

文章编号: 0253-2697(2007)02-0105-04

## 蒸汽吞吐汽窜调剖参数优化设计研究

张红玲<sup>1</sup> 刘慧卿<sup>1</sup> 王 晗<sup>2</sup> 王书林<sup>2</sup> 包术成<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室 北京 102249; 2. 河南油田分公司第二采油厂 河南南阳 473400)

**摘要:** 对稠油油藏蒸汽吞吐的汽窜动态和汽窜方式进行了分析,根据汽窜通道内的蒸汽凝析特征,建立了窜流通道内的蒸汽驱非活塞驱替模型。并根据窜通井对应射孔段的油层物性差异,建立了井间平均连通程度和窜通角计算方法。利用该方法计算出井间窜汽量,然后由非活塞式驱替模型、注汽动态资料和窜通时间确定了井间窜通孔隙体积。注蒸汽油藏数值模拟研究表明,调剖段塞处于井间中部时,调剖效果较好;初次调剖段塞比率为 10%~15%时,蒸汽波及系数达到最大。对 L1833 井进行了调剖参数设计,按照深部调剖原则选取堵剂颗粒粒径,调剖剂用量为 32 m<sup>3</sup>。实施调剖后注汽,邻井的汽窜通道得到了封堵,堵调效果较好。

**关键词:** 稠油油藏;蒸汽吞吐;汽窜通道;调剖参数;优化设计;数值模拟

中图分类号: TE345

文献标识码: A

### Optimization design of profile control parameters for steam stimulation wells

Zhang Hongling<sup>1</sup> Liu Huiqing<sup>1</sup> Wang Han<sup>2</sup> Wang Shulin<sup>2</sup> Bao Shucheng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. No. 2 Oil Production Plant, Sinopec Henan Oilfield Company, Nanyang 473400, China)

**Abstract:** The steam breakthrough performance and mode of steam stimulation in heavy oil reservoir were analyzed. A non-piston steam displacement model was build on the basis of steam condensation features in the steam stimulation wells. The rate of the directional steam flow can be obtained by calculation of inter-well formation connection degree and breakthrough angle. Then the steam sweep volume and porous size can be also determined. The numerical simulation of steaming reservoir showed that the maximum steam sweep efficiency was obtained when the profile control agent slug was at a half inter-well distance, and the slug ratio of the steam sweep pores was 10% to 15%. The profile slug agent of 32 m<sup>3</sup> in volume and proper diameter of grain was used to design the profile control parameters of L1833 Well. The steam breakthrough around production wells disappeared after field application of profile control. Good result has been achieved.

**Key words:** heavy oil reservoir; steam stimulation, steam breakthrough; profile control parameters; optimization design; numerical simulation

井楼油田一二区油层以水下扇三角洲平原分流河道沉积相为主,其岩性粗,分选差,压实和成岩作用差;油层胶结疏松,岩石物性较好,油层平面和纵向非均质较严重;油层原油密度、粘度、胶质及沥青质含量高,含蜡、含硫量低,凝固点也低;油层温度下对应的脱气原油粘度为 5.745~85.422 Pa·s,属于超稠油油藏。1992 年正式投入开发,到 2005 年 5 月累积注汽 15.2662×10<sup>4</sup>t,累积采油 11.6737×10<sup>4</sup>t,回采水 6.9772×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>。该区 87%的油井已经达到 5 个吞吐周期,目前存在的主要问题是蒸汽吞吐过程中发生严重汽窜。主要表现在:周围窜通生产井的产液量和温度上升,含水率急剧上升,但产油量下降。汽窜既影响

了注汽井本井的蒸汽吞吐效果,又影响了窜通井的生产,而且热利用率降低。蒸汽吞吐并在注汽过程中,油层内为典型的非等温渗流过程<sup>[1-2]</sup>,即注入压力、温度、注汽速度同时都发生变化。目前采用的蒸汽吞吐调剖措施中,对调剖剂用量缺少必要的设计方法和手段,矿场应用时大多根据经验进行设计,其推广应用受到一定限制;因此,对蒸汽吞吐井调剖进行优化设计,对于提高蒸汽吞吐效果具有重要的意义。

#### 1 井间窜通体积的确定

汽窜主要有两种形式:①蒸汽窜:由于井距较小,油井投产时间不同,地下亏空和地层压力出现差异,井

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 50276040)“稠油热力泡沫复合驱的耦合作用和耦合模型”部分研究成果。

作者简介:张红玲,女,1966 年 10 月生,2001 年获石油大学(华东)油气田开发专业硕士学位,现为中国石油大学(北京)石油天然气工程学院副教授,主要从事采油工程理论与技术的教育和研究工作。E-mail: zhanghl@cup.edu.cn

间高渗透层在较大压差作用下容易形成蒸汽窜流通道而导致汽窜;②热水窜:在稠油吞吐过程中,部分生产井形成蒸汽指进而造成真正的汽窜,大部分汽窜多发生在井间所形成的高含水率通道,此时从注汽井注入的蒸汽冷凝而形成的热水发生指进,即热水很快窜到生产井。当热水采出后,温度达到100℃以上时,则可从井口见到闪蒸出来的蒸汽<sup>[3]</sup>。

### 1.1 注采井间窜通体积

对矿场汽窜动态分析表明,汽窜通道内为凝析水和蒸汽驱后的剩余油。对于多吞吐周期,汽窜通道内基本上为残余油,因而注汽发生窜流时,油层内为汽驱水的两相流动过程,蒸汽在驱替过程中和周围岩体之间存在传热而产生凝析<sup>[4]</sup>。窜流通道内蒸汽驱的非活塞驱替方程为

$$\int_0^{t_{hj}} [C_j q_s \nu_{ws} - \bar{G}_j V_{1ij}] dt = \phi \frac{V_{1ij}}{f'_s(S_{Rf})} \quad (1)$$

$$\bar{G}_j = 2\lambda(T_s - T_i) / [\sqrt{\pi\alpha[t - \delta(x)]} L_v \rho_s S] \quad (2)$$

式中  $q_s$  为注汽井注汽速度(冷水当量), t/d;  $C_j$  为  $j$  方向注汽量劈分系数, 无因次;  $\nu_{ws}$  为水蒸汽的比容,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $\bar{G}_j$  为  $j$  方向单位时间单位岩体体积内凝析体积,  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $V_{1ij}$  为  $j$  方向蒸汽窜通体积,  $\text{m}^3$ ;  $t_{hj}$  为  $j$  方向汽窜时间, d;  $f'_s(S_{Rf})$  为驱替前缘含汽率导数(由图解法确定), 无因次;  $\rho_s$  蒸汽密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\lambda$  为油层导热系数,  $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{d} \cdot \text{C})$ ;  $\alpha$  为油层热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{d}$ ;  $S$  为蒸汽波及区的特征尺寸, m;  $L_v$  为汽化潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $\delta(x)$  为开始注汽时间为零点对应于长度  $x$  处具有热损失时间;  $T_s$  注入蒸汽的温度, K;  $T_i$  原始油层温度, K。

由于稠油在常温下通常为非牛顿流体, 随温度的升高, 原油剪切变稀的非牛顿流体特性会逐渐消失, 从而表现出牛顿流体的特性<sup>[5]</sup>, 蒸汽和热水的窜通体积是指牛顿流体转化温度的体积范围。

### 1.2 注汽量劈分系数

井间的油层纵向物性差异较大, 须确定井间平均连通程度(图1)。由于井间可能出现多向窜通, 同时

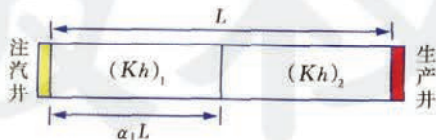


图1 注采井间平面非均质模式

Fig. 1 The lateral heterogeneous model of inter-well formation between injection and production wells

考虑到注采井间层位对应和井间屏蔽效应, 窜通角可以根据井位分布来确定(图2)。

根据等值渗流阻力得到井间平均地层系数为

$$(\bar{Kh})_j = (Kh)_{1j} (Kh)_{2j} / (1 - \alpha_{1j}) (Kh)_{1j} + \alpha_{1j} (Kh)_{2j} \quad (3)$$

式中  $(\bar{Kh})_j$  为  $j$  方向注采井间平均地层系数;  $(Kh)_{1j}$  为  $j$  方向注入井地层系数;  $(Kh)_{2j}$  为  $j$  方向生产井地层系数;  $\alpha_{1j}$  为  $j$  方向距注入井的长度分数, 无因次(在没有资料时可取其中值 0.5)。

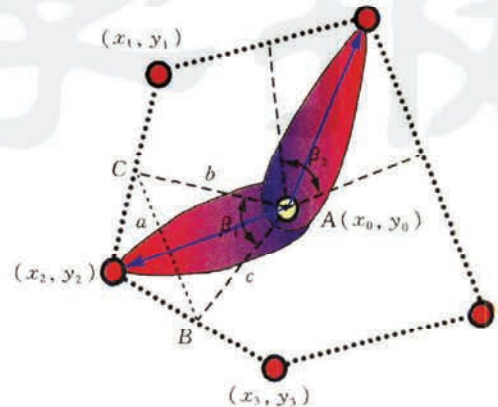


图2 井间窜通角示意图

Fig. 2 The schematic drawing of steam breakthrough angle

根据注采井间窜通角和地层系数, 注汽量劈分系数为

$$C_j = \beta_j (\bar{Kh})_j / \sum_{j=1}^M \beta_j (\bar{Kh})_j \quad (4)$$

式中  $\beta_j$  为  $j$  方向的窜通角;  $M$  为对应注入井的窜通方向数。

### 1.3 窜流通道的渗透率

由于蒸汽吞吐的注汽速度较大, 流动阻力由粘滞阻力和惯性阻力两部分组成<sup>[6]</sup>, 水蒸汽在油层中为非线性渗流, 渗流速度与压力梯度的二项式为

$$\frac{\Delta p_j}{L_j} = \frac{\mu_{ws}}{K_s} \frac{q_{wsj}}{(Bh)_j} + \rho_{ws} \frac{c}{K_s} \frac{q_{wsj}^2}{(Bh)_j^2} \quad (5)$$

式中  $(Bh)_j$  为  $j$  方向平均渗流截面,  $\text{cm}^2$ ;  $\Delta p_j$  为  $j$  方向注采压差, KPa;  $L_j$  为  $j$  方向注采井距, m;  $c$  和  $\alpha$  分别为常数,  $c = 2.417 \times 10^6$ ,  $\alpha = 1.5$ ;  $\mu_{ws}$  为水蒸汽的粘度, mPa·s;  $q_{wsj}$  为  $j$  方向水蒸汽的体积流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $K_s$  为水蒸汽流动的有效渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\rho_{ws}$  为水蒸汽的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

由式(5)可以计算出水蒸汽的有效渗透率, 即束缚水和残余油状态下的渗透率。油层的绝对渗透率为

$$K = K_s \exp[(S_{wes} + S_{ors}) / (1 - S_{wes} + S_{ors})] \quad (6)$$

式中  $S_{wes}$  为蒸汽驱束缚水饱和度;  $S_{ors}$  为蒸汽驱残余油饱和度。

## 2 调剖参数的优选

### 2.1 段塞位置

调剖段塞尺寸为汽窜通道体积的 10%, 设置不同

的段塞位置,以河南井楼油田一二区的概念地质模型和平均注汽动态为计算条件,并利用油藏数值模拟方法计算其温度分布,根据流变曲线拐点温度求得蒸汽驱的汽窜体积,并进一步计算出蒸汽波及效率(图 3)。

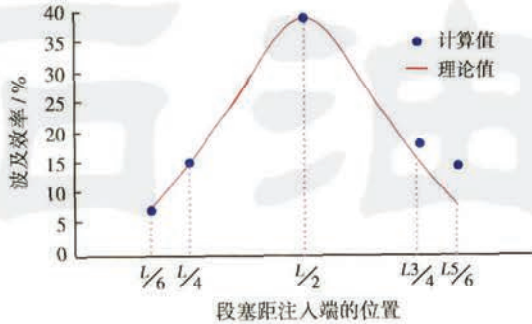


图 3 调剖段塞不同位置时的蒸汽波及系数

Fig. 3 Steam sweep efficiency for different positions of slug

由图 3 可以看出,调剖段塞位置处于井间之中时,调剖效果较好。

### 2.2 段塞尺寸

对于初次调剖,将段塞中心位置处于井距之中部,不同段塞尺寸时的蒸汽波及率如图 4 所示。由图 4 可以看出,调剖段塞尺寸为 10%~15% 时的蒸汽波及系数基本达到最大值。此后,增大调剖用量,蒸汽的波及系数增加较小。

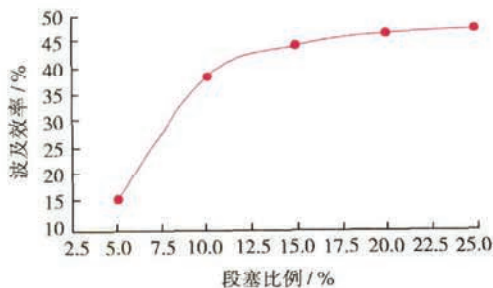


图 4 不同段塞尺寸时的蒸汽波及系数

Fig. 4 Steam sweep efficiency for different slug size

### 2.3 颗粒堵剂粒径

运用 1/3~2/3 架桥理论确定浅部调剖的封窜剂颗粒粒径,用于深部调剖的封窜剂运用 1/3~1/9 架桥理论<sup>[7]</sup>。由于调剖封窜剂粒径是根据地层岩石平均孔隙直径推算出的平均值,实际选用时要考虑到最大孔径和最大粒径,颗粒分布要有一个合适的范围,应依据有关测井资料、大孔道描述资料和岩心试验来选定。根据有关资料介绍和实际经验,高温调剖封窜剂的最大粒径可选为平均粒径的 3~5 倍,并控制在总量的 0.1%~0.2%。

## 3 汽窜井组调剖参数设计

图 5 为 L1833 井组汽窜分布,从中可以看出,由

于近井间的屏蔽效应,各井组的汽窜基本上以近井井间窜通为主,但也出现了 L1833 井和 L1730 井间的非近井窜通的情况。由当时井组的注采汽窜过程可以看出,L1833 井注汽时其邻近的 L1731 井和 L1832 井正处于关井阶段。

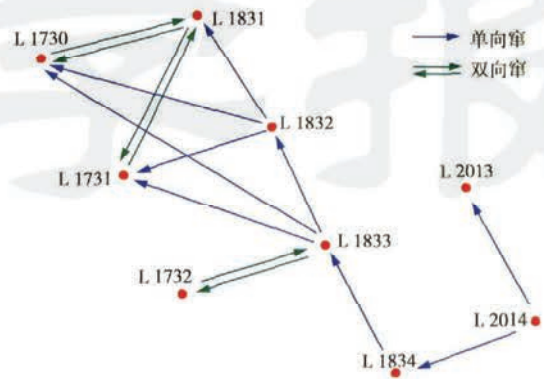


图 5 L1833 井组汽窜分布

Fig. 5 The steam breakthrough directions of L1833 well group

根据注汽历史资料,选择最新汽窜周期的注入动态,根据 L1833 井组的井距、射孔层地质参数、注汽参数及见汽时间对窜汽量进行了劈分,计算出井间窜通体积和平均孔隙直径<sup>[8]</sup>(表 1)。

表 1 L1833 井组窜通孔隙体积和平均孔隙直径

Table 1 Inter-well steam sweep volume and pore size in L1833 well group

窜通井	窜汽量/t	窜通孔隙体积/m <sup>3</sup>	平均孔隙直径/μm
L1833—L1832	390.0	46.07	29.40
L1833—L1731	390.0	42.20	27.44
L1833—L1732	122.0	168.68	24.50

根据最优化调剖设计原则和表 1 计算结果,对 L1833 井进行了调剖参数设计,调剖段塞尺寸取窜通孔隙体积 256.95 m<sup>3</sup> 的 12.5%,即调剖用量为 32 m<sup>3</sup>。按照深部调剖原则,颗粒堵剂粒径选取范围为 2.9~8.6 μm;L1833 井实施调剖后注汽。调剖前第一周期的注汽压力为 3.6 MPa,注汽强度为 13.5 t/(d·m);调剖后注汽压力为 4.3 MPa,注汽强度为 10.7 t/(d·m)。由于相邻井处于不同生产周期,调剖前、后相邻汽窜井的生产动态如表 2 所示。

由表 2 可以看出,L1833 井调剖后,3 口邻井的井口温度和含水率变化较小。这表明对应邻井的汽窜通道得到封堵,堵调效果较好。

## 4 结论

(1) 井间汽窜通道内为凝析水和蒸汽驱后的残余

表 2 L1833 井组汽窜井调剖前、后生产动态

Table 2 Production performance of production wells near L1833 Well

井 号	调 剖 前					调剖后(注汽阶段)		
	周期	温度变化/℃	含水率变化/%	见汽时间/d	汽窜时间/d	周期	温度变化/℃	含水率变化/%
L1832	4	46→102	36→95	3	20	5	57→52	23→25
L1731	3	59→80	42→98	7	23	4	68→65	34→30
L1732	5	42→93	31→96	4	20	6	72→67	42→35

油,油层内为汽驱水的两相流动过程,蒸汽在驱替过程中和周围岩体之间存在传热而产生凝析,形成蒸汽驱的非活塞驱替。

(2) 井间出现多向窜通时,窜汽量与井间平均连通程度和窜通角有关。

(3) 蒸汽驱油藏数值模拟方法研究表明,调剖段塞位置处于井间之中部时,调剖效果较好。初次调剖段塞尺寸为 10%~15% 时的蒸汽波及效率达到最大。

(4) 对 L1833 井进行了调剖参数设计,按照深部调剖原则选取了颗粒堵剂粒径,实施调剖后注汽,对应邻井的汽窜通道得到封堵,堵调效果较好。

## 参 考 文 献

- [1] 邵先杰,汤达祯,樊中海,等. 河南油田浅薄层稠油开发技术试验研究[J]. 石油学报,2004,25(2):74-79.  
Shao Xianjie, Tang Dazhen, Fan Zhonghai, et al. Development technologies for shallow and thin heavy-oil reservoir in Henan Oil-field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 74-79.
- [2] 胡常忠,刘新福. 浅薄层蒸汽吞吐规律[J]. 石油学报,1995,16(2):71-76.  
Hu Changzhong, Liu Xinfu. A study on regularity of steam stimulation for a shallow and thin heavy oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(2): 71-76.
- [3] 凌建军,宋振宇. 蒸汽吞吐阶段“汽窜”现象实质研究[J]. 江汉石油学院学报,1996,18(1):58-61.  
Ling Jianjun, Song Zhenyu. A study of the essentials of ‘steam channeling’ in the process of steam soaking[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1996, 18(1): 58-61.
- [4] 张锐. 稠油热采技术[M]. 北京:石油工业出版社,1999:414-418.  
Zhang Rui. Thermal recovery technology in heavy oil reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 414-418.
- [5] 郑惠光. 非牛顿原油流变特性及其在油田开发中的应用[J]. 江汉石油学院学报,2003,25(3):90-91.  
Zheng Huiguang. Rheological properties of non-Newtonian crude oil percolation and its application in oilfield development[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(3): 90-91.
- [6] 杨继盛. 采气工艺基础[M]. 北京:石油工业出版社,1992:53-56.  
Yang Jisheng. Element of gas production technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 53-56.
- [7] 张金波,鄢捷年. 钻井液中暂堵剂颗粒尺寸分布优选的新理论和新方法[J]. 石油学报,2004,25(6):88-91.  
Zhang Jinbo, Yan Jienian. New theory and method for optimizing the particle size distribution of bridging agents in drilling fluids [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6): 88-91.
- [8] 王允诚. 油层物理学[M]. 北京:石油工业出版社,1993:41-42.  
Wang Yuncheng. Petrophysics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 41-42.

(收稿日期 2006-04-30 改回日期 2006-06-19 编辑 孟伟铭)

版权所有