

引文: 葛枫, 贾长青, 李宏. 四川盆地罗家寨高含硫气田安全高效开发与长期稳产关键技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(9): 85-92.  
GE Feng, JIA Changqing, LI Hong. Key technologies for safe and efficient development and long-term stable production of the Luojiashai high-sulfur gas field in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(9): 85-92.

# 四川盆地罗家寨高含硫气田安全高效开发与长期稳产关键技术

葛 枫 贾长青 李 宏

中国石油西南油气田公司川东北作业分公司

**摘要:** 罗家寨气田飞仙关组气藏是中国石油在四川盆地储量规模最大、丰度最高的高含硫气藏, 自 2008 年以来, 随着开发阶段的不断深入, 气藏安全高效开发面临长期稳产的严峻挑战。为保障高含硫气藏的长期稳产, 从全生命周期角度系统分析了优质储层准确识别难、硫沉积影响全生命周期产能评价和产能维护难, 以及复杂地理和人居环境下硫化氢 ( $H_2S$ ) 泄漏预警监测难的“三难”问题, 并通过地质、工程等多专业联合攻关, 创新形成了高含硫天然气开发关键技术。研究结果表明: ①解决了低品质地震资料成像、多期滩体叠置与多尺度裂缝发育背景下优质储层预测难的问题, 形成了高陡复杂构造高含硫鲕滩气藏超高产井精细培育技术, 优质储层预测符合率从 70% 提高到 85%, 平均单井无阻流量由  $293.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  提升至  $794.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 确保了超高产井部署的效果, 实现了高产; ②研发了高含硫气藏高效溶硫产品, 解决了元素硫沉积机理及硫沉积影响的生产特征不明确问题, 支撑了硫沉积影响的全局智能优化高效决策, 形成了硫沉积气藏全生命周期智能优化稳产技术, 气藏以  $900 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  规模连续稳产 6 年以上, 实现了长期稳产; ③解决了国内高含硫气田避难风险评估技术缺乏, 以及硫化氢泄漏后大规模避难安全保障等难题, 形成了高含硫气田泄漏预警及公众防护技术, 气藏已连续安全生产超 2 500 天, 实现了安全生产。结论认为, 长期稳产关键技术的形成有力支撑了罗家寨高含硫气田“少井高产、长期稳产、安全生产”的重大开发成效, 可以为国内外同类型气藏提供有益的借鉴。

**关键词:** 四川盆地; 罗家寨气田; 飞仙关组气藏; 高含硫; 安全高效开发; 长期稳产

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2023.09.008

## Key technologies for safe and efficient development and long-term stable production of the Luojiashai high-sulfur gas field in the Sichuan Basin

GE Feng, JIA Changqing, LI Hong

(CDB Operating Company, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Natural Gas Industry, Vol.43, No.9, p.85-92, 9/25/2023. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** The Feixianguan Formation gas reservoir in the Luojiashai Gas Field is PetroChina's high-sulfur gas reservoir with the largest reserves and the highest abundance in the Sichuan Basin. With the continuous advancement of its development, its safe and efficient development has faced severe challenges in long-term stable production since 2008. In order to ensure the long-term stable production of high-sulfur gas reservoirs, this paper systematically analyzes "three difficulties" in the accurate identification of high-quality reservoirs, the whole-life-cycle productivity evaluation and maintenance under the influence of sulfur deposition, and the prewarning and monitoring of hydrogen sulfide ( $H_2S$ ) leakage under complex geographical and living environments from the perspective of whole life cycle. In addition, the key technologies for the development of high-sulfur natural gas are innovatively developed by means of multiple-discipline research including geology and engineering. And the following research results are obtained. First, the difficulties in predicting high-quality reservoirs under the background of low-quality seismic imaging, multiple-stage shoal superposition and multi-scale fracture development are solved, and the technologies in precisely cultivating super high-yield wells in high-sulfur oolitic shoal gas reservoirs with complex and steep structures are developed, which increases the prediction coincidence rate of high-quality reservoirs from 70% to 85% and the average absolute open flow (AOF) per well from  $293.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  to  $794.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , ensures the deployment effect of super high-yield wells, and achieves a high production rate. Second, an efficient sulfur dissolution product for high-sulfur gas reservoirs is researched and developed, and the depositional mechanisms of elemental sulfur and the production characteristics under the influence of sulfur deposition are clarified, which supports global, intelligent, optimized and efficient decision-making under the influence of sulfur deposition. In addition, the intelligent and optimized technology for the stable production of gas reservoirs with sulfur deposition through the whole life cycle is formed. As a result, the gas reservoir maintains a stable production at the rate of  $900 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  continuously for over 6 years, so as to realize the long-term stable production. Third, the evacuation risk assessment technologies for domestic high-sulfur gas fields are worked out, the large-scale evacuation safety after  $H_2S$  leakage is ensured, and the prewarning and public protection technologies for high-sulfur gas fields are developed. The gas reservoir has been in safe production continuously for more than 2 500 days. In conclusion, the formation of key technologies for long-term stable production provides a powerful support for the significant development achievements of the Luojiashai high-sulfur gas field, including "high yield with fewer wells, long-term stable production, and safe production." The research results can provide valuable reference for similar gas reservoirs at home and abroad.

**Keywords:** Sichuan Basin; Luojiashai Gas Field; Feixianguan Formation gas reservoir; High sulfur content; Safe and efficient development; Long-term stable production

**作者简介:** 葛枫, 1981 年生, 高级工程师; 现任中国石油西南油气田公司川东北作业分公司党委书记、总经理; 长期从事天然气开发生产、经营管理与 QHSE 等管理工作。地址: (610051) 四川省成都市锦江区滨江东路 9 号。ORCID: 0000-0001-6334-516X。E-mail: gefeng@petrochina.com.cn。

## 0 引言

天然气是最清洁低碳的化石能源,加大天然气勘探开发力度是缓解我国能源供需矛盾,推动绿色发展,构建清洁低碳、安全高效现代能源体系的必由之路<sup>[1-5]</sup>。据统计,世界天然气资源约 60% 含硫、10% 为高含硫,主要分布在海相地层中。我国高含硫气藏资源丰富,累计探明高含硫天然气储量超万亿立方米,开发潜力巨大。20 世纪九十年代末到 21 世纪初,国内油气公司加大海相油气勘探力度,相继取得一系列重大成果,在四川盆地环开江—梁平海槽东侧台缘带相继发现了渡口河、罗家寨、铁山坡、普光等大中型高含硫整装气田群<sup>[6-10]</sup>。

其中,位于川东北部地区的罗家寨气田是中国石油西南油气田公司启动开发的国内陆上单井产量最高、全球安全风险最高的特大型超深层海相高含硫碳酸盐岩整装气田。自 2008 年以来,围绕高陡构造和滩相岩性双重控制下优质储层精细辨识、硫沉积影响下全生命周期产能评价与产能维护、复杂地理与人居环境下安全风险预警与管控等制约气藏实现安全高效开发的瓶颈问题<sup>[11-13]</sup>,着力“少井高产、长期稳产、安全生产”的攻关目标,开展多专业联合攻关,采用“边攻关、边应用、边完善”的模式,创新形成针对性开发关键技术,有效支撑了 6 口井日产天然气  $9 \times 10^6 \text{ m}^3$  生产规模的建成,并已维持 6 年以上稳产,保障 2 500 天安全生产,所取得的研

究成果可以为国内外同类型气藏的安全高效开发提供有益的借鉴。

## 1 罗家寨气田开发基本特征

### 1.1 气田基本概况与主要特征

罗家寨气田位于四川省达州市宣汉县及重庆市开州区境内,构造位置位于四川盆地东北部高陡构造带,具体位于川东北大巴山前缘褶皱带与川东褶皱带交汇处。该气藏主要特征如下:①罗家寨构造可分为东、西两个潜伏构造,断层对构造形态起控制作用,如图 1 所示,共圈面积达  $61.28 \text{ km}^2$ ,闭合高度 820 m,已申报探明储量  $776.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;②高陡构造背景下的多期滩体分散叠置,储层纵横向分布呈现强非均质特征,东西部储层厚度差异大,东部储层平均厚达 60.7 m,西部储层平均厚 20.5 m;③储层整体具有中高孔隙度、中高渗透率特征,多尺度裂缝发育,储层类型为裂缝—孔隙型,试井解释气井渗透率介于 42 ~ 170 mD,比基质渗透率大 2 ~ 4 倍,裂缝对储层品质改善贡献十分显著;④气藏中部地层压力达 41.66 MPa,压力系数介于 1.05 ~ 1.28,平均气藏温度 90 °C,硫化氢 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 含量达  $138 \text{ g/m}^3$ ,存在边水,属高含硫化氢、常温常压、弹性气驱为主的边水气藏;⑤气藏早期测试微气井与超高产井并存,测试产量介于  $2 \times 10^4 \sim 302 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,产能极差达到 4 个数量级;⑥ 6 口投产气井井均产量达  $150 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,井均动

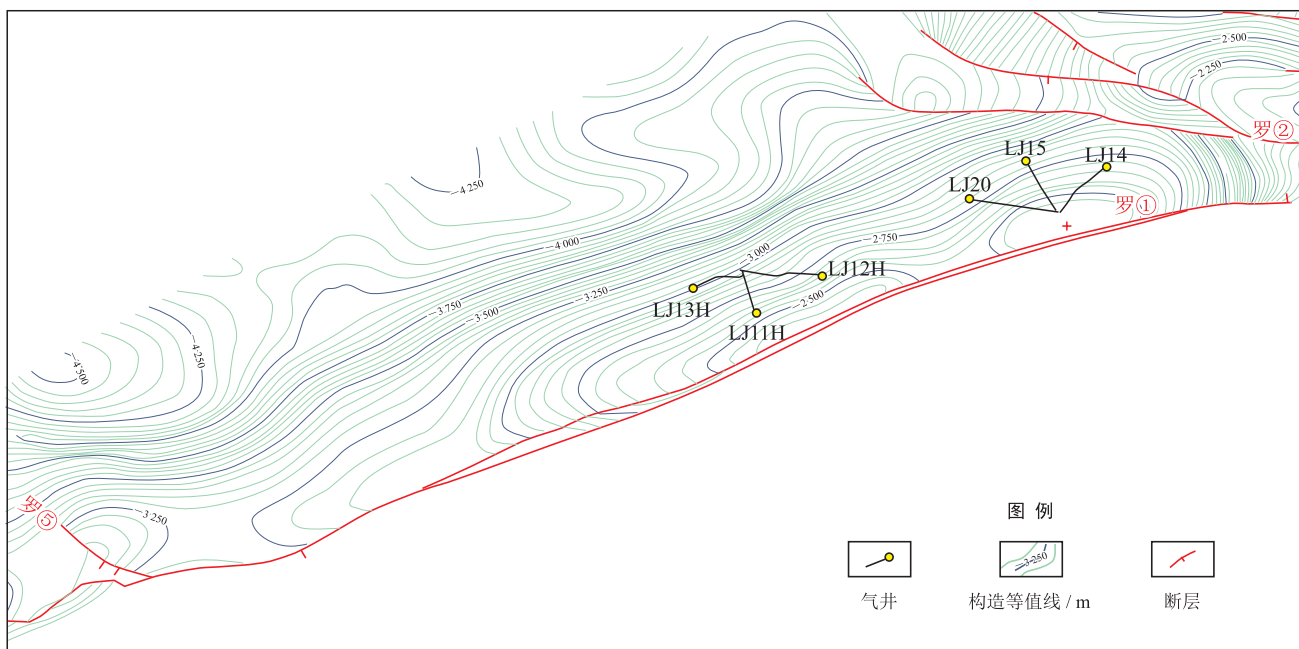


图 1 罗家寨飞仙关组气藏投产井井位图

态储量  $130 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 稳产时间 6 年以上, 投产气井高产稳产能力相对较强; ⑦随着开发生产中地层压力的下降, 部分气井在地面管汇和生产设施中出现明显的元素硫沉积现象, 气井产能下降幅度明显。

## 1.2 开发面临的挑战

罗家寨气田兼具高陡构造和滩相岩性双重控制的复杂地质特征, 处于山地地貌、人居稠密、环境敏感, 同时开发建设成本高、安全风险大, 实现气田高产稳产和安全开发是公认的世界难题<sup>[14-16]</sup>, 主要面临以下 3 大方面的挑战。

1) 高含硫高投资背景下, “少井高产”的开发方式是实现高效开发最为现实的需求, 而罗家寨气田飞仙关组储层非均质性强, 且受高陡构造地震资料成像品质影响, 优质储渗体的准确辨识与高产井位部署面临挑战。

2) 硫沉积对地下与地面生产系统影响大, 对储层“动态”伤害机理复杂, 井筒多相流动规律难以准确掌握, 全生命周期开发动态实时预测优化与产能维护难度大, 气田开发长期稳产面临挑战。

3) 气田地理和人居环境复杂, 应急防控范围大, 对安全风险实时预警与管控要求极高, 目前国内尚无成体系的硫化氢泄漏预防和监测系统可借鉴, 避难风险评估、事故应急手段与日常管理机制缺乏, 气田开发安全保障面临挑战。

## 2 开发关键技术创新

聚焦复杂高陡构造碳酸盐岩高含硫气藏“优质储层识别、产能预测及维护、泄漏预警与防护”3 个关键技术瓶颈, 以“少井高产、长期稳产、安全生产”为攻关目标, 创新形成一套适用于复杂碳酸盐岩高含硫气田高产稳产与安全开发关键技术, 以解决我国高含硫气藏安全高效开发中的关键科学问题。

### 2.1 高陡复杂构造高含硫鲕滩气藏超高产井精细培育技术

#### 2.1.1 复杂高陡构造低信噪比地震资料高精度成像处理技术

针对高陡复杂构造区储层的地震预测问题, 在改善地震高分辨率成像效果方面, 通过 3 大关键处理环节综合配套, 形成针对高陡复杂构造低信噪比资料的高精度成像处理技术, 增强鲕滩反射信号能量, 信噪比得到大幅提升, 为有效识别、钻遇优质储层提供保障。

1) 创新了面向鲕滩储层保真保幅去噪技术, 以“十”字锥形滤波技术衰减面波为主的处理技术, 提高资料的信噪比。

2) 创新了鲕滩储层弱信号增强技术, 以 VSP 资料波组特征、频率为约束条件, 以井震标定和 VSP 标定为验证手段, 反褶积中加入井约束, 在保证信噪比的基础上提高资料分辨率。

3) 创新了多信息联合约束深度域精细建模相结合的高精度成像技术, 综合地质层位信息、井信息、表层信息等多种信息约束联合建立速度场, 获得归位准确、高精度的叠前深度偏移成像, 成果与实际钻井吻合度达到 96%。

#### 2.1.2 高陡构造与多期滩相“双控”下优质储层识别技术

针对多期滩相“双控”下沉积地层横向岩性、形态和结构变化剧烈、储层预测难度大的问题, 以高精度三维地震资料为基础, 以精细标定储层特征为桥梁, 创建深度域相控储层反演技术。基于岩石物理敏感参数分析, 充分利用地震相信息, 创新应用分频构形反演获得兼具多种反演优势的更高分辨率结果, 解决沉积地层横向岩性、形态和结构变化等复杂背景下常规变差函数求解误差相对较大的问题, 实现高陡构造多期滩相“双控”下优质储层识别, 反演结果与实钻井储层厚度误差 5 m 以内, 预测符合率从 70% 提高至 85%。

#### 2.1.3 高陡构造与多期次鲕滩狭长优质储渗体精细雕刻技术

罗家寨地区飞仙关组鲕滩储层类型以裂缝—孔隙型为主, 基质物性较好, 裂缝作为沟通孔隙喉道的主要渗流通道, 是进一步改善储层物性的重要影响因素。为实现“少井超高产”目标, 需开展优质储渗体的精细刻画, 找到优质储层, 确保超高产井部署<sup>[17-22]</sup>。为此, 创新形成多尺度裂缝综合预测和高精度孔隙度预测相结合的储渗体精细刻画技术, 采用多尺度裂缝综合预测技术精细雕刻高渗透区(图 2), 利用高精度孔隙度预测技术对优质储层储渗空间进行描述(图 3), 指导了高陡复杂构造区高含硫鲕滩储层少井高产的优化井网部署。罗家寨地区大斜度井和水平井地层倾角误差降到  $5^\circ$  以下, 优质储层钻遇率 100%, 单井无阻流量最高超过  $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

### 2.2 考虑硫沉积的气藏全生命周期智能优化稳产技术

#### 2.2.1 高温高压元素硫溶解度实验测定技术

针对目前国内外无成熟、安全元素硫溶解度测

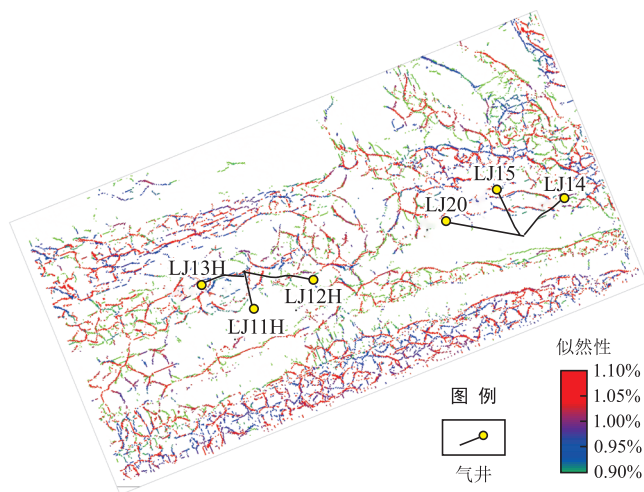


图2 罗家寨气田飞仙关组多尺度裂缝综合预测平面图

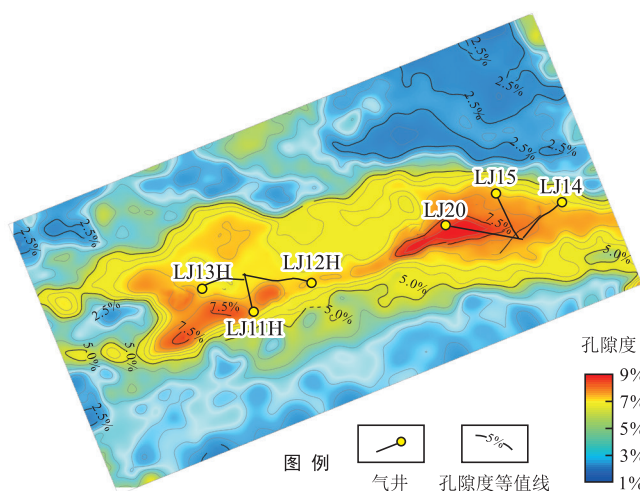


图3 罗家寨气田飞仙关组孔隙度预测平面分布图

定装置的难题<sup>[23-24]</sup>,自主研发了适用于高温高压(100 MPa, 200 ℃)高含硫气藏元素硫溶解度测定装置,创新设计了自动控制、热传感流量计量、元素硫串联吸收等六大关键系统和微动态压差(0.1 MPa)元素硫溶解度的测定方法,确保了实验过程中人员的安全。基于硫溶解度实验测定装置,可准确获取地下一井筒—地面条件下的元素硫溶解度,从而实现元素硫析出条件及位置精准预测,攻克了高温高压下安全准确测定高含硫气藏特殊相态和复杂渗流特征技术难题。应用该技术首次预测罗家寨气藏地层压力低于 24 MPa 时,储层中硫单质开始饱和析出,支撑气藏开发技术对策优化调整。

### 2.2.2 元素硫地下井筒耦合沉积规律评价技术

高含硫气藏硫沉积对储层伤害及气井产能影响较大、定量评价难度大<sup>[25-27]</sup>,攻关形成元素硫地下井筒耦合沉积规律评价技术,明确元素硫在储层、井筒

内沉积机理与运移规律,指导气井合理生产制度制定。

1) 创新了基于连续脉冲渗透率测试的储层硫沉积实时在线评价技术,实现了采用真实高含硫气体模拟地层条件下的硫沉积室内实验评价<sup>[28]</sup>,揭示元素硫析出机理及在岩心三维储集空间中的动态伤害机制,并建立了基于实验测试和硫沉积微观吸附理论的硫沉积预测模型<sup>[29]</sup>,为高含硫气藏渗流能力及产能评价提供依据。

2) 创新了高含硫井筒气—液—固多相流数值仿真技术,计算井筒举升过程中井筒内气体的流速分布,并结合硫颗粒临界悬浮流速数学模型,确定井筒内壁硫沉积临界条件,判断气井井筒在实际生产条件下是否存在硫沉积。

目前,罗家寨气藏地层压力约 27 MPa,高于储层条件下硫单质饱和析出压力(24 MPa),因此储层中尚未发生硫沉积,同时,井间连通性、近井表皮系数未发生改变,进一步证实气藏开发过程中储层尚未受到硫沉积的影响。基于一体化耦合模型发现气井举升能力逐年下降,且在投产 3 个月初期下降幅度明显,表明气井井筒在投产初期可能已出现硫沉积吸附现象,进一步应用硫溶解度模型预测在井筒 0~700 m 处硫单质颗粒会析出沉积,但由于气流速度远大于硫颗粒悬浮速度,因此目前仅在井筒壁面产生硫膜吸附。

### 2.2.3 基于大数据的高含硫气藏全生命周期智能优化决策技术

针对高含硫气藏全生命周期产能评价及产能维护难的问题<sup>[30]</sup>,考虑硫沉积影响的一体化约束条件,在智能化气田建设的基础上<sup>[31]</sup>,通过井筒—地面热力学—动力学模型耦合、气藏—井筒—地面耦合,创新建立高含硫气藏—井筒—地面一体化双向耦合数学模型。在此基础上,运用一体化模型与 DNN 神经网络模型进行高频次自动拟合、校验,同步修正预设参数,提高一体化模型高精度计算效率。从而形成考虑硫沉积影响的全局智能优化高效配产技术,气藏整体配产优化决策时间从 3 天缩短至 20 分钟,实现了对不同生产阶段、不同位置硫沉积动态分布的准确模拟。有效预测了目前罗家寨高含硫气藏硫单质沉积位置主要出现在井筒及集输场站二、三级节流阀等部位,而储层中尚未出现硫沉积,进一步预测气藏压力降低至 24 MPa 后,储层中气井近井地带 2 m 处发生硫沉积。

### 2.2.4 高效溶硫解堵应用技术

针对罗家寨气田地面集输管道存在的硫沉积堵

塞问题<sup>[32-33]</sup>，研发出了一种刺激性气味较小、溶硫效率高、腐蚀性小的复合化学溶硫解堵液，解堵液技术对策为溶硫主剂+溶硫助剂（渗透剂、悬浮剂、缓蚀剂等），溶硫剂主剂为复合胺类，研选了溶硫剂助剂为缓蚀剂、渗透剂、悬浮剂，与现场溶硫解堵液关键性能对比结果见表 1。LJ11 井集输管线，清除沉积硫质量为 200 kg，溶硫量提高 30% 以上，实现集输系统管线内硫清洗效率提升 20%。

表 1 自主研发化学溶硫解堵液与现场溶硫解堵液关键性能对比结果表

| 配方                          | 气味               | 溶硫量（40℃）/[g·（100 g） <sup>-1</sup> ] | 溶硫时间/h | 腐蚀情况                                    |
|-----------------------------|------------------|-------------------------------------|--------|-----------------------------------------|
| 现场解堵配方<br>（主要成分乙二胺）         | 刺激性气味明显          | 28～30                               | 4～6    | 金属：0.06 g/（m <sup>2</sup> ·h）<br>橡胶：溶胀  |
| 60%～70% 主剂+<br>30%～40% 水+助剂 | 轻微刺激性气味<br>（近距离） | 40～45                               | 2～4    | 金属：0.04 g/（m <sup>2</sup> ·h）<br>橡胶：无溶胀 |

2.3 高含硫气田泄漏预警及公众防护技术

2.3.1 硫化氢气体泄漏预警立体监测系统

1) 硫化氢气体泄漏预防系统：基于井筒到地面全流程硫化氢气体泄漏预防考虑，建立一套包括高含硫气田设计标准、高抗硫材质选择、管线与设备腐蚀管理、超压保护、紧急关停和第三方破坏预防等综合预防系统，严控硫化氢气体泄漏发生。

2) 硫化氢气体泄漏监测系统：部署 5 种监测技术联动运行，将分布式光纤声波感应技术（DAS）、

负压波泄漏监测技术、无线点式 H<sub>2</sub>S/LEL 监测技术相结合的方式作为泄漏检测主体<sup>[34-36]</sup>，管道穿越河流或挡土墙等分布式光纤无法正常使用的盲区，应用气云成像摄像技术和点式 H<sub>2</sub>S 探测器检测 2 种辅助技术进行补充，以此集成具有项目特色的管道泄漏检测系统 PLDS，保证 30 km 管线全覆盖无死角，不同类型管道泄漏监测系统检测技术及应用效果见表 2。检测系统经过 5 年多的运行，提高了泄漏检测准确性，实际运行效果显著，泄漏检测率保持 100%。

表 2 管道泄漏监测系统检测技术及应用效果表

| 泄漏监测技术                       | 工作原理                                                               | 应用效果评价                                                     |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 分布式光纤声波感应                    | 利用与管线同沟敷设的光纤，对管线的泄漏点进行检测和定位，分布式光纤声波感应技术还可检测管线两侧的第三方活动情况            | 检测灵敏度高，能及时检测到温度、声音及震动，分布式光纤声波感应技术监测会受附近机械振动干扰              |
| 负压波泄漏监测                      | 当管道内流体发生扰动时，不平衡能量会以压力波的形式向管线两端扩散到压力变送器处，对管线泄漏点进行定位                 | ATMOS 负压波系统在发生气体泄漏时，能快速定位出泄漏点的位置，但不适用气相介质管道                |
| 气体云成像摄像                      | 根据红外吸收光谱的原理对泄漏气体进行实时监测，能识别泄漏的气体种类及泄漏量，并且可以自动追踪气体云的扩散方向             | 在设计中避免监测盲区，监测手段直接，更为准确。能监测大范围内的小泄漏量，但视线不能受阻                |
| 无线点式 H <sub>2</sub> S/LEL 监测 | 常规的点式 H <sub>2</sub> S 及可燃气体检测器，外加太阳能供电以及无线数据传输技术，可解决偏远地区气体泄漏检测的盲区 | 管线上的硫化氢探测器分布在地势低洼和人口密集的高后果区域，一旦硫化氢泄漏将及时报警，为管线关停和人员撤离提供重要依据 |

3) 硫化氢气体泄漏报警系统：根据硫化氢浓度，建立了场站和社区两级智能化警报系统。在气田各井场、集气站、天然气厂和硫磺厂设置各自相对独立的火气探测系统及报警装置；社区应急计划区覆盖社区报警系统（CAS），共约 100 km<sup>2</sup>，分为 20 个社区警报分区，由 40 个警报站组成。并开展地形声场研究，保证应急计划区内 75 分贝全覆盖。社区警报由南坝安全控制中心根据管线检测系统传来的数据进行激活，每个社区警报器均可手动或远程启动，

有保安 24 h 现场值守，并在每月 15 日进行全系统测试。

2.3.2 高含硫气藏避难室检测评估技术与避难防护体系

1) 高含硫气藏避难室检测评估技术：针对国内缺乏避难风险评估技术<sup>[37]</sup>，高含硫气田周边居民房屋类型多样，硫化氢泄漏后大规模避难很难得到安全保障等难题。考虑居民房屋类型和有毒气体扩散时间分布特性，研发了高精度避难室空气交换率检测

技术及避难室内外有毒气体浓度数值模拟技术, 准确率达 90% 以上, 显著降低了由于疏散不及时导致的周边居民生命风险。通过建立现有居民房屋避难风险评估体系, 改造了现有民房, 保障就地避难人员的 1 h 安全时间, 减少了周边居民暴露于有毒空气下的风险。

2) 高含硫气藏避难防护体系: 针对可能发生的有毒气体泄漏事故, 创新了阶梯型避难室防护体系,

采用就地避难策略, 根据距离的远近, 设定不同的避难室防护标准, 能够在可能影响区域大规模布设避难室, 解决由于费用问题无法实现大规模布设避难室的难题, 解决我国应对高含硫气田毒气泄漏事故应急手段单一、防护能力不足的问题, 全面提升我国高含硫油气田重大泄漏事故的人员保护能力和应急技术水平, 川东北项目社区应急避难室设置见表 3 所示。

表 3 川东北项目社区应急避难室部分统计表

| 区域  | 敏感点名称      | 距离含硫设施 /<br>m | 人数 /<br>名 | 面罩数 /<br>个 | H <sub>2</sub> S 探测器数量 /<br>个 | 避难所数量 /<br>个 | 可容纳人数 /<br>名 |
|-----|------------|---------------|-----------|------------|-------------------------------|--------------|--------------|
| 南坝镇 | 南坝镇养老院     | 440           | 76        | 116        | 41                            | 41           | 82           |
| 塔河镇 | 塔河爱心幼儿园    | 600           | 146       | 192        | 8                             | 8            | 240          |
|     | 高桥敬老院      | 600           | 34        | 34         | 6                             | 54           | 108          |
|     | 高桥齐力梦星月幼儿园 | 120           | 96        | 235        | 4                             | 4            | 120          |
| 高桥镇 | 高桥齐力中心校幼儿园 | 230           | 65        | 188        | 3                             | 3            | 90           |
|     | 高桥中心小学幼儿园  | 500           | 45        | 83         | 1                             | 1            | 50           |
|     | 高桥育苗幼儿园    | 400           | 235       | 394        | 8                             | 8            | 320          |
| 合计  |            |               | 697       | 1 242      | 71                            | 119          | 1 010        |

2.3.3 应急计划区划分方法和公众应急疏散常态化管理机制

针对国内未建立高含硫气田应急计划区和硫化氢泄漏公众应急疏散机制, 导致事故发生后难以及时有效组织大规模公众疏散的难题。基于硫化氢特性和临界量、地形和气象条件等影响因素, 分析硫化氢泄漏扩散后的浓度场和毒性负荷分布, 结合国内外广泛认可的气体浓度和毒性负荷阈值参数, 创建了重大毒气泄漏事故应急计划区划分方法。建立了横跨川渝地区 4 个镇, 面积达 100 km<sup>2</sup>, 涉及 8 万余居民的高含硫气田应急计划区, 包括 20 个社区, 警报分区分布 40 台社区警报、33 个社区集合点、26 个敏感点、222 个就地庇护室。形成了常态化公众应急培训与演练机制, 确保公众所面临的风险处于可接受的范围。

3 气田开发成效

通过三大方面开发关键技术的系统集成与规模应用, 强力支撑了罗家寨气田高效开发和安全运行。

1) 高含硫鲕滩优质储层预测符合率从 70% 提高到 85%, 高产井部署模式可靠, 优质储层钻遇率达到 100%, 平均单井无阻流量由 293.4×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 提升至 794.3×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d, 提高单井产能成效显著。

2) 气藏以 900×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 规模连续稳产 6 年以上, 累计产气量超 160×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 气井平均油压年递减率小于 5%, 平均控制储量 130×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 单位压降采气量 15×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/MPa, 高产稳产能力强。

3) 气藏已连续安全生产超 2 500 天, 单井产量居国内碳酸盐岩气藏首位, 成功破解高含硫气藏安全清洁高效开发这一国际难题, 使我国复杂碳酸盐岩高含硫气田高产稳产与安全开发关键技术整体跻身世界前列。

4 结论

针对高陡构造和滩相岩性双重控制的复杂背景下地震成像品质低、优质储渗体精细刻画难度大的问题, 创新形成高陡复杂构造高含硫鲕滩气藏超高产气井精细培育技术, 落实气田高产井部署模式, 实现少井高产。

针对硫沉积对地下与地面生产系统的影响, 创新形成考虑硫沉积的气藏全生命周期智能优化稳产技术, 研发了高含硫气藏高效溶硫产品, 揭示了硫沉积对储层伤害机理, 明确井筒多相流动规律, 支撑了硫沉积影响的全局智能优化高效决策, 实现气藏长期稳产。

针对罗家寨高含硫气田人口密集、管线高程差异大、河流多等特点, 创新形成高含硫气田泄漏预警及公众防护技术, 解决了国内高含硫气田避难风险评估技术缺乏以及硫化氢泄漏后大规模避难难以得到安全保障等难题, 实现气藏安全生产。

### 参 考 文 献

- [1] 邹才能, 郭建林, 贾爱林, 等. 中国大气田科学开发的内涵[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 1-12.  
ZOU Caineng, GUO Jianlin, JIA Ailin, et al. Connotation of scientific development for giant gas fields in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 1-12.
- [2] 马新华. 四川盆地天然气发展进入黄金时代[J]. 天然气工业, 2017, 37(2): 1-10.  
MA Xinhua. A golden era for natural gas development in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 1-10.
- [3] 马新华. 天然气与能源革命——以川渝地区为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 1-8.  
MA Xinhua. Natural gas and energy revolution: A case study of Sichuan-Chongqing gas province[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 1-8.
- [4] 贾承造, 张永峰, 赵霞. 中国天然气工业发展前景与挑战[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 1-11.  
JIA Chengzao, ZHANG Yongfeng, ZHAO Xia. Prospects of and challenges to natural gas industry development in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 1-11.
- [5] 郇峰, 刘保磊, 李茂林, 等. 全球天然气发展趋势与启示[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(6): 13-21.  
Gao Feng, Liu Baolei, Li Maolin, et al. Global natural gas development trend and enlightenment[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(6): 13-21.
- [6] 孔凡群, 王寿平, 曾大乾. 普光高含硫气田开发关键技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(3): 1-4.  
KONG Fanqun, WANG Shouping, ZENG Daqian. Key techniques for the development of the Puguang Gas Field with a high content of  $H_2S$ [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(3): 1-4.
- [7] 杜志敏. 国外高含硫气藏开发经验与启示[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 35-37.  
DU Zhimin. Oversea experiences of acid gas reservoir development and their enlightenments[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 35-37.
- [8] 戴金星, 胡见义, 贾承造, 等. 科学安全勘探开发高硫化氢天然气田的建议[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 1-4.  
DAI Jinxing, HU Jianyi, JIA Chengzao, et al. Suggestions for scientifically and safely exploring and developing high  $H_2S$  gas fields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2): 1-4.
- [9] 冉隆辉, 陈更生, 徐仁芬. 四川盆地罗家寨大型气田的发现和探明[J]. 海相油气地质, 2005, 10(1): 43-47.  
RAN Longhui, CHEN Gengsheng, XU Renfen. Discovery and exploration of LuoJiazhai Gas Field, Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(1): 43-47.
- [10] 苏立萍, 罗平, 胡社荣, 等. 川东北罗家寨气田下三叠统飞仙关组鲕粒滩成岩作用[J]. 古地学报, 2004, 6(2): 182-190.  
SU Liping, LUO Ping, HU Sherong, et al. Diagenesis of oolitic bank of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in LuoJiazhai Gas Field, northeastern Sichuan Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(2): 182-190.
- [11] 孙天礼, 朱国, 梁中红, 等. 元坝高含硫气田地面系统腐蚀主控因素研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(1): 77-82.  
SUN Tianli, ZHU Guo, LIANG Zhonghong, et al. Study on main control factors of surface system corrosion in Yuanba high sulfur gas field[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2021, 50(1): 77-82.
- [12] 田源, 顾锡奎, 王敏安, 等. 高含硫气田元素硫沉积研究进展[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(1): 78-85.  
TIAN Yuan, GU Xikui, WANG Min'an, et al. Research progress of elemental sulfur deposition in high sulfur gas fields. [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2022, 51(1): 77-85.
- [13] 林丽君, 何明格, 马梓瀚. 一种应用于高含硫气井的智能取垢器系统设计[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 175-182.  
LIN Lijun, HE Mingge, MA Zihan. Design of an intelligent fouling-getting system in natural gas well with high sulfur content[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(3): 175-182.
- [14] 胡勇, 惠栋, 彭先, 等. 高含硫气藏开发关键技术新进展、挑战及攻关方向[J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 23-31.  
HU Yong, HUI Dong, PENG Xian, et al. Key development technologies for high-sulfur gas reservoirs: New progress, challenges and key research directions[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 23-31.
- [15] 王一刚, 窦立荣, 文应初, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏  $H_2S$  成因研究[J]. 地球化学, 2002, 31(6): 517-524.  
WANG Yigang, DOU Lirong, WEN Yingchu, et al. Origin of  $H_2S$  in Triassic Feixianguan Formation gas pools, northeastern Sichuan Basin, China[J]. Geochimica, 2002, 31(6): 517-524.
- [16] 李鹭光. 高含硫气藏开发技术进展与发展方向[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 18-24.  
LI Luguang. Progress in and developing orientation of technologies for the recovery and production of high-sulfur gas reservoirs in China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 18-24.
- [17] 郭旭升, 胡东风. 川东北礁滩天然气勘探新进展及关键技术[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 6-11.  
GUO Xusheng, HU Dongfeng. Newest progress and key techniques in gas exploration of reef-bank reservoirs in the northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 6-11.
- [18] 郭彤楼. 川东北地区台地边缘礁、滩气藏沉积与储层特征[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 201-211.  
GUO Tonglou. The characteristics of sedimentation and reservoirs of reef-beach gas fields in carbonate platform margins, northeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 201-211.
- [19] 刘宏, 谭秀成, 周彦, 等. 川东北黄龙场气田飞仙关组台缘滩

- 型碳酸盐岩储层预测[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 219-224.
- LIU Hong, TAN Xiucheng, ZHOU Yan, et al. Prediction of platform-edge bank carbonate reservoir in Feixianguan Formation of Huanglongchang Gas Field in the northeastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 219-224.
- [20] 张敏知. 生物礁地球物理响应特征及储层预测——以川东北 SYB 地区长兴组为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- ZHANG Minzhi. The geophysical response characteristics of reef and reservoir prediction—A case study of the SYB area in Northeast Sichuan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [21] 敬朋贵. 川东北地区礁滩相储层预测技术与应用[J]. 石油物探, 2007, 46(4): 363-369.
- JING Penggui. Reservoir prediction technology of reef-flat facies in Northeast Sichuan Province and its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(4): 363-369.
- [22] 刘殊, 唐建明, 马永生, 等. 川东北地区长兴组—飞仙关组礁滩相储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 332-339.
- LIU Shu, TANG Jianming, MA Yongsheng, et al. Prediction of reef and shoal facies reservoirs in Changxing-Feixianuan formations in Northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 332-339.
- [23] 杨学锋, 黄先平, 钟兵, 等. 高含硫气体中元素硫溶解度实验测定及计算方法研究[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 416-419.
- YANG Xuefeng, HUANG Xianping, ZHONG Bing, et al. Experimental test and calculation methods of elemental sulfur solubility in high sulfur content gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 416-419.
- [24] 钟太贤, 袁士义, 周龙军, 等. 含硫天然气相态及渗流[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 109-111.
- ZHONG Taixian, YUAN Shiyi, ZHOU Longjun, et al. Phase behavior and flow of sour gas under reservoir conditions[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 109-111.
- [25] 杨学锋. 高含硫气藏特殊流体相态及硫沉积对气藏储层伤害研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2006.
- YANG Xuefeng. A study on the special phase behavior of multiphase fluid in gas reservoirs with high sulfur content and formation damage caused by the sulfur deposition[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2006.
- [26] 曾平, 赵金洲, 周洪彬. 高含硫气藏元素硫沉积对储集层的伤害[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 113-115.
- ZENG Ping, ZHAO Jinzhou, ZHOU Hongbin. Formation damage from elemental sulfur deposition in sour gas reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 113-115.
- [27] 王琛. 硫的沉积对气井产能的影响[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 56-58.
- WANG Chen. The effect of sulfur deposition on gas well deliverability[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(5): 56-58.
- [28] 李农, 赵立强, 惠栋, 等. 高含硫储层硫沉积微观特性[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 168-174.
- LI Nong, ZHAO Liqiang, HUI Dong, et al. Microscopic characteristics of sulfur depositions in high-sulfur-content reservoirs[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(1): 168-174.
- [29] HE Liu, ZHANG Li, WAN Ying, et al. Structures and energetics of elemental sulfur in hydrogen sulfide[J]. Journal of Cluster Science, 2022, 33(3): 1157-1164.
- [30] 张勇, 杜志敏, 郭肖, 等. 硫沉积对高含硫气藏产能影响数值模拟研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(6): 94-96.
- ZHANG Yong, DU Zhimin, GUO Xiao, et al. A numerical simulation study on the impact of sulfur deposit on productivity of Sour gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(6): 94-96.
- [31] 李玥洋, 任静思, 张苏, 等. 智能气田一体化模型数据共享平台建设与实践[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(1): 155-162.
- LI Yueyang, REN Jingsi, ZHANG Su, et al. Construction and application of intelligent gas field integrated model data sharing platform[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(1): 155-162.
- [32] 胡德芬, 侯梅, 徐立, 等. 高含硫气井集输系统天然气水合物的防治——以川东地区高含硫气井为例[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 78-82.
- HU Defen, HOU Mei, XU Li, et al. Gas hydrate control measures for gathering system of high-sulfur gas wells in eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 78-82.
- [33] 黎洪珍, 杨涛, 徐春碧, 等. 高含硫气井存在的问题及对策探讨[J]. 钻采工艺, 2008, 31(6): 118-121.
- LI Hongzhen, YANG Tao, XU Chunbi, et al. Research on existent problems and processing measures in high sour gas wells[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(6): 118-121.
- [34] 王寿平, 龚金海, 刘德绪, 等. 普光气田集输系统安全控制与应急管理[J]. 天然气工业, 2011, 31(9): 116-119.
- WANG Shouping, GONG Jinhai, LIU Dexu, et al. Safety control and emergency management of the gathering and transmission system in the Puguang Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(9): 116-119.
- [35] 涂强, 周大为, 银小兵, 等. 川渝地区高含硫气田开发的 HSE 保障体系建设探讨[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 102-105.
- TU Qiang, ZHOU Dawei, YIN Xiaobing, et al. An HSE guarantee system for the development of high H<sub>2</sub>S gas fields in Sichuan and Chongqing area[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 102-105.
- [36] 章博. 高含硫天然气集输管道腐蚀与泄漏定量风险研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- ZHANG Bo. Analysis on risk due to corrosion and leakage of high sulfide natural gas gathering pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [37] 魏孔瑞. 高含硫气田集气站风险评价技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- WEI Kongrui. Research on risk assessment technology of gathering station in high sulfur gas field[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.

(修改回稿日期 2023-06-10 编辑 韩 建)



本文互动