水平井精细控压钻井技术对目的层持续点火钻进，提高了全程的钻速，平均日进尺比常规钻井提高103.7%。PCDS-Ⅱ精细控压钻井装备具备模块化施工能力，系统能够识别不同设备，使控压钻井工艺转换不受设备约束，实现了模块化设计，自动识别外部设备工况，工艺工况自动匹配。

一体化技术创新融合钻井、录井、测井全流程，构建远程–本地协同控制平台，可对现场数据实时采集、处理与调控。该技术体系在塔里木、川渝等深井超深井推广应用，可有效减少井涌、漏失等复杂情况，塔里木深部水平井延伸率提升210%，显著提升单井产能，整体达到国际先进水平，为深层油气增储上产提供技术保障。

### （六）井身结构与轨迹控制配套技术

控压钻井技术与井身结构优化、轨迹精准控制技术的协同，进一步提升了深井超深井的钻井成效。通过优化套管程序，增设备用套管层，封隔复杂层段，双鱼石构造井身结构将三开273.00mm套管下深加深，具备应对井下复杂的灵活调整能力；垂直钻井系统在高陡地层中可将井斜角控制在1°以内，为定向作业奠定基础。地质导向技术与“分段微增”剖面设计相结合，在吴家坪组采用近钻头单扶螺杆复合钻增斜，最大增斜狗腿度

2.98° /30m，在茅口组灵活调整入窗位置，实现地质工程一体化。在川西北双鱼石构造 SYX133井应用中，该配套技术与控压钻井协同，有效解决了多压力系统、难钻地层等难题，试油获得日产 $142.51 \times 10^4 \text{ m}^3$ 工业气流<sup>[8]</sup>。

### 三、控压钻井技术发展趋势展望

#### （一）智能化与自动化升级

未来控压钻井技术将在人工智能与数字技术的发展进一步智能化升级。例如，技术人员可以通过构建钻井过程数字孪生模型，并结合实时监测数据以及以往的历史案例，提前预测压力窗口，优化钻井参数。旋转导向与控压钻井技术的融合将成为重点，优化轨迹控制与压力调控，进一步提升钻井效率与安全性<sup>[9]</sup>。

#### （二）技术融合与跨领域创新

控压钻井技术将与井控技术、连续流动循环系统深度融合，建立控压钻井操作控制矩阵与动态井控压井技术结合的一体化方案，解决模拟控压钻井与井口转换边界条件、优化操作流程等关键问题。在大位移井、长水平段井中，与连续流动循环系统结合，对全过程钻井液循环控压，改善井身质量并提高排气效率<sup>[10]</sup>。此外，双梯度钻井技术、加压泥浆帽钻井技术将在深水领域加速推广，借助水下旋转防喷器可以控制井底恒压与微流量，拓展控压钻井技术的应用场景。

#### （三）极端环境适配能力强化

针对超高温（220℃以上）、超高压（150MPa以上）、高

含硫等极端环境，将进一步优化钻井液配方与设备材质。开发抗240℃以上高温的钻井液体系与水泥浆材料，提升钻井液的抗污染、抗沉降性能；研发小型化、高可靠性的井下工具与传感器，增强设备在极端环境下的抗压、抗腐蚀能力，解决万米超深井钻探的难题。同时，环保型控压钻井技术将成为重点，开发无黏土、可降解钻井液体系，降低海洋与陆地钻井对环境的影响，践行绿色能源开发理念。

#### （四）地质工程一体化深化

依托随钻前探技术与实时数据分析，实现地层压力动态校准、井下复杂早期诊断与钻具故障预警的一体化。通过增加地质参数监测维度，优化控压钻井与地质目标的适配性，提高储层钻遇率与单井产能。“十四五”期间，我国将重点攻关随钻前探、数字孪生建井等技术，推动控压钻井从工程技术向地质工程一体化技术转型，为深层油气增储上产提供技术支撑。

### 四、结论

控压钻井技术在深井超深井中的应用，体现出其在复杂底层环境中保障作业安全，提高钻井效率的优势，其可以有效解决深井超深井复杂钻探难题。从复杂压力系统适配、极端工况溢漏控制再到智能化装备的应用，控压钻井技术可以突破传统钻井的瓶颈，提升钻探效率与产能，同时降低井下风险。未来，期待控压钻井在更深、更复杂的油气资源勘探开发中发挥更大价值，更好地应对复杂地质条件和作业环境的挑战。

### 参考文献

- [1] 刘伟，付加胜，郭庆丰，等. 智能控压钻井关键技术研究进展与展望 [J]. 石油钻探技术，2024, 52(05): 42-50.
- [2] 米晓军，刘东伟，杨保健，等. 精细控压钻井技术研究及应用现状浅析 [J]. 中国石油和化工标准与质量，2024, 44(19): 186-189.
- [3] 赵治岗，倪明春，倪俊强. 油田钻井中的控压钻井设备研究 [J]. 中国设备工程，2024, (19): 89-91.
- [4] 周英操，郭庆丰，蔡晓，等. 精细控压钻井技术及装备研究进展 [J]. 钻采工艺，2024, 47(04): 94-104.
- [5] 屈宪伟. 控压钻井关键技术研究与应用 [J]. 石化技术，2024, 31(03): 193-195.
- [6] 刘宇，张峰，姬超. 精细控压钻井技术在高温高压井钻井中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量，2024, 44(02): 193-195.
- [7] 叶小科. 精细控压钻井中气体溢流识别与排气降压技术 [J]. 化工管理，2023, (19): 83-87.
- [8] 肖劲超，李洪兴，张勇，等. 川西北部超深大斜度井优快钻井技术应用 [C]// 中国石油学会天然气专业委员会. 第33届全国天然气学术年会（2023）论文集（04钻采工程）. 川庆钻探工程有限公司川西钻探公司；, 2023: 223-229.
- [9] 汪海阁，黄洪春，毕文欣，等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望 [J]. 天然气工业，2021, 41(08): 163-177.
- [10] 李照，蒋林，江迎军，等. 四川多压力系统复杂深井控压钻井技术探讨 [C]// 中国石油学会天然气专业委员会. 第32届全国天然气学术年会（2020）论文集. 川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院；欠平衡与气体钻井试验基地；, 2020: 2423-2429.