

致密砂岩储层测井参数优选与产能预测研究

张杨硕

中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司 上海 200127

摘要: 针对鄂尔多斯盆地伊陕斜坡致密砂岩储层低孔特低渗、非均质性强、产能预测难度大的问题, 依托 36 口井测井及 42 层试气数据, 经数据预处理后, 结合数理统计与机器学习方法优选参数, 确定 MPOR、Rmean、Sg 为核心参数。对比多种预测模型, 构建 PSO-XGBoost 最优模型, 经校正后预测精度显著提升, 现场应用平均相对误差 7.7%, 有效识别储层甜点区, 为油气高效开发提供技术支撑。

关键词: 致密砂岩储层测井; 参数优选; 产能预测

引言: 鄂尔多斯盆地致密砂岩气资源储量丰富, 是非常规油气开发的重点领域。但该类储层孔喉细小、非均质性强, 常规测井参数冗余度高, 产能与测井响应非线性关系复杂, 传统预测模型精度有限, 难以满足勘探开发需求。为精准评价储层产能, 本文依托工区实测测井与试气数据, 开展测井参数优选与智能预测模型研究, 旨在建立高精度产能预测体系, 为储层评价与井位部署提供科学依据。

1 研究区地质概况与测井数据预处理

1.1 研究区地质特征

(1) 研究区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中段, 构造整体呈西倾单斜形态, 断层不发育, 局部发育低幅度鼻状隆起。上古生界二叠系下石盒子组与山西组为典型河流-三角洲沉积体系, 纵向上多期砂体叠置, 横向上连续性较差, 地层厚度稳定, 埋深介于 2800~3200 m。(2) 储集岩以中-细粒长石岩屑砂岩为主, 胶结物主要为黏土矿物、碳酸盐及硅质。孔隙类型以残余原生粒间孔和次生溶孔为主, 平均孔隙度 5.8%~8.2%, 渗透率 0.05~0.50 mD, 属低孔特低渗范畴。压汞资料显示排驱压力较高, 孔喉半径集中分布于 0.1~0.5 μm , 分选系数偏大, 强非均质性主要受沉积微相转换和成岩改造差异控制^[1]。(3) 储层流体以甲烷为主, 含少量凝析油, 气水关系复杂, 局部发育边底水。产能与有效厚度、裂缝发育程度及黏土矿物含量关系密切, 高产井多位于分流通道主砂带且裂缝密度大于 0.5 条/m。

1.2 测井资料与试气数据基础

(1) 收集常规综合测井(自然伽马、声波时差、补偿中子、密度、深中浅电阻率)、核磁共振测井及阵列感应测井资料, 共计覆盖研究区内 36 口井。(2) 试气数

据来源于地层测试成果报告, 选取稳定产量大于 $0.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 且测试时间不少于 72 h 的样本, 剔除工程异常井及未射孔层段数据, 共筛选有效样本 42 层。(3) 以测井深度为基准, 将各井产能数据按射孔层位归位, 逐层匹配测井响应特征值, 构建包含测井曲线、解释参数与对应产能标签的研究数据集。

1.3 测井数据预处理方法

(1) 采用滑动窗口滤波法识别并剔除测井曲线毛刺与负值异常点, 依据 GR 与 SP 曲线形态进行深度漂移校正, 确保多趟测井深度对齐。(2) 应用标准化公式: $x' = \frac{x - \mu}{\sigma}$ 。对声波时差、密度、中子孔隙度等曲线进行标准化处理, 其中 μ 和 σ 分别为各曲线均值和标准差, 消除仪器刻度差异影响。(3) 缺失段采用克里金插值法补全, 补全后计算各曲线变异系数均小于 15%, 信噪比大于 20 dB, 数据质量满足后续解释需求。

2 致密砂岩储层测井参数优选研究

2.1 测井参数初选与特征分析

(1) 基于研究区测井资料实际, 初步选取自然伽马(GR)、声波时差(AC)、补偿中子(CNL)、密度(DEN)、深侧向电阻率(RT)、浅侧向电阻率(RXO)等 6 项常规测井参数, 衍生计算孔隙度(POR)、渗透率(PERM)、泥质含量(Vsh)、含气饱和度(Sg)等 4 项物性参数, 以及由核磁共振测井提取的可动流体孔隙度(MPOR)、束缚水饱和度(Swi)、孔喉半径均值(Rmean)等 3 项孔隙结构参数, 共计 13 项初选参数。(2) 统计各参数在不同产能井段的变化规律: 高产能层段呈现 GR 相对低值($< 65 \text{ API}$)、AC 明显增大($> 225 \mu\text{s}/\text{m}$)、DEN 降低($< 2.52 \text{ g}/\text{cm}^3$)、RT 中等偏高($> 35 \Omega \cdot \text{m}$)的“三低一高”响

应特征；低产能层段则相反。MPOR 与 Rmean 在高产层明显增大，Swi 显著降低，表明孔隙连通性与可动流体占比是控制产能的关键因素^[2]。（3）通过相关矩阵计算，剔除与 GR 相关系数大于 0.85 的 Vsh（信息冗余），剔除 RT 与 RXO 中相关系数达 0.92 的冗余项（保留 RT），最终保留 10 项待筛选参数进入后续敏感性分析。

2.2 基于数理统计的敏感参数筛选

（1）计算各参数与试气无阻流量的皮尔逊相关系数，结果显示 MPOR ($r = 0.74$)、Rmean ($r = 0.68$)、POR ($r = 0.61$) 与产能呈较强正相关，GR ($r = -0.55$) 呈中等负相关，其余参数相关系数绝对值小于 0.40。（2）引入互信息系数（MIC）捕捉非线性关联，MPOR (MIC = 0.81)、Rmean (MIC = 0.76)、Sg (MIC = 0.72) 表现最优，DEN (MIC = 0.38) 和 CNL (MIC = 0.35) 相对较低，表明密度与中子曲线在研究区对产能的指示信息有限。（3）对 10 项参数进行主成分分析，前 3 个主成分累计方差贡献率达 86.2%，其中第 1 主成分主要由 MPOR、POR、Rmean 载荷较高，第 2 主成分由 Sg 与 PERM 主导，第 3 主成分由 GR 贡献。初步提取 MPOR、POR、Rmean、Sg、PERM、GR 共 6 项核心参数。

2.3 基于机器学习的最优参数组合优选

（1）基于随机森林（RF）算法构建特征重要度评价模型，以 6 项核心参数为输入、无阻流量为标签。计算结果表明 MPOR（重要度 0.27）和 Rmean（0.23）占据主导地位，Sg（0.18）次之，PERM（0.14）、POR（0.11）、GR（0.07）贡献相对较低。（2）对比 RF、XGBoost、Gradient Boosting 三种算法，采用前向特征选择策略，综合交叉验证均方根误差（RMSE）和决定系数（ R^2 ）两项指标：RF 在 3 参数组合（MPOR+Rmean+Sg）下 $R^2 = 0.79$ 达到最优，继续增加参数时 R^2 提升不足 0.02 而 RMSE 反弹，故确定该组合为最优方案。（3）最终确定最优测井参数组合为：核磁可动流体孔隙度（MPOR）、孔喉半径均值（Rmean）、含气饱和度（Sg），三者构成致密砂岩储层产能预测核心参数体系，兼顾了孔隙有效性、渗流能力与含气丰度三方面信息^[3]。

2.4 优选参数有效性验证

（1）将优选 3 参数组合与储层物性参数进行交会分析：MPOR 与渗透率呈良好正相关（ $R^2 = 0.71$ ），Rmean 与孔隙度相关（ $R^2 = 0.58$ ），Sg 与含气丰度匹配关系明确。各参数随产能升高呈单调递增趋势，高产井（ $> 5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）与低产井（ $< 1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）参数分布区间分离

度显著，区分效果良好。（2）利用未参与建模的 10 口井数据进行盲测验证，3 参数组合预测产能的相对误差平均为 8.7%，且在不同埋深（2800 ~ 3200 m）和不同砂体厚度（5 ~ 20 m）条件下预测精度保持稳定，表明该参数组合具有良好的适用性和泛化能力。明确该优选参数组合适用于鄂尔多斯盆地同类致密砂岩储层产能评价，为后续产能预测模型构建奠定参数基础。

3 致密砂岩储层产能预测模型构建与应用

3.1 产能预测模型原理与方案设计

（1）对比分析三类主流产能预测模型原理：传统多元线性回归（MLR）基于最小二乘法建立参数与产能的线性映射关系，结构简单但难以刻画非线性特征；支持向量回归（SVR）通过核函数将低维非线性问题映射至高维线性空间，适用于小样本；随机森林（RF）基于多棵决策树的 Bagging 集成策略，能有效处理高维特征交互；BP 神经网络通过多层神经元的前向传播与误差反向调整，具备强非线性拟合能力但需较大样本支撑；极限梯度提升（XGBoost）采用梯度提升框架并引入正则化项，在效率和精度间取得较好平衡^[4]。（2）以优选测井参数（MPOR、Rmean、Sg）为模型输入，试气无阻流量为目标输出，构建“输入层—预处理层—模型层—输出层”四层架构。预处理层完成数据标准化与异常样本剔除，模型层同时部署 MLR、RF、BP、XGBoost 四类算法进行并行训练与对比。（3）建立三指标评价体系：精度指标采用决定系数（ R^2 ）与均方根误差（RMSE）；稳定性指标采用五折交叉验证 R^2 标准差（ σ_{R^2} ）；泛化性指标采用测试集与训练集 R^2 差异（ ΔR^2 ）。设定模型优选标准为 $R^2 > 0.80$ 且 $\Delta R^2 < 0.10$ 。

3.2 多类型产能预测模型构建

（1）构建 MLR 基准模型，采用最小二乘法拟合方程 $Q = 0.32 \cdot \text{MPOR} + 0.28 \cdot \text{Rmean} + 0.15 \cdot \text{Sg} - 1.86$ ，经 F 检验显著性水平 $p < 0.01$ ，拟合优度 $R^2 = 0.67$ ，作为后续对比基线。（2）RF 模型经网格搜索优化树数（ $n_{\text{estimators}} = 300$ ）、最大深度（ $\text{max_depth} = 12$ ）与最小样本分裂数（ $\text{min_samples_split} = 4$ ）；BP 模型采用三层结构（3-8-1），学习率 0.01，经早停法防止过拟合，迭代至验证集误差连续 10 轮不下降时终止^[5]。（3）构建 PSO-XGBoost 混合模型，采用粒子群算法对 XGBoost 的学习率（0.01 ~ 0.30）、最大深度（3 ~ 12）、正则化参数 λ （0 ~ 5）进行全局寻优，粒子数 30、迭代 50 代，确定最优超参数组合（ $\text{learning_rate} = 0.12$ ， $\text{max_depth} = 7$ ， $\lambda = 1.8$ ）。

3.3 模型训练、验证与性能对比

(1) 将42组样本按6:2:2比例随机划分为训练集(25组)、验证集(8组)和测试集(9组),采用分层抽样保证各产能区间样本分布一致。(2) 各模型测试集表现: MLR 的 $R^2 = 0.64$ 、 $RMSE = 1.87 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; RF 的 $R^2 = 0.79$ 、 $RMSE = 1.26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; BP 的 $R^2 = 0.81$ 、 $RMSE = 1.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; PSO-XGBoost 的 $R^2 = 0.87$ 、 $RMSE = 0.94 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。交叉验证稳定性排序为 PSO-XGBoost ($\sigma_{R^2} = 0.041$) 优于 RF (0.052)、BP (0.087) 和 MLR (0.113),泛化性方面 ΔR^2 分别为 PSO-XGBoost 的 0.04、RF 的 0.07、BP 的 0.13。(3) 综合精度、稳定性与泛化性三项指标,确定 PSO-XGBoost 为最优产能预测模型,依据测试集残差分布对模型输出进行无偏校正: $Q_{\text{adj}} = 1.02 \cdot Q_{\text{pred}} - 0.15$,校正后 RMSE 进一步降至 $0.89 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3.4 模型实际应用与效果分析

(1) 选取研究区未参与建模的4口新井进行单井产能预测,以射孔层段优选参数均值输入模型,输出各井无阻流量预测值分别为 3.62×10^4 、 6.18×10^4 、 1.43×10^4 、 $5.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。(2) 将预测结果与实测试气数据对比,绝对误差依次为 0.31×10^4 、 0.52×10^4 、 0.18×10^4 、 $0.44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均相对误差 7.7%,表明模型具有良好的实用性和预测可靠性。(3) 基于模型对全区36口井进行产能逐层预测,采用克里金插值生成储层产能平面分布图,识

别出东北部分流河道交汇带和中部鼻隆构造高部位两个 I 类甜点区(预测产能 $> 5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),面积合计约 18.6 km^2 ,为后续水平井部署与井网优化提供依据。

结束语

本文完成了致密砂岩储层测井数据预处理、核心参数优选及智能产能预测模型构建,筛选出适配研究区的三项核心测井参数,优化后的 PSO-XGBoost 模型兼具高精度、稳定性与泛化性。模型可精准预测单井产能、刻画储层产能平面分布,成功识别优质甜点区。研究成果有效解决了致密储层产能预测精度不足的难题,可为同类致密砂岩储层评价与油气高效开发提供参考。

参考文献

- [1] 席胜利. 鄂尔多斯盆地致密砂岩储层测井响应特征与产能主控因素 [J]. 石油学报, 2025, 46(02): 210-221.
- [2] 杨清, 管耀. 基于流动单元分类与参数优选的致密砂岩储层产能评价 [J]. 石油钻探技术, 2025, 53(02): 181-190.
- [3] 潘金涛. 基于 PSO-SVM 算法的致密砂岩储层测井物性参数优选与产能预测 [J]. 地球物理学进展, 2026, 41(02): 759-767.
- [4] 朱海燕. 致密砂岩气储层多参数优选与地质-工程甜点产能评价方法 [J]. 天然气工业, 2023, 43(06): 76-86.
- [5] 信毅. 致密砂岩气藏多品质测井参数优选及产能差异化评价 [J]. 地球科学, 2024, 49(06): 2085-2102.