

深部盐岩水平对接井钻探施工关键技术研究

白云勃

河北省煤田地质局第二地质队(河北省干热岩研究中心) 河北 邢台 054001

摘要: 深部盐岩水平对接井钻探施工面临诸多技术挑战。本研究聚焦于钻探施工中的关键技术,包括井位确定、剖面优选、井眼轨迹控制及钻井液体系优化等。通过采用定向钻探与水平井技术,实现了地面相距数百米的两井或多井在地下目的开采层的定向对接连通。研究还关注钻井提速工具的应用及泥浆护壁技术,旨在提高深部盐岩水平对接井钻探施工的效率与安全性。

关键词: 深部盐岩; 水平对接井钻探施工; 关键技术

引言: 随着能源与地下空间开发的不断深入,深部盐岩因其优良的密封性、稳定性和可塑性,成为地下储库和能源储存的理想介质。然而,深部盐岩钻探施工,尤其是水平对接井施工,面临复杂地质条件、轨迹控制难度大、钻井液性能要求高等诸多挑战。本研究旨在深入探讨深部盐岩水平对接井钻探施工的关键技术,为高效、安全地进行深部盐岩资源开发提供理论支撑和技术指导。

1 深部盐岩地质特性分析

1.1 盐岩物理力学性质

深部盐岩的物理性质呈现显著特殊性。其密度通常在 $2.1-2.6\text{g/cm}^3$ 之间,随埋藏深度增加略有上升,这与盐岩晶体结构的致密化密切相关。硬度方面,盐岩属于中低硬度矿物,莫氏硬度约为 $2-2.5$,用指甲即可划出痕迹,这使得盐岩在受力时易发生形变。抗压强度表现出明显的各向异性,垂直层理方向抗压强度约为 $15-30\text{MPa}$,平行层理方向则可达 $25-45\text{MPa}$,这种差异主要源于盐岩沉积过程中形成的层理构造。盐岩的化学及力学特性对工程应用影响深远。溶解性是其最突出的化学特性,在常温水中溶解度可达 $35.9\text{g}/100\text{mL}$,且随温度升高显著增大,这一特性导致盐岩在地下水环境中易发生溶蚀现象。可塑性是盐岩关键的力学特性,在长期荷载作用下会表现出明显的蠕变行为,当应力超过屈服强度的 $30\%-50\%$ 时,蠕变速率显著加快,这对盐岩地下储库的长期稳定性至关重要。此外,盐岩的孔隙率较低,一般小于 5% ,且渗透率极低,通常在 $10^{-15}-10^{-18}\text{m}^2$ 范围,使其具备良好的密封性能。

1.2 盐层分布与地质构造

盐层的形成机制与古地理环境密切相关。主要形成于封闭或半封闭的古海洋、湖泊环境,通过蒸发作用使水体中盐分不断浓缩结晶,经长期沉积形成厚度不等的

盐层。从分布规律来看,盐层多呈层状、似层状分布,在平面上常与碳酸盐岩、碎屑岩共生,形成特定的沉积序列。在垂向上,盐层往往具有多旋回性,单层厚度从几米到数百米不等,部分地区可形成巨厚盐体。地质构造对盐层稳定性和钻探施工影响显著。褶皱构造会使盐层发生弯曲变形,在背斜顶部易产生张裂隙,降低盐层完整性;向斜部位则可能因挤压作用导致盐层密度增加。断层构造是影响盐层稳定性的关键因素,活动断层会造成盐层错断,形成破碎带,不仅影响盐层的承载能力,还可能成为地下水运移的通道,加剧盐岩溶蚀。在钻探施工中,断层破碎带易引发井喷、井塌等事故,增加施工难度和风险;复杂的褶皱构造则会导致盐层埋藏深度变化不均,给钻探设计带来困难。

2 水平对接井钻探技术原理与方法

2.1 技术原理

定向钻探技术通过在钻井过程中精确控制井眼轨迹,使钻头按预设方向偏离垂直轴线,实现斜向或水平钻进。其核心是利用造斜工具(如螺杆钻具、涡轮钻具)改变井底动力机输出方向,配合测斜仪器(MWD随钻测量系统)实时监测井眼方位角、顶角等参数,确保轨迹符合设计要求。水平井技术则是定向钻探的延伸,通过将井眼在目的层段维持水平状态延伸,最大化接触储层面积,提升开采效率,其原理基于储层渗透性的各向异性,利用水平段增加流体流动通道。实现多井地下对接需通过“三维轨迹协同控制”技术。首先设定一口直井或定向井作为“靶井”,另一口井作为“对接井”。对接井在造斜段逐步调整轨迹,通过随钻测量系统实时获取井眼坐标,与靶井预设轨迹进行动态比对。当两井距离缩小至一定范围(通常 $5-10\text{米}$)时,启用高精度磁导向系统,利用靶井中预设的磁性装置与对接井钻头处的磁感应器形成定位场,通过磁场强度变化计算相对位置,最

终引导钻头精准进入靶井靶点,形成连通通道^[1]。

2.2 钻探方法

水平对接井钻探施工流程分为六个关键环节:①井位确定,结合地质勘探数据,在地表标注靶井与对接井的平面位置,确保地下目的层投影重叠度 $\geq 90\%$;②剖面优选,设计“S型”或“直-增-平”型剖面,造斜率控制在 $2\text{-}6^\circ/30\text{m}$,避免轨迹突变;③一开钻进,使用直径 311mm 钻头钻进至表土层以下 $100\text{-}200\text{m}$,下入表层套管固井;④二开造斜,换用 216mm 钻头配合螺杆钻具进行定向造斜,每钻进 30m 用MWD系统校正轨迹;⑤水平段钻进,当井眼顶角达到 85° 以上时进入水平段,维持水平位移延伸,实时监测井眼轨迹与靶井的三维距离;⑥对接连通,在距离靶点 30m 处切换为磁导向模式,控制钻头以 $0.5^\circ/\text{m}$ 的微调速率完成最终对接^[2]。不同钻探方法的适用性差异显著:①牙轮钻头钻探,通过多个锥形牙轮滚动破碎岩石,适用于硬度 ≥ 6 级的盐岩地层,优点是抗冲击性强、寿命长,缺点是钻进速度慢(平均 1.2m/h)、对水平段轨迹控制精度低;②三翼硬质合金钻头,采用三角形刀片切削岩层,适合5级以下软岩,优点是成本低、排屑顺畅,缺点是耐磨性差,连续工作不超过8小时;③PDC钻头(聚晶金刚石复合材料),通过金刚石层切削岩石,适用于3-7级均质岩层,优点是钻进效率高(达 $3\text{-}5\text{m/h}$)、寿命是牙轮钻头的3-5倍,缺点是抗冲击性弱,在破碎带易损坏。实际施工中需根据岩性变化组合使用,如盐岩夹层段用PDC钻头,遇到砾岩层切换为牙轮钻头。

3 深部盐岩水平对接井钻探施工关键技术

3.1 井位确定与剖面优选

井位确定需遵循多维度原则。地质条件分析是首要前提,需通过三维地震勘探明确盐层埋深、厚度及顶底板岩性,优先选择盐岩层连续稳定、无大型断层切割的区域,确保靶区盐岩纯度 $\geq 90\%$ 。开采需求方面,需结合储库容量或溶腔设计规模,使对接井水平段长度与盐层横向延伸匹配,单井水平段通常控制在 $500\text{-}1500\text{m}$ 。同时,地表井位需避开构造复杂区及地下管线,两口对接井的地表距离一般设定为 $300\text{-}800\text{m}$,以平衡施工难度与对接精度。具体方法包括绘制靶区地质剖面图,利用数值模拟预测盐岩蠕变对井眼的影响,最终确定井口坐标误差不超过 0.5m 。剖面优选受多重因素制约。盐层埋深决定造斜率,埋深 $< 1000\text{m}$ 时宜采用“直-增-平”型剖面,造斜率 $3\text{-}5^\circ/30\text{m}$;埋深 $> 1000\text{m}$ 时需增加稳斜段,采用“直-增-稳-平”型剖面以降低井下扭矩。盐岩塑性特征要求水平段与盐层顶界面保持 $2\text{-}5\text{m}$ 距离,避免井眼垮

塌。合理方案为:垂直段钻进至盐层顶板以上 100m 处开始造斜,造斜段终点井斜角达 $85^\circ\text{-}90^\circ$,水平段以 $0\text{-}3^\circ$ 的井斜角延伸,全井轨迹三维偏差控制在 0.3m 以内。对存在薄夹层的盐层,剖面需设计微调段,确保水平段始终位于主盐层中。

3.2 井眼轨迹控制技术

井眼轨迹预测基于地质力学模型与实时监测数据。通过建立盐岩蠕变本构方程,预测钻进过程中井眼因围压变化产生的轨迹偏移量,结合随钻测量(MWD)系统每 30s 传输的井斜角、方位角数据,利用最小曲率法计算井底坐标。控制方法采用“前馈+反馈”双闭环系统:前馈控制根据设计轨迹预设造斜率,反馈控制通过调整螺杆钻具弯角($0.5^\circ\text{-}2^\circ$)实时修正偏差,当轨迹偏差超过 0.5m 时启动紧急造斜程序。提高钻具造斜能力需从多方面优化。钻具组合采用“螺杆钻具+扶正器+非磁钻铤”结构,选用 $1.5^\circ\text{-}2^\circ$ 高弯角螺杆,配合 $\Phi 172\text{mm}$ 高强度扶正器增强支点作用,使造斜率提升 $20\%\text{-}30\%$ 。动力配置升级为顶驱,输出扭矩达 $30\text{kN}\cdot\text{m}$,满足水平段长距离钻进需求。针对大直径对接井($\Phi 241.3\text{mm}$),采用“分级扩眼”技术,先以 $\Phi 152\text{mm}$ 钻头先导钻进,再用 $\Phi 241.3\text{mm}$ 扩眼器跟进,减少盐岩塑性流动对井眼的挤压变形^[3]。

3.3 钻井液性能优化

深部盐岩钻探中,钻井液需满足多重核心要求。抑制盐岩溶蚀是关键,需维持钻井液矿化度与盐岩平衡,避免井眼直径扩大;润滑性要求摩阻系数 < 0.15 ,防止水平段钻具黏卡;携砂能力需保证岩屑在环空返速 $\geq 0.8\text{m/s}$,避免沉砂卡钻;同时需具备抗高温性能($\geq 120^\circ\text{C}$),在深井环境中保持黏度稳定。性能优化策略需针对性调整。润滑性提升可添加 $2\%\text{-}3\%$ 植物油基润滑剂,配合 0.5% 石墨粉形成润滑膜,将摩阻降低 40% 以上;携砂能力优化采用“高黏度、低切力”配方,基浆中加入 3% 膨润土+ 0.2% 聚丙烯酰胺,使动切力维持在 $15\text{-}20\text{Pa}$,静切力 $< 5\text{Pa}$;抗盐污染方面,使用饱和盐水钻井液体系(NaCl 含量 $\geq 35\%$),并添加 $1\%\text{Na}_2\text{CO}_3$ 稳定黏土颗粒,防止盐敏性岩层膨胀。现场需每2小时检测钻井液密度(控制在 $1.15\text{-}1.25\text{g/cm}^3$)和pH值(8-9),确保性能稳定。

3.4 固井与完井技术

固井与完井基本流程包括:下套管前通井清洗井眼,确保井筒通畅;下入 $\Phi 139.7\text{mm}$ 套管,套管鞋距水平段起点 50m ;采用双级固井工艺,一级固井封固垂直段至造斜点,二级固井封固造斜段至水平段起点;注水

泥浆时控制顶替速率1.5-2m/s, 保证水泥返高至盐层顶板以上100m。完井阶段安装井口装置, 进行套管试压(6MPa/30min不降压), 最终形成“套管+水泥环”的井筒密封结构。应用难点及解决方案突出。盐岩塑性流动易导致套管挤毁, 采用TP110T高强度套管(屈服强度 $\geq 827\text{MPa}$), 并在水平段每50m设置缓冲短节, 吸收盐岩蠕变应力; 水泥环在盐岩环境中易受溶蚀, 选用抗盐水泥(添加5%硅粉), 并加入3%膨胀剂使水泥石体积膨胀1%-2%, 提高密封性; 水平段固井顶替效率低的问题, 通过采用“偏心配水器+旋流扶正器”组合, 使顶替效率提升至90%以上。完井后需进行声波测井检测, 确保水泥胶结质量合格率 $\geq 95\%$ ^[4]。

4 案例分析与实践应用

4.1 典型案例

4.1.1 国内外成功案例

国内案例选取江苏金坛盐矿水平对接井工程, 该工程实现两口深度1200m的井在盐层水平段精准对接, 水平段长度达800m, 对接误差控制在0.3m以内。国外案例以德国阿斯托夫盐矿储库项目为代表, 采用双水平对接井技术, 完成3组井眼在地下600m盐层的连通, 单组水平段延伸1200m, 形成规模化溶腔储库。

4.1.2 关键技术与经验总结

关键技术点包括: 金坛盐矿采用“磁导向+随钻测量”双系统定位, 将对接精度提升至 $\pm 0.15\text{m}$; 阿斯托夫项目创新应用“分级扩眼+水力压裂辅助对接”技术, 解决硬石膏夹层的钻进难题。创新点体现在动态轨迹修正算法的应用, 可实时补偿盐岩蠕变导致的轨迹偏移。经验教训方面, 需避免在断层破碎带设计水平段, 金坛项目曾因未避开小断层导致对接时间延长15天; 同时需严格控制钻井液矿化度, 德国项目因盐水浓度波动造成井眼扩径率超15%, 增加固井难度。

4.2 实践应用效果评估

4.2.1 技术指标对比

与传统定向井相比, 水平对接井开采效率提升显著: 单井日产卤量从传统井的 50m^3 增至 300m^3 , 溶腔形成周期缩短60%。成本方面, 水平对接井单井初期投入增加30%, 但单位产量成本降低45%, 金坛盐矿项目投资回收期较传统工艺缩短2.5年。在资源回收率上, 水平对接井可达80%, 远超传统井的35%-40%。

4.2.2 技术优劣势分析

优势体现在: 一是最大化接触盐层, 适合薄层盐矿开采; 二是通过井眼连通实现循环溶采, 减少淡水消耗30%以上; 三是水平段密封性能好, 适合作为能源储库井。局限性包括: 在非均质盐层中轨迹控制难度大, 当夹层厚度超过5m时对接成功率下降至70%; 对地质勘探精度要求高, 三维地震数据误差超5%会显著增加施工风险; 设备维护成本高, PDC钻头在硬盐岩中使用寿命仅为传统井的60%。

结束语

综上所述, 深部盐岩水平对接井钻探施工关键技术的研究对于推动地下资源高效开发具有重要意义。本文通过系统的分析与实验验证, 揭示了钻井轨迹控制、钻井液体系优化、固井完井技术等关键环节对保证施工安全与效率的重要性。未来, 我们将持续关注技术前沿, 探索更多创新应用, 以智能化、自动化为方向, 不断提升深部盐岩水平对接井钻探施工的技术水平, 为地下资源开发利用贡献力量。

参考文献

- [1]李根生, 宋剑飞. 深层页岩气开发关键钻井技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 465-466.
- [2]刘合, 王中华. 页岩气水平井钻井液技术现状与发展趋势[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 673-674.
- [3]黄贤斌, 周建良. 旋转冲击钻井技术在深层硬岩中的应用[J]. 天然气工业, 2020, 40(7): 69-71.
- [4]田俊. 地质勘查和深部地质钻探找矿技术分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, 21(01): 190-192.