

文章编号:1006 - 396X(2008)03 - 0060 - 03

# 添加表面活性剂对注蒸汽采油效果的影响

张义祥<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院力学所, 北京 100080; 2. 辽河油田分公司, 辽宁盘锦 124010)

**摘 要:** 通过对添加表面活性剂注汽机理的研究, 以及对乳化液微观特征的分析, 得出添加表面活性剂时的注蒸汽与常规注蒸汽存在两点不同, 即加热带面积的设定不同和被加热物体的内能不同。在此基础上, 系统描述了添加表面活性剂注汽过程中蒸汽推进速度、加热面积及热力损失的计算方法。通过理论分析, 阐述了表面活性剂作用下的注蒸汽效果好于常规蒸汽吞吐的原理。推导出了提高采收率的最佳方法, 以及减少热损失的基本原理及方法。

**关键词:** 蒸汽吞吐; 添加表面活性剂; 能量守恒方程; 采收率

**中图分类号:** TE832.333 **文献标识码:** A

## Impact of Adding Surfactants on the Oil Recovery Factor by Steam Injection

ZHANG Yi - xiang<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P. R. China;

2. PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin Liaoning 124010, P. R. China)

Received 10 June 2008; revised 10 July 2008; accepted 15 July 2008

**Abstract:** By studying the steam injection mechanism of adding surfactants and analyzing the microscopic characteristics of emulsions, the differences between steam injections with surfactants and without surfactants (conventional) are summarized in two aspects: the difference in setting heating zone area and the difference in the internal energy of heated object, based on which the methods for calculating steam marching speed, heating area and thermal loss in the process of steam injection with surfactants added are systematically described. By way of theoretical analysis, the philosophy for steam injection result under the effect of surfactants being superior to conventional CSS is expounded. The optimum method for EOR as well as the philosophy and method for minimizing thermal loss is deduced.

**Key words:** CSS; Adding surfactants; Energy conservation equation; Recovery factor

Corresponding author. Tel.: +86 - 427 - 7805277; fax: +86 - 427 - 7805277; e-mail: Zhangyx@petrochina.com.cn

早在 1959 年, Marx J W 和 Langenheim R H<sup>[1]</sup> 就得到了注蒸汽过程中热量转换的三维微分方程的近似解析解, 并得到广泛认可。拉普拉斯转换描述了每个时刻的受热面积, 但未考虑在渗流束缚环境下水蒸汽的物质和界面能的交换。随着化学工业的发展, 20 世纪 70 年代晚期就出现了很多应用化学添加剂对注蒸汽效果进行改善的方法, 其中, 较为行之有效及最有技术前景的是注入一种水溶性的活性

剂和碱的混合溶液。

在理论分析的基础上, 重点描述了添加表面活性剂注蒸汽的热传导, 得到了表面活性剂作用下注蒸汽过程中三维热传导微分方程的解析解。

## 1 理论描述

为了确定在温度场中温度的分布, 按照热力学第一定律和傅立叶定律对微分体积单元推导热传导方程。对于体积单元的能量守恒方程如下:

$$Q_i - Q_o + Q_m = Q_g \quad (1)$$

式中,  $Q_i$  为流进体积单元的流量,  $Q_o$  为流出体积单元的流量,  $Q_m$  为内部产生的热流量,  $Q_g$  为内部增长的热流量。

收稿日期: 2008 - 06 - 10

作者简介: 张义祥 (1963 - ), 男, 辽宁盘锦市, 高级工程师, 硕士。

基金项目: 国家自然科学基金资助 (50174011)。

通过这个方程,Marx J W 和 Langenheim R H (1959)合理的假设了注蒸汽过程中的每个条件,并且作出了评价。

进入体积单元的热流量就是注热率  $Q_i$ ,是恒定的。 $Q_n$ 是内部热源,假设它为0。流出体积单元的热流量  $Q_o$  是流到上层和下层的热损失。其值为:

$$Q_i = \int_0^t \frac{K_{ob} T}{\sqrt{D(t-\tau)}} \frac{dA}{d} d\tau \quad (2)$$

其中,  $A(t)$  是加热面积,  $K_{ob}$  是上下层热传导率,  $D$  是导热系数,  $T = T_s - T_r$ ,  $T_s$  是注入蒸汽温度,  $T_r$  是初始地层温度,  $t$  是时间,  $d$ 。

内部增长的热流量  $Q_o$  是使油层内部产生能量,生产的能量流向生产层,进行稠油开采。其值为:

$$Q_o = ch T \frac{dA}{dt} \quad (3)$$

$$c = [(1 - \phi) r_{cr} + S_w \phi_w c_w + S_o \phi_o c_o]$$

其中,  $c$  为油层的比热容,  $h$  是产层厚度,  $\phi$  为孔隙度,  $r_{cr}$ ,  $w$  和  $o$  是岩石颗粒密度、水密度和油密度,  $S_w$  和  $S_o$  分别是油藏初始水和油的饱和度,  $c_r$ ,  $c_w$ ,  $c_o$  为岩石颗粒、水和油的比热容。

按照热力学平衡定律,  $Q_i = Q_o + Q_n$  ( $Q_n = 0$ ), Marx J W 和 Langenheim R H 推导出加热面积公式:

$$A(t) = \frac{Q_i h}{4 K_{ob} T} \left[ \exp\left(\frac{t b}{h^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{t b}}{h}\right) + \frac{2}{\sqrt{t b}} \left[ \frac{\sqrt{t b}}{h} - 1 \right] \right] \quad (4)$$

式中,  $t b = 4 D t / h^2$ ,  $b$  是油藏比热容与上层比热容比,  $t$  是注汽时间。

添加表面活性剂时的注蒸汽与常规注蒸汽存在着两点不同。首先,在注蒸汽过程中表面活性剂得到了应用,它与蒸汽同时注入,温度与蒸汽温度相同<sup>[2-5]</sup>。油包水或水包油的乳化液很快进入地层。经实验检测油颗粒的直径在 0.5 ~ 4.0  $\mu\text{m}$ 。因此,这种乳化液的内表面积比外表面积大得多,所以外表面积可以忽略。因为水是连续相,所以加热面积是内表面积,不是外表面积(公式(2)中则是外表面积)。其次,根据热力学第一定律,油藏内部能量的增量与流向生产层的能量相等。但是 Marx J W 和 Langenheim R H 的解表明其做功为零。在有表面活性剂作用下注蒸汽的过程中,水包油的乳化液是一个多相的分散体系,存在表面能。增加的内能

$$U = U^b + U \quad (5)$$

其中,  $U^b$  是连续相内能的增量,它由公式(3)表示。 $U$  是表面相内能增量,由(6)式表示:

$$dU = \frac{dA}{dt} \quad (6)$$

其中,  $\sigma$  是油水之间界面张力,  $dA$  是内表面增量,  $t$  是时间。

综上所述,由于考虑了表面相内能,根据能量守恒定律:

$$Q_i = Q_o + Q_n + Q_s \quad (7)$$

式中  $Q_s$  为表面相内能的增量。

得出:

$$Q_i = 2 \int_0^t \left[ \frac{K_{ob} T}{\sqrt{D(t-\tau)}} \frac{dA}{d} + ch T \frac{dA}{dt} + \frac{dA}{dt} \right] \quad (8)$$

由此得出表面活性剂作用下注蒸汽的能量守恒方程,如(8)式所示。

在解方程(8)之前,首先定义  $\frac{dA}{dt}$ , 由于乳化作用,内表面迅速增加,在瞬间达到最大值,它很难用一个确切的函数详细的描述。将  $A(t)$  定义为阶跃函数  $BH(t)$ :

$$\begin{cases} H(t) = 1 & t > 0 \\ H(t) = 0 & t = 0 \end{cases} \quad (9)$$

这个阶跃函数的导数是  $\delta(t)$  函数:

$$\delta(t) = dH(t)/dt \quad (10)$$

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \infty & t = 0 \\ 0 & t > 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\int_a^b f(t) \delta(t) dt = f(0) \quad (12)$$

$$\int_a^b f(t) \delta(t-a) dt = f(a) \quad (13)$$

由式(10) - (14)可知,当函数  $\delta(t)$  作为被积因子时,积分有确定解。

$\delta(t)$  的拉普拉斯变换是:

$$L[\delta(t)] = \int_0^+ (t) e^{-st} dt = 1 \quad (14)$$

从上述  $\delta(t)$  的特征和初始条件  $A(0) = 0$ , 用拉普拉斯变换和逆变换就得到方程(8)的解:

$$A(t) = \frac{Q_i - Bch T}{K_{ob} T} \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (15)$$

受热区域的前缘速度是:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \frac{Q_i - Bch T}{2 K_{ob} T} \sqrt{\frac{D}{t}} \quad (16)$$

## 2 理论描述的分析

在表面活性剂作用下注蒸汽的特点是蒸汽和表面活性剂都注入到油藏中,同时原油被乳化生成油包水或水包油乳化液<sup>[6-12]</sup>。

从  $B$  值的数学定义中得知,  $B$  指示着乳化作用

的程度,所以  $B$  取决于沥青颗粒之间的相互作用能量、油层和原油性质(渗透率、孔隙度、井底流压和多孔介质中流体流变性)等。毫无疑问,表面活性剂的添加直接改变  $B$  值。

控制油层的加热面积特别是受热区域前缘速度,是蒸汽吞吐设计的主要手段。图 1 是不同  $B$  值对加热区域前缘速度的影响。通过添加表面活性剂, $B$  值增加,前缘速度降低,油藏中热流及物流交换能力增加,有效的提高了吞吐效果。方程(15)表明  $B$  大一些等效于油层厚一些。而图 1 则明确指示原油乳化作用等效于油层厚度变大,受热区域扩展速度变慢。添加表面活性剂注蒸汽的优势在于开采薄油层。

蒸汽吞吐必须控制热量的损失,由方程(2)和方程(16)得出:

$$Q_0 = \frac{Q_i - BchT}{0} \quad (17)$$

热量损失率为:

$$= \frac{Q_i - BchT}{Q_i} \quad (18)$$

由(18)式可知,热损失率不是时间的函数,在注入速率  $Q_i$  为常数时,只与比热容  $c$ ,油层厚度  $h$  及温

差  $T$  有关。

图 2 是热量损失率与  $B$  值之间的关系。从图 2 及式(18)可以看出,在注入速度为常数时,热量损失与时间无关, $B$  值越大热量损失越小,净油层厚度越大热量损失越小。当  $h=0$  时热量全部损失。

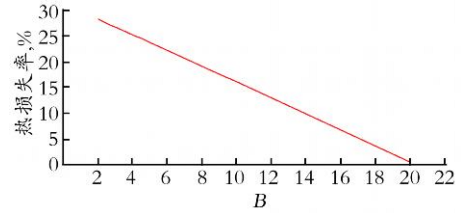


Fig. 1 Impact of variations in  $B$  value on the leading edge speed of heating zone

图 1  $B$  值变化对加热区域前缘速度的影响

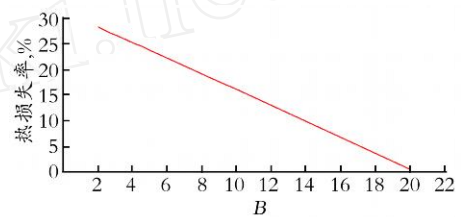


Fig. 2 Heat loss rate vs.  $B$

图 2 热量损失率与  $B$  之间的关系

## 参 考 文 献

- [1] Max J W, Langenheim R H. Reservoir heating by hot fluid injection[J]. Trans. AIME, 1959, 216: 312.
- [2] 张锐. 稠油热采技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1994.
- [3] 徐振章,译. 岩石流体热物性测试方法及参数研究[M]. 沈阳:辽宁科学出版社, 1990.
- [4] 博贝格 T C. 热力采油工程方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1980.
- [5] 杨承志, 郭立言, 孔凤清, 等. 热力法提高石油采收率[M]. 北京:石油工业出版社, 1991.
- [6] 葛家理, 宁正福, 刘丹田, 等. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京:石油工业出版社, 2001.
- [7] 陈元千, 李. 现代油藏工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2001.
- [8] 杨承志, 岳清山, 沈平平. 混相驱提高石油采收率[M]. 北京:石油工业出版社, 1991.
- [9] 陈元千. 相对渗透率曲线和毛管压力曲线的标准化方法[J]. 石油实验地质, 1990, 12(1): 64 - 69.
- [10] 郭平. 稠油热采过程中的水 - 岩反应实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 222 - 225.
- [11] 吴耀国, 胡思海, 刘保超, 等. LAS 与苯胺在河床沉积物上吸附的相互影响[J]. 石油化工高等学校学报, 2008, 21(2): 48 - 52.
- [12] 李松岩, 林日忆, 李兆敏, 等. 泡沫流体密度 - 压力 - 温度关系的实验研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2008, 21(2): 71 - 75.

(Ed.: WYX, Z)

(上接第 59 页)

- [7] Panariti N, Bianco A, Piero G, et al. Petroleum residue upgrading with dispersed catalysts part 2 effect of operating conditions [J]. Applied catalysis A: General, 2000, 204: 215 - 222.
- [8] Ren Rui, Wang Zongxian, Guan Cuishi, et al. Study on the sulfurization of molybdate catalysts for slurry - bed hydroprocessing of residuum [J]. Fuel rocessing technology, 2004, 86: 169 - 78.
- [9] 刘东, 马魁菊, 阙国和. 水溶性分散型加氢催化剂的分离和表征[J]. 石油炼制与化工, 2006, 37(2): 38.

(Ed.: YYL, Z)