

# 超临界注汽油井中蒸汽参数的数值计算

王 良 王秋旺 胡延东 张 毅

盖平原 徐明海 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要** 本文通过对动量方程、能量方程、散热方程等控制方程的离散求解, 用稳态和瞬态相结合的方法, 计算了超临界注汽油井地下垂直段、过渡段和水平段蒸汽参数(压力、温度等)和井筒散热损失、压力降等随注入时间、注入流量和压力的变化规律。计算结果表明, 随着井深的增加, 蒸汽压力在垂直段和过渡段的前半部分是增加的, 而在过渡段后半部分和水平段则减小, 且同一井深位置随流量增加蒸汽压力减小, 注入蒸汽压力高于 22 MPa 时, 井底蒸汽出口压力比入口高, 同一井深位置每公斤蒸汽散热损失随流量的增加而减少, 而随压力的增加无明显变化。井底蒸汽压力和温度在注入时间大约 3 天左右即趋于一稳定值, 而井底热损失则随注入时间的增加而减少。

**关键词** 超临界蒸汽; 垂直油井; 水平油井; 热损失; 压力降

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2001)05-0601-04

## HEAT DISSIPATION AND PRESSURE DROP OF OIL-WELL WITH SUPERCRITICAL STEAM INJECTION

WANG Liang WANG Qiu-Wang HU Yan-Dong ZHANG Yi

GAI Ping-Yuan XU Ming-Hai TAO Wen-Quan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** In the present work, the variations of heat dissipation, pressure drop and temperature of the oil-well with the supercritical steam injection with time, mass flux, pressure and the depth of oil-well were studied parametrically by solving the momentum equation, energy equation, and heat dissipation equation. It was found that both the steam pressure and heat dissipation decreases with the increase of the inlet steam flow rate at the same well depth, and the exit steam pressure is higher than the inlet if the inlet steam pressure is greater than 22 MPa. Furthermore, after about three-day's injection, both the exit steam pressure and temperature approach constant, while the heat dissipation of steam at the exit of the well decrease with time.

**Key words** supercritical steam; vertical oil-well; horizontal oil-well; heat dissipation; pressure drop

## 1 引 言

蒸汽注射方法在国内外石油开采工业中广泛用来开采稠油。注射蒸汽的主要目的是用以加热井底油层中的稠油, 以降低其粘性, 便于开采。因而, 对蒸汽尤其是超临界蒸汽注射过程中散热损失的估计具有重要的意义。注汽油井的管路系统示意图如图 1 所示。从锅炉来的具有一定初始参数的蒸汽流过地上水平管, 然后进入注汽井。从本质上说, 蒸汽注

入井筒后的热交换过程是一个非稳态传热过程, 各个热力参数不仅随井深而异, 也随时间而变化。同时井筒内蒸汽的散热不可分割地同压力的降落联系在一起。这些都增加了井筒散热计算的复杂性。

从六十年代起, 国外的一些石油公司及大学就开始了井筒散热损失及压力降计算的研究工作<sup>[1~4]</sup>。1965 年, Satter<sup>[2]</sup>把从井筒到地层深处的热量传递过程分成两个部分, 即从井筒到水泥层及从水泥层到地层深处, 前者的热传递过程视作为稳态的, 后

收稿日期: 2001-02-01; 修订日期: 2001-06-16

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项基金资助项目 (No.98069835); 国家自然科学基金资助项目 (No.59995460-2)

作者简介: 王 良 (1975-), 男, 辽宁营口人, 硕士研究生, 主要从事强化传热和数值计算方面的研究。

者则作为非稳态过程来处理,并假定不计蒸汽压力损失且地层土壤换热按一维径向导热问题来处理。这两个假定简化了计算过程,但与实际问题则有一定的偏离。1972年, Pacheco-Farouq<sup>[3]</sup>采用“有效粘性系数”,以单相介质的方式来计算蒸汽的压力损失。1981年, Farouq<sup>[4]</sup>进一步完善了 Satter 模型,在计算压力损失时,考虑了两相流不同流动状态的影响,对地层中的不稳态导热采用了二维轴对称模型,这是目前文献中最先进的一种模型。

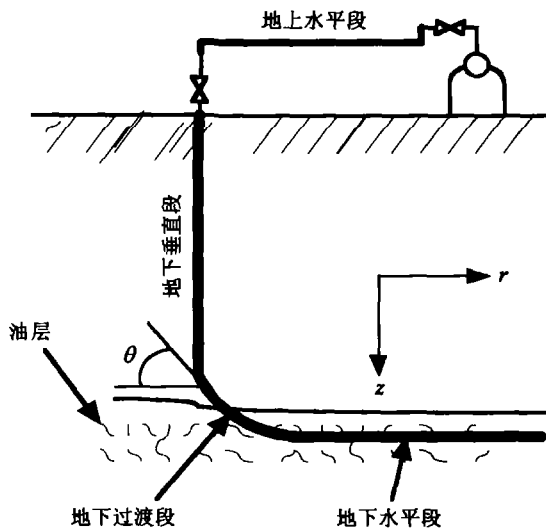


图1 超临界注汽油井示意图

本文采用 Farouq 模型,计算分为地面水平段和井下段,井下段又分为垂直段、过渡段和井下水平段。讨论了井底蒸汽参数(温度、压力等)随入口参数(压力、流量等)的变化。

## 2 基本假设

(1) 锅炉出口蒸汽压力、温度、流量及干度在注汽过程中保持恒定;

(2) 从井筒到水泥层之间的热传递过程是稳态的,从水泥层到地层深处的导热过程是非稳态的;

(3) 除注射介质、绝热材料的物性外,计算中所涉及到的其它物性均取为常数;

(4) 注汽管中汽液两相的流动时当作一维两相均质流动来处理;

(5) 井下过渡段泥土传热的计算区域忽略倾角的影响,与井下垂直段的计算方法相同。

## 3 控制方程及计算方法

(1) 注汽管内一维均质流动的动量方程:

$$\frac{dp}{dz}|_t = \frac{dp}{dz}|_g + \frac{dp}{dz}|_f + \frac{dp}{dz}|_a \quad (1)$$

由重力引起的压力变化:

$$\frac{dp}{dz}|_g = g\rho_m \sin \theta \quad (1a)$$

式中  $\theta$  为汽流方向与水平方向的夹角,见图1。

摩擦阻力损失:

$$\frac{dp}{dz}|_f = -\frac{f\rho v^2}{d} = -\tau_f \quad (1b)$$

加速损失:

$$\frac{dp}{dz}|_a = -\frac{W}{A} \frac{dv}{dz} = -\frac{W^2}{A^2} \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{\rho_m} \right) \quad (1c)$$

式中  $f$  为阻力系数,  $\tau_f$  为压力梯度,  $W$  为质量流速,  $A$  为油管流动截面积,  $v$  为蒸汽流速。

(2) 注汽管内一维均质流动的能量方程:

$$\frac{d\Phi}{dz} + W \frac{d}{dz} \left( h_m + \frac{v_m^2}{2} - gz \right) = 0 \quad (2)$$

式中  $\Phi$  为从地面起算到所计算地点的总散热量,  $z$  为井内蒸汽流动方向。

(3) 注汽管的散热方程:

$$\frac{d\Phi}{dz} = \pi Dk(T_s - T_{ref}) \quad (3)$$

式中  $T_s$  为蒸汽温度,  $T_{ref}$  为参考温度。对于地面水平段,  $T_{ref}$  为常年平均气温;对井下段,  $T_{ref}$  取为水泥与地层交界面处的温度。  $D$  为注汽管外径,  $k$  为总传热系数,由串联热阻迭加原则确定。

(4) 计算时把井下段按实际情况分为几大大段,包括垂直段、过渡段和井下水平段。把每一大大段又均分为若干小段,每一小段中蒸汽物性、传热系数等均取为常数。地层中温度分布按二维稳态导热计算,其控制方程式、初始边界条件及计算方法见文献 [5,6]。

## 4 计算结果与讨论

本文计算时,取垂直段 2000 m;过渡段 500 m,倾角为  $18^\circ/100$  m;地下水平段 500 m。蒸汽注射时间为 20 天。计算结果如下。

### 4.1 沿程蒸汽压力和热损失随注入蒸汽流量的变化

如图 2, 3 所示。可以看出,随着井深的增加,蒸汽压力在水平段和过渡段的前半部分是增加的,而在过渡段后半部分和水平段则减小,且同一井深位置随流量增加,蒸汽压力减小。这主要是因为,在垂直段有重力造成的静压影响,且流量增加时重力

的影响作用减小。在其它条件相同时，同一井深位置蒸汽散热损失随流量的增加而减少。

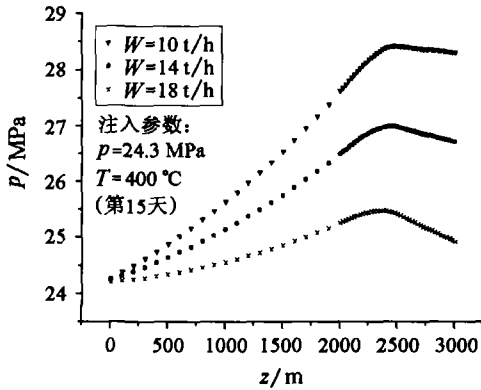


图 2 井筒内沿程蒸汽压力随注入流量的变化

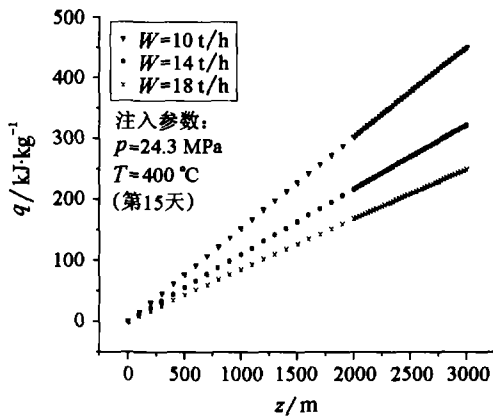


图 3 井筒内沿程蒸汽热损失随注入流量的变化

#### 4.2 沿程蒸汽压力和热损失随注入蒸汽压力的变化

如图 4, 5 所示。可以看出，注入蒸汽压力高于 22 MPa 时，井底蒸汽出口压力比入口高，而低于此值时，在上述井深情况下由于压力沿程损失的缘故，井底蒸汽出口压力比入口低。而蒸汽散热损失则随压力的增加无明显变化，只有在近出口处随压力升高而略有增加。

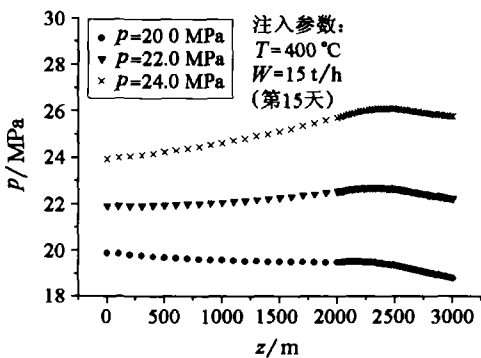


图 4 不同注入压力下，井筒内蒸汽压力的变化

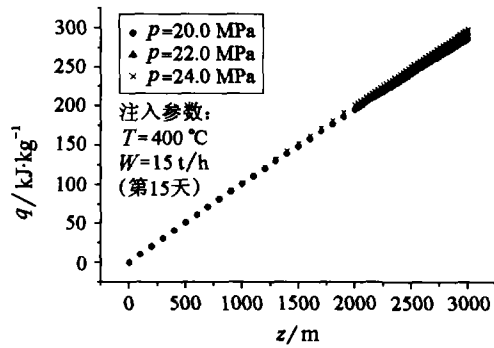


图 5 不同注入压力下，井筒内蒸汽热损失的变化

#### 4.3 井底出口参数随蒸汽注入时间的变化

图 6~8 分别示出了井底出口参数 (压力、温度、

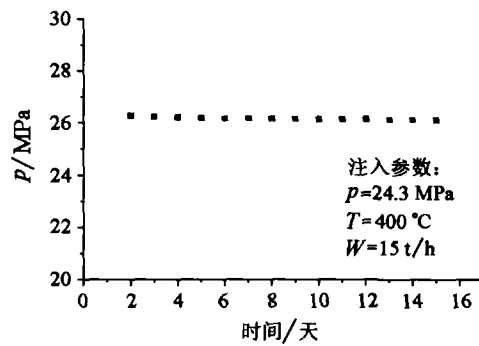


图 6 井底蒸汽出口压力随注入时间的变化

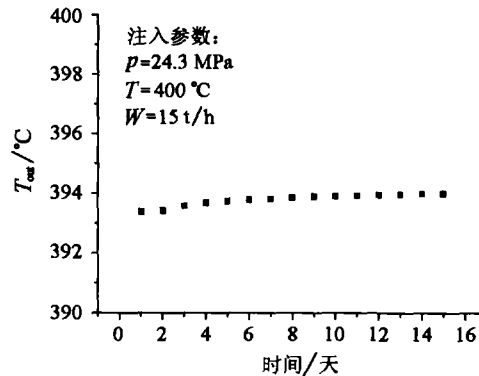


图 7 井底蒸汽出口温度随注入时间的变化

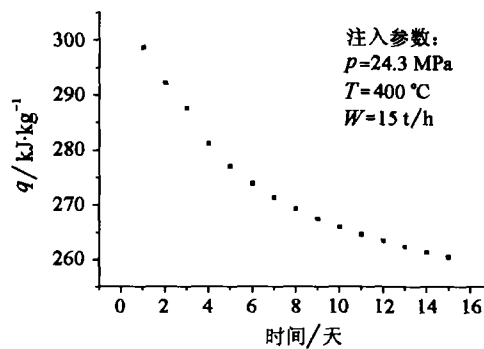


图 8 井底热损失随注入时间的变化

热损失) 随蒸汽注入时间的变化。可以看出, 井底出口蒸汽压力和温度在注入大约 3 天左右的时间时即趋于一稳定值, 而井底热损失则随注入时间的增加而减少。

## 5 结 论

(1) 在其它条件相同时, 随着井深的增加, 蒸汽压力在水平段和过渡段的前半部分是增加的, 而在过渡段后半部分和水平段则减小, 且同一井深位置随流量增加蒸汽压力减小, 注入蒸汽压力高于 22 MPa 时, 井底蒸汽出口压力比入口高。

(2) 在其它条件相同时, 同一井深位置每公斤蒸汽散热损失随流量的增加而减少, 而随压力的增加无明显变化。

(3) 井底出口蒸汽压力和温度在注入大约 3 天

左右的时间时即趋于一稳定值, 而井底热损失则随注入时间的增加而减少。

## 参 考 文 献

- [1] Ramey M J. Wellbore Heat Transmission. *Journal of Petroleum Technology*, 1962, 427-435
- [2] Satter A. Heat Losses during Flow of Steam Down a Wellbore. *Journal of Petroleum Technology*, 1965, 845-851
- [3] Pacheco E F, Farouq-Ali S M. Wellbore Heat Losses and Pressure Drop in Steam Injection. *Journal of Petroleum Technology*, 1972, 139-144
- [4] Farouq-Ali S M. A Comprehensive Wellbore Steam/Water Flow Model for Steam Injection. *Journal of Petroleum Technology*, 1981, 527-534
- [5] 张毅, 王良, 陶文铨等. 超临界蒸汽注射井筒散热损失及压力降的计算. *工业加热*, 2000, 5: 19-23
- [6] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988