



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110929447 B

(45) 授权公告日 2020.11.03

(21) 申请号 201911326643.4

CN 105154038 A, 2015.12.16

(22) 申请日 2019.12.20

CN 110159239 A, 2019.08.23

(65) 同一申请的已公布的文献号

US 2019010795 A1, 2019.01.10

申请公布号 CN 110929447 A

US 2019055452 A1, 2019.02.21

(43) 申请公布日 2020.03.27

廖毅. “非均质碳酸盐岩转向酸化模型研究”. 《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技I辑》. 2017, (第11期),

(73) 专利权人 西南石油大学

薛衡. “复杂碳酸盐岩储层水平井高效酸化数值模拟研究”. 《中国博士学位论文全文数据库 工程科技I辑》. 2018, (第05期),

地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

(72) 发明人 郭建春 刘壮 路千里 李鸣

任冀川 陶亮

Guo Jianchun et al.. “An optimal design of network-fracture acidification for ultra-deep gas wells in the Lower Permian strata of the western Sichuan Basin”. 《Natural Gas Industry B》. 2017, 第4卷 (第6期),

(74) 专利代理机构 成都金英专利代理事务所

(普通合伙) 51218

代理人 袁英

Zheng Zhang et al.. “Wellbore temperature distribution during circulation stage when well-kick occurs in a continuous formation from the bottom-hole”. 《Energy》. 2018, 第164卷

(51) Int. Cl.

G06F 30/23 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

G06F 119/08 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 104806230 B, 2018.01.05

CN 108316251 A, 2018.07.24

审查员 易建琼

权利要求书4页 说明书7页 附图4页

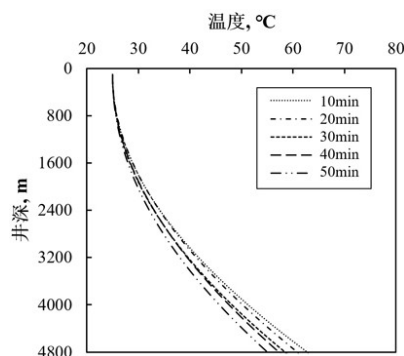
(54) 发明名称

一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法

(57) 摘要

本发明涉及一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法,包括:(1)利用流变仪测定稠化酸样品不同温度、不同剪切速率下的表观粘度,建立稠化酸流变模型;(2)判定不同注入条件下的稠化酸流动流态,计算不同流态下的稠化酸井筒流动剪切速率;(3)将稠化酸井筒流动剪切速率带入流变模型,得到不同注入条件下的酸液表观粘度,计算不同注入条件下的稠化酸对流换热系数;(4)建立考虑酸液流变性影响的稠化酸酸化井筒温度场数值计算模型;(5)计算不同注入条件下的井筒内酸液温度分布。本发明考虑酸

化过程中酸液流变性对于井筒-地层传热效率的影响,采用数值方法计算井筒内酸液温度分布,对于海相碳酸盐岩储层酸化改造设计具有指导意义。



1. 一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法,依次包括以下步骤:

(1) 利用流变仪测定稠化酸样品不同温度、不同剪切速率下的表观粘度,建立稠化酸流变模型,过程如下:

利用流变仪开展不同实验温度下液体变剪切表观粘度测试,获取酸液流变曲线,采用最小二乘法拟合酸液流变曲线,建立考虑温度和流动剪切速率共同影响的酸液流变模型:

$$\mu_a = ke^{aT} \gamma^{n-1}$$

式中: μ_a ——酸液表观粘度,Pa·s;

k——稠度系数,Pa·sⁿ;

a——常数,无因次;

T——酸液温度,°C;

γ ——剪切速率,s⁻¹;

n——流态指数,无因次;

(2) 基于非牛顿流体流动流态判别方法,判定不同注入条件下的稠化酸流动流态,计算不同流态下的稠化酸井筒流动剪切速率,过程如下:

计算不同注入条件下井筒内流体流动雷诺数Re:

$$Re = \frac{8^{1-n} D^n v^{2-n} \rho}{2ke^{aT} \left(\frac{1+n}{1+3n} \right) \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n}$$

式中:D——井筒直径,m;

v——酸液注入速度,m/s;

ρ ——酸液密度,kg/m³;

计算不同注入条件下稠化酸井筒流动临界雷诺数Re_c:

$$Re_c = 640 \left[\frac{(3n+1)^3}{2(2n+1)(3n+2)(4n+3)} \right]^{-1}$$

判断井筒内酸液流动流态:

$$\begin{cases} Re > Re_c, \text{紊流} \\ Re \leq Re_c, \text{层流} \end{cases}$$

若井筒内酸液流态为层流,利用下式计算稠化酸井筒流动剪切速率 γ :

$$\gamma = \frac{1+3n}{1+n} \frac{2v}{D}$$

若井筒内酸液流态为紊流,利用ANSYS软件建立井筒流体流动模型并计算稠化酸井筒流动剪切速率 γ ;

(3) 将步骤(2)计算的稠化酸井筒流动剪切速率带入步骤(1)建立的流变模型,得到不同注入条件下的酸液表观粘度,结合不同流态下的对流换热系数公式,计算不同注入条件下的稠化酸对流换热系数;

(4) 建立考虑酸液流变性影响的稠化酸酸化井筒温度场数值计算模型;

(5) 基于步骤(3)计算得到的对流换热系数,基于步骤(4)建立的稠化酸酸化井筒温度

场数值计算模型,计算不同注入条件下的井筒内酸液温度分布。

2.如权利要求1所述的一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法,其特征在于,所述步骤(3)过程如下:

1)将步骤(2)计算的稠化酸井筒流动剪切速率带入步骤(1)建立的流变模型,计算得到不同注入条件下的酸液表观粘度;

2)若井筒内酸液流态为层流,利用下式计算层流状态下稠化酸井筒流动对流换热系数:

$$h=1.86\lambda(\text{RePr}D/L)^{0.33}(\mu_{\text{at}}/\mu_{\text{aw}})^{0.14}/D$$

若井筒内酸液流态为紊流,利用下式计算紊流状态下稠化酸井筒流动对流换热系数:

$$h=0.027\lambda\text{Re}^{0.8}\text{Pr}^{\frac{1}{3}}(\mu_{\text{at}}/\mu_{\text{aw}})^{0.14}\left[1+(D/L)^{0.7}\right]^{1/4}/D$$

$$\text{Pr}=\mu_{\text{at}}C/\lambda$$

式中: λ ——酸液导热系数,W/(m·°C);

L——井筒长度,m;

Pr——Prandtl数,无因次;

μ_{at} ——油管中(井筒内)流动酸液的表观粘度,Pa·s;

μ_{aw} ——油管壁面温度下的酸液表观粘度,Pa·s;

C——酸液比热容,J/(kg·°C)。

3.如权利要求1所述的一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法,其特征在于,所述步骤(4)过程如下:

1)建立酸化井筒温度场模型:

$$\begin{cases} Q\rho C\frac{\partial T_0}{\partial z}+2\pi r_0 h_a(T_1-T_0)-\pi r_0^2\rho C\frac{\partial T_0}{\partial t}=0 \\ \frac{2r_1 h_w(T_2-T_1)}{r_1^2-r_0^2}-\frac{2r_0 h_a(T_1-T_0)}{r_1^2-r_0^2}=\rho_i C_i\frac{\partial T_1}{\partial t} \\ \frac{2r_2 h_w(T_3-T_2)}{r_2^2-r_1^2}-\frac{2r_1 h_w(T_2-T_1)}{r_2^2-r_1^2}=\rho_w C_w\frac{\partial T_2}{\partial t} \\ \frac{1}{r_i}\frac{\partial}{\partial r_i}\left(\lambda_i r_i\frac{\partial T_i}{\partial r_i}\right)=\rho_i C_i\frac{\partial T_i}{\partial t} \end{cases}$$

式中:Q——注酸排量,m³/s;

T₀——油管内酸液温度,°C;

z——井筒垂向深度,m;

T₁——油管温度,°C;

T₂——环空液温度,°C;

T₃——套管温度,°C;

T_i——第i层管柱温度,°C;

r₀——油管内壁半径,m;

r₁——油管半径,m;

- r_2 ——套管内壁半径,m;
 r_3 ——套管半径,m;
 r_i ——第*i*层管柱半径,m;
 h_a, h_w ——酸液,环空液对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;
 ρ_t ——油管密度, kg/m^3 ;
 C_t ——油管比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;
 ρ_w ——环空液密度, kg/m^3 ;
 C_w ——环空液比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;
 λ_i ——第*i*层管柱导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$;
 ρ_i ——第*i*层管柱密度, kg/m^3 ;
 C_i ——第*i*层管柱比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;

2) 将步骤(3)得到的稠化酸井筒流动对流换热系数代入酸化井筒温度场模型中,得到考虑酸液流变性影响的稠化酸酸化井筒温度场数值计算模型:

若井筒酸液流态为层流:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Q\rho C \frac{\partial T_0}{\partial z} + 2\pi r_0 h (T_1 - T_0) - \pi r_0^2 \rho C \frac{\partial T_0}{\partial t} = 0 \\
 \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_1^2 - r_0^2} - \frac{2r_0 h (T_1 - T_0)}{r_1^2 - r_0^2} = \rho_t C_t \frac{\partial T_1}{\partial t} \\
 \frac{2r_2 h_w (T_3 - T_2)}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_2^2 - r_1^2} = \rho_w C_w \frac{\partial T_2}{\partial t} \\
 \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(\lambda_i r_i \frac{\partial T_i}{\partial r_i} \right) = \rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} \\
 h = 1.86\lambda \left(Reke^{aT_0} \left(\frac{1+3n}{1+n} \frac{2\nu}{D} \right)^{n-1} CD/\lambda L \right)^{0.33} e^{0.14a(T_0-T_1)}/D
 \end{array} \right.$$

若井筒酸液流态为紊流:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Q\rho C \frac{\partial T_0}{\partial z} + 2\pi r_0 h (T_1 - T_0) - \pi r_0^2 \rho C \frac{\partial T_0}{\partial t} = 0 \\
 \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_1^2 - r_0^2} - \frac{2r_0 h (T_1 - T_0)}{r_1^2 - r_0^2} = \rho_t C_t \frac{\partial T_1}{\partial t} \\
 \frac{2r_2 h_w (T_3 - T_2)}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_2^2 - r_1^2} = \rho_w C_w \frac{\partial T_2}{\partial t} \\
 \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(\lambda_i r_i \frac{\partial T_i}{\partial r_i} \right) = \rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} \\
 h = 0.027\lambda Re^{0.8} \left(Cke^{aT_0}/\lambda (c_1 \nu^{c_2})^{n-1} \right)^{0.33} e^{0.14a(T_0-T_1)} \left[1 + (D/L)^{0.7} \right] / D
 \end{array} \right.$$

式中： h ——对流换热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；

λ ——酸液导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ；

L ——井筒长度， m ；

C ——酸液比热容， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

4. 如权利要求1所述的一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法，其特征在于，所述步骤(5)内容如下：

基于步骤(4)建立的稠化酸酸化井筒温度场数值计算模型，带入不同的注入参数即可求解不同注入条件下的井筒垂直深度 z 对应的油管内酸液温度 T_0 。

5. 如权利要求1所述的一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法，其特征在于，若井筒内酸液流态为紊流，利用ANSYS软件建立井筒流体流动模型并计算稠化酸井筒流动剪切速率 γ ，具体步骤为：

①利用ANSYS-ICEM软件建立长为 L ，直径为 D 的井筒流动物理模型；②对物理模型自动进行网格划分，井筒长度方向采用矩形网格，井筒径向方向采用“Y”型网格，并将划分好网格的物理模型保存为“.mesh"文件；③将“.mesh"文件导入ANSYS-Fluent软件，并在“General”模块对导入的网格进行网格质量检测，若网格质量低于0.3，须返回步骤①重新划分网格；④在“Models”模块选择“K-epsilon(2eqn)”紊流计算模型；⑤在“Materials”模块选中“non-newtonian-power-law”类型流体；⑥在“Cell Zone Conditions”模块中设置模型边界条件：“inlet”设置为“velocity-inlet”并赋予入口注入速度 v ，“outlet”设置为“pressure-outlet”并赋予出口压力；⑦在“Reference Value”模块中将稠化酸实验参数赋为流体参数；⑧在“Run Calculation”中设置迭代次数，模拟得到不同注入条件下的稠化酸流动剪切速率曲线，以此计算稠化酸井筒流动剪切速率 γ 。

6. 如权利要求5所述的一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法，其特征在于，所述模拟得到不同注入条件下的稠化酸流动剪切速率曲线，以此计算稠化酸井筒流动剪切速率 γ ，过程如下：

基于模拟的稠化酸流动剪切速率曲线，拟合得到不同注入条件下的紊流剪切速率计算公式，计算紊流状态下的酸液剪切速率：

$$\gamma = c_1 v^{c_2}$$

式中： c_1, c_2 ——拟合经验参数，无因次。

一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法

技术领域

[0001] 本发明涉及石油工程领域,尤其是深层碳酸盐岩储层稠化酸酸化过程中考虑酸液流变性影响的井筒温度场的数值计算方法。采用数值计算方法计算酸化过程中井筒流动酸液温度变化,提高深层碳酸盐岩储层酸化设计的准确性,实现深层碳酸盐岩储层高效酸化改造。

背景技术

[0002] 深层海相碳酸盐岩层系是实现四川盆地天然气效益勘探开发的主力层系,储层具有埋藏深(>5000m)、温度高(>140℃)等特征(马新华,杨雨,文龙,罗冰.四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J].石油勘探与开发,2019,46(1):1-13)。该类储层开发难以自然获得工业油气流,酸化技术是区块储层主要的增产改造手段之一。

[0003] 酸化是一种通过向地层注入一定类型、浓度的酸液和添加剂组成的配方酸液,溶蚀地层岩石部分矿物或孔隙、裂缝内的堵塞物,提高地层或裂缝渗透性,改善渗流条件,达到恢复或提高油气井产能目的的油气田增产技术(李颖川.采油工程[M].石油工业出版社,2009)。稠化酸是目前广泛应用于海相碳酸盐岩储层酸化改造的主要酸液体系之一(韩慧芬.四川盆地上震旦统灯四段气藏提高单井产量的技术措施[J].天然气工业,2017,37(08):40-47)。酸化过程中,酸液在井筒中流动会受到高温地层加热而持续升温,酸液温度直接影响酸液性能以及酸与岩石的反应速率,进而影响储层酸化效果。因此,准确预测井筒温度场有利于优化储层酸化工艺与设计。

[0004] 目前常用的井筒温度计算方法主要关注井筒与地层的传热过程分析(Zhang Z, Xiong Y M, Gao Y, et al. Wellbore temperature distribution during circulation stage when well-kick occurs in a continuous formation from the bottom-hole. Energy, 164 (2018): 964-977, 2018), 却忽略了酸化过程中酸液流变性对于井筒-地层传热效果的影响。因此,针对四川盆地高温深井的特点,研究酸化过程井筒温度变化规律,考虑酸液流变性对于井筒内酸液温度分布的影响,对于四川海相碳酸盐岩储层酸化改造设计至关重要。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法,该方法重点研究酸化注液过程中酸液流变性对于井筒-地层传热效率的影响,采用数值方法计算考虑上述影响的井筒内酸液温度分布。该方法原理可靠,计算高效,有利于计算高温深井井筒内酸液温度,对于四川海相碳酸盐岩储层酸化改造设计具有指导意义。

[0006] 为达到以上技术目的,本发明采用以下技术方案。

[0007] 首先,利用流变仪测定不同温度下现场常用稠化酸液样品的表观粘度;其次,基于非牛顿流动流态判别方法判定井筒内稠化酸流动流态,并建立不同流态下的井筒内稠化酸流动剪切速率模型;再者,结合稠化酸流变模型以及流动剪切速率模型求解不同流态下的

稠化酸对流换热系数;然后,结合对流换热系数,建立考虑酸液流变性影响的井筒温度场数值计算模型;最后,基于井筒温度场模型计算井筒内酸液温度分布分布。

[0008] 一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法,依次包括以下步骤:

[0009] (1) 利用流变仪测定稠化酸样品不同温度、不同剪切速率下的表观粘度,建立稠化酸流变模型;

[0010] (2) 基于非牛顿流体流动流态判别方法,判定不同注入条件下的稠化酸流动流态,基于解析公式以及ANSYS软件,计算不同流态下的稠化酸井筒流动剪切速率;

[0011] (3) 将步骤(2)计算的稠化酸井筒流动剪切速率带入步骤(1)建立的流变模型,得到不同注入条件下的酸液表观粘度,结合不同流态下的对流换热系数公式,计算不同注入条件下的稠化酸对流换热系数;

[0012] (4) 建立考虑酸液流变性影响的稠化酸酸化井筒温度场数值计算模型;

[0013] (5) 基于步骤(3)计算得到的对流换热系数,基于步骤(4)建立的稠化酸酸化井筒温度场数值计算模型,计算不同注入条件下的井筒内酸液温度分布。

[0014] 在本发明中,所述步骤(1)中,利用流变仪测定稠化酸样品不同温度不同剪切速率下的表观粘度,建立稠化酸流变模型,过程如下:

[0015] 选取现场常用的聚丙烯酰胺稠化酸体系,配制等量稠化酸作为流变实验样品,利用流变仪开展不同实验温度下液体变剪切表观粘度测试,获取酸液流变曲线,采用最小二乘法拟合酸液流变曲线,建立考虑温度和流动剪切速率共同影响的酸液流变模型:

$$[0016] \quad \mu_a = k e^{aT} \gamma^{n-1} \quad (1)$$

[0017] 式中: μ_a ——酸液表观粘度,Pa·s;

[0018] k ——稠度系数,Pa·sⁿ;

[0019] a ——常数,无因次;

[0020] T ——酸液温度,℃;

[0021] γ ——剪切速率,s⁻¹;

[0022] n ——流态指数,无因次。

[0023] 在本发明中,所述步骤(2)中,基于非牛顿流体流动流态判别方法,判定不同注入条件下的稠化酸流动流态,基于解析公式以及ANSYS软件,计算不同流态下的稠化酸井筒流动剪切速率,过程如下:

[0024] 1) 基于刘崇建等推导的非牛顿流体雷诺数计算公式(刘崇建,刘孝良,柳世杰.非牛顿流体流态判别方法的研究[J].天然气工业,2001(04):49-52),计算不同注入条件下井筒内流体流动雷诺数:

$$[0025] \quad Re = \frac{8^{1-n} D^n v^{2-n} \rho}{2k e^{aT} \left(\frac{1+n}{1+3n} \right) \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n} \quad (2)$$

[0026] 式中:Re——流动雷诺数,无因次;

[0027] D ——井筒直径,m;

[0028] v ——酸液注入速度,m/s;

[0029] ρ ——酸液密度,kg/m³。

[0030] 2) 基于刘乃震等推到的紊流流动临界雷诺数公式(刘乃震,王廷瑞,刘孝良,等.非

牛顿流体的稳定性及其流态判别[J].天然气工业,2003(01):53-57),计算不同注入条件下稠化酸井筒流动临界雷诺数:

$$[0031] \quad Re_c = 640 \left[\frac{(3n+1)^3}{2(2n+1)(3n+2)(4n+3)} \right]^{-1} \quad (3)$$

[0032] 式中: Re_c ——临界雷诺数,无因次。

[0033] 3)对比步骤1)和步骤2)计算的雷诺数与临界雷诺数,判断井筒内酸液流动流态:

$$[0034] \quad \begin{cases} Re > Re_c, \text{紊流} \\ Re \leq Re_c, \text{层流} \end{cases} \quad (4)$$

[0035] 4)基于步骤3)判定的结果,若井筒内酸液流态为层流,采用刘崇建等推导的层流剪切速率解析公式计算稠化酸井筒流动剪切速率 γ :

$$[0036] \quad \gamma = \frac{1+3n}{1+n} \frac{2v}{D} \quad (5)$$

[0037] 5)基于步骤3)判定的结果,若井筒内酸液流态为紊流,利用ANSYS软件建立井筒流体流动模型并计算稠化酸井筒流动剪切速率 γ 。其具体操作步骤为:①利用ANSYS-ICEM软件建立长为L,直径为D的井筒流动物理模型(其中L和D参考实际井筒尺寸,要求设置 $L > 50D$ 以保证流体流动充分发展);②对物理模型自动进行网格划分,井筒长度方向采用矩形网格,井筒径向方向采用“Y”型网格,并将划分好网格的物理模型保存为“.mesh"文件;③将“.mesh"文件导入ANSYS-Fluent软件,并在“General”模块对导入的网格进行网格质量检测,若网格质量低于0.3,须返回步骤①重新划分网格;若高于0.3,则继续下一步骤;④在“Models”模块选择“K-epsilon(2eqn)”紊流计算模型;⑤在“Materials”模块选中“non-newtonian-power-law”类型流体,并基于步骤(1)计算的流变参数赋予该流体稠度系数k以及流态指数n;⑥在“Cell Zone Conditions”模块中设置模型边界条件:“inlet”设置为“velocity-inlet”并赋予入口注入速度v,“outlet”设置为“pressure-outlet”并赋予出口压力(默认为大气压);⑦在“Reference Value”模块中将步骤(1)中的稠化酸实验参数赋为流体参数;⑧在“Run Calculation”中设置迭代次数(默认为500次),模拟得到不同注入条件下的稠化酸流动剪切速率曲线,以此计算稠化酸井筒流动剪切速率 γ 。

[0038] 所述模拟得到不同注入条件下的稠化酸流动剪切速率曲线,以此计算稠化酸井筒流动剪切速率 γ ,过程如下:

[0039] 基于模拟的稠化酸流动剪切速率曲线,拟合得到不同注入条件下的紊流剪切速率计算公式,通过该公式计算紊流状态下的酸液剪切速率:

$$[0040] \quad \gamma = c_1 v^{c_2} \quad (6)$$

[0041] 式中: c_1, c_2 ——拟合经验参数,无因次。

[0042] 在本发明中,所述步骤(3)中,将步骤(2)计算的稠化酸井筒流动剪切速率带入步骤(1)建立的流变模型,得到不同注入条件下的酸液表观粘度,结合不同流态下的对流换热系数公式,计算不同注入条件下的稠化酸对流换热系数,过程如下:

[0043] 1)将步骤(2)计算的稠化酸井筒流动剪切速率带入步骤(1)建立的流变模型,可以计算得到不同注入条件下(温度,剪切速率)的酸液表观粘度;

[0044] 2) 若井筒内酸液流态为层流,将步骤1)计算的表观粘度代入Rohsenow等给出的层流状态下对流换热系数计算公式(Rohsenow W, Harnett J, Cho Y. Handbook of heat transfer (3rd ed). New York: McGraw Hill book company, 1998), 计算层流状态下稠化酸并筒流动对流换热系数:

$$[0045] \quad h = 1.86\lambda (\text{RePr}D/L)^{0.33} (\mu_{\text{at}}/\mu_{\text{aw}})^{0.14}/D \quad (7)$$

[0046] 式中: h ——对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

[0047] λ ——酸液导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

[0048] L ——井筒长度, m ;

[0049] Pr ——Prandtl数, 无因次;

[0050] μ_{at} ——油管中(井筒内)流动酸液的表观粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

[0051] μ_{aw} ——油管壁面温度下的酸液表观粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

[0052] 3) 若井筒内酸液流态为紊流,将步骤1)计算的表观粘度代入Gniellinski等建立的紊流状态下对流换热系数计算公式(Gniellinski V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flows. International Chemical Engineering, 1976. 16 (2): 359-368), 计算得到紊流状态下稠化酸并筒流动对流换热系数:

$$[0053] \quad h = 0.027\lambda \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{\frac{1}{3}} (\mu_{\text{at}}/\mu_{\text{aw}})^{0.14} \left[1 + (D/L)^{0.7} \right] / D \quad (8)$$

[0054] 公式(7)、公式(8)中Pr数的定义为:

$$[0055] \quad \text{Pr} = \mu_{\text{at}} C / \lambda \quad (9)$$

[0056] C ——酸液比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

[0057] 在本发明中,所述步骤(4)中,建立考虑酸液流变性影响的稠化酸酸化并筒温度场数值计算模型,过程如下:

[0058] 1) 建立酸化并筒温度场模型(廖毅. 非均质碳酸盐岩转向酸化模型研究[D]. 西南石油大学, 2017):

$$[0059] \quad \begin{cases} Q\rho C \frac{\partial T_0}{\partial z} + 2\pi r_0 h_a (T_1 - T_0) - \pi r_0^2 \rho C \frac{\partial T_0}{\partial t} = 0 \\ \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_1^2 - r_0^2} - \frac{2r_0 h_a (T_1 - T_0)}{r_1^2 - r_0^2} = \rho_i C_i \frac{\partial T_1}{\partial t} \\ \frac{2r_2 h_w (T_3 - T_2)}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_2^2 - r_1^2} = \rho_w C_w \frac{\partial T_2}{\partial t} \\ \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(\lambda_i r_i \frac{\partial T_i}{\partial r_i} \right) = \rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} \end{cases} \quad (10)$$

[0060] 式中: Q ——注酸排量, m^3/s ;

[0061] T_0 ——油管内酸液温度, $^\circ\text{C}$;

[0062] z ——井筒垂向深度, m ;

[0063] T_1 ——油管温度, $^\circ\text{C}$;

[0064] T_2 ——环空液温度, $^\circ\text{C}$;

[0065] T_3 ——套管温度, $^\circ\text{C}$;

- [0066] T_i ——第*i*层管柱温度, °C;
- [0067] r_0 ——油管内壁半径, m;
- [0068] r_1 ——油管半径, m;
- [0069] r_2 ——套管内壁半径, m;
- [0070] r_3 ——套管半径, m;
- [0071] r_i ——第*i*层管柱半径, m;
- [0072] h_a, h_w ——酸液, 环空液对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;
- [0073] ρ_t ——油管密度, kg/m^3 ;
- [0074] C_t ——油管比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;
- [0075] ρ_w ——环空液密度, kg/m^3 ;
- [0076] C_w ——环空液比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$;
- [0077] λ_i ——第*i*层管柱导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$;
- [0078] ρ_i ——第*i*层管柱密度, kg/m^3 ;
- [0079] C_i ——第*i*层管柱比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

[0080] 需要说明的是, 上述模型中酸液对流换热系数由恒定酸液粘度计算所得, 未考虑酸液流变性影响, 计算过程中酸液对流换热系数为常值。

[0081] 2) 将步骤(3)得到的稠化酸井筒流动对流换热系数代入步骤1)建立的酸化井筒温度场模型中, 得到考虑酸液流变性影响的稠化酸酸化井筒温度场数值计算模型:

[0082] 若井筒酸液流态为层流 ($Re \leq Re_c$):

$$\begin{cases}
 Q\rho C \frac{\partial T_0}{\partial z} + 2\pi r_0 h (T_1 - T_0) - \pi r_0^2 \rho C \frac{\partial T_0}{\partial t} = 0 \\
 \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_1^2 - r_0^2} - \frac{2r_0 h (T_1 - T_0)}{r_1^2 - r_0^2} = \rho_t C_t \frac{\partial T_1}{\partial t} \\
 \frac{2r_2 h_w (T_3 - T_2)}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_2^2 - r_1^2} = \rho_w C_w \frac{\partial T_2}{\partial t} \\
 \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(\lambda_i r_i \frac{\partial T_i}{\partial r_i} \right) = \rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} \\
 h = 1.86\lambda \left(Re k e^{aT_0} \left(\frac{1 + 3n}{1 + n} \frac{2\nu}{D} \right)^{n-1} CD/\lambda L \right)^{0.33} e^{0.14a(T_0 - T_1)}/D
 \end{cases} \quad (11)$$

[0084] 若井筒酸液流态为紊流 ($Re > Re_c$):

$$[0085] \left\{ \begin{array}{l} Q\rho C \frac{\partial T_0}{\partial z} + 2\pi r_0 h (T_1 - T_0) - \pi r_0^2 \rho C \frac{\partial T_0}{\partial t} = 0 \\ \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_1^2 - r_0^2} - \frac{2r_0 h (T_1 - T_0)}{r_1^2 - r_0^2} = \rho_i C_i \frac{\partial T_1}{\partial t} \\ \frac{2r_2 h_w (T_3 - T_2)}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{2r_1 h_w (T_2 - T_1)}{r_2^2 - r_1^2} = \rho_w C_w \frac{\partial T_2}{\partial t} \\ \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(\lambda_i r_i \frac{\partial T_i}{\partial r_i} \right) = \rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} \\ h = 0.027 \lambda Re^{0.8} \left(Cke^{aT_0} / \lambda (c_1 v^{c_2})^{n-1} \right)^{0.33} e^{0.14a(T_0 - T_1)} \left[1 + (D/L)^{0.7} \right] / D \end{array} \right. \quad (12)$$

[0086] 在本发明中,所述步骤(5)中,基于步骤(3)计算得到的对流换热系数,基于步骤(4)建立的稠化酸酸化井筒温度场模型,计算不同注入条件下的井筒内酸液温度分布,内容如下:

[0087] 基于步骤(4)建立的稠化酸酸化井筒温度场模型,带入不同的注入参数即可求解不同注入条件下的井筒垂直深度z对应的油管内酸液温度 T_0 。

[0088] 与现有技术相比,本方法具有以下有益效果:

[0089] ①本发明基于实验方法建立了一套稠化酸流变模型,模型简单,理论可靠,能够计算指定注入条件下的酸液表观粘度;

[0090] ②本发明建立了考虑稠化酸流变性影响的酸化井筒温度场模型,克服了采用经验常数判断流态以及采用实验测得的稳态酸液粘度计算井筒传热的误差;

[0091] ③本发明考虑了稠化酸流变性对于稠化酸对流传热效率的影响,参数来源真实,预测结果更加符合现场实际情况。

附图说明

[0092] 图1是本发明中不同温度下稠化酸流变曲线。

[0093] 图2是本发明中井筒流体流动物理模型。

[0094] 图3是本发明中稠化酸紊流流动(酸液温度 50°C)不同注入速率条件下的剪切速率。

[0095] 图4是本发明中稠化酸酸化井筒垂向深度—酸液温度分布图。

具体实施方式

[0096] 下面结合附图和应用实例进一步说明本发明,旨在对本发明做示意性说明和解释,并不限定本发明的范围。

[0097] 实施例1

[0098] 一种稠化酸酸化过程中井筒温度场数值计算方法,具体如下:

[0099] 1.基于川西海相碳酸盐岩气藏某井现场常用的一套稠化酸体系配制实验样品,现场酸化注酸速率为 $2\text{m}^3/\text{min}$,地温梯度为 $0.22^\circ\text{C}/\text{m}$,井筒直径为 90mm ,井深为 4800m 。利用流变仪测试不同温度下的稠化酸流变曲线(见图1),采用步骤(1)所述方法,计算式(1)中各参

数为： $k=3.1$ ， $a=-0.003$ ， $n=0.29$ 。建立不同温度下的稠化酸流变模型。

[0100] 2. 将步骤(1)获得的相关参数带入步骤(2)中，可以计算当前注入条件下的稠化酸流动雷诺数为7571.2，计算流动临界雷诺数为3692.5。

[0101] 3. 由步骤2可知当前注入条件下稠化酸井筒流动为紊流流态，基于步骤(3)所述方法以及现场参数，利用ANSYS软件建立井筒流体流动物理模型(见图2)，模拟不同注入条件下稠化酸井筒紊流流动的剪切速率(见图3)。代入步骤2所得参数，计算当前注入条件下流动剪切速率为 320s^{-1} ，式(6)各参数为： $c_1=52.3$ ， $c_2=0.96$ 。

[0102] 4. 将步骤3建立的剪切速率模型引入步骤1建立的稠化酸流变模型可以计算特定注入条件下酸液的表现粘度，带入式(7)可以计算紊流状态下的稠化酸对流换热系数。

[0103] 5. 将步骤4计算的对流换热系数带入步骤(4)所述模型中替换原有对流换热系数，建立稠化酸酸化井筒温度场模型。

[0104] 6. 基于步骤5建立的稠化酸酸化井筒温度场模型，模拟当前注入条件下井筒内酸液温度分布(见图4)。

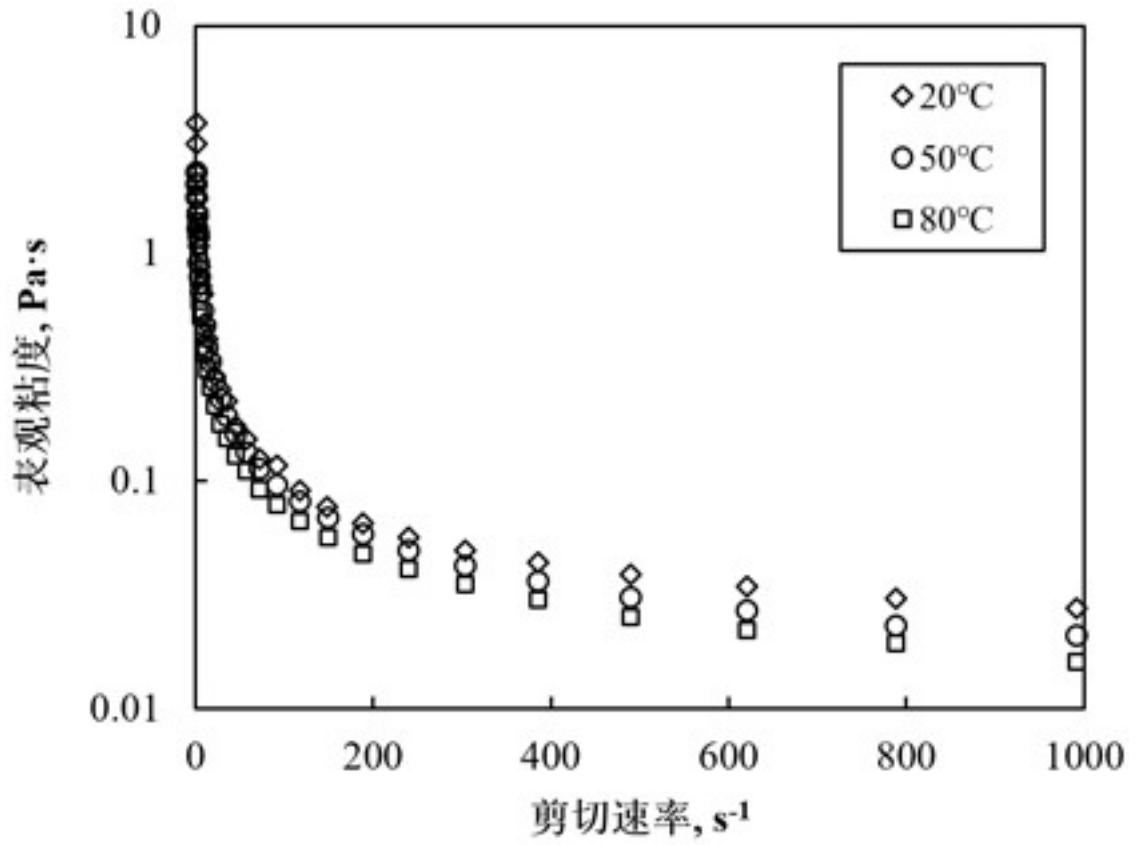


图1

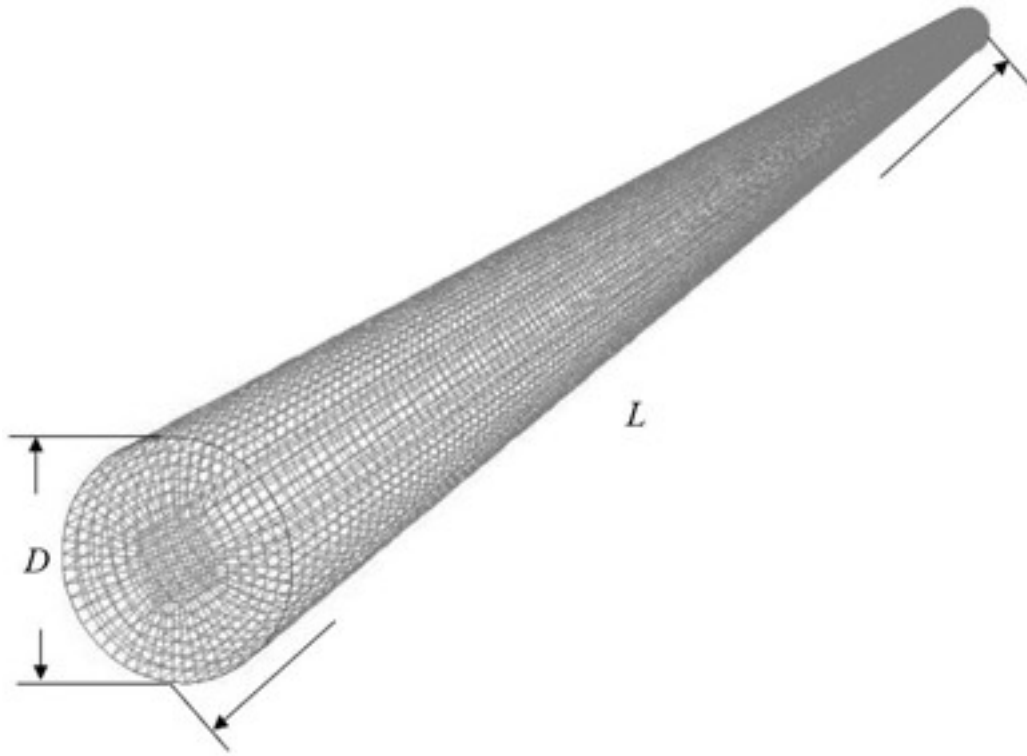


图2

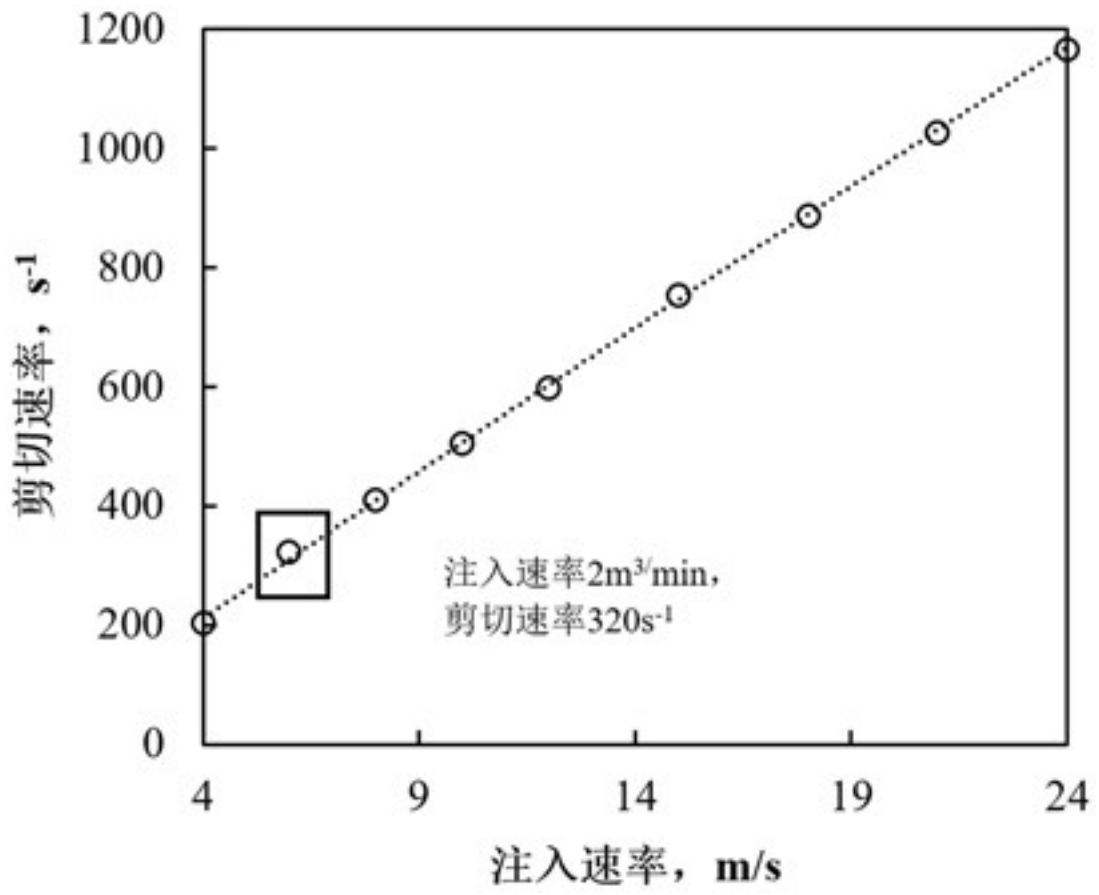


图3

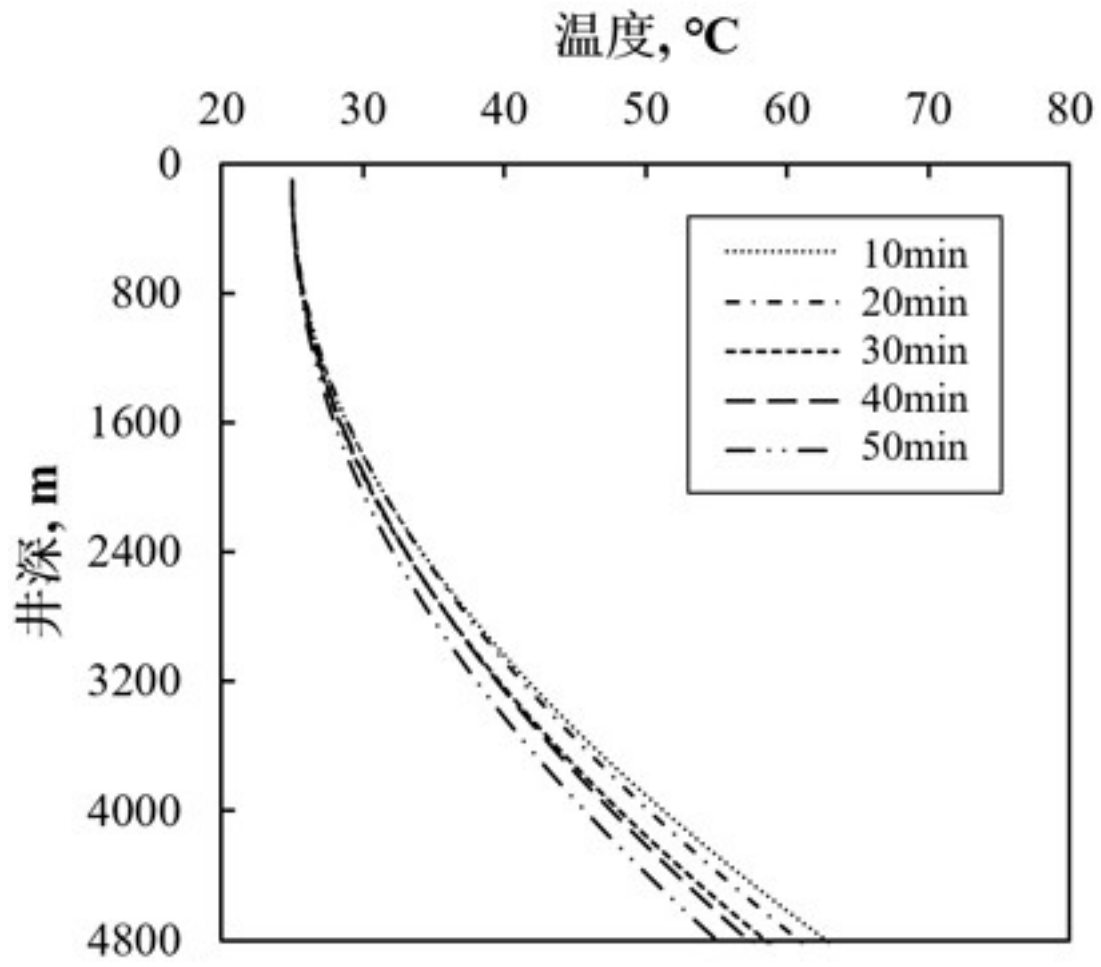


图4