

复杂水力裂缝网络延伸规律研究进展

赵立强¹, 刘飞¹, 王佩珊², 刘平礼¹, 罗志锋¹, 李年银¹

(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 西南油气田分公司勘探事业部, 四川 成都 610000)

摘要:随着天然裂缝性储层、煤层气、页岩气、致密砂岩气、致密油和复杂岩性低渗透油气藏勘探开发进程的加快,大规模体积压裂实践及微地震裂缝实时监测技术对水力裂缝延伸模拟提出了巨大挑战。复杂网络裂缝延伸受储层岩性、岩石力学性质、地质力学和天然裂缝特征等影响,文中综述了天然裂缝对水力诱导裂缝延伸影响的国内外研究进展。水力诱导裂缝与天然裂缝相交前、相交时和相交后的复杂力学行为决定了水力诱导裂缝的复杂延伸规律:水力裂缝尖端逼近时,诱导应力场会导致胶结天然裂缝张性或剪性脱粘;相交时,天然裂缝可能出现剪切破裂导致压裂液大量滤失、或水力裂缝穿过天然裂缝沿原方向延伸、或转向沿天然裂缝延伸并在其端部或弱结构点起裂;相交后,可能出现多个裂缝尖端同时延伸的情况,形成复杂网络裂缝。真三轴压裂测试系统结合工业CT扫描、声发射装置、X-衍射等是研究复杂网络裂缝形成机理的主要试验手段;而非正规裂缝模型和扩展有限元方法(XFEM)是模拟复杂网络裂缝延伸的主要数值手段。XFEM是处理含裂纹等不连续问题的最有效方法,并具有有限元方法的所有优点,考虑到裂缝内流体压力是水力裂缝延伸的驱动力,故基于XFEM的渗流-应力-裂缝延伸全耦合研究是未来体积压裂复杂网络裂缝延伸模拟的重要发展方向。

关键词:延伸规律;相交作用准则;渗流-应力-裂缝延伸耦合;扩展有限单元法;网络裂缝;天然裂缝

中图分类号:TE357

文献标识码:A

A review of creation and propagation of complex hydraulic fracture network

Zhao Liqiang¹, Liu Fei¹, Wang Peishan², Liu Pingli¹, Luo Zhifeng¹, Li Nianyin¹

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Exploration Utility Department, Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: With the accelerated process of the exploration and exploitation of natural fractured reservoir, coal bed methane, shale gas, tight gas, tight oil and complex lithology reservoir with low and/or ultra-low permeability, simulation of hydraulic fracture propagation is faced with big challenges from volume fracturing and real-time microseismic monitoring of hydraulic fracture. The propagation behaviors of complex fracture network are affected by reservoir lithology, geomechanics and natural fracture characteristics, etc. Research on the influences of natural fractures on the propagation of hydraulic fractures both at home and abroad was reviewed in this paper. The mechanical behaviors before, during and after the intersection of hydraulic fracture with pre-existing natural fracture determine the propagation of hydraulic fractures and the creation of fracture network. Before their intersection, tensile or shear debonding of cemented pre-existing natural fractures may start when induced fractures tip approaching. During their intersection, the natural fractures might be sheared to cause abundant fracturing fluid filtration, while the hydraulic fractures might penetrate natural fractures and propagate along the original path, or be arrested to propagate along the direction of natural fractures and re-initiate at its terminal or weak structure point. After their intersection, a complex fracture network may be formed with the simultaneous propagation of multiple fracture tips. True triaxial fracturing test system, combined with industrial computed tomography (CT) scan, acoustic emission device and X-ray diffraction, is the principal laboratorial means of studying the generation mechanism of complicated fracture network, while unconventional fracture model and extended finite element method (XFEM) are the main numerical methods for simulation of complex fracture network. XFEM is the most effective approach to deal with discontinuous analysis especially crack propagation problem, and has all the advantages of the finite element

收稿日期:2014-01-15;修订日期:2014-05-29。

第一作者简介:赵立强(1957—),男,教授、博士生导师,油气藏增产改造理论与技术、采油气工程。E-mail:zhaolq@vip.163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05030-005-08)。

methods. As fracture fluid pressure is the driving force for hydraulic fracture propagation, XFEM-based seepage flow-stress-fracture propagation coupling is the future trend of complex fracture network propagation simulation.

Key words: propagation pattern, intersection criterion, coupled seepage-stress-fracture propagation, extended finite element method, network fracture, natural fracture

20世纪60年代以来,人们开始关注裂缝性油气藏压裂过程中天然裂缝对水力裂缝延伸的影响。在诸多水力压裂实践中均观测到多重水力裂缝延伸现象,特别是在天然裂缝性储层中,当延伸的水力裂缝与天然裂缝相交时,水力裂缝可能会分叉,这个过程是自我强化的过程^[1],FracProPT等商业压裂软件常采用等效多裂缝对其进行处理,形成类似于“千层饼”或“仙人掌”状的多重水力裂缝。Mahrer^[2]认为多裂缝延伸最先发生于近井地带,受天然裂缝和地层弱面影响,易形成裂缝带,并首次提出了网络裂缝的概念;McDaniel^[3]归纳了近井区域延伸的几种多裂缝形态,提出了径向缝网延伸概念图;Warpinski和Teufel^[4-5]进行地质非连续体对水力裂缝延伸影响的矿场实验,观察到了6~9 m裂缝带,提出了远井缝网构想图;微地震监测表明Barnett页岩水力压裂形成了复杂的网络裂缝^[6];Fisher^[7-8]认为水力裂缝可分为:平面双翼裂缝、复杂多裂缝和极为复杂的网络裂缝。

随着对水力压裂复杂形态裂缝延伸的深入认识,将缝网压裂的思想引入页岩气、煤层气、致密砂岩气、裂缝性储层的增产改造,形成了体积压裂改造理论,吴奇^[9]等给出了广义和狭义上的体积改造定义。体积改造形成的是复杂网状裂缝系统,裂缝的起裂与延伸包含张性、剪切、滑移、错断等复杂的力学行为,主要受就地应力场、孔隙流体压力、岩石矿物组成、岩石力学性质、天然裂缝发育程度及特征等影响。经典压裂理论认为水力裂缝为对称双翼平面裂缝,不能满足体积改造多裂缝延伸和复杂网络裂缝延伸模拟的要求,迫切需要一套能够解决复杂网络裂缝延伸的理论和方法来指导体积压裂设计,为我国页岩油气等非常规油气藏大规模开发奠定理论基础和技术储备。本文就天然裂缝对水力裂缝延伸影响的室内试验、判断准则、模拟模型等的研究进展进行综述,并对今后缝网压裂理论模拟和现场实施方面提出了展望。

1 裂缝延伸实验研究及判别准则

Gu^[10]将天然裂缝对水力裂缝延伸的影响分为两个阶段(图1):第一阶段,水力裂缝尖端与天然裂缝相交,但由于流体滞后效应导致压裂液尚未到达该交点,交点处流体净压力为零(图1a)。存在两种可能:①天然裂缝发生剪切滑移或捕获水力裂缝阻止其继续

延伸(图1b);②水力裂缝直接穿过天然裂缝(图1c)。第二个阶段,压裂液抵达天然裂缝,交点处流体净压力升高。若第一阶段为b,则压裂液进入并张开天然裂缝,使其成为水力裂缝的一部分(图1d)。若第一阶段为c,根据流体压力与作用在天然裂缝上的正应力的相对大小关系,可分成两种表现形式:①若小于,则天然裂缝仍处于闭合状态(图1e);②若大于,则天然裂缝张开,在合适的条件下可使多个裂缝尖端同时延伸(图1f)。

实际上,水力裂缝延伸时,会在裂缝尖端附近产生较大的诱导应力(包括张应力和剪切应力),该诱导应力可能导致天然裂缝张性或剪性脱粘,从而影响到后续水力裂缝的延伸(图2)^[11]。

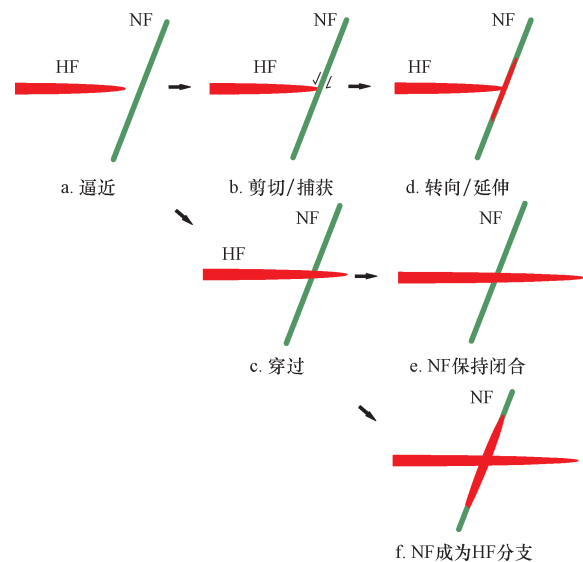


图1 水力裂缝和天然裂缝之间的相互作用过程分解^[10]

Fig. 1 Interaction process between hydraulic fractures (HF) and natural fractures (NF)^[10]

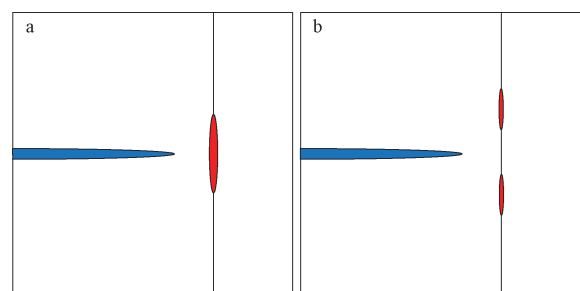


图2 水力裂缝逼近时天然裂缝行为示意图^[11]

Fig. 2 Schematic diagram showing natural fracture behaviors when hydraulic fracture approaching^[11]

a. 拉伸断裂张开; b. 剪切破坏张开

1.1 水力裂缝延伸实验

Lamont 和 Jessen^[12]对6种含天然裂缝的岩石(包括水泥、石灰石、露头岩石和地下砂岩等)进行了107次水力裂缝延伸实验。结果表明:水力裂缝会发生一定的转向并以适当角度与天然裂缝相交,之后转向并且垂直穿过预置裂缝,离开的位置受岩石基质薄弱点影响,最后逐渐转向至平行于初始路径方向。

Daneshy^[13]研究了天然裂缝尺度和性质(张开或闭合)对水力裂缝延伸的影响。Anderson^[14]研究了天然裂缝面摩擦系数和作用在天然裂缝面上的正应力对水力裂缝延伸的影响。

Blanton^[15]的研究表明只有在高应力差和大逼近角下水力裂缝才会穿过天然裂缝延伸,而低应力差和小逼近角下,水力裂缝被张开天然裂缝捕获延伸。

Warpinski^[16]开展的矿场试验研究表明:水力裂缝存在三种延伸模式:①穿过天然裂缝;②被张开破裂的天然裂缝阻止延伸;③被剪切破裂的天然裂缝阻止延伸。

Olson^[17]在石膏岩样中嵌入不同尺寸的玻片作为非渗透预置裂缝,试验中观察到旁通、穿过和转向三种延伸模式。

Chitrala^[18]等采用声发射装置测量了在不同水平应力下的致密砂岩裂缝延伸机理,发现局部区域剪切破裂比张性破裂更常见。

Renard^[19]等采用X-射线显微层析法观察了水力裂缝的三维延伸形态,研究表明岩样中的硬结构(如颗粒)和弱结构(如孔隙、微裂缝等)都会影响水力裂缝的最终延伸路径。

国内,赵益忠^[20]等对玄武岩、巨砾岩和泥灰岩3种不同岩性地层水力压裂裂缝扩展规律进行了试验研究。

陈勉^[21-29]研究团队采用水泥和石英砂浇筑试件或天然岩样,浇筑时用白纸模拟不同产状天然裂缝(人造试件),利用真三轴压裂装置系统研究了天然裂缝存在对水力裂缝的延伸的影响,并创新的考虑了天然裂缝倾角对相交作用模式的影响。

Tiankui Guo^[30]等首次利用真三轴测试系统对页岩露头进行水力压裂模拟实验,利用大尺度非破坏性测试系统对压后岩心裂缝形态进行高能CT扫描。研究表明:当水平主应力差小于9 MPa时,水力裂缝容易沿着天然裂缝延伸,形成复杂网络裂缝,且随应力差的增大(<9 MPa),水力主裂缝能连通更多的天然裂缝,形成相对更复杂的裂缝系统;当压裂液排量和粘度的乘积达到 $10^{-9} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,更有利于形成复杂网络裂缝,但过大或过小都不利;且重复压裂有助于

形成不同于之前裂缝的新裂缝体系,能达到更好的压裂效果。

1.2 裂缝延伸判别准则

为了评估在水力裂缝与天然裂缝交点附近多条裂缝的延伸情况,需要引入判断裂缝是否延伸及延伸方向的准则。

Warpinski^[4]等指出了水平应力差、相交角度和施工压力对水力裂缝和天然裂缝之间的相互作用有所影响,在没有考虑后续泵注过程的情况下,给出了相应破裂准则(W-T准则)。

Blanton^[31]以水力裂缝与天然裂缝作用区域的应力分布为基础,得到了水力裂缝与天然裂缝相互作用判断准则的弹性解。

任岚^[32]组合了Blanton准则和W-T准则,将天然裂缝对水力的延伸的影响分为4个模式。

翁定为^[33]等基于W-T准则给出了天然裂缝发生张性和剪切破裂所需的流体净压力公式。

$$p > \sigma_n, |\tau| > \tau_0 + \mu_f(\sigma_n - p) \quad (1)$$

当天然裂缝发生张性破裂时,所需缝内流体净压力为:

$$p_{\text{net}}(x, t) > \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2}(1 - \cos 2\theta) \quad (2)$$

当天然裂缝为剪切破裂时,所需缝内流体净压力为:

$$p_{\text{net}}(x, t) > \frac{\tau_0}{\mu_f} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2\mu_f}(\mu_f - \sin 2\theta - \mu_f \cos 2\theta) \quad (3)$$

式中: p 和 p_{net} 分别为裂缝内的流体压力和流体净压力,MPa; σ_n 和 τ 为远场应力作用在天然裂缝上的正应力和剪应力,MPa; τ_0 为天然裂缝的内聚力,MPa; μ_f 为天然裂缝面摩擦系数; σ_H 和 σ_h 为最大和最小水平主应力,MPa; θ 为天然裂缝与水力裂缝(平行于最大水平主应力)夹角,°。

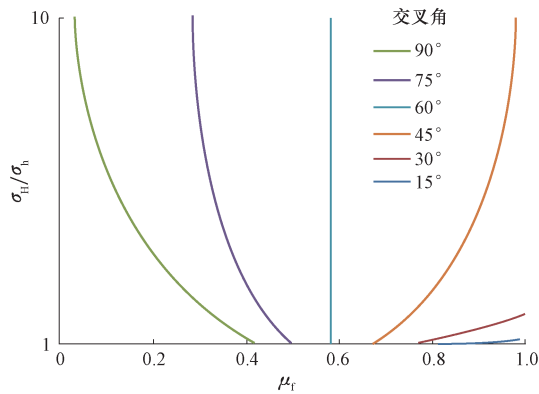
Hossain^[34]等基于摩尔库仑线弹性剪切破裂理论给出了裂缝发生剪切破裂的准则。

Olson^[35]等采用边界元法研究了水力裂缝与天然裂缝之间的相互作用,认为天然裂缝与人工裂缝的夹角、拟净压力系数是影响网状裂缝形成的主要因素。拟净压力系数 R_n 的定义为:

$$R_n = \frac{p_{\text{net}} - \sigma_h}{\sigma_H - \sigma_h} \quad (4)$$

Rehshaw 和 Pollard^[36]基于裂缝尖端诱导应力的线弹性断裂力学解给出了水力裂缝穿过正交天然裂缝的判断准则(R-P准则)。

$$\frac{-\sigma_H}{T_0 - \sigma_h} > \frac{0.35 + \frac{0.35}{\mu_f}}{1.06} \quad (5)$$

图3 应力比大于1时不同交叉角情况下的交叉准则图^[10]Fig. 3 Plot of crossing criterion for stress ratio > 1 at several intersection angles^[10]

式中: T_0 为岩石基质的抗张强度, MPa。

由于天然裂缝走向通常与最大水平主应力方向不一致, 即水力裂缝与天然裂缝的逼近角在 0 到 90° 之间。Gu 和 Weng^[10,37] 将 R-P 准则扩展到了非正交情形 (G-W 准则)。图 3 为不同逼近角下 G-W 准则的计算结果, 曲线右侧区域表示水力裂缝穿过天然裂缝^[10]。

程万等^[29]根据断裂力学理论, 建立了三维空间中水力裂缝穿过天然裂缝的判别准则, 该准则与 G-W 准则的区别在于考虑了天然裂缝的倾角, 并与其试验研究结果和前人研究结果吻合良好。

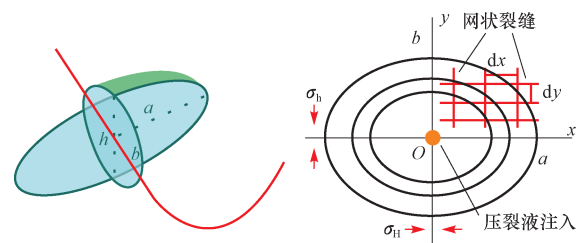
而在有限元或扩展有限元分析中, 通常采用线弹性断裂力学中常用的最大周向应力准则、最小应变能密度准则、最大能量释放率准则和最大张应力准则等^[38-40]。

2 网络裂缝延伸模型

经典压裂理论认为水力裂缝为对称双翼平面形态, 该假设不符合复杂网络裂缝延伸的实际情况, 不适合继续用来模拟复杂缝网。

2.1 线网模型 (Wire-mesh Model)

为了克服常规裂缝模型的限制, Xu^[41-43]、Meyer 和 Bazan^[44]等在模拟缝网的延伸过程中考虑了两组平行、隔开的正交裂缝, 建立了线网 (Wire-mesh) 模型。该模型为半解析模型, 认为页岩气藏水平井压裂产生的裂缝网络是沿井筒对称的椭球体, 通过将该椭球体划分为数条正交的水平、垂直均匀截面来描述高渗裂缝 (图 4)。其优点在于提供了一种缝网尺寸和缝网中支撑剂空间分布的估计方法, 且它所需要的运算量不大, 适合实时应用。不足在于: ①它必须将油藏改造区域近似为沿井筒对称的椭球体, 不能模拟不规则的裂

图4 线网模型示意图^[43]Fig. 4 Schematic diagram of wire-mesh model^[43]

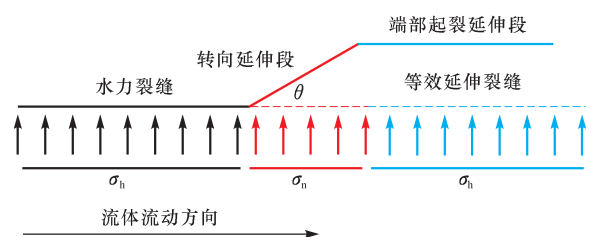
缝形态; ②没有建立判断准则, 直接地认为天然裂缝与人工裂缝相连接; ③没有考虑人工裂缝之间的相互干扰; ④裂缝间距和改造体积由微地震监测结果确定, 仅限于本段压裂施工模拟, 计算结果不具有普遍适用性。

2.2 等效裂缝模型

Potluri^[45]和赵金洲^[46]考虑水力裂缝与天然裂缝相交作用后可能发生转向延伸的情况, 结合相交作用准则, 在常规二维 PKN 模型的基础上建立了裂缝非平面延伸的等效模型。其核心思想在于将沿天然裂缝转向延伸段旋转至水力裂缝主方向, 从而将非平面延伸裂缝转化为平面延伸裂缝, 采用 PKN 模型进行求解, 转化原理如图 5 所示。等效裂缝模型将水力裂缝在天然裂缝处的转向延伸段等效为平面裂缝延伸的一部分, 该等效方法不能模拟多个裂缝尖端同时延伸的情况。

2.3 非常规裂缝模型 (UFM 模型)

Kresse 和 Weng^[47-52]等在拟三维裂缝延伸模型的基础上, 考虑天然裂缝与水力诱导裂缝的相互作用及相邻水力裂缝之间的应力干扰, 建立了非常规裂缝模型 (Unconventional Fracture Model, UFM), 用以模拟体积改造中复杂裂缝网络的延伸。UFM 模型与拟三维裂缝模型具有相似的假设条件和控制方程, 控制方程主要包括三个部分: ①裂缝网络中流体流动的方程, ②裂缝变形方程, ③裂缝延伸准则 (采用 G-W 准则判断水力裂缝与天然裂缝的相交作用)。UFM 模型的优点在于其能模拟天然裂缝和水力裂缝之间的相互作用, 即确定水力裂缝是被天然裂缝捕获还是直接穿过

图5 水力裂缝转向等效裂缝延伸路径^[46]Fig. 5 Equivalent fracture propagation for dilation hydraulic fractures^[46]

天然裂缝;另外,还能同时模拟多个裂缝尖端同时延伸。

考虑到计算量和工程精度要求,UFM 模型假设天然裂缝和水力裂缝均是垂直的,即该模型对天然裂缝垂直或近似垂直的油气藏的水力裂缝延伸规律模拟结果较为准确。当裂缝变形方程从拟三维简化为 PKN 时,UFM 计算结果如图 6 所示。

2.4 多维虚拟内键模型 (VMIB)

Zhang^[53]等采用多维虚拟内键理论 (Virtual Multi-dimensional Internal Bond, VMIB),将材料认为是微观



图 6 垂直的天然裂缝性储层中形成的水力裂缝网络^[52]

Fig. 6 Hydraulic fracture net-work forming in fractured reservoirs with vertical natural fractures^[52]

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^h(x) = & \sum_{i \in S} N_i(x) \mathbf{u}_{ai} + \underbrace{\sum_{j=1}^{N_c} \sum_{i \in S_{Hj}} N_i(x) [H_j(x) - H_j(x_i)] \mathbf{u}_{bi,j}}_{\text{第 } j \text{ 条裂纹的裂纹贯穿单元加强}} + \\ & \underbrace{\sum_{j=1}^{N_l} \sum_{i \in S_{Cj}} N_i(x) \left\{ \sum_{l=1}^4 [\psi_j^l(x) - \psi_j^l(x_i)] \mathbf{u}_{ci,j}^l \right\}}_{\text{第 } j \text{ 个裂尖的裂尖单元加强}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{N_x} \sum_{i \in S_{lj}} N_i(x) J_j(x) \mathbf{u}_{di,j}}_{\text{第 } j \text{ 个裂纹交点的裂纹交叉单元加强}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为单元内任意点的位移自由度向量; $\mathbf{u}_\alpha$ ($\alpha = a, b, c, d$) 分别为常规节点自由度、阶跃函数加强节点自由度、裂尖函数加强节点自由度和裂纹汇交函数加强节点自由度; $N(x), H(x), \psi(x), J(x)$ 分别为常规节点插值函数、裂纹贯穿单元节点附加阶跃插值函数、裂尖单元节点附加渐进插值函数和裂纹汇交单元附加汇交插值函数; S 为所有节点的集合; S_{Hj}, S_{Cj}, S_{lj} 分别为第 j 条裂纹的阶跃函数加强节点集,第 j 个裂尖的渐进函数加强节点集和第 j 个裂纹交点的汇交函数加强节点集。

水力裂缝延伸与常规裂纹延伸问题的主要区别在于裂缝内流体压力是裂纹延伸的主要驱动力,故 XFEM 模拟水力裂缝延伸的关键在于如何施加裂纹内流体压力。Dahi-Taleghani^[11,61]将 XFEM 与裂缝内流

体流动间接耦合计算了裂缝性储层的水力裂缝的延伸。Keshavarzi^[39,62]也采用 XFEM 来模拟了天然裂缝对水力裂缝延伸的影响。Gordeliy^[63]提出了一种基于 XFEM 的流固耦合方案来模拟复杂网络裂缝的延伸问题。Mohammadnejad^[64]提出了一种基于 XFEM 的粘聚裂纹模型 (Cohesive Crack Model) 来模拟水力裂缝的延伸。Zuorong Chen^[65-66]通过 ABAQUS 用户子程序接口 UEL 定义二维四边形平面应变单元,在单元的合适节点加入额外的流体压力自由度来描述粘稠流体在裂纹中的流动及对裂纹延伸的驱动作用,结合 XFEM 的优点解决二维水力裂缝延伸问题。Lamb^[67-69]将扩展有限单元法与双孔双渗模型结合,将含裂缝岩体划分为具有相同尺寸和坐标的基岩单元和裂缝单元,基岩

上由材料颗粒组成,材料颗粒由虚拟内键联接,材料颗粒通过随机分布的网状结构相互作用,宏观上的本构关系直接由颗粒内聚力准则得到(将材料破裂准则隐含在本构关系中)。而天然裂缝区采用等效粘合区替代,该区内材料颗粒微观尺度间距远大于均质岩石基质区颗粒间距,从而可以忽略颗粒相互作用,形成宏观尺度的天然裂缝。裂缝壁面的接触作用和摩擦作用采用两节点接触单元法,并引入影响函数来描述接触颗粒附近的位移。

对于水力裂缝内流体流动,基于有限元法,将作用在水力裂缝壁面的流体压力转化为作用在单元节点处的等效节点力。裂缝网络的延伸采用局部应变来识别失效单元,从而将天然裂缝与水力裂缝相互作用引起的裂缝延伸准则隐去。

2.5 扩展有限元模型 (XFEM)

Moes 等^[54-55]通过改进有限元方法的插值形函数,提出扩展有限单元法 (eXtended Finite Element Method, XFEM) 来解决裂纹等不连续问题。XFEM 成为迄今为止求解不连续力学问题最有效的数值方法^[56-60],逐渐引起水力压裂工作者的关注。

XFEM 通过在传统有限元表达中增加广义节点自由度和相应的插值基函数提高数值描述精度,并解决了有限元网格划分困难的问题。

体流动间接耦合计算了裂缝性储层的水力裂缝的延伸。Keshavarzi^[39,62]也采用 XFEM 来模拟了天然裂缝对水力裂缝延伸的影响。Gordeliy^[63]提出了一种基于 XFEM 的流固耦合方案来模拟复杂网络裂缝的延伸问题。Mohammadnejad^[64]提出了一种基于 XFEM 的粘聚裂纹模型 (Cohesive Crack Model) 来模拟水力裂缝的延伸。Zuorong Chen^[65-66]通过 ABAQUS 用户子程序接口 UEL 定义二维四边形平面应变单元,在单元的合适节点加入额外的流体压力自由度来描述粘稠流体在裂纹中的流动及对裂纹延伸的驱动作用,结合 XFEM 的优点解决二维水力裂缝延伸问题。Lamb^[67-69]将扩展有限单元法与双孔双渗模型结合,将含裂缝岩体划分为具有相同尺寸和坐标的基岩单元和裂缝单元,基岩

单元的渗透率为常数,裂缝单元的渗透率采用张量形式表示,裂缝和基岩的流体交换项(滤失项)采用窜流函数表征,并与 XFEM 耦合模拟了裂缝性多孔介质的渗流、变形和裂缝延伸过程。

2.6 电磁场监测模型(EM 模型)

Cuevas^[70]提出了通过监测水力压裂过程中记录的电磁场(Electro-Magnetic)数据来模拟张开裂缝在地层中的延伸特征。其原理是裂缝壁面流体携带电荷流动产生电流,从而在地层中产生诱导电磁场,压裂过程中监测到的电磁场取决于裂缝性质(如裂缝几何尺寸和裂缝位置)、压裂液和地层流体性质(如导电性)等,故可以通过电磁场诊断裂缝的延伸过程。

3 认识与展望

实际上,天然裂缝在地层中呈三维分布,与水力裂缝相交后力学行为将更加复杂,可能存在张开、剪切、撕裂及其复合三维破裂行为。目前主要从室内试验研究了二维垂直天然裂缝对水力裂缝延伸的影响,三维天然裂缝的影响尚处于探索阶段,将真三轴压裂测试系统与工业 CT 扫描、声发射装置、X 衍射等结合是室内试验研究复杂网络裂缝形成机理的主要发展方向。

考虑计算效率和工程精度的需求,忽略微尺度天然裂缝的影响,对一定尺度以上的天然裂缝在地层中的三维分布进行精细描述^[71-73]是复杂水力裂缝网络延伸模拟和体积压裂优化设计的基础。

虽然 UFM 模型具有较强的实用价值,但难以准确模拟复杂天然裂缝分布时的应力干扰,以及未考虑天然裂缝的倾角等。而扩展有限单元法是处理含有弱胶结面、材料界面、天然裂缝等瑕疵的裂纹延伸问题的最有效数值手段,XFEM 将在复杂水力裂缝网络延伸模拟中大放异彩,但需要基于 XFEM 的渗流-应力耦合理论的支持。

基于天然裂缝三维分布的精细地质力学描述^[74-76],结合渗流-应力耦合的 XFEM 模型来模拟压裂液在水力裂缝中和复杂介质中的流动规律,充分考虑压裂液滤失后孔隙流体压力的影响,再现支撑剂在裂缝网络中的铺置规律,充分考虑天然裂缝与水力诱导裂缝相交前、相交时和相交后的应力行为,并能够兼顾运算时间的三维模型是模拟网络裂缝延伸的重要发展方向。另外,借鉴其他学科的最新研究成果,通过实时监测水力压裂过程中的某些状态参数,再现天然裂缝性储层网络裂缝延伸规律也是一个重要发展方向。同时,大量非常规油气藏缝网压裂的现场应用,基于压裂施工曲线拟合、停泵后压力降落曲线拟合、微地震监测

建立的网络裂缝延伸模型是今后的又一重要发展方向。

大规模体积压裂是非常规油气藏重要的增产开发手段,随着大量高钙质非常规复杂岩性油气藏、碳酸盐岩胶结天然裂缝性储层和致密碳酸盐岩油气藏的勘探开发,应重视体积酸压在增产改造中的重要地位。酸液在剪切破裂的天然裂缝中大量滤失能够有效刻蚀裂缝壁面,形成酸蚀裂缝,增加网络裂缝的复杂性,同时可避免由于砂堵引起的工程事故;另外,酸岩反应将降低岩石强度,也有利于复杂网络裂缝的形成。

参 考 文 献

- [1] Gas Research Institute. Advanced stimulation technical description, GRI-95/0258; multiple hydraulic fractures[M]. 1995.
- [2] Mahrer K D. A review and perspective on far-field hydraulic fracture geometry studies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, 24(1): 13-28.
- [3] McDaniel B W, McMechan D E, Stegent N A. Proper use of proppant slugs and viscous gel slugs can improve proppant placement during hydraulic fracturing applications[J]. 2001, SPE 71661: 1-16.
- [4] Warpinski N R, Teufel L W. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation (includes associated papers 17011 and 17074)[J]. Journal of Petroleum Technology, 1987, 39(2): 209-220.
- [5] Teufel L W, Clark J A. Hydraulic fracture propagation in layered rock; experimental studies of fracture containment[J]. SPE Journal, 1984, 24(1): 19-32.
- [6] Urbancic T I, Maxwell S C. Microseismic imaging of fracture behavior in naturally fractured reservoirs[J]. 2002, SPE 78229: 1-7.
- [7] Fisher M K, Wright C A, Davidson B M, et al. Integrating fracture mapping technologies to improve stimulations in the Barnett Shale [J]. SPE Production & Facilities, 2005, 20(2): 85-93.
- [8] Fisher M K, Heinze J R, Harris C D, et al. Optimizing horizontal completions in the Barnett shale with microseismic fracture mapping[J]. Journal of Petroleum Technology, 2005, 57(3): 41-42.
- [9] 吴奇, 胥云, 王晓泉, 等. 非常规油气藏体积改造技术——内涵、优化设计与实现[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 352-357. Wu Qi, Xu Yun, Wang Xiaoquan, et al. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs; connotation, optimization design and implementation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 352-357.
- [10] Gu H, Weng X, Lund J B, et al. Hydraulic fracture crossing natural fracture at nonorthogonal angles; a criterion and its validation[J]. SPE Production & Operations, 2012, 27(1): 20-26.
- [11] Dahi-Taleghani A. Analysis of hydraulic fracture propagation in fractured reservoirs; An improved model for the interaction between induced and natural fractures[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2009.
- [12] Lamont N, Jessen F W. The effects of existing fractures in rocks on the extension of hydraulic fractures[J]. Journal of Petroleum Technology, 1963, 15(2): 203-209.
- [13] Daneshy A A. Hydraulic fracture propagation in the presence of planes of weakness[J]. 1974, SPE 4852: 1-8.
- [14] Anderson G D. Effects of friction on hydraulic fracture growth near unbonded interfaces in rocks [J]. SPE Journal, 1981, 21(1): 21-29.
- [15] Blanton T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures[J]. 1982, SPE/DOE10847: 559-561.

- [16] Warpinski N R. Hydraulic fracturing in tight, fissured media [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1991, 43(2): 146 – 151.
- [17] Olson J E, Bahorich B, Holder J. Examining hydraulic fracture: natural fracture interaction in hydrostone block experiments [J]. 2012, SPE 152618; 1 – 10.
- [18] Chitrala Y, Moreno C, Sondergeld C, et al. An experimental investigation into hydraulic fracture propagation under different applied stresses in tight sands using acoustic emissions [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, 108: 151 – 161.
- [19] Renard F, Bernard D, Desrues J, et al. 3D imaging of fracture propagation using synchrotron X-ray microtomography [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286(1): 285 – 291.
- [20] 赵益忠, 曲连忠, 王幸尊, 等. 不同岩性地层水力压裂裂缝扩展规律的模拟实验 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(3): 63 – 66.
Zhao Yizhong, Qu Lianzhong, Wang Xingzun, et al. Simulation experiment on prolongation law of hydraulic fracture for different lithologic formations [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2007, 31(3): 63 – 66.
- [21] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(增): 868 – 872.
Chen Mian, Pang Fei, Jin Yan. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(S): 868 – 872.
- [22] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 多裂缝储层水力裂缝扩展机理试验 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(4): 51 – 54.
Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, et al. Experiment of propagation mechanism of hydraulic fracture in multi-fracture reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008, 32(4): 51 – 54.
- [23] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 裂缝性储层水力裂缝扩展机理试验研究 [J]. *石油学报*, 2007, 28(5): 109 – 113.
Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, et al. Experimental study on propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 109 – 113.
- [24] 陈勉, 周健, 金衍, 等. 随机裂缝性储层压裂特征实验研究 [J]. *石油学报*, 2008, 29(3): 431 – 434.
Chen Mian, Zhou Jian, Jin Yan, et al. Experimental study on fracturing features in naturally fractured reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 431 – 434.
- [25] 姚飞, 陈勉, 吴晓东, 等. 天然裂缝性地层水力裂缝延伸物理模拟研究 [J]. *石油钻采工艺*, 2008, 30(3): 83 – 86.
Yao Fei, Chen Mian, Wu Xiaodong, et al. Physical simulation of hydraulic fracture propagation in naturally formations [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2008, 30(3): 83 – 86.
- [26] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 压裂中天然裂缝剪切破坏机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增1): 2637 – 2641.
Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, et al. Mechanism study of shearing slippage damage of natural fracture in hydraulic fracturing [J]. 2008, 27(S1): 2637 – 2641.
- [27] Zhou Jian, Xue Chengjin. Experimental investigation of fracture interaction between natural fractures and hydraulic fracture in naturally fractured reservoirs [J]. 2011, SPE 142890; 1 – 12.
- [28] Zhou Jian, Chen Mian, Jin Yan, et al. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(7): 1143 – 1152.
- [29] 程万, 金衍, 陈勉, 等. 三维空间中水力裂缝穿透天然裂缝的判别准则 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2): 1 – 6.
- Cheng Wan, Jin Yan, Chen Mian, et al. A criterion for identifying hydraulic fractures crossing natural fractures in 3D space [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 1 – 6.
- [30] Guo Tiankui, Zhang Shicheng, Qu Zhanqing, et al. Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume [J]. *Fuel*, 2014, 128: 373 – 380.
- [31] Blanton T L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs [J]. 1986, SPE 15261; 613 – 627.
- [32] 任岚. 裂缝性油气藏缝网压裂机理研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2011.
Ren Lan. Mechanism of fracture-network fracturing for naturally fractured reservoirs [D]. Chengdu: Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, 2011.
- [33] 翁定为, 雷群, 胥云, 等. 缝网压裂技术及其现场应用 [J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 280 – 284.
Weng Dingwei, Lei Qun, Xu Yun, et al. Network fracturing techniques and its application in the field [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(2): 280 – 284.
- [34] Hossain M M, Rahman M K, Rahman S S. A shear dilation stimulation model for production enhancement from naturally fractured reservoirs [J]. *SPE Journal*, 2002, 7(2): 183 – 195.
- [35] Olson J E, Taleghani A D. Modeling simultaneous growth of multiple hydraulic fractures and their interaction with natural fractures [J]. 2009, SPE 119739; 1 – 7.
- [36] Renshaw C E, Pollard D D. An experimentally verified criterion for propagation across unbounded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, 32(3): 237 – 249.
- [37] Gu H, Weng X. Criterion for fractures crossing frictional interfaces at non-orthogonal angles [J]. 2010, ARMA 10 – 198; 1 – 6.
- [38] 李世愚, 和泰名, 尹祥础, 等. 岩石断裂力学导论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
Li Shiyu, He Taiming, Yin Xiangchu, et al. Introduction of rock fracture mechanics [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010.
- [39] Keshavarzi R, Mohammadi S. A new approach for numerical modeling of hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs [J]. 2012, SPE 152509; 1 – 12.
- [40] Mohammadi, S. Extended finite element method for fracture analysis of structure [M]. UK: Blackwell Publishing, 2008.
- [41] Xu W, Thiercelin M J, Walton I C. Characterization of hydraulically-induced shale fracture network using an analytical/semi-analytical model [J]. 2009, SPE 124697; 1 – 7.
- [42] Xu W, Le Calvez J H, Thiercelin M J. Characterization of hydraulically-induced fracture network using treatment and microseismic data in a tight-gas sand formation: a geomechanical approach [J]. 2009, SPE 125237; 1 – 5.
- [43] Xu W, Thiercelin M J, Ganguly U, et al. Wiremesh: a novel shale fracturing simulator [J]. 2010, SPE 132218; 1 – 6.
- [44] Meyer B R, Bazan L W. A discrete fracture network model for hydraulically induced fractures-theory parametric and case studies [J]. 2011, SPE 140514; 1 – 36.
- [45] Potluri N K. Effect of a natural fracture on hydraulic fracture propagation [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2004.
- [46] 赵金洲, 任岚, 胡永全, 等. 裂缝性地层水力裂缝非平面延伸模拟 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(4): 174 – 180.
Zhao Jinzhou, Ren Lan, Hu Yongquan, et al. Numerical simulation on non-planar propagation of hydraulic fracture in naturally fractured for-

- mations[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(4): 174 – 180.
- [47] Kresse O, Weng X, Wu R, et al. Numerical modeling of hydraulic fractures interaction in complex naturally fractured formations[J]. 2012, ARMA2012 – 292; 1 – 11.
- [48] Kresse O, Weng X, Gu H, et al. Numerical modeling of hydraulic fractures interaction in complex naturally fractured formations[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(3): 555 – 568.
- [49] Kresse O, Wu R, Weng X, et al. Modeling of interaction of hydraulic fractures in complex fracture networks[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. 2011, 1: 8.
- [50] Wu R, Kresse O, Weng X, et al. Modeling of interaction of hydraulic fractures in complex fracture networks[J]. 2012, SPE 152052: 1 – 14.
- [51] Kresse O, Cohen C, Weng X, et al. Numerical modeling of hydraulic fracturing in naturally fractured formations[J]. 2011, ARMA11 – 363; 1 – 11.
- [52] Weng X, Kresse O, Cohen C E, et al. Modeling of hydraulic-fracture-network propagation in a naturally fractured formation[J]. SPE Production & Operations, 2011, 26(4): 368 – 380.
- [53] Zhang Z, Ghassemi A. Simulation of hydraulic fracture propagation near a natural fracture using virtual multidimensional internal bonds[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(4): 480 – 495.
- [54] Moes N, Dolbow J, Belytschko T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46: 131 – 150.
- [55] Duax C, Moes N, Dolbow J, et al. Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 48(12): 1741 – 1760.
- [56] 李录贤, 王铁军. 扩展有限元法(XFEM)及其应用[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 5 – 20.
Li Luxian, Wang Tiejun. The extended finite element method and its applications; a Review[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 5 – 20.
- [57] 庄茁, 柳占立, 成斌斌, 等. 扩展有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
Zhuang Zhuo, Liu Zhanli, Cheng Binbin, et al. Extended finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [58] Pommier S, Gravouil A, Moes N, et al. Extended finite element method for crack propagation[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- [59] Sukumar N, Prévost J H. Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method Part I: computer implementation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(26): 7513 – 7537.
- [60] Huang R, Sukumar N, Prévost J H. Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method Part II: numerical applications[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(26): 7539 – 7552.
- [61] Dahi-Taleghani A, Olson J E. Numerical modeling of multistranded-hydraulic-fracture propagation; accounting for the interaction between induced and natural fractures[J]. SPE Journal, 2011, 16(3): 575 – 581.
- [62] Keshavarzi R, Jahanbakhshi R. Investigation of Hydraulic and Natural Fracture Interaction: Numerical Modeling or Artificial Intelligence [C]//Bunger A P, McLennan J, Jeffrey R, eds. Effective and sustainable hydraulic fracturing. Croatia: Intech, 2013: 1039 – 1057.
- [63] Gordeliy E, Peirce A. Coupling schemes for modeling hydraulic fracture propagation using the XFEM[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2013, 253: 305 – 322.
- [64] Mohammadnejad T, Khoei A R. An extended finite element method for hydraulic fracture propagation in deformable porous media with the cohesive crack model[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2013, 73: 77 – 95.
- [65] Chen Z. An ABAQUS implementation of the XFEM for hydraulic fracture problems[C]//Bunger A P, McLennan J, Jeffrey R, eds. Effective and sustainable hydraulic fracturing. Croatia: Intech, 2013: 725 – 739.
- [66] Chen Z. Finite element modelling of viscosity-dominated hydraulic fractures[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 88 – 89: 136 – 144.
- [67] Lamb A R. Coupled deformation, fluid flow and fracture propagation in porous media[D]. London: Imperial College, 2011.
- [68] Lamb A R, Gorman G J, Gosselin O R, et al. Coupled deformation and fluid flow in fractured porous media using dual permeability and explicitly defined fracture geometry[J]. 2010, SPE 131725: 1 – 15.
- [69] Lamb A R, Gorman G J, Elsworth D. A fracture mapping and extended finite element scheme for coupled deformation and fluid flow in fractured porous media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(17): 2916 – 2936.
- [70] Cuevas N H. Electrokinetic coupling in hydraulic fracture propagation [D]. Berkeley: University of California, 2009.
- [71] 倪春中, 刘春学, 张世涛. 从岩石露头裂隙迹线估算裂隙三维空间方向[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1): 102 – 105.
Ni Chunzhong, Liu Chunxue, Zhang Shitao. Estimation of three-dimensional distribution of fissures according to fissure traces on outcrops[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 102 – 105.
- [72] 倪春中, 刘春学, 张世涛, 等. 基于体视学技术的二维数据模拟三维裂隙网络[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 148 – 152.
Ni Chunzhong, Liu Chunxue, Zhang Shitao, et al. Stereology-based simulation of 3D fracture network with 2D data[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 148 – 152.
- [73] 杨勉, 徐梓洋, 杨柏松, 等. 贝尔凹陷基岩潜山致密储层裂缝分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 253 – 257.
Yang Mian, Xu Ziyang, Yang Baisong, et al. Fracture prediction of bedrock buried hill tight reservoirs in Beier Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 253 – 257.
- [74] 罗小龙, 汤良杰. 塔里木盆地雅克拉断凸古构造应力场数值模拟[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 841 – 846.
Luo Xiaolong, Tang Liangjie. Numerical simulation of palaeotectonic stress field in Yakela faulted salient, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 841 – 846.
- [75] 苟波, 郭建春. 基于精细地质模型的大型压裂裂缝参数优化[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 809 – 815.
Gou Bo, Guo Jianchun. Fracture parameter optimization of large hydraulic fracturing based on the fine geological model[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 809 – 815.
- [76] 苏建政, 黄志文, 龙秋莲, 等. 基于 ANSYS 软件的降低破裂压力机理模拟[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 640 – 645.
Su Jianzheng, Huang Zhiwen, Long Qiulian, et al. ANSYS-based simulation of fracturing pressure reducing mechanism[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 640 – 645.