

海上稠油油藏蒸汽吞吐效果预测方法研究

孔超杰

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459)

摘要:针对常规方法无法准确预测渤海稠油油藏蒸汽吞吐采出程度的问题,以LD稠油油藏实际参数为基础,建立蒸汽吞吐油藏模型,分别从注采工艺与地质油藏特征两方面,研究了12项参数对热采效果的影响,采用正交试验方法,根据单因素的影响显著性分析结果,得到了影响蒸汽吞吐开发效果的6个关键参数:最小井底流压、注汽强度、注汽干度、岩石压缩系数、有效储层厚度、流度。采用多元非线性回归分析,最终得到了综合考虑油藏特征与热采工作制度的采出程度预测方法。LD油田实际蒸汽吞吐效果验证了该方法的可靠性,研究成果可用于指导渤海稠油油藏蒸汽吞吐效果预测。

关键词:蒸汽吞吐;影响因素;正交设计;效果预测;稠油

中图分类号:TE345 **文献标志码:**A

Study on prediction method of steam stimulation effect in the offshore heavy oil reservoirs

KONG Chaojie

(Bohai Petroleum Research Institute, Tianjin Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: Aiming at the problem that conventional methods can not accurately predict the recovery degree of steam huff and puff in Bohai heavy oil reservoirs, based on the actual parameters of LD heavy oil reservoir, a steam huff and puff reservoir model was established. The effect of 12 parameters on the effect of thermal recovery was studied from two aspects: injection and production process and geological reservoir characteristics, respectively. Using the orthogonal test method, based on the results of the single factor significance analysis, six key parameters affecting the development effect of steam stimulation were obtained: minimum bottom hole flow pressure, steam injection intensity, steam injection dryness, rock compression coefficient, effective reservoir thickness, and mobility. Using multiple nonlinear regression analyses, the recovery degree prediction method considering reservoir characteristics and thermal recovery system was finally obtained. The actual steam huff and puff effect of the LD oilfield has verified the reliability of the method, and the research results can be used to guide the prediction of the steam huff and puff effect of the Bohai heavy oil reservoir.

Key words: steam huff and puff; influencing factors; orthogonal design; effect prediction; heavy oil

渤海海域稠油储量比较丰富,蒸汽吞吐是稠油热采的主要方式之一,热采提高采收率效果显著^[1-3]。LD油田正在开展蒸汽吞吐先导试验,该矿场试验探索地下原油黏度350 mPa·s以上海上稠油油田的有效开发方式,在海上生产条件限制下,如何充分利用少量测试资料评价蒸汽吞吐热采效果至关重要^[4-6]。

侯健等^[7]建立了一种蒸汽吞吐效果的采收率预测模型,考虑了原油黏度、油层厚度对热采效果的影响;张贤松等^[8]研究了蒸汽吞吐方式下注汽强度、注汽速度等注采参数对稠油油藏采收率的影响;周志军等^[9]针对某陆地油田地质特征与流体性质,开展了稠油油藏蒸汽吞吐注采参数优化对采收率影响的研究。海上油田开发具有平面井距大、纵向跨

度大和埋藏较深等特点,加上平台空间的限制、作业环境和保压开发方式的影响,目前需要建立一套适合海上油田的考虑多因素影响的采收率预测模型。为此,本文选取渤海海域LD稠油油藏为典型区块,考虑热采工作制度 and 地质油藏参数等多重因素对蒸汽吞吐采收率的影响,得到了海上油田蒸汽吞吐采出程度关于显著性影响参数的多项表达式,对渤海海域稠油油藏蒸汽吞吐潜力进行了预测。

收稿日期:2022-04-28;改回日期:2023-01-30。

作者简介:孔超杰(1992—),女,工程师,主要从事海上油气田开发工程方面的研究工作。E-mail:1457116594@qq.com。

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058-001)。

1 油田概况

LD油田明化镇组、馆陶组储层主要为岩屑长石砂岩。明下段属于三角洲沉积,储层岩心分析孔隙度在24.8%~38.8%之间,平均34.4%;渗透率主要集中在 $(330.0 \sim 11\,116.9) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均 $3\,786.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于高孔、高渗型储层。馆陶组属于辫状河沉积,储层岩心分析孔隙度分布在13.8%~29.8%之间,平均21.7%;渗透率多大于 $10.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最高可达 $3\,582.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $466.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于中—高孔、中—高渗型储层。明化镇组—馆陶组I油组属于重质稠油,地面原油密度 $0.949 \sim 0.989 \text{ g/cm}^3$,地面原油黏度 $905.10 \sim 5\,369.20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,含硫量0.22%~0.45%,含蜡量0.87%~8.32%,胶质沥青质14.31%~45.36%,凝固点 $-21 \sim 8^\circ\text{C}$ 。

从2009年投产到2022年已开采13年,目前油田共有开发井23口,动用储量采油速度1.0%,动用储量采出程度22.4%,综合含水73.0%。

2 预测海上稠油蒸汽吞吐效果的方法研究

2.1 主要影响因素筛选

蒸汽吞吐过程复杂,影响热采效果的参数较多。结合国内外蒸汽吞吐研究现状、室内实验及矿场实践,筛选出了影响蒸汽吞吐热采效果的关键参数用于正交试验设计,分为地质油藏参数和热采工作制度两组:地质油藏参数包括渗透率、渗透率级差、岩石压缩系数、原油黏度、孔隙度和有效储层厚度;热采工作制度包括注汽速度、注汽温度、注汽干度、注汽强度(注汽量/水平段长度)、最大产液量和最小井底流压。

2.2 正交试验方法研究

正交试验设计是研究多因素多水平的一种设计方法^[9],是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点。LD稠油油藏参数利用油藏数值模拟软件建立蒸汽吞吐井组数模机理模型,基本参数为:油藏埋深1 300 m,原始含油饱和度0.717,地层原油黏度 $2\,336.7 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,平均有效油层厚度10 m,平均渗透率 $3\,786 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度34.4%。数值模型中I方向和J方向的网格步长均为5 m,K方向步长为1 m。I方向划分网格数为101,J方向划分网格数为81,纵向上划分网格数为10,模拟网格共计 $101 \times 81 \times 10 = 81\,810$ 个。1口水平井位于模型中心处,水平段长度300 m。

在本次正交试验中,注入井采用二级控制条件进行模拟:第一控制条件为定注入速度,第二控制条件为定注入压力;采油井采用三级控制条件进行模拟:第一控制条件为定液生产,第二控制条件为定压差生产,第三控制条件为定井底流压生产,共吞吐10轮。试验分为地质油藏参数和热采工作制度两组,共50个方案。第一组25个方案为地质油藏参数不变,根据正交试验设计不同注采参数下的蒸汽吞吐开发;第二组25个方案为热采工作制度不变,根据正交试验设计不同地质油藏参数下的蒸汽吞吐开发。

蒸汽吞吐正交试验方差分析结果如表1所示,从正交试验结果来看,地质油藏参数影响蒸汽吞吐开发效果的主次顺序为:岩石压缩系数>渗透率>有效储层厚度>地层原油黏度>孔隙度>渗透率级差。分析原因如下:岩石压缩系数决定了地层能够释放的弹性能,其影响程度最大;渗透率直接影响稠油的渗流速度,其影响程度小于岩石压缩系数;有效储层厚度影响蒸汽的垂向波及体积,其影响程度小于渗透率;地层原油黏度与渗透率联合影响稠油的渗流速度,其影响程度略小于有效储层厚度;孔隙度主要影响储量的物质基础,其影响程度小于地层原油黏度;渗透率级差影响储层非均质性,进而影响蒸汽波及效率,其影响程度小于孔隙度。利用数模法研究蒸汽吞吐效果对流度的敏感性,研究发现,相同流度下,不同渗透率和地层原油黏度对采出程度影响不大,流度越小,采出程度差异越小;流度为 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 时,最小地层原油黏度 $500 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 和最大地层原油黏度 $10\,000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 下的吞吐采出程度差异在10%以内。因此,可将渗透率和地层原油黏度转换为流度进行影响规律研究。

热采工作制度影响蒸汽吞吐开发效果的主次顺序为:最小井底流压>注汽干度>注汽强度>最大产液量>注汽温度>注汽速度。分析原因如下:最小井底流压即最大稳定生产压差,主要影响压降漏斗范围,对蒸汽吞吐开发效果影响最大;注汽强度和注汽干度主要影响蒸汽的加热范围,其影响程度比较接近,蒸汽干度影响程度略高于注汽强度;产液速度取决于蒸汽加热半径、压力波及半径,主要影响油井在地层热量散失前的采液量,其影响程度小于注汽强度;注汽温度影响蒸汽中携带的热量,进而影响蒸汽加热范围,其影响程度小于产液速度;注汽速度直接影响热量在井筒中的热损失,进而影响井底蒸汽的干度与温度,当注入量、蒸汽干度及温度确定时,其影响程度较小。蒸汽吞吐采收率的单因素影响规律如图1所示。

表1 蒸汽吞吐正交试验方差分析统计

试验参数	方差来源	采出程度/%	偏差平方和	自由度	F临界值	F值	显著性
地质油藏参数	平均渗透率	17.4	375.297	4	2.81	0.858	显著
	地层原油黏度	14.4	358.432	4	2.81	0.819	显著
	孔隙度	13.1	162.716	4	2.81	0.377	
	有效厚度	15.2	365.523	4	2.81	0.836	显著
	岩石压缩系数	19.6	1325.874	4	2.81	3.008	特别显著
	渗透率级差	12.3	73.287	4	2.81	0.174	
热采工作制度	注汽强度	15.7	12.56	4	2.81	0.375	显著
	注汽速度	12.6	3.39	4	2.81	0.074	
	注汽温度	13.1	5.049	4	2.81	0.128	
	注汽干度	17.2	17.545	4	2.81	0.539	显著
	最大产液量	14.6	6.184	4	2.81	0.166	
	最小井底流压	19.2	147.061	4	2.81	4.79	特别显著

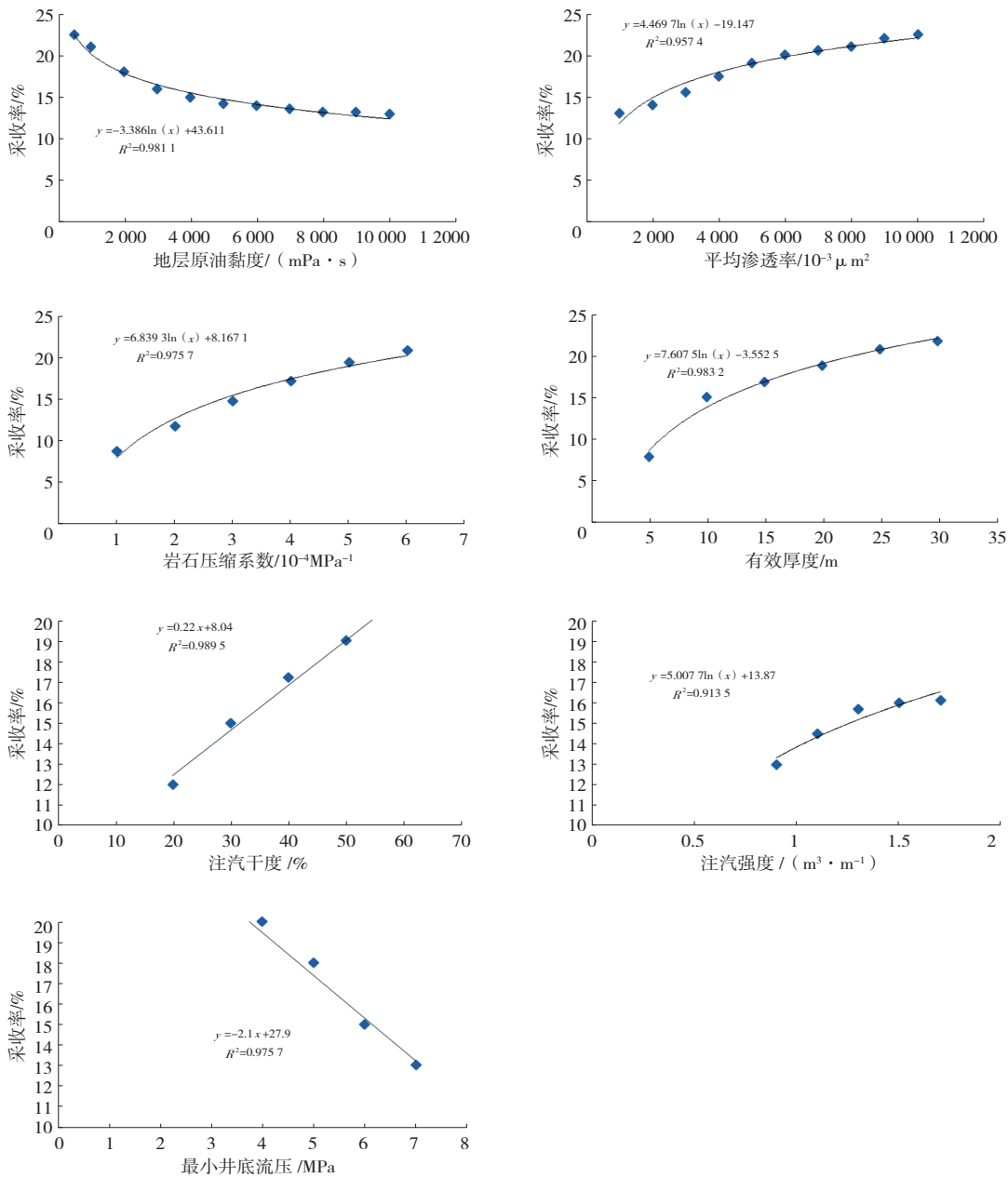


图1 蒸汽吞吐采收率的单因素影响规律

2.3 蒸汽吞吐效果预测方法研究

为使建立的预测方法科学、准确,根据单因素的影响显著性分析结果,选取影响程度最小的井底流压、注汽强度、注汽干度、岩石压缩系数、有效储层厚度、流度等6个参数作为预测模型考虑的

表征参数,各影响因素与采出程度呈良好的数学关系,且相关性较高,为建立可靠的预测模型奠定了基础。

以蒸汽吞吐采出程度为目标函数,回归6个显著性参数对目标函数的关系式(见表2)。

表2 一元非线性回归结果统计

主控因素	蒸汽吞吐采出程度/%
注汽强度 $I/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1})$	$-0.0053I^2 + 0.2839I + 17.9823 (R^2 = 0.9689)$
注汽干度 $D_f/\%$	$-6.0558D_f^2 + 8.3137D_f + 19.0546 (R^2 = 0.9913)$
最小井底流压 P_{wf}/MPa	$-0.0589P_{wf}^2 - 1.389P_{wf} + 24.647 (R^2 = 0.9998)$
流度 $M/(10^{-3}\mu\text{m}^2\cdot(\text{mPa}\cdot\text{s})^{-1})$	$4.3262\ln(M) + 17.626 (R^2 = 0.9504)$
有效储层厚度 h/m	$25.4032e^{-0.014h} (R^2 = 0.9912)$
岩石压缩系数 $C_i/10^{-4}\text{MPa}^{-1}$	$-0.000123C_i^2 + 0.1491C_i + 2.5607 (R^2 = 0.9999)$

根据单因素与采出程度的数学关系,对数据进行多元非线性回归分析,可以得到蒸汽吞吐采出程度关于显著性影响参数的多项式表达式,进而可以计算6个关键参数在任意值下的蒸汽吞吐采出程度。

以一元非线性回归统计结果为基础,采用 Levenberg Marquardt 算法对拟合样本进行多元非线性回归,该算法利用梯度求最大值的算法,它的关键是用模型函数 f 对待估参数向量 p 在其领域内做线性近似,忽略掉二阶以上的导数项,从而转化为线性最小二乘问题,它具有收敛速度快等优点;当 λ 很小时,步长等于牛顿法步长,当 λ 很大时,步长约等于梯度下降法的步长。通过 MATLAB 软件求解实现,得到蒸汽吞吐采出程度预测模型如下:

$$EOR_{\text{css}} = 0.006987I^2 - 0.365751I + 7.273143D_f^2 - 10.003131D_f - 0.0368P_{wf}^2 - 0.883472P_{wf} + 4.252687\ln(M) + 22.353908e^{-0.012338h} - 0.000122C_i^2 + 0.137126C_i - 10.521635$$

上式是基于数值模型运算结果回归得到的,因此具有最佳适用范围: $0.1\times10^{-3}\leq M\leq5\times10^{-3}\mu\text{m}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$; $5\leq h\leq100\text{ m}$; $10\times10^{-4}\leq C_i\leq500\times10^{-4}\text{ MPa}^{-1}$; $5\leq I\leq30\text{ m}^3/\text{m}$; $0\leq D_f\leq0.8$; $2\leq P_{wf}\leq6\text{ MPa}$ 。

采用蒸汽吞吐采出程度预测模型计算样本方案中拟合样本和检验样本的采出程度,计算值与实际值的关系如图2所示。拟合样本平均计算误差0.46%,检验样本平均计算误差为0.75%,蒸汽吞吐采出程度预测模型能够满足工程计算要求。

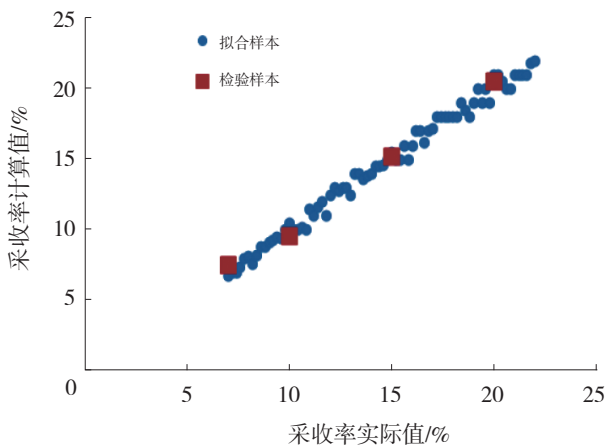


图2 蒸汽吞吐采收率计算值与实际值的关系

3 实例应用

LD 油田 P 砂体部署两口热采先导试验井 P1H、P2H,动用地质储量 $90\times10^4\text{ t}$,2 口井已实施 4 轮次蒸汽吞吐,采用建立的蒸汽吞吐效果预测模型分别对每轮次吞吐后的周期累产油进行预测,并与实际周期累产油进行对比(见表3、表4),表明该模型预测海上油田蒸汽吞吐开发效果有较高的适用性。

采用该模型对渤海海域相似稠油油藏(地下原油黏度 $350\sim1\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$,初始含油饱和度 $0.55\sim0.75$)进行了效果预测,结果表明,按照 8~12 轮蒸汽吞吐设计方案,不同稠油区块采收率介于 $14\%\sim19\%$,渤海海域稠油油藏蒸汽吞吐潜力较大,该模型可以为渤海相似稠油油田蒸汽吞吐开发提供有益的参考。

表3 P1H井4轮次蒸汽吞吐周期采出程度模型预测与实际对比

轮次	周期注入量/ 10^4m^3	注汽强度/ $(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1})$	注汽干度/%	最小井底流压/MPa	流度/ $(10^{-3}\mu\text{m}^2\cdot(\text{mPa}\cdot\text{s})^{-1})$	有效储层厚度/m	岩石压缩系数/ 10^{-4}MPa^{-1}	预测周期累产/ 10^4m^3	实际周期累产/ 10^4m^3
第一轮次	3 000	15.0	0.80	9.4	5.0	7.0	30	0.93	0.92
第二轮次	4 205	21.0	0.82	8.8	5.0	7.0	30	1.05	1.03
第三轮次	5 010	25.1	0.84	8.4	5.0	7.0	30	1.28	1.26
第四轮次	5 600	28.0	0.8	9.3	5.0	7.0	30	0.65	0.62

表4 P2H井4轮次蒸汽吞吐周期采出程度模型预测与实际对比

轮次	周期注入量/ 10^4m^3	注汽强度/ $(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1})$	注汽干度/%	最小井底流压/MPa	流度/ $(10^{-3}\mu\text{m}^2\cdot(\text{mPa}\cdot\text{s})^{-1})$	有效储层厚度/m	岩石压缩系数/ 10^{-4}MPa^{-1}	预测周期累产/ 10^4m^3	实际周期累产/ 10^4m^3
第一轮次	4 501	18.00	0.90	9.0	4.0	6.5	30	0.75	0.73
第二轮次	5 250	21.00	0.95	8.1	4.0	6.5	30	1.33	1.31
第三轮次	3 930	15.72	0.91	9.1	4.0	6.5	30	0.84	0.82
第四轮次	6 000	24.00	0.92	8.7	4.0	6.5	30	0.81	0.79

4 结论与认识

(1)采用正交试验方法对影响热采效果的参数进行了研究,岩石压缩系数和最小井底流压分别为影响蒸汽吞吐的主要地质油藏参数与工作制度参数。

(2)针对目标区稠油油藏的特点,分析了不同参数对蒸汽吞吐效果的影响,最终明确了6个关键影响参数。

(3)采用多元非线性回归分析,建立了综合考虑油藏特征与注采参数的采出程度预测新方法。该方法计算精度较高,能够指导渤海相似稠油油藏蒸汽吞吐效果预测。

参考文献

[1] 许鑫,刘永建,尚策,等.稠油油藏蒸汽驱提高热利用率研究[J].特种油气藏,2019,26(2):112-116.

[2] 依沙克·司马义,阿依夏木·牙克甫.稠油开采技术现状及展望[J].化工管理,2019(17):217-218.

[3] 胡书勇,李兆亮,李刚,等.重18井区浅层特稠油水平井蒸汽吞吐参数研究[J].石油天然气学报,2014,36(8):133-136.

[4] 李延杰,朱国金,田冀,等.一种稠油油藏水平井蒸汽吞吐初期产能预测方法:CN201710009434.1[P].2017-05-31.

[5] 刘东,胡廷惠,潘广明,等.稠油油藏弱凝胶调驱增油预测模型研究[J].特种油气藏,2018,25(4):103-108.

[6] 赵红雨.稠油油藏组合蒸汽吞吐的分区方法[J].特种油气藏,2018,25(3):77-81.

[7] 侯健,王树涛,杜庆军,等.海上稠油油藏蒸汽吞吐效果预测模型[J].石油天然气学报,2013,35(7):118-122.

[8] 张贤松,李延杰,陈会娟,等.海上稠油油藏蒸汽吞吐注采参数正交优化设计[J].重庆大学学报,2015,38(3):80-85.

[9] 周志军,张国青,黄咏梅,等.基于多指标正交设计的稠油油藏高周期蒸汽吞吐注采参数优化[J].数学的实践与认识,2021,51(11):174-180.

(编辑 韩 枫)