

文章编号: 0253-2697(2013)03-0550-06 DOI: 10. 7623/syxb201303020

# 超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂孔内增压机理

程宇雄 李根生 王海柱 沈忠厚 黄中伟 宋先知

(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:**利用计算流体力学方法模拟了超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂过程中的孔内流场,对比和分析了超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂与水力喷射压裂的增压效果,并研究了各参数对超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂增压效果的影响。研究结果表明:超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂在相同条件下具有比水力喷射压裂更强的孔内增压效果,在喷嘴压降为 30 MPa 时,其增压值比水力喷射压裂高 2.4 MPa;超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂的孔内增压值随着喷嘴压降和喷嘴直径的增大而增大,随着套管孔径的增大而减小,且不受环空压力和超临界 CO<sub>2</sub> 流体温度的影响。

**关键词:**超临界流体;二氧化碳;喷射;压裂;增压;数值模拟

中图分类号:TE357 文献标识码:A

## Pressure boost mechanism within cavity of the supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing

CHENG Yuxiong LI Gensheng WANG Haizhu SHEN Zhonghou HUANG Zhongwei SONG Xianzhi

(State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** In order to verify the feasibility of Supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing and uncover its pressure boost capability, this research simulated flow fields within cavity of Supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing with computational fluid dynamics method, compared the pressure boost effect of Supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing with that of the water jet fracturing, and analyzed the influences of various parameters on the pressure boost effect of Supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing. The results indicated that Supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing has a stronger pressure boost effect than water jet fracturing under the same conditions. When the nozzle pressure drops to 30 MPa, the boost pressure of Supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing is 2.4 MPa higher than that of water jet fracturing. Moreover, the boost pressure of Supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing increases with increasing nozzle pressure and increasing nozzle diameter but decreases with increasing inner casing diameter, and it is not affected by the annulus pressure and the temperature of Supercritical CO<sub>2</sub> fluid.

**Key words:** supercritical fluid; carbon dioxide; jet; fracturing; boost pressure; numerical simulation

页岩气、煤层气等非常规油气资源已成为 21 世纪重要的接替能源<sup>[1]</sup>,但非常规油气藏大多需要压裂才能投产<sup>[2-3]</sup>,现虽已取得了一定的成果,却仍存在诸多问题<sup>[4-6]</sup>。随着钻完井技术的快速发展,20 世纪末超临界 CO<sub>2</sub> 流体被应用到钻完井工程中<sup>[7-8]</sup>。超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂可以解决常规水力压裂在非常规油气藏增产中遇到的问题,成为环保、高效、安全的新型压裂方法<sup>[9-11]</sup>。由于在水力喷射压裂过程中,高速射流进入射孔孔道后逐渐滞止,根据伯努利原理,滞止压力将高于环空压力,两者差值即为射流增压值<sup>[12]</sup>。当孔内滞止压力达到地层破裂压力时,射流孔道顶端将产生裂缝并延伸,

而此时环空压力仍低于地层破裂压力,不会压开其他层位,从而实现了定点压裂<sup>[13]</sup>。而利用超临界 CO<sub>2</sub> 进行喷射压裂作业的首要问题就在于,超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂能否像水力喷射压裂那样在射流孔道内产生有效的射流增压效果,从而在环空压力低于地层破裂压力的情况下使地层起裂。为此,笔者等利用计算流体力学方法模拟了超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂过程中的孔内流场,对比和分析了超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂与水力喷射压裂的增压效果,并揭示了各参数对超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂射流增压效果的影响规律,从而证实了超临界 CO<sub>2</sub> 喷射压裂的可行性。

**基金项目:**国家自然科学基金重点项目(No. 51034007)和国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(No. 51210006)资助。

**第一作者:**程宇雄,男,1987 年 6 月生,2006 年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,现为中国石油大学(北京)博士研究生,主要从事超临界二氧化碳钻完井基础理论研究。Email:chengyuxiong@126.com

**通讯作者:**李根生,男,1961 年 9 月生,1983 年毕业于华东石油学院钻井工程专业,1988 年获石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,现为中国石油大学(北京)教授、博士生导师,主要从事油气钻井和完井工程方面的研究。Email:ligs@cup.edu.cn

# 1 模型的建立和求解

## 1.1 几何模型

假设超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂形成的地层孔道与水力喷射压裂形成孔道的形状一致,为纺锤体<sup>[14]</sup>(图1)。流动区域包括喷嘴入口、环空及地层孔道3部分,喷嘴出口处设为横坐标原点。在超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂过程中,超临界CO<sub>2</sub>流体将从喷嘴依次进入环空和孔道,最后从环空流出。因此,喷嘴入口是压力进口边界,环空出口是压力出口边界,其他边界为无滑移壁面边界。在划分网格时,采用局部网格划分方法,并在压力梯度变化较大的喷嘴直线段加密网格(图2)。由于流动方向是沿着网格结构方向的,因此选用结构化网格,就可以使用较少的网格单元获得较高精度的结果<sup>[15]</sup>。

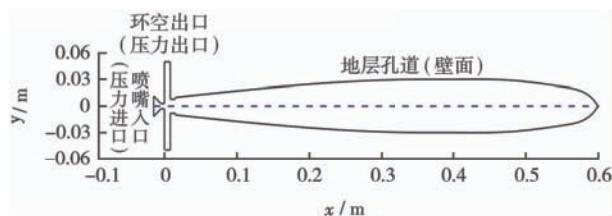


图1 流场几何模型

Fig. 1 Geometry model of flow field

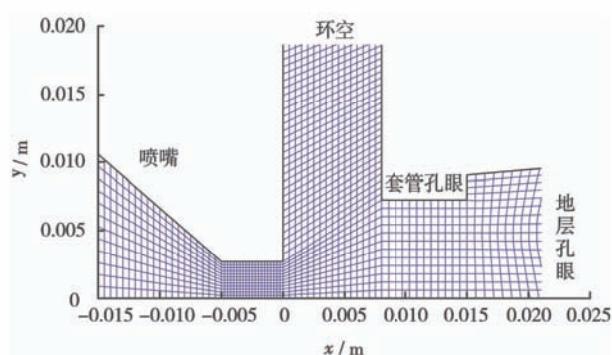


图2 局部网格加密

Fig. 2 Local grid refinement

## 1.2 数学模型

由于超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂过程中涉及传热和压缩性流体,除了质量方程和动量方程以外,还须求解能量方程<sup>[16]</sup>。湍流计算采用目前应用广泛的标准k-ε模型<sup>[16]</sup>。

在超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂过程中超临界CO<sub>2</sub>流体的压力和温度会发生剧烈的变化,同时超临界CO<sub>2</sub>的物性参数对压力和温度非常敏感,也会随之变化,而物性参数的变化反过来又会影响到压力场和温度场<sup>[17]</sup>。为了对这一过程进行精确模拟,必须采用精确的超临界CO<sub>2</sub>物性参数模型,使每个节点上超临界CO<sub>2</sub>的物性参数都成为这一节点上压力和温度的函数。笔者采用精度较高的Span-Wagner状态方程来计算超临界CO<sub>2</sub>的热力学性质<sup>[18]</sup>。无量纲Helmholtz自由能表达式为

$$\Phi(\delta, \tau) = \Phi^o(\delta, \tau) + \Phi^r(\delta, \tau) \quad (1)$$

式中: $\Phi(\delta, \tau)$ 为无量纲Helmholtz自由能; $\Phi^o(\delta, \tau)$ 为其理想状态部分, $\Phi^r(\delta, \tau)$ 为其残余部分; $\delta$ 为对比密度, $\delta = \rho/\rho_c$ ; $\rho$ 为密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\rho_c$ 为临界密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\tau$ 为对比温度, $\tau = T_c/T$ ,无量纲; $T$ 为温度,K; $T_c$ 为临界温度,K。

超临界CO<sub>2</sub>的密度可采用数值算法得到,计算式为

$$\rho(\delta, \tau) = \rho RT(1 + \delta\Phi_\delta^r) \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为压力,MPa; $R$ 为比气体常数 $R = 0.1889 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ; $\Phi_\delta^r$ 为中间变量,是 $\Phi^r$ 对 $\delta$ 的偏导,无量纲。

CO<sub>2</sub>定压比热容的解析解的表达式为

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

式中: $c_p$ 为定压比热容,kJ/(kg·K); $\Phi_{\tau^2}^o$ , $\Phi_{\tau^2}^r$ , $\Phi_{\delta\tau}^r$ , $\Phi_{\delta^2}^r$ 分别是 $\Phi^o$ 或 $\Phi^r$ 对 $\delta$ 或 $\tau$ 的二次偏导,无量纲。

分别采用Fenghour等<sup>[19]</sup>和Vessovic等<sup>[20]</sup>的模型计算CO<sub>2</sub>的黏度和导热系数。

## 1.3 计算流程

超临界CO<sub>2</sub>射流属于高速可压缩流动,可忽略重力,此外笔者采用对求解超临界CO<sub>2</sub>射流问题更有优势的耦合求解器<sup>[21]</sup>。从计算流程可以看出(图3),每

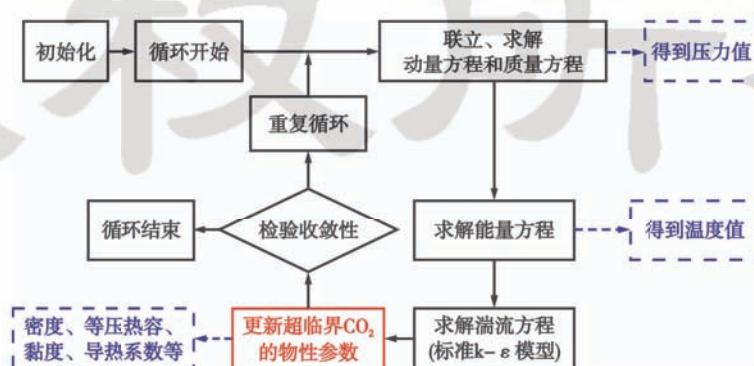


图3 计算流程

Fig. 3 Solution procedures

次进入计算循环以后,求解器将联立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(标准k-ε模型)。在每次循环结束之前,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理参数(密度、等压热容、黏度和导热系数等)<sup>[22]</sup>。这种将压力场、温度场与超临界CO<sub>2</sub>物性参数进行耦合计算的方法,可以精确地模拟超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂孔内的流场。

## 2 增压机理

为了揭示超临界CO<sub>2</sub>射流的增压机理,研究了超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂过程中静压力、动压力、总压力和速度沿孔道轴线的分布。其中,静压力是由于流体分子不规则运动产生的压力,其与流体的压能成正比;动压力是由于流体流动产生的压力,其与流体的动能成正比;总压力是静压力和动压力之和,其与流体的机械能成正比<sup>[23]</sup>。如图4所示,当CO<sub>2</sub>流体经过喷嘴和环空时,静压力从39.3 MPa急剧降低到20.5 MPa,而动压力提高到15.2 MPa,射流速度迅速提高到235 m/s,这是流体压能转化为动能的结果。当高速超临界CO<sub>2</sub>射流进入套管孔眼后,动压力和速度开始下降,静压力上升,这是流体动能转化为压能的结果。最终,当超临界CO<sub>2</sub>流体滞止于孔道中时,由于动压力降为0,总压力曲线和静压力曲线重合,其值为滞止压力,大小为31.1 MPa,比环空压力高11.1 MPa。可见,利用超临界CO<sub>2</sub>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。

在动压力和静压力相互转换的过程中(图4),总压力发生了明显的下降,这说明在此过程中,由于超临界CO<sub>2</sub>流体流动需要克服摩擦力作功,其机械能发生了损失。因此,超临界CO<sub>2</sub>流体在流动中克服摩擦力作功的大小会影响滞止压力:克服摩擦力作功越小,滞

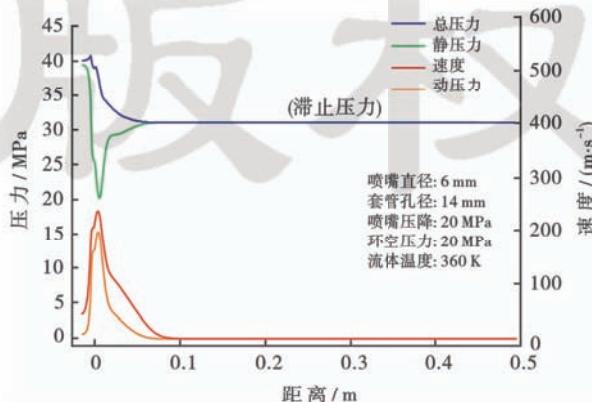


图4 压力与速度沿孔道轴线分布

Fig.4 Distribution of pressures and velocity along cavity axis

止压力越大,射流增压效果也就越好。

## 3 超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂与水力喷射压裂增压效果对比

为了验证超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内增压效果,在相同的参数条件下模拟了超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂和水力喷射压裂过程中孔道中的流场,并对比了两者的增压效果。由于水的物理参数随着温度和压力的变化范围较小,因此,在水射流流场模拟中水的物理参数采用温度为360 K,压力为30 MPa条件下的值,即密度为980.5 kg/m<sup>3</sup>,黏度为0.334 mPa·s,导热系数为0.69 W/(m·K),定压热容为4.141 kJ/(kg·K)。图5对比了超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂和水力喷射压裂在5种不同喷嘴压降条件下的孔内增压值。可以看出,超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内增压值曲线高于水力喷射压裂的增压值曲线。在喷嘴压降为30 MPa时,超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的增压值为16.7 MPa,比相同条件下水射流的增压值高2.4 MPa。可见,超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂在相同条件下具有比水力喷射压裂更强的孔内增压效果。

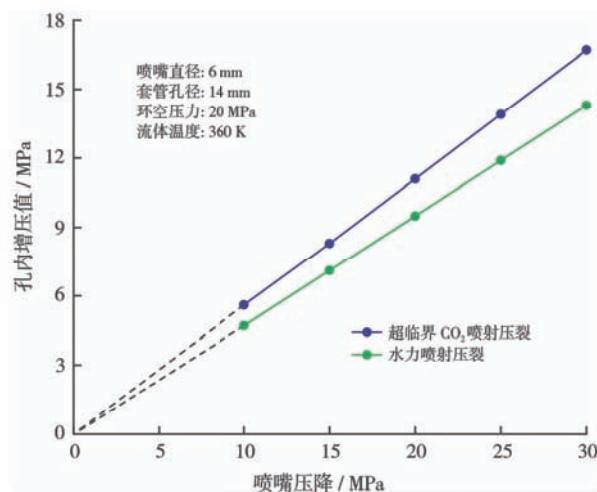


图5 超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂与水力喷射压裂孔内增压值对比

Fig.5 Boost pressure comparison between water jet fracturing and supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing

由于流体在流动中克服摩擦力越小,射流增压效果越好,且摩擦力的大小受流体黏度的影响很大。通过对比模拟条件下的水和超临界CO<sub>2</sub>流体的黏度可以看出,水的黏度为0.334 mPa·s,而超临界CO<sub>2</sub>流体的黏度等参数在孔道轴线上的分布如图6所示。在喷射压裂高温高压的条件下,超临界CO<sub>2</sub>的黏度为0.042~0.056 mPa·s,仅是水的12.6%~16.8%。可见,在喷射压裂过程中,超临界CO<sub>2</sub>流体的黏度远低于水的黏度,这正是超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂在相同条件下具有更强的孔内增压效果的原因。

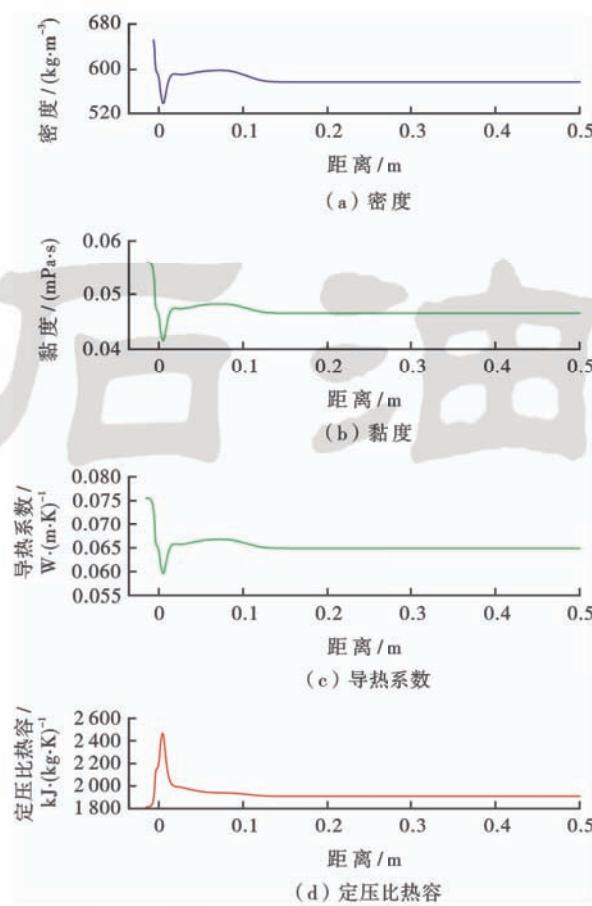
图6 超临界CO<sub>2</sub>的各性质参数沿孔道轴线分布

Fig. 6 Supercritical CO<sub>2</sub> parameters distribution along the cavity axis

#### 4 超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂孔内增压效果的影响因素

##### 4.1 喷嘴压降

喷嘴压降定义为喷嘴入口压力与环空压力之差,其是决定射流动能大小的重要参数,因此研究了不同喷嘴压降条件下超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内压力分布(图7)。在其他参数一定的条件下,喷嘴压降越大,孔内滞止压力越大,孔内增压值也越大。这一规律和水力喷射压裂基本相同,这是由于不管是超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂还是水力喷射压裂,喷嘴压降都决定了射流动能的大小,射流动能最终将会转化为压能,从而提高孔内压力。

##### 4.2 喷嘴直径

通过将喷嘴直径分别设置为4、5、6、7和8 mm,研究了不同喷嘴直径条件下超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内压力分布(图8)。在其他参数一定的条件下,喷嘴直径越大,孔内滞止压力越大,孔内增压值也越大。这是由于在相同的喷嘴压降下,加大喷嘴直径会增加射流动能,从而可以取得更好的射流增压效果。因此,在现场施工条件允许的情况下,可适当增大喷嘴压降和喷嘴直径,以提高增压效果。

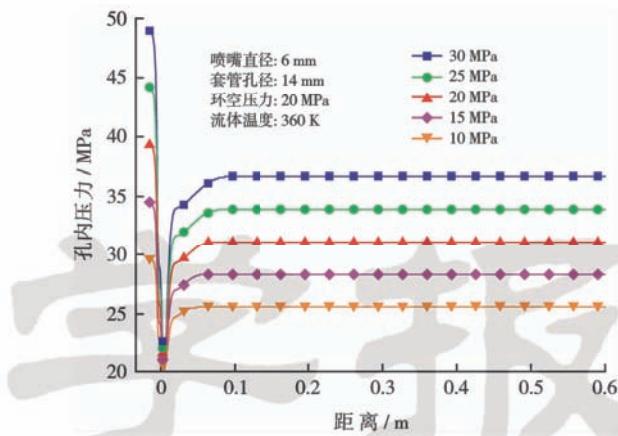
图7 不同喷嘴压降下超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内压力分布

Fig. 7 Cavity pressure distribution of supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing with different nozzle pressure drops

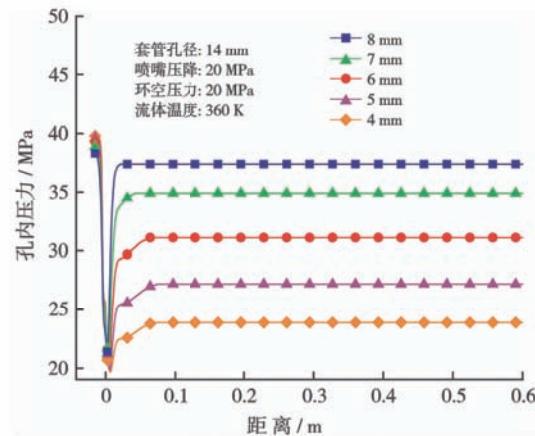
图8 不同喷嘴直径下超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂孔内压力分布

Fig. 8 Cavity pressure distribution of supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing with different nozzle diameters

##### 4.3 套管孔径

利用超临界CO<sub>2</sub>对套管完井段进行射孔作业时,在套管上形成的孔眼直径(套管孔径)大小会对增压效果产生明显的影响。通过将套管孔径分别设置为10、12、14、16和18 mm,研究了不同套管孔径条件下超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内压力分布(图9)。在其他参数一定的条件下,套管孔径越大,孔内滞止压力越小,孔内增压值也越小。这是由于套管孔眼中同时存在着流入和流出孔道的流体,因此起到了密封孔道内高压流体的作用,套管孔眼越小,其密封效果就越好,从而保证了更好的孔内增压效果。

##### 4.4 环空压力

通过将环空压力分别设置为15、20、25、30和35 MPa,研究了超临界CO<sub>2</sub>射流孔内滞止压力和增压值随环空压力的变化规律(图10)。在其他参数一定的条件下,滞止压力随着环空压力的增大而线性增大,但

增压值不会随之变化。这说明,环空压力会影响整个流场的压力水平,但不会影响射流动能的大小,从而也不会影响孔内增压值的大小。

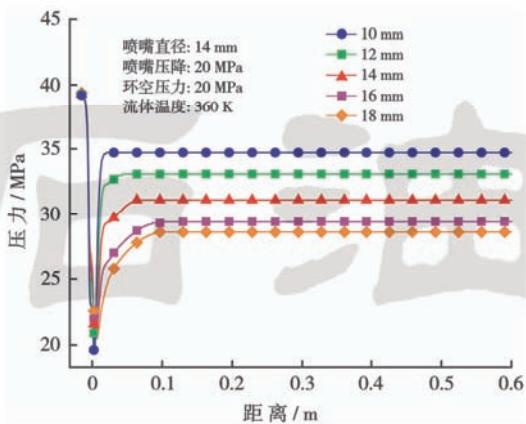


图9 不同套管孔径下超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内压力分布

Fig. 9 Cavity pressure distribution of supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing with different casing hole diameters

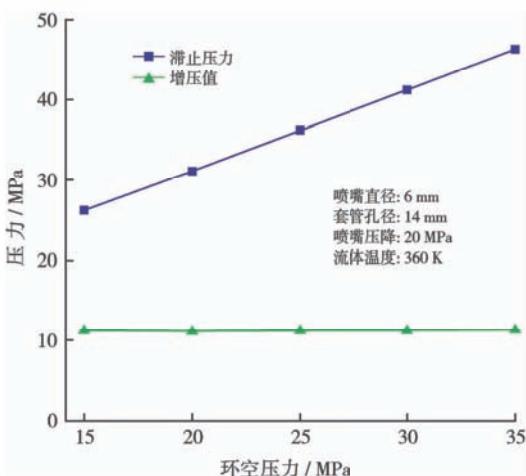


图10 环空压力对超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂滞止压力和增压值的影响

Fig. 10 Influences of annulus pressure on stagnation pressure and boost pressure for supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing

#### 4.5 超临界CO<sub>2</sub>流体温度

超临界CO<sub>2</sub>流体的温度会影响其物性参数,而物性参数的变化会对超临界CO<sub>2</sub>射流的结构形态产生影响。为了探明超临界CO<sub>2</sub>流体温度对超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂增压效果的影响,研究了3种不同喷嘴压降(30、20和10 MPa)条件下超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内增压值随温度的变化规律(图11),温度分别设置为300~400 K。在300~400 K的温度范围内,3种不同的喷嘴压降条件下的增压曲线基本上都是水平的,这表明超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的增压效果不受超临界CO<sub>2</sub>流体温度的影响。

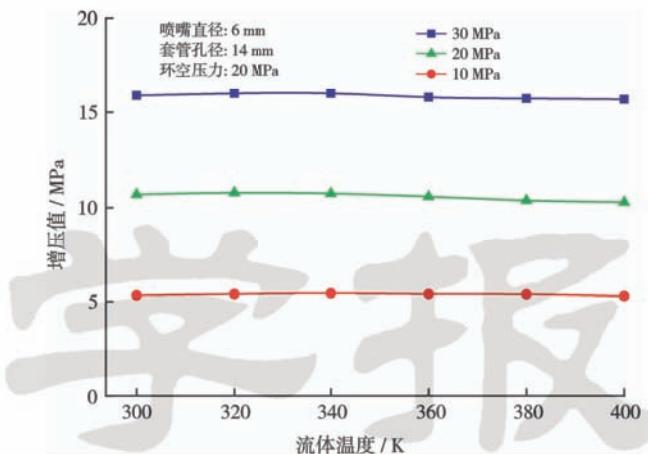


图11 不同喷嘴压降下超临界CO<sub>2</sub>流体温度对超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂增压值的影响

Fig. 11 Influences of supercritical CO<sub>2</sub> fluid temperature on supercritical CO<sub>2</sub> jet fracturing boost pressure with different nozzle pressure drops

## 5 结论

(1) 超临界CO<sub>2</sub>流体的黏度远低于水,使超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂在相同条件下具有比水力喷射压裂更强的孔内增压效果。在本文模拟条件下,当喷嘴压降为30 MPa时,超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的增压值为16.7 MPa,比相同条件下水射流的增压值高2.4 MPa。

(2) 超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内增压值随着喷嘴压降和喷嘴直径的增大而增大。在现场施工条件允许的情况下,可适当增大喷嘴压降和喷嘴直径,以提高增压效果。

(3) 超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内增压值随着套管孔径的增大而减小。套管孔眼起到了密封孔道内高压流体的作用,且套管孔眼越小,其密封效果越好。

(4) 超临界CO<sub>2</sub>喷射压裂的孔内增压值不受环空压力和超临界CO<sub>2</sub>流体温度的影响,具有较广泛的适用性。

## 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(增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(Supplement 1): 89-98.
- [2] 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.
- [3] Palisch T T, Chapman M A, Godwin J. Hydraulic fracture design

- optimization in unconventional reservoirs; a case history[R]. SPE 160206, 2012.
- [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] Touzel P. Managing environmental and social risks in China[R]. SPE 156503, 2012.
- [6] Andersona R L, Ratcliffeb I, Greenwell H C, et al. Clay swelling; a challenge in the oilfield[J]. Earth-Science Reviews, 2010, 98(3/4): 201-216.
- [7] Gupta A P, Gupta A, Langlinais J. Feasibility of supercritical carbon dioxide as a drilling fluid for deep underbalanced drilling operation[R]. SPE 96992, 2005.
- [8] Wang H, Shen Z, Li G. The development and prospect of supercritical carbon dioxide drilling[J]. Petroleum Science and Technology, 2012, 30(16): 1670-1676.
- [9] 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.  
Peng Yingli, Ma Chengyu. Application manual of super critical fluid technology[M]. Beijing: Chemical Industury Press, 2005: 1-40.
- [10] 沈忠厚, 王海柱, 李根生. 超临界CO<sub>2</sub>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] 王海柱, 沈忠厚, 李根生. 超临界CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 30-35.
- [12] Surjaatmadja J B. Multioriented fracturing in unconventional reservoirs offers improved production by better connectivity[R]. SPE 137353, 2010.
- [13] Stanojevic M, Jaripatke O A, Sharma A. Pinpoint fracturing technologies; a review of successful evolution of multistage fracturing in the last decade[R]. SPE 130580, 2010.
- [14] 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.
- [15] FLUENT Inc.. GAMBIT modeling guide[M]. Shanghai: FLUENT Inc., 2003: 124-135.
- [16] 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, 2011: 101-118.  
Zhu Hongjun, Lin Yuanhua, Xie Longhan. Fluent 12 fluid anlysis and engineering simulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 101-118.
- [17] 韩布兴. 超临界流体科学与技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2005: 1-4.  
Han Buxing. Supercritical fluid science & technology[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005: 1-4.
- [18] 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(6): 1509-1596.
- [19] Fenghour A, Wakeham W A. The viscosity of carbon dioxide[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Date, 1998, 27(1): 31-44.
- [20] Vesovic V, Wakeham W A, Olchowy G A, et al. The transport properties of carbon dioxide[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Date, 1990, 19(3): 763-808.
- [21] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 196-200.  
Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis: theory and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 196-200.
- [22] ANSYS Inc.. ANSYS FLUENT 12.0 UDF manual[EB/OL].[2012-11-11] <https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomer-Portal>.
- [23] ANSYS Inc.. ANSYS FLUENT 12.0 user's guide[EB/OL].[2012-11-11] <https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomer-Portal>.

(收稿日期 2012-11-12 改回日期 2013-01-22 编辑 王培玺)