

# 元坝超深酸性气井试气作业安全管控技术

胡桂林<sup>1</sup> 铁忠银<sup>2</sup> 李青<sup>1</sup> 李勇<sup>2</sup> 钟昇<sup>1</sup> 姚金兵<sup>2</sup>

1. 中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 2. 中石化西南石油工程有限公司

胡桂林等. 元坝超深酸性气井试气作业安全管控技术. 天然气工业, 2016, 36(增刊 1): 188-192.

**摘 要** 元坝气田具有储层埋藏深、温度高、产量高、压力高、腐蚀性流体含量高特征, 地表和地下地质条件复杂, 工程施工难度大, 安全风险高。为此, 充分利用“安全系统学”和“危险控制四原则”的安全管理理论, 在井筒作业、地面控制、过程管理控制等方面探索形成了针对元坝“四高”气田试气作业较为成熟的“物资设备本质安全控制、施工方案优化、组织方案细化、有毒有害气体实时监测及防护、关键环节全过程管控、应急体系保障”安全管控技术, 并得到成功运用, 保证了元坝气田试气安全、优质、高效作业。

**关键词** 元坝气田 试气作业 酸性气井 四高气井 安全管控

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2016.S1.035

元坝气田是目前世界上埋藏最深的海相酸性气田, 具有超深(6 200 ~ 7 250 m)、高含硫化氢(最高 12.2%)、高温(最高 157.414 °C)、最高施工压力(127 MPa)、高产(最高无阻流量  $792 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )等特点, 是全球试气难度最大的地区之一。在元坝超深酸性气井试气过程中探索形成了以“物资设备本质安全控制、施工方案优化、组织方案细化、有毒有害气体实时监测及防护、关键环节全过程管控、应急体系保障”为核心的安全管控技术, 解决了试气作业中井控风险大、安全防护难、井筒复杂情况多等难题, 实现了元坝超深酸性气田安全、高效投产。

## 1 试气作业安全管控需求

元坝超深酸性气井存在  $\text{H}_2\text{S}$  泄漏、井下管柱窜漏、地面控制系统刺蚀、工具仪表失效、人员中毒等风险, 试气作业安全管控需求强。

1) 高含  $\text{H}_2\text{S}$  等强腐蚀性气体, 对井口采气树、测试管柱、工具腐蚀性强, 易出现  $\text{H}_2\text{S}$  泄漏事故<sup>[1]</sup>。

2) 元坝酸性气井施工压力高, 测试管柱内外压差大, 各种工况交变应力作用下管柱密封易失效。

3) 产量大, 流速快, 能在短时间内对控制系统节流转向部分产生剧烈的刺蚀, 产生极大的井控安

全风险。

4) 元坝海相碳酸盐岩地层井漏现象比较严重, 易发生先漏后喷事故。

## 2 试气作业安全管控技术

运用“安全系统学”和“危险控制四原则”安全管理理论, 对元坝酸性气田试气作业过程进行分析, 从井筒作业、地面控制、过程管理等方面系统研究, 制订技术措施, 保障现场安全施工。

### 2.1 井筒作业安全管控技术

#### 2.1.1 管柱力学分析

三高气井井下测试管柱工作环境压力高、温度高、腐蚀性气体分压高, 测试前, 通过有效轴向力力学模型及数学模型、有效外挤压力和内压计算数学模型、封隔器与测试管柱的力学模型对管柱进行受力分析, 保障管柱安全, 元坝 1—侧 1 井管柱力学分析数据如表 1 所示<sup>[2]</sup>。数学模型如下:

$$T_c = \sum_{i=1}^n T_i + \frac{(H_x - H)q_j}{1000} + \sum_{i=1}^{n+1} F_i \quad (1)$$

$$P_s = \frac{P_{bs}}{e^{1.115 \times 10^{-4} \rho_{\text{gas}} H_s}} \quad (2)$$

$$p_{bc} = p_s - G_w H \quad (3)$$

表 1 元坝 1—侧 1 井油管可自由移动不同工况各效应参数表

序号		1	2	3	4	5	7	9	10
工况		下钻完	坐封	射孔	排液	产气	关井	井下关井	压井
活塞效应	变形	7.27	6.24	3.06	5.61	1.10	-2.37	6.59	0.39
	效应力	0.00	0.00	184.24	36.85	300.22	453.08	-33.38	292.45
鼓胀效应	变形	0.78	0.78	-0.53	0.52	-2.13	-0.77	1.61	0.73
	效应力	0.00	0.00	45.26	9.05	102.04	55.33	-28.59	2.75
温度效应	变形	6.27	6.27	6.27	6.27	11.11	10.44	6.27	6.27
	效应力	0.00	0.00	0.00	0.00	-41.96	-42.78	0.00	0.00
螺旋效应	变形	0.00	0.00	-0.52	-0.04	-1.23	-1.68	-0.08	-0.72
	效应力	0.00	0.00	259.67	51.93	423.13	556.24	-70.09	329.85
流动效应	变形	0.00	0.00	0.00	-0.09	-1.75	0.00	0.00	0.00
	效应力	0.00	0.00	0.00	5.94	120.62	0.00	0.00	0.00
相对地面总变形		14.32	14.32	13.29	8.28	12.26	7.11	5.62	14.39
相对坐封总变形		1.032	1.03	0.00	-5.01	-1.03	-6.18	-7.67	1.10

$$T_{p1} = \frac{\pi D^2 (L - H_k) \Delta p}{4L} \quad (4)$$

$$T_{p2} = T_{r_b} = f_k q_s \int_{BDE} \sin \alpha_l dl \quad (5)$$

式中  $F_i$  表示包括计算段在内的第  $i$  段测试管柱台肩的台肩力, kN;  $T$  表示温度, °C;  $H$  表示井深, m;  $p_s$  表示管柱出口压力, MPa;  $p_{bs}$  表示管柱内的有效内压力, MPa;  $G_c$  表示完井液压力梯度, MPa/m;  $\rho_{gas}$  表示天然气相对密度;  $T_{p1}$  表示流体摩阻, kN;  $T_{p2}$  表示轴向拉力, kN;  $L$  表示管柱长度, m;  $D$  表示管柱直径, m。

### 2.1.2 材质的优选

元坝气田长兴组储层温度在 160 °C,  $H_2S$  平均含量 5.14%, 可能有单质硫的存在, 依据 ISO15156 及腐蚀评价试验, 结合产量预测井筒内部的温度分布, 在井深小于等于 4 000 m 选用 4C 类镍基合金油管、718 材质完井投产工具, 井深大于等于 4 000 m 选用 4D 类镍基合金材质及 725 材质完井投产工具<sup>[3]</sup>。132 °C 时长兴组不同产量下对应的井深如表 2 所示<sup>[4]</sup>。

表 2 132 °C 时长兴组不同产量下对应的井深表

产量 / (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	井深 / m
30	4 650
40	4 400
50	4 150
60	3 950

### 2.1.3 管柱优化设计

完井投产管柱主要考虑到酸压、测试、投产及

井控安全的需要, 优化完井投产管柱结构为: 安全阀流动短节+井下安全阀+安全阀流动短节+循环滑套+液压坐封封隔器(含锚定密封总成)+磨铣延伸筒+剪切球座<sup>[5]</sup>。

考虑到钢丝作业能力及降低管柱的复杂性, 不下入坐落短节, 后期需要进行井下取样及相关作业时采用专门的配套工具进行。

### 2.1.4 油管的优选

根据“气井生产系统分析”, 完井油管采用 Ø89 mm 或 Ø89 mm + Ø73 mm 的复合油管能够满足携液、抗冲蚀及增产要求。

根据管柱在酸压、生产过程中的强度校核, 油管柱选择 125 钢级 Ø88.9 mm × 7.34 mm + Ø88.9 mm × 6.45 mm + Ø73 mm × 5.51 mm 复合油管<sup>[5]</sup>。

### 2.1.5 管柱密封保障技术

采用微牙痕设备对油管和工具进行上扣, 咬痕小于 0.15 mm, 减少油管损伤, 采用 140 MPa 气密封检测设备对丝口密封进行检测, 保障管柱密封性能。

### 2.1.6 气测录井监护

施工中采用 NLS 综合录井仪对井筒作业全过程监控, 特别强调对硫化氢含量和全氢含量检测, 施工现场严格执行气最大油气上窜速度在 30 m/h 以内方可进行起下钻作业, 确保井筒作业施工安全。

### 2.1.7 井控安全工艺措施

#### 2.1.7.1 井控设备优选

采用两套 EE 级 105 MPa 液压双闸板防喷器组合, 结构为半封闸板+剪切闸板+全封闸板+半封

闸板；配备与井筒内管柱连接的 105 MPa 防硫防喷短节和防喷单根；配备双机双泵及循环储备系统；准备充足的井控备件及材料。根据地层压力 70 ~ 80 MPa，最大关井压力 48 ~ 55 MPa，选择 105 MPa + 70 MPa 二级抗硫（EE 级）节流流程，同时现场考虑双向放喷、分离计量、保温、正反循环压井、自动点火等功能。

采用 105 MPa、HH 级采气树，设计井下安全阀控制管线穿越通道。

在井口至节流控制系统之间设计 105 MPa 的 ESD 安全控制阀，实现 3 s 关井，在投产管柱下 90 m 左右位置设置 105 MPa 井下安全阀，实现 2 s 关井。

### 2.1.7.2 压井液准备

元坝气田压井液密度安全附加值取 0.15 g/cm<sup>3</sup>，并添加除硫剂、缓蚀剂，控制 pH 值在 9.5 以上。

探井现场储备高于钻进时最高密度 0.2 g/cm<sup>3</sup> 以上的高密度压井液。上部陆相大尺寸井眼，高密度钻井液储备量不少于本次开钻最大井眼容积的 1.5 倍。以下井段，高密度钻井液储备量应不少于井筒容积的 2 倍，并储备加重剂不少于 500 t。

开发井重浆可按井筒容积 1 倍储备。对易漏失井应储备同性能的钻井液及堵漏材料，钻井液储备量应是井筒容积 1 倍，堵漏材料应储备 2 次用量以上。储备压井液应按规定循环、维护，使用自动加重装置。

### 2.1.7.3 井控技术措施

1) 起下大尺寸工具井控措施：起下带有大直径工具的管柱时控制起下钻速度为 10 ~ 20 m/min，距离裸眼段 300 m 以内起下管柱速度不超过 5 m/min，防止产生抽汲或压力激动；对于不能正常循环，下部管柱可能存在高压圈闭时，在防喷装置上加装防顶卡瓦，并及时向井内灌注压井液。

2) 起下钻溢流监测措施：起下管柱专人观察是否外溢或漏失，发现异常立即进行压井<sup>[6]</sup>。

3) 空井筒情况下发现井口溢流采取措施：①若溢流量小于 2 m<sup>3</sup>/h，则立即抢下钻具至井底然后进行加重循环压井，下钻途中若溢流量大于 2 m<sup>3</sup>/h，则应立即关防喷器半封，然后组织挤压井；②若溢流量大于等于 2 m<sup>3</sup>/h，则应立即关防喷器全封，然后组织挤压井。

4) 关井操作程序：严格执行旋转作业、起下钻、起下大直径工具、空井、诱喷求产发生流程刺漏、诱喷求产井口 1 号阀门以上刺漏、诱喷求产井口 1 号阀门以下刺漏、拆换井口溢流 8 种工况下关井操作程序。

## 2.2 地面控制安全管控技术

### 2.2.1 优选井口技术

根据工程地质资料预测的地层压力、井口最高关井压力、井口最高施工压力、井口流动温度、流体腐蚀分压，优选采气树。采气树配置远控操作的安全阀，保证试气作业中安全施工需要，井口装置选择流程如图 1 所示，元坝超深酸性气井试气井口装置选择 HH 级抗蚀合金井口。

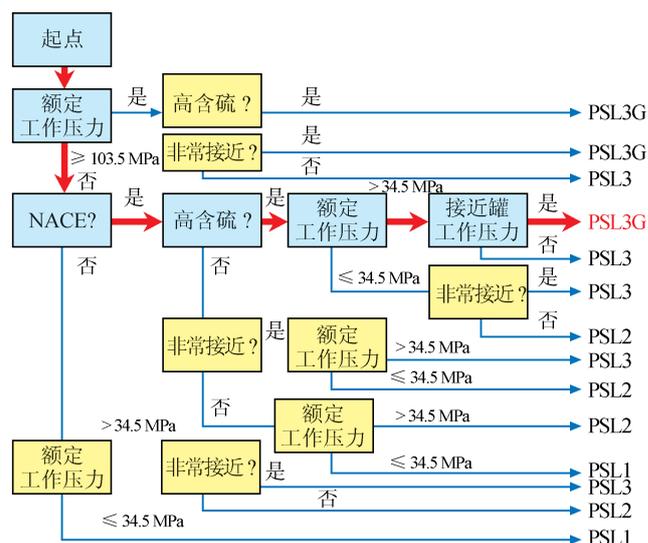


图 1 井口装置选择流程图

### 2.2.2 节流控制技术

根据元坝气井地层压力和对最高关井压力的预测，探井选择 105 MPa + 70 MPa + 70 MPa 三级测试流程，投产井选择 105 MPa + 70 MPa 二级测试流程。在测试期间原则上不频繁开关采气树闸阀的情况下，一级节流管汇起到临时作为井口装置的作用，额定工作压力达到甚至超过最高关井压力<sup>[7]</sup>。

### 2.2.3 快速截流技术

采用自动数据采集设备，实时监测系统压力、温度数据，并在流程管汇与井口之间安装 ESD 紧急关闭阀，当数据超过额定压力，可自动或远程控制 3 s 内关井，确保流程安全和操作人员的人身安全<sup>[8]</sup>。

### 2.2.4 分离保温技术

元坝酸性气井选用进口油、气、水三相分离设备，对试气施工地层产出的天然气和液体进行有效分离、计量；优选加热保温装置，使用锅炉及热交换器对天然气进行加温，防止天然气形成水合物，避免发生冰堵，避免了设备超压工作，保证试气流程设备的安全，

同时保证了试气质量。

### 2.2.5 防刺蚀技术

放喷求产时采用合金油嘴及丝堵控制、同时伴注液体防止流程刺蚀。

### 2.2.6 硫化氢防护技术

根据施工井现场条件、作业设备布置及安全环保要求,硫化氢防护落实以下技术措施:①井场设置施工隔离带;②井场设置风斗、风向标、标志牌等警告标志或信号;③在有可能形成 $H_2S$ 聚集的区域应有良好的通风;④钻台上下、井场、循环罐、节流管汇、分离器、放喷出口等重要部位应有防爆探照等照明设备;⑤地面放喷流程的主要设备和人员操作区应增加固定式硫化氢监测仪;⑥井场设置两条不同风向的逃生路线,呼吸器至少存放于两个不同的地方,建立安全区(集合点)和安全呼吸区域确保人员的任何行动都在上风侧。

## 2.3 过程管理安全管控技术

### 2.3.1 设备安全管控技术

#### 2.3.1.1 强化设备使用管理,保障设备安全运行

1) 制订标准化设备管理流程、标准化操作维护规范、标准化检查细则“三个标准化”,使管理关系更加明晰,效率得到显著提高<sup>[9]</sup>。

2) 编制操作注意事项简易读本,加强对各岗位的精细化管理,提高现场操作人员的操作技能和设备保养技术,对养成良好的作业习惯起到积极推动作用,更好地推动全员参与管理。

3) 优化奖惩激励机制,细化各类型设备检查考核实施细则,使考核有章可循,公平公正,有效地提高现场的设备管理水平。

#### 2.3.1.2 实现设备动态监管,保障设备有效运行

针对元坝高产、高压、高含硫、作业时间较长、施工层次较多等特点,现场使用的防硫材料、防硫物资设备、锅炉、压力容器等特种设备,指重表、压力表、安全阀等安全附件严格做到“动态监控”,发现问题及时进行维护保养或更换。

### 2.3.2 细化组织方案

1) 制订“四案一划”,严把安全审查关。提前制订“四案一划”(施工组织方案、设备保障方案、应急压井预案、施工应急预案、施工进度计划),确保生产有计划、有预案、有序安全运行。

2) 做好风险评估,落实控制措施。施工设计中

细化作业风险分析,并制订应对措施,下发现场,严格执行,保证施工质量,避免安全事故发生。

3) “四级”开工确认<sup>[10]</sup>,确保万无一失。在试气施工前进行“四级”开工验收,严格监控试气作业重点工序的安全施工,施工单位和测试配合作业单位对本单位负责的重点设备、高压井口、测试管汇和井控设备等进行检查确认,发现问题及时整改,待现场所有交叉作业施工单位对各自工作进行确认,符合安全要求后方可施工。

### 2.3.3 实施重点工程关键环节分级管理,预防重特大事故发生

通过建立重点工程关键作业环节分级管理模式,落实各环节管理职责,来预防重特大事故的发生。挂牌领导负责对其挂牌的重点工程在施工期间到现场对设计(规范)、相关HSE制度以及进度计划执行情况督促检查,做到生产管理“三靠前”,即“靠前指挥、靠前协调、靠前服务”,全面负责工程开工验收、关键作业环节生产技术、物资设备保障、工程施工的组织与协调,并在施工现场成立技术组、生产协调组、物资装备保障组、安全环保组、应急抢险组等执行小组,按照PDCA运行模式,负责对施工组织、开工验收、施工过程、应急管理关键环节实施全过程、全方位、全天候的闭环管理,做到生产组织协调到现场、工作督办落实到现场、检查验收整改到现场、突发险情排除到现场、事故复杂处理到现场“五到场”,使施工中重点工程关键环节得到有效组织与监控,确保安全生产。

### 2.3.4 建立健全单井应急救援体系,防患于未然

按照“气防救援为主、兼顾消防环保、依托井口灭火、就近应急救援”的应急建设指导思想,建设完整的应急救援体系。

根据“一井一案”的原则<sup>[11]</sup>,安排专人对现场进行居民分布及地理地貌的调查,编制针对性和操作性强的井控、硫化氢防护、环境保护等应急预案,严格执行应急管理规定,定期开展不同工况的应急演练,达到班自为战、队自为战的目的。并将应急预案报当地政府备案,开展大型企地联合应急演练,做到与地方政府应急联动。

## 3 安全管控技术在元坝气田应用

通过元坝超深酸性气井试气作业安全管控技术的运用,顺利完成元坝1井、元坝12井、元坝29

井等 12 口勘探井完井试气施工, 完成元坝 205 井、元坝 29 井、元坝 104 井等 8 口修井施工, 完成元坝 204-1H 井、元坝 103-1H 井、元坝 205-3 井等 33 口井投产试气施工, 未发生安全事故, 保障了现场施工安全。

#### 4 结论和建议

1) 形成了优选 HH 井口、4C4D 类油管、双级安全阀、多级节流控制系统等技术, 解决了元坝酸性气井流程刺蚀、设备腐蚀等难题, 保障了设备物资本质安全。

2) 形成了管柱优化设计、微牙痕上扣、气密封检测、气测录井监护、水基润滑防刺蚀、有毒有害气体实时监测等安全控制技术, 保障了现场井控和员工人身安全。

3) 评估单井风险、健全应急体系、制订四案一划、四级开工验收、关键环节领导值班等安全管理措施, 解决了多工种、多单位、多工序等过程管理难题。

4) 通过应用元坝超深酸性气井试气安全管控技术, 顺利完成了元坝区块 12 口探井、33 口投产井施工, 保障了现场作业安全, 超深酸性气井试气安全管控技术可以在国内外同类施工井中推广应用。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨廷玉. 川东北高含硫气井测试作业安全控制技术浅谈 [J]. 2012, 3(21).
- [2] 张朝举. 川东北高压高产含硫气井测试优化设计研究 [R]. 成都: 中石化西南石油工程有限公司, 2009.
- [3] 苏鏢, 赵祚培, 杨永华. 高温高压高含硫气井完井试气工艺技术与应用 [J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 53-56.
- [4] 雷先轸. 元坝超深酸性气田试气投产关键技术 [J]. 中国化工贸易, 2014: 259.
- [5] 苏鏢. 超深高温高压高含硫气井的安全完井投产技术 [J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 60-64.
- [6] 隋秀香. 含硫油气井井控技术及管理方法 [J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(7).
- [7] 唐瑞江. 元坝气田超深高含硫气井测试及储层改造关键技术 [J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 32-35.
- [8] 谭明文. 川东北含硫超深气井测试地面控制技术优化研究及应用 [J]. 钻采工艺, 2011, 9(1): 58-62.
- [9] 张可航. 井下作业井控存在的问题分析及应对探讨 [J]. 科学论坛, 2016: 93.
- [10] 王光明. 高含硫气田投产试气的 HSE 管理 [J]. 安全健康和环境, 2015, 15(8): 50-53.
- [11] 彭国生. 川东北“四高”气田成功勘探开发主要安全措施与展望 [J]. 石油化工安全环保技术, 2011, 27(6): 1-5.

(收稿日期 2016-07-05 编辑 韩晓渝)