

2) 当进气压力高于二级额定进气压力 $p_{in,2}$ 低于 $p_{in,3}$ 时, 球罐放气至 p_2 的放气量为 m_{s2} , 此过程压缩机第一级不做功, 第二、三级指示功耗为:

$$W_{s2,2} = \int_{m=0}^{m_{s2}} RT_3 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{m_{总} - m_{s1}}{m_{总} - m_{s1} - m} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] dm \quad (5)$$

$$W_{s2,3} = mRT_3 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{out,3}}{p_{in,3}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (6)$$

3) 当进气压力低于二级额定进气压力 $p_{in,2}$ 时, 球罐放气至 $p_{终}$ (0.2MPaA) 的放气量为 m_{s3} , 此过程各级指示功耗为:

$$W_{s3,1} = \int_{m=0}^{m_{s3}} RT_3 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{m_{总} - m_{s1} - m_{s2}}{m_{总} - m_{s1} - m_{s2} - m} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] dm \quad (7)$$

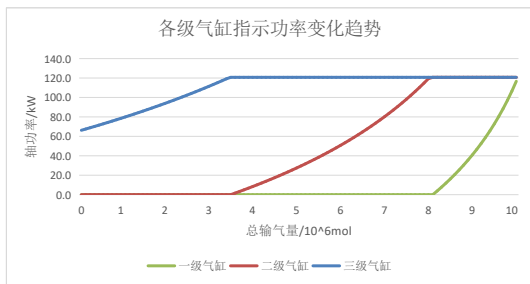
$$W_{s3,2} = mRT_2 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{out,2}}{p_{in,2}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (8)$$

$$W_{s3,3} = mRT_3 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{out,3}}{p_{in,3}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (9)$$

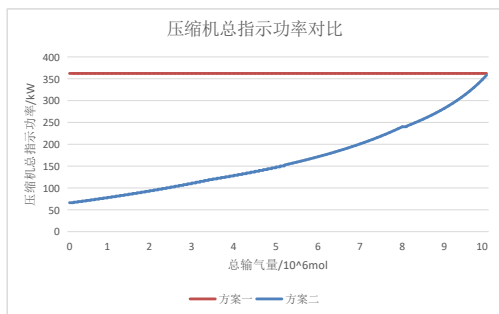
则压缩机总指示功耗为:

$$W = W_{s1,3} + W_{s2,2} + W_{s2,3} + W_{s3,1} + W_{s3,2} + W_{s3,3} \quad (10)$$

压缩机按三级等压比设置, 压缩过程按理想气体绝热压缩考虑, 每级进口温度按 40℃, 则计算出两种方案压缩机气缸指示功耗随输气量变化趋势如下:



图二 方案二各级气缸的指示功率变化趋势



图三 两种方案总指示功率变化趋势

两种方案总指示功耗结果计算如下:

表一 两种方案总指示功耗的结果

	方案一	方案二
总指示功耗, kW·h	20280	9330

可见, 相较于减压方案, 应用无级气量调节系统, 在一个完整球罐气循环, 压缩机指示功耗可降低约 54%, 节能效果十分显著。

5 无级气量调节系统应用的注意事项

无级气量调节系统也并非完美无缺的, 其造价成本较高, 控制系统复杂, 对于压缩机组来说, 增加了易损件, 降低了整个机组的可靠性。高频开关电磁阀作为核心部件, 其可靠性需要重点关注。

在氢气压缩机上应用时, 则要求压缩机的所有气缸均按照球罐初始气压力设计, 使得在初期高压进气时气缸有足够的承压能力。这会造成压缩机的成本增加。

无级气量调节系统通过改变气缸的有效容积, 理论上可以实现 0~100% 的全范围调节, 但在实际应用时, 调节范围太大会造成连杆小头反向角不足。API 618 规定: 有槽小头轴瓦的反向角至少应为 15°, 无槽小头瓦的反向角至少应为 45°。尤其是在小流量高压力的场景, 反向角限制更为明显^[5], 这时压缩机气缸在设计时应考虑采用增大气缸缸径, 设置尾部平衡杆等措施, 增大反向角。这对压缩机的结构设计带来挑战, 也同时造成了压缩机的可靠性下降。因此在满足使用要求的情况下, 应尽量减小调节范围, 在操作时应应对调节范围严格控制, 避免反向角过小造成烧瓦。

6 总结

氢气球罐气况的氢气压缩机能耗问题值得关注, 经过初步分析, 相较于传统减压至最低气压力的方案, 应用无级气量调节系统, 氢气无减压直接进压缩机, 能大幅降低氢气压缩机能耗, 节能效果显著。在工程实践中, 应关注其造成的压缩机造价升高, 可靠性下降和反向角不足等问题。

参考文献

- [1] 中德能源与能效合作伙伴. 绿氢认证: 欧盟近期工作和进展 [M].2022.7
- [2] 龚思琦, 杨洋等. 风光互补发电制氢耦合合成氨系统的配置分析[J]. 洁净煤技术. 2024.30(05):38-45.
- [3] 王玉莉, 李成海, 陈军. 基于无级气量调节系统的往复压缩机优化设计[J].压缩机技术.2025.(02):24-28.
- [4] 郁永章等. 容积式压缩机技术手册[M].机械工业出版社.2000.
- [5] 文孟刚, 郁永章, 李云. 反向角问题的理论分析及其工程应用研究[J].压缩机技术.2016.(06):1-5+10.

Research and Application of Dynamic Monitoring Scheme for Well Area 530 in Zone 8

Pengtao Yang¹ Panxiang Dai² Xiaowen Zhang¹ Duomin Hao¹

1. West Drilling Engineering Co., Ltd. Oil Testing Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China

2. Xinjiang Oilfield Development Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China

Abstract

This study systematically investigates dynamic monitoring techniques for Well Area 530 in Zone 8. Through analysis of regional geological characteristics and tracer application effectiveness, the limitations of traditional monitoring methods are identified, and a dynamic monitoring scheme based on multi-source information fusion is proposed. Research findings indicate that the area features a complex fracture-pore dual-medium reservoir with strong heterogeneity, where conventional tracer monitoring shows significant quantitative characterization deficiencies. The newly designed dynamic monitoring scheme employs a stepped injection system and multi-parameter inversion method to achieve precise evaluation of inter-well connectivity, providing crucial technical support for efficient oilfield development.

Keywords

dynamic monitoring; tracer; inter-well connectivity; well pattern design

八区 530 井区动态监测方案研究与应用

杨鹏涛¹ 代潘祥² 张晓文¹ 蒿多民¹

1. 西部钻探工程有限公司试油公司, 中国·新疆 克拉玛依 834000

2. 新疆油田分公司, 中国·新疆 克拉玛依 834000

摘要

本文系统研究了八区530井区动态监测技术方法, 通过分析区域地质特征和示踪剂应用效果, 指出了传统监测方法的局限性, 提出了基于多源信息融合的动态监测方案。研究表明, 该区发育复杂的裂缝-孔隙双介质储层, 非均质性强, 传统示踪剂监测在定量表征方面存在明显不足。新设计的动态监测方案采用阶梯注入制度和多参数反演方法, 实现了井间连通性的精准评价, 为油田高效开发提供了重要技术支撑。

关键词

动态监测; 示踪剂; 井间连通性; 方案设计

1 引言

1.1 区域地质特征

八区 530 井区位于准噶尔盆地西北缘, 构造上属于克百断裂带下盘, 区域构造背景复杂, 经历了多期构造运动。主要含油层系为下克拉玛依组, 埋藏深度 2100-2400 米。储层岩性以砂砾岩为主, 成分成熟度较低, 结构成熟度中等。砂体主要发育辫状河三角洲前缘亚相, 储层空间类型多样, 包括原生孔隙、次生溶孔。

1.2 储层物性特征

下克拉玛依组储层物性表现出较强的非均质性。根据岩心分析资料, 孔隙度主要分布在 8%-16% 之间, 平均

10.6%; 渗透率变化范围较大, 为 0.1-125mD, 平均 2.1mD, 属低孔、特低渗的储集层。储层微观孔隙结构复杂, 根据高压压汞资料, 孔喉中值半径分布在 0.04 ~ 3.33 μm , 平均为 0.28 μm , 以特小孔道储层为主。孔隙配位数 2-8, 平均 4.2, 反映出储层具有较复杂的孔隙连通关系。这种强烈的非均质特征给油田开发带来了巨大挑战, 特别是注气开发过程中容易出现气体突进和受效不均等问题。

1.3 开发历程及现状

八区 530 井区于 2008 年投入开发, 初期采用衰竭式开采, 2015 年开始实施注气开发。目前全区共有油井 45 口, 注气井 12 口。经过多年开发, 地层压力由原始的 23.5MPa 下降至目前的 18.2MPa, 综合含水率 68.3%, 采出程度 21.6%。

近年来, 随着开发的深入, 暴露出诸多问题: 气体沿优势通道突进明显, 井组间受效差异大, 部分区域地层压力保持水平低, 严重影响了开发效果。2024 年的动态监测

【作者简介】杨鹏涛 (1993-), 男, 中国河南郑州人, 本科, 工程师, 从事油气井测试研究。

数据显示，气体主要沿北西方向突进，最大突进速度达到 18.2m/h，导致部分生产井过早气窜，开发形势日趋复杂。

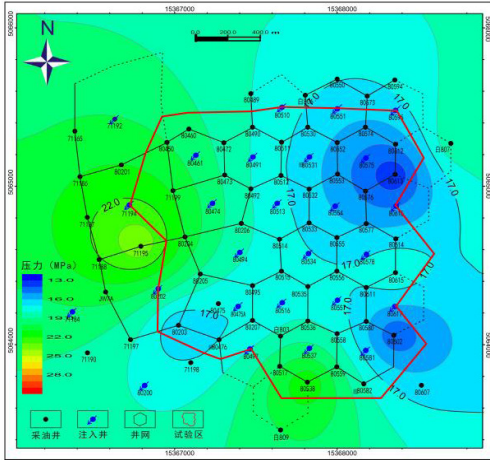


图 1.1 2017 年试验区地层压力

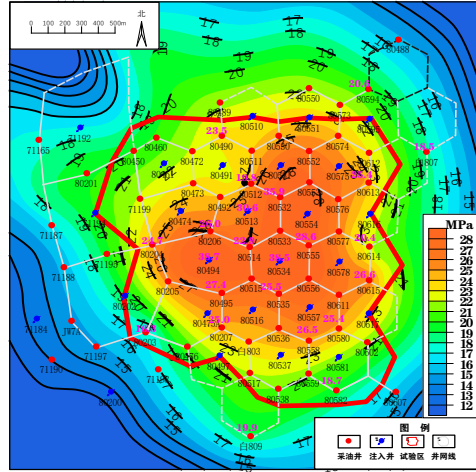


图 1.2 2022 年试验区地层压力

2 示踪剂应用效果及缺陷

2.1 示踪剂监测成果

2024年在八区530井区开展了系统的示踪剂监测工作，采用GST系列示踪剂，监测范围覆盖3个注气井组(图2.1)。监测数据显示(表1)，示踪剂突破时间具有明显的方向性差异：西北方向见剂时间最早，为10小时；东南方向最晚，为24小时。

表 1 注入井 80557 井井组示踪剂见效时间、运移速度

注入井	生产井	井间距离 m	见效时间 d	运移速度 m/d
80557	80556	183.6	10	18.36
	80535	202.0	16	12.62
	80515	390.5	18	21.69
	80615	397.1	26	15.27
	80611	194.6	16	12.16
	80580	221.8	32	6.93
	80495	531.1	26	20.43
	白 803	422.4	24	17.60

浓度变化特征表明，各方向均出现多峰现象，其中

80557 井组表现最为典型(图 2.2)，监测到 3-4 个明显波峰，反映出气体沿多条通道推进的特征。通过示踪剂运移速度计算，识别出三类连通通道：裂缝性通道运移速度大于 15m/h，孔隙性通道运移速度约 10m/h，混合型通道运移速度 12-14m/h。

2.2 示踪剂资料的地质认识

示踪剂监测为认识油藏地质特征提供了重要依据。首先，证实了西北向裂缝系统是主要的渗流通道，这与构造研究结果相吻合。其次，示踪剂浓度场的空间分布反映了储层非均质性的强弱程度，高浓度区对应于高渗条带，低浓度区对应于低渗区。第三，多峰特征说明储层内部存在多级次渗流通道，宏观裂缝与微观孔隙共同构成了复杂的渗流网络。

2.3 传统示踪剂方法的局限性

尽管示踪剂监测取得了重要认识，但传统方法仍存在明显不足。首先，示踪剂浓度解释多基于定性分析，缺乏精确的定量表征手段。其次，传统对流-扩散模型无法准确描述复杂裂缝网络中的示踪剂运移行为^[1]，特别是在多重介质条件下。第三，井间干扰影响难以有效排除，导致解释结果存在多解性。

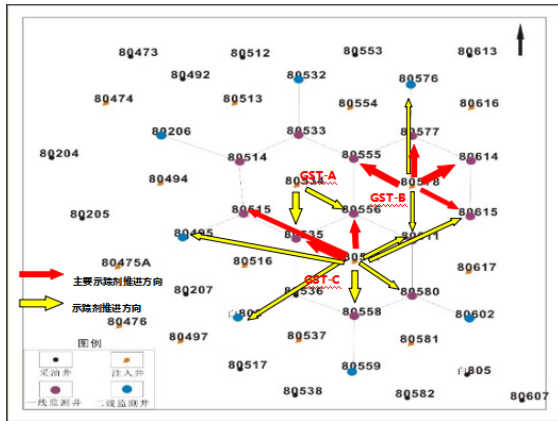


图 2.1 八区 530 井区示踪剂结果

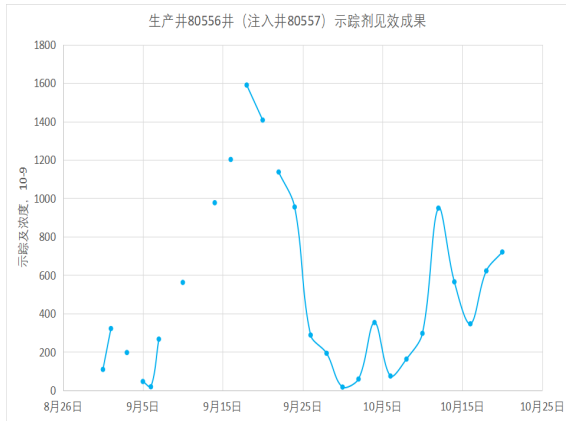


图 2.2 生产井 80556 井示踪剂浓度曲线

具体表现在以下几个方面：示踪剂突破时间的解释未考虑裂缝开度的非均匀分布；浓度变化的分析忽略了基质与裂缝的交换作用；波峰特征的解释缺乏严格的数学物理模型支持。这些局限性严重制约了示踪剂资料在地质建模和开发调整中的应用效果。

3 动态监测方案原理及设计

3.1 动态监测理论基础

针对传统方法的局限性，本研究提出了基于多源信息融合的动态监测新方法。理论基础包括三个方面：首先是分数阶微分理论，用于描述复杂通道中的异常扩散现象；其次是多相渗流理论，考虑气-液两相相互作用对示踪剂运移的影响；第三是信号处理理论，实现监测数据的降噪和特征提取^[2]。

新的数学模型突破了传统对流-扩散方程的局限，引入了时间分数阶导数和空间分数阶导数项，控制方程如下：

$$\begin{cases} \frac{\partial^\alpha C}{\partial t^\alpha} = -\mathbf{v} \cdot \nabla C + D \frac{\partial^\beta C}{\partial t^\beta} + Q(x, t) \\ C(x, 0) = C_0(x) \\ C(x, t) = g(x, t) \end{cases}$$

其中：

α ：时间分数阶导数的阶数， $0 < \alpha \leq 1$ 。

C ：示踪剂的浓度，是空间位置 x 和时间 t 的函数，单位是 mg/L 或 ppm ；

\mathbf{v} ：流体的速度矢量（在多孔介质中，通常是达西速度）；

$-\mathbf{v} \cdot \nabla C$ ：对流项，表示流体携带示踪剂运动；

D ：扩散系数（或弥散系数）。它表示示踪剂由于浓度梯度而发生的分子扩散和机械弥散；

β ：空间分数阶导数的阶数， $1 < \beta \leq 2$ 。

α 和 β 通过岩心实验数据确定，为岩性在研究区取值范围分别为 0.7-0.9 和 1.2-1.5。该模型能更准确地描述示踪剂在裂缝-孔隙介质中的运移行为，特别是在非均质强、尺度效应明显的储层中。

3.2 监测方案设计原则

新的动态监测方案遵循以下设计原则：一是系统性原则，考虑注采系统的整体性和关联性；二是差异性原则，针对不同地质特征设计个性化方案三是可操作性原则，确保方案在现场易于实施。具体而言，方案设计考虑了以下几个方面的因素：井网部署特征、储层非均质程度、裂缝发育状况、当前开发矛盾、现有技术条件等。通过多因素综合分析，确定监测的重点区域、关键参数和适用技术，形成针对性的监测方案。

3.3 阶梯注入制度设计

注入制度是动态监测的核心内容。本研究设计了三级阶梯注入方案：第一级为低速注入阶段，注入速度 7t/d ，持

续时间 5 天，主要用于激活孔隙通道；第二级为中速注入阶段，注入速度 15t/d ，持续时间 5 天，用于识别中等渗流通道；第三级为高速注入阶段，注入速度 30t/d ，持续时间 3 天，用于揭示裂缝系统响应。

注入速度的选择基于以下考虑：低速注入对应基质系统的渗流能力，中速注入对应微裂缝的渗流能力，高速注入对应宏观裂缝的渗流能力。通过分析不同注入速度下的压力响应和流体运移特征，可以识别不同级次的渗流通道，定量评价其贡献程度。

3.4 监测网络优化部署

监测网络的部署采用“点-线-面”相结合的方式。在点的布置上，重点考虑构造关键部位、裂缝发育带和开发矛盾突出区域；在线的布置上，沿主要裂缝方向和垂直裂缝方向设置监测剖面；在面的控制上，确保监测覆盖整个井区。

具体部署方案如下：在西北部布置 2 条监测剖面，共计 15 个监测点；在东北方向布置 1 条监测剖面，7 个监测点；在东南部相对均质区布置 1 条监测剖面，4 个监测点。监测点优先选择生产稳定的油井，避免关井和作业井。

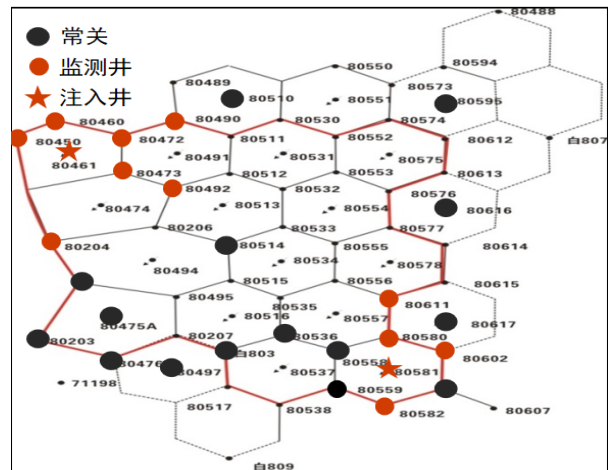


图 3.1 八区 530 井区动态监测网络部署

3.5 数据采集与处理方法

数据采集采用多类型传感器组合的方式。压力监测使用高频电子压力计，采样间隔 1 分钟；流量采样间隔 5 分钟。数据处理采用先进的信号分析技术。首先进行数据质量控制，剔除异常值；然后进行背景校正，消除环境因素影响；最后进行特征提取，获取突破时间、峰值浓度、波峰宽度等关键参数。整个过程实现自动化，大大提高处理效率和准确性。

3.6 现场实施技术要求

现场实施需要满足以下技术要求：一是注入系统稳定性要求，注入压力波动范围控制在 $\pm 0.5\text{MPa}$ 以内；二是监测设备精度要求，压力测量误差小于 0.1%，流量测量误差小于 1%；三是取样质量要求，样品剪代表性强，保存条件合格；四是数据传输要求，实时可靠，延迟小于 1 分钟。