

The Research Progress of Fracturing Numerical Simulation Technology for Fractured Reservoir

Xiangtong Yang¹, Yang Zhang¹, Wentong Fan¹, Dan Ba¹, Liwen Piao^{2,3}, Yiliu Sun^{2,3}

¹Research Institute of Petroleum Engineering, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla Xinjiang

²State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing

³College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing

Email: Yangxt-tlm@petrochina.com.cn

Received: Jan. 15th, 2018; accepted: Feb. 25th, 2018; published: Jun. 15th, 2018

Abstract

A large number of natural fractures were often developed in unconventional reservoirs; it had a significant effect on the fracture propagation morphology in hydraulic fracturing. Fractures were rich in unconventional reservoirs and these fractures will affect hydraulic fracturing significantly. Therefore, numerical simulation was an effective method to study fracture propagation in fractured reservoirs. Till now, the numerical simulation methods mainly included extended finite element method, distinct element method and boundary element method. In this paper, the basic theory, the advantages and disadvantages, and the applications of these three methods are all studied. By comparing these three methods, it is found that proper numerical methods are adopted in consideration of different research requirements. Furthermore, the fracture propagation law in hydraulic fracturing process can be grasped and the actual hydraulic fracturing operation design can be guided.

Keywords

Fractured Reservoir, Hydraulic Fracturing, Extended Finite Element, Distinct Element Method, Boundary Element Method

裂缝性储层压裂数值模拟技术研究进展

杨向同¹, 张 杨¹, 范文同¹, 巴 旦¹, 朴立文^{2,3}, 孙一流^{2,3}

¹中国石油塔里木油田分公司油气工程研究院, 新疆 库尔勒

²油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京

³中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京

作者简介: 杨向同(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事高温高压井完井改造方面的工作。

Email: Yangxt-tlm@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018年1月15日; 录用日期: 2018年2月25日; 发布日期: 2018年6月15日

摘 要

非常规储层中常常发育大量天然裂缝, 对水力压裂裂缝扩展形态影响显著。为了研究裂缝性储层中水力裂缝的扩展规律, 往往要借助数值模拟。现有的水力压裂数值模拟方法主要有扩展有限元、离散元和边界元。分别介绍了上述3种方法的基础理论、优缺点以及应用情况。通过比较各种压裂数值模拟计算方法, 在研究不同问题时要根据问题本身以及研究需求选用合适的数值方法, 进而掌握水力压裂过程中的裂缝扩展规律, 指导实际的水力压裂施工设计。

关键词

裂缝性储层, 水力压裂, 扩展有限元, 离散元, 边界元

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

以页岩气、页岩油、致密气为主的非常规油气资源在新开发储层中占据了越来越大的比重, 随着大规模储层改造技术日益成熟, 水平井分段压裂技术在现场广泛应用, 并取得了巨大的经济效益。与常规均质砂岩储层不同, 这类储层中往往发育有大量的天然裂缝[1] [2], 致使水力压裂后常形成高度分散的不规则裂缝网络[3] [4]。复杂的裂缝几何形态对压裂施工设计、压后产能分析提出了严峻的挑战。因此, 研究水力裂缝如何在天然裂缝储层中扩展成为控制压裂增产规模和效果的重中之重。

2. 裂缝性储层裂缝扩展研究

地震技术、岩心切片分析及井下成像技术均已证明, 非常规储层中发育有丰富的天然裂缝, 与低胶结强度的沉积岩层理面共同形成了储层中的弱交界面。大量的室内岩石力学试验表明, 储层非均质性及各向异性对水力裂缝的扩展及裂缝形态具有很大影响。

裂缝性储层各向异性的特点使得人工裂缝尖端应力场与常规储层扩展相比更为复杂。室内试验已证明, 地应力分布、交界面强度、弱面方位角均是影响人工裂缝穿透天然裂缝行为的重要因素。为了判别

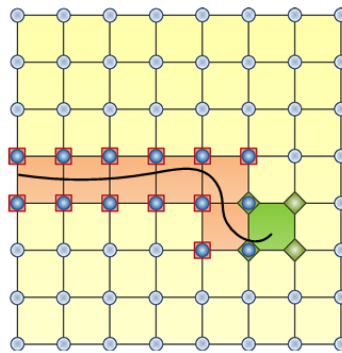
水力压裂过程中，水力缝尖扩展与天然裂缝的相互影响，国内外学者提出了诸多判别准则及研究结果，如 Warpinski 等[3]提出弱面特征、岩石内摩擦角、地应力及压裂液性能共同影响裂缝扩展路径；Wei 等[5]研究了天然裂缝胶结性质对裂缝干扰的影响，发现天然裂缝的胶结强度会显著影响裂缝的扩展行为，主要表现为穿透、停止扩展和穿透偏向扩展 3 种情况；Zhou 等[6]通过试验手段研究了天然裂缝储层中水力裂缝扩展规律，发现在高水平地应力差条件下，水力压裂易形成一条主裂缝，在低水平地应力差条件下，水力压裂易形成裂缝网络；Weng 等[7]考虑了水力裂缝与天然裂缝的作用准则以及裂缝间的应力干扰，耦合了裂缝弹性变形、高度增长、流体流动、支撑剂运移多个方程综合求解，建立了裂缝性储层中的缝网扩展模型；Lam 等[8]采用位移不连续法，模拟了裂缝发生剪切破坏时的扩展路径；Thiercelin 等[9]提出天然裂缝在受人工裂缝缝尖应力场影响下重新开启，分析了裂缝最可能开启的位置；Zhang 等[10]考虑缝内流体压力梯度的影响，假设岩石为不可渗透的均质体，研究了岩石断裂与流体流动的耦合；Wang 等[11] [12]考虑了天然裂缝的尺度特征，分别建立了在毛细管力影响下的裂缝网络对称和非对称条件下的扩展模型，研究了天然裂缝内的尺度差异对裂缝扩展的影响规律。

3. 水力压裂数值模拟研究

裂缝性储层水力压裂数值模拟技术是模拟水平井分段压裂施工条件下，人工裂缝与天然裂缝相互影响形成的裂缝网络的逢高、缝宽等几何参数以及支撑剂分布情况。其目的是为了设计和优化施工程序，为后续油田整体开发提供理论依据。水力压裂模拟可以概括为 4 个过程的耦合：岩石在高压流体作用下发生断裂，形成流动通道；压裂液在裂缝内流动，将井底压力传递到缝尖；流体在孔隙介质中的渗流；支撑剂随压裂液流动分布。由于研究的问题具有复杂性，一般采用数值方法求解。目前，关于裂缝性储层中水力裂缝扩展数值模拟方面的研究，国内外学者已经做了大量的工作，取得了较大的研究进展。主要数值模拟方法包括：扩展有限元法，离散元法以及边界元法。

3.1. 扩展有限元法

扩展有限元法是有限元法的一种变形。当研究目标区域含有裂缝时，有限元法在处理裂缝尖端的奇异性时准确性较差，同时在裂缝扩展过程中，有限元法需要实时变化整个区域的网格划分，导致计算速度缓慢。扩展有限元法通过引入带有不连续性质的局部加强函数，能够有效且准确地描述裂缝的不连续特征，同时在处理裂缝扩展问题时，不需要根据裂缝扩展路径重新构建整个区域的网格，在很大程度上提高了计算效率，同时还能更准确地反映裂缝的扩展规律(图 1)。



注：灰色圆形表示有限元标准形函数节点，红色方形表示 Heaviside 阶跃函数节点，绿色菱形表示裂缝尖端的近似解析解函数节点，蓝色圆形表示修正后的水平集函数节点。

Figure 1. Different element types in extended finite element method
图 1. 扩展有限元法中的不同单元类型

王涛等[13]采用不连续的位移场描述岩石裂缝扩展行为,在 ABAQUS 中编写相应单元子程序,将裂缝面上的压力转化为单元内力,考虑了缝内流体压力梯度,模拟结果与室内试验符合良好。Sheng 等[14]基于扩展有限元模拟了多孔介质中页岩气输运过程,该模拟器可用于缝网卸流能力评价,具有一定应用前景。Leonhart 等[15]基于扩展有限元方法结合 CCM 模型,分析了破碎储层的有效渗透率,认为储层联通程度及有效渗透率主要受缝宽影响,计算结果与现场监测的产能历史比较符合。Sepahri 等[16]模拟了定向射孔条件下水力裂缝的随机扩展行为,验证了扩展有限元在模拟水力压裂施工的有效性并研究了复杂水力裂缝扩展的敏感参数,如射孔长度、角度、岩石力学性质、水平地应力差。结果表明,大斜度井进行压裂施工在近井区域裂缝容易发生扭曲,需要更大的井底压力,杨氏模量对近井应力阴影的影响并不显著,但对裂缝扭曲半径有影响。

3.2. 离散元法

离散元方法的基本思想是将岩体分割为若干独立的单元,邻近的单元可以接触也可以分开。单元之间的相互作用力根据单元之间的重叠量,按力-位移定理求出,而单元的运动则根据该单元所受的不平衡力和不平衡力矩的大小按牛顿第二定律求出。按上述步骤循环计算,直到每一个单元均达到平衡状态。PFC 颗粒流方法是将每一个独立单元视为规则球体的离散元方法。在颗粒流方法中,本构关系遵循力-位移关系,运动方程遵循牛顿第二定律。

离散元法[17][18]是一种常用于研究非连续介质力学行为的数值方法。在岩石力学计算方面,能够更真实地表达节理岩体的力学特性,便于处理非线性变形及裂缝扩展在弱面上的问题。常常作为微观裂缝模型用于石油工程水力压裂机理研究。但对于油田整体开发的大尺度施工模拟,需要大量的计算单元,耗时较长,所得结果也并不能符合现场微地震监测结果。

Hazzard 等[19]和 Gil 等[20]通过 PFC 离散元软件研究了低渗透储层中水力压裂裂缝扩展模拟。Damjanac 等[21]将离散裂缝网络模型与胶结颗粒流模型想结合,代表天然裂缝性储层,同时借助 PFC 软件研究了裂缝储层中水力裂缝扩展。McLennan 等[22]使用 3DEC 离散元软件模拟了正交裂缝网络条件下的复杂裂缝网络扩展以及相应的产能计算。Hamidi 等[23]使用 3DEC 软件研究了不同流体性质、流体注入速率、地应力、以及岩石力学性质对水力裂缝扩展的影响。Zangeneh [24]通过比较不同的施工泵注程序,进一步验证了 UDEC 软件在模拟水力压裂裂缝扩展方面的准确性,同时表明地应力以及裂缝内部流体压力对井间距以及压裂施工的优化作用和主要影响。

3.3. 边界元法

边界元法分为直接边界元和间接边界元,目前常用的模拟裂缝扩展的边界元方法主要为间接边界元法中的位移不连续法。该方法是基于线弹性力学推导的,适用于处理包含裂缝等不连续区域的一种常用方法。尤其在处理水力压裂问题时,位移不连续法能够用简单、直接的形式描述复杂裂缝网络,同时考虑多裂缝间的相互干扰,因此被国内外的大量学者广泛采用。

边界元在一定程度上克服了由积分奇异性造成的困难,并应用到了很多工程及科学领域。其主要特点为:① 将区域问题简化为边界问题,显著降低了需要求解的自由度数,提高了计算效率;② 能够采用解析解与数值解相结合的方式,利用已知基本解作为边界积分方程的基函数,提高了计算精度;③ 已知微分算子的基本解自动满足无限远处条件,因此边界元适合于处理无限域及半无限域问题。但边界元法求解以存在相应的微分算子的基本解为前提,一定程度上限制了其使用范围和发展前景。

Olson 等[25][26]采用边界元方法,模拟了多裂缝储层条件下的水平井多段压裂裂缝扩展行为,研究了天然裂缝以及应力扰动对水力裂缝扩展的影响。Wu 等[27]采用三维边界元方法,研究了三维多裂缝扩

展时的相互干扰问题,同时比较了边界元与有限元的计算效率,发现边界元的计算速度远高于有限元的速度。Wang 等[28]借助位移不连续的方法描述了压裂过程中岩石的弹性变形,研究了流体的压缩性对裂缝扩展的影响。Weng 等[7]采用位移不连续方法,同时考虑了水力裂缝与天然裂缝干扰时的 OpenT 模型,研究了水力压裂过程中裂缝网络的扩展,该模型区别于以往缝网模型的最大不同是能够考虑压裂液流体性质及施工条件对裂缝扩展、干扰的影响。

4. 各种压裂数值模拟方法的缺陷

扩展有限元法在处理裂缝扩展问题时其裂缝扩展路径不受单元网格划分的影响,但是需要对整个研究目标进行网格划分,网格数目巨大,计算耗时长。

边界元法通过降维处理,能够将区域问题转化成边界问题,大大减少了计算量,但是边界元问题不能考虑研究对象内部的非均匀性和各向异性,同时随着计算次数的增多,边界元计算量逐渐增大,严重影响计算速度。

以 PFC3D 为代表的离散元软件在研究小尺寸试样的细观力学行为上具有一定的优势,但在模拟油田尺度的水力裂缝扩展时,由于涉及到单元众多,并不适用。

5. 结语

裂缝性储层中发育着大量的天然裂缝,显著影响着水力压裂裂缝扩展轨迹。而水力压裂数值模拟技术是研究裂缝扩展的有力工具,同时也是模拟水力压裂过程中裂缝扩展规律的重要方法。现有的水力压裂数值模拟方法主要是扩展有限元法、离散元法和边界元法,每种方法各有优缺点,在使用时要结合具体的研究对象和主要需要解决的问题进行筛选。

基金项目

中国石油塔里木油田分公司项目(201015120220)。

参考文献

- [1] Maxwell, S.C., Urbancic, T.I., Steinsberger, N., *et al.* (2002) Microseismic Imaging of Hydraulic Fracture Complexity in the Barnett Shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, 29 September-2 October 2002. <https://doi.org/10.2118/77440-MS>
- [2] Fisher, M.K., Wright, C.A., Davidson, B.M., *et al.* (2002) Integrating Fracture Mapping Technologies to Optimize Stimulations in the Barnett Shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 975-981.
- [3] Warpinski, N.R. and Teufel, L.W. (1984) Influence of Geologic Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation. *Journal of Petroleum Technology*, **39**, 209-220.
- [4] Jeffrey, R.G. (1994) Hydraulic Fracturing Experiments in the Great Northern Coal Seam. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference*, Melbourne, 7-10 November 1994. <https://doi.org/10.2118/28779-MS>
- [5] Wei, F., Ames, B.C., Bungler, A.P., *et al.* (2016) Impact of Partially Cemented and Non-Persistent Natural Fractures on Hydraulic Fracture Propagation. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, **49**, 1-8.
- [6] Zhou, J., Chen, M., Jin, Y., *et al.* (2008) Analysis of Fracture Propagation Behavior and Fracture Geometry Using a Tri-Axial Fracturing System in Naturally Fractured Reservoirs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **45**, 1143-1152. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.01.001>
- [7] Weng, X., Kresse, O., Cohen, C., *et al.* (2011) Modeling of Hydraulic-Fracture-Network Propagation in a Naturally Fractured Formation. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, The Woodlands, 24-26 January 2011. <https://doi.org/10.2118/140253-MS>
- [8] Lam, K.Y. and Cleary, M.P. (1984) Slippage and Re-Initiation of (Hydraulic) Fractures at Frictional Interfaces. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, **8**, 589-604. <https://doi.org/10.1002/nag.1610080607>
- [9] Thiercelin, M. and Makhhyu, E. (2007) Stress Field in the Vicinity of a Natural Fault Activated by the Propagation of

- an Induced Hydraulic Fracture. American Rock Mechanics Association. <https://doi.org/10.1201/NOE0415444019-c203>
- [10] Zhang, X., Thiercelin, M.J. and Jeffrey, R.G. (2007) Effects of Frictional Geological Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, College Station, 29-31 January 2007. <https://doi.org/10.2118/106111-MS>
- [11] Wang, D., Chen, M., Jin, Y., *et al.* (2016) Theoretical and Experimental Study on Fracture Network Initiation and Propagation in Shale That Considers the Capillary Effect. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **34**, 486-498. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.07.016>
- [12] 王迪, 陈勉, 金衍, 等. 考虑毛细管力的页岩储层压裂缝网扩展研究[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2017, 47(11): 66-77.
- [13] 王涛, 高岳, 柳占立, 等. 基于扩展有限元法的水力压裂大物模实验的数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014(10): 1304-1309.
- [14] Sheng, M., Li, G., Shah, S.N., *et al.* (2012) Extended Finite Element Modeling of Multi-Scale Flow in Fractured Shale Gas Reservoirs. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, 8-10 October 2012. <https://doi.org/10.2118/159919-MS>
- [15] Leonhart, D., Timothy, J.J. and Meschke, G. (2015) Determination of Effective Transport Properties of Fractured Rocks Using the Extended Finite Element Method and Micromechanics. *International Society for Rock Mechanics*, **10**, 124-132.
- [16] Sepehri, J. (2014) Application of Extended Finite Element Method (XFEM) to Simulate Hydraulic Fracture Propagation from Oriented Perforations. PhD Thesis, Texas Tech University.
- [17] Iwashita, K. and Oda, M. (2000) Micro-Deformation Mechanism of Shear Banding Process Based on Modified Distinct Element Method. *Powder Technology*, **109**, 192-205. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00236-3](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00236-3)
- [18] Tanaka, H., Momozu, M., Oida, A., *et al.* (2000) Simulation of Soil Deformation and Resistance at Bar Penetration by the Distinct Element Method. *Journal of Terramechanics*, **37**, 41-56. [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(99)00013-0)
- [19] Hazzard, J.F., Young, R.P. and Oates, S.J. (2002) Numerical Modeling of Seismicity Induced by Fluid Injection in a Fractured Reservoir. *Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium Mining and Tunnel Innovation and Opportunity*, Toronto, 1023-1030.
- [20] Gil, I., Damjanac, B., Nagel, N. and Guo, Q. (2010) Geomechanical Evaluation of Solids Injection. *44th U.S. Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*, Salt Lake City, 27-30 June 2010, ARMA 10-399.
- [21] Damjanac, B., Gil, I., Pierce, M., Sanchez, M., Van As, A. and McLennan, J. (2010) A New Approach to Hydraulic Fracturing Modeling in Naturally Fractured Reservoirs. *44th U.S. Rock Mechanics Symposium and 5th U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium*, Salt Lake City, 27-30 June 2010, ARMA 10-400.
- [22] McLennan, J., Tran, D., Zhao, N., *et al.* (2010) Modeling of Fluid Invasion and Hydraulic Fracture Propagation in Naturally Fractured Rock: A Three-Dimensional Approach. Society of Petroleum Engineers, *SPE* 127888. <https://doi.org/10.2118/127888-MS>
- [23] Hamidi, F. and Mortazavi, A. (2012) Three Dimensional Modeling of Hydraulic Fracturing Process in Oil Reservoirs. *46th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, Chicago, 24-27 June 2012, ARMA 12-283.
- [24] Zangeneh, N. (2013) Numerical Simulation of Hydraulic Fracture, Stress Shadow Effects and Induced Seismicity in Jointed Rock. PhD Thesis, University of British Columbia, Columbia.
- [25] Olson, J.E. (2008) Multi-Fracture Propagation Modeling: Applications to Hydraulic Fracturing in Shales and Tight Gas Sands. *The 42nd U.S. Rock Mechanics Symposium*, San Francisco, 29 June-2 July 2008.
- [26] Olson, J.E. and Taleghani, A.D. (2009) Effects of Frictional Geological Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation. <https://doi.org/10.2118/106111-MS>
- [27] Wu, K., Olson, J.E. and Balhoff, M.T. (2015) Study of Multiple Fracture Interaction Based on an Efficient Three-Dimensional Displacement Discontinuity Method. American Rock Mechanics Association, **3**, 2345-2353.
- [28] Wang, D., Chen, M., Jin, Y., *et al.* (2018) Bunker. Impact of Fluid Compressibility for Plane Strain Hydraulic Fractures. *Computers and Geotechnics*, **97**, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.comptgeo.2017.12.009>

[编辑] 帅群

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2471-7185，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org