

文章编号: 0253-2697(2015)02-0203-07 DOI:10. 7623/syxb201502009

超临界二氧化碳压裂井筒非稳态温度-压力耦合模型

郭建春¹ 曾 冀²

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 四川成都 610500; 2. 中国石油西南油气田公司采气工程研究院 四川广汉 618300)

摘要:井筒内温度、压力对二氧化碳物性参数影响较大,且三者之间相互影响,需进行耦合求解。基于连续性方程、运动方程、能量守恒定律和传热学理论,建立了超临界二氧化碳压裂井筒非稳态温度-压力耦合模型。采用交错网格全隐式离散模型,并调用 Ref-prop 软件计算二氧化碳物性参数,采用循环迭代求解。计算结果表明:在目前施工条件下井底二氧化碳能达到超临界状态;井口二氧化碳注入温度对井筒温度影响明显,而对井筒压力影响较弱;二氧化碳注入压力和油管粗糙度对井筒压力影响较大,而对井筒温度影响较弱;二氧化碳注入排量对井筒温度、压力均有明显影响。二氧化碳的高摩阻和低黏度分别限制了施工排量和砂比的提升,因此需进一步加强流体减阻和增稠方面的研究。

关键词:超临界二氧化碳;压裂;非稳态;井筒;温度;压力;耦合

中图分类号:TE357.2 文献标识码:A

A coupling model for wellbore transient temperature and pressure of fracturing with supercritical carbon dioxide

Guo Jianchun¹ Zeng Ji²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China; 2. Gas Production Engineering Research Institute, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Sichuan Guanghan 618300, China)

Abstract: Wellbore temperature and pressure have a great impact on the physical parameters of carbon dioxide, and these three factors interact with each other, which requires coupled solution. Based on continuity equation, motion equation, law of conservation of energy and heat transfer theory, a coupling model for wellbore transient temperature and pressure of fracturing with supercritical carbon dioxide was built. The model was discretized by staggered-grid fully implicit format; the REFPROP software was used to compute the physical parameters of carbon dioxide; and the coupled solution was made using loop iteration algorithm. The computation result shows that the down-hole carbon dioxide can reach supercritical state under the present operation condition; the injected temperature exerts a significant influence on wellbore temperature, and weak influence on the wellbore pressure; the injected pressure and tubing roughness have great effect on wellbore pressure, and weak effect on wellbore temperature. The injection rate has impacts on both wellbore temperature and pressure obviously. The high friction and low viscosity of carbon dioxide limit the increase in injection rate and sand ratio respectively, and thus studies on fluid friction reduction and fluid thickening should be further enhanced.

Key words: supercritical carbon dioxide; fracturing; transient; wellbore; temperature; pressure; coupling

引用:郭建春,曾冀.超临界二氧化碳压裂井筒非稳态温度-压力耦合模型[J].石油学报,2015,36(2):203-209.

Cite:Guo Jianchun,Zeng Ji. A coupling model for wellbore transient temperature and pressure of fracturing with supercritical carbon dioxide[J]. Acta Petrolei Sinica,2015,36(2):203-209.

随着页岩气勘探开发的深入,压裂技术得到更加广泛的应用,水力压裂对水过度依赖的弊端也日益凸显,因而无水压裂技术方兴未艾^[1-8]。目前无水压裂技术主要包括液态二氧化碳压裂、氮气压裂、二氧化碳/氮气压裂和 LPG 压裂等。这些压裂工艺各有其优点和局限性,沈忠厚在研究超临界二氧化碳流体性质及

其在钻井应用的基础上,提出使用超临界二氧化碳进行压裂^[9,10];日本学者通过室内实验证明使用超临界二氧化碳压裂较液态二氧化碳压裂具有更低的破裂压力和更大的壁面粗糙度,且更易形成多分支缝^[11]。

超临界二氧化碳是指温度、压力均高于其临界点(31.06℃、7.38 MPa)时的二氧化碳,处于超临界状态

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51374178)和四川省青年科技创新研究团队资助计划项目(2011JTD0018)资助。

第一作者:郭建春,男,1970年9月生,1992年获西南石油学院学士学位,1998年获西南石油学院博士学位,现为西南石油大学石油与天然气工程学院院长、教授、博士生导师,主要从事油气藏开采和增产技术方面的研究和教学。Email:guojianchun@vip.163.com

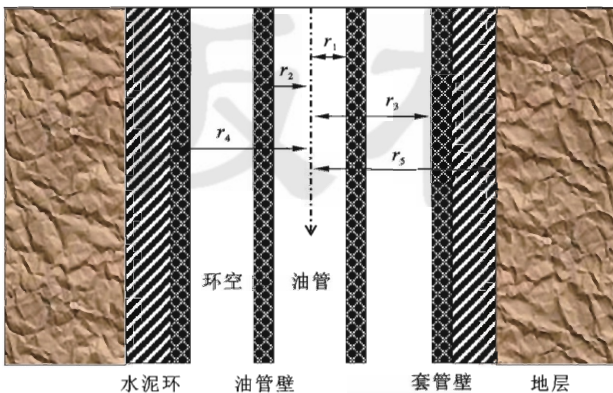
通信作者:曾 冀,男,1988年5月生,2011年获西南石油大学学士学位,2014年获西南石油大学硕士学位,现为中国石油西南油气田公司采气工程研究院助理工程师,主要从事油气藏增产改造方面的研究。Email:zengjideha@126.com

的二氧化碳具有独特的物理化学性质,其密度接近于液体,黏度和扩散系数接近于气体,且具有很强的流动性和传质性^[12]。目前针对超临界二氧化碳压裂进行系统研究的公开文献不多,部分学者仅针对相关课题进行探索研究^[13-15],笔者在大量文献调研的基础上,针对压裂过程井筒温度、压力分布规律进行研究,以期拓展超临界二氧化碳压裂的研究领域。

1 物理模型

国内外学者将井筒传热状态的研究方法大致分为半稳态和非稳态^[16],半稳态将井筒内传热处理为稳态传热,地层传热为非稳态传热^[17];非稳态传热则是将井筒和地层传热都视为非稳态处理^[18-20]。前者多以 Ramey 模型为基础,后者多以 Raymond 模型为基础。根据温度、压力计算关系又可分为非耦合和耦合两类,前者将温度、压力分开计算,后者考虑了温度、压力间的相互影响。目前广泛使用的压裂井筒非稳态传热模型是基于 Eickmeier 模型改进而来^[21],其较好地解决了 Ramey 等模型不适用于短期非稳态过程的问题,但却不能描述超临界二氧化碳压裂时温度、压力及物性参数间相互影响的问题,故此类非耦合常物性模型不能准确描述这一物理过程。因此,笔者基于连续性方程、运动方程和能量守恒定律,并调用不同温度、压力下二氧化碳对应的各物性参数,建立了超临界二氧化碳压裂井筒变物性非稳态温度-压力耦合模型。

模型假设各传热介质以油管中心呈轴对称分布,且各传热介质热物性参数各向同性,建立如图 1 所示的物理模型。并考虑二氧化碳从油管注入,环空为静止流体。由于二氧化碳临界压力远远小于压裂作业施工压力,故其相变焓为零,即从液态二氧化碳转变为超临界态二氧化碳无潜热。



注: r_1 为油管半径, m ; r_2 为油管外半径, m ; r_3 为套管内半径, m ; r_4 为套管外半径, m ; r_5 为水泥环外半径, m 。

图 1 井筒传热剖面

Fig. 1 Wellbore heat transfer profile

2 数学模型

2.1 基本假设

模型基本假设:①注液前,井筒内流体与地层达到热平衡;②油管同一截面处温度、压力、流速相同;③地面泵注排量和温度恒定;④地表 $z = z_0$ 处以上为恒温带, $z = z_0$ 以下地层温度随深度呈线性变化;⑤忽略环空流体的热辐射传热。

2.2 井筒温度-压力耦合模型

2.2.1 传热模型

(1) 油管内传热模型

油管内流体控制单元热量由 3 部分构成:①轴向上由于流体流动带入和带出的净热量;②径向上流体和油管壁面对流换热产生的热量;③流体和壁面摩擦形成的内热源。由能量守恒定律可得,单位时间内控制体内流入的热量与流出的热量之差等于控制体内能的增加量。

$$\frac{Q_m}{\pi r_1^2} - \frac{\partial(\rho_1 v_1 c_1 T_1)}{\partial z} + \frac{2h_1(T_2 - T_1)}{r_1} = \frac{\partial(\rho_1 c_1 T_1)}{\partial t} \quad (1)$$

式中: Q_m 为油管内单位长度产生的热量, W/m ; ρ_1 为二氧化碳密度, kg/m^3 ; v_1 为二氧化碳流速, m/s ; c_1 为二氧化碳比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; T_1 为二氧化碳温度, $^\circ C$; T_2 为油管壁温度, $^\circ C$; h_1 为油管内壁对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; z 为深度, m ; t 为时间, s 。

(2) 油管壁传热模型

根据能量守恒定律可得:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) + \frac{2r_2 h_2 (T_3 - T_2)}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{2r_1 h_1 (T_2 - T_1)}{r_2^2 - r_1^2} = \frac{\partial(\rho_2 c_2 T_2)}{\partial t} \quad (2)$$

式中: T_3 为环空流体温度, $^\circ C$; h_2 为油管外壁对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; ρ_2 为油管密度, kg/m^3 ; c_2 为油管比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; λ_2 为油管导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

(3) 环空传热模型

环空内控制体单元主要考虑径向自然对流产生的热量:

$$\frac{2r_3 h_3 (T_4 - T_3)}{r_3^2 - r_2^2} - \frac{2r_2 h_2 (T_3 - T_2)}{r_3^2 - r_2^2} = \frac{\partial(\rho_3 c_3 T_3)}{\partial t} \quad (3)$$

式中: T_4 为套管温度, $^\circ C$; h_3 为套管内壁对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; ρ_3 为环空流体密度, kg/m^3 ; c_3 为环空流体比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

(4) 复合层传热模型

在套管、水泥环及地层中的传热方式为纯导热,因此可构成复合圆筒导热系统,整理能量守恒方程可导出其传热方程为:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(\lambda_i r_i \frac{\partial T_i}{\partial r_i} \right) = \frac{\partial(\rho_i c_i T_i)}{\partial t}, \quad 4 \leq i \leq N-1 \quad (4)$$

式中: λ_i 为不同位置导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; T_i 为不同位置温度, $^\circ C$; r_i 为不同位置半径, m ; ρ_i 为不同位置流体密度, kg/m^3 ; c_i 为不同位置流体比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; N 为径向划分最大单元数; $i=4$ 时为套管, $i=5$ 时为水泥环, $i \geq 6$ 时为地层。

在套管内壁界面处, 套管壁与环空流体对流换热热量等于套管壁的导热热量, 即:

$$-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big|_{r=r_3} = h_3 (T_4 - T_3) \quad (5)$$

此外, 在不同导热介质界面处, 导入的热量与导出的热量相等, 即:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial r} \Big|_{r=r_i} \quad (6)$$

若采用套管注入方式, 则去掉油管壁及环空传热模型, 将套管内传热介质看作整体, 并套用油管传热模型进行计算。

2.2.2 压降模型

由连续性方程和运动方程, 可得二氧化碳流体在油管中向下流动的压降公式为:

$$\frac{\partial p_1}{\partial z} = \rho_1 g - f \frac{\rho_1 v_1^2}{2d_1} - \frac{\partial(\rho_1 v_1^2)}{2\partial z} - \frac{\partial(p_1 v_1)}{\partial t} \quad (7)$$

式中: p_1 为油管内流体压力, MPa ; d_1 为油管内径, m ; g 为重力加速度, $g=9.8 m/s^2$; f 为摩擦阻力系数, 无因次。

2.2.3 相关参数

(1) 油管内对流换热系数

油管内流体与油管内壁换热为强制对流换热, 采用垂直圆管换热方法进行处理:

$$h_1 = \frac{0.027\lambda_1 Re^{0.8} Pr^n}{d_1} \quad (8)$$

式中: λ_1 为油管内流体导热率, $W/(m \cdot ^\circ C)$; n 为指数, 当流体被加热时, $n=0.4$, 当流体被冷却时, $n=0.3$; 雷诺数 Re 和普朗特数 Pr 的计算详见文献[22]。

(2) 环空对流换热系数

采用 Dropkin 和 Sommerscales^[23] 关于垂直平板间自然对流换热系数计算方法作近似处理:

$$h_2 = \frac{0.049(GrPr)^{1/3} Pr^{0.074} \lambda_3}{r_2 \ln(r_3/r_2)} \quad (9)$$

式中: λ_3 为环空流体导热率, $W/(m \cdot ^\circ C)$; 格拉晓夫数 Gr 的计算详见文献[22]。

(3) 二氧化碳物性参数

目前计算二氧化碳物性参数的方法主要是基于立

方定律和亥姆霍兹自由能计算, 但这些方法计算结果较实验测定值有一定的误差, 因此笔者采用由美国国家标准技术研究所(NIST)研制开发的 Refprop 软件进行物性参数计算。

(4) 摩擦热源

根据摩擦力做功及摩擦阻压降的表达式, 化简可得:

$$Q_m = \Delta p_f \cdot q \quad (10)$$

式中: Δp_f 为摩擦压降梯度, Pa/m ; q 为体积流量, m^3/s 。

(5) 摩擦系数

根据 Chen^[24] 提出的适用于所有雷诺数和粗糙度的显式摩擦系数计算公式:

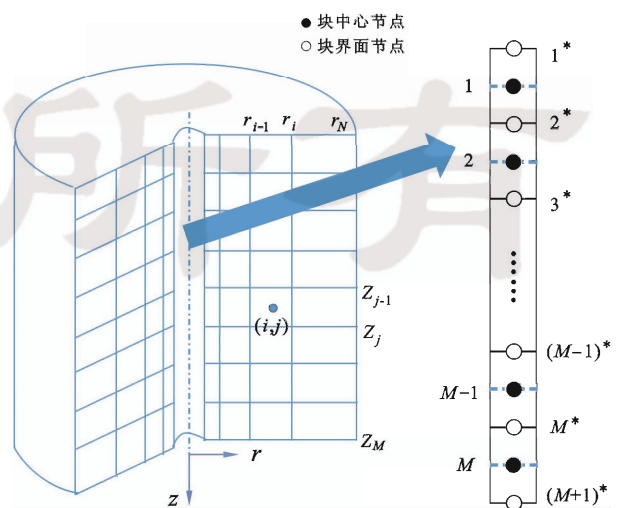
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left[\frac{R_a/d}{3.7065} - \frac{5.0452}{Re} \lg \left(\frac{(R_a/d)^{1.1098}}{2.8257} + \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right) \right] \quad (11)$$

式中, R_a 为油管内壁平均粗糙度, m 。

2.3 模型求解方法

非稳态温度-压力耦合模型涉及连续性方程、动量方程和能量守恒方程, 精确求解需采用温度和压力双重迭代的数值算法同时求解这 3 个守恒方程。由于二氧化碳流体的热物性参数是随着温度、压力不断变化的, 同时计算环空对流换热系数也需耦合环空两侧温度, 此外, 考虑介质垂向导热将某一节点温度与相邻 4 个节点温度相关联, 这增加了迭代求解的复杂性。

对模型进行相应的网格划分(图 2), 为准确耦合温度、压力, 对油管单元离散时采用交错网格的全隐式离散格式, 即将温度节点和压力节点布置于控制体中心, 速度节点布置与控制体界面处, 对微分方程中空间项进行中间差分, 时间项进行向前差分。由于温度、压



注: M 为垂向划分最大单元数; 上标“*”为界面处节点。

图 2 网格单元划分

Fig. 2 Grid cell division

力、物性参数和传热系数等相互耦合且彼此影响,每一时间步都需上一时间步计算结果作为初始条件,因此通过不断循环迭代求解温度、压力、二氧化碳物性参数及环空自然对流换热系数,直至得到该时间步下的收敛解。

3 模型影响因素

由于缺乏超临界二氧化碳压裂的井底温度、压力监测数据,因此笔者按照实际施工情况,抽提出表1所示的基础参数进行计算分析。

从图3可以看出,在整个施工过程中,由于井口泵注的低温液态二氧化碳不断冷却地层,因此井底温度持续降低,但终保持在二氧化碳临界温度之上;由于二氧化碳临界压力较低,因此在整个施工过程中井底压力也始终保持在其临界压力之上,即泵注到井底的二氧化碳始终能达到超临界状态。

从图4可以看出,随着时间推移,井筒内温度会逐渐减低,而压力在施工开始时出现陡降,后随时间逐渐增加;同一时刻,随着纵向深度增加,温度、压力随时间变化也越明显。由于二氧化碳在油管内以较快的速度流动,产生较流体自重更大的沿程摩阻,故表现出从井

口到井底压力呈递减分布的现象。从井口到井底,二氧化碳流体流速增加,因此摩阻梯度随深度逐渐增大;随着井口低温流体的不断注入,井筒内温度降低,使得

表1 模拟基础参数

Table 1 Basic data of simulation

名称	数值	名称	数值
储层中深/m	3500	恒温点温度/°C	20
恒温点深度/m	20	地温梯度/(°C·km ⁻¹)	30
施工排量/(m ³ ·min ⁻¹)	3	注入温度/°C	0
注入压力/MPa	60	油管内壁粗糙度/ μm	24.5
施工时间/min	120	油管外径/mm	76
油管外径/mm	89	套管内径/mm	157.8
套管外径/mm	177.8	水泥环外径/mm	237.8
内径等比因子/无因次	1.6	油管比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	460.5
环空流体比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	4186.8	套管比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	460.5
水泥环比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	879.2	地层比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1040
油管导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	44.7	环空导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.6
套管导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	44.7	水泥环导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.1
地层导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2	油管密度/(kg·m ⁻³)	7800
环空流体密度/(kg·m ⁻³)	1000	套管密度/(kg·m ⁻³)	7800
水泥环密度/(kg·m ⁻³)	1900	地层密度/(kg·m ⁻³)	2600

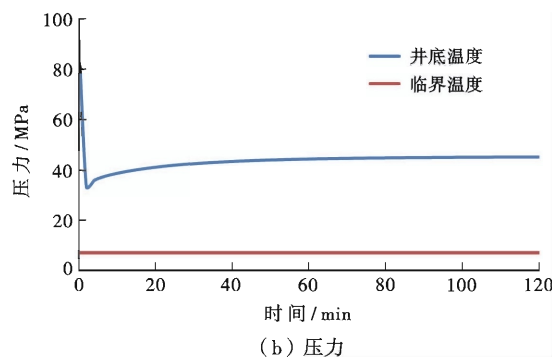
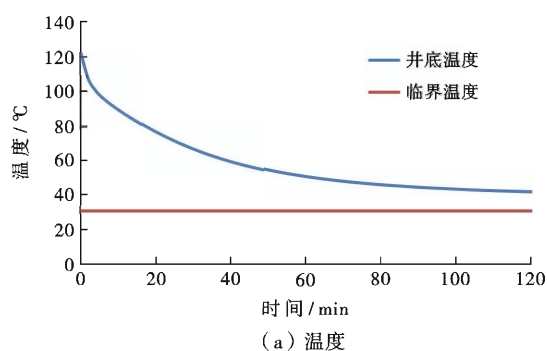


图3 井底参数随时间变化

Fig. 3 Variation of downhole parameters with time

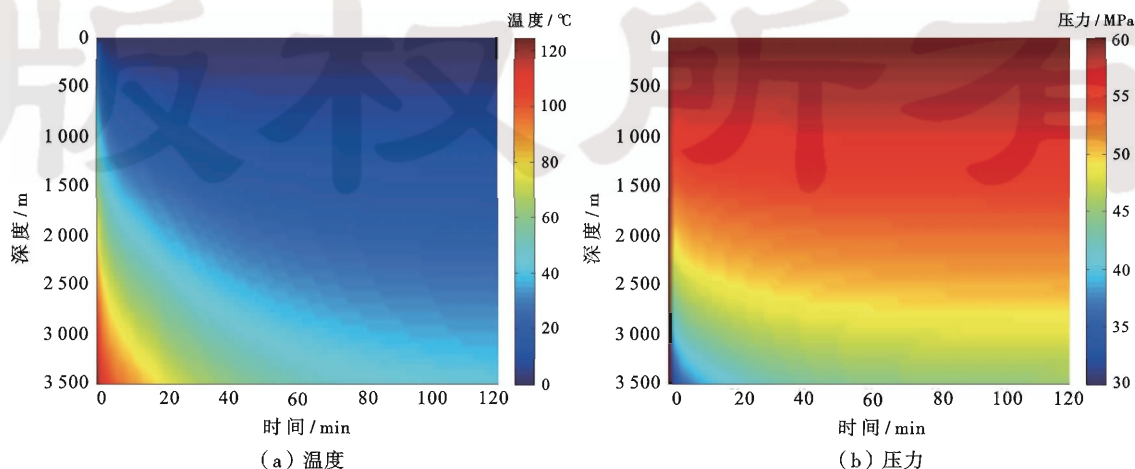


图4 井筒温度、压力分布

Fig. 4 Temperature and pressure distribution of wellbore

流体密度逐渐增大,一方面流体自重增大,另一方面摩擦阻梯度也相对减小,因此井筒内压力表现出随时间逐渐增大的现象。值得一提的是,井筒内压力随时间的变化幅度较温度随时间变化幅度明显更小,但这并不能说明温度、压力分开计算是可行的,仅能说明压力稳定较热力稳定更易达到^[25]。

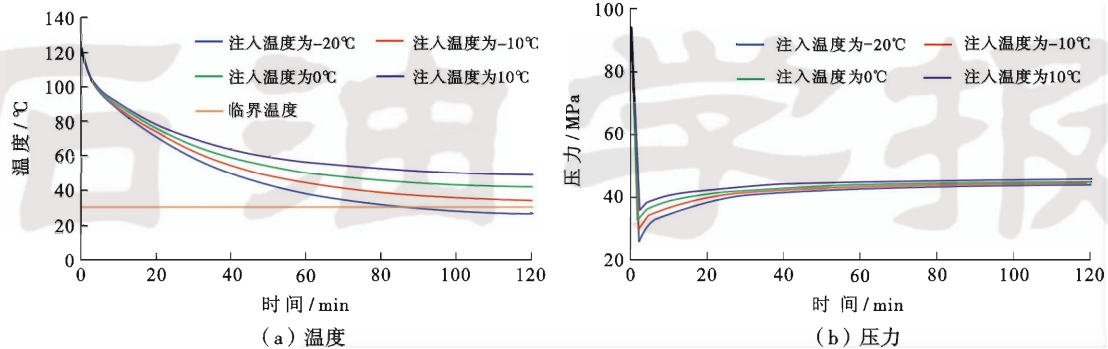


图 5 不同注入温度下井底参数变化

Fig. 5 Variation of downhole parameters under different injection temperature

从图 6 可以看出,注入压力越高,井底温度和压力越高,但井底温度在不同注入压力下变化幅度相对较小。一方面,注入压力增大导致二氧化碳密度和黏度增加,但相应增大的摩擦梯度与井口注入端压力增加

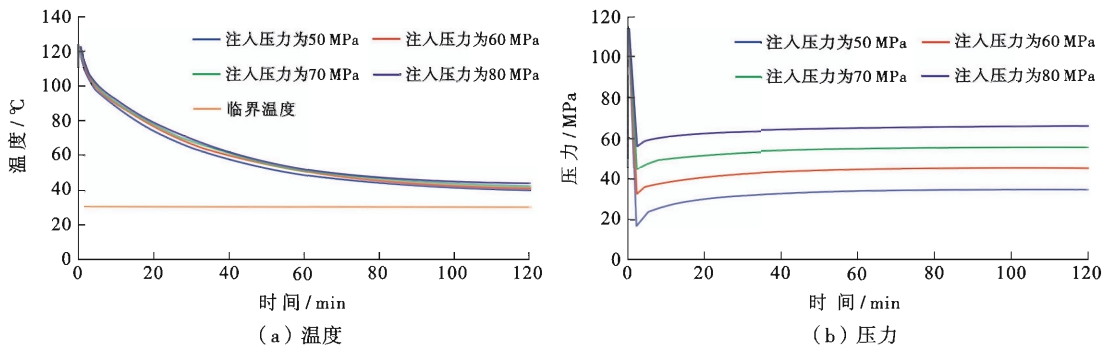


图 6 不同注入压力下井底参数变化

Fig. 6 Variation of downhole parameters under different injection pressure

从图 7 可以看出,注入排量越大,井底压力越低,但温度却呈现出先减小后增加的趋势,且温度和压力的变化幅度都较明显。值得注意的是,随着排量的增加,摩擦阻梯度迅速增大,从而导致井筒压力的大幅降低;同时,二氧化碳流体的机械能通过摩擦力做功的方式转换为内能的量,则随排量增大而显著增多,使得流体温度升高,因而出现 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ 排量下井底温度反而比 $2 \text{ m}^3/\text{min}$ 和 $3 \text{ m}^3/\text{min}$ 排量下井底温度更高的“反常”情况。基于上述分析,还可得出除非在较低注入排量下,否则忽略摩擦生热项是极其不合理的。

从图 8 可以看出,油管粗糙度越大,井底温度越高,井底压力越低,但井底温度在不同油管粗糙度下变

从图 5 可以看出,注入温度越低,井底温度和压力越高,井底压力在不同注入温度下变化幅度相对较小。通过改变井口注入温度,可改变二氧化碳流体到达井底的状态;注入温度越低,其密度和摩擦阻梯度都相应较大,两种因素共同作用导致不同注入温度下的井底压力差异随时间逐渐减小。

值相比较小,因此表现出不同注入压力下,井底压力差异维持相对稳定的现象;另一方面,增大的摩擦梯度导致摩擦生热增多,使得井筒温度升高,但其增加幅度较弱,几乎可以忽略。

化幅度相对较小。油管粗糙度可改变摩擦阻梯度,从而影响井筒温度、压力分布。结合之前分析可看出,通过影响沿程摩擦进而影响摩擦生热项,其对井筒压力的影响远大于对温度的影响。

二氧化碳的高摩擦极大地限制了施工排量的提升;同时,其低黏度还引起高滤失量和低携砂能力,这对压裂施工都是不利的。但低黏流体有利于沟通天然裂缝和层理,从而形成复杂的裂缝网络。因此需进行二氧化碳减阻及增稠方面研究^[26],以增强聚合物分子在二氧化碳流体中的溶解量或合成新型增稠剂以增高其黏度,并在此基础上进行二氧化碳流体变黏的研究以增强造缝的复杂程度。

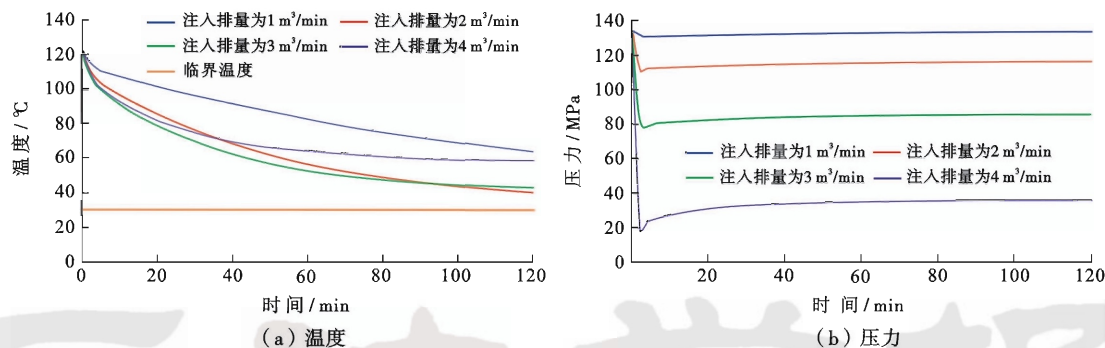


图7 不同注入排量下井底参数变化

Fig. 7 Variation of downhole parameters under different injection rate

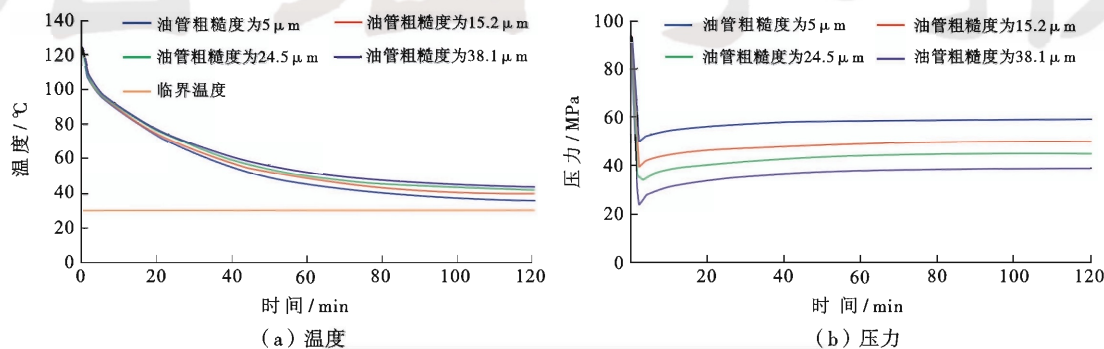


图8 不同油管粗糙度下井底参数变化

Fig. 8 Variation of downhole parameters under different tubing roughness

4 结论

(1) 由于井筒温度、压力和二氧化碳流体物性参数相互影响,超临界二氧化碳压裂井井筒非稳态传热耦合模型能更好地描述超临界二氧化碳压裂过程,提高井筒温度、压力分布预测精度。

(2) 二氧化碳临界压力远低于施工压力,因此在现场施工允许条件下,可适当调节对井底温度影响较大的注入温度和注入排量,使二氧化碳在井底达到超临界状态。

(3) 注超临界二氧化碳压裂井除非在异常低排量的情况下,否则忽略摩擦生热项是极其不合理的。

(4) 二氧化碳的高摩阻和低黏度分别限制了施工排量和砂比的提升,因此需进一步加强二氧化碳流体减阻和增稠方面的研究。

参考文献

- [1] 王永辉,卢拥军,李永平,等.非常规储层压裂改造技术进展及应用[J].石油学报,2012,33(增刊1):149-158.
Wang Yonghui, Lu Yongjun, Li Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Supplement 1): 149-158.
- [2] 唐颖,唐玄,王广源,等.页岩气开发水力压裂技术综述[J].地质

通报,2011,30(2):393-399.

Tang Ying, Tang Xuan, Wang Guangyuan, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 393-399.

- [3] Leblanc D P, Martel T, Graves D G, et al. Application of propane (LPG) based hydraulic fracturing in the McCully gas field, New Brunswick, Canada [R]. SPE 144093, 2011.
- [4] Campbell S M, Fairchild Jr. N R, Arnold D L. Liquid CO₂ and sand stimulations in the Lewis shale, San Juan Basin, New Mexico; a case study [R]. SPE 60317, 2000.
- [5] Stidham J E, Tetrick L T, Glenn S A. Nitrogen coiled-tubing fracturing in the Appalachian Basin [R]. SPE 72382, 2001.
- [6] Gottschling J C, Royce T N. Nitrogen gas and sand; a new technique for stimulation of Devonian shale [J]. Journal of Petroleum Technology, 1985, 37(5): 901-907.
- [7] 侯磊,孙宝江,李云,等.非常规油气开发对压裂设备和材料发展的影响[J].天然气工业,2013,33(12):105-110.
Hou Lei, Sun Baojiang, Li Yun, et al. Impact of unconventional oil and gas exploitation on fracturing equipment and materials development [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 105-110.
- [8] Hou Xiangqian, Lu Yongjun, Fang Bo, et al. Waterless fracturing fluid with low carbon hydrocarbon as base fluid for unconventional reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 646-650.
- [9] 王海柱,沈忠厚,李根生.超临界 CO₂ 开发页岩气技术 [J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 30-35.

- Wang Haizhu, Shen Zhonghou, Li Gensheng. Feasibility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO₂ [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 30-35.
- [10] 沈忠厚, 王海柱, 李根生. 超临界 CO₂ 连续油管钻井可行性分析 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 743-747.
- Shen Zhonghou, Wang Haizhu, Li Gensheng. Feasibility analysis of coiled tubing drilling with supercritical carbon dioxide [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 743-747.
- [11] Ishida T, Aoyagi K, Niwa T, et al. Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing laboratory experiment with supercritical and liquid CO₂ [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(16): 1-6.
- [12] 韩布兴. 超临界流体科学与技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2005.
- Han Buxing. Science and technology of supercritical fluid [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005.
- [13] 程宇雄, 李根生, 沈忠厚, 等. 超临界二氧化碳射流冲击压力参数影响规律 [J]. 石油学报, 2014, 35(4): 765-770.
- Cheng Yuxiong, Li Gensheng, Shen Zhonghou, et al. Impact pressure and parametric sensitivity analysis of supercritical CO₂ jet [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 765-770.
- [14] 程宇雄, 李根生, 王海柱, 等. 超临界 CO₂ 喷射压裂孔内增压机理 [J]. 石油学报, 2013, 34(3): 550-555.
- Cheng Yuxiong, Li Gensheng, Wang Haizhu, et al. Pressure boost mechanism within cavity of the supercritical CO₂ jet fracturing [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 550-555.
- [15] Brown D W. A hot dry rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water: proceedings of Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, January 24-26, 2000 [C]. Stanford, Stanford University, 2000.
- [16] 宋洵成, 管志川. 深水钻井井筒全瞬态传热特征 [J]. 石油学报, 2011, 32(4): 704-708.
- Song Xuncheng, Guan Zhichuan. Full transient analysis of heat transfer during drilling fluid circulation in deep water wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 704-708.
- [17] Ramey Jr. H J. Wellbore heat transmission [J]. Journal of Petroleum Technology, 1962, 14(4): 427-435.
- [18] Raymond L R. Temperature distribution in a circulating drilling fluid [J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(3): 333-341.
- [19] Wooley G R. Computing downhole temperatures in circulation, injection, and production wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1980, 32(9): 1509-1522.
- [20] Beirute R M. A circulating and shut-in well-temperature-profile simulator [J]. Journal of Petroleum Technology, 1991, 43(9): 1140-1146.
- [21] 王鸿勋, 张士诚. 水力压裂设计数值计算方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- Wang Hongxun, Zhang Shicheng. Hydraulic fracturing design numerical calculation method [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [22] 李万平. 计算流体力学 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- Li Wanping. Computational fluid dynamics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004.
- [23] Dropkin D, Somerscales E. Heat transfer by natural convection in liquids confined by two parallel plates which are inclined at various angles with respect to the horizontal [J]. Journal of Heat Transfer, 1965, 87(1): 77-82.
- [24] Chen N H. An explicit equation for friction factor in pipe [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1979, 18(3): 296-297.
- [25] 廖新维, 刘立明. 对气井井筒压力温度分析的新认识 [J]. 天然气工业, 2003, 23(6): 86-87.
- Liao Xinwei, Liu Liming. New idea for borehole pressure and temperature analysis of gas wells [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(6): 86-87.
- [26] Xu Jianhang, Wlaschin A, Enick R M. Thickening carbon dioxide with the fluoroacrylate-styrene copolymer [J]. SPE Journal, 2003, 8(2): 85-91.

(收稿日期 2014-07-13 改回日期 2014-10-21 编辑 王培玺)

版权所有