

# 超深特深层气井试气测试技术难点与对策

刘生国 牟小清 杨 桢 肖喜庆

中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川 德阳 618000

**摘 要：**文章阐述超深特深层气井试气测试技术的重要性，从地层特性与高温环境、井筒完整性、测试工具适应性、资料录取与解释等方面分析技术难点，针对超深特深层气井试气测试，可研发耐温耐压材料与工具，用耐高材料提升设备性能；强化井筒完整性管理，保障固井等质量；优化测试工具与工艺，改进封隔器等设计；改进资料录取与解释方法，提高数据准确性，为测试提供技术支撑。

**关键词：**超深特深层气井；试气测试技术；技术对策

## 引言

在油气勘探开发领域，常规油气资源日益减少，向地球更深部探寻油气资源成为必然。超深特深层气井的开发利用对保障能源供应、推动行业持续发展意义重大。试气测试作为超深特深层气井开发的核心环节，能准确评估气井储量与产能、优化开发方案、保障开发安全。然而，该测试面临诸多技术难题，亟待研究有效对策以推动技术进步。

### 1 超深特深层气井试气测试技术的重要性

在油气勘探开发领域，超深特深层气井占据着愈发关键的地位。随着常规油气资源的逐渐枯竭，向地球更深部探寻油气资源成为必然趋势，超深特深层气井的开发利用成为保障能源供应、推动行业持续发展的关键力量。而试气测试技术作为超深特深层气井开发过程中的核心环节，其重要性不言而喻。从资源评估角度看，试气测试是准确掌握超深特深层气井储量与产能的必经之路。超深特深层地质构造复杂，地层非均质性强，仅依靠地质勘探手段难以精确判断气井的实际产能。通过试气测试，能够直接获取气井在不同生产制度下的压力、产量、储层物性等关键参数，准确评估气井的商业开发价值，为后续的开发方案制定提供坚实的数据支撑。在开发方案优化方面，试气测试结果能为合理确定开采速度、压裂规模等提供依据。不同气井的地质条件和流体性质差异显著，试气测试可揭示气井的生产特性，帮助工程师制定个性化的开发策略，提高开发效率，降低开发成本，实现资源的高效利用。试气测试对于保障超深特深层气井开发的安全性至关重要。超深特深层气井面

临着高温、高压等极端条件，试气测试能够提前发现井筒完整性、地层压力异常等潜在问题，为采取针对性的安全措施提供预警，确保气井开发过程的安全平稳运行，推动超深特深层油气勘探开发技术不断进步。

### 2 超深特深层气井试气测试技术难点

#### 2.1 地层特性与高温环境引发的测试难题

超深特深层气井的试气测试面临地层特性与高温环境叠加的复杂挑战。这类气井储层普遍具有致密特征，孔隙结构复杂且连通性差，导致流体流动阻力显著增大。储层本身的高压属性与酸压改造所需的高施工压力形成叠加效应，井底压力常处于极高水平，为实现有效测试，需通过震荡加载方式突破地层原始应力状态。这种动态压力作用会使测试管柱及配套工具承受频繁的交变载荷，密封界面易因应力集中出现微缝，引发流体窜漏；部分井下工具的结构强度难以匹配极端压力环境，关键部件可能发生塑性变形，导致功能失效。高温环境对测试系统的影响同样显著。井底温度的持续攀升会加速井下工具橡胶密封件的老化进程，高分子材料的弹性模量与密封性能随温度升高呈非线性衰减，当温度超过临界值时，密封件会丧失有效接触压力，造成井筒内流体通道异常连通。高温条件还会改变泥浆及无固相工作液的物理化学性质，如黏土颗粒分散性增强导致泥浆黏度异常波动，无固相流体的化学稳定性被破坏，出现添加剂分解与润滑性能下降等问题，加剧管柱磨损与流动阻力。地层高压与高温的耦合作用，最终会引发井下管柱整体失效，导致试气测试中断甚至施工失败<sup>[1]</sup>。

#### 2.2 井筒完整性保障

试气测试及完井阶段，井筒完整性的核心挑战聚焦于井筒质量，其中套管与固井质量问题尤为突出。（1）套管作为井筒结构的关键承载单元，其制造精度与安装工艺直接影响整体稳定性，若存在壁厚不均、接箍密封

**作者简介：**刘生国，男，汉，1984年1月，四川宜宾，本科学历，单位：中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司，高级工程师，研究方向：完井及试油测试技术。

不良等缺陷,在酸压测试的高压作用下,极易成为流体窜流的薄弱通道,不仅干扰测试数据的准确性,更可能导致储层污染;(2)固井质量缺陷表现为水泥环胶结不连续、胶结强度不足等问题,这类缺陷会使环空形成压力传导通道,酸压施工时高压流体可能沿环空向上窜动,引发井口压力异常,甚至导致套管外窜槽,为后续高产气井的投产开发埋下隐患;(3)当气井获得高产时,井筒内流体流速剧增带来的冲蚀效应与压力波动,会加剧套管与水泥环界面的损伤,原本存在的质量缺陷在长期生产载荷作用下会加速扩展,可能引发井筒泄漏、产能下降等严重问题,显著增加开发维护成本。

### 2.3 测试工具适应性

超深特深层气井试气测试中,测试工具面临的核心问题集中在密封性与极端工况下的操作可靠性两方面。封隔器等关键工具的橡胶密封组件在高温环境下,分子链结构易发生降解,弹性与耐磨性显著衰减,无法形成有效密封界面,导致井筒内流体串流,直接造成测试工序中断;其他辅助工具的橡胶元件也存在类似问题,密封失效会破坏测试段的压力边界,使测试数据失真。液压油作为工具驱动系统的传力介质,在高温高压作用下会出现黏度异常降低、化学稳定性下降等现象,导致液压管路内泄漏量增加,驱动压力传递效率锐减;同时,工具内部机构的机械传动部件,如齿轮啮合副、阀芯运动导向结构等,在极端工况下会因材料热膨胀系数差异产生卡滞,或因润滑失效加剧磨损,使开关动作响应延迟甚至失灵,无法按测试程序完成预定操作。这些问题相互叠加,会严重削弱测试工具的整体性能,不仅影响试气测试的顺利进行,还可能因工具失效引发井下复杂情况,增加作业风险与成本<sup>[2]</sup>。

### 2.4 资料录取与解释

(1)超深特深层气井资料录取与解释工作面临储层复杂特性与测试环境干扰的双重挑战,技术瓶颈聚焦于数据有效性和模型适配性。储层强非均质性致使流体流动呈现多尺度特征,微米级孔隙与毫米级裂缝渗流机制差异大,测试压力动态曲线包含多组响应特征,常规解析方法难以分离。(2)井筒储集效应在超深井中加剧,较长井筒容积延长压力传导滞后时间,早期测试数据受井筒干扰信息主导,真实地层响应特征被掩盖。高温高压下气体非达西流动效应增强,惯性力与湍流作用使渗流方程线性假设不再成立,传统产能公式计算误差显著增大。(3)资料解释阶段,现有数值模拟模型对深部储层地质条件考量不足,如未充分考虑地应力场各向异性、孔隙介质热弹性效应等因素,导致试井曲线拟合精

度下降,储层渗透率、表皮系数等关键参数难以准确反演,影响气藏开发潜力评估可靠性。

## 3 超深特深层气井试气测试技术对策

### 3.1 研发耐温耐压材料与工具

针对超深特深层气井试气测试的极端环境,需从材料革新与工具结构优化双轨并行寻求突破。在密封材料方面,AFLAS橡胶凭借其耐高温介质的耐受性,可在180℃环境下保持稳定的弹性性能,适用于中等温度区间的密封场景;全氟醚橡胶则能应对260℃以上的超高温工况,其分子结构中的氟碳键赋予材料优异的抗热氧化能力,可有效解决传统橡胶在高温下的失封问题。在工具研发中,测试封隔器的可靠性是需重点攻克环节,通过采用金属骨架与弹性体复合结构,增强胶筒的抗挤压能力,同时在密封面设计阶梯式接触形态,利用压力自增效应提升密封比压,减少因井筒不规则导致的密封失效。永久式完井的解封机制仍存在技术瓶颈,当前采用的液压驱动式封隔器在长期高温作用下,活塞密封件易老化导致解封力传递损耗,可尝试集成电磁驱动模块,通过非接触式能量传输实现封隔器状态的精准调控。材料层面同步推进镍基合金的微合金化处理,通过添加铌、钛等元素细化晶粒,使构件在200℃以上高温及150MPa压力下的蠕变速率降低50%以上。工具关键部位嵌入形状记忆合金组件,利用其温度感应形变特性,动态补偿密封间隙,确保在温度波动区间内始终维持有效密封,为试气测试的稳定进行提供硬件支撑<sup>[3]</sup>。

### 3.2 强化井筒完整性管理

(1)全生命周期井筒完整性管理需以固井质量为核心,自钻井阶段便需优化水泥浆体系设计,采用超细水泥与弹性树脂复合配方,增强水泥石在高温高压下的韧性,使其在酸压测试压力波动中不易产生微裂缝,为超高压工况提供基础保障。(2)固井施工中,脉冲式顶替技术通过动态调节顶替速率与压力,让水泥浆在环空均匀分布,填满套管外环形空间。施工质量以胶结面声幅度测值低于20%为标准,确保水泥环与地层、套管有效粘结,满足后期投产密封要求,降低井漏等风险,保障井筒长期稳定。(3)完井阶段需对固井质量进行多维度验证,采用超声成像与变密度测井组合技术检测水泥环胶结完整性,针对超高压酸压测试需求,进行井口憋压试验至设计压力1.2倍并稳压30分钟无泄漏,确保井筒具备承受极端测试压力与长期生产载荷的能力,为试气测试与投产开发提供可靠的结构支撑。

### 3.3 优化测试工具与工艺

针对超深特深层气井特殊工况,测试工具模块化与

工艺改进需聚焦核心突破。封隔器设计上,因可溶桥塞强度不足,主攻永久式封隔器解封机制,其锁紧机构嵌可溶控制组件,用耐蚀镁基复合材料,经双重密封腔体隔离酸液与地层流体,接收预设信号才溶解解锁;还探索机械触发解锁机构,借管柱轴向位移驱动锁销脱离,形成多重保障。测试阀组采用多通道并行架构,主通道配高压耐磨节流组件适配高产气量测试,旁通通道集成精密调节阀门,可动态切换流量区间,满足103-105m<sup>3</sup>/d产量波动需求,优化流道减少紊流对压力测量的干扰。工艺上推行“射孔-测试-改造”一体化流程,借连续油管输送系统实现带压快速切换测试段,单段周期缩短约30%;压裂测试用多级段簇射孔技术,依储层甜点设计非均匀布孔,孔密16-20孔/m,结合实时压力监测调排量与砂比防超井筒承载极限,智能井控系统闭环控制将井口压力波动精准控在 $\pm 0.5$ MPa内,保障作业安全稳定。

### 3.4 改进资料录取与解释方法

(1) 资料录取与解释技术升级核心在于构建“高精度监测+多场耦合模拟”技术体系。在监测设备层面,将石英晶体压力计与蓝宝石温度计相结合,前者测量精度达 $\pm 0.01\%$ FS,后者精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ,同时将采样频率提升至10Hz,以此实现瞬态压力波动的有效捕捉;流量计量运用超声多普勒技术,通过多声道交叉测量机制,在高含砂气流环境下将计量误差控制在1%以内。(2) 数据处理环节成果显著。构建井筒-储层耦合解释模型,在产能方程里引入气体高速流动动能修正项与非达西系数,让二项式产能公式计算误差大幅降低25%;针对井筒储集效应开发早期数据校正算法,通过反演拟合消除井筒容积造成的压力传导滞后,有效提升有效测试数据利用率达40%,为后续分析提供有力支撑。(3) 数值模拟方面,引入双重介质模型,分离表征裂缝网络与基质系统,并

考虑地应力各向异性对渗透率的影响,采用有限元-有限体积耦合方法求解流动方程,使试井曲线拟合度提升至90%以上。在解释过程中,融合成像测井与动态测试数据,借助机器学习算法构建储层参数反演模型,开展渗透率、表皮系数等关键参数的多解性分析,为开发方案制定提供量化支撑<sup>[4]</sup>。

### 结束语

为推动超深特深层气井试气测试技术进步,采取了多方面举措。一方面,研发耐温耐压材料与工具,从密封材料及工具结构优化着手,为试气测试稳定运行提供硬件支撑,可有效应对极端环境;另一方面,强化井筒完整性管理,优化水泥浆体系、应用脉冲式顶替技术等,保障井筒质量,降低井漏等风险。同时,优化测试工具与工艺、改进资料录取与解释方法,构建先进技术体系,提升测试效率和数据准确性,为开发方案制定提供量化支撑。

### 参考文献

- [1]孙虎,贺秋云,徐文,卢齐,庞东晓.川渝地区深层超深层试油完井技术现状及展望[J].钻采工艺,2024,47(2):130-140.
- [2]冯成军,刘生国,伍强.四川盆地特深含硫气井APR测试对策研究[J].内蒙古石油化工,2021,47(6):102-105.
- [3]刘洪涛,刘举,刘会锋,邱金平,才博,刘军严,杨战伟,刘珏瑜.塔里木盆地超深层油气藏试油与储层改造技术进展及发展方向[J].天然气工业,2020,40(11):76-88.
- [4]罗静,朱遂珩,曹建,周际春,邓清源,张楚越,张砚,赵慧言,杨敏.超深高压气藏动态监测技术对策研究——以SY构造栖霞组气藏为例[J].天然气技术与经济,2019,13(1):13-15+81.