

基于双层非稳态导热过程的井筒温度场半解析模型

赵金洲¹ 彭 瑀¹ 李勇明¹ 田植升² 符东宇¹

1. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学 2. 中国石化河南石油工程有限公司

赵金洲等. 基于双层非稳态导热过程的井筒温度场半解析模型. 天然气工业, 2016, 36 (1): 68-75.

摘 要 在油气井酸化、压裂增产施工中, 温度控制着入井工作液的流变性和酸岩反应速度, 是影响裂缝几何形态、酸蚀导流能力和措施后产能的重要因素。但目前的井筒温度场模型还缺乏对非稳态过程的严密推导和精确描述。为此, 首先在物性分析的基础上, 建立了轴向上离散、径向上解析的双层非稳态导热井筒温度场半解析模型, 并通过拉普拉斯变换和 Stehfest 数值反演方法进行了求解; 其次, 分析了不同水泥环导热过程处理方法对井筒温度分布的影响, 认为假设水泥环具有稳态热阻, 模拟输出的误差过大且难以修正; 最后, 对地层和施工参数进行了敏感性分析, 认为岩性、施工排量 and 注入温度变化对井筒温度分布具有显著的影响, 而油管腐蚀的影响则可以忽略。现场实际应用效果表明, 该数学模型精度较高, 模拟结果与监测结果吻合良好。该成果对于提高单井酸化压裂成功率、增加措施后的产能和油气田采收率具有重要意义。

关键词 井筒 温度场 非稳态导热 酸化 压裂(岩石) 拉普拉斯变换 数学模型

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2016.01.008

A semi-analytic model of wellbore temperature field based on double-layer unsteady heat conducting process

Zhao Jinzhou¹, Peng Yu¹, Li Yongming¹, Tian Zhisheng², Fu Dongyu¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation//Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Sinopec Henan Petroleum Engineering Co., Ltd., Nanyang, Henan 473132, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 36, ISSUE 1, pp.68-75, 1/25/2016. (ISSN 1000-0976 ; In Chinese)

Abstract: In the process of well acidizing and fracturing, downhole working fluid rheology and acid-rock reaction rate are controlled by temperature, which is an important factor affecting fracture geometry, acid etching conductivity and stimulated productivity. At present, however, the well bore temperature field model lacks strict deduction and fine description of the unsteady process. In this paper, a semi-analytic model was established for temperature field of double-layer (axial discretion and radial analysis) unsteady heat conducting wellbores and solved by means of Laplace transformation and Stehfest numerical inversion. Then, analysis was conducted of the effect on wellbore temperature distribution by cement-sheath heat conducting treatment methods. It is believed that the errors of analog outputs are too large to be corrected when cement sheath is assumed to have steady state thermal resistance. Finally, sensitivity analysis was performed on formation and operation parameters. It is regarded that wellbore temperature distribution is remarkably influenced by lithological change, operational discharge capacity and injection temperature, but the effect of tubing corrosion can be neglected. Field application shows that this mathematical model is higher in precision and the simulation results fit monitoring results. Therefore, this research result is of great importance in increasing the success ratio of single-well acid fracturing and improving productivity and recovery factor after stimulation.

Keywords: Wellbore; Temperature field; Unsteady-state heat conducting; Acidizing; fracturing(Rock) ; Laplace transformation; Mathematical model

基金项目: 国家自然科学基金项目“页岩地层动态随机裂缝控制机理与无水压裂理论”(编号:51490653)、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“页岩气储层压裂改造机理研究”(编号:2013CB228004)。

作者简介: 赵金洲, 1962年生, 教授, 博士生导师, 本刊第七届编委会委员、《Natural Gas Industry B》编委会委员, 现任西南石油大学校长; 主要从事油气田开采和增产新技术新理论的研究工作。地址:(610500)四川省成都市新都区新都大道8号。ORCID:0000-0003-1686-1828. E-mail:zhaojz@swpu.edu.cn

通信作者: 彭瑀, 1988年生, 博士研究生; 主要从事油气田增产改造理论与技术方面的研究工作。地址:(610500)四川省成都市新都区新都大道8号。ORCID:0000-0001-5233-4860. E-mail:pengyu_frac@foxmail.com

在油气井酸化、压裂增产施工中，温度控制着入井工作液的流变性^[1-3]、滤失能力^[4]和酸岩反应速度，是影响裂缝几何形态、单井增产效果和措施后产能的重要因素^[5]。自 1964 年，Ramey^[6] 引入 Van Everdinger 等^[7] 推导的时间函数建立了第一个非稳态井筒温度场模型以来，对井筒非稳态传热研究就进入了蓬勃发展期。其中最具有代表性的有：1970 年，Eickmeier 等^[8] 采用传热过程的分析方法建立了非稳态的井筒温度场差分模型，但在该非稳态模型中油套环空、油管壁和水泥环都是单层的、热阻也是恒定的，因此该模型不能体现近井位置的非稳态导热特征。1990 年，劳伦斯伯克利实验室的吴玉树等^[9] 通过非稳态导热微分方程和拉普拉斯变换建立了井筒温度场的解析模型，但在该模型中将从油管到水泥环的传热考虑为稳态过程，并且没有对这一假设导致的误差进行分析。20 世纪 90 年代，Hasan 和 Kabir 等^[10-13] 又在 SPE 上发表了大量有关于井筒温度场的研究成果，形成了其独有的温度场模拟体系和经验处理方法，对井筒温度场的发展做出了巨大贡献。但他们在地层非稳态导热模型中引入了松弛距离的概念，其本质就是 Ramey 模型中的时间函数，因此与 Ramey 模型一样，存在不能给出早期精确解的问题。2000 年以后，Hagoort、Mcspadden 和 Yoshida 等又分别研究了 Ramey 模型的理论依据^[14]、单井模型在井工厂模式下的应用^[15] 以及井筒温度场和酸化油藏温度场的耦合^[16]，对原有的经典模型进行了扩展。

井筒传热是一个比例极不协调的对流换热、非稳态导热耦合问题。在轴向上动辄千米，采用简单的解析模型不能得到精确结果；在径向上，层数多且厚薄不一，如果要体现每一层的非稳态导热特征则会导致计算量过大，甚至结果不收敛，降低计算效率。因此，笔者在物性分析的基础上，建立了轴向上离散，径向上解析，基于双层非稳态导热的井筒温度场半解析模型，并进行了参数分析。

1 模型假设条件

根据已有的研究和目前的工艺现状，需要对井筒温度分布的物理模型做如下假设（图 1）：①酸化、

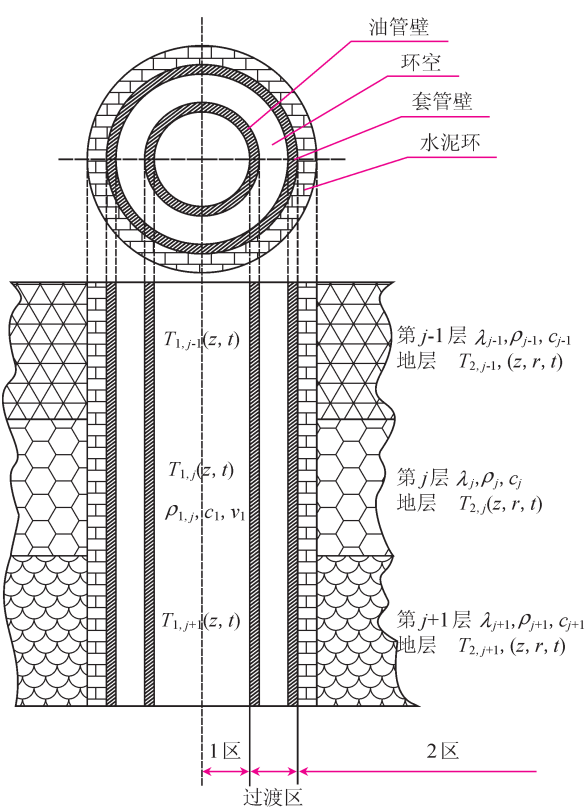


图 1 井筒温度场物理模型和物性参数图

压裂介质均为液体，不考虑焦汤效应，流体不可压缩，机械能不向内能转化；②在轴向上按照岩性和精度要求划分层段，在径向上仅有油、套管壁具有稳态热阻；③酸液在油管中流动时，与油管壁在缓蚀剂作用下微量反应；④地层、管串和环空是均质、各向同性的，并且关于井轴对称；⑤油管内的强迫对流换热和油套环空腔体内的自然对流换热物性参数由 Hermite 插值获得，定性温度为平均温度；⑥忽略径向上各层间的界面热阻。

导温系数是衡量温度在某种介质中传播速度的指标，从表 1 可得低碳钢的导温系数最高，而水泥环的导温系数最低。温度在低碳钢中的传播速度分别是在砂岩、白云岩、石灰岩、页岩、水泥环中传播速度的 4.5 ~ 20 倍、8.0 ~ 15.0 倍、10.7 ~ 17.0 倍、15.1 ~ 17.4 倍、26.7 ~ 57.9 倍。因此，油套管内外壁面的温差不大，可以考虑这两层具有稳态热阻；而水泥环和地层中的导热则是明显的非稳态过程。

表 1 井筒温度模拟需要的材料热物性参数

材料	导热系数 / [W·(m·℃) ⁻¹]	密度 / (g·cm ⁻³)	比热 / [J·(kg·℃) ⁻¹]	导温系数 / (m ² ·s ⁻¹)
低碳钢	47.50 ~ 50.50	7.8	465.0	(1.30 ~ 1.39)×10 ⁻⁵
固井水泥	1.11 ~ 1.74	1.9 ~ 2.1	1 880.0 ~ 2 220.0	(2.40 ~ 4.87)×10 ⁻⁷
石灰岩	1.70 ~ 2.68	2.4 ~ 2.7	824.8 ~ 950.4	(0.82 ~ 1.22)×10 ⁻⁶
白云岩	2.52 ~ 3.79	2.5 ~ 2.7	921.1 ~ 1 000.6	(0.93 ~ 1.63)×10 ⁻⁶
砂岩	2.18 ~ 5.10	2.3 ~ 3.0	762.0 ~ 1071.8	(0.68 ~ 2.91)×10 ⁻⁶
页岩	1.72	2.6 ~ 2.8	774.6	(8.01 ~ 8.60)×10 ⁻⁷

2 模型建立

井筒温度场可以分为 1 区、2 区和过渡区, 如图 2 所示。 r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 r_5 分别为油管内壁、油管外壁、套管内壁、套管外壁和井壁到油管中心的距离。在酸压过程中 1 区为强迫对流换热, 2 区为非稳态导热, 过渡区从内到外依次为油管壁导热、环空的腔体自然对流换热和套管壁导热。

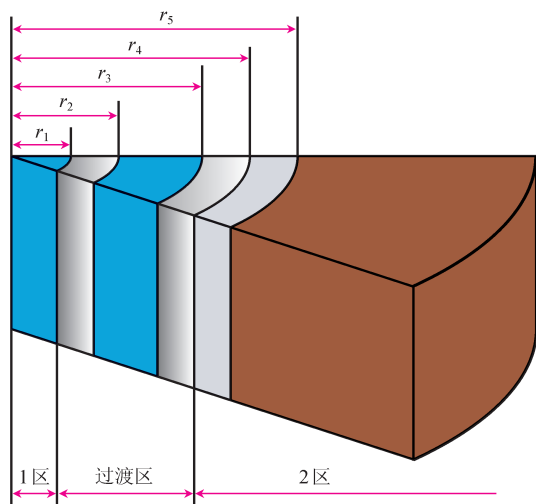


图 2 径向上的传热过程图

2.1 管内热平衡方程

通过轴向上的微元分析, 可得管内的热平衡方程式:

$$\rho_1 c_1 v_1 \frac{\partial T_{1,j}}{\partial z} + \rho_1 c_1 \frac{\partial T_{1,j}}{\partial t} + \frac{2}{r_1} (q_{1,j} - q_i) = 0 \quad (1)$$

上式中 $q_{1,j}$ 是径向上的传热, 表示为:

$$q_{1,j} = \frac{R_j}{r_1} (T_{1,j} - T_{2,j} \big|_{r=r_4}) \quad (2)$$

式(2)中的 R_j/r_x 是距井轴 r_x 远处的综合传热系数, 其中 R_j 为:

$$\frac{1}{R_j} = \frac{1}{\alpha_{1,j} r_1} + \frac{1}{\lambda_t} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{2}{\alpha_{e,j} (r_2 + r_3)} + \frac{1}{\lambda_t} \ln \frac{r_4}{r_3} \quad (3)$$

式(3)中的 $\alpha_{1,j}$ 和 $\alpha_{e,j}$ 分别为油管内的强迫对流换热系数和环空内的腔体自然对流换热系数。根据对流换热理论^[17-19], 前者可用式(4)计算, 而后者可以参考图版的取值(图3)。即

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_r}{\mu_w} \right)^{0.14} \left[1 + \left(\frac{D}{Z} \right)^{0.7} \right] \quad (4)$$

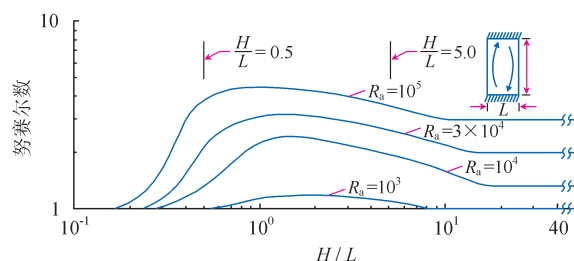


图 3 腔体自然对流换热系数图版

从图3可得, 当 H/L 大于 20 时, 腔体自然对流换热系数与尺寸比例无关, 努赛尔数的表达式退化为:

$$Nu = 0.039 R_a^{1/3} \quad (5)$$

2.2 地层非稳态导热

水泥环和地层中的非稳态导热微分方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{2,j}}{\partial t} = a_{2,j} \left(\frac{\partial^2 T_{2,j}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{2,j}}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial T_{3,j}}{\partial t} = a_{3,j} \left(\frac{\partial^2 T_{3,j}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{3,j}}{\partial r} \right) \end{cases} \quad (6)$$

初始状态为热平衡条件, 各段井筒及地层温度满足地温梯度线性函数, 即

$$T_{i,j}(t=0) = f(z) = az + T_{air} \quad (7)$$

油管的上边界条件等于注入温度或者上一段的计算值:

$$\begin{cases} T_{1,1}(z=0) = T_{inj} \\ T_{1,j}(z=z_{j-1}) = T_{1,j-1}(z=z_{j-1}) \end{cases} \quad (8)$$

非稳态导热的内边界条件满足牛顿冷却定律, 外边界温度满足地温梯度函数, 水泥环和地层的界面满足第一类和第二类边界条件:

$$\begin{cases} r = r_4, q_{1,j} = \frac{R_j}{r_4} (T_{1,j} - T_{2,j} \big|_{r=r_4}) \\ r = r_5, T_{2,j} = T_{3,j} \\ r = r_5, q_{2,j} = q_{3,j} \\ r \rightarrow \infty, T_{3,j} = f(z) \end{cases} \quad (9)$$

由式(6)~(9)可以构成地层中第 j 段关于温度的定解问题。

3 模型求解

式(6)~(9)给出的定解问题是一个初边值问题, 可在进行拉氏变换后, 将原问题化简为常微分方程求解。为了得到 0 阶的贝塞尔方程, 以及简化推导过程, 采用如式(10)所示的方案进行初边值问题的无因次化。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{i,j} = \frac{T_{i,j} - f(z)}{T_{inj} - T_{air}} \\ r_D = \frac{r}{r_4} \\ z_D = \frac{z}{Z} \\ t_D = \frac{tv_1}{Z} \end{array} \right. \quad (10)$$

将无因次化后的方程进行拉氏变换：

$$\overline{\Phi}_{i,j} = \int_0^\infty \Phi_{i,j} e^{-st} dt \quad (11)$$

可以得到拉氏空间中的定解问题：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \overline{\Phi}_{1,j}}{\partial z_D} + (s + \beta_1) \overline{\Phi}_{1,j} - \beta_1 \overline{\Phi}_{2,j} \Big|_{r_D=1} + \frac{\beta_2}{s} = 0 \\ r_D^2 \frac{\partial^2 \overline{\Phi}_{2,j}}{\partial r_D^2} + r_D \frac{\partial \overline{\Phi}_{2,j}}{\partial r_D} - \beta_{32} s r_D^2 \overline{\Phi}_{2,j} = 0 \\ r_D^2 \frac{\partial^2 \overline{\Phi}_{3,j}}{\partial r_D^2} + r_D \frac{\partial \overline{\Phi}_{3,j}}{\partial r_D} - \beta_{33} s r_D^2 \overline{\Phi}_{3,j} = 0 \\ z_D = 0, \quad \overline{\Phi}_{1,1} = \frac{1}{s} \\ z_D = z_{D,j-1}, \quad \overline{\Phi}_{1,j} = \overline{\Phi}_{1,j-1} \\ r_D = 1, \quad \frac{\partial \overline{\Phi}_{2,j}}{\partial r_D} = \beta_4 (\overline{\Phi}_{2,j} \Big|_{r_D=1} - \overline{\Phi}_{1,j}) \\ r_D = \frac{r_5}{r_4}, \quad \overline{\Phi}_{2,j} = \overline{\Phi}_{3,j} \\ r_D = \frac{r_5}{r_4}, \quad \lambda_2 \frac{\partial \overline{\Phi}_{2,j}}{\partial r_D} = \lambda_3 \frac{\partial \overline{\Phi}_{3,j}}{\partial r_D} \\ r_D \rightarrow \infty, \quad \overline{\Phi}_{3,j} = 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

其中 $\beta_1 = \frac{2R_j}{r_1^2} \frac{Z}{\rho_1 c_1 v_1}$

$$\beta_2 = \frac{Z}{T_{inj} + T_{air}} \left[\frac{\partial f(z)}{\partial z} - \frac{2q_i}{r_1 \rho_1 c_1 v_1} \right]$$

$$\beta_{32} = \frac{v_1 r_4^2}{Z a_{2,j}}$$

$$\beta_{33} = \frac{v_1 r_4^2}{Z a_{3,j}}$$

$$\beta_4 = \frac{R_j}{\lambda_2}$$

将贝塞尔方程通解带入边界条件^[20-22]，求解关于待定系数的线性方程组，可分别得到水泥环和地层中的非稳态导热解析解：

$$\overline{\Phi}_{2,j} = \overline{\Phi}_{1,j} \left[A_j I_0 \left(\sqrt{\beta_{32} s} r_D \right) + B_j K_0 \left(\sqrt{\beta_{32} s} r_D \right) \right] \quad (13)$$

$$\overline{\Phi}_{3,j} = \overline{\Phi}_{1,j} C_j K_0 \left(\sqrt{\beta_{33} s} r_D \right) \quad (14)$$

其中

$$A_j = \frac{\beta_4}{Z_{PP}} \left[\lambda_2 K_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) K_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) - \right.$$

$$\left. \lambda_3 \sqrt{\frac{\beta_{33}}{\beta_{32}}} K_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) K_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) \right]$$

$$B_j = \frac{\beta_4}{Z_{PP}} \left[\lambda_2 I_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) K_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) + \right.$$

$$\left. \lambda_3 \sqrt{\frac{\beta_{33}}{\beta_{32}}} I_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) K_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) \right]$$

$$C_j = \frac{\beta_4 \lambda_2}{Z_{PP}} \left[I_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) K_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) + \right.$$

$$\left. I_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) K_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) \right]$$

$$Z_{PP} = \beta_4 \lambda_2 K_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) K_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) I_0 \left(\sqrt{\beta_{32} s} \right) -$$

$$\beta_4 \lambda_3 \sqrt{\frac{\beta_{33}}{\beta_{32}}} K_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) K_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) I_0 \left(\sqrt{\beta_{32} s} \right) -$$

$$\lambda_2 \sqrt{\beta_{32} s} K_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) K_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) I_1 \left(\sqrt{\beta_{32} s} \right) -$$

$$\lambda_3 \sqrt{\beta_{33} s} K_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) K_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) I_1 \left(\sqrt{\beta_{32} s} \right) +$$

$$\left[\beta_4 K_0 \left(\sqrt{\beta_{32} s} \right) + \sqrt{\beta_{32} s} K_1 \left(\sqrt{\beta_{32} s} \right) \right] \times$$

$$\left[\lambda_2 I_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) K_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) + \right.$$

$$\left. \lambda_3 \sqrt{\frac{\beta_{33}}{\beta_{32}}} I_0 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{32} s}}{r_4} \right) K_1 \left(\frac{r_5 \sqrt{\beta_{33} s}}{r_4} \right) \right]$$

油管内温度的解析解可以通过求解常微分方程得到，当 $j = 1$ 时为：

$$\overline{\Phi}_{1,1} = -\frac{\beta_2}{s(s + \beta_1 - \beta_5)} + \left[\frac{1}{s} + \frac{\beta_2}{s(s + \beta_1 - \beta_5)} \right] e^{-(s + \beta_1 - \beta_5)z_D} \quad (15)$$

其中 $\beta_5 = \beta_1 \left[A_j I_0 \left(\sqrt{\beta_3 s} \right) + B_j K_0 \left(\sqrt{\beta_3 s} \right) \right]$

当 $j > 1$ 时为:

$$\overline{\Phi}_{1,j} = -\frac{\beta_2}{s(s+\beta_1-\beta_5)} + \left[\overline{\Phi}_{1,j-1} \Big|_{z_D=z_{D,j-1}} + \frac{\beta_2}{s(s+\beta_1-\beta_5)} \right] e^{(s+\beta_1-\beta_5)(z_{D,j-1}-z_D)} \quad (16)$$

将求解的管内温度代入到式(13)、(14), 通过 Stehfest 数值反演^[23-25]方法, 即式(17)、(18), 就可以得到原空间中水泥环和地层中的温度分布。

$$f(T) = \frac{\ln 2}{T} \sum_{i=1}^N V_i F\left(\frac{\ln 2}{T} i\right) \quad (17)$$

$$V_i = (-1)^{2+i} \sum_{k=\left[\frac{i+1}{2}\right]}^{\min\left(i, \frac{N}{2}\right)} \frac{k^{\frac{N}{2}} (2k)!}{\left(\frac{N}{2}-k\right)! k! (k-1)! (i-k)! (2k-i)!} \quad (18)$$

4 实例验证与参数分析

4.1 实例验证

根据某气井的地层和施工参数进行了井底温度模拟, 并与实际的井温监测数据进行了比较, 结果如图4所示。

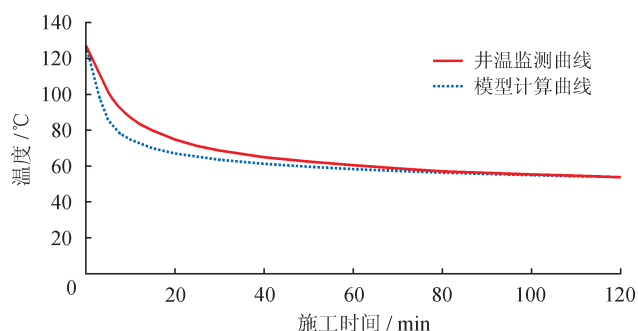


图4 模拟温度与实测温度对比图

从图4可以看出, 井筒温度场半解析模型模拟出的井底温度与实测井底温度曲线具有较高的吻合度, 特别是在30 min之后两条曲线基本重合。该模型的精度较高, 可以用来解决一些与酸化压裂井温计算相关的模拟与优化问题。

4.2 水泥环的处理方法

国内外对水泥环传热的处理方法主要有3种。

1) 考虑水泥环的热物性与地层接近, 把水泥环视为地层的一部分, 将式(15)、(16)中的 β_5 替换为如下形式即可得到该假设条件下的解。

$$\beta_5 = \frac{\beta_1 \beta_4 K_0 \left(\sqrt{\beta_3 s} \right)}{\beta_4 K_0 \left(\sqrt{\beta_3 s} \right) + \sqrt{\beta_3 s} K_1 \left(\sqrt{\beta_3 s} \right)} \quad (19)$$

2) 考虑水泥环具有稳态热阻, 将综合传热系数的倒数改为如下形式:

$$\frac{1}{R_j} = \frac{1}{\alpha_{1,j} r_1} + \frac{1}{\lambda_t} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{2}{\alpha_{e,j} (r_2 + r_3)} + \frac{1}{\lambda_t} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_5}{r_4} \quad (20)$$

3) 本模型中, 将水泥环也作为非稳态导热过程考虑。3种假设条件下模拟输出的曲线分别如图5、6、7所示。

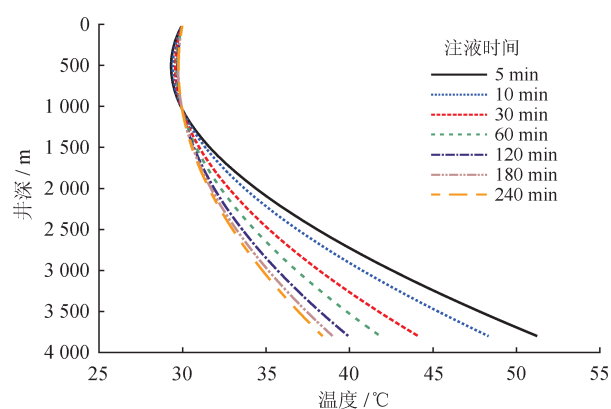


图5 忽略水泥环的模拟结果图

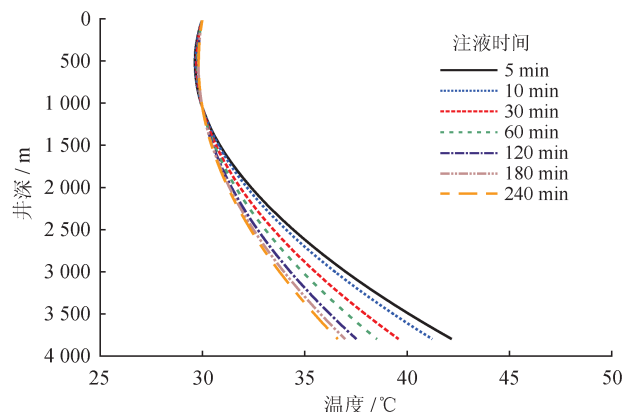


图6 水泥环稳态导热的模拟结果图

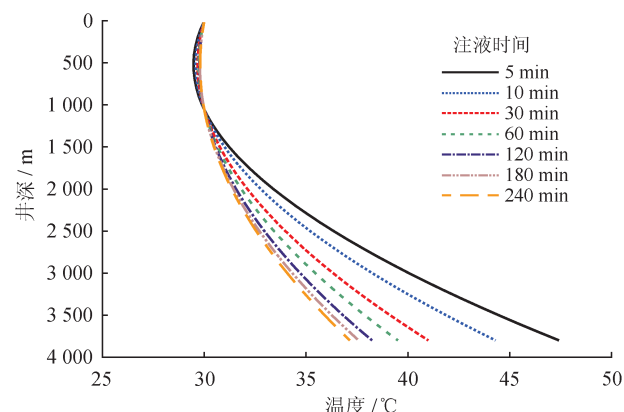


图7 水泥环非稳态导热的模拟结果图

由图 5 ~ 7 可得到假设情况 1) 和 2) 的模拟结果比较接近, 对图 5 的结果进行平移修正, 就基本可以满足精度要求, 因此将水泥环归为地层的一部分比较合理。假设情况 2) 得到的模拟结果精度较差, 井底温度的变化范围很窄、修正困难, 因此不能认为水泥环具有稳态热阻。

4.3 厚层分段

图 8 中黑色实线和红色密短线代表将整个厚层作为单段考虑时的模拟结果, 而蓝色点线和绿色疏短线代表将整个厚层均分为 4 段的模拟结果。图 8 的曲线显示, 当模拟的层厚超过 2 500 m 时, 采用单段和多段的模拟结果就会产生一定偏差。因此在岩性较为均一的巨厚层需要对其进行网格加密, 增加模拟精度。另外, 随着注液时间的增加, 厚层分段与否对模拟结果的影响逐渐变小。

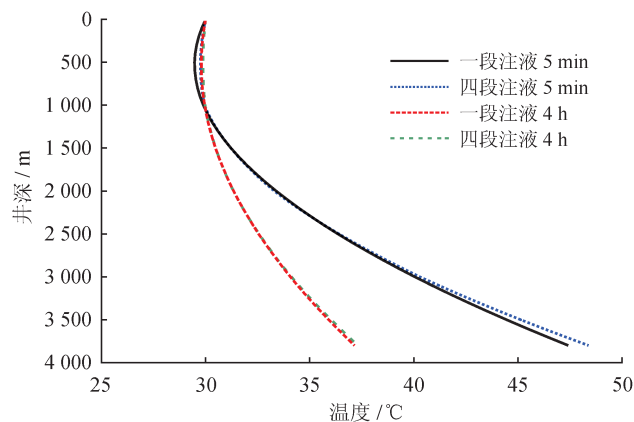


图 8 单段与多段模拟对比图

4.4 岩性分段

在井深方向上的岩性差异, 也是进行垂向分段的重要依据之一。图 9 模拟的施工井在 0 ~ 3 796 m 砂岩比重高, 而井深 3 796 ~ 6 895 m 石灰岩是主要层段。

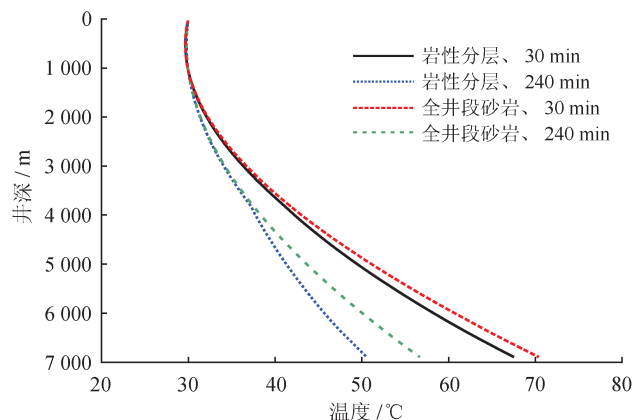


图 9 岩性分层对井筒温度分布的影响图

图 9 的曲线模拟了岩性变化对井筒温度的影响。无论是在注液 0.5 h 还是 4 h 后, 考虑岩性变化进行分段都会在 3 796 m 处产生明显拐点。是否考虑井深方向的岩性变化对模拟出的温度分布具有重大影响, 并且该影响随着施工时间的增加而增大。在具有明显岩性差异的区域应该考虑在垂向上分段模拟。

4.5 施工排量

图 10 指出排量对井筒温度的分布具有显著影响, 排量提高三分之二, 井底温度会下降近 20 °C, 但若继续提高排量, 其降温效果会变差。此外, 随着施工时间的推移, 排量对井筒温度的影响有减小的趋势。图 10 中还可以看出; 排量很低时, 在岩性界面会有一明显拐点; 随着排量增加, 拐点逐渐消失, 证明在高排量下岩性变化的影响不如在低排量下显著。

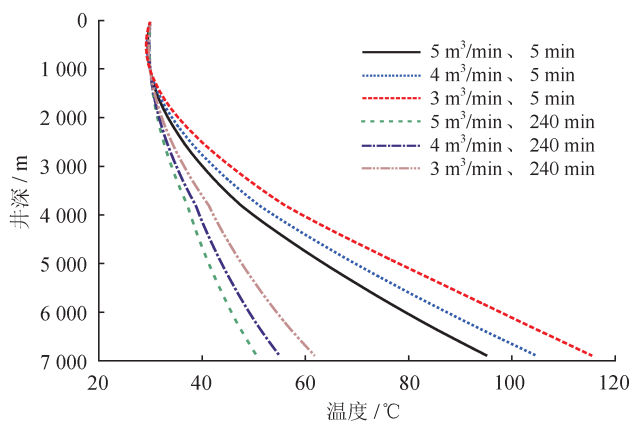


图 10 施工排量对井筒温度分布的影响图

4.6 注入温度

在需要泵送隔离剂、堵剂等试剂的特殊类型施工中, 入井液的温度可能会高于正常值。因此分析了注入温度对井筒温度分布的影响。由图 11 可知: 随着注入温度的升高, 井筒的加热效应逐渐减弱; 甚至

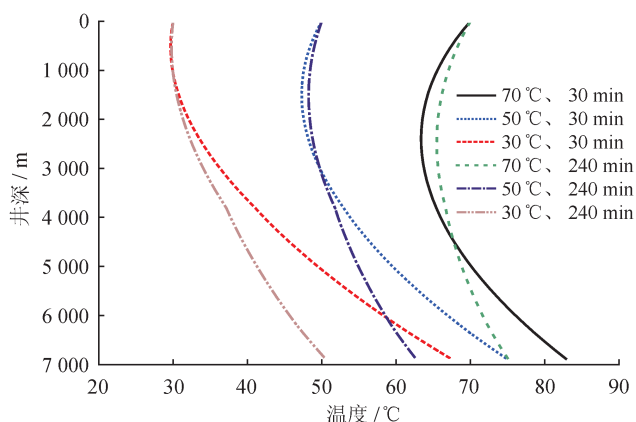


图 11 注入温度对井筒温度场的影响图

在注入高温液体时会在上半段产生明显的冷却、降温作用。在正常施工条件下,井口注入的温度越高,井筒的温度分布越均匀。

4.7 油管腐蚀

酸压施工中,油管内壁与酸液会在缓蚀剂的作用下微量反应,因此在推导过程中引入了内热源项以考察其影响。图 12 中的曲线是模拟腐蚀速度分别为 15、30、45 g/(m²·h) 时井筒温度的分布。从图 12 中可以看出,油管腐蚀对井筒温度分布的影响不大,可以忽略。

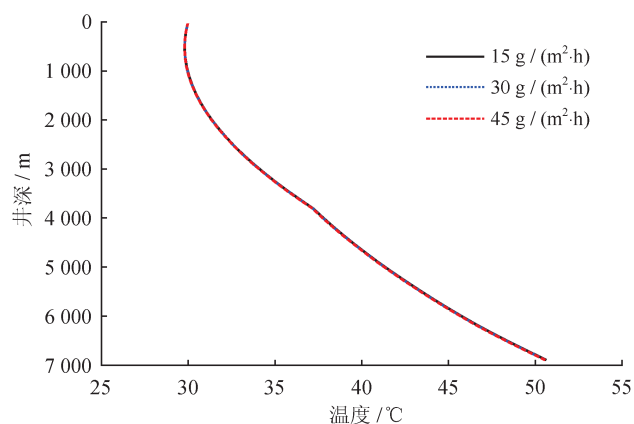


图 12 腐蚀速度对井筒温度分布的影响图

5 结论

1) 进行了物性分析,认为在井筒传热过程中水泥环具有不可忽略的非稳态效应,因此建立了轴向上离散、径向上解析的双层非稳态导热井筒温度场半解析模型。

2) 比较了现场施工监测数据和模拟数据,认为半解析模型的精度较高,可以用来解决与酸化压裂井温计算相关的模拟与优化问题。

3) 对比分析了不同水泥环导热过程处理方法的井温分布计算结果,认为假设水泥环具有稳态热阻时,计算误差大且难于修正。

4) 考察了轴向分段对井温分布的影响,认为在划分轴向网格时,应该以岩性界面为准并按照精度要求在某些厚层加密网格。

5) 岩性变化、施工排量和注入温度对井筒温度分布具有显著影响,但岩性变化和注入温度的影响随着施工时间的增加而增强,施工排量的影响则随着施工时间的增加而减弱;油管腐蚀对井温分布的影响可以忽略。

符号说明

r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 、 r_5 分别是油管内壁、油管外壁、套管内壁、套管外壁和井壁到油管中心的距离, m; ρ_1 是油管内流体密度, kg/m³; c_1 是油管内流体的比热, J/(kg·°C); v_1 是油管内流体的流速, m/s; t 是时间, s; s 是拉氏变量, 无量纲; z 是轴向坐标, m; r 是径向坐标, m; $T_{1,j}$ 、 $T_{2,j}$ 、 $T_{3,j}$ 、 T_{air} 、 T_{inj} 分别是油管内的温度、水泥环内的温度、地层中的温度、常温层温度和注入温度, °C; $q_{1,j}$ 、 $q_{2,j}$ 、 $q_{3,j}$ 、 q_i 分别是油管内壁的热流密度、水泥环中的热流密度、地层中的热流密度和单位面积单位时间油管腐蚀产生的热量, W/m²; a 是地温梯度, °C/m; $f(z)$ 是地温函数, °C; $a_{2,j}$ 、 $a_{3,j}$ 分别是水泥环和地层中的导温系数, m²/s; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别是钢的导热系数、水泥环的导热系数和地层的导热系数, W/(m·°C); α_1 、 α_e 分别是油管内的强迫对流换热系数和环空中的腔体自然对流换热系数, W/(m²·°C); μ_i 、 μ_w 分别是管内温度和管壁温度下的流体黏度, Pa·s; Nu 是努赛尔数, 无量纲; Re 是雷诺数, 无量纲; Gr 是格拉晓夫数, 无量纲; Pr 是普朗特数, 无量纲; Ra 是瑞利数, 无量纲; D 是油管直径, m; Z 是井深, m; H 是腔体高度, m; L 是腔体宽度, m; N 是精度系数 (必须是偶数), 无量纲; T 是一个确定的时间, 无量纲; $\Phi_{i,j}$ 是无因次温度, 无量纲; r_D 是无因次径向距离, 无量纲; z_D 是无因次轴向距离, 无量纲; t_D 是无因次时间, 无量纲; K_0 是 0 阶的第一类修正贝塞尔函数, 无量纲; I_0 是 0 阶的第二类修正贝塞尔函数, 无量纲。

参 考 文 献

- [1] 米强波, 伊向艺, 罗攀登, 任岚. 塔中超深致密砂岩油藏水平井分段压裂技术 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2015, 37(2): 114-118.
Mi Qiangbo, Yi Xiangyi, Luo Pandeng, Ren Lan. Horizontal well staged fracturing technology of tight sandstone reservoirs with super depth in Tazhong Area [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2015, 37(2): 114-118.
- [2] 韩烈祥, 朱丽华, 孙海芳, 譙抗逆. LPG 无水压裂技术 [J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 48-54.
Han Liexiang, Zhu Lihua, Sun Haifang, Qiao Kangni. LPG waterless fracturing technology [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 48-54.
- [3] 宋振云, 苏伟东, 杨延增, 李勇, 李志航, 汪小宇, 等. CO₂ 干法加砂压裂技术研究与实践 [J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 55-59.
Song Zhenyun, Su Weidong, Yang Yanzeng, Li Yong, Li Zhihang, Wang Xiaoyu, et al. Experimental studies of CO₂/sand dry-frac process [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6): 55-59.
- [4] 张烨, 杨胜来, 焦克波. 塔河油田超大型复合酸压降滤失技

- 术研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2014, 36(3): 121-126.
- Zhang Ye, Yang Shenglai, Jiao Kebo. Technology research about super large composite acid fracturing filtration in Tahe Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2014, 36(3): 121-126.
- [5] 曾凡辉, 王树义, 郭建春, 江启峰, 张桷乔. 裂缝面非均匀流入的气藏压裂水平井产量计算[J]. 天然气工业, 2014, 34(5): 100-105.
- Zeng Fanhui, Wang Shuyi, Guo Jianchun, Jiang Qifeng, Zhang Nanqiao. Yield calculation of a fractured horizontal well with a non-uniform gas flow on fracture surface[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5): 100-105.
- [6] Ramey Jr HJ. Wellbore heat transmission[J]. Journal of Petroleum Technology, 1962, 14(4): 427-435.
- [7] Van Everdingen AF, Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs[J]. Journal of Petroleum Technology, 1949, 1(12): 305-324.
- [8] Eickmeier JR, Ersoy D, Ramey HJ. Wellbore temperatures and heat losses during production or injection operations[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1970, 9(2): 115-121.
- [9] Wu YS, Pruess K. An analytical solution for wellbore heat transmission in layered formations[J]. SPE Reservoir Engineering, 1990, 5(4): 531-538.
- [10] Hasan AR, Kabir CS. Heat transfer during two-phase flow in wellbores: Part I—formation temperature[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 6-9 October 1991, Dallas, Texas, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/22866-MS>.
- [11] Hasan AR, Kabir CS. Aspects of wellbore heat transfer during two-phase flow[J]. SPE Production & Facilities, 1994, 9(3): 211-216.
- [12] Hasan AR, Kabir CS. Determination of static reservoir temperature from transient data following mud circulation[J]. SPE Drilling & Completion, 1994, 9(1): 17-24.
- [13] Hasan AR, Kabir CS, Lin D. Analytic wellbore temperature model for transient gas-well testing[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005, 8(3): 240-247.
- [14] Hagoort J. Ramey's wellbore heat transmission revisited[J]. SPE Journal, 2004, 9(4): 465-474.
- [15] Mcspadden AR, Coker OD. Multiwell thermal interaction: Predicting wellbore and formation temperatures for closely spaced wells[J]. SPE Drilling & Completion, 2010, 25(4): 448-457.
- [16] Yoshida N, Zhu D, Hill AD. Temperature prediction model for a horizontal well with multiple fractures in a shale reservoir[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September - 2 October 2013, New Orleans, Louisiana, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/166241-MS>.
- [17] Lienhard JH. A heat transfer textbook[M]. New York: Courier Dover Publications, 2005.
- [18] Holman JP. Heat transfer[M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [19] Rohsenow WM. Handbook of heat transfer[M]. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [20] 顾樵. 数学物理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- Gu Qiao. Mathematical methods for physics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [21] 李顺初, 黄炳光. Laplace 变换与 Bessel 函数及试井分析理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- Li Shunchu, Huang Bingguang. Basic theory of Laplace transform, Bessel function and well test analysis[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000.
- [22] 奚定平. 贝塞尔函数[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- Xi Dingping. Bessel function[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [23] 同登科, 陈钦雷. 关于 Laplace 数值反演 Stehfest 方法的一点注记[J]. 石油学报, 2001, 22(6): 91-92.
- Tong Dengke, Chen Qinlei. Remark on Stehfest numerical inversion method of Laplace transforms[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6): 91-92.
- [24] Stehfest H. Algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transforms[J]. Communications of the ACM, 1970, 13(1): 47-49.
- [25] Stehfest H. Remark on algorithm 368: Numerical inversion of Laplace transforms[J]. Communications of the ACM, 1970, 13(10): 624.

(收稿日期 2015-07-15 编辑 韩晓渝)