

页岩储层压裂裂缝扩展规律及影响因素研究探讨

史璨^{1,2}, 林伯韬^{1,2*}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

* 通信作者, lin_cupb@163.com

收稿日期: 2020-04-29

国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题4“页岩气排采工艺技术与应用”(编号: 2017ZX05037-004)资助

摘要 油气勘探开发领域从常规油气向非常规油气跨越, 是石油工业发展的必然趋势。全球“页岩气革命”推动页岩气勘探开发技术得到了迅速发展, 水力压裂成为页岩气高效开发的关键技术之一。为了实现致密页岩储层的商业开采, 必须通过大规模全井段储层缝网体积改造才能获取经济产能。目前复杂裂缝网络的形态和扩展规律仍是压裂施工中面临的关键难题, 严重制约了页岩气资源的合理开发。本文归纳总结了目前常见的裂缝扩展规律研究方法并分析了不同方法在研究裂缝扩展规律问题时的优缺点。此外, 在页岩水力压裂裂缝扩展的已有实验和数模的研究基础上, 从地质和工程因素两个角度分析了对水力裂缝扩展规律的影响, 系统总结了各因素影响下的裂缝扩展规律, 取得了如下认识: (1)页岩物理及力学性质影响裂缝的扩展, 高脆性, 非均质性强的地层容易形成复杂裂缝网络; (2)地应力是影响裂缝扩展的最主要因素, 决定了裂缝扩展的方向与裂缝形态; (3)页岩储层中的天然弱面(层理与天然裂缝等)是产生复杂裂缝的重要原因, 其弱面性质、产状以及地应力共同决定了裂缝能否穿过弱面扩展; (4)高施工排量和高黏度可以有效增加储层的压裂改造范围, 但是裂缝复杂程度低; (5)射孔方式能影响裂缝复杂程度, 螺旋射孔得到的裂缝形态最复杂, 平面射孔的裂缝形态最简单。通过实验和数模可以研究特定地层和施工条件下的裂缝扩展规律, 但是无法满足现场真实情况下的复杂裂缝网络的裂缝扩展规律的研究。未来对于页岩储层裂缝扩展规律的研究仍然以实验和数值模拟方法为主, 不断改进和完善复杂裂缝网络的模拟, 同时大力发展裂缝形态监测技术, 更加准确的描述实验和现场压裂裂缝的形态。此外积极探索研究裂缝扩展规律的新方法, 为我国非常规页岩油气资源的勘探开发提供强有力的储层改造理论保障。

关键词 页岩气; 页岩油; 压裂; 裂缝扩展; 人工智能

Principles and influencing factors for shale formations

SHI Can^{1,2}, LIN Botao^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract It is an inevitable trend for the oil and gas industry to transform the exploration & development domain from conventional hydrocarbon accumulations to unconventional hydrocarbon ones. The global "shale gas revolution" has promoted shale gas exploration and development technology, and hydraulic fracturing has become one of the critical technologies for efficient shale

引用格式: 史璨, 林伯韬. 页岩储层压裂裂缝扩展规律及影响因素研究探讨. 石油科学通报, 2021, 01: 92-113

SHI Can, LIN Botao. Principles and influencing factors for shale formations. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 92-113. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.008

gas & oil development. Field research on the morphology and propagation of complex fracture-networks in fracturing shale oil & gas reservoirs is still a fundamental problem, which seriously restricts rational development of shale gas resources. This article summarizes the current standard research methods into fracture propagation and analyzes the advantages and disadvantages of different methods. In addition, based on existing experiments and mathematical models, this paper analyzed the influence on hydraulic fracture propagation from geological and engineering factors. It systematically summarized fracture propagation under the influence of various factors. The following understandings have been obtained: (1) The physical and mechanical properties of shale affect the propagation of fractures, and highly brittle and heterogeneous formations are prone to form complex fracture networks; (2) In-situ stress is the most critical factor influencing fracture propagation, which determines the morphology and propagation of fracture; (3) Weak-side surfaces (bedding and natural fractures, etc.) in shale reservoirs are important causes of complex fractures, and the properties of the surface, appearance, and in-situ stress difference determine whether the fracture can propagate through the weak-side surface; (4) High displacement and high viscosity can increase fracturing reconstruction range, but the complexity of fractures is low; (5) The shape of the crack obtained by spiral perforation is the most complicated, and the form of the planar perforation is the simplest. Although current experimental and numerical simulation research can describe the fracture propagation under the influence of specific formation and construction conditions to a certain extent, it still cannot satisfy the research on the fracture propagation of complex fracture networks under natural formation situations. In future, research into the fracture propagation in shale reservoirs will continue to improve the experimental and digital simulation methods to simulate complex fracture networks. Simultaneously, it is important to develop research on new hydraulic fracture monitoring technologies to describe fracture morphology more accurately. At the same time, we should actively explore other methods to better understand unconventional shale in China. The exploration and development of shale oil and gas resources provides a robust theoretical guarantee for reservoir reconstruction.

Keywords shale gas; shale oil; hydraulic fracturing; fracture propagation; artificial intelligence

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.008

0 引言

以页岩气革命为代表的非常规资源成为了全球油气产量增长的重要部分,促进了全球能源结构的调整和改变。2018年,全球原油产量为 44.5×10^8 t,其中非常规原油占14%;天然气产量为 3.97×10^{12} m³,其中非常规气占25%^[1]。美国依靠“页岩气革命”从能源进口国转变为出口国,推动美国逐步实现能源独立。中国页岩气勘探在近些年发展中取得了重大突破,成为继美国、加拿大之后,第三个实现规模化商业化开发的国家^[2]。截至2019年,中国海相页岩气探明储量为 1.8×10^{12} m³,累计投产页岩气井700余口,产量约为 145×10^8 m³/a,页岩气已经成为中国天然气上产的重要接替资源^[1]。中国陆相页岩油资源潜力巨大,是未来非常规油气勘探开发最有潜力的资源,会成为今后中国稳定原油产量的重要领域^[3-4]。

页岩等非常规储层的物性较差,具有典型的超低孔、超低渗的特征^[5],为了实现商业开采,必须通过大规模全井段储层缝网体积改造才能获取经济产能。然而,影响页岩裂缝形态的因素较多,裂缝扩展的机理和空间的展布规律尚不明确,这也是目前页岩储层压裂施工中所遇到的主要问题和难点。本文基于大量页岩水力压裂裂缝扩展规律的室内试验和数值模拟的研

究成果,分析了地质因素和工程因素对页岩储层水力裂缝扩展规律的影响,系统总结了各因素影响下的裂缝扩展规律,旨在为层状页岩储层水力压裂裂缝扩展预测提供理论指导。

1 页岩储层压裂裂缝扩展规律研究方法

1.1 水力裂缝扩展物理实验研究

实验室尺度的水力压裂物理模拟实验是一种真实、可靠的了解裂缝扩展形态的方法。其中应用最为广泛的就是真三轴水力压裂实验。自2000年陈勉、金衍、侯冰等人设计并组建了大尺寸真三轴模拟实验系统,开展了水力压裂裂缝扩展机理研究,证实了室内大型水力模拟试验的可行性^[6-7]。随后,诸多学者利用真三轴水力压裂模拟实验,研究了不同影响因素条件下水力裂缝扩展规律^[8-17]。目前真三轴实验多沿压裂缝将压后样品打开肉眼观察裂缝,同时借助示踪剂来标识裂缝面,难以获取其完整的三维形态。国内外学者通过众多监测方法和实验手段来解决这一问题。声发射技术(AE)是在室内真三轴压裂实验中被广泛采用的一种裂缝监测手段,通过声发射事件点对裂缝网络形成过程进行三维动态跟踪,一定程度上明确了水

力裂缝的起裂和扩展过程^[18-20]。但是该技术无法准确展示裂缝面以及空间几何形态,也无法精确刻画复杂裂缝网络。CT断层扫描技术也被应用于裂缝形态监测中^[21-23],该技术在无损监测上的优势可以借助三维重构技术获取三维裂缝展布形态。但是该技术的受限于样品尺寸的影响,对大尺寸样品应用效果差。一些学者利用透明有机玻璃(PMMA)进行压裂实验^[24-26],可以获取裂缝的动态扩展过程。该方法的局限在于PMMA材质无法真实反映页岩,砂岩等岩样的力学、物理性质(如孔隙结构、各向异性、非均质性等)。近年来,分布式光纤监测系统在国内逐渐应用于油藏温度场测量^[27-29]以及裂缝监测中^[30-31]取得了很好的应用效果。未来,室内物理模拟实验也可以借助该技术以更好地实现对水力压裂裂缝扩展的监测。不同实验监测方法的对比见表1。

1.2 水力裂缝扩展模型研究

水力压裂裂缝扩展模拟的研究一直是水力压裂领域研究的重点问题。油田水力压裂概念及理论模型始于20世纪50年代^[32-33]。早期,国外学者在传统弹性

力学理论上建立了大量二维裂缝扩展经典模型,如Penny模型、PKN模型和KGD模型等^[33-36]。二维模型的局限性在于裂缝高度固定,且缝内流体沿长度方向一维流动。为了模拟裂缝纵向延伸的过程,国内外学者提出了一系列拟三维(P3D)模型^[37-40]。P3D模型实现了对裂缝延伸过程中缝高变化的模拟,但是依然遵循PKN或KGD等二维模型的假设,裂缝内流体仍然为一维流动,仅在裂缝长度大于高度时适用。为了解决这一问题,国内外学者利用数值方法建立了一系列刻画全三维水力压裂裂缝延伸的理论模型^[41-43],适用于各种地层条件,能够更真实地模拟水力压裂物理过程。其中常用的数值模拟方法有:有限元方法^[44-46]、扩展有限元方法^[47-48]、离散元方法^[49-50]、边界元方法^[51]、相场法^[52]等。随着国内外学者的不断研究和改进,水力压裂裂缝扩展模型经历了从低维度到高维度,从单一裂缝到多条裂缝以致裂缝网络的发展过程,水力裂缝扩展模型也越来越接近于真实地层中裂缝形态。表2归纳总结了常见的二维、拟三维以及三维裂缝扩展模型的特点。

表1 真三轴水力压裂实验裂缝监测方法对比

Table 1 Comparison of fracture monitoring methods in HF experiments

监测方法	优点	缺点
直接打开样品 ^[6-7]	借助示踪剂可以直接观察水力裂缝面形态	难以获取样品的三维裂缝形态;难以区分水力裂缝与天然裂缝
声发射监测 ^[18-20]	可以对裂缝网络的形成过程进行三维动态追踪	无法准确展示裂缝面的空间几何形态;无法精确刻画复杂裂缝网络
CT扫描 ^[21-23]	可以在不破坏样品的条件下重构三维裂缝网络的展布形态	对大尺寸样品应用效果差;价格昂贵,经济性差
透明材质 ^[24-26]	可以直接通过观察获取裂缝的展布形态	无法真实的反应岩石的力学、物理性质

表2 不同水力压裂扩展模型对比

Table 2 Comparison of different hydraulic fracturing propagation models

扩展模型	模型特点	实现的功能	不足之处	代表模型
二维模型	(1)各向同性均匀介质;(2)弹性力学平面应变条件;(3)模型的缝高或缝宽为定值;(4)流体沿缝长方向一维流动;(5)半解析模型	在指定缝高的情况下计算缝长和缝宽;可以考虑滤失的影响	裂缝高度固定	PKN模型 ^[34-35] KGD模型 ^[33,36]
拟三维模型	(1)各向同性均匀介质;(2)弹性力学平面应变条件;(3)流体可沿缝长方向和垂向流动;(4)缝长大于缝高的延伸	考虑了裂缝扩展过程中缝高的变化;可以近似模拟三维裂缝;计算量不大	裂缝垂向延伸较大时不适用	PKNC模型 ^[38] PZGD模型 ^[37]
三维模型	(1)各向同性均匀介质;(2)缝内流体为二维或三维矢量流动;(3)采用线弹性断裂力学准则作为裂缝扩展的判据;(4)采用数值方法	可以模拟裂缝长、宽、高3个方向的延伸;适用于各种地层条件	计算效率低	有限元模型 ^[44-46] 离散元模型 ^[49-50] 边界元模型 ^[51]

1.3 现场裂缝扩展规律研究

1.3.1 压裂施工曲线分析

通过分析压力施工曲线的特征，可以大致判断水力裂缝的扩展形态，及时调整施工措施，以保证施工安全顺利进行^[52]。通过分析加砂时对数压力($\lg P$)随对数时间($\lg t$)变化的趋势线特征，可以判断裂缝扩展状态，见图 1^[53]。利用上述分析方式能较好指导现场施

工。

1.3.2 示踪剂评价技术

示踪剂监测是近年来发展起来的裂缝描述的一种重要手段，是压裂裂缝近井形态检测中最直接、最准确的技术^[54]。通过在压裂施工的不同阶段加注具有不同能量伽马射线的失踪砂，通过测井仪测量伽马能谱，再解谱得到支撑剂的分布情况，计算出裂缝高度、宽度等信息，见图 2^[55]。

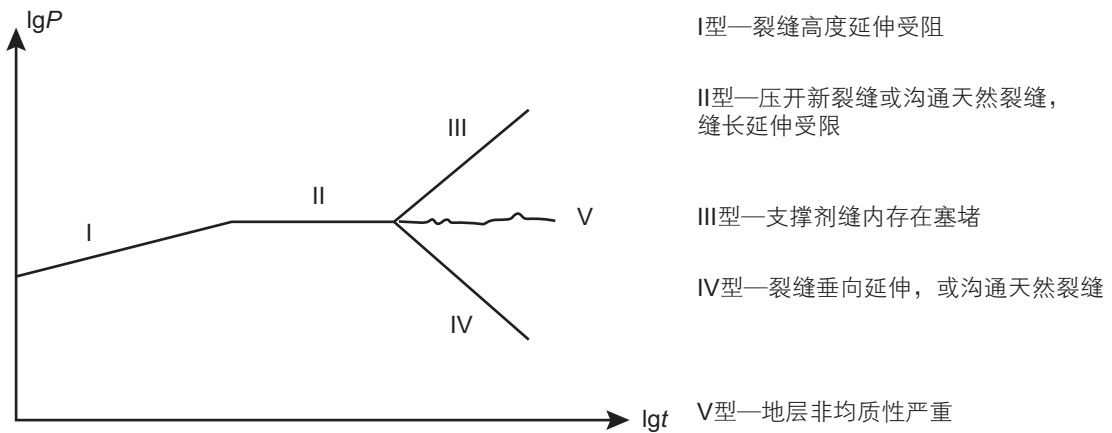


图 1 $\lg P$ - $\lg t$ 曲线图^[52]

Fig. 1 $\lg P$ - $\lg t$ curve^[52]

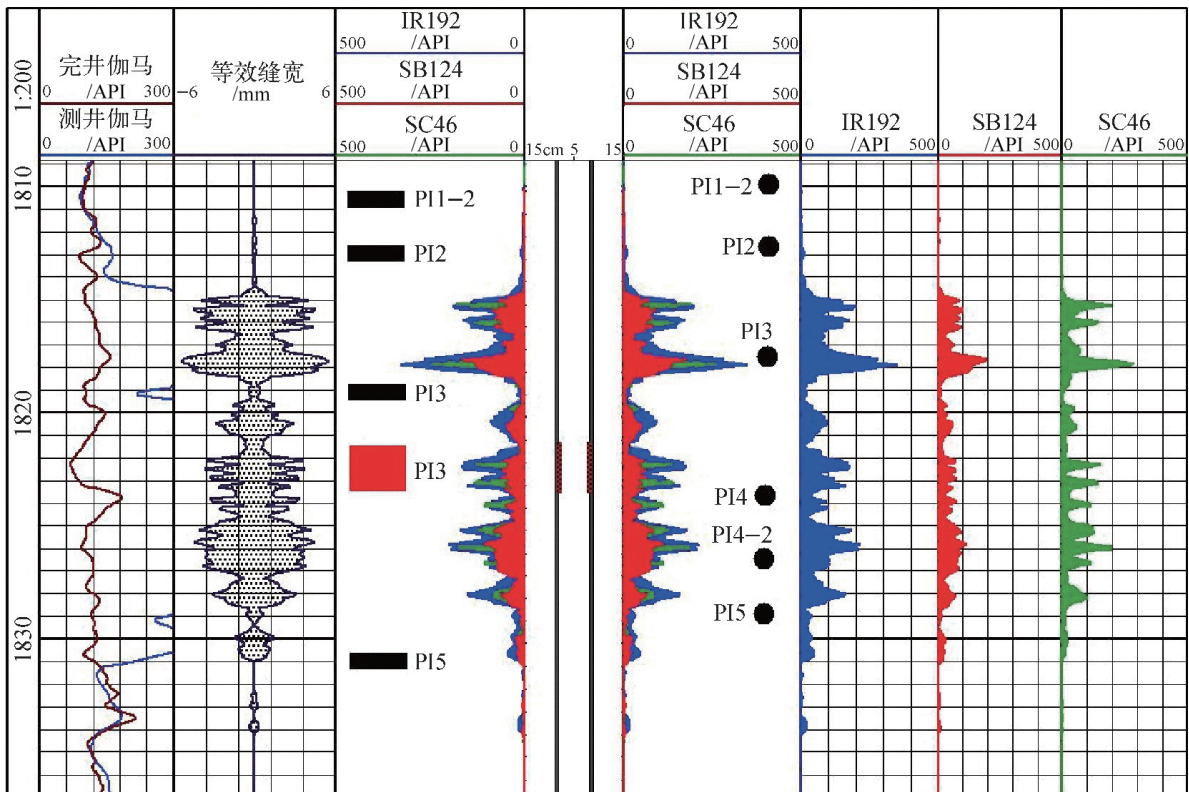


图 2 压裂段测井图^[55]

Fig. 2 Logging of target layer logging^[55]

1.3.3 微地震监测

水力压裂微地震监测技术是近年来得到迅速发展的地球物理勘探技术之一。它是以声发射学和地震学为基础,通过观测分析水力压裂作业时产生的微小的地震事件绘制裂缝的空间图像,监测裂缝的发育过程。但是随着记录距离和相关的信号衰减,一般只能监测到背景噪音水平之上相对较大的微震事件^[56]。通过分析水平井多级压裂微地震监测结果,不仅可以分析裂缝沿各个方向的扩展情况,还可以分析各段裂缝走向,判断储层的最大水平地应力方向(图3)^[57]。

1.3.4 测斜仪裂缝监测技术

测斜仪裂缝监测技术包括地面测斜仪测试和井下测斜仪测试2种方法,是通过在压裂井井口周围和邻井井下布置两组测斜仪来监测压裂施工过程中由于裂缝张开所引起的向各个方向辐射的岩石变形所导致的地层倾斜,并经过地球物理反演计算确定压裂参数的一种裂缝监测方法^[58]。

1.3.5 电位法裂缝监测技术

电位法裂缝监测技术也是一种目前广泛应用的监测压裂裂缝的有效方法,在长庆、大港、吐哈等油田

广泛应用。技术是以传导类电法勘探基本理论为依据,通过监测注入到目的层的高电离能量的压裂液所引起的地面电场形态的变化,来解释获得压裂裂缝方位、长度、形态等相关参数^[58]。最后本文对几种常见的现场裂缝监测技术的技术性能进行了比较,见表3。

2 影响页岩储层裂缝扩展的地质力学因素

富有机质页岩作为一种典型的沉积岩,在沉积过程中矿物颗粒择优取向,具有明显的层状的构造特征。研究页岩在不同力学性质、天然弱面以及地应力影响下的裂缝扩展规律,可有效指导页岩气甜点区的选择,实现页岩油气储层的高效开发。

2.1 力学性质对水力裂缝扩展的影响

2.1.1 力学性质的参数值

页岩的脆性是储层体积改造的基础,诱导裂缝的形态受脆性的影响很大^[59]。脆性矿物含量越高,黏土矿物含量越低,储层的弹性模量越大,泊松比越小,岩石的脆性也越强,越容易形成复杂裂缝网

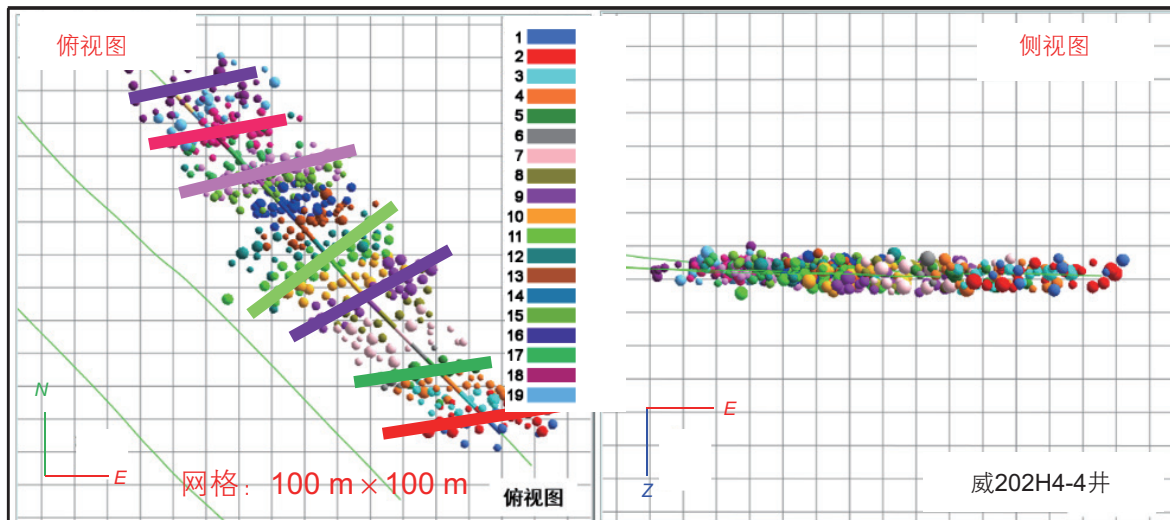


图3 页岩气井微地震监测图像^[57]

Fig. 3 Microseismic monitoring images^[57]

表3 压裂裂缝监测技术对照表

Table 3 Comparison table of fracture crack monitoring technology

测试方法	长度	高度	宽度	方位	倾角	局限性
施工曲线	√	×	√	×	×	需要精确的压力数据
同位素	×	√	√	√	√	只能监测近井筒附近裂缝
电位法	√	×	×	√	×	不同储层导电性不同,无法适用于边、底水油藏
倾斜仪	√	√	×	√	√	无法确定单个以及复杂裂缝尺寸,深井不适用
微地震	√	√	×	√	√	对监测井要求高,分辨率低

络^[60]。随着岩石的脆性增加,在水力压裂改造时,即使在很小的排量下地层也可能破裂,并且随着排量提升,可能出现多次破裂的现象,从而形成复杂裂缝网络^[14, 16, 60-63]。Rickman等认为,岩石脆性特征大于50的储层裂缝形态趋向形成缝网,见表4^[64]。赖锦等研究表明储层的脆性指数大于60%时,说明储层岩石具有极高的脆性,容易形成裂缝网络^[65]。

2.1.2 力学性质的非均质性

页岩储层在纵向上具有明显的非均质性,地层的物理力学性质与土层的形成环境、沉积年代以及沉积物来源有很大关系^[66]。激烈水动力条件下形成的地层沉积物颗粒大,弹性模量偏大、压缩性弱;低能沉积动力环境中,沉积物的力学强度较低但是压缩性高^[67]。页岩层理面两侧岩石的断裂韧性、弹性模量等力学性质存在差异,在一定程度上影响了裂缝垂向扩展的过程^[68-70]。水力裂缝倾向于“排斥”高弹性模量

的岩层;倾向于“吸引”低弹性模量的岩层,如图4所示^[12]。

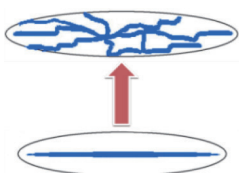
当裂缝从低弹性模量岩层扩展至高弹性模量岩层时,会对缝高产生阻碍作用;当从高弹性模量岩层至低弹性模量岩层,可发生穿透界面、停止扩展、产生多裂缝、张开界面以及裂缝扭曲等多种表现形式^[71-74]。层理两侧的断裂韧性差异对裂缝扩展的影响规律与弹性模量的影响大致相同^[74]。

2.1.3 力学性质的各向异性

对于层状页岩来说,垂直层理面的断裂韧性值(K_{ICV})和平行层理面的断裂韧性值(K_{ICH})存在明显差异^[75-76]。 $K_{ICV} - K_{ICH}$ 的差异越大,裂缝越倾向于沿水平方向扩展,见图5^[77]。此外,两个方向断裂韧性的比值存在一个极限,小于该极限值时,裂缝倾向于穿层扩展;在极限值附近时,裂缝穿层伴有部分偏转扩展;大于极限值时,裂缝仅沿岩层界面扩展^[75]。

表4 基于页岩储层脆性与裂缝形态关系^[64]

Table 4 The relationship between brittleness and fracture morphology^[64]

综合脆性指数 IB	人工裂缝类型	裂缝宽度
60 以上		不均匀
50		
40		
30		
20 以下		均匀

2.2 地应力对水力裂缝扩展的影响

2.2.1 地应力模式的影响

储层的原始地应力控制着水力压裂裂缝扩展与压裂效果。根据Anderson断层模型,可将储层的地应力模式分为3种:正断层、逆断层和走滑断层应力模式^[78]。水力裂缝总是垂直于最小主应力方向 S_3 方向扩展^[79]。因此在正断层与走滑断层应力状态下,水力压裂将产生垂直延伸的裂缝^[80];逆断层应力状态下则形成水平扩展的裂缝^[81]。

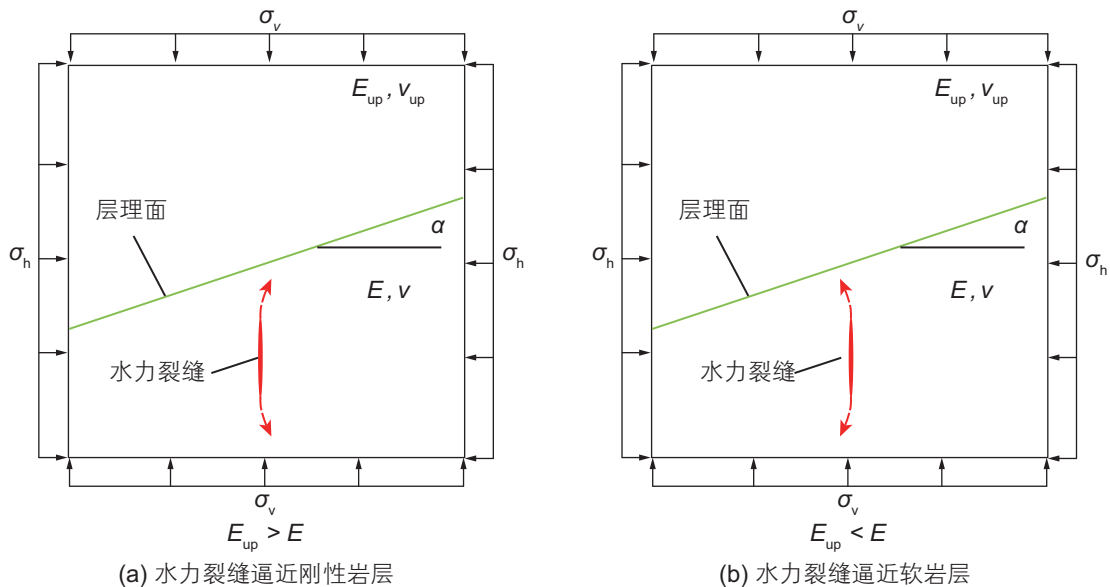


图4 水力裂缝逼近层理的示意图^[12]

Fig. 4 Schematic diagram of hydraulic cracks approaching bedding^[12]

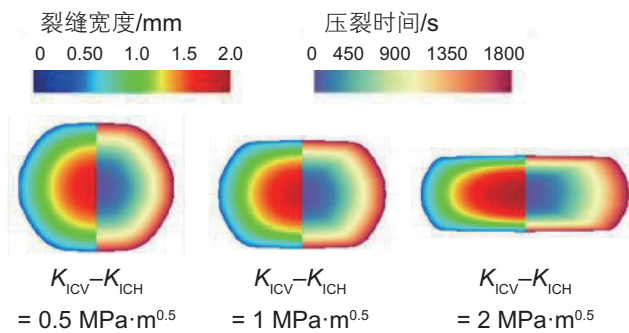


图5 地层断裂韧性的各向异性对裂缝扩展形态的影响^[77]

Fig. 5 Effect of fracture toughness anisotropy on crack propagation morphology^[77]

2.2.1 层间水平地应力差异

层间水平地应力差指的是储层以及邻近隔夹层最小水平地应力之间的差值，是影响裂缝垂向扩展的关键因素^[82-84]，缝高受层间应力差控制明显。层间水平应力差越小，裂缝越容易沿垂向扩展，缝高越大；层间水平应力差越大，裂缝穿层难度越高。当层间水平应力差为4~8 MPa时能有效地阻止水力裂缝的垂向扩展^[74, 86-87]。

2.2.2 垂向应力差异系数

垂向地应力差异系数定义为垂向地应力值与水平最小地应力值之间差值与最小水平地应力的比值($K_v = (S_v - S_h)/S_h$)。 K_v 值的大小决定了水力裂缝形态：(1)当 $K_v > 1$ ，会形成单一主裂缝；(2)当 $0.5 < K_v < 1$ 时，主裂缝倾向于沟通部分天然裂缝或者弱面；(3)当 $0.2 < K_v < 0.5$ 时，容易形成鱼骨形复杂裂缝网络；(4)当 $K_v < 0.2$ 时，压裂后倾向于形成随机的裂缝网络^[88]。图6为不同 K_v 值条件下的实验后的页岩样品以及对应的裂缝三维重构示意图。

2.2.3 水平应力差异系数

水平地应力差异系数定义为水平最大地应力与水平最小地应力值之间差值与最小水平地应力的比值($K_H = (S_H - S_h)/S_h$)。 K_H 越小，压裂后越容易形成复杂缝网； K_H 越大，压裂后越容易形成单一主裂缝：(1) $0 < K_H < 0.3$ 时，水力压裂可以形成复杂缝网；(2) $0.3 < K_H < 0.5$ 时，水力压裂在净高压条件下可形成较为复杂的缝网；(3) $K_H > 0.50$ 时，裂缝为单一主裂缝形态^[89]。随着水平主应力差增大，体积裂缝的在长度上的展布范围增加、宽度上的展布范围减小，即体积裂缝的长宽比增加^[15]。

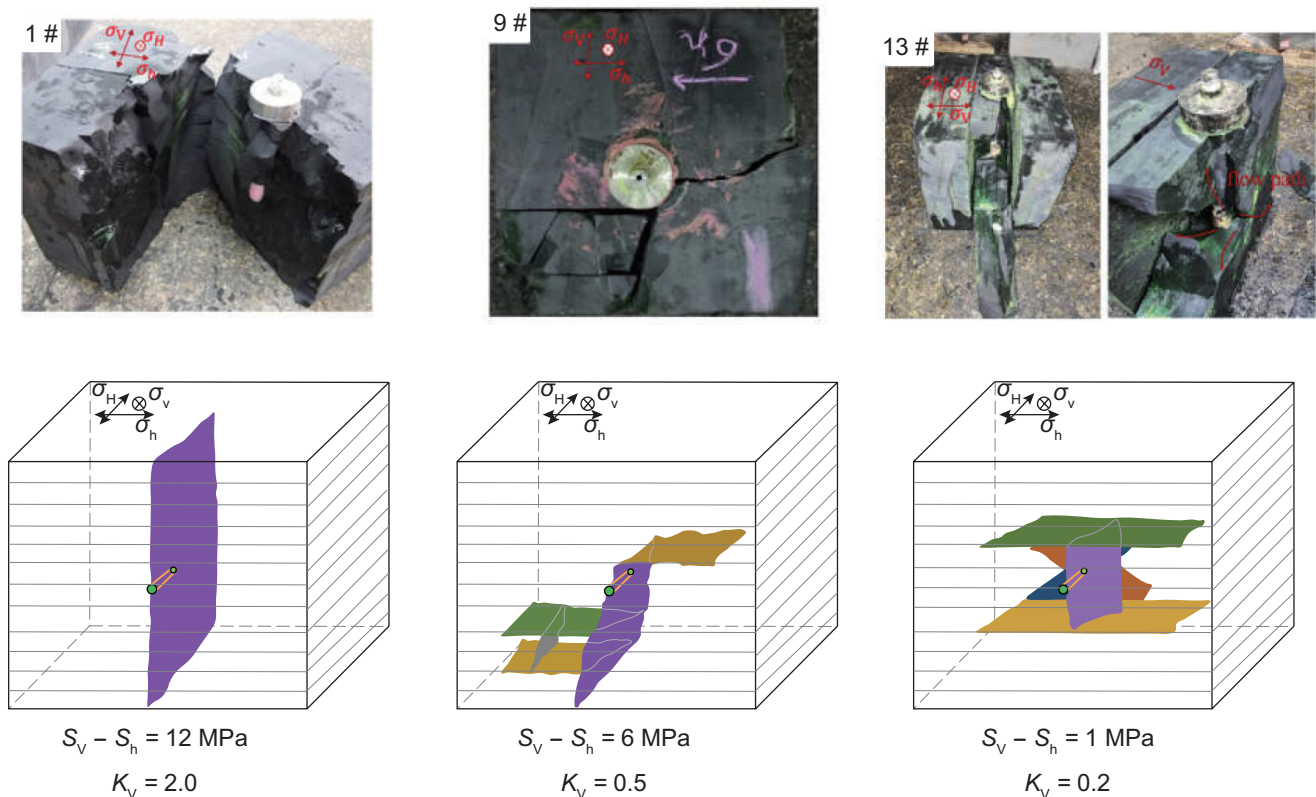


图6 页岩露头压裂后裂缝形态示意图^[88]

Fig. 6 Schematic diagram of fracture morphology after fracturing^[88]

2.2.4 地层压力的影响

油藏长期开采会引起裂缝周围地层压力分布的变化,导致地应力大小和方向发生改变^[90]。地应力大小总体上呈现随时间递减的规律,这主要是因为孔压下降造成的:由于总应力由有效应力和孔压组成,孔压下降会导致总应力的显著下降^[90]。而裂缝周围的最大水平地应力方向也会随着开采时间的增加而发生偏转。Guo 等人研究了开采导致的地应力变化对邻井压裂裂缝形态的影响,见图 7。随着生产时间的增加,两口水平井之间地层的水平最大地应力方向发生偏转,导致加密井的裂缝逐渐沿水平井筒方向扩展^[91]。

2.3 层理对水力裂缝扩展的影响

页岩的层理发育,水力裂缝在垂向上的裂缝形态非常复杂^[92-94]。现场观测和试验均发现,裂缝正交于层理时,层理面胶结强度的差异会导致裂缝呈现不同

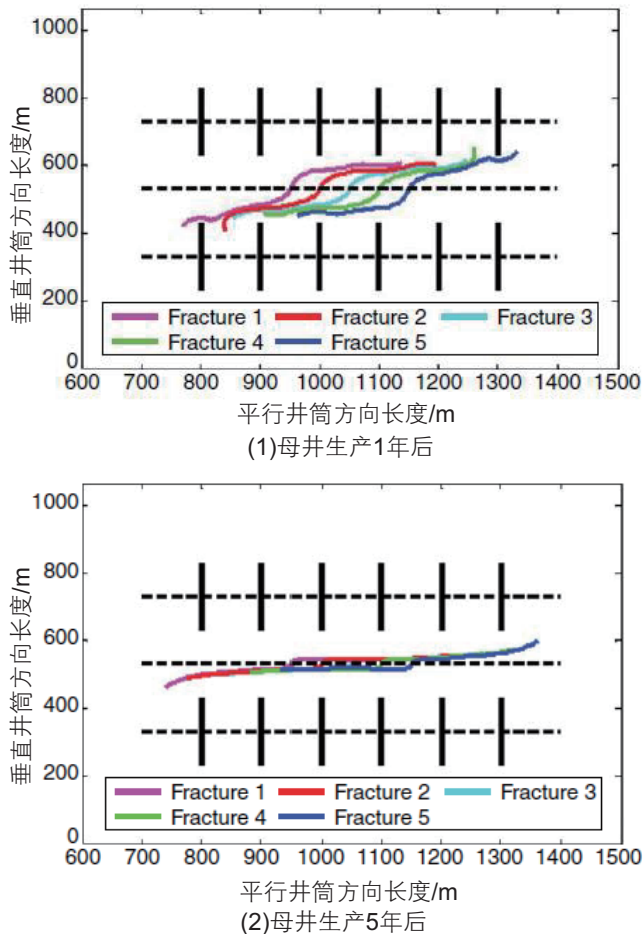


图 7 加密井压裂裂缝扩展路径:(1)母井生产 1 年后;(2)母井生产 5 年后^[91]

Fig. 7 Infill-well fracture-propagation paths after legacy production in parent wells for (1)1 year, (2) 5 years^[91]

的扩展形态:胶结脆弱处易发生裂缝的分叉、转向,形成网状裂缝;胶结强度大则裂缝容易穿透层理扩展^[95-98]。胶结强度过弱或过强都不利于网状裂缝的形成^[98-99]。谭鹏等人研究了不同地应力及界面强度条件下水力裂缝在层理面的扩展^[100],界面强度定义为

$$\gamma = (T_I/T_R + \sum_i \tau_{L,i}/\tau_{R,i})/3$$

其中 T_I , T_R 分别为界面层和储层的抗拉强度,通过直剪实验测得; $\tau_{L,i}$ 和 $\tau_{R,i}$ 分别为界面层和储层的内聚力。

研究发现存在 3 类典型的裂缝形态:(1)界面强度越低,垂向应力差异系数越小,越易形成 T 型缝;(2)界面强度越低,垂向应力差异系数越大,越易形成钝化缝;(3)界面强度越高,垂向应力差异系数大,易形成穿层缝,如图 8 所示。图 9 为层理面强度、垂向应力差异系数以及层间最小水平应力差异系数($K_h = (S_{B,h} - S_{R,h})/S_{R,h}$,其中 $S_{B,h}$ 为上部隔层最小水平地应力,MPa; $S_{R,h}$ 为上部隔层最小水平地应力,MPa)影响下裂缝扩展形态图版。

此外,如果水力裂缝与层理面斜向交叉,水力裂缝周围的应力场失去对称性,水力裂缝的扩展路径因此变得更为复杂^[101]。Goldstein 等人通过实验研究表明,裂缝扩展至摩擦的界面时会造成界面滑移,且界面的倾角越大,滑移距离越大^[102]。

2.4 天然裂缝对水力裂缝扩展的影响

页岩储层中天然裂缝发育,对裂缝的扩展路径有着非常重要的影响。水力裂缝遇到天然裂缝时可发生转向或者穿透天然裂缝,形成一种空间非平面裂缝网络^[8, 103-104]。裂缝面性质、水力裂缝逼近角、水平应力差以及天然裂缝走向是影响天然裂缝与水力裂缝干扰行为的关键因素^[12, 65, 99]。以下逐一开展讨论。

2.4.1 裂缝面性质的影响

小型天然裂缝只能在局部范围对水力裂缝扩展造成影响,很难改变水力裂缝的整体扩展方向;随着天然裂缝开度和渗透率的增加,容易导致水裂缝转向扩展,难以形成新的主水力裂缝面,见图 10^[8, 106]。天然裂缝内聚力、摩擦系数越大,天然裂缝面越不容易发生剪切滑移,水力裂缝越容易贯穿天然裂缝^[73, 107]。天然裂缝内摩擦角越小,天然裂缝连通面积越大,越易形成复杂网络裂缝^[108]。

2.4.2 逼近角的影响

在一定的逼近角和水平主应力差条件下,天然裂缝会改变水力裂缝的延伸形态和扩展模式。逼近角较大(大于 $60^\circ \sim 75^\circ$)且应力差较高的情况下,水力裂缝

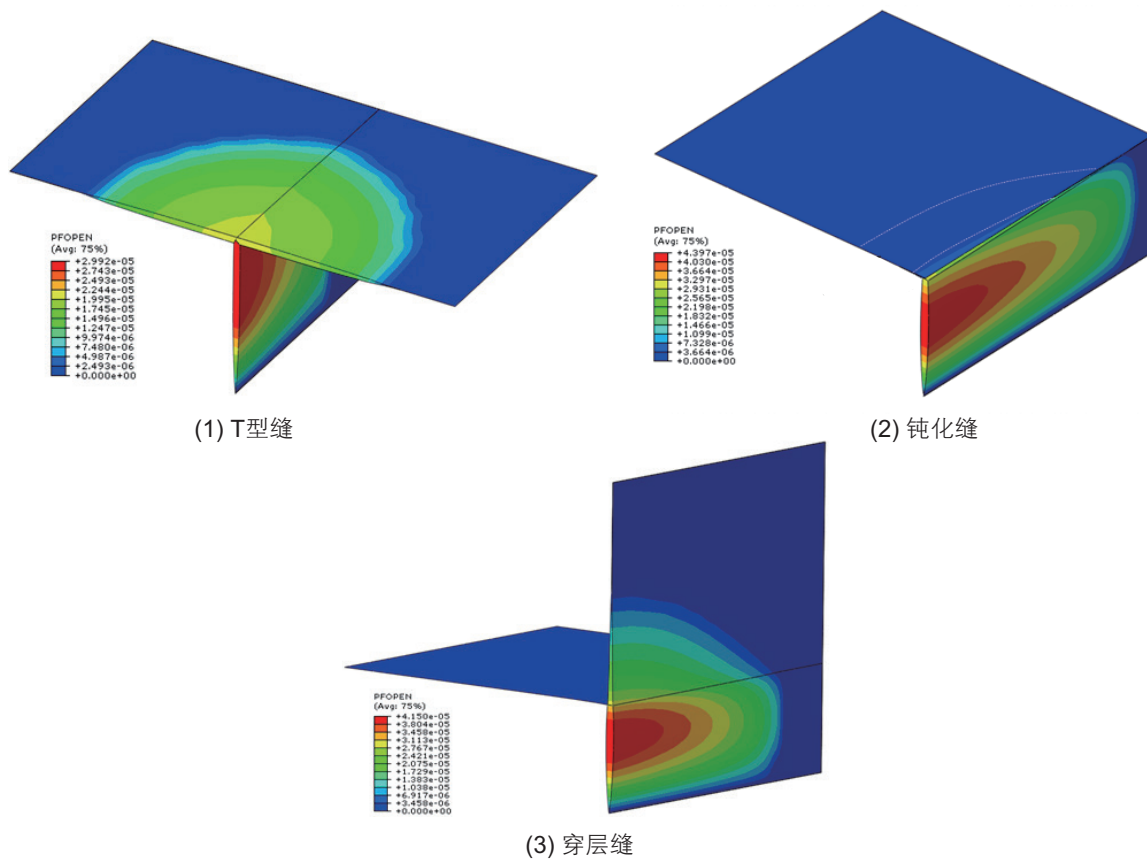


图8 层理面附近水力裂缝扩展形态^[100]

Fig. 8 Propagation pattern of hydraulic cracks near bedding plane^[96]

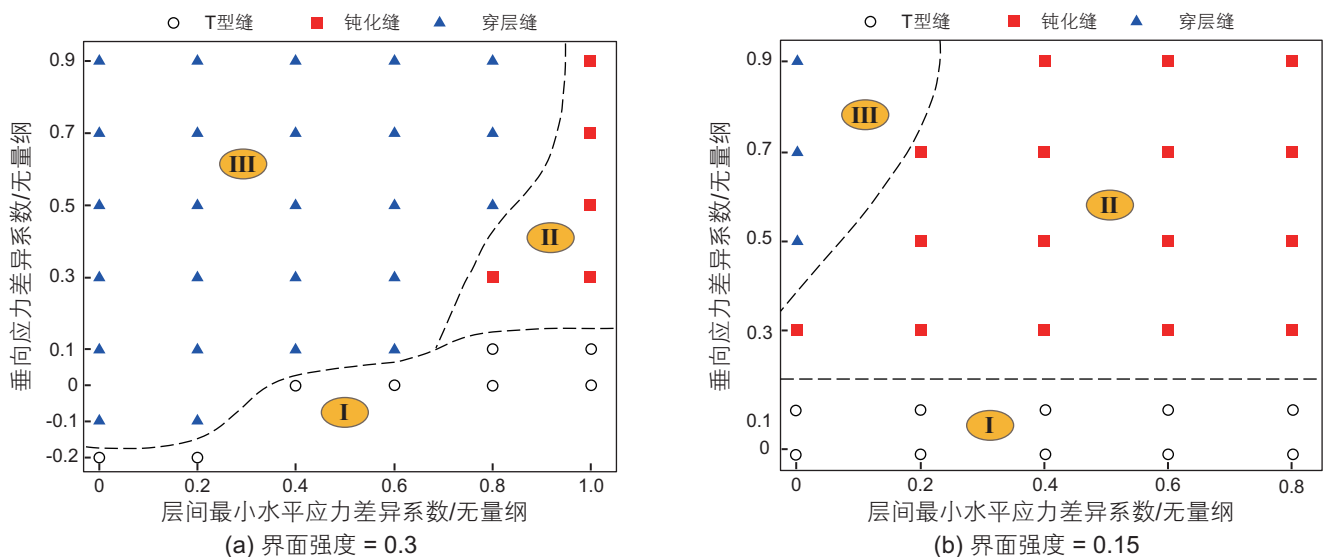


图9 不同界面强度下垂向应力差异系数与水平应力差异系数的综合影响^[100]

Fig. 9 The combined effect of vertical stress difference coefficient and horizontal stress difference coefficient at different interface strengths^[100]

倾向于穿过天然裂缝继续延伸；逼近角较小(小于 45° ~ 60°)且应力差较低的情况下，水力裂缝倾向于转向沿天然裂缝继续延伸；其他情况下水力裂缝在与天然裂

缝相交后常常伴随穿过、张开和分支 3 种模式混合延伸的情况^[17, 109-111]。程万等人通过实验建立了逼近角和应力差影响下的裂缝扩展图版，见图 11^[111]。

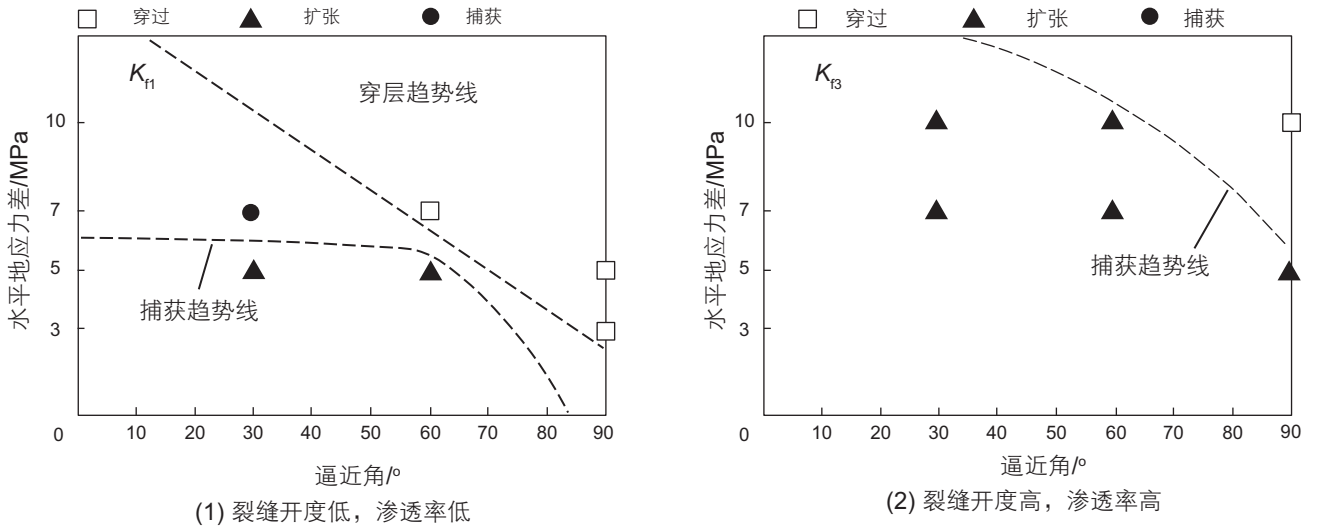


图 10 天然裂缝影响下水力裂缝扩展形态图版^[106]

Fig. 10 Propagation pattern of hydraulic fracture under the influence of natural fracture^[106]

2.4.3 天然裂缝产状的影响

天然裂缝的倾角(α)和走向角(β)影响着水力裂缝扩展规律。与裂缝的倾角相比,裂缝的走向角是影响水力裂缝能否穿透预制裂缝的更为关键的因素,且预置裂缝走向角越大,水力裂缝越容易穿透预置裂缝。当储层的水平主应力差大于4~7 MPa时,水力裂缝才有可能在较高走向角的情况下穿透预置裂缝^[12, 105-106, 112-113]。图 12 为裂缝倾角和走向角以及应力差对裂缝扩展的影响因素图版^[12]。

2.5 地质力学因素影响小结

为了更直观地展现地质因素对层状页岩储层裂缝扩展的影响,提供各个影响因素下的裂缝扩展规律的

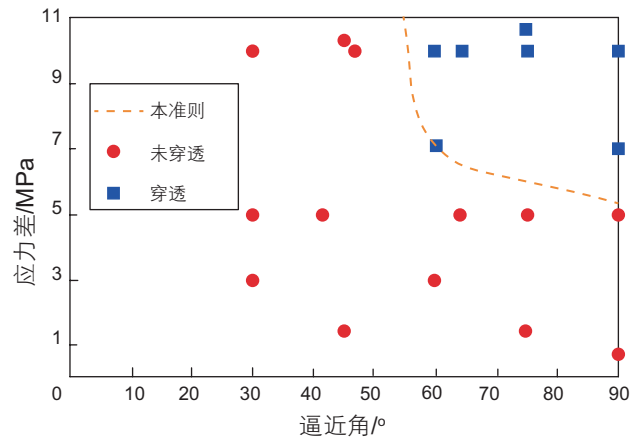


图 11 逼近角对扩展行为的影响^[111]

Fig. 11 Effect of approach angle on propagation behavior^[111]

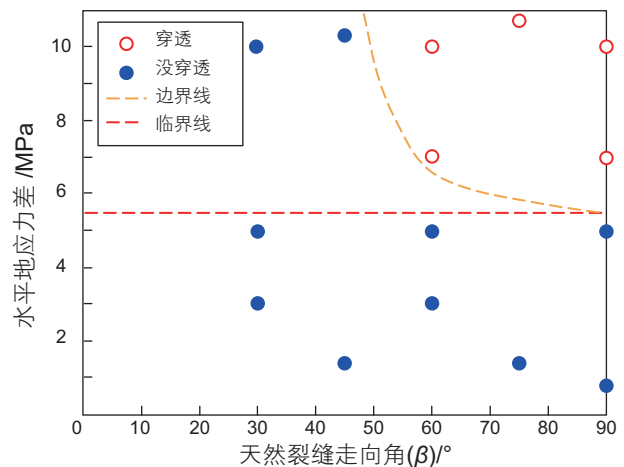
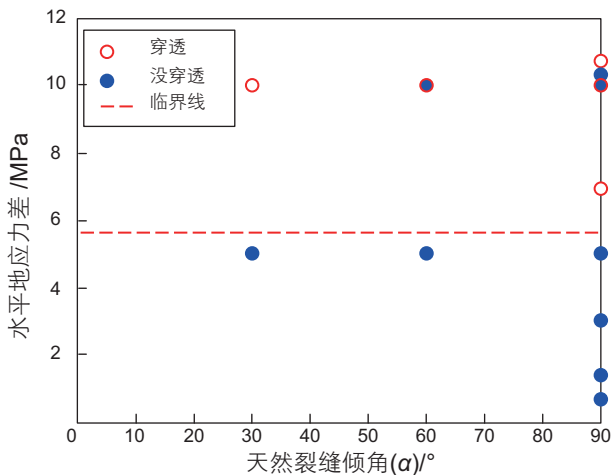


图 12 天然裂缝走向角、倾角对扩展行为的影响图版^[12]

Fig. 12 Influence of natural crack strike angle and dip angle on propagation behavior^[12]

整体认识, 本文系统归纳了不同影响因素下的裂缝扩展规律, 如表5所示。

3 页岩储层裂缝扩展工程影响因素

3.1 施工排量对裂缝扩展的影响

在一定的范围内排量影响了压裂裂缝的复杂度。当排量特别低时, 压裂液基本沿天然裂缝和层理缝滤失流动, 水力裂缝难以自由转向^[114]; 低排量则会有效降低地层破裂压力, 有利于开启天然裂缝系统, 从而增加裂缝的复杂性^[115-116]; 较高的排量则更容易形成新的水力裂缝, 导致水力裂缝更易穿透闭合的天然裂缝,

从而增大压裂改造规模^[117-119]。

采用变排量压裂, 初始阶段, 随着压力逐渐升高, 会在井筒周围的弱面附近产生多个待破裂点, 随排量突然提高, 水力裂缝沿着多个破裂点动态分叉扩展。随着排量阶梯式升高, 泵压升高, 排量增大, 水力裂缝与天然裂缝沟通形态越复杂, 有助于形成复杂裂缝网络^[120]。解经宇等人通过实验得到了相似的结论, 见图13^[121]。

3.2 压裂液性质对裂缝扩展的影响

3.2.1 压裂液类型的影响

压裂液在水力压裂工作中起着至关重要的作用, 可分为水基压裂液和无水压裂液。无水压裂液可以解

表5 页岩储层裂缝扩展地质影响因素汇总表

Table 5 Summary of fracture propagation in shale reservoirs

力学性质	裂缝扩展规律			
脆度 ^[64]	综合脆性指数 $IB > 50$, 容易产生复杂缝网; $IB < 50$, 倾向于产生单一裂缝			
K_{IC} ^[74]	断裂韧性越小, 裂缝越容易扩展; 断裂韧性越大, 裂缝越不容易扩展			
$K_{ICV} - K_{ICH}$ ^[75-77]	差值越大, 越倾向于沿水平方向扩展; 差值越小, 越倾向于产生复杂裂缝网			
E/K_{IC} 层间差异 ^[12, 71-74]	水力裂缝不易穿透高弹性模量和断裂韧性的岩层			
地应力	裂缝扩展规律			
地应力模式 ^[80-81]	$S_v > S_H > S_h$	$S_H > S_h > S_v$	$S_H > S_v > S_h$	
	水平裂缝	垂直裂缝	垂直裂缝	
层间最小水平应力差 ^[74, 86-87] ($S_{h, 隔层} - S_{h, 储层}$)	0~4	4~8	> 8	
	裂缝可以穿过隔层	部分穿过隔层	无论任何条件, 无法穿过隔层	
水平地应力差异系数(K_H) ^[83]	< 0.3	0.3~0.5	> 0.5	
	形成复杂缝网	在较高的压力下可以形成复杂缝网	单一裂缝	
垂向地应力差异系数(K_v) ^[88]	> 0.2	0.2~0.5	0.5~1	> 1
	随机裂缝网络	“鱼骨形”裂缝网络	沟通部分天然裂缝和弱面	单一主裂缝
层理	裂缝扩展规律			
层理面强度 ^[98-100]	低(~0.1)	中(0.1~0.2)	高(0.3~)	
	无法穿过层理, 产生“T型缝”	产生伴随层理面滑移的钝化缝	产生穿透层理的穿层缝	
天然裂缝	裂缝扩展规律			
逼近角 ^[17, 109-111]	< 45° ~ 60°		> 60° ~ 75°	
	水力裂缝沿天然裂缝扩展		应力差 < 4 MPa, 应力差 > 7 MPa, 穿透沿天然裂缝扩展 天然裂缝	
天然裂缝产状 ^[12, 107, 109]	走向角越大, 越容易穿透天然裂缝; 裂缝倾角对裂缝扩展影响较小			
裂缝开度与渗透率 ^[71, 107-108]	低	中	高	
	水力裂缝穿透天然裂缝	水力裂缝部分穿过天然裂缝	水力裂缝无法穿透天然裂缝, 并沿天然裂缝扩展	
水平应力差 ^[12, 109-111]	< 4~7 MPa		> 4~7 MPa	
	水力裂缝沿天然裂缝扩展		逼近角 < 45° ~ 60° 时穿过天然裂缝扩展	

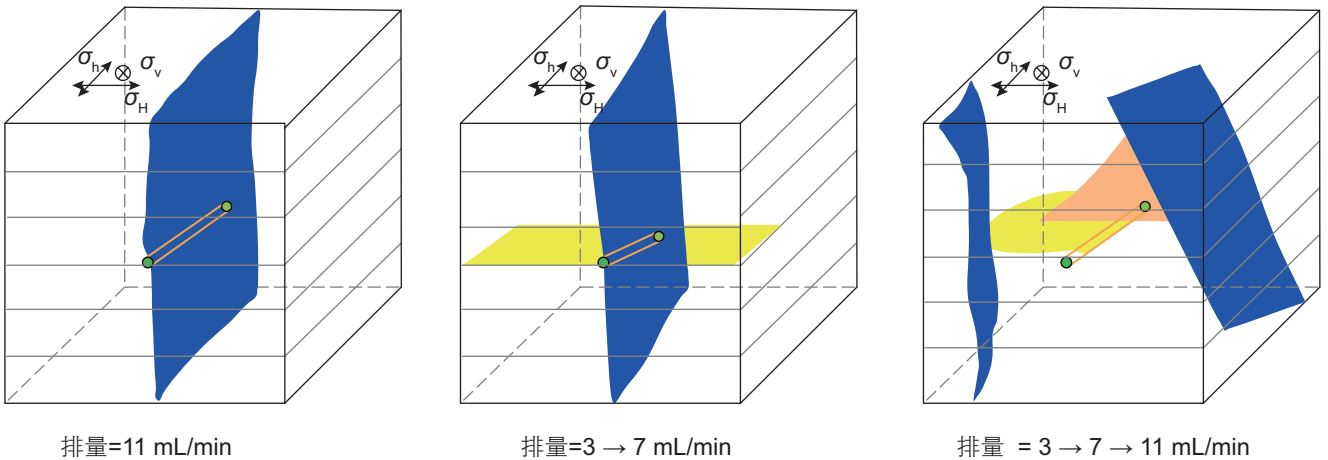


图 13 变排量注液对裂缝扩展的影响^[121]

Fig. 13 Effect of variable displacement fluid injection on fracture propagation^[121]

决水资源紧缺以及水污染的问题，同时可以避免水敏、盐敏、水锁以及润湿性反转等储层伤害问题。目前常用的无水压裂技术主要包括二氧化碳压裂技术以及液化石油气(LPG)压裂技术^[122]。

CO₂ 的超低黏度特性有利于储层形成 I-II 混合型破坏为主的复杂的裂缝网络^[123]。此外低温 CO₂ 注入地层后会与地层产生热应力效应，促进裂缝起裂的同时，形成许多微裂缝^[123]。但是 CO₂ 压裂液也存在增稠困难、携砂能力差、降滤失能力差以及缝宽小等缺点^[124]。LPG 压裂液主要采用液化石油气作为压裂液，具有表面张力低、黏度低、密度低、返排时间短等优点。同时 LPG 压裂的支撑裂缝长度基本等于有效裂缝长度，有效增加了裂缝面的面积，见图 14^[125]。但该方法存在成本高、安全性能不足等问题，使其推广受到了一定限制^[125-126]。

水基压裂液的高压流变性是影响压裂施工成败的关键因素之一^[122]，一般可以用剪切黏度进行表征，可以有效影响裂缝体系的复杂程度。低黏度压裂液可以更好地传导压力，并能沟通更多的天然裂缝，从而形成复杂的裂缝网络，此外低黏度压裂液容易使微裂缝产生错位和滑移，从而增加微裂缝的导流能力^[127]。使

用高黏度的压裂液时，液体滤失较小，会显著增加缝内净压力，有利于水力裂缝穿透层理面。随着压裂液黏度增加，裂缝的宽度和长度均有所增加^[117-118, 128]，但是变化幅度很小^[116]。交替注入不同黏度的滑溜水和胶液可以有效增加裂缝的复杂程度，见图 15^[129]。通过研究表明：(1)交替注液的造缝效果要好于单次注液；(2)胶液的造缝能力大于滑溜水的造缝能力；(3)胶液优先注入有利于提高裂缝网络的复杂程度。

3.3 射孔对裂缝扩展的影响

Zhang 等人利用物理模拟实验研究了定面射孔和螺旋射孔对井筒周围裂缝形态的影响，发现螺旋射孔相比于定面射孔会增大井筒周围的破裂压力和裂缝复杂度^[130]，并且总结了射孔影响下的 3 种近井筒周围的裂缝形态，见图 16^[131]。

解经宇等人通过真三轴水力物模实验研究了不同射孔方式对裂缝扩展的影响，见图 17^[121]。研究表明，射孔相位角为 60° 时，裂缝形态最复杂；其次是定向射孔；平面射孔压裂后水力裂缝形态最为简单^[121]。

俞然刚等深入研究了射孔相位对起裂压力以及裂缝扩展的影响，发现在相同地应力与施工参数下，射

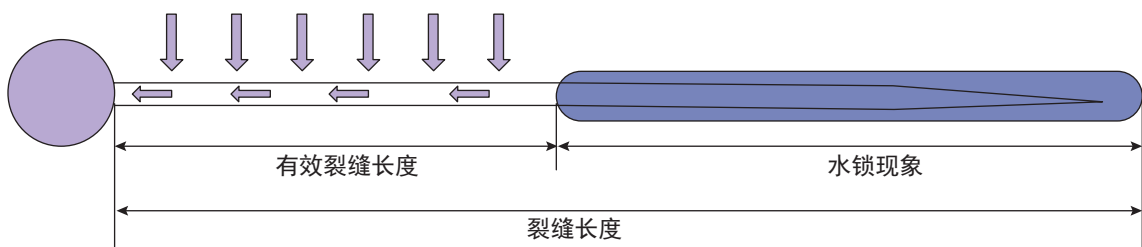


图 14 压裂有效裂缝示意图^[125]

Fig. 14 Schematic diagram of effective fracturing fractures^[125]

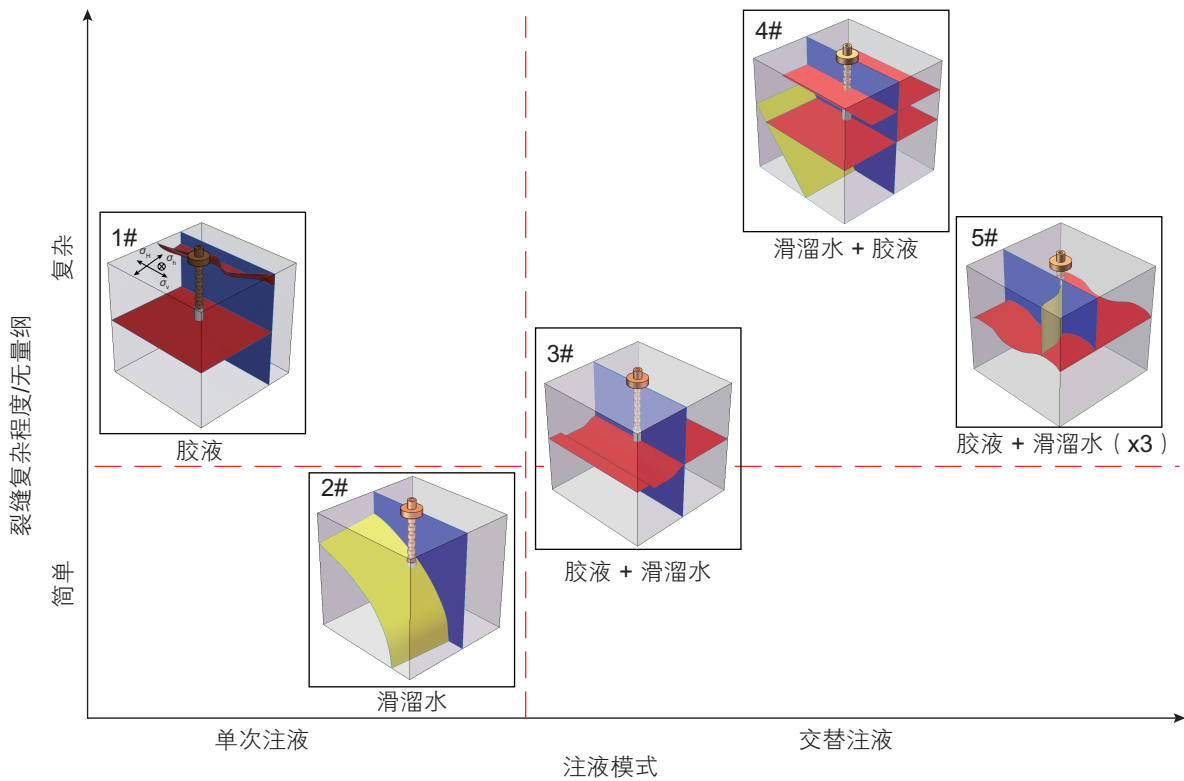


图 15 试样裂缝分布形态随注液模式的变化^[129]

Fig. 15 Distribution of fracture morphology with liquid injection model^[129]

孔相位 60°时支裂缝数量多，转向与穿层效果明显，可更加充分地连通岩层中原有的天然裂缝，有利于裂缝形成复杂网络，见图 18^[132]。

4 页岩储层裂缝扩展研究问题与展望

近些年来随着实验技术以及裂缝扩展数值模型的发展，逐步明确了多种地质和工程因素下裂缝的扩展形态和规律，为现场压裂施工提供了很好的理论支持。目前对于层状页岩裂缝扩展的研究还存在诸多亟待解

决的问题。

(1)受射孔方位、天然裂缝、层理等多因素的影响，页岩储层的水力裂缝呈现出非平面、相互交叉的复杂延伸模式，形成I-II复合型裂缝。目前裂缝扩展模型大多数模型是将岩石假设为各向同性材料，无法反应真实地层中物理和力学性质的各向异性特征，无法模拟实际地层中的裂缝非平面扩展过程，只能针对特定影响因素下裂缝的走向趋势以及扩展规律进行研究。

(2)目前研究地应力对裂缝扩展的影响时，边界条

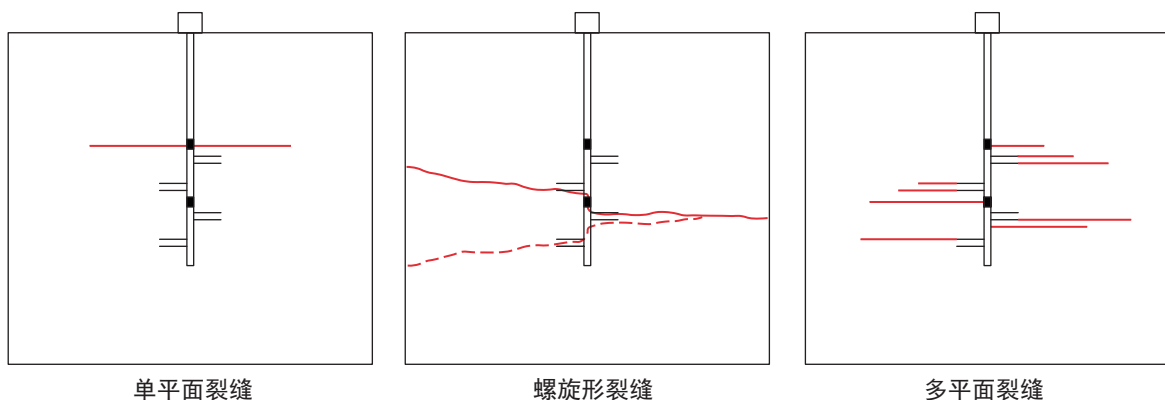


图 16 射孔影响下的 3 种典型裂缝形态^[131]

Fig. 16 Three typical crack shapes under the influence of perforation^[131]

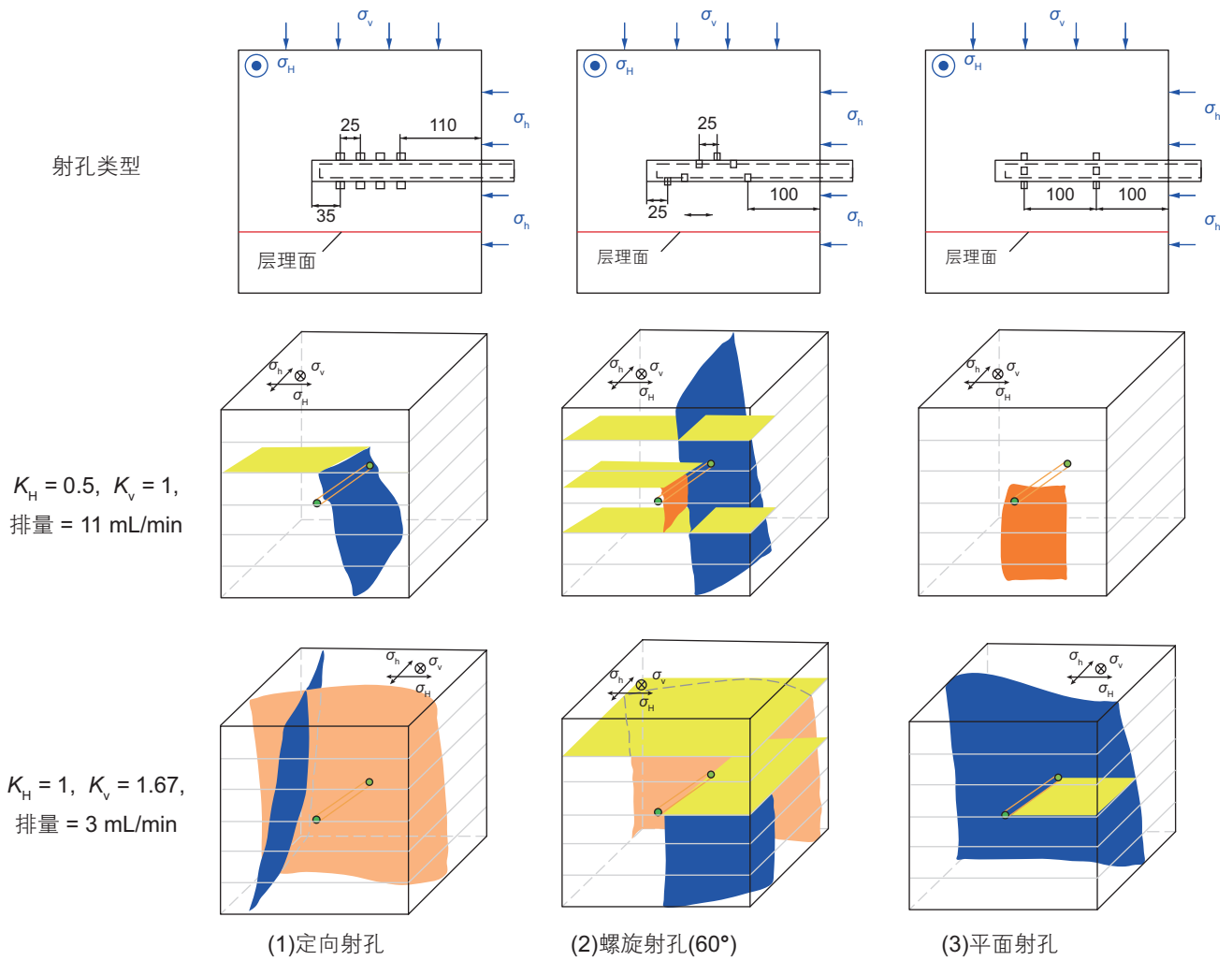


图 17 不同射孔类型对裂缝扩展的影响^[121]

Fig. 17 Influence of different perforation types on crack propagation^[121]

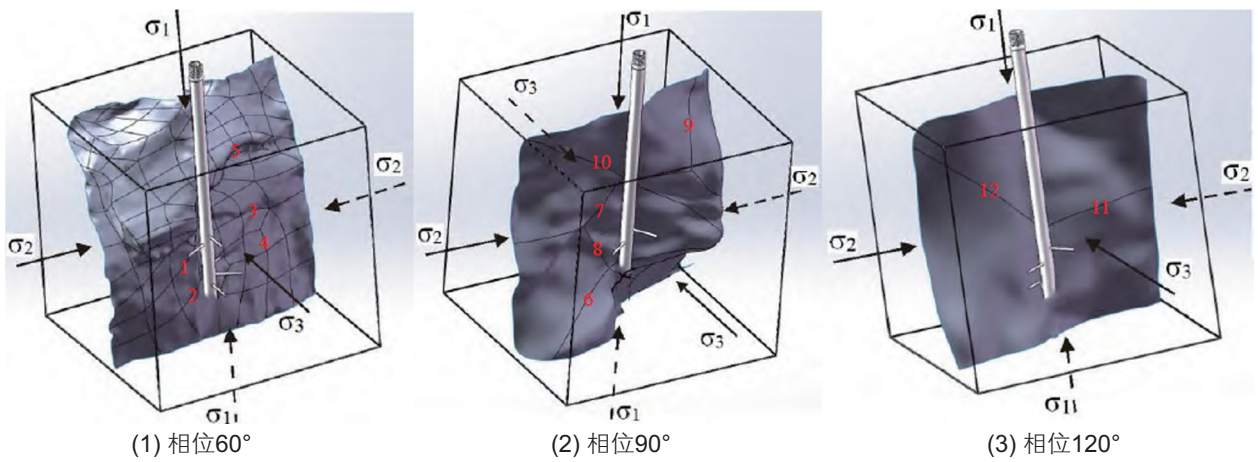


图 18 相位角对裂缝形态的影响^[132]

Fig. 18 Effect of phase angle on crack morphology^[132]

件均为原位地应力值，即在裂缝扩展过程中应力值不变。但是随着多段多簇、重复压裂等技术的发展和应

用，裂缝扩展对于局部地应力场的影响应该受到重视。明确裂缝扩展对于储层局部应力状态的影响和精确表

征压裂前后的储层四维(三维空间加时间)应力场,是未来的研究重点也是难点。构建储层四维应力场,可以更准确的预测后续邻井压裂裂缝扩展形态和扩展规模,从而为加密井距离提供有效指导,此外还可以帮助评价老井重复压裂效果,从而指定合理的改造方案。

(3)按照正常沉积规律,不同地层之间存在一定厚度的转变区域(即“过渡区”)。过渡区的应力场分布复杂,物理和力学性质各向异性增强,容易诱导水力裂缝缝高及缝宽的非协调性增长,对裂缝扩展有较大的影响。目前,多数研究将过渡区简化为零厚度的突变面,与实际情况存在较大的差异,需要针对该问题展开一系列研究,阐明过渡区域的存在对裂缝扩展的影响。

目前针对页岩储层压裂的研究多集中在中美海相、陆相页岩气储层,随着非常规油气资源开发脚步的迈进,页岩油已逐步成为热点、重点,将成为我国未来非常规发展的重要接替能源,是我国未来勘探开发的重点领域。目前,我国页岩油开发在储集层类型、源储关系、甜点主控因素及页岩油聚集类型等方面已形成较系统的认识,并提出了以水平井规模重复“压采”开发为主导的一体化开发模式,水力压裂技术仍然是高效开发页岩油资源的核心技术^[133-134]。但是由于页岩油的特征导致其压裂裂缝扩展规律与页岩气储层存在差异。因此,必须加快对于页岩油储层的裂缝扩展规律的研究,明确页岩油储层裂缝扩展规律,为页岩油储层的勘探开发提供一系列技术和理论支撑。

大型物理模拟实验仍然是观察裂缝扩展形态的最直接手段,未来应该改进现有的裂缝监测方法,力求更加准确的获取实验后的三维裂缝扩展形态。数值模拟方面,更多的集中在裂缝非平面扩展模型和缝网压力模型的研究上,不断优化算法提高计算效率,模拟真实地层条件下的裂缝扩展形态。此外,全球各大顶尖石油公司纷纷加快与新兴计算机科技(IT)公司的联合创新,发展适用于石油行业的人工智能技术,力求为石油天然气的勘探开发提供全新的智能解决方案,以期孕育新的油气革命^[135]。大数据分析、云计算以及机器学习等技术已经在石油工业取得了初步应用,在预测油藏地质甜点^[136],井壁稳定风险^[137],最优化采油方案分析^[138]以及储层物性解释和分析^[139-140]等问题方面展现了其优势性和高效性。人工智能的广泛应用同样为裂缝形态预测提供了新的思路:广泛采集室内真三轴压裂实验和现场压裂施工压后的裂缝形态数据开展深度学习,综合分析各个影响因素对裂缝扩展形态的影响,分类裂缝网络类型,定量刻画裂缝体形态与复杂度。

5 认识与结论

页岩储层水力压裂裂缝扩展规律是现阶段页岩油气开采的主要问题,然而裂缝扩展规律的影响因素众多,实际压裂过程中裂缝扩展机理和规律不明确。本文通过对页岩储层裂缝扩展研究各类方法入手,分析、总结、归纳了地质因素和工程因素对裂缝扩展的影响,得到了以下认识。

(1)目前水力裂缝扩展规律的研究方法主要分为3类:真三轴水力压裂物模试验研究、基于数值方法的水力裂缝扩展模型研究和现场监测。目前物理模拟实验裂缝形态描述方面受限于实验精度和样品尺寸的影响,无法精确地描述样品的三维裂缝形态以及展布规律。水力压裂裂缝扩展模型经历了从低维度到高维度、从单一裂缝发展到多个裂缝以及裂缝网络的过程,水力裂缝扩展模型也越来越接近于地层中裂缝形态。裂缝扩展模型的研究很好的弥补了物理模拟实验的简单实验条件和尺寸效应带来的缺陷,使得多因素下油藏尺度的裂缝扩展规律模拟成为可能。但是,数值方法计算效率低,且模型无法反应地层的非均质性,因此无法真实地还原储层条件下裂缝扩展形态。

(2)页岩储层压裂裂缝扩展的主控因素可以概括为地质因素和工程因素2类。前者是储层本身的地质和力学特征;后者是与现场施工相关的参数,合理的压裂施工参数能够引导水力裂缝充分扩展,形成复杂有利的裂缝网络。地应力是影响裂缝扩展形态的主要地质因素,而层理以及天然裂缝等弱面则是决定页岩储层水力裂缝能否形成缝网的关键地质因素。排量和黏度在一定范围内能够影响裂缝的复杂程度,低排量和低黏度的压裂液可以更好地传导压力,沟通更多的天然裂缝和弱胶结层层面。另外,阶梯排量注入以及不同黏度压裂液交替注入能有效增加页岩储层的裂缝复杂程度。

(3)随着世界范围内常规油气产量的不断下降,非常规油气成为油气资源的重要接替领域。页岩气勘探开发技术的迅猛发展使得页岩层系中的油气资源得到了广泛关注。页岩油和深层页岩气是未来勘探开发的重点和难点领域。在裂缝扩展研究方面,要重点分析页岩油和深层页岩的地质构造、物理力学性质等特点,利用室内试验和数值模拟方法研究其裂缝扩展规律同时,要紧跟发展趋势,探索人工智能方法在预测裂缝形态方面的实现途径,为我国非常规页岩油气资源的勘探开发提供强有力的理论保障。

参考文献

- [1] 邹才能, 潘松圻, 荆振华, 等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12. [ZOU C N, PAN S Q, JING Z H, et al. Shale oil gas revolution and its impact[J]. ACTA PETROLEI SINICA, 2020, 41(1): 1-12.]
- [2] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 166-178. [ZOU C N, DONG D Z, WANG Y M, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects(II)[J]. Petroleum exploration and development, 2016, 43(2): 166-178.]
- [3] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26. [ZOU C N, YANG Z, CUI J W, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum exploration and development, 2013, 40(1): 14-26.]
- [4] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10. [ZHAO W Z, HU S Y, HOU L H, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. Petroleum exploration and development, 2020, 47(1): 1-10.]
- [5] 琚宜文, 卜红玲, 王国昌. 页岩气储层主要特征及其对储层改造的影响[J]. 地球科学进展, 2014, 29(4): 492-506. [JU Y W, BU H L, WANG G C. Main Characteristics of shale gas reservoir and its effect on the reservoir reconstruction[J]. ADVANCES IN EARTH SCIENCE, 2014, 29(4): 492-506.]
- [6] 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(S1): 868-872. [CHEN M, PANG F, JIN Y. Experiments and an analysis on hydraulic fracturing by a Large-size triaxial simulator[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000(S1): 868-872.]
- [7] 张广清, 周大伟, 窦金明, 等. 天然裂缝群与地应力差作用下水力裂缝扩展实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(05): 157-162. [ZHANG G Q, ZHOU D W, DOU J M, et al. Experiments on hydraulic fracture propagation under action of natural fractures and crustal stress difference[J]. Journal of China University of Petroleum, 2019, 43(05): 157-162.]
- [8] 侯冰, 陈勉, 李志猛, 等. 页岩储集层水力裂缝网络扩展规模评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(06): 763-768. [HOU B, CHEN M, LI Z, et al. Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs[J]. Petroleum exploration and development, 2014, 41(06): 763-768.]
- [9] 侯冰, 陈勉, 张保卫, 等. 裂缝性页岩储层多级水力裂缝扩展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(06): 1041-1046. [HOU B, CHEN M, ZHANG B W, et al. Propagation of multiple hydraulic fractures in fractured shale reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(06): 1041-1046.]
- [10] HOU B, CHEN M, ZHIMENG L I, et al. Propagation area evaluation of hydraulic fracture networks in shale gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration&Development, 2014, 41 (6): 833-838.
- [11] CHENG W, JIN Y, CHEN M. Reactivation mechanism of natural fractures by hydraulic fracturing in naturally fractured shale reservoirs[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering. 2015, Vol 23: 431-439.
- [12] 程万. 三维空间下裂缝性页岩储层水力裂缝扩展机理研究[D]. 中国石油大学(北京), 2015. [CHENG W. Mechanism of hydraulic fracture propagation in fractured shale reservoir in three dimensional space[D]. China University of Petroleum, Beijing, 2015.]
- [13] CHENG W, JIN Y, CHEN M. Experimental study of step-displacement hydraulic fracturing on naturally fractured shale outcrops[J]. Journal of Geophysics and Engineering. 2015, Vol 12: 714-723.
- [14] 赵金洲, 任岚, 胡永全. 页岩储层压裂缝成网延伸的受控因素分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(1): 1-9. [ZHOU J Z, REN L, HU Y Q. Controlling factors of hydraulic fractures extending into network in shale formations[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(1): 1-9.]
- [15] 赵金洲, 李勇明, 王松, 等. 天然裂缝影响下的复杂压裂裂缝网络模拟[J]. 天然气工业, 2014, 34(1): 68-73. [ZHAO J Z, LI Y M, WANG S, et al. Simulation of complex fracture network under the influence of natural fractures[J]. Natural gas industry, 2014, 34(1): 68-73.]
- [16] 赵金洲, 许文俊, 李勇明, 等. 页岩气储层可压性评价新方法[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(6): 1165-1172. [ZHAO J Z, XU W J, LI Y M, et al. A new method for fracability evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural gas Geoscience, 2015, 26(6): 1165-1172.]
- [17] 周健. 裂缝性地层水力裂缝起裂和延伸机理实验研究[D]. 中国石油大学(北京), 2008. [ZHOU J. Experimental study on hydraulic fracture initiation and propagation in naturally fractured reservoirs[D]. China University of Petroleum, Beijing, 2008.]
- [18] PETTITT W S, KING M S. Acoustic emission and velocities associated with the formation of sets of parallel fractures in sandstones[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 151-156.
- [19] KING M S, PETTITT W S, HAYCOS JR, et al. Acoustic emissions associated with the formation of fracture sets in sandstone under polyaxial stress conditions[J]. Geophysical Prospecting, 2012, 60(1): 93-102.

- [20] 侯冰, 陈勉, 谭鹏, 等. 页岩气藏缝网压裂物理模拟的声发射监测初探[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 66–71. [HOU B, CHEN M, TAN P, et al. Monitoring of hydraulic fracture network by acoustic emission method in simulated tri-axial fracturing system of shale gas reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(1): 66–71.]
- [21] RENARD F, DOMINIQUE B, JACQUES D, et al. 3D imaging of fracture propagation using synchrotron X-ray microtomography[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009. 286(1): p. 285–291.
- [22] ZOU, Y S, ZHANG S C, ZHOU T, et al. Experimental investigation into hydraulic fracture network propagation in gas shales using ct scanning technology[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016. 49(1): p. 33–45.
- [23] 林伯韬, 史璨, 庄丽, 等. 基于真三轴实验研究超稠油出基层压裂裂缝扩展规律[J]. 石油勘探与开发, 2020, <http://www.cpedm.com/CN/Y0/V/I/202062>. [LIN B, SHI C, ZHUANG L, et al. Study on fracture propagation behavior in ultra-heavy oil reservoirs based on true triaxial experiments[J]. Petroleum exploration and development, 2020, <http://www.cpedm.com/CN/Y0/V/I/202062>.]
- [24] ALPERN J S, MARONE C J, ELSWORTH D, et al. Exploring the physicochemical processes that govern hydraulic fracture through laboratory experiments[C]. 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2012: p. ARMA–2012–678.
- [25] QUAN G, ELSWORTH D, ALPERN J S, et al. Breakdown pressures due to infiltration and exclusion in finite length boreholes[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2015. 127: p. 329–337.
- [26] BUNGER, ANDREW P, EMMANUEL D. Experimental validation of the tip asymptotics for a fluid-driven crack[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2008. 56(11): p. 3101–3115.
- [27] VIKRAM J, ROBERT H JED W, et al. Hydraulic fracturing stimulation monitoring with distributed fiber optic sensing and microseismic in the permian wolfcamp shale play[C]. URTConference, Denver, Colorado, 22–24 July 2019. October 2019, 554–567.
- [28] 章敬, 潘勇, 游红娟等. 基于分布式光纤测温的SAGD水平井蒸汽腔前缘监测技术[C]. 2014 油气藏监测与管理国际会议论文集, 2014: 1–8. [ZHANG J, PAN Y, YOU H J, et al. Monitoring technology of steam cavity leading edge of SAGD horizontal well based on distributed optical fiber temperature measurement [C]. Proceedings of the 2014 International Conference on Oil and Gas Reservoir Monitoring and Management, 2014: 1–8.]
- [29] 闫正和, 罗东红, 唐圣来, 等. 基于光纤分布式声波传感的井下多相流测试研究[J]. 油气井测试, 2017, 26(02): 9–12. [YAN Z H, LOU D H, TANG S L, et al. Study on down-hole multiphase flow measurement system based on fiber distributed acoustic sense[J]. Well Testing, 2017, 26(02): 9–12.]
- [30] NATH D K, FINLEY DB, KAURA JD. Real-time fiber-optic distributed temperature sensing (dts)—new applications in the oilfield[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2016, doi: 10.2118/103069–ms.
- [31] MOLENAAR M M, FIDAN E, HILL D. Real-time downhole monitoring of hydraulic fracturing treatments using fibre optic distributed temperature and acoustic sensing[C]. SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, doi: 10.2118/152981–ms.
- [32] HARRISON E, KIESCHNICK WF, et al. The mechanics of fracture induction and extension[J]. Petroleum Trans AIME. 1954
- [33] KHRISTIANOVIC SA, ZHELTOV Y P. Formation of vertical fractures by means of highly viscous liquid[C]. In: Proceedings of the fourth world petroleum congress, Rome, 1955.
- [34] PERKINS T K, KERN LR. Widths of hydraulic fractures[J]. J. Pet. Tech., 1961, 13(9): 937–949.
- [35] NORDREN RP. Propagation of a vertical hydraulic fracture[J]. SPE J 1972, 12(8): 306–314.
- [36] GEERTSMA J, DE K F. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures[J]. J. Pet. Tech., 1969, 21(12): 571–581
- [37] SETTARI A, Sullivan RB, Hansen CE. A new two-dimensional model for acid fracturing design[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana. 27–30 September, 1998.
- [38] CLEARY M P, MICHAEL K, LAM K Y. Development of a fully three-dimensional simulator for analysis and design of hydraulic fracturing[C]. SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium, Denver, Colorado. 14–16 March, 1983.
- [39] PALMER I D, CARROLL Jr H B. Three-dimensional hydraulic fracture propagation in the presence of stress variations[J]. SPE Journal, 1983, 23(06): 870–878.
- [40] RUEDA J I, ZILLUR R, HOLDITCH SA. A semi-analytical solution to three-dimensional hydraulic fracture propagation in multistress media[C]. Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas 16–18 March, 1994.
- [41] 陈治喜, 陈勉, 黄荣樽, 等. 层状介质中水力裂缝的垂向扩展[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(4): 23–26. [CHEN Z X, CHEN M, HUANG R Z, et al. Vertical expansion of hydraulic cracks in layered media[J]. Journal of China University of Petroleum, 1997, 21(4): 23–26.]
- [42] 陈勉, 陈治喜. 层状岩层中的水力裂缝延伸研究: 第五届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1994. [CHEN M, CHEN Z X. Research on hydraulic fracture extension in layered rock: The 5th national conference on numerical analysis and analytical methods of rock and soil mechanics[M]. Chongqing University Press, Chongqing.]
- [43] 刘洋, 徐苗, 景岷雪, 等. 考虑形变效应下水力压裂裂缝拟三维延伸研究[J]. 天然气勘探与开发, 2012年, 35(4): 60–63. [LIU

- Y, XU M, JING M X, et al. Study on pseudo three-dimensional extension of hydraulic fracturing cracks considering fractal effect[J]. *Natural gas exploration and development*, 2012 年, 35(4): 60–63.]
- [44] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(7): p. 1060–1066. [LI L C, YANG T H, TANG C A, et al. Coupling analysis on hydraulic fracturing process of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): p. 1060–1066.]
- [45] 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统RFPA2D[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(5): p. 507–508. [TANG C A, ZHAO W. Analysis software system RFPA2D for the whole process of rock failure[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(5): p. 507–508.]
- [46] WANGEN M. Finite element modeling of hydraulic fracturing in 3D[C]. *Computational Geosciences*, 2013, Mars(4): p. 1–13.
- [47] FU P, HUANG J, SETTGAST RR, et al. Apparent toughness anisotropy induced by roughness of in situ stress: a mechanism that hinders vertical growth of hydraulic fractures and its simplified modeling[C]. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition held in The Woodlands, Texas, USA, 5–7 February 2019*, SPE–194359–MS.
- [48] KESHAVARZI R, MOHAMMADI S. A new approach for numerical modeling of hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs[C]. *SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference & Exhibition-From Potential to Production, Austria, 2012*.
- [49] ZHANG Z Z, GHASSEMI A A. Three-dimensional fracture simulation using the virtual multidimensional internal bond[C]. *44th U. S. Rock Mechanics Symposium and 5th U. S.–Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, Utah, USA. 27–30 June, 2010*.
- [50] HAMIDI F, MORTAZAVI A. Three-dimensional modeling of hydraulic fracturing process in oil reservoirs[C]. *46th U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Chicago, Illinois. 24–27 June, 2012*.
- [51] ZHUANG X, ZHOU S, SHENG M, et al. On the hydraulic fracturing in naturally-layered porous media using the phase field method[J]. *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j. enggeo.2019.105306.
- [52] 李树臣, 邵宪志, 付春权, 等. 压裂水平井压力动态曲线分析[J]. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(2): 71–73. [LI S C, SHAO X Z, FU C Q, et al. Analysis of pressure dynamic curve of fracturing horizontal well[J]. *Daqing Petroleum Geology and Development*, 2007, 26(2): 71–73.]
- [53] 黄月明. 压裂加砂施工曲线形态剖析[J]. *河南石油*, 2002, (5): 51–54. [HUANG Y. Curve Shape Analysis of Sand Hydraulic Fracturing Operation[J]. *Henan Petroleum*, 2002, (5): 51–54.]
- [54] 罗宁, 何绪全, 唐杰, 等. 同位素测井在四川油气田的应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2007, 30(3): 27–28. [LUO N, He X Q, TANG J, et al. Application of isotope logging to Sichuan oil and gas fields[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2007, 30(3): 27–28.]
- [55] 郭宏利, 潘群, 翟丽娜. 人工裂缝纵向剖面测试技术在大庆油田水力压裂中的应用[J]. *同位素*, 2019, 32(02): 115–120. [GUO H L, PAN Q, ZHAI L N. The artificial fracture longitudinal profile testing technology in the application of hydraulic fracturing in Daqing Oil Field[J]. 2019, 32(02): 115–120.]
- [56] 赵博雄, 王忠仁, 刘瑞, 等. 国内外微地震监测技术综述[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(4): 1882–1888. [ZHAO B X, WANG Z R, LIU R, et al. Review of microseismic monitoring technology research[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(4): 1882–1888.]
- [57] 石林, 史璨, 田中兰, 等. 中石油页岩气开发中的几个岩石力学问题[J]. *石油科学通报*, 2019, 03: 223–232. [SHI L, SHI C, TIAN Z L, et al. Several rock mechanics problems in the development of shale gas in PetroChina[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 03: 223–232.]
- [58] 邵茂华, 曹鼎洪, 邹春雷. 裂缝监测技术在水平井中的应用[J]. *内蒙古石油化工*, 2014, 3: 97–100. [SHAO M H, CAO D H, ZOU C L, et al. Application of crack monitoring technology in horizontal wells[J]. *Inner Mongolia Petrochemical*, 2014, 3: 97–100.]
- [59] 林英松, 韩帅, 周雪, 等. 体积压裂技术在煤层气开采中的适应性研究[J]. *西部探矿工程*, 2015, 27(04): 59–61. [LIN Y S, HAN S, ZHOU X, et al. Research on the adaptability of volume fracturing technology in coal bed methane exploitation[J]. *Western Exploration Engineering*, 2015, 27(04): 59–61.]
- [60] 唐颖. 渝页 1 井储层特征及其可压裂性评价[D]. 中国地质大学(北京), 2011. [TANG Y. Reservoir characteristics and fracturability evaluation of Yuye 1 well[D]. *China University of Geosciences, Beijing*, 2011.]
- [61] 赵海峰, 陈勉, 金衍. 页岩气藏网状裂缝系统的演示断裂动力学[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(4): 464–470. [ZHAO H F, CHEN M, JIN Y. Demonstration fracture dynamics of mesh fracture system in shale gas reservoir[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 464–470.]
- [62] 尹虎, 王新海, 张芳, 等. 吸附气对气水两相流页岩气井井底压力的影响[J]. *断块油气田*, 2013, 20(1): 74–76. [YIN H, WANG X H, ZHANG F, et al. Effect of adsorbed gas on bottom pressure of shale gas well with gas-water two-phase flow[J]. *Fault block oil and gas field*, 2013, 20(1): 74–76.]
- [63] 唐颖, 唐玄, 王广源, 等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. *地质通报*, 2011, 30(3): 393–399. [TANG Y, TANG X, WANG G Y, et al. Summary of hydraulic fracturing technology in shale gas development[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(3): 393–399.]
- [64] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale [R]. *SPE 115258*, 2008.

- [65] 赖锦, 王贵文, 范卓颖, 等. 非常规油气储层脆性指数测井评价方法研究进展[J]. 石油科学通报, 2016, 1(03): 330-341. [LAI J, WANG G W, FAN Z Y, et al. Research progress in brittleness index evaluation methods with logging data in unconventional oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(03): 330-341.]
- [66] 吴燕开, 刘松玉, 洪振舜. 土层工程性质与其沉积环境关系分析研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 263-267. [WU Y K, LIU Y S, HONG Z S. The relationship between the geotechnical properties and the deposited environment for the soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3): 263-267.]
- [67] 李萍, 李培英, 刘乐军, 等. 南黄海油气资源区海底沉积物的工程地质特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(3): 37-41. [LI P, LI P Y, LIU L J, et al. Geotechnical characteristics of seafloor sediments in oil resource area in south yellow sea[J]. Marine geology & Quaternary geology, 2001, 21(3): 37-41.]
- [68] RABAA E. Hydraulic fracture propagation in the presence of stress variation[C]. Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, 1987.
- [69] CASAS L, MISKIMINS J L, BLACK A, et al. Laboratory hydraulic fracturing test on a rock with artificial discontinuities[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 2006.
- [70] 李传华, 陈勉, 金衍. 层状介质水力压裂模拟实验研究[C]. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会, 中国西安, 2002. [LI C H, CHEN M, JIN Y. Experimental study on hydraulic fracturing simulation of layered media[C]. The 7th Academic Conference of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, Xian, China, 2002.]
- [71] WU K, OLSON J E. Mechanics analysis of interaction between hydraulic and natural fractures in shale reservoirs[C]. Unconventional Resources Technology Conference, 2014, doi: 10.15530/urtec-2014-1922946.
- [72] HUANG B, LIU J. Experimental investigation of the effect of bedding planes on hydraulic fracturing under true triaxial stress[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(10): 2627-2643.
- [73] GU H, WENG X, LUND J, et al. Hydraulic fracture crossing natural fracture at nonorthogonal angles: A criterion and its validation[J]. SPE Production & Operations. 2012, 27(1): 20-26
- [74] 耿宇迪. 层状介质水力裂缝垂向扩展的物理模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2004. [GENG Y. Physical simulation study on vertical propagation of hydraulic cracks in layered media[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2004.]
- [75] 潘睿, 张广清. 层状岩石断裂能各向异性对水力裂缝扩展路径影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2309-2318. [PAN R, ZHANG G Q. The influence of fracturing energy anisotropy on hydraulic fracturing path in layered rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10): 2309-2318.]
- [76] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 228-237. [HENG S, YANG C H, GUO Y T, et al. Influence of Bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 228-237.]
- [77] FU P, HUANG J, SETTGAST R R, et al. Apparent toughness anisotropy induced by roughness of in situ stress: A mechanism that hinders vertical growth of hydraulic fractures and its simplified modeling[C]. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition held in The Woodlands, Texas, USA, 5-7 February 2019, SPE-194359-MS.
- [78] FJAER E, HOLT R M, HORSRUD P, ET AL. Petroleum related rock mechanics[M]. Elsevier, 2008.
- [79] HUBBERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. Petr. Trans. AIME, 1957, 210: 153-163.
- [80] ABASS H, HEDAYATI S, MEADOWS D. Nonplanar fracture propagation from a horizontal wellbore: Experimental study[J]. spe production & facilities, 1996, DOI: 10.2118/24823-PA.
- [81] 张金才, 尹尚先. 页岩油气与煤层气开发的岩石力学与压裂关键技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1691-1699. [ZHANG J C, YIN S X. Some technologies of rock mechanics applications and hydraulic fracturing in shale oil, shale gas and coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1691-1699.]
- [82] WARPINSKI N R, CLARK J A, SCHMIDT R A, et al. Laboratory investigation on the effect of in situ stresses on hydraulic fracture containment [C]. SPE9834, 1981.
- [83] TEUFEL L W, CLARK J A. Hydraulic fracture propagation in layered rock: Experimental studies of fracture containment[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1984, 24(01), 19-32.
- [84] 刘玉章, 付海峰, 丁云宏, 等. 层间应力差对水力裂缝扩展影响的大尺度实验模拟与分析[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(4): 88-92. [LIU Y Z, FU H F, DING Y H, et al. Large scale experimental simulation and analysis of interlayer stress difference effect on hydraulic fracture extension[J]. OIL DRILLING & PRODUCTION TECHNOLOGY, 2014, 36(4): 88-92.]
- [85] 周祥, 张士诚, 马新仿, 等. 薄差层水力压裂控缝高技术研究[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2015, 33(04): 94-99. [ZHOU X, ZHANG S C, MA X F, et al. Research on fracture height containment in thin and poor pay zones[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2015, 33(04): 94-99.]
- [86] 张燕平, 王小军, 陈和平, 等. 浩口油田压裂难点及对策[J]. 江汉石油职工大学学报, 2011, 4(01): 6-10. [ZHANG Y P, WANG X J, CHEN H P, et al. On difficulties of fracturing in haokou oilfield and its countermeasures[J]. Journal of Jianghan Petroleum

- University of Staff and Workers, 2011, 4(01): 6–10.]
- [87] 王瀚. 水力压裂垂直裂缝形态及逢高控制数值模拟研究[D]. 中国科学技术大学, 2013. [WANG H. A numerical study on vertical hydraulic fracture configuration and fracture height control[D]. University of Science and Technology of China, 2013.]
- [88] TAN P, JIN Y, HAN K, et al. Analysis of hydraulic fracture initiation and vertical propagation behavior in laminated shale formation[J]. *Fuel*, 2017, 206: 482–493.
- [89] RENSHAW C E, POLLARD D D. Are large differential stresses required for straight fracture propagation paths[J]. *Journal of Structural Geology*, 1994, 16(6): 817–882.
- [90] 郭旭洋, 金衍, 林伯韬. 页岩油立体开发诱发的储层地应力动态响应特征[J]. 石油钻采工艺, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1072.TE.20200121.1348.003.html>. [GUO X Y, JIN Y, LIN B T. A study of in-situ stress evolution induced by three-dimensional development of shale oil reservoirs[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1072.TE.20200121.1348.003.html>.]
- [91] GUO X, WU K, KILLOUGH J, et al. Understanding the mechanism of interwell fracturing interference with reservoir/geomechanics/fracturing modeling in Eagle Ford Shale[C]. *The Unconventional Resources Technology Conference*, URTEC 2874464.
- [92] TEUFEL L W. An experimental study of hydraulic fracture propagation in layered rock[D]. Texas Univ., College Station/Texas, 08.1979.
- [93] FISHER K, WARPINSKI N. Hydraulic-fracture-height growth: Real data[J]. *SPE Production & Operations*, 2012.
- [94] DELALE F, ERDOGAN F. On the mechanical modeling of the interfacial region in bonded half-planes[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1988, 55(2), 317–324.
- [95] HELGESON DE, AYDIN A. Characteristics of joint propagation across layer interfaces in sedimentary rocks[J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(8), 897–911.
- [96] MARTINEZ D, GUPTA V. Energy criterion for crack deflection at an interface between two orthotropic media[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1994, 42(8), 1247–1271.
- [97] COOKE M L, UNDERWOOD C A. Fracture termination and step-over at bedding interfaces due to frictional slip and interface opening[J]. *Journal of Structural Geology*, 2001, 23(2), 223–238.
- [98] 张士诚, 郭天魁, 周彤, 等. 天然页岩压裂裂缝扩展机理试验[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 497–581. [ZHANG S C, GUO T K, ZHOU T, et al. Fracture propagation mechanism experiment of hydraulic fracturing in natural shale[J] *ACTA PETROLEI SINICA*, 2014, 35(3): 497–581.]
- [99] 侯振坤, 杨春和, 王磊, 等. 大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 407–414. [HOU Z K, YANG C H, WANG L, et al. Hydraulic fracture propagation of shale horizontal well by large-scale true triaxial physical simulation test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 407–414.]
- [100] 谭鹏. 多岩性组合层状储层水力裂缝垂向扩展的力学行为研究[D]. 中国石油大学(北京), 2019. [TAN P. Mechanical behavior of hydraulic fracture vertical propagation for layered formation with multi-lithology combination[D]. China University of Petroleum, Beijing, 2019.]
- [101] COOK T S, ERDOGAN F. Stresses in bonded materials with a crack perpendicular to the interface[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1972, 10(8), 677–697.
- [102] GOLDSTEIN R V, OSIPENKO N M. Initiation of a secondary crack across a frictional interface[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 140: 92–105.
- [103] CHENG W, JIN Y, CHEN M. Reactivation mechanism of natural fractures by hydraulic fracturing in naturally fractured shale reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science & Engineering*. 2015, Vol 23: 431–439.
- [104] CHENG W, JIN Y, et al. Experimental investigation about influence of pre-existing fracture on hydraulic fracture propagation under tri-axial stresses[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2015, Vol 33: 467–473
- [105] BLANTON T L. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures[C]. 1982, SPE 10847.
- [106] ZHOU J, CHEN M, JIN Y, 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: 1143–1152.
- [107] 曾青冬, 姚军. 基于扩展有限元的页岩水力压裂数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2014, 35(11): 1239–1248. [ZENG Q D, YAO J. Numerical Simulation of Shale Hydraulic Fracturing Based on the Extended Finite Element Method[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, 35(11): 1239–1248.]
- [108] 李玉梅, 吕炜, 宋杰, 等. 层理性页岩气储层复杂网络裂缝数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(4): 108–113. [LI Y M, LU W, SONG J, et al. Numerical simulation of fractures in complex network of stratified shale gas reservoir [J], *Oil drilling technology*, 2016, 44(4): 108–113.]
- [109] 肖晖. 裂缝性储层水力裂缝动态扩展研究[D]. 西南石油大学, 2014. [XIAO H. Research of hydraulic fracturing dynamic propagation in fractured reservoirs[D]. Southwest Petroleum University, 2014.]
- [110] BLANTON T L. Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs[C]. 1986, SPE 15261.

- [111] CHENG W, JIN Y, CHEN M, et al. A criterion for a hydraulic fracture crossing a natural fracture in a 3D space[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2014, Vol 41(3): 371–376.
- [112] 曾青冬. 页岩致密层压裂裂缝扩展数值模拟研究[D]. 中国石油大学(北京), 北京, 2016. [ZENG Q D. Numerical simulation study of hydraulic fracture propagation in shale and tight reservoirs[D]. China University of Petroleum, Beijing.]
- [113] 孙可明, 张树翠. 水力裂缝遇斜交层理弱面的扩展规律解析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 3535–3539. [SUN K M, ZHANG S C. Hydraulic fracture propagation analytical analysis meeting skew bedding[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(2): 3535–3539.]
- [114] WU K, OLSON J E. Mechanics analysis of interaction between hydraulic and natural fractures in shale reservoirs[C]. *Unconventional Resources Technology Conference*, 2014, doi: 10.15530/urtec-2014-1922946.
- [115] 张搏, 李晓, 王宇. 排量对水力压裂网络扩展影响的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 26(6): 1516–1522. [ZHANG B, LI X, WANG Y. Experimental study on effect of pump rate on fracture network propagation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 26(6): 1516–1522.]
- [116] 沈国军, 陈晨, 高帅, 等. 压裂液对油页岩裂缝扩展影响的数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(32): 1671–1815. [SHEN G J, CHEN C, GAO S, et al. Numerical simulation on the effect of fracturing fluid on oil shale fracture propagation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(32): 1671–1815.]
- [117] 龚道光, 曲占庆, 李建雄, 等. 基于ABAQUS平台的水力裂缝扩展有限元模拟研究[J]. *岩土力学*, 2016, 3(5): 1512–1519. [GONG D G, QU Z Q, LI J X, et al. Extended finite element simulation of hydraulic fracture based on ABAQUS platform[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 3(5): 1512–1519.]
- [118] 王永辉, 刘玉章, 丁云宏, 等. 页岩层理对压裂裂缝垂向扩展机制研究[J]. *钻采工艺*, 2017, 40(5): 39–42. [WANG Y H, LIU Y Z, DING Y H, et al. Research on influence of shale bedding to vertical extension mechanism of hydraulic fracture[J]. *D R ILLING & P R ODUCTION TECHNOLOGY*, 2017, 40(5): 39–42.]
- [119] 何建华, 丁文龙, 王哲, 等. 页岩储层体积压裂缝网形成的主控因素及评价方法[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(4): 108–117. [HE J H, DING W L, WANG Z, et al. Main controlling factors of fracture network formation of volume fracturing in shale reservoirs and its evaluation method[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(4): 108–117.]
- [120] 侯冰, 陈勉, 程万, 等. 页岩气储层变排量压裂的造缝机制[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(11): 2149–2152. [HOU B, CHEN M, CHENG W, et al. Fracturing mechanism of shale gas reservoir with variable pump rates [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(11): 2149–2152.]
- [121] 解经宇. 龙马溪组页岩射孔井水力压裂裂缝形态模拟实验研究[D]. 中国地质大学(武汉), 2019. [XIE J Y. Experimental investigation on hydraulic fracture geometry of perforated well in Longmaxi Shale Gas Reservoir[D]. China University of Geosciences, 2019.]
- [122] 罗明良, 杨宗梅, 巩锦程, 等. 压裂液技术及其高压流变性研究进展[J]. *油田化学*, 2018, 35(4): 715–720. [LUO M L, YANG Z M, GONG J C, et al. Progress on fracturing fluid technology and its rheological property at high pressure[J]. *Oilfield Chemistry*, 2018, 35(4): 715–720.]
- [123] 周大伟, 张广清. 超临界CO₂压裂诱导裂缝机理研究综述[J]. *石油科学通报*, 2020, 5(2): 239–253. [ZHANG D W, ZHANG G Q. A review of mechanisms of induced fractures in SC-CO₂ fracturing[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(2): 239–253.]
- [124] 王海柱, 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 H Z, SHEN Z H, LI G S. Technology of developing shale gas with supercritical CO₂[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(3): 30–35.]
- [125] 韩烈祥, 朱丽华, 孙海芳, 等. LPG无水压裂技术[J]. *天然气工业*, 2014, 34(6): 48–54. [HAN L X, ZHU L H, SUN H F, et al. LPG waterless fracturing technology[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(6): 48–54.]
- [126] 范志坤, 任韶然, 张亮, 等. LPG压裂工艺在超低渗储层中的应用[J]. *特种油气藏*, 2013, 20(2): 142–145. [FAN Z K, REN S R, ZHANG L, et al. Application of LPG fracturing technology in ultralow permeability reservoirs[J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 2013, 20(2): 142–145.]
- [127] 刘立峰, 张士诚. 通过改变近井地应力场实现页岩储层缝网压裂[J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(4): 71–74. [LIU L F, ZHANG S C. Net fracturing by changing the surrounding in-site stress in shale reservoirs[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(4): 71–74.]
- [128] 李元清. 影响压裂裂缝形态的主控参数研究[J]. *油气井测试*, 2016, 25(2): 14–18. [LI Y Q. Study on multilayered test capacity evaluation for multilayer fracturing in tight sandstone gas reservoir[J]. *Well testing*, 2016, 25(2): 14–18.]
- [129] HOU B, CHANG Z, FU W, et al. Fracture initiation and propagation in deep shale gas reservoir subject to alternating fluid injection hydraulic fracturing treatment[J] *SPE Journal*, 2019, DOI: 10.2118/195571-PA.
- [130] ZHANG R, HOU B, SHAN Q, et al. The study on hydraulic fracture initiation and propagation of coplanar perforation technology in the horizontal well[C]. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, 29–31 Jan, 2018, SPE/IADC-189374-MS.
- [131] ZHANG R, HOU B, SHAN Q, et al. Hydraulic fracturing initiation and near-wellbore nonplanar propagation from horizontal perforated

- boreholes in tight formation[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 55: 337–349.
- [132] 俞然刚, 张尹, 郑彬涛, 等. 射孔相位及地应力对薄互层起裂压力及裂缝扩展影响的实验研究[J]. *钻井液与完井液*, 2019, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1118.TE.20191223.1653.002.html>. [YU R G, ZHANG Y, ZHENG B T, et al. Experimental research on the influence of perforation angle and ground stress to fracture pressure and cracks extension of thin interbeds[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1118.TE.20191223.1653.002.html>.]
- [133] 杜金虎, 刘合, 马德胜, 等. 试论中国陆相致密油有效开发技术[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2): 198–205. [DU J H, LIU H, MA D S, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(2): 198–205.]
- [134] 贾光亮, 邵彤, 殷晓霞, 等. 杭锦旗区块致密气藏混合水体积压裂技术[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(2): 87–92. [JIA G L, SHAO T, YIN X X, et al. Volumetric fracturing with mixed water in tight gas reservoirs in the Hangjinqi Block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2): 87–92.]
- [135] 林伯韬, 郭建成. 人工智能在石油工业中的应用现状探讨[J]. *石油科学通报*, 2019, 04: 403–413. [LIN Botao, GUO Jiancheng. Discussion on current application of artificial intelligence in petroleum industry[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 04: 403–413. doi: 10.3969/j.issn.2096–1693.2019.04.036.]
- [136] JACOBS T. BP and startup beyond limits try to prove that cognitive AI is ready for oil and gas[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 2018, doi: 10.2118/1018–0026–JPT.
- [137] ZHU Q. Application in drilling tool combination aided design based on data intelligence[C]. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, Manama, Bahrain, Mar 18–21, 2019, SPE–195093–MS.
- [138] KHAN M R, ALNUAIM S, TARIQ Z, et al. Machine learning application for oil rate prediction in artificial gas lift wells[C]. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, Manama, Bahrain, Mar 18–21, 2019, SPE–194713–MS.
- [139] ALARFAJ M K, ABDULRAHEEM A, BUSALEH Y R. Estimating dewpoint pressure using artificial intelligence[C]. *SPE Saudi Arabia section Young Professionals Technical Symposium*, Dhahran, Saudi Arabia, Mar 19–21, 2012, SPE 160919.
- [140] SULTAN A. New artificial neural network model for predicting the TOC from well logs[C]. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*, Manama, Bahrain, Mar 18–21, 2019, SPE–194716–MS.

(编辑 马桂霞)