

水力裂缝表皮因子计算方法讨论和完善

詹悦

中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041

摘要:水力裂缝表皮因子是影响压裂效果的重要参数,目前常采用 Cinco-Ley 公式进行分析。为正确认识水力裂缝表皮因子,从表皮因子的推导入手,通过理论分析指出了 Cinco-Ley 公式的不合理之处,并给出了水力裂缝表皮因子的新公式。新公式与径向流表皮因子公式协调一致,能反映表皮因子的真实物理含义,并指出水力裂缝表皮因子与裂缝长度无关的物理实质。水力压裂应通过减小液体滤失深度或液体残渣物含量来减小水力裂缝表皮因子,而不是通过增大缝长减小表皮因子。该研究结果可为水力压裂的设计提供理论依据。

关键词:水力裂缝;表皮因子;Cinco-Ley 公式;裂缝长度;渗流距离

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.03.013

Discussion and Improvement on Calculation of Skin Factor of Hydraulic Fracture

Zhan Yue

China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China

Abstract: The skin factor of hydraulic fracture is an important parameter affecting the productivity of fracturing. This factor is commonly analysed using the formula proposed by Cinco-Ley. To correctly understand the skin factor of hydraulic fractures, starting from the derivation of the skin factor and theoretical analysis, some imperfections of Cinco-Ley formula were identified and a new formula was then developed. The new formula is consistent with radial flow skin factor formula; it is able to represent the actual physical meaning of skin factor, and indicates that the skin factor of hydraulic fracture is independent of the fracture length. To reduce the skin factor, hydraulic fracturing should be done using frack liquid with less contaminant hence reduces damage on formation permeability and reduces filtration depth of fractured surface instead of increasing the fracture length. This research result can provide theoretical basis for the design of hydraulic fracturing.

Keywords: Hydraulic fracture; Skin factor; Cinco-Ley formula; Fracture length; Seepage distance

收稿日期:2020-03-20

基金项目:东营市科技计划项目“功能化纳米复合减阻新材料合成与应用技术研究”(2017 ZDCX 08)

作者简介:詹悦(1995-),女,新疆库尔勒人,助理工程师,学士,主要从事油气田增产增注技术研究。E-mail:872874339@

qq.com

0 前言

由于流体侵入等因素,水力裂缝壁面附近会出现渗透率下降的现象,这种现象叫做水力裂缝表皮效应^[1-3]。水力裂缝表皮效应给裂缝壁面带来了附加压降,导致压裂后产能无法实现预期效果,也给水力压裂后评估工作带来一定困难^[4-5]。Cinco-Ley^[6]于1997年首先研究了水力裂缝表皮效应,并给出了水力裂缝表皮因子的公式。研究者^[7-9]多采用该式分析水力裂缝的表皮因子。笔者通过深入分析该公式,发现Cinco-Ley水力裂缝表皮因子的公式并不完善,存在与实际情况矛盾的情况。因此重新推导了裂缝表皮因子,得到合理的水力裂缝表皮因子。新的表皮因子公式物理含义明确,有利于设计人员合理分析改善压裂效果。

1 Cinco-Ley 公式及相关参数概念分析

Cinco-Ley 建立的水力裂缝表皮因子为:

$$S_f = \frac{\pi w_d}{2L_f} \left(\frac{K}{K_d} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: S_f 为水力裂缝表皮因子; w_d 为污染带宽度,m; L_f 为裂缝半长,m; K 为未污染带渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_d 为污染带渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。分析可知污染带宽度 w_d 越大或污染带渗透率 K_d 越低,裂缝表皮因子 S_f 就越大。这与实际情况相符,恰当反映了表皮因子阐述的物理背景^[10-12]。然而,式(1)也反映出“裂缝长度越大,裂缝表皮因子越小”的现象。即相同污染(污染带宽度和渗透率相同)的情况下,长缝会比短缝的表皮因子小。这难免会引起设计者的关注,如果遵循上述规律,压裂设计就可以通过增大缝长来减小裂缝表皮因子。

为了检验缝长对表皮因子是否有这样的影响,考察图1所示压裂后油藏情况,除图1-a)水力缝长小于图1-b)水力缝长之外,其他参数均相同,即两油藏具有相同宽度和相同渗透率的污染带。

水力压裂将地层流体向井筒的径向流转变为地层流体到水力裂缝、水力裂缝内流体到井筒的双线性流^[13-15]。水力裂缝表皮因子发生于地层流体到水力裂缝的线性流阶段。考虑地层流体到裂缝的线性渗流阶段,图1中两种缝长情况下的供给边界压力相同,单位裂缝长度的流量相同。根据单相流压力分布公式,可以得到图1-a)和图1-b)的裂缝内流体压力相同,因此两者具有相同的表皮因子,而不是图1-b)的表皮因子小于图1-a)的表皮因子。可见,Cinco-Ley公式反映的缝长与表皮因子的关系不准确,用Cinco-Ley公式分析裂缝表皮因子存在矛盾。

为了解决这一矛盾,需要分析表皮因子的由来,并

重新推导出水力裂缝表皮因子。

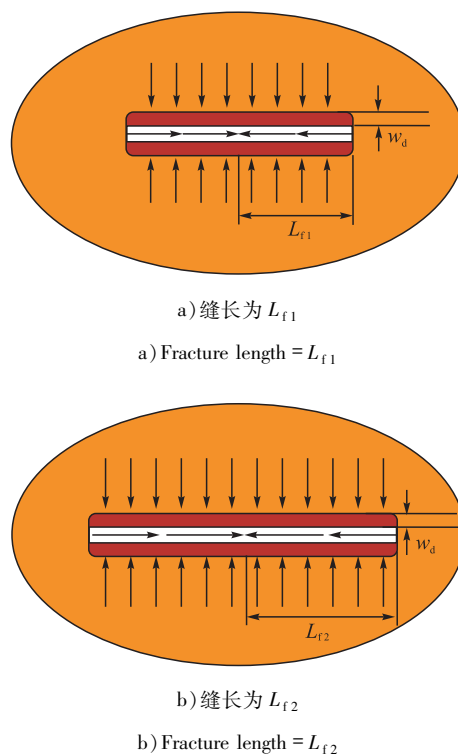


图1 水力压裂油藏示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic fracturing reservoir

2 水力裂缝表皮因子的建立

2.1 表皮因子的由来

表皮因子与热传导中薄膜的传热系数相似,可以通过求解复合油藏的压力分布来建立表皮因子^[16-19]。前期研究在建立表皮因子时,采用的是圆形复合油藏,并筒附近渗透率损伤示意图见图2,其他形状的油藏表皮因子也可通过如下建立过程推导得到。

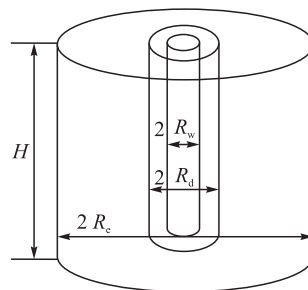


图2 井筒附近渗透率损伤示意图

Fig. 2 Schematic diagram of permeability damage near wellbore

根据达西定律可得径向流的稳态流量为:

$$Q = \frac{p_e - p_d}{\mu \ln \frac{R_e}{R_d}} \times 2\pi KH = \frac{p_d - p_w}{\mu \ln \frac{R_d}{R_w}} \times 2\pi K_d H \quad (2)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; p_e 为供给边界压力,MPa; p_d 为渗

透率变异界面压力, MPa; p_w 为存在渗透率变异的地层的井底压力, MPa; R_e 为供给半径, m; R_d 为污染带半径, m; R_w 为井筒半径, m; μ 为流体黏度, mPa · s; H 为油层厚度, m。

由式(2)得:

$$p_e - p_w = \frac{\mu Q}{2\pi KH} \left(\ln \frac{R_e}{R_w} + \frac{K \ln \frac{R_d}{R_w}}{K_d} \right) \quad (3)$$

对于未受污染地层:

$$p_e - p'_w = \frac{\mu Q}{2\pi KH} \ln \frac{R_e}{R_w} \quad (4)$$

式中: p'_w 为不存在渗透率变异的底层的井底压力, MPa。

式(3)减式(4), 得到:

$$\Delta p_d = p'_w - p_w = \frac{\mu Q}{2\pi KH} \left(\frac{K}{K_d} - 1 \right) \ln \frac{R_d}{R_w} \quad (5)$$

因此, 直井径向流的表皮因子为:

$$S = \left(\frac{K}{K_d} - 1 \right) \ln \frac{R_d}{R_w} \quad (6)$$

式中: S 为表皮因子。

2.2 水力裂缝表皮因子的推导

水力压裂地层存在地层与裂缝的线性流、裂缝与井筒的线性流, 见图3, 水力裂缝表皮因子 S_f 存在于地层与裂缝的线性流阶段。根据达西定律可知线性流流量为:

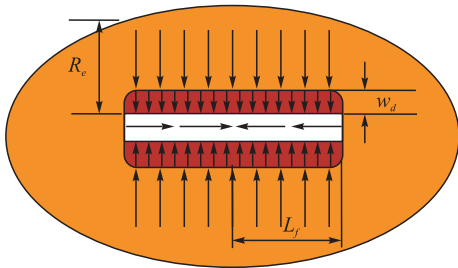


图3 裂缝附近流动示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flow near the crack

$$Q = \frac{p_e - p_d}{\mu(R_e - w_d)} \times 2KHL_f = \frac{p_d - p_w}{\mu w_d} \times 2K_d HL_f \quad (7)$$

由式(7)得到:

$$p_e - p_w = \frac{\mu QR_e}{2KHL_f} \left(1 + \left(\frac{K}{K_d} - 1 \right) \frac{w_d}{R_e} \right) \quad (8)$$

对于未受污染地层:

$$p_e - p'_w = \frac{\mu QR_e}{2KHL_f} \quad (9)$$

因此, 水力裂缝表皮因子表示为:

$$S_f = \left(\frac{K}{K_d} - 1 \right) \frac{w_d}{R_e} \quad (10)$$

推导过程可以看出, 水力裂缝表皮因子 S_f 即为带状

油藏单向流的表皮因子。这是水力压裂导致地层产生双线性流的结果。裂缝半长 L_f 与渗流面积有关, 与表皮因子无关。

实际上, Cinco-Ley 水力裂缝表皮因子公式, 即是通过单向线性流动推导的结果^[20-21], 但 Cinco-Ley 推导中在无因次压力中漏掉了缝长, 导致出现本文公式。

3 水力裂缝表皮因子新公式的讨论分析

水力裂缝表皮因子的新公式表明裂缝表皮因子与缝长无关, 而与渗流距离(渗流半径)相关。正的表皮因子相当于增大了渗流距离, 负的表皮因子相当于减小了渗流距离。这与圆形油藏“正的表皮因子相当于减小井径, 负的表皮因子相当于增大井径^[7]”相一致, 表明两者公式形式和含义协调一致。

实际上, 因为污染带宽度 w_d 和污染带渗透率 K_d 都难以得到^[17], 机械表皮因子很难通过理论公式计算得到。但作为理论分析的公式, 物理含义清楚, 不应该出现违反实际情况的矛盾。若是理论分析裂缝表皮因子, 就应该采用式(9), 而不是 Cinco-Ley 给出的式(1)。

水力裂缝表皮因子的理论公式表明, 可以通过减小压裂液在裂缝面的滤失深度和对地层渗透率的伤害程度(如减小液体残渣含量等)来减小水力裂缝表皮因子, 而改变缝长不会对其产生影响。

4 结论

Cinco-ley 公式反映的缝长越长, 表皮因子越小的规律与实际不相符合。根据表皮因子的定义, 参照径向流表皮因子的推导过程, 给出了水力裂缝表皮因子新公式。

水力裂缝表皮因子的实质是改变了渗流距离, 与圆形油藏井筒表皮因子改变渗流半径的实质一致; 水力裂缝表皮因子与缝长无关, 水力压裂过程应通过减小压裂液对地层伤害来减小表皮因子, 而不应通过增大缝长减小表皮因子。

参考文献:

- [1] 陈元千, 阎为格. 表皮系数的分解方法[J]. 断块油气田, 2004, 10(6): 32-35.
Chen Yuanqian, Yan Weige. The Decomposition Method of the Skin Factor [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2004, 10(6): 32-35.
- [2] Mahdiyari H, Jamiolahmady M. Optimization of Hydraulic Fracture Geometry in Gas Condensate Reservoirs [J]. Fuel, 2014, 119: 27-37.
- [3] Moench A F. Convergent Radial Dispersion in a Double-Porosity Aquifer with Fracture Skin: Analytical Solution and Application

- to a Field Experiment in Fractured Chalk [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33 (3): 501 - 503.
- [4] Bello R O, Wattenbarger R A. Modelling and Analysis of Shale Gas Production with a Skin Effect [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2010, 49 (12): 37 - 48.
- [5] 蒋海, 杨兆中, 李小刚, 等. 裂缝面滤失对压裂井产能的影响分析[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2008, 5(1): 87 - 89.
- Jiang Hai, Yang Zhaozhong, Li Xiaogang, et al. Analyses on the Effect Fracture Surface Leak-off on Fractured Well Productivity [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2008, 5 (1): 87 - 89.
- [6] Cinco-Ley. 裂缝油藏试井分析[J]. 吴光大, 译. *国外测井技术*, 1997, 12(1): 44 - 49.
- Cinco-Ley H. Well Test Analysis of Fractured Reservoir [J]. Wu Guangda, trans. *World Well Logging Technology*, 1997, 12 (1): 44 - 49.
- [7] Pietrek M, Horst P. Determination of the Fracture Toughness of Debonded Asymmetric Sandwich Beams with a Thin-Walled Skin Considering Plastic Deformation [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 188: 217 - 231.
- [8] Zeng Fanhua, Zhao Gang. The Optimal Hydraulic Fracture Geometry Under Non-Darcy Flow Effects [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 72 (1 - 2): 143 - 157.
- [9] 才博, 王晓冬, 王欣. 水力裂缝缝壁表皮效应数学模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(6): 938 - 942.
- Cai Bo, Wang Xiaodong, Wang Xin. Mathematical Study of Fracture Face Skin in Hydraulic Fractures [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40 (6): 938 - 942.
- [10] Wang Wendong, Shahvali M, Su Yuliang. A Semi-Analytical Fractal Model for Production from Tight Oil Reservoirs with Hydraulically Fractured Horizontal Wells [J]. *Fuel*, 2015, 158: 612 - 618.
- [11] 李元生, 李相方, 藤赛男, 等. 考虑非均质及表皮因子的一点法试井资料处理方法[J]. *断块油气田*, 2013, 20(2): 258 - 261.
- Li Yuansheng, Li Xiangfang, Teng Sainan, et al. Single-Point Method for Well Test Data Processing Considering Reservoir Heterogeneity and Skin Factor [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2013, 20 (2): 258 - 261.
- [12] 李晓平, 晏宁平, 袁淋, 等. 水平井分段酸化后表皮因子研究新方法[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(3): 25 - 30.
- Li Xiaoping, Yan Ningping, Yuan Lin, et al. New Method to Study the Skin Factor of Horizontal Gas-well After Staged Acidizing [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2015, 37 (3): 25 - 30.
- [13] 刘海龙. 双重介质压裂直井非稳态井底压力分析[J]. *天然气与石油*, 2019, 37(5): 72 - 78.
- Liu Hailong. Dynamic Analysis on Bottom Pressure of Unsteady Flow in Dual-Medium Fracturing Vertical Well [J]. *Natural Gas and Oil*, 2019, 37 (5): 72 - 78.
- [14] Chittick E A, Srebotnjak T. An Analysis of Chemicals and Other Constituents Found in Produced Water from Hydraulically Fractured Wells in California and the Challenges for Wastewater Management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 204 (Part 1): 502 - 509.
- [15] Huang Da, Gu Dongming, Song Yixiang, et al. Towards a Complete Understanding of the Triggering Mechanism of a Large Reactivated Landslide in the Three Gorges Reservoir [J]. *Engineering Geology*, 2018, 238: 36 - 51.
- [16] 王晓冬, 张奇斌, 邹艳华. 表皮因子与渗流方式[J]. *油气井测试*, 2005, 14(2): 1 - 3.
- Wang Xiaodong, Zhang Qibin, Zou Yanhua. Skin Factor and Flow Pattern [J]. *Well Testing*, 2005, 14 (2): 1 - 3.
- [17] Yi R, Tan G M, Yang Z, et al. Length-Weight and Length-Length Relationships of Five Fish Species from the Zigui Section of the Lower Three Gorges Reservoir, Hubei Province, China [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2018, 34 (3): 771 - 773.
- [18] Ezeuko C C, Gates I D. Thermal Oil Recovery from Fractured Reservoirs: Energy and Emissions Intensities [J]. *Energy*, 2018, 155: 29 - 34.
- [19] Gong J, Rossen W R. Characteristic Fracture Spacing in Primary and Secondary Recovery for Naturally Fractured Reservoirs [J]. *Fuel*, 2018, 223: 470 - 485.
- [20] Wang Lu, Yang Shenglai, Meng Zhan, et al. Time-Dependent Shape Factors for Fractured Reservoir Simulation Effect of Stress Sensitivity in Matrix System [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 163: 556 - 569.
- [21] Harmelen A V, Weijermars R. Complex Analytical Solutions for Flow in Hydraulically Fractured Hydrocarbon Reservoirs with and Without Natural Fractures [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 56: 137 - 157.