

深层页岩气储层压裂裂缝导流能力模拟研究现状

黎文昊 严树资 胡颂贤 王佳兴

重庆科技大学 石油与天然气工程学院, 重庆 401331

[摘要]深层页岩气储层(埋深 $>3500\text{m}$)普遍存在高地应力、高闭合压力和强应力敏感等特征,压裂形成的水力裂缝导流能力是决定产能的关键因素。本文系统综述了深层页岩气压裂裂缝导流能力的研究现状,重点总结了实验测试、解析模型与数值模拟三方面的进展。实验研究表明,支撑剂在高应力下的压实、嵌入与破碎是导流能力衰减的主控因素,其中压实贡献最大(约72%),嵌入次之(约14%)。优化支撑剂类型、铺砂浓度、压裂液体系及生产制度可有效延缓导流能力下降。解析模型方面,赫兹接触理论、等效裂缝及多因素耦合模型为导流能力快速计算提供了理论工具,但仍依赖实验标定,对复杂缝网描述不足。数值模拟中,嵌入式离散裂缝模型(EDFM)、扩展有限元法(XFEM)、CFD-DEM耦合方法及格子玻尔兹曼方法(LBM)等各具优势,分别适用于宏观缝网流动、裂缝扩展模拟、支撑剂微观行为及孔隙流动分析,但在多场全耦合、支撑剂非均匀分布动态演化及现场验证方面仍存在局限。未来研究应致力于多尺度多场耦合模型构建、人工智能代理模型开发,以及真实三维地质力学-流动一体化模拟,以推动深层页岩气压裂裂缝导流能力的精准预测与优化调控。

[关键词]深层页岩气;水力压裂;裂缝导流能力;数值模拟;多场耦合;支撑剂;应力敏感

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18625

中图分类号: TE3

文献标识码: A

Current Status of Simulation Research on Fracturing Fracture Conductivity of Deep Shale Gas Reservoirs

LI Wenhao, YAN Shuzi, HU Songxian, WANG Jiaying

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing, 401331, China

Abstract: Deep shale gas reservoirs (burial depth $>3,500\text{ m}$) commonly exhibit characteristics such as high ground stress, high closure pressure, and strong stress sensitivity. The hydraulic fracture conductivity formed by fracturing is a key factor determining productivity. This article provides a systematic overview of the current research status on the flow conductivity of deep shale gas fractures, with a focus on summarizing the progress in experimental testing, analytical models, and numerical simulations. Experimental studies have shown that the compaction, embedding, and fragmentation of proppants under high stress are the main controlling factors for the attenuation of flow capacity, with compaction contributing the most (about 72%), followed by embedding (about 14%). Optimizing the type of proppant, sand concentration, fracturing fluid system, and production system can effectively delay the decline in diversion capacity. In terms of analytical models, Hertz contact theory, equivalent cracks, and multi factor coupling models provide theoretical tools for rapid calculation of flow capacity, but still rely on experimental calibration and lack sufficient description of complex fracture networks. In numerical simulation, embedded discrete fracture model (EDFM), extended finite element method (XFEM), CFD-DEM coupling method, and lattice Boltzmann method (LBM) have their own advantages and are suitable for macroscopic fracture network flow, crack propagation simulation, micro behavior of proppants, and pore flow analysis, respectively. However, there are still limitations in multi field full coupling, dynamic evolution of non-uniform distribution of proppants, and field verification. Future research should focus on the construction of multi-scale and multi field coupling models, the development of artificial intelligence agent models, and the integration of real 3D geomechanics and flow simulation, in order to promote accurate prediction and optimization of the flow capacity of deep shale gas fractures.

Keywords: deep shale gas; hydraulic fracturing; crack conductivity; numerical simulation; multi field coupling; proppant; stress sensitivity

页岩气是富有机质泥页岩中的一种重要非常规天然气资源,其高效开发对保障国家能源安全具有战略意义。我国页岩气资源潜力巨大,但储层普遍具有低孔、低渗、非均质性强等特点,且地质力学条件与应力状态差异显著,导致压裂改造效果难以预测,开采难度极大。压裂的核心目标是形成具有高导流能力的大规模复杂裂缝网络,扩大储层改造体积。然而,实际压裂过程中裂缝形态复杂多变,尤其在普遍采用低黏度滑溜水进行大排量

压裂的背景下,支撑剂能否有效进入并均匀铺置于复杂裂缝分支中,如何提升裂缝网络的整体导流能力,仍是尚未完全解决的关键问题。为此,本文围绕页岩气压裂中支撑剂运移与裂缝导流能力这一核心难题展开研究,旨在建立三维支撑剂运移模型、发展导流能力实验与计算模型、构建考虑支撑剂非均匀分布的产能预测模型,以期为我国页岩气高效压裂设计与产能评价提供理论依据与技术支持。

1 实验模拟研究现状

页岩气井通常采用含有支撑剂的压裂液进行压裂,通过支撑剂支撑裂缝以延缓其闭合。然而,支撑剂在长期高闭合压力作用下会发生压实、嵌入、破碎及运移,尤其在深层页岩高地应力条件下,裂缝表现出强应力敏感性,导致导流能力持续衰减,影响长期产能。目前,大量学者针对支撑剂损伤机制与导流能力控制开展了系统的实验研究,重点围绕应力敏感性、支撑剂行为、压裂液伤害等方面展开,为压裂设计与生产制度优化提供了重要依据。

1.1 基于实验的裂缝导流能力衰减机理与控制方法

支撑剂在高闭合应力下的动态损伤是导流能力下降的核心。吴建发^[1]等人采用“定围压变流压测试方法”,模拟了生产过程中流压变化对支撑剂运移的影响。研究发现,无支撑剂时裂缝渗透率损失率可达 65%,而支撑剂的加入能显著降低应力敏感性。提高铺砂浓度可进一步减弱敏感性,但效果随浓度增加而趋缓。

研究还强调了生产制度的重要性。采用“小压差逐级降压”方式相比大幅降压,能有效减缓支撑剂的嵌入与破碎,保护裂缝导流能力。实验识别出一个关键临界有效应力值(约 19MPa):低于此值,渗透率恢复率高(约 95%);超过此值,导流能力将发生不可逆的显著下降。这一发现为深层页岩气井的合理配产提供了关键阈值。

1.2 裂缝导流能力影响因素的实验研究

大量学者针对页岩储层水力压裂支撑剂导流能力的衰减机理与控制方法开展了系统研究。刘学伟^[2]等人采用 20~40、40~60、70~100 目的陶粒、石英砂及覆膜砂支撑剂开展裂缝导流能力研究,重点分析了支撑剂类型、颗粒大小、铺砂浓度、应力循环加卸载和滑溜水作用对支撑剂导流能力影响研究。研究表明,在支撑剂类型方面,陶粒的导流能力显著高于石英砂和覆膜砂,在闭合压力达 70MPa 时仍可保持 $45\mu\text{m}^2\text{cm}$ 以上的导流性能;不同支撑剂类型的导流能力对比如图 1 所示,在高闭合压力下陶粒的优势更为明显。在支撑剂粒度与组合方面,低闭合压力下 20~40 目陶粒导流能力最大,而高闭合压力下组合支撑剂(20~40 目与 40~60 目陶粒以 1:2 混合)表现出更优的导流能力与抗破碎性;在铺砂浓度方面,导流能力随浓度增加而提升,综合考虑经济性与施工效果,推荐铺砂浓度为 $7.5\text{kg}/\text{m}^2$ 。此外,研究还发现循环应力加载会使导流能力较稳载模式下降 31.7%,主要由于支撑剂嵌入加剧及破碎颗粒堵塞孔隙所致。在压裂返排液污染方面,胍胶压裂液导致导流能力下降 76.5%,显著高于滑溜水体系的 33.9%,因此建议选用低伤害滑溜水压裂液体系以减轻污染。研究成果揭示了多因素对导流能力的影响机制。

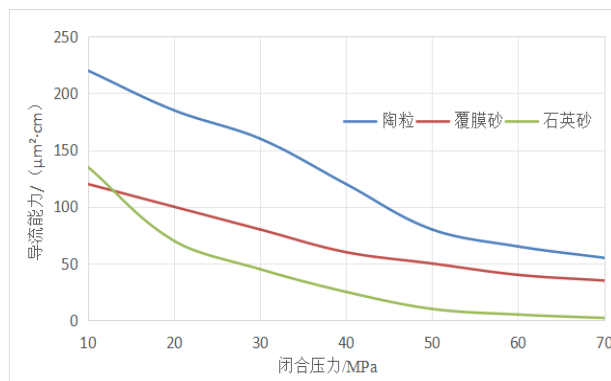


图1 支撑剂类型对导流能力的影响(刘学伟等人^[1])

1.3 支撑剂压实、嵌入与破碎对导流能力的量化影响

为厘清各损伤机制的贡献,王欣桐等人^[3]设计了钢板与岩板组合实验(图 1.3),系统对比了“仅压实”“压实+破碎”“压实+嵌入”及三者叠加四种情景。实验表明,导流能力下降可分为三个阶段:低压阶段($<20\text{MPa}$)以压实为主;中压阶段($20\sim60\text{MPa}$)嵌入加剧;高压阶段($>30\text{MPa}$)破碎率增大。通过对比不同组合的导流能力变化,四组导流能力从高到低依次为:A 钢板+钢砂(仅压实) $>$ B 钢板+陶粒(压实+破碎) $>$ C 岩板+钢砂(压实+嵌入) $>$ D 岩板+陶粒(三者叠加),直观体现了“仅压实”“压实+破碎”“压实+嵌入”“三者叠加”四种情境下导流能力的衰减程度差异。量化分析显示,压实贡献最大(约 72%),嵌入次之(约 14%),破碎最小(约 9%)。该结果明确了各机制的影响程度,为支撑剂优选提供了直接依据。支撑剂在裂缝中的受力与嵌入行为是其导致导流能力下降的物理基础,其简化力学分析模型如图 2 所示。

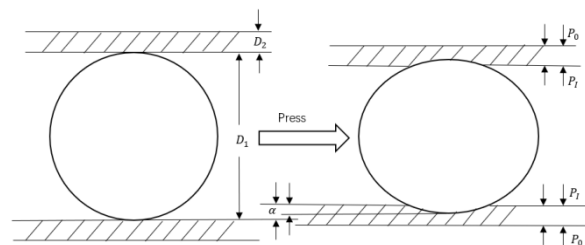


图2 单个支撑剂在裂缝中的应力分析图(吴国涛等人^[6])

1.4 支撑剂回流与应力加载方式对导流能力的影响研究

陈浩等人^[4]通过自主研发的回流模拟系统,研究了不同应力路径下导流能力的变化。对比变围压与变流压两种测试方法发现,变流压条件下导流能力前期下降更快,且支撑剂回流率显著更高(可达 20.53%),更贴近实际生产情况。研究指出,对于高铺砂浓度裂缝,应采用变流压测试以更真实反映支撑剂运移的影响,避免低估导流能力伤害。

1.5 压裂液侵入对页岩储层导流能力的伤害机制研究

压裂液侵入会严重劣化支撑剂和岩石的力学性能。袁旭等人^[5]的研究表明,液体浸泡会加剧支撑剂破碎,尤以

大粒径石英砂为甚（破碎率上升 65.1%），并显著加重支撑剂嵌入。在不同液体类型中，清水造成的伤害最大（导流能力下降 81.7%），而 2%KCl 溶液因具防膨性伤害相对较小。该研究强调，在压裂液体系选择、支撑剂粒径设计及铺砂浓度优化时，必须综合考虑压裂液侵入带来的化学-力学耦合伤害。

2 解析模型研究现状

深层页岩气压裂裂缝导流能力的准确预测，是优化压裂设计、评估长期产能的核心理论问题。解析模型因其形式简洁、物理意义明确、计算高效等特点，成为理解裂缝导流能力变化机理的重要工具。本节对现有解析模型的研究进展进行系统梳理，主要围绕支撑剂嵌入、缝网等效及多因素耦合等关键过程。

吴国涛等人^[6]与 Li 等人^[7]基于赫兹接触理论，建立了计算支撑剂嵌入和裂缝导流能力的解析模型，适用于支撑剂单层或多层铺置的理想及实验情况。张晗等人^[8]根据水电相似原理，提出了“等效裂缝”概念，建立了复杂缝网导流能力优化模型。为同时刻画支撑剂层压实与颗粒嵌入的双重伤害（图 3），陈冬等人^[9]耦合孔隙压缩与固体接触理论，建立了考虑压实与嵌入双重作用的导流能力模型。

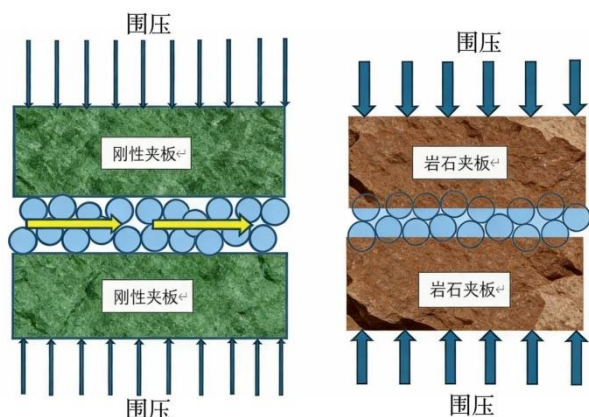


图 3 支撑剂充填裂缝导流能力实验原理（陈冬等人^[9]）

侯腾飞等人^[10]进一步综合考虑支撑剂嵌入、变形及压裂液伤害，建立了多因素影响的计算模型。针对高地应力条件，陈铭等人^[11]建立了考虑弹塑性变形的支撑剂嵌入预测模型。上述解析方法多为半经验公式，需经实验数据校准。

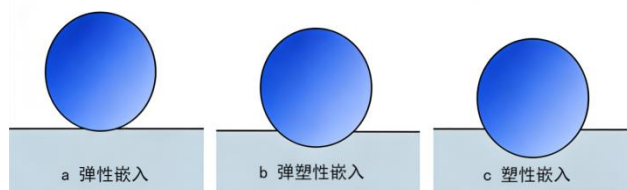


图 4 支撑剂嵌入阶段示意图（侯腾飞等人^[11]）

3 数值模拟研究现状

在室内实验与解析模型之外，计算流体力学（CFD）

与离散元（DEM）等数值模拟方法已成为研究人工裂缝变形与导流能力的重要手段。朱海燕、刘英君、王向阳等^[12]学者通过 CFD-DEM 耦合模型，综合考虑支撑剂破碎及渗流-应力相互作用，系统分析了铺砂浓度、支撑剂组合、水岩作用、裂缝形态及闭合应力等因素对支撑剂嵌入、破碎及导流能力的影响机制，揭示了相关力学与流动规律。另一方面，徐加祥、丁云宏、杨立峰等人^[13]采用 DEM 与格子玻尔兹曼方法（LBM）进行模拟，利用 LBM 在介观尺度及复杂边界处理方面的优势，更精细地刻画了支撑剂孔隙内的流动行为。

作为连接实验与工程应用的关键桥梁，数值模拟能够高效复现压裂缝网形成、支撑剂运移及导流能力演化全过程，为深层页岩气压裂优化提供量化依据。针对深层储层高地应力、强应力敏感及复杂缝网等特点，当前主流方法聚焦于宏观流动、细观力学及多场耦合模拟，主要包括嵌入式离散裂缝模型（EDFM）、扩展有限元法（XFEM）、CFD-DEM 耦合方法及 LBM 等。这些方法各具理论基础与适用范围，在精度、场景适应性与计算效率上相互补充，共同推动该领域研究进展。

3.1 嵌入式离散裂缝模型（EDFM）

嵌入式离散裂缝模型（EDFM）通过将裂缝作为独立流动单元嵌入储层基质网格，无需对裂缝区域进行精细网格划分，仅通过引入裂缝渗透率张量即可实现基质与裂缝、裂缝与裂缝间的流动耦合，有效解决了传统有限元法在复杂缝网模拟中网格划分难度大、计算效率低的瓶颈。EDFM 方法的网格处理，裂缝网格与基质网格独立，通过非相邻连接（NNC）实现流动交换，从而避免了复杂的局部网格划分。该方法已被广泛应用于页岩气藏复杂缝网的流动表征与开发参数优化，尤其适用于大规模缝网的高效模拟。

在深层页岩气领域，EDFM 的核心应用集中于缝网导流能力评价与产能联动预测。徐加祥等人^[13]研究表明，EDFM 能够精准刻画“主缝-分支缝”的流量分配特征，分支缝因开度较小、支撑剂铺置不足，其导流贡献仅为主缝的 30%~40%。此外，EDFM 与缝网扩展模拟方法的耦合，实现了“裂缝形态演化-导流能力分布-产量预测”的一体化模拟，为施工参数优化提供了直接技术支撑。但该方法的局限性在于对支撑剂嵌入、破碎等细观力学行为的描述不足。

3.2 扩展有限元法（XFEM）

扩展有限元法（XFEM）通过在位移场中引入裂缝尖端与裂缝面的富集函数，实现了裂缝扩展过程的无网格重构模拟。该方法擅长捕捉裂缝尖端应力集中效应，能够精准描述高地应力条件下水力裂缝动态扩展、分支形成及缝宽演化过程，为分析裂缝形态对导流能力的影响提供细观力学基础。

彭越等人^[14]在裂缝导流能力模拟中, XFEM 的优势体现在“裂缝扩展-支撑剂运移-导流能力”的全流程耦合表征。通过 XFEM 可量化分析裂缝分支角度、缝宽分布等形态参数对支撑剂铺置均匀性的影响。例如, 分支缝与主缝夹角小于 45° 时, 支撑剂更易进入分支缝形成有效支撑; 而夹角大于 60° 时易出现“空支撑”现象, 导致局部导流能力骤降。但 XFEM 计算成本较高, 更适用于细观尺度的机理研究。

3.3 计算流体力学-离散元耦合方法 (CFD-DEM)

CFD-DEM 耦合方法是研究支撑剂运移、铺置及裂缝导流能力细观机理的核心工具。其原理为: 通过 DEM 模拟支撑剂颗粒的碰撞、嵌入、破碎等细观行为, 通过 CFD 模拟压裂液/天然气在裂缝中的宏观流动, 利用相间耦合模型实现流体与固体颗粒的相互作用, 最终复现支撑剂在复杂裂缝中的运移规律及导流能力演化过程。

高庆庆等人^[15]研究通过 CFD-DEM 模拟揭示了支撑剂与岩石弹性模量对裂缝导流能力的影响: 支撑剂弹性模量越高, 裂缝缝宽越大, 导流能力越高; 岩石弹性模量越大, 支撑剂嵌入越浅, 导流能力亦越高。该方法还可模拟“主缝+支缝+次微缝”结构中支撑剂的分流规律, 优化压裂液黏度与排量以改善支撑剂分布。

3.4 数值模拟方法的对比与现存不足

当前主流数值模拟方法在深层页岩气压裂裂缝导流能力研究中各有侧重, 其核心特征对比见表 1:

表 1 主流数值模拟方法对比

模拟方法	核心优势	适用场景	主要局限性
EDFM	计算效率高, 适配复杂缝网	宏观缝网导流能力评价、压后产能预测	细观机理表征不足
XFEM	精准模拟裂缝扩展与应力演化	细观裂缝形态-导流能力耦合研究	大规模缝网模拟效率低
CFD-DEM	复现支撑剂运移、嵌入、破碎细观机理	支撑剂参数优化、细观机理研究	计算成本高, 尺度有限
LBM	擅长复杂孔隙通道流动, 边界处理简单	支撑剂孔隙流动、流固耦合研究	宏观缝网模拟适用性差

尽管各类方法已取得显著进展, 但当前数值模拟研究仍存在三大核心不足: ①多场耦合描述不全面, 对“化学-力学-流动”全耦合表征不足; ②支撑剂非均匀铺置与动态损伤的耦合模拟缺失; ③实验校准与现场验证不足, 导致模拟结果与现场产能存在偏差。

未来, 数值模拟的发展趋势将向“多方法融合、多场全耦合、数据驱动优化”演进: 推动 CFD-DEM 与 EDFM/XFEM 的多尺度耦合; 引入人工智能代理模型提升计算效率; 构建真实三维地质力学-流动耦合模型, 提升模拟结果的现场适用性。

4 结论

深层页岩气储层具有高地应力、高闭合压力与强应力敏感等特征, 其压裂裂缝导流能力是决定压裂效果与长期

产能的关键因素。本文系统梳理了深层页岩气压裂裂缝导流能力的实验测试、解析模型与数值模拟三方面的研究进展, 主要结论如下:

(1) 实验研究表明, 支撑剂在长期高闭合应力作用下的压实、嵌入、破碎及运移是导致裂缝导流能力衰减的核心机制。其中, 压实贡献最大(约 72%), 嵌入次之(约 14%), 破碎相对较小(约 8%)。优化铺砂浓度、采用陶粒支撑剂、实施“小压差逐级降压”生产制度, 可显著延缓导流能力下降。压裂液侵入会加剧支撑剂嵌入与破碎, 尤其是清水和胍胶压裂液伤害较大, 推荐采用低伤害滑溜水体系。

(2) 解析模型方面, 基于赫兹接触理论、等效裂缝原理及多因素耦合框架的模型, 为导流能力的快速计算与机理分析提供了有效工具。现有模型能够量化支撑剂嵌入、裂缝压实及化学伤害的影响, 但多属于半经验公式, 依赖实验标定, 对复杂缝网与非均匀支撑的描述仍显不足。

(3) 数值模拟方法, 在揭示复杂缝网流动与细观机理方面具有独特优势。嵌入式离散裂缝模型(EDFM)适用于宏观缝网流动与产能预测; 扩展有限元法(XFEM)擅长模拟裂缝扩展与应力演化; CFD-DEM 耦合方法可精细刻画支撑剂运移、嵌入与破碎过程; 格子玻尔兹曼方法(LBM)则适于模拟支撑剂孔隙内的流动。然而, 现有模拟在“化学-力学-流动”全耦合、支撑剂非均匀铺置动态演化, 以及模型现场验证方面仍存在明显不足。

(4) 未来发展趋势, 应聚焦于多尺度、多场耦合的模型构建, 推动 EDFM/XFEM 与 CFD-DEM/LBM 等方法融合, 发展人工智能代理模型以提升计算效率, 并融合地质、测井与监测数据构建真实三维地质力学-流动耦合模型, 从而实现深层页岩气压裂裂缝导流能力的精准预测与优化控制。

基金项目: 重庆市大学生科技创新训练项目《深层页岩气压裂裂缝变形机理及模型研究》, 项目编号: S202511551061。

【参考文献】

- [1] 吴建发, 樊怀才, 张鉴, 等. 页岩人工裂缝应力敏感性实验研究——以川南地区龙马溪组页岩为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 71-81.
- [2] 刘学伟. 页岩储层水力压裂支撑裂缝导流能力影响因素[J]. 断块油气田, 2020, 27(3): 394-398.
- [3] 王欣桐, 吕照, 施雷庭, 等. 吉木萨尔页岩油藏人工裂缝导流能力动态变化规律[J]. 科学技术工程, 2022, 22(1): 136-141.
- [4] 陈浩, 高帅强, 吴天鹏, 等. 支撑剂回流对页岩人工裂缝导流能力影响试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 142-149.
- [5] 袁旭, 许冬进, 陈世海, 等. 压裂液侵入对页岩储层导流能

力伤害[J].科学技术与工程,2020,20(9):3591-3597.

[6]吴国涛,胥云,杨振周,等.考虑支撑剂及其嵌入程度对支撑裂缝导流能力影响的数值模拟[J].天然气工业,2013,33(5):65-68.

[7]Li,Kewen, Gao, et al. New Mathematical Models for Calculating Proppant Embedment and Fracture Conductivity[J].SPE Journal,2015,20(3):496-507.

[8]张晗.四川盆地龙马溪组页岩储层缝网导流能力优化[J].天然气地球科学,2019,30(7):955-962.

[9]侯腾飞.页岩储层复杂裂缝支撑剂非均匀分布规律及导流能力研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.

[10]陈冬,王楠哲,叶智慧,等.压实与嵌入作用下压裂裂缝导流能力模型建立与影响因素分析[J].石油钻探技术,2018,46(6):82-89.

[11]陈铭,张士诚,柳明,等.水力压裂支撑剂嵌入深度计算方法[J].石油勘探与开发,2018,45(1):149-156.

[12]朱海燕,刘英君,王向阳,等.考虑支撑剂颗粒破碎的页岩分支裂缝导流能力[J].中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(1):72-79.

[13]徐加祥,丁云宏,杨立峰,等.基于格子—玻尔兹曼方法的裂缝导流能力流固耦合[J].大庆石油地质与开发,2020,39(4):94-100.

[14]彭越.页岩气藏裂缝扩展及产能预测数值模拟研究[D].北京:中国地质大学(北京),2024.

[15]高庆庆.页岩支撑裂缝导流能力的离散元流固耦合数值模拟研究[D].四川:西南石油大学,2019.

作者简介:黎文昊(2004—),男,汉族,重庆大足人,本科在读,重庆科技大学,研究方向:采油工程。