

# 水平井热采工艺研究与应用

孙鹏勃

辽河油田公司曙光采油厂工艺研究所

DOI:10.12238/jpm.v3i7.5082

**[摘要]** 随着油田进入开发中后期,原油储量及产量均出现不同程度下降,稠油资源作为重要的接替资源之一,由于其具有粘度大、渗流阻力大的特点,需要应用水平井热采工艺来提升其开采效果。在应用水平井注蒸汽技术时,可以考虑蒸汽中加入二氧化碳或表明活性剂等助剂,能够显著提升水平井蒸汽驱效果。对于蒸汽驱效果不理想的稠油油藏,可以使用火烧油层技术、电磁加热技术等热采工艺。水平井火烧油层技术、水平井重力辅助火烧油层技术、水平井二氧化碳蒸汽吞吐技术、水平井电加热开采技术等水平井热采工艺,能够显著提升稠油开采效果,大幅提升原油采收率,具有较好的应用前景。

**[关键词]** 水平井; 热采工艺; 研究; 应用

**中图分类号:** TU832.1+6 **文献标识码:** A

## Research and Application of Thermal Mining Process of Horizontal Wells

Pengbo Sun

Technology Research Institute of Shuguang Oil Production Plant, Liaohe Oilfield Company

**[Abstract]** As the oil field enters the middle and late stage of development, the crude oil reserves and output decline to varying degrees. For the heavy oil resources, as one of the important replacement resources, due to the characteristics of large viscosity and large seepage resistance, the horizontal well thermal mining process is needed to improve its mining effect. When applying horizontal well injection steam technology, the steam can include carbon dioxide or additives indicating the active agent, which can significantly improve the effect of horizontal well steam drive. For thick oil reservoir whose steam drive effect is not ideal, hot mining process such as burning oil layer technology and electromagnetic heating technology can be used. Horizontal well burning oil layer technology, horizontal well gravity auxiliary burning oil layer technology, horizontal well carbon dioxide steam throughput technology, horizontal well electric heating mining technology, can significantly improve the effect of heavy oil mining, greatly improve the crude oil recovery, has a good application prospect.

**[Key words]** horizontal well; thermal mining process; research; application

油田经过多年的开采,目前已进入开发中后期,常规油气资源储量越来越少,勘探与开发程度越来越高,亟待寻找接替资源,实现油田的可持续发展。盆地含油丰富的非常规油气资源,在西部斜坡带稠油资源含量较为丰富。稠油油藏构造复杂、地层非均质性严重,岩性以灰-灰白色砂砾岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩为主,储层孔隙度高和渗透率相对较高,埋藏相对较浅。由于稠油成熟度相对较低,胶质成分含量高,原油粘度大、密度小、渗流阻力大,其开发方式也不同于常规原油。为了有效提高稠油采收率,目前多采用水平井热采工艺技术。

### 1 稠油热采工艺技术

#### 1.1 蒸汽吞吐

蒸汽吞吐技术原理是向地层中注入蒸汽,使地层中稠油温度升高,达到降低稠油粘度的效果。这种技术应用较早,技术较

为成熟与简单,使用成本较低,投产周期短。但这种开发方式存在一定缺陷,当油井生产压力下降后,蒸汽吞吐的热能波及范围有限,靠近油井的地层中含水率上升,使得热能利用率变低。此外,这种开发方式对油层中纵向上稠油开发效果不理想,油井采收率相对较低。

#### 1.2 蒸汽驱

蒸汽驱能够持续向稠油地层中供给热量,能够提升加热效率,较蒸汽吞吐大大提高了波及范围,油井采收率也大大提高。蒸汽驱采用的蒸汽有水蒸气、二氧化碳和水蒸气、氢气和水蒸气,这些蒸汽不仅给地层带去热量,还能与稠油发生作用,降低接触到的稠油的粘度,提升开采效果。在直井中应用蒸汽驱,由于蒸汽密度小,会发生重力上窜,使得在垂向上驱替效果不好。而采用水平井开发,由于水平井水平段延伸方向与地层平行,接触面

积大,波及范围广,水平井结合蒸汽驱的方法能够最大限度的提高原油开发效率。

### 1.3 热水驱

热水驱通过向地层注入热水,降低原油粘度,改善地层相对渗透率,防止高粘油带的形成。蒸汽驱采用的蒸汽密度上与地层流体差别较大,容易导致出现汽窜,影响了加热效果,热水驱使用的水密度与地层流体相近,能够解决以上问题。热水驱操作简单,但由于热水单位体积携带热量有限,驱替效果一般,与常规水驱效果差不多,对于稠油藏,可以采用热水驱加表面活性剂的方法,该方法在降低稠油粘度的同时,还能够降低油水界面张力,同时还能出现水包油,进一步提升稠油开采效果。热水驱还可以结合氮气泡沫等,能够显著提升稠油开采效果。

### 1.4 火烧油层

火烧油层驱油技术是先将气体注入油层,然后利用各种方式将油层点燃,并持续将氧气或空气注入地层中,使地层不断向前燃烧。原油燃烧会导致地层温度升高,使得稠油粘度降低,稠油中的轻质组份被蒸馏,并且沿途产生水蒸气,燃烧烟气、水蒸气与蒸馏的稠油原油一起向前推进,使得稠油粘度显著降低。稠油中重质组份受到高温影响发生裂解产生焦炭,焦炭能够燃烧不断向前推进,将热量向前扩散,达到驱替原油的效果。火烧油层技术根据氧气注入的方向及是否有水注入,可以分为湿式火烧、干式正向火烧、反向火烧三种方式。火烧油层技术由于会产生蒸汽,其原理综合了蒸汽驱、焓混和驱等驱油机制,并且其驱替效果明显好于其它驱替手段,不过驱替过程中会消耗一部分原油,可达地层原油储量的15%。火烧油层技术与水平井结合,能够大大提高驱油效果。近年来,在水平井中应用重力辅助火烧油技术越来越普遍,该方式能够发挥重力辅助火烧油能量利用率高特点,结合水平井与储层接触面大、控油范围广的特点,能够提升加热效果,避免出现燃烧难以维持等问题,水平井重力辅助火烧油层技术能够大大提高单井采收率。

### 1.5 电磁加热技术

电磁加热技术是在向储层内通入电流,利用电流来加热地层流体中,达到稠油降粘的目的。电流的注入可控性好,能够消除注蒸汽或注水开发初期注入效果差,注入流体量不均匀、加热效率低等难题,根据加热方式不同,电磁加热技术分为电介质加热、电阻加热及感应加热。电磁加热技术多结合其它加热技术使用,能够达到较好的开采效果。电磁加热技术具有加热效率高、可控性好、安全环保等优点,但使用成本高、加热半径相对较小。

## 2 物理模型

热采水平井均衡采油完井方式为预充填砾石筛管/割缝衬管+打孔中心管组合完井。砾石填充筛管及割缝衬管可防止储层出砂及井眼坍塌,打孔中心管利用泄油孔的附加压降来调节流量,有效调节中心管内的流压分布使水平段流量剖面得以改善,从而达到均衡动用稠油油藏的目的。

在热采水平井均衡采油完井方式下,流体从泄油边界到井

底的流动过程中产生的压降主要包括理想储层渗流压降、储层表皮压降、泄油孔节流压降和中心管管流压降4部分,其表达式为:

$$p_e - p_w = \Delta p_r + \Delta p_s + \Delta p_h + \Delta p_w \quad (1)$$

根据中心管的长度以及沿水平井段储层渗透率的分布,将中心管等分为M个单元段,第i个单元段的泄油孔数量为 $N_i$ ,每个单元段根据内部泄油孔数量等分为若干个微元段,每个微元段内仅包含1个泄油孔。在此基础上,建立热采水平井均衡采油数学模型并提出优化设计方法。

## 3 数学模型

在采用热采水平井开发的稠油油藏中,流体在水平段内的流动与其在储层中的渗流相互制约,且互为边界条件。因此,要实现均衡采油,不仅要考虑储层条件,还要考虑水平段内流体流动压降对周围储层渗流造成的影响,这就需要储层渗流与水平段内变质量流动的耦合模型进行研究。

### 3.1 储层压降模型

在热采水平井生产过程中,流体在远离水平井的主体部分呈水平流动,而在井眼附近呈径向流动。因此,流体的渗流压降为远井端的平面渗流压降和近井端的径向渗流压降之和。针对流体在储层中的渗流过程,Josh提出了考虑渗透率各向异性和偏心距的水平井产能公式。徐景达根据水平段流体的流动特征,对Josh公式进行了改进,提出了修正的Josh公式,即:

$$q_L = 2\pi K_h \Delta p_r B \mu \alpha \frac{\phi \sigma}{\sigma} \div \div \ln 2a + 4a^2 - L^2 L + \beta h L \ln \beta 2h^2 - 4\beta^2 \delta^2 2\beta \pi hrw \quad (2)$$

由式(2)可得到理想储层渗流压降表达式为:

$$\Delta p_r = q_L B \mu 2\pi K_h \times \alpha \frac{\phi \sigma}{\sigma} \div \div \ln 2a + 4a^2 - L^2 L + \beta h L \ln \beta 2h^2 - 4\beta^2 \delta^2 2\beta \pi hrw \quad (3)$$

修正后的Josh公式适用于理想裸眼完井或完善井。而水平井在实际钻井与完井过程中,井眼附近的储层易受到损害和污染,流体在穿过井壁附近时需克服附加阻力,该储层表皮压降表达式为:

$$\Delta p_s = q_L \mu B^2 \pi K_h S \quad (4)$$

对于筛管/衬管完井,总表皮系数为钻井污染表皮系数、打开程度表皮系数和筛管/衬管完井表皮系数之和,其表达式为:

$$S = S_d + S_c + S_G \quad (5)$$

其中:

$$S_d = \alpha \frac{\phi \sigma}{\sigma} \div \div K K d - 1 \ln r d r w \quad (6)$$

$$S_c = 2.948 \alpha \frac{\phi \sigma}{\sigma} 1 C - 1 \times \alpha \frac{\phi \sigma}{\sigma} \div \div 2.498 C - 3.884 C^2 + 1.586 C^3 + 0.339 \ln \beta hrw - 1 \quad (7)$$

$$S_G = 542.8 K h K v L \Delta p_r q_L B \mu \quad (8)$$

因此,实际储层渗流压降为理想储层渗流压降与储层表皮压降之和,其表达式为:

$$\Delta p_r = \Delta p_r + \Delta p_s \quad (9)$$

以单元段为对象,第i个单元段渗流压降公式为:

$$\Delta p_r, i = \Delta p_r, i + \Delta p_s, i = q_i B \mu 2\pi K_i h_i \times \alpha \frac{\phi \sigma}{\sigma} \ln 2a + 4a^2 - \Delta L^2 \Delta L + \beta h_i \Delta L \ln \beta 2h_i^2 - 4\beta^2 \delta^2 2\beta \pi hrw + q_i B \mu 2\pi K_i \Delta L S_i \quad (10)$$

### 3. 2泄油孔压降模型

流体通过中心管泄油孔时的流动可视为径向流动。由于流体通过泄油孔时速度较高,故采用Forchheimer方程描述,其表达式为:

$$-dp_{dr} = \mu K_{vp} + \lambda \rho v_p^2 \quad (11)$$

将泄油孔近似看作圆柱形,单个泄油孔的质量流量表达式为:

$$m = 2 \pi r_p L_p \rho v_p \quad (12)$$

单个泄油孔的体积流量可以表示为水平井单位长度的流量与泄油孔密度之比,也可以表示为泄油孔的质量流量与流体密度之比,其表达式为:

$$q_p = 2 \pi r_p L_p v_p \quad (13)$$

由式(13)可得到泄油孔的流体流速表达式为:

$$v_p = q_m / (2 \pi r_p L_p \rho) \quad (14)$$

将式(14)代入式(11),积分可得流体通过单个泄油孔的压降表达式为:

$$dp_h = \mu q_m^2 \pi K_d \rho p L_p L_n r_o r_p + \lambda \rho q_m^2 4 \pi^2 \rho p L_p^2 \frac{e^{\frac{2\pi}{L_p} \int r_o} \div r_l p - r_l o}{r_l p - r_l o} \quad (15)$$

在第*i*个单元段内,由泄油孔产生的泄油孔节流压降为段内各个泄油孔的压降之和,其表达式为:

$$\Delta p_{h,i} = \rho p_{,i} dp_{h,j} \Delta L = \mu q_{m,i} \Delta L^2 \pi K_d L_p L_n r_o r_p + \lambda \rho q_{m,i}^2 \Delta L^4 \pi^2 \rho p_{,i} L_p^2 \frac{e^{\frac{2\pi}{L_p} \int r_o} \div r_l p - r_l o}{r_l p - r_l o} \quad (16)$$

### 3. 3中心管压降模型

储层中的流体在打孔中心管内流动时,受管壁粗糙度和中心管倾角的影响,存在管壁摩擦压降和流体重力压降。此外,由于中心管内流体的流动属于变质量流,径向上不断有流体由泄油孔进入中心管与主流流体汇合,流体在流动过程中存在混合压降和加速度压降。因此,在中心管内,流体的流动压降为管壁摩擦压降、混合压降、加速度压降和重力压降之和。第*j*个微元段的压降表达式为:  $dp_w, j = dp_f, j + dp_m, j + dp_a, j + dp_g, j$  (17)

其中:

$$dp_f, j = 12 f_j \rho d L v_j^2 \quad (18)$$

$$dp_m, j = \frac{1}{2} \rho v_j^2 \left( \frac{1}{\text{Re}} + \frac{0.031 \times \text{Re}^{\frac{1}{4}}}{\text{Re}} \right) \frac{q_p}{q_{pL}} \quad (19)$$

$$dp_a, j = 2 \rho (v_j - v_{j-1})^2 \quad (20)$$

$$dp_g, j = \rho g \cos \theta dL \quad (21)$$

第*i*个单元段的压降为各微元段压降的叠加,其表达式为:

$$\Delta p_{w,i} = \sum_{j=1}^N (dp_f, j + dp_m, j + dp_a, j + dp_g, j) \quad (22)$$

### 3. 4水平段一储层压降耦合模型

热采水平井生产时,生产压差为泄油边界压力与流动压力之差。水平段第*i-1*个单元段与第*i*个单元段的生产压差的表达式分别为:

$$\Delta p_{i-1} = \Delta p_{r,i-1} + \Delta p_{h,i-1} \quad (23)$$

$$\Delta p_i = \Delta p_{r,i} + \Delta p_{h,i} \quad (24)$$

此外,水平段中第*i-1*个单元段的生产压差可用第*i*个单元段的生产压差与这2个单元段之间的流动压降之和表示。因此,第*i-1*个单元段的生产压差表达式为:

$$\Delta p_{i-1} = \Delta p_i + (p_{w,i} - p_{w,i-1}) \quad (25)$$

将式(23)、式(24)代入式(25),整理后可得:

$$p_{w,i} - p_{w,i-1} = (\Delta p_{r,i-1} - \Delta p_{r,i}) + (\Delta p_{h,i-1} - \Delta p_{h,i}) \quad (26)$$

由中心管变质量流动模型可知:

$$p_{w,i} - p_{w,i-1} = \Delta p_f, i + \Delta p_m, i + \Delta p_a, i + \Delta p_g, i \quad (27)$$

故水平段一储层压降耦合控制方程可表示为:

$$(\Delta p_{r,i-1} - \Delta p_{r,i}) + (\Delta p_{h,i-1} - \Delta p_{h,i}) = \Delta p_f, i + \Delta p_m, i + \Delta p_a, i + \Delta p_g, i \quad (28)$$

## 4 优化方法

热采水平井采取常规筛管完井时,水平段跟端压降大于趾端,水平段流量剖面不均匀。根据耦合模型对中心管泄油孔密度进行优化,调整井底压力分布,以改善水平段流量剖面。

### 4. 1中心管泄油孔密度优化方程

由物理模型的假设条件,中心管被均分为*M*个单元段,为达到稠油油藏热采水平井均衡采油的目的,各个单元段的流量相同。

则第*i*个单元段的流量表达式为:

$$q_i = q_L / M \quad (29)$$

元段的泄油孔密度,由式(结合水平段一储层耦合模型,若已知第*i*个单元段)可得该段的泄油孔压降。将第*i-1*个单元段的泄油孔压降计算式代入式(28),整理可得第*i-1*个单元段泄油孔密度为未知数的方程表达式为:

$$\mu q_{m,i-1} \Delta L^2 \pi K_d L_p L_n r_o r_p + \lambda \rho q_{m,i-1}^2 \Delta L^4 \pi^2 \rho p_{,i-1} L_p^2 \frac{e^{\frac{2\pi}{L_p} \int r_o} \div r_l p - r_l o}{r_l p - r_l o} = \Delta p_w, i + \Delta p_r, i + \Delta p_h, i - \Delta p_r, i-1 \quad (30)$$

第*i-1*个单元段泄油孔密度的表达式为:

$$\rho p_{,i-1} = x y - z \quad (31)$$

$$\text{其中 } x = \lambda \rho q_{m,i-1}^2 \Delta L^4 \pi^2 L_p^2 \frac{e^{\frac{2\pi}{L_p} \int r_o} \div r_l p - r_l o}{r_l p - r_l o} \quad (32)$$

$$y = (\Delta p_w, i + \Delta p_r, i + \Delta p_h, i - \Delta p_r, i-1) \quad (33)$$

$$z = \mu q_{m,i-1} \Delta L^2 \pi K_d L_p L_n r_o r_p \quad (34)$$

### 4. 2中心管泄油孔密度优化步骤

优化步骤主要包括: ①根据沿水平段的储层渗透率分布,将热采水平井打孔中心管等分为*M*个单元段,计算出每段的平均渗透率; ②由式(29)计算各个单元段流量作为初始流量; ③由初始的中心管趾端泄油孔密度开始,分别利用式(10)、式(16)、式(22)计算实际储层渗流压降、泄油孔节流压降和中心管管流压降,利用式(31)计算第*M-1*段泄油孔密度,依次类推,计算出中心管各段泄油孔密度; ④根据由式(22)得到的一组中心管流压分布,利用式(10)计算出一组新的各单元段流量; ⑤将新的一组流量和初始流量进行比较,若相对误差绝对值大于精度要求,将新的一组流量作为初始流量,重复步骤③、④,直到满足精度要求。

## 5 水平井热采工艺的应用探讨

稠油最显著的特点是原油粘度大、密度小、渗流阻力大,采用普通直井开发,由于原油流动性差,直井与储层接触面积小,开发效果不理想。水平井井身结构不同于普通直井,由于具有较长水平段,可以在储层中穿行,与油层接触面积大,控油范围大,能够显著提升原油开采效果,单井采收率可达直井的1.5倍。稠

油开采的关键之一是降低原油粘度,由于稠油对温度比较敏感,热采工艺是稠油开发的首选,目前常用的热采工艺有蒸汽吞吐、热水驱、蒸汽驱及火烧油层等技术,水平井结合热采工艺技术,能够显著提高稠油井日产量,提升油井的采收率,达到理想的开采效果。现阶段常用的水平井热采工艺有水平井蒸汽驱、水平井蒸汽吞吐、重力辅助蒸汽驱、加热通道蒸汽驱、水平井电加热开采、水平井火烧油层技术、水平井重力辅助火烧油层技术、水平井二氧化碳蒸汽吞吐技术等,这些水平井热采工艺极大提升了稠油的开采效果。

### 6 结束语

稠油油藏具有原油粘度大、密度小、渗流阻力大等特点,采用直井常规方式难以经济有效的开发,水平井热采工艺能够显著提升稠油油藏的开发效果。为此,系统分析了蒸汽吞吐、蒸汽驱、热水驱、火烧油层技术、电磁加热技术等热采工艺,结合水平井与储层接触面积大、控油范围广的特点,对水平井热采工艺的应用进行了探讨。

### [参考文献]

[1]王春红,刘月田,马翠玉,等.薄浅层稠油油藏热采水平井

合理井网形式研究[J].特种油气藏,2013,20(04):88-91+155.

[2]张贤松.渤海油田稠油水平井蒸汽吞吐油藏经济技术界限研究及应用[J].中国海上油气,2013,25(04):31-35.

[3]马奎前,刘东.稠油油藏水平井热采吞吐产能预测新模型[J].西南石油大学学报(自然科学版),2018,40(01):114-121.

[4]顾浩,孙建芳,秦学杰,等.稠油热采不同开发技术潜力评价[J].油气地质与采收率,2018,25(03):112-116.

[5]刘东.热采水平井加热半径计算新模型[J].中国海上油气,2015,27(03):84-90.

[6]王瑞,张义之,张翱,等.热采水平井找堵水技术在春光油田的应用[J].石油地质与工程,2020,34(03):108-112.

[7]唐磊,杜殿发,张根凯,等.基于井筒温度剖面的热采水平井找水方法[J].油气地质与采收率,2021,28(03):90-95.

[8]吴明录,赵高龙,姚军,等.稠油热采三区复合油藏水平井试井解释模型及压力响应特征[J].大庆石油地质与开发,2016,35(06):117-122.

[9]李彦龙,董长银,阿雪庆,等.热采水平井近井地应力分布及影响因素分析[J].石油天然气学报,2014,36(11):168-173+10.

### 中国万方数据库简介:

万方数据成立于1993年。2000年,在原万方数据(集团)公司的基础上,由中国科学技术信息研究所联合中国文化产业投资基金、中国科技出版传媒有限公司、北京知金科技投资有限公司、四川省科技信息研究所和科技文献出版社等五家单位共同发起成立——“北京万方数据股份有限公司”。

万方数据是国内较早以信息服务为核心的股份制高新技术企业,经过20年来快速稳定的发展,万方数据目前拥有在职员工近千人,其中硕士以上学历约占25%,专业技术人员占70%,已经发展成为一家以提供信息资源产品为基础,同时集信息内容管理解决方案与知识服务为一体的综合信息内容服务提供商,形成了以“资源+软件+硬件+服务”为核心的业务模式。

万方数据以客户需求为导向,依托强大的数据采集能力,应用先进的信息处理技术和检索技术,为决策主体、科研主体、创新主体提供高质量的信息资源产品。在精心打造万方数据知识服务平台的基础上,万方数据还基于“数据+工具+专业智慧”的情报工程思路,为用户提供专业化的数据定制、分析管理工具和情报方法,并陆续推出万方医学网、万方数据企业知识服务平台、中小学数字图书馆等一系列信息增值产品,以满足用户对深层次信息和分析的需求,为用户确定技术创新和投资方向提供决策支持。

在为用户提供信息内容服务的同时,作为国内较早开展互联网服务的企业之一,万方数据坚持以信息资源建设为核心,努力发展成为中国优质的信息内容服务提供商,开发独具特色的信息处理方案和信息增值产品,为用户提供从数据、信息到知识的全面解决方案,服务于国民经济信息化建设,推动全民信息素质的提升。