

苏东区域煤气同采钻井轨迹控制技术 研究



杨碧学^{1,*}, 宁金生¹, 黄旭平¹, 王方炯²

¹ 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西西安 710065

² 西安石油大学油气田化学陕西省高校工程研究中心, 陕西西安 710016

摘要: 本文主要结合该区域煤矿分布, 通过对苏东区块地质分层、井身结构、轨迹优化设计、摩阻扭矩等进行分析优化, 实现最大位移, 探寻不同天然气开发模式下, 气、煤资源利用的最优解(位移、水平段长)。基于煤、气协同共采理念优化不同井型(直/定井、水平井)的钻井造斜点、井身轨迹等参数, 实现最优位移、水平段长。定向井井组施工井口数大于 3 口时, 进行“鱼刺”状预分, 主动分离, 给后续施工井预留轨迹防碰空间。直井段轨迹走势若持续向井架大门方向($\pm 30^\circ$ 范围内), 应及时采取有效纠斜措施, 以免给后续井的防碰施工造成困难。井组安排应考虑道路和优化井眼轨迹的需要, 考虑靶前位移对施工的影响, 定向井井组最大可实现 1300 米位移。总体设计时, 应对各井排列施工顺序, 建议先施工水平位移大、造斜点浅的井, 并设计为后大门方向, 设计前大门方向钻水平位移小, 造斜点深的井和直井。水平井预留煤柱中井作为井口, 考虑偏移距、防碰绕障, 模拟最大水平位移, 同一井场可布置: 偏移距小于 500, 水平段 900 米以内的三维水平井四口, 水平段 1200 米以内的二维水平井两口。

关键词: 煤气同采; 保安煤柱; 最大位移; 最长水平段

DOI: 10.57237/j.cse.2023.03.003

Research on the Control Technology of Drill-ing Trajectory for Gas Co-production in Su-dong

Yang Bixue^{1,*}, Ning Jinsheng¹, Huang Xuping¹, Wang Fangjiong²

¹ CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. Changqing Drilling Corporation, Xi'an 710065, China

² Shaanxi University Engineering Research Center of Oil and Gas Field Chemistry, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710016, China

Abstract: Based on the distribution of coal mines in the region; this paper analyzes and optimizes the geological stratification; well bore structure; trajectory optimization design; friction torque; etc. of the Sudong block to achieve the maximum displacement and explore the optimal solution (displacement; horizontal section length) of gas and coal resources utilization under different natural gas development modes. Based on the concept of co-production of coal and gas; the parameters such as drilling deflection point and well trajectory of different well types (vertical/fixed well; horizontal well) are optimized to achieve the optimal displacement and horizontal section length. When the number of construction wells in the directional well group is more than 3; the "fishbone" pre-section shall be carried out; and the

*通信作者: 杨碧学, 475826191@qq.com, 296109305@qq.com

收稿日期: 2023-06-20; 接受日期: 2023-08-14; 在线出版日期: 2023-08-29

<http://www.chemscieng.com>

active separation shall be carried out to reserve the trajectory anti-collision space for the subsequent construction wells. If the track trend of the vertical well section continues to the direction of the derrick gate (within $\pm 30^\circ$); effective corrective measures shall be taken in time to avoid causing difficulties to the anti-collision construction of the subsequent wells. The arrangement of well groups should take into account the needs of roads and optimization of well trajectory; and the impact of displacement in front of target on construction. The maximum displacement of directional well groups can be 1300 meters. During the overall design; the construction sequence of each well should be arranged. It is recommended to construct the well with large horizontal displacement and shallow deflection point first; and design the direction of the rear gate. The design direction of the front gate is to drill the well and vertical well with small horizontal displacement and deep deflection point. The middle well of the reserved coal pillar of the horizontal well is used as the wellhead. Considering the offset distance; collision avoidance and obstacle avoidance; the maximum horizontal displacement can be simulated. The same well pad can be arranged with four three-dimensional horizontal wells with an offset distance of less than 500 and a horizontal section of less than 900 meters; and two two-dimensional horizontal wells with a horizontal section of less than 1200 meters.

Keywords: Gas co-mining; Safety Coal Pillar; Maximum Displacement; Longest Horizontal Section

1 背景与思路

新街台格庙矿区位于鄂尔多斯境内，是国务院批准的国家级重点项目，也是晋陕蒙煤炭核心区唯一尚未开发的大型整装煤田[1]。为推动煤矿项目有序开发，确保煤炭资源稳定供应，促进煤炭资源开发与生态环境保护相协调，新街台格庙矿区总体规划重新修编。修编后的规划对矿区规划面积、开采布置等在环境影响评价报告的基础上均进行了科学调整。一是扣减掉禁采区查干淖水源地 119.74 平方公里、禁采区资源储量 19.74 亿吨，矿区规划面积和资源储量分别调整为 681.03 平方公里和 123 亿吨；二是调整后矿区划分从 5 个井田 1 个后备区、总规模 6200 万吨调整为 8 个井田和 1 个后备区、总规模 5600 万吨。三是调整后释放了

煤炭先进产能，单井规模 800 万吨，减轻了矿井冲击地压、水害等问题[2]。四是调整后煤矿按照一个矿区一个开发主体模式建设，实现了矿区内基础设施集约、高效、共享。新街台格庙矿区气、煤资源重叠形势严峻，结合该区域煤矿分布，通过对苏东区块地质分层、井身结构、轨迹优化设计、摩阻扭矩等进行分析优化[3, 4]，实现最大位移，探寻不同天然气开发模式下，气、煤资源利用的最优解（位移、水平段长），如图 1 所示。针对区域地层特征及钻探实践，利用 Navigator 软件，按目前主流 40、50 型钻机能力，系统模拟不同井身结构水平井（优化三开、常规），不同井眼尺寸定向井（8'1/2、6'1/2）下，最大水平段长和最大位移[5]，如图 2。

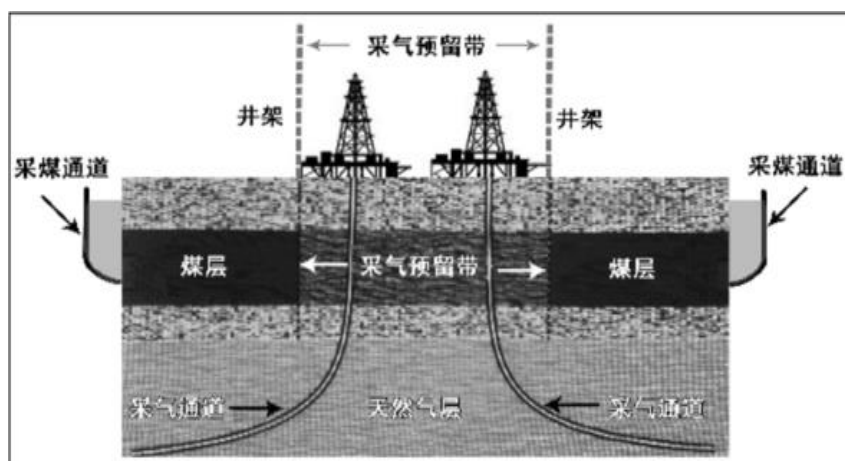


图 1 台格庙矿区气煤资源重叠形势

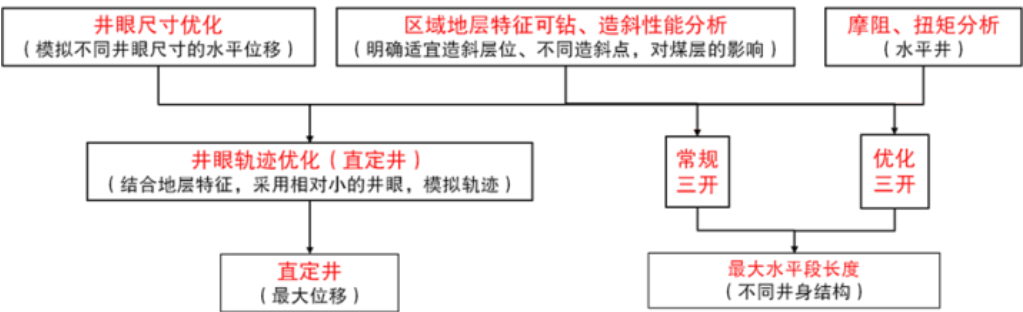


图 2 气煤重叠区井身轨迹优化参数研究思路

2 矿区构造及井场设置

2.1 地层构造特征

鄂尔多斯盆地西北部, 构造上属伊陕斜坡二级构造单元, 总体表现为西倾的平缓单斜[6]。表层覆盖第四系黄色流沙, 白垩系、侏罗系、三叠系和二叠系地层以砂

泥岩互层为主, 延安组富含多套煤层。刘家沟组块状砾岩, 中粗砂砾岩发育, 与石千峰组交界处裂缝发育, 施工中井漏频发, 局部失返性漏失; 石千峰与石盒子发育的厚层棕红色泥岩易造成钻头泥包。目的层二叠系盒 8、山 1, 盒 3-盒 7、山 2、太原、本溪局部发育, 如表 1。

表 1 苏东区域地质分层数据

层位				设计分层 m		岩性简述	复杂情况提示
系	统	组	亚段	底界垂深	垂厚		
第四系						黄色流沙、粘土夹砾石层	防塌、防漏
白垩系	下统			486		粉红色砂岩夹泥质条带	防斜、防出水
侏罗系	中统	安定组		598	112	泥灰岩、紫红色泥岩、灰黄色细砂岩	防塌、防卡
		直罗组		758	160	灰绿、紫红色泥岩与浅灰色砂岩互层, 上部以泥岩为主, 底部为砂砾岩	防塌、防斜、防出水
	下统	延安组		1011	253	深灰、灰黑色泥岩与灰色砂岩互层夹多层煤, 底部杂色泥岩夹灰白色中粗砂岩	防塌、防斜、防卡、防喷
三叠系	上统	延长组		1444	433	上部泥岩夹粉细砂岩, 中部以厚层块状砂岩为主夹砂质泥岩、炭质泥岩, 下部长石砂岩夹紫色泥岩	防塌、防斜、防卡、防喷
	中统	纸坊组		1759	315	上部棕紫色泥岩夹砂岩, 下部灰绿色砂岩、砂砾岩	防塌、防斜
	下统	和尚沟组		1884	125	棕红色泥岩夹灰色砂岩	防漏、防斜
		刘家沟组		2184	300	灰绿色砂岩夹棕褐、浅棕色泥岩	防漏
二叠系	上统	石千峰组		2449	265	上部棕红色泥岩夹肉红色砂岩, 下部肉红色砂岩夹棕红色泥岩	防塌、防斜
	中统	石盒子组		2725	276	上部以杂色、灰色泥岩夹灰绿色砂岩为主, 下部为灰白色砂岩夹深灰色泥岩	防喷、防漏、防硫化氢
	下统	山西组		2807	82	深灰色泥岩与灰白色砂岩互层, 夹煤线及煤层	
		太原组		2829	22	深灰色灰岩、泥岩、煤	
石炭系	上统	本溪组		2857	28	煤, 深灰色泥岩	

为实现最大位移目标, 通过分析岩层特性, 选择可钻性较好, 不易产生漏失、泥包的上部地层造斜, 实现允许井斜范围内最大位移或水平段最大延伸长度。

2.2 井场设置与煤矿开采层位移确定

由于该区域煤矿埋藏开采深度在 835~976 米之间, 在采矿区采煤通道上方不能承压, 为确保煤气同采, 在采区上方垂直于采煤通道留设保安煤柱, 用于地面设备、道路建设个钻井布井[7]。根据煤层埋藏深度和地面建设需要, 保安煤柱预留宽度为 300 米, 如图 3。

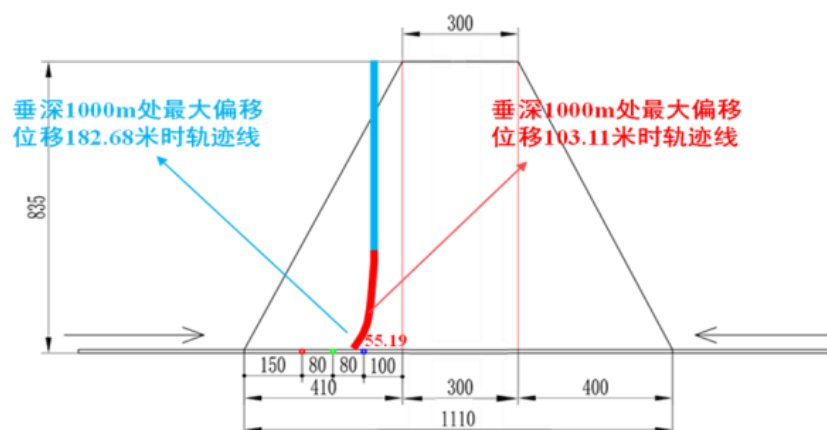


图3 井场设置与煤矿开采层位移

在定向井标准全角变化率范围内,模拟表层施工500m、550m造斜至1000m时的理论最大偏移位移为182.68米,目前钻井偏移位移基本在120m以下,在保安煤柱300米安全范围内,如表2。

表2 模拟表层施工1000m处位移数据

造斜点	最大井斜	1000米处位移
550	40	182.68
600	40	143.04
650	40	118.69
700	35	90.89
750	30	66.93
800	25	45.35
850	15	22.43

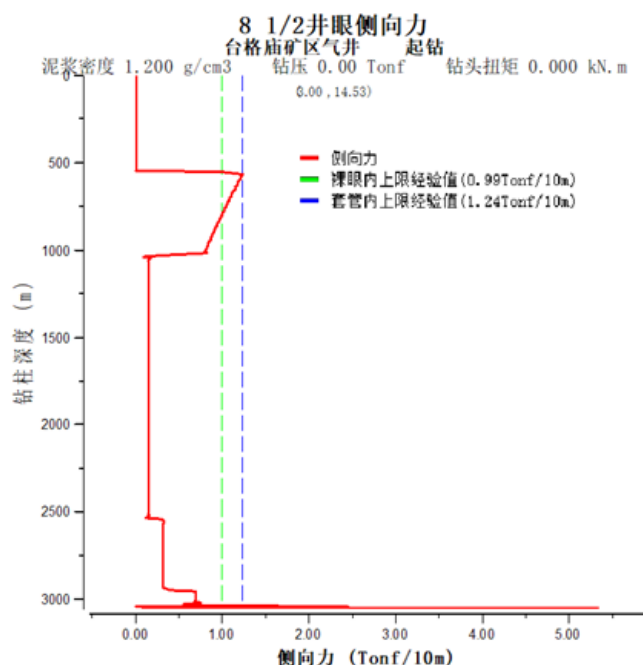


图4 8 1/2 井眼测向力图

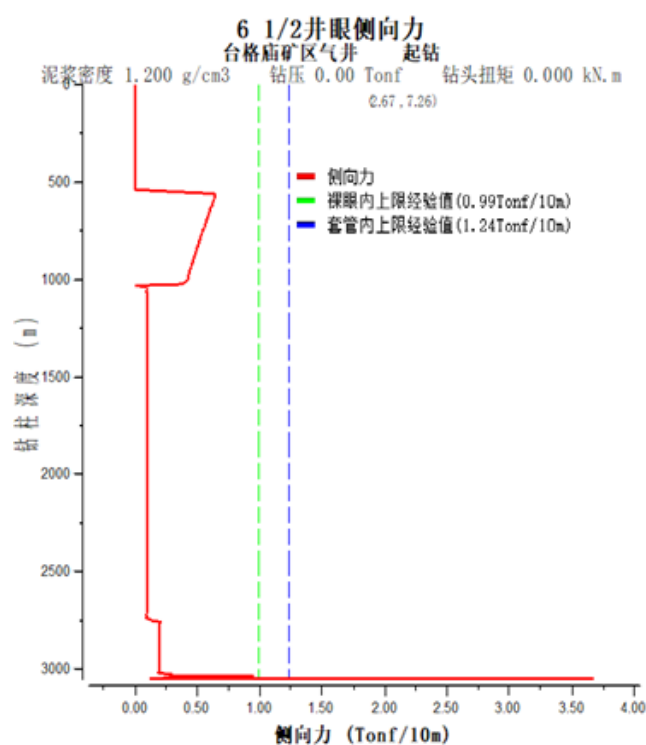


图5 6 1/2 井眼测向力图

3 定向井井身轨迹多因素优化、模拟评价轨迹参数

3.1 定向井采用相对较小的井眼尺寸,有利于增大水平位移

如图4,5所示,软件模拟下,在其他因素不变的情况下,起钻工况6 1/2“井眼在井深563米处侧向力0.65,小于裸眼内上限经验值0.99Tonf/10m,8 1/2”井眼在井深566米处,侧向力达到1.23Tonf/10m,超

过裸眼内上限经验值 0.99Tonf/10m，接近套管内上限经验值 1.24Tonf/10m，该处井眼易形成键槽，并存在损坏套管的风险[8]。一定范围内相对小的井眼水平位移相对较大。

3.2 小井眼井身结构优势

小井眼在钻、固、压、试施工中，会产生一连串的减量作用，节约各类配套钻具、套管、灰料、油料等成本费用，从源头上减轻钻井产生的岩屑、泥浆等固液状废弃物后续处理的环保压力[9]；6 1/2井眼容积与岩屑方量相比 8 1/2减少 50%左右。为满足电测要求须控制最大井斜在 40°以内，同时由于小井眼定向井稳斜相对困难，实际施工中须预留 3 到 5 度井斜区间，故最大位移需要控制在 1300 米。通过钻具受力分析：位移 1300 米情况下旋转钻进三轴应力接近钻具最小屈服强度，起钻时钻具轴向受力接近钻具抗拉强度安全系数值，继续增大位移钻具将产生不可逆变形；存在钻具扭断、拉断风险，如表 3。

表 3 小井眼井身结构优势数据

井眼尺寸 (英寸)	井眼容积 (m³/1000m)	井筒岩屑方量 (m³) 岩屑膨胀率按照 2.5~3 倍
8 1/2	36.62	650-700
6 1/2	21.39	350-400

3.3 不同造斜点下最大位移

3.3.1 设计表层 500 米，550 米造斜，6 1/2”
(165mm) 井眼可施工最大位移 1300 米

为满足电测要求须控制最大井斜在 40°以内，同时由于小井眼定向井稳斜相对困难，实际施工中须预留 3 到 5 度井斜区间，故最大位移需要控制在 1300 米。通过钻具受力分析，如表 4：位移 1300 米情况下旋转钻进三轴应力接近钻具最小屈服强度，起钻时钻具轴向受力接近钻具抗拉强度安全系数值，继续增大位移钻具将产生不可逆变形；存在钻具扭断、拉断风险[10, 11]，如图 6。

表 4 6 1/2” (165mm) 井眼可施工最大位移 1300 米

井眼尺寸	位移	井斜 max (°)	钩载 max (Tonf)	扭矩 max (KN.m)	摩阻 max (Tonf)	备注
165	1200	31.92	83.33	11.47	14.72	可施工，起钻三轴应力达到极限
	1300	35.69	90.17	12.33	17.57	
	1500	40.45	97.65	13.41	20.48	井斜大，无法缆测。同时起钻与旋转钻进时三轴应力大于钻具最小屈服强度，产生不可逆变形；起钻时钻具轴向受力大于钻具抗拉强度安全系数值，存在钻具拉断风险

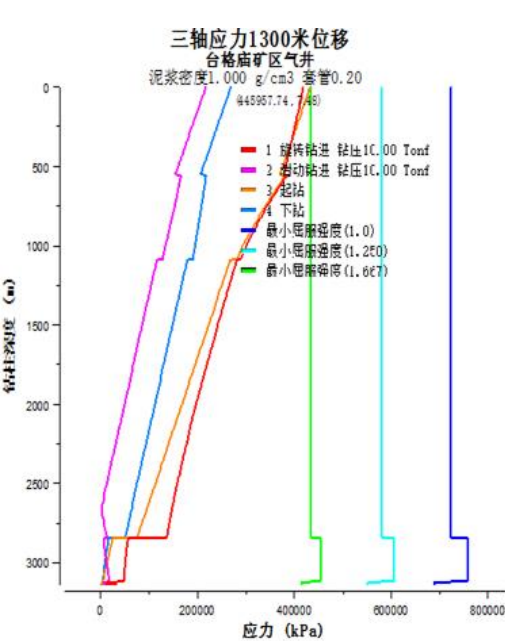


图 6 1/2” (165mm) 1300 米位移井眼模拟效果

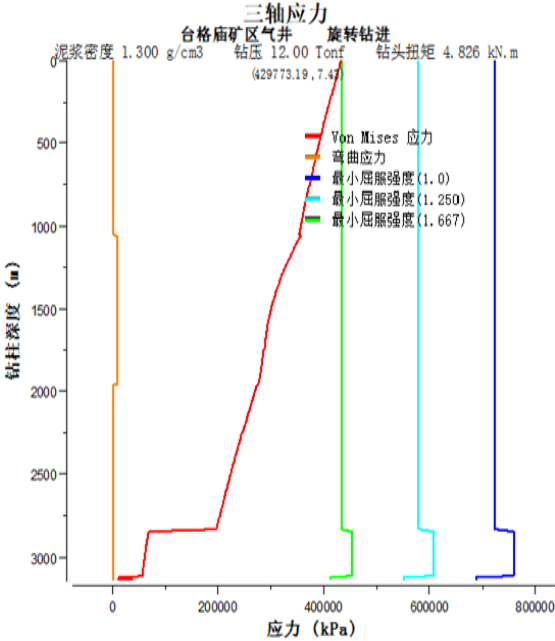


图 7 1/2” (165mm) 1000 米位移井眼模拟效果

3.3.2 设计表层 1000 米, 1050 米造斜, 6 1/2" (165mm) 井眼可施工最大位移 1000 米

如表 5 所示, 小井眼定向井稳斜相对困难, 实际施工中在满足电测要求最大井斜 40° 以内时, 需预留 3 到 5° 井斜区间; 位移 1000 米, 轨迹设计最大井斜 35°; 位移 1200 米, 轨迹设计最大井斜 45°; 超过标准值; 同时旋转钻进三轴应力接近钻具最小屈服强度, 起钻时钻具轴向受力接近钻具抗拉强度安全系数值[12], 如图 7。

表 5 6 1/2" (165mm) 井眼可施工最大位移 1000 米

井眼尺寸	位移	井斜 max (°)	钩载 max (Tonf)	扭矩 max (KN.m)	摩阻 max (Tonf)	备注
165	500	17	70	6.76	6.52	可施工
	1000	35	75.6	10.1	12.29	钻具三轴应力达到最小屈服强度 1.0 安全系数
	1200	45	78	9.44	14.46	井斜较大, 电测困难
	1500	48	79.17	11.11	16.93	

表 6 不同井身结构摩阻分析数据

水平段长井型	800	1000	1200	1400	1600	800
常规三开摩阻 (T)	9.37	11.89	14.08	15.86	17.67	9.37
优化三开摩阻 (T)	13.5	15.33	19.46	20.92	22.72	13.5

随着水平段长度的增加, 摩阻逐渐增大; 相同井深与水平段长的情况下, 优化三开水平井摩阻大于常规三开水平井, 如表 8, 9 所示。

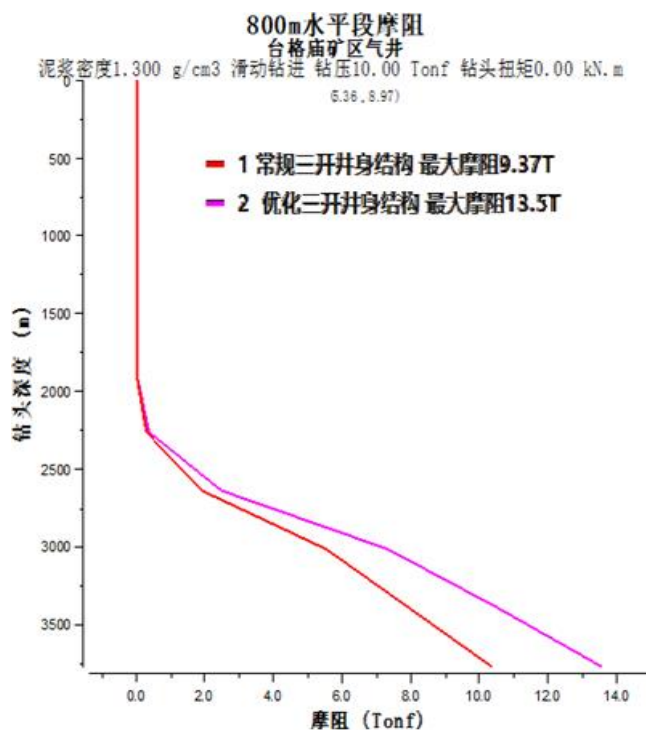


图 8 800 米水平段摩阻台格庙矿区气井

4 水平井井身轨迹多因素优化、模拟评价轨迹参数

4.1 不同井身结构摩阻分析

如表 6 所示, 摩阻主要指的就是钻具受到的摩擦阻力, 摩阻主要分为轴向上的摩擦阻力及轴向上的扭矩两种。模拟最大水平位移和水平段长度时要保证钻具屈曲与轴向应力在相应安全范围内[13]。

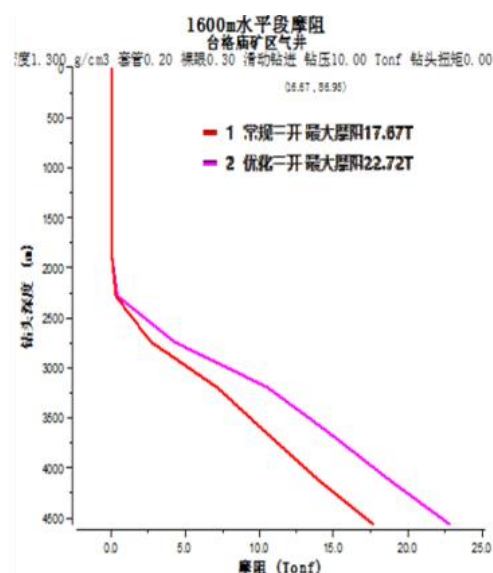


图 9 1600 米水平段摩阻台格庙矿区气井

4.2 水平井最大水平段长度模拟—轨迹设计

4.2.1 优化三开水平井水平段模拟分析

2020-2021 苏东区域优化三开水平井整体平均进尺 4178 米, 平均水平段长 1045 米[14], 如表 7。

(1) 二维水平井：水平井设计靶前距 350~420 之间，可钻性强，地层稳定，水平段长度可达到 1200 米，如图 10，11 所示。

表 7 水平段 1200 米设计剖面节点数据表

测深 (m)	井斜 (deg)	网格方位 (deg)	垂深 (m)	视平移 (m)	狗腿度 (deg/30m)	闭合距 (m)	闭合方位 (deg)	段长 (m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2200.00	0.00	0.00	2200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2200.00
2317.86	13.75	0.00	2316.74	13.41	3.50	14.08	0.00	117.86
2395.79	13.75	0.00	2392.43	31.05	0.00	32.60	0.00	77.92
2967.66	90.00	0.00	2720.00	428.70	4.00	450.00	0.00	571.87
4167.66	90.00	0.00	2720.00	1571.89	0.00	1650.00	0.00	1200.00



图 10 井轨迹水平段 1200 作业模式

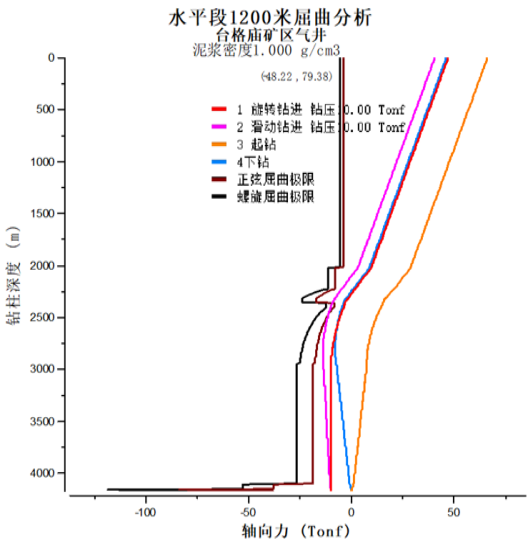


图 11 水平段 1200 米施工分析

(2) 如表 8 所示，三维水平井：造斜点选择 1000 米，地层延安组底部，可钻性强，易于造斜，后期 1150~2340 米稳斜消偏，减少滑动提高施工效率，水平段长度可达到 1000 米，可进行偏移距 500 米水平井施工，如表 9、图 12、13、14、15。

表 8 三维水平井设计剖面节点数据表

测深 (m)	井斜 (deg)	网格方位 (deg)	垂深 (m)	视平移 (m)	狗腿度 (deg/30m)	闭合距 (m)	闭合方位 (deg)	段长 (m)
0.00	0.00	89.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1000.00	0.00	89.01	1000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1000.00
1157.17	20.96	89.01	1153.69	9.11	4.00	28.42	89.01	157.17
2337.43	20.96	89.01	2255.88	144.35	0.00	450.54	89.01	1180.26
2605.37	30.00	0.00	2505.14	226.18	4.00	506.02	81.15	267.94
3055.37	90.00	0.00	2720.00	580.71	4.00	672.68	48.01	450.00
3955.37	90.00	0.00	2720.00	1438.11	0.00	1439.62	20.32	900.00

表 9 900 米水平段 500 米偏移距摩阻扭矩分析

900 米水平段 500 米偏移距摩阻扭矩分析（最大）		
悬重 (T)	扭矩 (KN.m)	摩阻 (T)
89.05	10.28	16.21



图 12 井轨迹水平段 900, 偏移距 500 作业模式

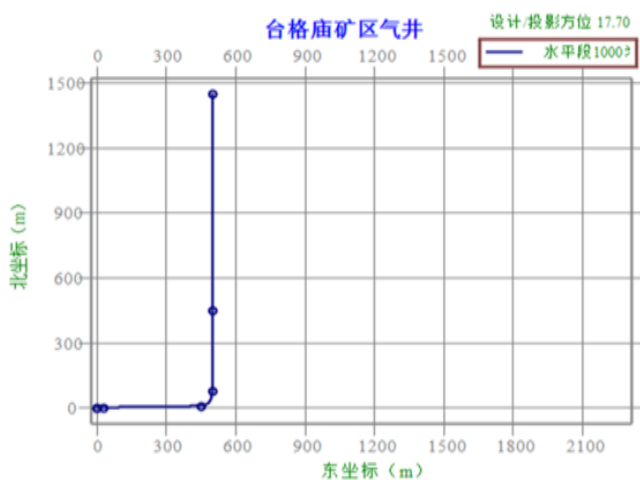


图 13 台格庙矿区气井坐标

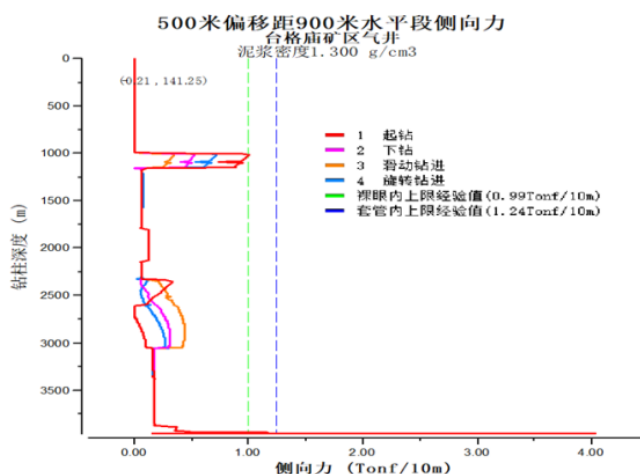


图 14 500 米偏移距 900 米水平段侧向力图

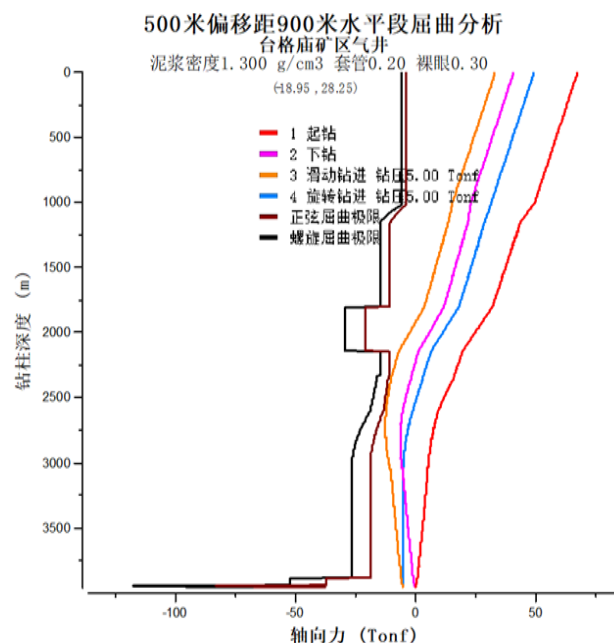


图 15 500 米偏移距 900 米水平段屈曲分析图

4.2.2 常规三开水平井水平段模拟分析

如表 10 所示, 二维水平井常规三开结构建议水平段长度小于 1600 米[15]。水平段长 1600 米, 达到最大施工极限。滑动钻进工况下, 井深 2410.73 米处钻柱轴向力达到-8.5, 超过此处钻柱正弦屈曲极限值-8.29, 井深 2716.52 米处钻柱轴向力达到-17.15, 超过此处钻柱正弦屈曲极限值-16.42, 在此两处钻杆易形成正弦屈曲, 部分钻压无法加至钻头上, 滑动施工出现托压现象, 如表 11, 图 16。

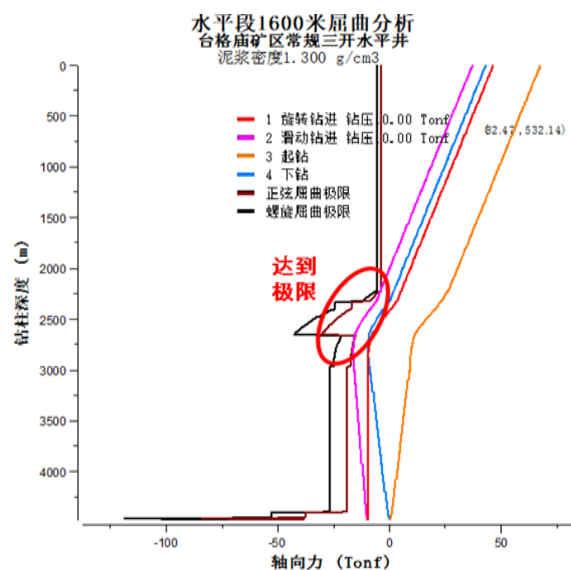


图 16 水平段 1600 米屈曲分析图

表 10 水平段 1600 米井身数据表

测深 (m)	井斜 (deg)	网格方位 (deg)	垂深 (m)	视平移 (m)	狗腿度 (deg/30m)	闭合距 (m)	闭合方位 (deg)	段长 (m)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2200.00	0.00	0.00	2200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2200.00
2317.86	13.75	0.00	2316.74	13.41	3.50	14.08	0.00	117.86
2395.79	13.75	0.00	2392.43	31.05	0.00	32.60	0.00	77.92
2967.66	90.00	0.00	2720.00	428.70	4.00	450.00	0.00	571.87
4567.66	90.00	0.00	2720.00	1952.96	0.00	2050.00	0.00	1600.00

表 11 二维水平井常规散开数据表

水平段长 (m)	1400	1600
最大钩载 (T)	83.11	84.53
最大摩阻 (T)	15.86	17.67
最大扭矩 (KN.M)	11.59	12.42

5 结论

- (1) 定向井井组施工井口数大于 3 口时，进行“鱼刺”状预分，主动分离，给后续施工井预留轨迹防碰空间。直井段轨迹走势若持续向井架大门方向（±30°范围内），应及时采取有效纠斜措施，以免给后续井的防碰施工造成困难。
- (2) 井组安排应考虑道路和优化井眼轨迹的需要，考虑靶前位移对施工的影响，定向井井组最大可实现 1300 米位移。总体设计时，应对各井排列施工顺序，建议先施工水平位移大、造斜点浅的井，并设计为后大门方向，设计前大门方向钻水平位移小，造斜点深的井和直井。
- (3) 水平井预留煤柱中井作为井口，考虑偏移距、防碰绕障，模拟最大水平位移，同一井场可布置：偏移距小于 500，水平段 900 米以内的三维水平井四口，水平段 1200 米以内的二维水平井两口。

参考文献

[1] 张遂安. 采煤采气一体化理论与实践 [J]. 中国煤层气, 2006; 11 (2): 14-15.

[2] 刘桂华. 合理留设保安煤柱的探讨 [J]. 矿山测量, 1989; 4 (1): 10-11.

[3] 秦永和, 付胜利, 高德利. 大位移井摩阻扭矩力学分析新模型 [J]. 钻采工艺; 2006; 11 (2): 62-63.

[4] 范光第, 黄根炉, 李绪锋, 等. 水平井管柱摩阻扭矩的计算模型 [J]. 钻采工艺; 2013; 20 (2): 65-68.

[5] 张峰. 煤层气井钻井工艺分析及优化建议 [J]. 西部探矿工程, 2021; 33 (8): 60-61+64.

[6] 刘曰武, 刘畅, 丁玖阁. 钻井式煤炭地下气化技术的发展及关键力学问题 [J]. 力学与实践, 2021; 43 (1): 1-12.

[7] 张娜. 钻井技术在非常规油气田中的应用研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020; 40 (22): 175-177.

[8] 杨甫, 段中会, 马东民, 等. 煤炭地下气化技术进展 [J]. 科技导报, 2020; 38 (20): 71-85.

[9] 李国红. 浅谈煤层气钻井过程中的储层伤害与保护 [J]. 价值工程, 2019; 38 (28): 14-15.

[10] 杨慧. 钻井技术在非常规油气田中的研究与应用分析 [J]. 信息记录材料, 2018; 19 (12): 105-106.

[11] 张全盛, 和喜军. 煤层气井储层保护钻井工艺分析 [J]. 工程建设与设计, 2020; 12 (13): 202-204.

[12] 霍轩, 桑秀夫, 王林, 等. 煤层气井储层保护钻井工艺分析 [J]. 云南化工, 2018; 45 (5): 150.

[13] 李东民. 中国煤层气钻井技术现状及发展趋势探析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017; 37 (23): 191-192.

[14] 颜培风. 煤层气储层保护钻井液技术探讨 [J]. 化工管理, 2015; 12 (33): 112.

[15] 郭林霞. 煤层气钻井工程风险及监控研究 [D]. 中国矿业大学 (北京), 2009.