

文章编号:1673-5005(2007)06-0068-06

## 氮气泡沫开发稠油底水油藏的物质平衡方程

庞占喜<sup>1</sup>, 程林松<sup>1,2</sup>, 何晓明<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 石油天然气工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

**摘要:**稠油底水油藏蒸汽吞吐过程中易形成底水在加热范围内的锥进,在底水锥进严重的生产井底部高压注入氮气泡沫,可以将水锥压回原始油水界面。将注氮气泡沫压水锥的过程看作气驱油、油驱泡沫和泡沫驱水3个过程,建立了多轮次蒸汽吞吐后注氮气泡沫控制稠油底水油藏底水锥进的物质平衡方程,得到了泡沫分离的氮气和表面活性剂溶液的启动油量、原油富集带厚度以及底水面深度的计算方法。对胜利油田某稠油底水油藏的一口生产井实施注氮气泡沫压水锥进行了计算,结果表明,对于600 m<sup>3</sup>/h的注氮气速度,注泡沫19 d可将水锥压回原始油水界面,最优的射孔高度距原始油水界面14.26 m。

**关键词:**物质平衡方程; 氮气; 泡沫; 稠油; 底水油藏

**中图分类号:**TE 357.4

**文献标识码:**A

## Material balance equations of heavy oil reservoir with bottom water exploited by injecting nitrogen foam

PANG Zhan-xi<sup>1</sup>, CHENG Lin-song<sup>1,2</sup>, HE Xiao-ming<sup>1</sup>

(1. Faculty of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Bottom water coning exists in steam heating area during the multiperiodic steam huff and puff in heavy oil reservoir with bottom water. Nitrogen foam injected into bottom of water coning well can push bottom water to original water-oil contact. The process of water coning control by injecting nitrogen foam was simplified as gas driving oil, oil driving foam and foam driving water. Material balance equations were obtained to study the water coning control technology in heavy oil reservoir with bottom water. The calculation methods of augment oil volume of injected nitrogen foam and released nitrogen, thickness of enriched oil zone and depth of bottom water were proposed. These equations were applied to a production well of heavy oil reservoir with bottom water in Shengli Oilfield. The results show that the water coning can be pushed to the original water-oil contact at nitrogen injection rate of 600 m<sup>3</sup>/h after injecting nitrogen foam 19 days, and the optimum wellbore penetration into a pay zone is 14.26 m above the original water-oil contact.

**Key words:** material balance equation; nitrogen; foam; heavy oil; bottom water reservoir

经过多轮次蒸汽吞吐,稠油底水油藏中形成一定的加热范围,为受热后的原油提供了流动空间,但蒸汽吞吐生产阶段易形成底水在加热范围内的突破锥进<sup>[1-2]</sup>。如果向底水锥进的生产井底部按一定的气液比高压注入非凝析的氮气和表面活性剂溶液,即向地层内注入泡沫,泡沫中不断分离出的氮气由于重力分异作用逐渐占据加热带的顶部形成次生气

顶,次生气顶下面是氮气启动的原油与锥进底水所形成的油水过渡带,油水过渡带的下面为泡沫存在区,而泡沫区的下面为纯水层。因此,注氮气泡沫控制水锥的过程可以简化为气驱油、油驱泡沫和泡沫驱水3个过程<sup>[3]</sup>。笔者利用物质平衡方法来确定氮气及表面活性剂溶液启动的原油体积和使底水面下降到某高度所需注入的氮气泡沫体积。

收稿日期:2007-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(50276040)

作者简介:庞占喜(1977-),男(汉族),山东禹城人,博士研究生,主要从事稠油开发和数值模拟研究。

## 1 蒸汽吞吐加热范围的计算

根据 Marx-Langenheim 加热模型<sup>[4]</sup>,注入蒸汽在地层中沿径向流动,岩石和流体的物性不变,流体饱和度不变;加热范围内地层处于蒸汽温度,加热范围外的地层处于原始地层温度;注入蒸汽温度和流量不变,加热范围模式如图1所示(图中, $A_s$ 、 $A_w$ 分别为蒸汽带和热水带)。根据假设,可得到蒸汽吞吐的加热范围计算公式为

$$A(t) = \frac{i_s h_m h M_R \alpha_s}{4 \lambda_s^2 \Delta \theta} \left( \exp(t_D) \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} + 2 \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right).$$

其中

$$t_D = \frac{4 \lambda_s^2}{M_R^2 h^2 \alpha_s} t.$$

式中, $A(t)$ 为任一时间 $t$ 对应的蒸汽吞吐的加热面积, $\text{m}^2$ ;  $i_s$ 为蒸汽注入速率, $\text{kg/h}$ ;  $h_m$ 为饱和蒸汽的焓, $\text{kJ/kg}$ ;  $h$ 为油层厚度, $\text{m}$ ;  $M_R$ 为油层的热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_s$ 为顶、底层的热扩散系数, $\text{m}^2/\text{h}$ ;  $\lambda_s$ 为顶、底层岩石的导热系数, $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\Delta \theta$ 为油层温度变化量, $^\circ\text{C}$ ;  $t$ 为蒸汽注入时间, $\text{h}$ 。

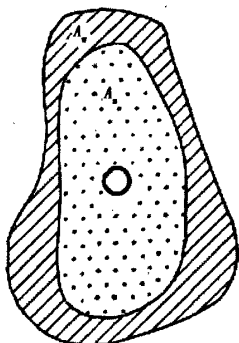


图1 Marx-Langenheim 加热范围模式图

## 2 氮气泡沫压水锥的物质平衡方程

为了便于研究,假设:

- (1) 实施注氮气泡沫压水措施前,已进行若干周期的蒸汽吞吐,底水在加热范围内锥进,加热范围外的冷区为不渗透区,如图2所示;
- (2) 油藏顶部不存在原生气顶;
- (3) 地层岩石、油相、水相以及注入的发泡剂溶液均不可压缩;
- (4) 注氮气泡沫过程中,气驱油、油驱泡沫和泡沫驱水的流动为垂向上的一维流动;
- (5) 注氮气泡沫过程中,油气界面、油泡沫界面

均能稳定下降;

(6) 氮气可迅速溶解在原油中,但不溶于地层水和发泡剂溶液;

(7) 地层内氮气泡沫的气泡大小和泡沫干度均为定值。

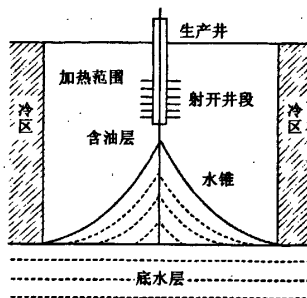


图2 稠油底水油藏底水锥进模式图

### 2.1 地层条件下注入泡沫总体积

已知注入地层的发泡剂溶液总体积为  $V_L$ , 标准状况下气液比为  $R_{gl}$ , 则地层条件下氮气的总体积为

$$V_g = R_{gl} B_g V_L,$$

其中

$$B_g = \frac{ZT}{p} \frac{P_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}},$$

地层条件下注入泡沫总体积为

$$V_f = (1 + R_{gl} B_g) V_L.$$

式中, $V_g$ 为地层条件下氮气的总体积, $\text{m}^3$ ;  $V_f$ 为地层条件下注入泡沫的总体积, $\text{m}^3$ ;  $p$ 为目前地层压力,  $\text{Pa}$ ;  $Z$ 为目前地层条件下氮气的压缩因子;  $R$ 为气体常数,  $8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ ;  $T$ 为绝对温度,  $\text{K}$ ;  $P_{sc}$ 为标准状况下的压力,  $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;  $Z_{sc}$ 为标准状况下氮气的压缩因子,取1;  $T_{sc}$ 为标准状况下的温度,  $293.15 \text{ K}$ 。

### 2.2 地层内剩余泡沫体积及泡沫分离氮气体积

注入地层的泡沫不断发生破裂而分离出氮气,氮气在重力分异作用下逐步向油藏顶部运移,运移过程中由于氮气在原油中的溶解和降粘作用对地层内的剩余油有启动作用,氮气启动的原油在重力作用下向下运移形成原油富集带<sup>[5-6]</sup>。根据泡沫总量平衡方程,泡沫的破灭速度  $C_f$  为地层含水饱和度  $S_w$ 、气相渗流速度  $v_g$ 、地层内气泡密度  $n_f$  (单位体积内的气泡个数) 的函数<sup>[7]</sup>, 即

$$C_f = f(S_w, v_g, n_f).$$

在底水锥进地层中,地层含水饱和度为  $1 - S_{orw}$  ( $S_{orw}$  为水驱残余油饱和度),因此含水饱和度对泡沫破灭速度的影响为定值。同时,氮气泡沫注入结

束后,泡沫分离出的氮气仅在重力分异作用下向上运移,其渗流速度基本为定值,因此泡沫的破灭速度仅是气泡密度的函数,即

$$C_t = k_t n_t.$$

式中,  $k_t$  为泡沫破灭速度常数,  $s^{-1}$ 。

从初始时刻至  $t$  时刻,破裂的泡沫总个数为

$$\int_0^t V_f(t) C_t dt = C_t \int_0^t V_f(t) dt.$$

至  $t$  时刻因泡沫破裂分离出的氮气总体积为

$$\Delta V_g(t) = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{D_B}{2} \right)^3 C_t \int_0^t V_f(t) dt = k_t \int_0^t V_f(t) dt.$$

因此,  $t$  时刻地层内泡沫总体积为

$$V_f(t) = V_i \exp\left(-\frac{k_t}{x} t\right).$$

地层条件下泡沫分离出的氮气总体积为

$$\Delta V_g(t) = V_i x \left[ 1 - \exp\left(-\frac{k_t}{x} t\right) \right].$$

式中,  $V_f(t)$  为  $t$  时刻地层内泡沫的总体积,  $m^3$ ;  $\Delta V_g(t)$  为地层条件下泡沫累积分离氮气的体积,  $m^3$ ;  $D_B$  为地层条件下气泡直径,  $m$ ;  $x$  为地层条件下泡沫干度, 无因次。

### 2.3 泡沫分离氮气波及的岩石体积

注氮气泡沫至  $t$  时刻, 泡沫分离氮气的物质平衡方程<sup>[8-11]</sup> 为

$$n_j = \Delta n_i - n_p - n_{go} - n_{gs}, \quad (1)$$

其中

$$n_j = \frac{p}{ZRT} V_j,$$

$$\Delta n_i = \frac{p}{ZRT} \Delta V_g(t),$$

$$n_p = \frac{p_{sc}}{Z_{sc} RT_{sc}} G_p,$$

$$n_{go} = \frac{p_{sc}}{Z_{sc} RT_{sc}} V_{od} (R_{go} - R_{gi}),$$

$$n_{gs} = \frac{p_{sc}}{Z_{sc} RT_{sc}} V_{gr} \varphi S_{org} (R_{go} - R_{gi}).$$

式中,  $V_j$  为自由氮气所占地层孔隙体积,  $m^3$ ;  $G_p$  为标准状况下累积回采氮气的体积,  $m^3$ ;  $V_{od}$  为地面累积产油量,  $m^3$ ;  $R_{go}$  和  $R_{gi}$  分别为地层条件下和标准状况下的溶解气油比,  $m^3/m^3$ ;  $V_{gr}$  为地层内的氮气占据的岩石体积,  $m^3$ ;  $\varphi$  为地层孔隙度, 无因次;  $S_{org}$  为气驱残余油饱和度, 无因次。

由式(1)得到目前地层条件下自由氮气的体积为

$$V_j = \Delta V_g(t) - B_g [G_p + V_{od} (R_{go} - R_{gi}) +$$

$$V_{gr} \varphi S_{org} (R_{go} - R_{gi})]. \quad (2)$$

泡沫破裂累积分离氮气所占地层孔隙体积  $V_d$

为

$$V_d = V_{gr} \varphi (1 - S_{wi} - S_{org}). \quad (3)$$

式中,  $S_{wi}$  为束缚水饱和度。

因为地层条件下自由氮气体积等于泡沫破裂累积分离氮气所占地层孔隙体积, 因此, 由式(2), (3)可以得到地层内的氮气所占岩石体积  $V_{gr}$  为

$$V_{gr} = \frac{\Delta V_g(t) - B_g [G_p + V_{od} (R_{go} - R_{gi})]}{\varphi [1 - S_{wi} - S_{org} + B_g S_{org} (R_{go} - R_{gi})]}.$$

### 2.4 地层内氮气启动的油量

泡沫破裂累积分离氮气在油层上方形成次生气顶, 能够启动实施蒸汽吞吐后的残余油, 包括注入氮气启动的未溶解氮气的原油和气驱残余油溶解氮气后因体积膨胀而启动的原油。

启动的未溶解氮气的原油体积  $V_{og1}$  为

$$V_{og1} = V_{gr} \varphi (S_{orw} - S_{org}).$$

气驱残余油溶解氮气后因体积膨胀而启动的原油体积  $V_{og2}$  为

$$V_{og2} = \frac{V_{gr} \varphi S_{org} B_{oi}}{B_{oi}} - V_{gr} \varphi S_{org}.$$

式中,  $B_{oi}$  和  $B_{on}$  分别为未溶解氮气和饱和氮气后的原油体积系数。

泡沫破裂累积分离氮气所启动的原油体积为

$$V_{og} = V_{og1} + V_{og2}.$$

### 2.5 地层内泡沫启动油量

注入油层的表面活性剂溶液能够大幅度降低油水界面张力, 改善地层岩石的表面润湿性, 使原来呈束缚状态的原油通过油水乳化、液膜置换等方式成为可动油, 降低水驱残余油饱和度。  $t$  时刻地层中泡沫所占岩石体积为

$$V_f(t) = V_{fr} \varphi (1 - S_{wi} - S_{orf}).$$

泡沫启动的原油体积为

$$V_{of} = V_{fr} \varphi (S_{orw} - S_{orf}).$$

式中,  $V_{of}$  为泡沫启动原油体积,  $m^3$ ;  $V_{fr}$  为  $t$  时刻剩余泡沫所占岩石体积,  $m^3$ ;  $S_{orf}$  为表面活性剂溶液驱替后的残余油饱和度, 无因次。

### 2.6 富集油带的厚度

富集原油包括注入氮气所启动的原油、表面活性剂溶液启动的原油和蒸汽吞吐剩余油, 油带的厚度等于油气界面和油泡沫界面之间的距离, 即

$$V_{og} + V_{of} + V_{gr} \varphi (\bar{S}_o - S_{orw}) + V_{or} \varphi \bar{S}_o = V_{or} \varphi S_{oi}.$$

因此, 油带的体积为

$$V_{\text{or}} = \frac{V_{\text{og}} + V_{\text{of}} + V_{\text{gr}} \varphi(\bar{S}_{\text{o}} - S_{\text{orw}})}{\varphi(S_{\text{oi}} - \bar{S}_{\text{o}})}$$

富集油带的厚度为

$$H_{\text{or}} = \frac{V_{\text{or}}}{A(t)}$$

式中,  $V_{\text{or}}$  为富集油带的体积,  $\text{m}^3$ ;  $\bar{S}_{\text{o}}$  为蒸汽吞吐剩余油饱和度, 无因次;  $S_{\text{oi}}$  为原始含油饱和度, 无因次;  $H_{\text{or}}$  为富集油带厚度,  $\text{m}$ 。

## 2.7 水锥深度

底水面以上的岩石总体积  $V_{\text{R}}$  为

$$V_{\text{R}} = V_{\text{gr}} + V_{\text{or}} + V_{\text{ir}}$$

根据蒸汽吞吐后的加热面积  $A(t)$ , 可计算出目前水锥的深度  $H_{\text{w}}$ , 即

$$H_{\text{w}} = H + \frac{V_{\text{R}}}{A(t)} \quad (4)$$

式中,  $H$  为油层顶面深度,  $\text{m}$ 。

利用式(4)即可得到水锥深度随氮气泡沫注入时间的变化关系, 因此可以计算得到锥进的底水被压至某一高度时所需注入的氮气的量、表面活性剂溶液体积和启动的油量。

## 3 氮气泡沫压锥井的避射高度

底水油藏生产井的避射高度是开发底水油藏的一项重要参数。避射高度大, 可延长井的见水时间, 但油井产能低; 避射高度小, 可以提高油井产能, 但油井见水较快。根据临界产量可计算最优避射程度<sup>[12]</sup>, 表达式为

$$Q_{\text{c}} = \frac{2\pi k \Delta \rho_{\text{wg}}}{\mu_{\text{o}} \beta_{\text{o}}} (R_{\text{e}} - \sqrt{R_{\text{e}}^2 - R_{\text{e}} H_{\text{or}} y})^2 \times \left[ \frac{H_{\text{or}} y}{\sqrt{R_{\text{e}}^2 + H_{\text{or}}^2 y^2}} + \frac{H_{\text{or}} (R_{\text{e}} - R_{\text{w}})}{R_{\text{w}} R_{\text{e}} \ln(R_{\text{e}}/R_{\text{w}})} (1 - y) \right] \quad (5)$$

式中,  $Q_{\text{c}}$  为临界产量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $k$  为地层绝对渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $\Delta \rho_{\text{wg}}$  为地层原油与泡沫密度差,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mu_{\text{o}}$  为地层原油粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\beta_{\text{o}}$  为原油体积系数;  $R_{\text{e}}$  为供给半径,  $\text{m}$ ;  $y$  为避射程度, 无因次;  $R_{\text{w}}$  为油井半径,  $\text{m}$ 。

对式(5)两端的  $y$  求导, 当  $\frac{\partial Q_{\text{c}}}{\partial y} = 0$  时, 即可得到最优的避射程度  $y_{\text{opt}}$ , 即

$$(R_{\text{e}} - C_1) \frac{R_{\text{e}} H_{\text{or}}}{C_1} \left[ \frac{y_{\text{opt}}}{C_2} + C_3 (1 - y_{\text{opt}}) \right] + (R_{\text{e}} - C_1)^2 \left( \frac{1}{C_2} - \frac{y_{\text{opt}}^2}{C_2^2} - C_3 \right) = 0$$

其中

$$C_1 = \sqrt{R_{\text{e}}^2 - R_{\text{e}} H_{\text{or}} y_{\text{opt}}}; C_2 = \sqrt{\left( \frac{R_{\text{e}}}{H_{\text{or}}} \right)^2 - y_{\text{opt}}^2};$$

$$C_3 = \frac{H_{\text{or}} (R_{\text{e}} - R_{\text{w}})}{R_{\text{e}} R_{\text{w}} \ln(R_{\text{e}}/R_{\text{w}})}$$

因此, 距离目前油水界面的避射高度为原油富集带的避射高度与泡沫富集带厚度之和, 即

$$H_{\text{y}} = H_{\text{or}} y_{\text{opt}} + H_{\text{ir}}$$

式中,  $H_{\text{y}}$  为距离原始油水界面的避射高度,  $\text{m}$ ;  $H_{\text{ir}}$  为泡沫富集带厚度,  $\text{m}$ 。

## 4 计算实例

胜利油田某底水稠油油藏的一口生产井, 油层顶面深 1 138.4 m, 原始油水界面 1 174.4 m, 油层厚度 36 m, 孔隙度 28.0%, 油层渗透率 2.5364  $\mu\text{m}^2$ , 原始含油饱和度 68.5%, 原始地层温度 56  $^{\circ}\text{C}$ , 原始地层压力 11.65 MPa, 原油密度 0.9788  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 50  $^{\circ}\text{C}$  时地面脱气原油粘度为 6.89  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。储层及流体的热物性参数为: 油层热容 1694.17  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 顶、底层热容 2 598.69  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 油层导热系数 7.32  $\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 顶、底层热扩散系数 0.0028  $\text{m}^2/\text{h}$ , 原油体积系数 1.02, 束缚水饱和度 0.32, 气驱残余油饱和度 0.10, 水驱残余油饱和度 0.28, 表面活性剂溶液驱替后的残余油饱和度 0.08。该油藏自生产之日起, 已进行了 6 轮次的蒸汽吞吐, 累积注气量为  $2.95 \times 10^4 \text{ t}$ , 累积产油量为  $4.50 \times 10^4 \text{ t}$ , 累积产水量为  $8.40 \times 10^4 \text{ t}$ , 油水界面上升至 1 153.0 m, 综合含水率达到 95.1%。

蒸汽吞吐 6 个周期之后, 此井加热半径达到 36.85 m, 加热面积为 4 266.04  $\text{m}^2$ , 生产结束时加热区的平均温度为 169.45  $^{\circ}\text{C}$ , 剩余油饱和度为 34.2%。自第 4 个吞吐周期开始, 平均日产水量从第 3 周期的 3.2  $\text{m}^3$  增至 74.2  $\text{m}^3$ , 说明底水已锥进到生产井, 因而造成第 5、6 周期大量产水, 产油量大幅度降低。

对该生产井实施注氮气泡沫控制底水锥进措施, 本文中只进行了注氮气泡沫吞吐作业第 1 周期的相关计算, 因此不需考虑回采气量和产油中溶解氮气的问题。蒸汽吞吐加热半径和平均温度计算结果见表 1。标准状况下的注氮气速度为 600  $\text{m}^3/\text{h}$ , 地层条件下泡沫的气液比为 1:1, 注氮气泡沫压锥措施预测结果见表 2。

表 1 蒸汽吞吐阶段加热半径及平均温度

| 周期 | 注汽时间<br>$t/d$ | 周期注汽量<br>$V/m^3$ | 生产时间<br>$t_p/d$ | 平均日产油量<br>$V_o/m^3$ | 平均日产水量<br>$V_w/m^3$ | 平均温度<br>$\theta/^\circ C$ | 加热半径<br>$R/m$ |
|----|---------------|------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------------|---------------|
| 1  | 11            | 3700             | 250             | 47.4                | 7.9                 | 62.14                     | 17.11         |
| 2  | 16            | 4600             | 604             | 29.2                | 2.4                 | 69.86                     | 19.33         |
| 3  | 10            | 3900             | 650             | 16.2                | 3.2                 | 84.09                     | 21.35         |
| 4  | 9             | 4700             | 240             | 15.0                | 35.8                | 116.61                    | 24.32         |
| 5  | 9             | 4050             | 195             | 4.0                 | 74.2                | 134.60                    | 28.13         |
| 6  | 9             | 4200             | 93              | 7.2                 | 78.7                | 169.45                    | 36.85         |

表 2 注氮气速度  $600\text{ m}^3/\text{h}$  时控制水锥动态预测结果

| 注入时间<br>$t/d$ | 泡沫波及体积<br>$V_R/m^3$ | 氮气波及体积<br>$V_{NR}/m^3$ | 泡沫启动原油体积<br>$V_{of}/m^3$ | 氮气启动原油体积<br>$V_{og}/m^3$ | 油带厚度<br>$H_{or}/m$ | 底水面深度<br>$H_w/m$ |
|---------------|---------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|
| 5             | 6684.60             | 6669.26                | 430.49                   | 423.87                   | 4.48               | 1158.49          |
| 10            | 8026.48             | 15801.15               | 516.91                   | 1004.26                  | 8.29               | 1163.98          |
| 15            | 8404.06             | 25748.10               | 541.22                   | 1636.45                  | 12.11              | 1169.47          |
| 20            | 8510.30             | 35924.40               | 548.06                   | 2283.22                  | 15.94              | 1174.97          |

对于所选的注氮气速度  $600\text{ m}^3/\text{h}$  而言,注氮气泡沫 19 d 可以将水锥压回原始油水界面 1174.4 m 处,启动油量为  $2700.66\text{ m}^3$ ,油带厚度为 15.18 m(图 3)。因此注氮气泡沫不但可以将锥进的底水压回,而且可以启动实施蒸汽吞吐后的剩余油,实现控水增油的目的。

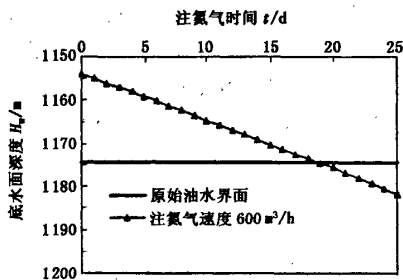


图 3 底水面深度随注氮气时间的变化曲线

措施井的生产位置应位于原油富集区域,这样可有效避免地层内用于封堵底水上升的富集泡沫回采,同时为避免次生气顶中氮气被大量回采,生产位置也应与次生气顶底界有一段距离。避射高度应距离原始油水界面 14.26 m 左右(图 4)。

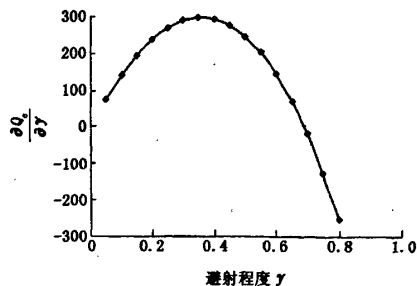


图 4 原油富集带避射程度优选图

## 5 结论及建议

(1) 注氮气泡沫压水锥的过程可简化为气驱油、油驱泡沫和泡沫驱水 3 个过程,利用推导出的多轮次蒸汽吞吐稠油底水油藏注氮气泡沫压水锥的物质平衡方程,可以求出注入泡沫的启动油量、泡沫分离氮气的启动油量、原油富集带厚度以及将底水面压至某一高度所需的氮气体积和表面活性剂溶液体积。

(2) 本文实例中,  $600\text{ m}^3/\text{h}$  的注氮气速度,注氮气泡沫 19 d 可将水锥压回原始油水界面,启动油量为  $2700.66\text{ m}^3$ ,油带厚度为 15.18 m;措施井的生产位置应位于原油富集带内,避射高度应距离原始油水界面 14.26 m。

### 参考文献:

- [1] 赵福麟,戴彩丽,王业飞. 海上油田提高采收率的控水技术[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(2):53-58.  
ZHAO Fu-lin, DAI Cai-li, WANG Ye-fei. Water control technique of enhanced oil recovery for offshore oil field [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(2):53-58.
- [2] 戴彩丽,路建国,任焱,等. 薄层底水油藏底水锥进控制可视化研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(3):72-76.  
DAI Cai-li, LU Jian-guo, REN Shang, et al. Visual studies on controlling water coning in thin oil reservoir with bottom water[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(3):72-76.
- [3] 杨元亮,沈国华,宋文芳,等. 注氮气控制稠油油藏底

- 水水锥技术[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(3): 83-84.
- YANG Yuan-liang, SHEN Guo-hua, SONG Wen-fang, et al. Nitrogen injection technique for controlling bottom water coning in heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(3): 83-84.
- [4] JONES J. Cyclic steam reservoir model for viscous oil pressure depleted, gravity drainage reservoirs [R]. SPE 6544, 1977.
- [5] 刘中春, 侯吉瑞, 岳湘安, 等. 泡沫复合驱微观驱油特性分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(1): 49-53.
- LIU Zhong-chun, HOU Ji-rui, YUE Xiang-an, et al. Micro-visual analysis on oil displacement in alkaline-surfactant-polymer foam flooding [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(1): 49-53.
- [6] 吕广忠, 刘显太, 尤启东, 等. 氮气泡沫热水驱油室内实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(5): 50-53.
- LÜ Guang-zhong, LIU Xian-tai, YOU Qi-dong, et al. Experiment on nitrogen hot-water foam flooding in laboratory [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(5): 50-53.
- [7] KOVSCEK A R, PATZEK T W, RADKE C J. Simulation of foam transport in porous media [R]. SPE 26402, 1993.
- [8] 马永祥. 对凝析气藏物质平衡方程的研讨[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(6): 45-50.
- MA Yong-xiang. A study on material balance equation for gas condensate reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(6): 45-50.
- [9] 康晓东, 李相方, 李敬松, 等. 考虑注采差异的循环注气开发凝析气藏物质平衡方程[J]. 天然气工业, 2005, 25(3): 118-120.
- KANG Xiao-dong, LI Xiang-fang, LI Jing-song, et al. Material balance equation of condensate gas reservoirs exploited by cycle gas injection considering the injection/production difference [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(3): 118-120.
- [10] 陈玉祥, 马发明, 王霞, 等. 凝析气藏物质平衡方程计算新方法[J]. 天然气工业, 2005, 25(2): 104-106.
- CHEN Yu-xiang, MA Fa-ming, WANG Xia, et al. New calculation method of material equilibrium equation for condensate reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(2): 104-106.
- [11] KING G R. Material balance techniques for coal seam and devonian shale gas reservoir with limited water influx [R]. SPE 20730, 1993.
- [12] GUO Bo-yun, LEE R L-H. A simple approach to optimization of completion interval in oil/water coning systems [R]. SPE 23994, 1993.

(编辑 李志芬)

(上接第67页)

- [6] 倪学锋, 程林松. 水平井蒸汽吞吐热采过程中水平段加热范围计算模型[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 108-112.
- NI Xue-feng, CHENG Lin-song. Calculating models for heating area of horizontal well bore in steam stimulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 108-112.
- [7] 周生田, 马德泉, 刘民. 射孔水平井孔眼分布优化研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(3): 52-54.
- ZHOU Sheng-tian, MA De-quan, LIU Min. Optimization of perforation tunnels distribution in perforated horizontal well [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(3): 52-54.
- [8] 刘想平, 张兆顺, 刘翔鹤. 水平井筒内与渗流耦合的流动压降计算模型[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(2): 36-39.
- LIU Xiang-ping, ZHANG Zhao-shun, LIU Xiang-e. A model to calculate pressure drops of horizontal well bore variable mass flow coupled with flow in a reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(2): 36-39.
- [9] 周生田, 张琪, 李明忠. 孔眼流入对水平井中流动影响的实验研究[J]. 实验力学, 2000, 15(3): 306-311.
- ZHOU Sheng-tian, ZHANG Qi, LI Ming-zhong. An experimental study for horizontal well flow under the influence of the inflow through perforation [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(3): 306-311.
- [10] 陈月明. 注蒸汽热力采油[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996, 7(1): 29-30.
- [11] JONES J. Why cyclic steam predictive model get no respect [J]. SPE Reservoir Engineering, 1992, 7(1): 67-74.
- [12] van LOOKEREN J. Calculation methods for linear and radial steam flow in oil reservoir [J]. SPEJ, 1983, 23(3): 427-439.

(编辑 李志芬)