文章编号:1673-5005(2014)04-0081-06

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.04.011

超临界二氧化碳喷射压裂孔内流场特性

程宇雄,李根生,王海柱,沈忠厚,田守嶒,蔡承政

(中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京102249)

摘要:为了证实利用超临界二氧化碳(CO₂)流体进行喷射压裂的可行性,利用 Span-Wagner 气体状态方程建立超临界 CO₂ 流场的计算流体力学模型,模拟超临界 CO₂ 喷射压裂过程中的孔内流场。结果表明:在喷嘴压降相同的条件下,与水射流相比,超临界 CO₂ 射流的射流速度更高,射流核心区更长;超临界 CO₂ 喷射压裂具有比水力喷射压裂更强的射流增压效果,更容易压开地层;超临界 CO₂ 射流具有显著的焦耳-汤姆逊效应,会导致温度下降,在压裂施工中应合理控制喷嘴压降,以防发生冰堵事故;超临界 CO₂ 的密度主要受压力影响,通过调节压力就能有效控制,可适应不同的地层温度条件。

关键词:超临界二氧化碳;射流;压裂;流场;数值模拟

中图分类号:TE 357 文献标志码:A

引用格式:程宇雄,李根生,王海柱,等. 超临界二氧化碳喷射压裂孔内流场特性[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(4):81-86.

CHENG Yuxiong, LI Gensheng, WANG Haizhu, et al. Flow field character in cavity during supercritical carbon dioxide jet fracturing[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 81-86.

Flow field character in cavity during supercritical carbon dioxide jet fracturing

CHENG Yuxiong, LI Gensheng, WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, TIAN Shouceng, CAI Chengzheng

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: To verify the feasibility of supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) jet fracturing, a computational fluid dynamic model was established based on Span-Wagner state equation to simulate the flow field in the cavity during SC-CO₂ jet fracturing. The results show that in comparison with water jet, the SC-CO₂ jet has higher jet energy and experiences less energy attenuation. It also has higher pressure boosting effect than water jet fracturing. Joule-Thomson effect can happen during SC-CO₂ jet and lead to temperature decrease. Therefore nozzle pressure drop should be reasonably controlled during the jet fracturing process to avoid ice block. The density of SC-CO₂ is mainly influenced by pressure instead of temperature. So it can be controlled by adjusting pressure for it to work under different formation temperatures.

Key words: supercritical carbon dioxide; jet; fracturing; flow field; numerical simulation

水力压裂技术是非常规油气藏开采的重要手段^[1-2],但也面临水资源消耗量大、污染环境、黏土膨胀等许多难题^[3-5]。20世纪末科研人员已将超临界CO₂流体应用到钻完井工程中^[6-8]。超临界CO₂流体不仅破岩门限压力低、渗透能力强,不会造成储层

伤害和环境污染,还能置换出吸附态天然气^[7,9-10],因此非常适合用于喷射压裂,成为非常规油气资源 高效开发的有效手段。超临界 CO₂ 喷射压裂的技 术原理与水力喷射压裂类似,首先将液态 CO₂ 通过 连续油管泵入井下,在井下高温高压条件下 CO₂ 转

收稿日期:2013-08-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51034007);国家自然科学基金重大国际(地区)合作项目(51210006)

作者简介:程字雄(1987-),男,博士研究生,主要从事超临界二氧化碳射流与钻完井基础理论研究。E-mail:chengyuxiong@126.com。

通讯作者:李根生(1961-),男,教授,博士生导师,主要从事钻完井和压裂研究。E-mail:ligs@ cup. edu. cn。

变为超临界态;然后提高油管压力并保持环空敞开, 以形成超临界 CO₂ 射流进行射孔;形成孔眼后,射 流继续冲击喷射孔眼,形成孔内增压;再向环空泵入 液态 CO₂,以增加环空压力,使地层起裂。国内外学 者已对水力喷射压裂的孔内流场进行了充分研究, 但关于超临界 CO₂ 喷射压裂孔眼内流场的研究并 未见文献报道。笔者模拟超临界 CO₂ 喷射压裂孔 内流场,揭示其流场特性,为该技术的研究和应用提 供理论依据。

1 计算流体力学模型

1.1 几何模型和边界条件

超临界 CO2 喷射压裂的孔内流场几何模型如 图 1 所示。该模型由喷嘴内部、环空及射孔孔眼 3 部分流场区域组成。其中,喷嘴为现场常用的直径 6 mm 的喷嘴,环空间距为 8 mm,套管孔径为 14 mm。地层孔眼形状为纺锤体,与文献[11]进行的 水力喷砂射孔试验中形成的孔眼形状一致。



图 1 流场几何模型 Fig. 1 Geometry model of flow field

在超临界 CO₂ 喷射射孔的过程中,提高油管压 力并保持环空敞开,超临界 CO₂ 流体经由喷嘴进入 环空和孔道,此时地层尚未起裂,流体将从环空返回 地面。因此,将喷嘴入口设为压力入口边界,压力值 等于喷嘴入口压力;将环空出口设为压力出口边界, 压力值等于环空压力;其他边界都设为壁面边界。

1.2 控制方程和计算流程

超临界 CO₂ 喷射压裂过程涉及到传热和压缩 性流体,因此除了要求解质量方程和动量方程以外, 还须求解能量方程^[12]。由于孔道内流场是在高速 剪切超临界 CO₂ 流体作用下形成的湍流流场,湍流 计算采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,忽略重力^[12]。

超临界 CO₂ 流体属于强可压缩流体,因此本文 中采用对此问题更有优势的耦合求解器^[13]。在超 临界 CO₂ 喷射压裂过程中,超临界 CO₂ 的压力和温 度会发生剧烈的变化,其物性参数会随压力和温度 变化,而物性参数的变化反过来又会引起温度场和 压力场的变化^[14]。为了实现这一过程的精确模拟, 计算模型必须将超临界 CO₂ 物性参数和压力场、温 度场进行耦合。由于现有的计算流体力学商业软件 无法单独完成这样的模拟,笔者编写了用于计算超 临界 CO₂ 流体物性参数的用户自定义函数(user defined function, UDF),并将其嵌入标准的计算流体力 学模型中^[15]。

计算流程如图 2 所示。在每一步迭代过程中,求 解器会耦合求解质量方程和动量方程,然后再依次求 解能量方程和湍流方程。在每次循环结束、检查收敛 性之前,都会根据之前求得的每个节点上的压力值和 温度值更新该节点的物性参数^[15]。这种将压力场、 温度场与超临界流体物性参数进行耦合计算的方法 可以精确模拟超临界流体的流场^[16]。



Fig. 2 Solution procedures

1.3 超临界 CO₂ 物性参数计算

采用基于亥姆霍兹自由能的 Span-Wagner 状态 方程计算超临界 CO₂ 流体的密度和比定压热容^[17]。 据文献报道,当温度和压力分别为 500 K 和 30 MPa 时,密度的计算误差能够控制在 0.03% ~0.05%, 比定压热容的计算误差控制在 0.15% ~1.50%,在 其他温度和压力条件下计算误差控制在 1.5% ~ 3.0%,计算精度远高于常用的 Pen-Robinson 状态方 程,因此该模型被美国国家标准和技术研究院 (NIST)推荐。

亥姆霍兹自由能 A 可由两个独立变量密度 ρ 和 温度 T 表示,即 $A=A(\rho,T)$,无因次的亥姆霍兹自由 能 $\Phi(\delta,\tau)=A(\rho,T)/(RT)$ 包括理想部分 $\Phi_o(\delta,\tau)$ 和残余部分 $\Phi_c(\delta,\tau)$,即

 $\Phi(\delta,\tau) = \Phi_{0}(\delta,\tau) + \Phi_{r}(\delta,\tau).$ (1) 其中

 $\delta = \rho / \rho_{\rm c}, \tau = T_{\rm c} / T.$

式中,R 为气体常数,R=0.1889 kJ/(kg·K); ρ_{e} 为临界密度,kg/m³; T_{e} 为临界温度,K。

采用数值算法求解 CO₂ 的密度,即 $p(\delta, \tau) = \rho R T (1 + \delta \Phi_{v\delta}).$ (2) 式中,p为压力, MPa; $\boldsymbol{\Phi}_{s}$ 为 $\boldsymbol{\Phi}_{r}$ 对 δ 的偏导。 CO, 比定压热容的解析解为

$$c_{p}(\delta,\tau) = R \left[-\tau^{2} (\Phi_{o\tau\tau} + \Phi_{\tau\tau\tau}) + \frac{(1+\delta \Phi_{\tau\delta} - \delta \tau \Phi_{\tau\delta\tau})^{2}}{1+2\delta \Phi_{\tau\delta} + \delta^{2} \Phi_{\tau\delta\tau}} \right].$$
(3)

式中, c_p 为比定压热容, $kJ/(kg \cdot K)$; $\boldsymbol{\Phi}_{orr}$ 、 $\boldsymbol{\Phi}_{rrr}$ 、 $\boldsymbol{\Phi}_{rorr}$ 、 $\boldsymbol{\Phi}_{rorr}$ 、 $\boldsymbol{\Phi}_{rorr}$ 、 $\boldsymbol{\Phi}_{rorr}$ 、 $\boldsymbol{\Phi}_{rorr}$ 、 $\boldsymbol{\Phi}_{rorr}$ 、

超临界 CO₂ 的黏度和导热系数采用 Fenghour 等^[18-19]的模型计算。该模型在中低压条件下计算 误差小于 0.3%,在高压条件下误差小于 5.0%,能 满足工程计算的要求,因此该模型也被 NIST 推荐。 该模型将黏度和导热系数分为独立的 3 部分,其通 用表达式为

 $X(\rho,T) = X_0(T) + \Delta X(\rho,T) + \Delta \eta_e X(\rho,T).$ (4) 式中, $X_0(T)$ 为零密度极限值; $\Delta X(\rho,T)$ 为密度增大 引起的附加值; $\Delta \eta_e(\rho,T)$ 为压力和温度在超临界附 近变化引起的增量。

由此得出 CO₂ 黏度表达式为

 $\mu(\rho,T) = \mu_0(T) + \Delta \mu(\rho,T) + \Delta \eta_o \mu(\rho,T).$ (5) CO₂ 导热系数表达式为 $\lambda(\rho,T) = \lambda_0(T) + \Delta \lambda(\rho,T) + \Delta \eta_o \lambda(\rho,T).$ (6) 以上参数计算方法详见文献[17-19]。

2 计算实例

由于超临界 CO₂ 喷射压裂相关研究较少,也无 现场数据,因此本文中参考了文献[20]中的水力喷 射压裂的压力参数。环空压力为 20 MPa,喷嘴压降 为 35 MPa,则喷嘴入口压力为 55 MPa,喷嘴直径为 6 mm,套管孔径为 14 mm。假设超临界 CO₂ 流体的 入口温度为 351 K。取地表温度为 297 K,压裂层位 井深 2.0 km,地热梯度为 0.027 K/m。

在相同条件下模拟了水力喷射压裂的孔内流 场,并将其与超临界 CO₂喷射压裂的孔内流场进行 对比。由于水的物性参数受温度和压力影响极小, 忽略其参数变化,采用温度为 351 K,压力为 25 MPa 条件下的值,即密度为 983.91 kg/m³,黏度为 37.1× 10⁻⁵ Pa · s,导热系数为 0.68 W/(m · K),比定压热 容为 4.144 kJ/(kg · K)。

3 结果分析

3.1 速度场

模拟对比了相同条件下超临界 CO₂ 喷射压裂 与水力喷射压裂的速度场,结果如图 3 所示。从速 度云图可以看出,两种流体经喷嘴加速,在喷嘴出口 处形成高速射流,通过套管孔眼中心冲击到地层孔 道中,然后从套管孔眼外围返回到环空中,最后从环 空返回地面。对比两者的高速射流区域可见,超临 界 CO₂ 射流的射流速度比水射流更高。而且,超临 界 CO₂ 射流的射流核心区域更长,一直延伸至孔道 内部,而水射流经过套管孔眼之后速度已经基本停 滞。这主要是由于超临界 CO₂ 流体具有高密度、低 黏度的特点,因此环境流体对高速射流的阻滞效应 小,高速射流的动能衰减小。



and hydraulic jet fracturing

根据射流理论,轴线射流速度是衡量水射流能量的重要标志。超临界 CO2 喷射压裂与水力喷射压裂的孔内轴线速度分布如图 4 所示。超临界 CO2 射流的最高射流速度为 263.4 m/s,比水射流高出 32.3%。另外,水射流的轴线速度在距喷嘴出口 21 mm 处就已经小于 10 m/s,而超临界 CO2 射流的轴 线速度在距喷嘴出口 67 mm 处才小于 10 m/s。可 见,与水射流相比,超临界 CO2 射流具有射流能量 高、能量衰减小的特性。



3.2 压力场

水力喷射压裂的突出特点是能够在环空压力低 于地层破裂压力的情况下利用射流增压原理提高地 层孔内压力,压开目标层,实现定点压裂^[20]。

射流增压机制的关键在于流体动能与压能的转 化,在计算流体力学中,流体压能用静压表征,流体 动能用动压 $\left(\frac{1}{2}\rho\nu^{2}\right)$ 表征,而流体静压与动压之和为 机械能,用流体总压表征^[21]。超临界 CO₂ 喷射压裂 过程中静压、动压、总压和速度在孔道轴线上的分布 如图 5 所示。当 CO, 流体经过喷嘴和环空的时候, 静压从 53.7 MPa 急剧降低到 20.8 MPa, 而动压提 高到 27.5 MPa,表明流体压能转化为动能。当高速 超临界 CO, 射流进入套管孔眼和地层孔道后,动压 开始下降,静压上升,表明动能转化为压能。最终, 当超临界 CO, 流体滞止于孔道中时, 动压降为0, 总 压曲线和静压曲线重合,其值被称为滞止压力 (39.9 MPa),滞止压力高于环空压力,两者之差即 为射流增压值(19.9 MPa)。可见,利用超临界 CO, 流体进行喷射压裂具有显著的射流增压效果,可以 在环空压力低于地层起裂压力的条件下压开地层。



同时从图 5 还可以看出,在动压和静压相互转换的过程中,总压发生了明显的下降,说明在此过程中超临界 CO₂ 流体由于克服摩擦力做功机械能发生了损失。因此,超临界 CO₂ 流体在流动中克服摩擦力做功会影响滞止压力,克服摩擦力做功越小,滞止压力越大,射流增压效果越强。

图 6 为相同参数条件下超临界 CO₂ 喷射压裂 和水力喷射压裂的孔内轴线压力的分布。在本模拟 条件下,超临界 CO₂ 喷射压裂的增压值为 19.9 MPa,比相同条件下水射流的增压值高 3.0 MPa。这

是因为在喷射压裂的温度和压力条件下,超临界 CO₂流体的黏度远低于水的黏度,使摩擦力做功更 小,增压效果更强。



为了探明流体黏度对射流流场的速度与压力分 布的影响,模拟了4种假想流体的射流流场,4种流 体的密度相同(800 kg/m³),黏度不同((5~40)×10⁻⁵ Pa·s),得到流体黏度对射流增压值与最高射流速度 的影响,如图7所示。在相同的喷嘴压降条件下,射 流增压值和最高射流速度都随着流体黏度的提高而 降低,这表明流体黏度越高,射流能量(压能、动能)损 失越大,造成射流增压值和最高射流速度减小。



3.3 温度场

CO₂ 流体的温度是决定其所处相态以及物性参数的重要参数,关系到超临界 CO₂ 喷射压裂施工的安全性。超临界 CO₂ 喷射压裂过程中孔内的温度场模拟结果如图 8 所示。超临界 CO₂ 流体的入口温度为 351 K,经过喷嘴时流体温度显著下降,环空中流体温度低于流体入口温度,最低温度为 324.5

K,降温幅度达到了 26.5 K。这是因为超临界 CO₂ 是一种强可压缩流体,当高速大排量的超临界 CO₂ 流体通过喷嘴时会发生节流,产生显著的焦耳-汤 姆逊效应,导致温度下降^[9]。



图 8 超临界 CO₂ 喷射压裂温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of SC-CO₂ jet fracturing

在本例中,流场最低温度为 324.5 K,高于 CO₂ 的 3 相点温度(216.6 K)和冰点(273.2 K),可以保 证安全施工。但是,喷嘴压降过大会导致温度大幅 下降,当温度低于 CO₂ 三相点温度时,超临界 CO₂ 会在高压、低温的作用下转化为固态,堵塞喷嘴和射 流孔道;如果遇到地层水,温度只要低于冰点就会导 致冰堵、泥环等井下事故^[9]。因此,在实际压裂施 工中必须合理控制喷嘴压降,防止井下事故的发生。

3.4 物性参数分布

孔道轴线上各物性参数随温度和压力的变化如 图 9 所示。可见在超临界 CO₂ 喷射压裂过程中,超 临界 CO₂ 流体的物性参数随温度和压力的变化发 生了显著变化,在流场模拟中不能设为常数。

超临界 CO₂ 喷射压裂密度分布如图 10 所示。 在喷嘴内部,超临界 CO₂ 流体呈高密度状态,最高 可达 900.5 kg/m³;在环空中,密度最低,最低值为 609.5 kg/m³;进入地层孔道后,密度上升至 830.2 kg/m³。从图 9 也能看出,在孔道轴线上,随着轴线 距离的增大,超临界 CO₂ 流体的密度先降低再升 高。这是因为在孔道轴线上温度和压力都是先升高 后降低,两者对密度的影响效果相反,但压力的影响 起到主导作用,使密度变化趋势与压力变化趋势相 对应。因此,在超临界 CO₂ 喷射压裂过程中,超临 界 CO₂ 流体密度通过调节压力就可以有效控制,从 而适应不同的地层温度条件。

如图 9 所示,在喷射压裂的高温高压的条件下, 超临界 CO_2 的黏度为 $(6.9 \sim 9.2) \times 10^{-5}$ Pa·s,仅为 水的 18.5% ~24.8%,远低于水的黏度。这正是超 临界 CO₂ 喷射压裂在相同条件下具有比水力喷射 压裂更强的射流增压效果的原因。



图 9 超临界 CO₂ 的各性质参数沿孔道轴线分布

Fig. 9 SC-CO₂ parameters distribution along cavity axis



Fig. 10 Density distribution of SC-CO, jet fracturing

4 结 论

(1)在喷嘴压降相同的条件下,与水射流相比, 超临界 CO₂ 射流的射流速度更高,射流核心区更 长,具有射流能量高、能量衰减小的特性。

(2)利用超临界 CO₂ 流体进行喷射压裂具有显 著的射流增压效果,可在环空压力低于地层起裂压 力的条件下压开地层,而且其增压效果比水射流更 强,在相同的环空压力下更容易压开地层。

(3) 超临界 CO₂ 是一种强可压缩流体,超临界 CO₂ 射流会产生显著的焦耳-汤姆逊效应,导致温度 下降,因此在压裂施工中必须合理控制喷嘴压降,防 止冰堵等井下事故的发生。

(4) 超临界 CO₂ 喷射压裂过程中, 流体的各物

性参数随着温度和压力的变化而发生显著变化。流体的密度主要受到压力的影响,通过调节压力就可以有效控制,从而适应不同的地层温度条件。

参考文献:

[1] 李建忠,郑民,张国生,等. 中国常规与非常规天然气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报,2012,33(1):89-98.

LI Jianzhong, ZHENG Min, ZHANG Guosheng, et al. Potential and prospects of conventional and unconventional natural gas resource in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(1):89-98.

- [2] SOLIMAN M Y, DAAL J A, EAST L E. Impact of fracturing and fracturing techniques on productivity of unconventional formations [R]. SPE 150949, 2012.
- [3] ARTHUR J D, COUGHLIN B J, BOHM B K. Summary of environmental issues, mitigation strategies, and regulatory challenges associated with shale gas development in the United States and applicability to development and operations in Canada [R]. SPE 138977, 2010.
- [4] SAKMAR S L. Shale gas development in North America: an overview of the regulatory and environmental challenges facing the industry [R]. SPE 144279, 2011.
- [5] ANDERSON R L, RATCLIFFE I, GREENWELL H C, et al. Clay swelling—a challenge in the oilfield [J]. Earth-Science Reviews, 2010,98(3/4):201-216.
- [6] GUPTA A P, LANGLINAIS J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation [R]. SPE 96992, 2005.
- [7] WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, LI Gensheng. The development and prospect of supercritical carbon dioxide drilling [J]. Petroleum Science and Technology, 2012,30 (16):1670-1676.
- [8] 彭英利,马承愚. 超临界流体技术应用手册[M]. 北京:化学工业出版社,2005:1-40.
- [9] 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.

[10] 王海桂,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. Feasi-

bility analysis on shale gas exploitation with supercritical CO₂[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(3): 30-35.

- [11] 牛继磊,李根生,宋剑,等.水力喷砂射孔参数实验研究[J].石油钻探技术,2003,31(2):14-16.
 NIU Jilei, LI Gensheng, SONG Jian, et al. An experimental study on abrasive water jet perforation parameters
 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003,31(2):14-16.
- [12] 朱红钧,林元华,谢龙汉. Fluent 12 流体分析及工程 仿真[M].北京:清华大学出版社, 2001:101-118.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学 出版社,2004:196-200.
- [14] 韩布兴. 超临界流体与科学[M]. 北京:中国石化出版社,2005:1-4.
- [15] ANSYS Inc. ANSYS Fluent 12.0 UDF manual [M]. ANSYS Inc, 2009:28-32.
- [16] GUARDO A, COUSSIRAT M, RECASENS F, et al. CFD study on particle-to-fluid heat transfer in fixed bed reactors: convective heat transfer at low and high pressure [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61 (13):4341-4353.
- SPAN R, WAGNER W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa
 J. Journal of Physical and Chemical Reference Date, 1996, 25:1509-1596.
- [18] FENGHOUR A W, VESOVIC V. The viscosity of carbon dioxide [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Date, 1998,27:31-44.
- [19] VESOVIC V W, OLCHOWY G A, SENGERS J V, et al. The transport properties of carbon dioxide [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Date, 1990,19: 763-808.
- [20] 曲海,李根生,黄中伟,等.水力喷射压裂孔道内部增压机理[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(5):73-76.
 QU Hai, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Boos-

ting mechanism in hydrajet-fracturing cavity [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(5):73-76.

[21] 盛茂,李根生,黄中伟,等.水力喷射孔内射流增压规 律数值模拟研究 [J]. 钻采工艺,2011,34 (2):42-46.

> SHENG Mao, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Numerical simulation of pressure boosting effect in jet hole during hydrajet fracturing [J]. Drilling and Production Technology, 2011,34(2):42-46.

[22] ANSYS Inc. ANSYS Fluent 12. 0 user's guide [M]. AN-SYS Inc, 2009:356-364.

(编辑 李志芬)