

响公路的正常使用和交通安全。断层破碎带往往是边坡的薄弱部位,破碎带内岩土体的抗剪强度低,容易引发边坡失稳。在断层附近进行边坡开挖时,需要加强支护措施,防止边坡滑动。节理的存在为边坡岩体的滑动提供了潜在的滑动面,尤其是当节理面与边坡坡面平行或夹角较小时,边坡稳定性降低。通过对节理的调查和分析,可评估边坡的稳定性,制定合理的边坡防护方案。

### 3.3 对地下工程的影响

在地下工程如隧道、地铁等建设中,地质构造对工程的影响尤为显著。褶皱构造会使隧道穿越不同岩性的地层,增加施工难度和风险。在褶皱核部,岩石破碎,可能导致隧道坍塌;在褶皱翼部,若岩层倾角较大,可能引起隧道衬砌的偏压问题。断层破碎带是地下工程建设的难点,破碎带内岩石破碎、地下水丰富,容易发生涌水、突泥等灾害,威胁施工人员的生命安全,增加工程成本。例如,某隧道在穿越断层破碎带时,发生了大规模的涌水事故,导致隧道施工中中断数月,经济损失巨大。节理的发育会增加地下工程的渗漏风险,影响工程的防水效果。在地下工程设计和施工中,需要考虑节理对岩体渗透性的影响,采取有效的防水措施。

### 3.4 对地震工程的影响

地质构造与地震活动密切相关,对地震工程具有重要影响。活动断层是地震的主要发震构造,在活动断层附近进行工程建设,地震时可能遭受强烈的地面震动和断层错动,对建筑物造成严重破坏。因此,在工程选址时,应尽量避免活动断层。褶皱构造和节理构造会影响地震波的传播和场地土的动力特性。在褶皱区域,地震波传播过程中会发生反射、折射等现象,导致地面震动的不均匀性增加;节理的发育会使场地土的剪切波速降低,增加地震时场地土的液化可能性。在地震工程设计中,需要考虑地质构造对地震动参数的影响,合理确定抗震设防标准。

## 4 基于地质构造识别的工程建设应对策略

### 4.1 工程选址优化

在工程选址阶段,充分利用地质构造识别成果,尽量避开地质构造复杂区域。对于大型工程应进行详细的区域地质调查和地质构造分析,选择地质条件相对稳定、地质构造简单的场地。例如,在核电站选址时,要远离活动断层、褶皱核部等地质构造复杂区域,确保核电站在运行过程中的安全。

### 4.2 地基处理措施

根据地质构造对地基稳定性的影响,采取相应的地基处理措施。在褶皱核部或断层破碎带等岩土体强度低、稳定性差的区域,可采用桩基础、深层搅拌法、灌浆法等地基处理方法,提高地基的承载能力和稳定性。对于位于断层破碎带的建筑物地基,可采用灌注桩基础,将桩端嵌入稳定的基岩中,以承受建筑物的荷载。

### 4.3 边坡防护与加固

针对地质构造对边坡稳定性的影响,制定合理的边坡防护与加固方案。在褶皱翼部、断层附近等容易发生边坡失稳的区域,可采用挡土墙、抗滑桩、锚索等加固措施,增强边坡的抗滑能力。比如说在山区公路边坡治理中,对于岩层倾向与边坡倾向一致的边坡,可采用抗滑桩结合挡土墙的支护形式,防止边坡滑动。

### 4.4 地下工程设计与施工优化

在地下工程设计与施工中,充分考虑地质构造的影响,优化设计方案和施工工艺。在隧道设计中,根据穿越的地质构造情况,合理确定隧道的位置、走向和支护形式。对于穿越褶皱构造的隧道,应尽量使隧道轴线与褶皱轴垂直,减少穿越不同岩性地层的长度;对于穿越断层破碎带的隧道,应加强支护设计,采用超前支护、钢支撑等措施,防止隧道坍塌和涌水。在施工过程中,加强地质超前预报,及时掌握前方地质构造变化情况,根据实际情况调整施工工艺和支护参数,确保施工安全。

### 4.5 地震设防与减灾措施

基于地质构造对地震工程的影响,加强工程的地震设防与减灾措施。在地震多发地区的高层建筑设计中,采用框架-剪力墙结构等抗震性能优良的结构体系,增强建筑物的抗震能力。同时,加强对场地土的动力特性分析,根据地质构造情况合理选择建筑场地,避免在地震效应显著的地质构造区域建设重要工程。此外,制定地震应急预案,加强地震监测和预警,提高工程的地震应急响应能力。

## 结束语

岩土工程勘察中的地质构造识别是保障工程建设安全与稳定的重要环节。通过多种方法能够准确识别褶皱构造、断层构造、节理构造等常见地质构造类型及其特征。基于地质构造识别成果,有效降低地质构造对工程建设的不利影响,确保工程建设的顺利进行和长期稳定运行。

## 参考文献

- [1]王复星.浅析地震勘探工程施工项目安全风险识别[J].居业,2024,(04):159-161.
- [2]栗全庆,刘红霞.从点云数据中直接识别实体特征的方法研究[J].机械设计,2016,33(04):89-94.
- [3]杨少文,吴霞,巨新昌,等.地质雷达在公路隧道施工风险识别与防控中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(11):148-149.
- [4]练玲玲,王钦东.识别结构弱面解决采掘工程技术难题的研究[J].能源技术与管理,2014,39(01):19-20.
- [5]陈庆发,曾颢.区域井巷工程结构面连通性识别方法[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(11):4631-4636.
- [6]谭衢霖,魏庆朝,杨松林,等.铁路工程地质遥感雷达图像应用分析[J].铁道工程学报,2009,(01):17-22.

# 文 23 储气库水平井钻完井关键技术

丁晓蕾

中原石油工程有限公司钻井工程技术研究院

DOI: 10.12238/jpm.v6i7.8237

**[摘要]** 文 23 储气库是我国中东部地区最大储气库。面对文 23 区块复杂的地质结构, 通过优化井身结构设计、井眼轨迹控制技术、超低压储层防漏及保护技术、盐膏层固井技术等, 形成了文 23 储气库水平井钻完井关键技术。这些技术在现场应用后, 显著提高了固井质量, 保障了储气库工程建设的顺利施工, 形成了一套完整的储气库水平井配套综合技术, 全面提高了储气库钻井速度, 满足了储气库建设的需要, 为枯竭性油气藏储气库建设提供了宝贵经验。

**[关键词]** 文 23 储气库; 盐膏层; 储层保护; 固井

## The Horizontal Well Engineering Techniques of the Wen 23 Gas Storage

Ding xiaolei

Drilling Engineering Institute of Zhong yuan Oilfield Service Corporation

**[Abstract]** The Wen23 Gas Storage Reservoir, China's largest in the central and eastern regions, required advanced horizontal drilling technology for depleted gas reservoirs due to its complex geological structure. Facing challenges in gas storage horizontal well construction, key technologies were developed by optimizing the well structure design, well trajectory control, ultra-low - pressure reservoir leakage prevention and protection, and salt - gypsum formation cementing. On site application of these technologies remarkably enhanced cementing quality, ensuring smooth project construction. These efforts formed a comprehensive set of gas storage horizontal well supporting technologies, boosting drilling speed and meeting construction needs, and provided valuable experience for depleted reservoir construction.

**[Key words]** Wen 23 gas storage; salt-gypsum formation; reservoir protection; cementing

### 前言

地下储气库是天然气产业中上下游不可分割的组成部分, 随着中国天然气工业的快速发展, 对地下储气库要求越来越迫切。文 23 储气库是中原地区利用枯竭型油气藏建立起来的储气库, 库容量大, 调峰能力强, 为不造成设备及资源闲置, 分两期建设。一期建设满足华北地区目前调峰气量, 井位部署在高-中产能区, 二期建设井位主要部署在中-低产能区。一期工程新钻井井型主要为直井、小斜度定向井, 二期井型进行了优化, 结合构造及储层展布特点, 利用水平井配合直井定向井建设该储气库。在文 23-5 区块部署水平井, 该区块为低产区气层少, 水平井部署在厚度最大的小层, 控制最大库容, 库容损失较少, 并且增产倍数达 2.5~3.6 倍, 大幅度提高低产区气井单井产能, 提高储气库综合经济效益。

在储气库钻完井实施过程中, 通过对水平井钻井技术进行整合和创新, 解决了诸多技术难题。使水平井在储气库建设中得到成功应用。笔者对文 23 储气库建设中水平井相关技术研究应用情况进行了总结, 形成了较完善的枯竭油气藏型储气库建设工程技术链, 可以为类似储气库建设提供技术保障和示范, 保障国家能源战略的实施。

### 1 文 23 储气库区块地质特征

中原文 23 储气库位于中原油田东濮凹陷中央隆起带北部,

是新疆煤制气外输管道工程项目的重点配套工程之一, 储层位于下第三系沙河街组沙四段, 埋藏深度 2760~3120m, 为具有块状特征的层状砂岩干气藏, 原始地层压力系数 1.25~1.35, 储层孔隙度为 8.8%~13.86%, 渗透率为 0.27~17.1md, 地温梯度 3.05℃/100m。

文 23 储气库建成前, 文 23 气田经过三十多年的开发, 气田处于枯竭状态, 地下状况发生了较大改变。地层压力系数分布紊乱, 储层亏空严重, 易发生井漏等问题, 造成钻井施工困难。

### 2 文 23 储气库水平井钻井难点

1) 地层压力系数分布紊乱, 钻井施工难度大

由于该区块开采时间较长, 地层压力系数分布紊乱, 为储气库安全钻井施工带来了极大的挑战。储层沙四段上部为低产层, 地层压力系数 0.4~1.2 (部分小块未开采, 地层孔隙压力为原始压力系数); 沙四上中部为主力产层, 地层压力系数最低仅为 0.1~0.3; 下部物性差, 地层压力系数 0.3~1.2, 储层段地层压力系数从上到下大致呈高-低-高的趋势。

2) 水平井安全钻井风险高

水平井井眼轨迹靶前距长井斜大、水平段长, 储层压力系数低易漏失, 为安全高效钻井带来风险;

3) 主力气层压力系数低, 易发生井漏, 储层保护困难

主力储层压力系数极低，使用常规钻井液钻进存在较大压差，易导致钻井液侵入地层，造成储层污染。特别是压差过大发生井漏时，大量钻井液的侵入会导致严重的储层损害。

4) 储气库盖层盐膏层段长，低承压地层固井难度大  
水平井钻遇沙三、沙四上地层，顶部发育巨厚文 23 盐膏层，厚达 900m (斜深)，由于储气库周期性开采特性，要求各层套管固井水泥浆返至地面，必须解决封固段长与地层压力系数低之间的矛盾。

### 3 文 23 储气库水平井钻井技术

#### 3.1 储气库水平井井身结构设计

储气库注采井满足季节调峰和应急供气的功能，需要满足大流量注采及长寿命、高安全的要求，应尽量采用较大尺寸的井身结构。对于文 23 块枯竭型油气藏应采用储层专打。

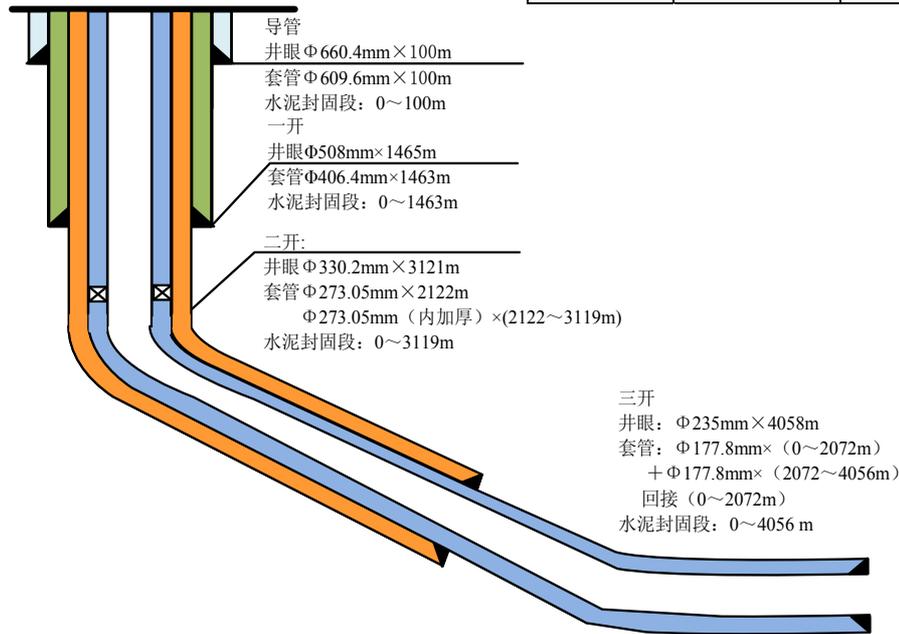


图 1 水平井井身结构示意图

#### 3.2 储气库水平井轨迹控制技术

根据水平井井位部署及井场实际情况，水平井井眼轨迹靶前距约 970m，水平段约 600m，充分利用单弯螺杆自然造斜能力，二开造斜率优化为 1.5°/30m，提高复合钻进比例，提高机械钻速。三开着陆前造斜率优化为 2.1°/30m，更利于着陆入靶。保证目的层钻遇率，实现了水平段井眼轨迹的有效控制。

#### 3.3 超低压储层防漏及保护技术

##### 3.3.1 储层防漏及随钻封堵

结合文 23 气田低压储层的特点，研制了微泡钻井液，具有良好的防漏性能和封堵效果。在施工过程中，加强微泡钻井液密度控制，尽可能降低钻井液密度，减少漏失风险。同时，通过地层岩性分析和室内堵漏材料试验，摸索出一套针对该储气库的随钻堵漏配方。在钻进过程中及时调整钻井液性能和密度，加入生物可降解堵漏材料，防止钻井液漏失，提高钻井过程安全。

##### 3.3.2 超低压储层保护

文 23 气田属中-低渗透层，储层伤害以钻井液滤液引起的

液相伤害为主。常年开采可能导致气层骨架应力及渗流通道孔径发生变化，储层接触钻井液 10 天以上，滤液侵入地层深度约近 1m 左右，容易引起较为严重的固相污染和液相水锁。储层岩性以紫红色细粉砂岩、泥质粉砂岩为主，含有泥质等敏感性矿物，钻井液滤液与地层矿物及高矿化度地层水不配伍，会导致气层发生敏感性伤害。为保护储层，优化了架桥暂堵剂的材料构成，优选油气层可变形封堵剂和自降解储层保护材料，整个三开井段实施了储层保护作业。可变形封堵剂通过变形挤入储层孔隙；对于已经进入储层的钻井液液相，应提高液相的抑制性，防止储层敏感矿物引起的敏感性伤害；应用抗水锁剂，既可提高钻井液的抑制性，又可降低滤液的表面活性，有利于液相在地层中的扩散及稳定敏感矿物，降低储层水锁伤害。

表 1 水平井井身结构设计表

| 井眼尺寸 (mm) | 井段 (m)           | 套管尺寸 (mm)              | 水泥返深 (m) |
|-----------|------------------|------------------------|----------|
| 660.4     | 0~100            | 609.6                  | 地面       |
| 508       | 馆陶组以下 50m        | 406.4                  | 地面       |
| 330.2     | 文 23 盐底界以下垂深 10m | 273.05<br>273.05 (内加厚) | 地面       |
| 235       | 完钻井深             | 177.8                  | 地面       |

根据文 23 区块地质资料、已完钻井资料，确定以下必封点，一是馆陶组及上部地层易漏失、垮塌，要对馆陶组地层进行封隔，二是考虑目的层压力亏空严重，需对目的层进行储层保护，要对目的层上部泥岩进行封隔，综合考虑确定了文 23 储气库水平井采用表 1 中井身结构。

液相伤害为主。常年开采可能导致气层骨架应力及渗流通道孔径发生变化，储层接触钻井液 10 天以上，滤液侵入地层深度约近 1m 左右，容易引起较为严重的固相污染和液相水锁。储层岩性以紫红色细粉砂岩、泥质粉砂岩为主，含有泥质等敏感性矿物，钻井液滤液与地层矿物及高矿化度地层水不配伍，会导致气层发生敏感性伤害。为保护储层，优化了架桥暂堵剂的材料构成，优选油气层可变形封堵剂和自降解储层保护材料，整个三开井段实施了储层保护作业。可变形封堵剂通过变形挤入储层孔隙；对于已经进入储层的钻井液液相，应提高液相的抑制性，防止储层敏感矿物引起的敏感性伤害；应用抗水锁剂，既可提高钻井液的抑制性，又可降低滤液的表面活性，有利于液相在地层中的扩散及稳定敏感矿物，降低储层水锁伤害。

#### 3.4 储气库水平井固井技术

##### 3.4.1 水平井套管柱设计

文 23 地下储气库主要承担华北、华东地区 and 新疆煤制气外输管道沿线中东部地区季节调峰、应急供气任务，同时负责附近天然气管道目标市场，为满足大流量注采的要求，储气库

井的井眼尺寸比常规开发井大一级,生产套管直径多为177.8mm,生产套管是注采天然气通道,要有承受交变压力和温度的能力,且要求使用寿命长,对强度、密封性、耐腐蚀性有更高的要求。同时考虑气源的多样化,按照一类气标准设计,材质依据西安管材研究所提供实验数据,悬挂器至井底选用钢级P110-S13Cr抗腐蚀套管,以上选用钢级P110的套管。导管封堵地表浅水层,表层套管封堵馆陶组及以上地层,技术套管封堵目的层以上泥岩等复杂地层,采用储层专打的方式,技术套管和生产套管采用气密封扣,对管柱的材质要求高。

### 3.4.2 盐膏层(盖层)固井技术

1)文23储气库的地质情况复杂,固井难度大、固井质量不理想。文23储气库沙三段地层发育盐膏层,垂厚200~700m不等,是储气库的主要盖层。二开套管固井一次封固段长,固井时易发生漏失;钻遇文23盐,水泥浆游离液易溶解盐层,对水泥浆产生污染,影响界面胶结质量,水泥环的长期封固质量影响到储气库的寿命,其力学性能及后期防窜性能需着重考虑。针对盐膏层固井井眼不规则和水泥环胶结质量差的特点,

表2 承压堵漏技术在文23储气库施工情况

| 井号        | 泵注堵漏浆体积/m <sup>3</sup> | 承压堵漏效果           |
|-----------|------------------------|------------------|
| 文23储11-4井 | 21                     | 提高地层承压能力至9.2 MPa |
| 文23储8-2井  | 30                     | 提高地层承压能力至9.1 MPa |
| 文23储6-4井  | 28                     | 提高地层承压能力至9.1 MPa |

## 4 现场应用效果

文23储12-平1井是文23区块首口储气库注采水平井,由于本井是中原区域首口储气库水平井,无相同井资料和成熟经验可参考,钻井与固井难度远超预期。针对该井裸眼段长、多井段易漏失、井壁稳定性差、巨厚盐膏层等诸多难题进行技术攻关,与2023年3月顺利完井。该井完钻井深3900m,井底水平位移1400.51m,固井质量优良,并刷新中原区块273.1毫米套管固井井斜最大(66°)和井深最深(3180m)两项纪录,获得甲方表扬。

## 5 结论

1)文23储气库水平井通过优化井身结构,选用耐腐蚀、高强度的套管,同时根据文23盐膏层的组分特征,采用新型抗盐弹韧性水泥浆体系、四级高效冲洗隔离防漏及固井前地层技术,提高完井井筒的完整性,保障储气库水平井的使用寿命。

2)文23储气库为枯竭型油气藏,地层亏空严重,在钻井过程中优化钻井液,加入随钻堵漏剂提高地层承压能力,防止井漏,可以降低钻井事故提高钻井速度。整个三开井段实施了储层保护作业,有效减少对气层的污染和伤害。

3)文23储12-平1井的经验为后期钻进和储气库建设提供了有力的技术支撑,形成了一套比较完整的储气库水平井配套综合技术,全面提高了储气库钻井速度,满足了储气库建设的需要。该水平井钻井技术为枯竭性油气藏储气库建设提供了宝贵的经验。

### [参考文献]

[1]金根泰,李国韬.油气藏地下储气库钻采工艺技术[M].北京:石油工业出版社,2015:25-32.

JIN Gentai, LI Guotao. Drilling and production technology of underground gas storage in oil and gas reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015: 25-32.

[2]袁光杰,夏焱,金根泰,等.国内外地下储库现状及工

程技术发展趋势[J].石油钻探技术,2017,45(4):8-14.

### 3.4.3 固井前地层承压

由于文23储气库运行周期达30年以上且长期处于注采引起的交变应力和H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>腐蚀双重作用下,对固井质量要求极高。因此,需要在固井前进行地层承压(地层承压一般要求达到7~9MPa),防止固井过程中发生井漏,污染储层,影响固井质量。由于微泡钻井液和配套的储层保护剂良好的储层封堵效果,66口施工井中有近50口井地层承压可以满足要求。对于不能满足要求的施工井,必须进行承压堵漏。利用高酸溶率凝胶聚合物NFJ-III、高酸溶率骨架材料及填充材料复配形成了适用于储层的承压堵漏剂配方,该技术在文23储气库应用3口井。下表是承压堵漏技术在文23储气库施工情况。从表中可以看出,提高地层承压能力至9MPa以上,保证了后期固井施工顺利进行。

程技术发展趋势[J].石油钻探技术,2017,45(4):8-14.

YUAN Guangjie, XIA Yan, JIN Gentai, et al. Present state of underground storage and development trends in engineering technologies at home and abroad[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4): 8-14.

[3]赵金洲.文23地下储气库关键工程技术[J].石油钻探技术,2019,47(3):18-24.

ZHAO Jinzhou. The key engineering techniques of the Wen 23 underground gas storage[J]. Petroleum Drilling Technology, 2019, 47(3): 18-24.

[4]袁光杰,张弘,金根泰,等.我国地下储气库钻井完井技术现状与发展建议[J].石油钻探技术,2020,48(3):1-7.

YUAN Guangjie, ZHANG Hong, JIN Gentai, et al. Current status and development suggestions of drilling and completion technology for underground gas storage in China [J]. Petroleum Drilling Technology, 2020, 48(3): 1-7.

[5]马小明,余贝贝,马东博,等.砂岩枯竭型气藏改建地下储气库方案设计配套技术[J].天然气工业,2010,30(8):67-71.

MA Xiaoming, YU Beibei, MA Dongbo, et al. Project design and matching technologies for underground gas storage based on a depleted sandstone gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(8): 67-71.

[6]苏月琦,李琦,田艳红等.东濮凹陷文23气田沙四段储层沉积相特征[J].断块油气田,2010,17(6):726-728.

Su Yueqi, Li Qi, Tian Yanhong, et al. Characteristics of sedimentary facies in the fourth member of Shahejie Formation in Wen 23 Gas Field, Dongpu Depression[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(6): 726-728.