

页岩储层水力裂缝导流能力研究现状

刘程州 黄柏铃 罗诗淑 张鑫 左晨辰

重庆科技大学 石油与天然气工程学院, 重庆 401331

[摘要]页岩储层水力压裂技术是提高页岩气采收率的核心手段,而裂缝导流能力直接决定了压裂效果及储层产能。本论文系统综述了页岩储层水力裂缝导流能力的研究进展,涵盖实验方法、支撑裂缝与自支撑裂缝的导流机制、理论模型及数值模拟技术。研究表明,支撑剂类型与分布、储层应力敏感性、压裂液侵入及黏土矿物伤害是影响导流能力的主要因素;自支撑裂缝通过天然粗糙面或酸蚀沟槽维持导流能力,但其长期稳定性仍需深入研究。经典立方定律修正模型和破碎-堵塞耦合模型显著提高了导流能力的预测精度,离散元方法(DEM)和格子-玻尔兹曼方法(LBM)等数值模拟技术为复杂裂缝导流能力研究提供了高效工具。实验研究与数值模拟的结合是提高导流能力评价精度的关键方向。未来需结合多尺度实验、多物理场耦合模型和智能化技术,进一步优化导流能力预测与调控方法。本论文的研究成果为页岩气开发提供了理论支撑和实践指导,对提高页岩气采收率具有重要意义。

[关键词]页岩储层;水力压裂;裂缝导流能力;支撑裂缝;自支撑裂缝;数值模拟

DOI: 10.33142/ect.v3i3.15709

中图分类号: TE357

文献标识码: A

Research Status of Hydraulic Fracture Diversion Capacity in Shale Reservoirs

LIU Chengzhou, HUANG Bailing, LUO Shishu, ZHANG Xin, ZUO Chenchen

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

Abstract: Hydraulic fracturing technology for shale reservoirs is the core means to improve shale gas recovery, and the fracture conductivity directly determines the fracturing effect and reservoir productivity. This paper systematically reviews the research progress on the hydraulic fracture diversion capacity of shale reservoirs, covering experimental methods, diversion mechanisms of supporting and self-supporting fractures, theoretical models, and numerical simulation techniques. Research has shown that the type and distribution of proppants, reservoir stress sensitivity, fracturing fluid invasion, and clay mineral damage are the main factors affecting flow conductivity; Self supporting cracks maintain their flow capacity through natural rough surfaces or acid etched grooves, but their long-term stability still needs further research. The classical cubic law correction model and the fracture blockage coupling model significantly improve the prediction accuracy of diversion capacity. Numerical simulation techniques such as Discrete Element Method (DEM) and Lattice Boltzmann Method (LBM) provide efficient tools for studying the diversion capacity of complex cracks. The combination of experimental research and numerical simulation is a key direction to improve the accuracy of diversion capacity evaluation. In the future, it is necessary to combine multi-scale experiments, multi physics coupling models, and intelligent technologies to further optimize the prediction and regulation methods of diversion capacity. The research results of this paper provide theoretical support and practical guidance for shale gas development, which is of great significance for improving shale gas recovery efficiency.

Keywords: shale reservoir; hydraulic fracturing; crack conductivity; supporting cracks; self-supporting cracks; numerical simulation

引言

页岩气作为一种重要的非常规能源,其高效开发对缓解能源短缺和优化能源结构具有重要意义。然而,页岩储层具有低孔隙度、低渗透率的特性,传统开采方式难以实现经济高效开发。水力压裂技术通过形成复杂的裂缝网络,显著提高了页岩气的采收率。裂缝导流能力作为评价压裂效果的核心指标,直接决定了储层的产能和经济性。裂缝导流能力的研究不仅有助于优化压裂设计,还能为页岩气开发提供理论支撑。近年来,国内外学者通过实验研究、理论建模和数值模拟等手段,揭示了裂缝导流能力的影响因素和演化规律。然而,由于页岩储层的非均质性和复杂性,裂缝导流能力的研究仍面临诸多挑战。本文旨在系统

总结页岩储层水力裂缝导流能力的研究进展,提出未来研究方向和应用建议,为页岩气开发提供参考。

1 实验研究方法

实验研究是揭示裂缝导流能力变化机理的基础手段,主要包括以下方向:

在支撑剂性能测试研究中,刘学伟等^[1](2020)通过室内实验对比了陶粒、石英砂和树脂涂层砂的强度特性,发现陶粒支撑剂在 30MPa 围压下的破碎率仅为 5%,而石英砂的破碎率高达 20%;陈冬等^[2](2018)通过实验研究了支撑剂嵌入深度,发现软岩中支撑剂嵌入深度可达颗粒直径的 30%~50%,导致裂缝宽度显著减小,导流能力下降 40%以上,而在硬岩中嵌入深度仅为 10%~20%,导流能

力损失较小;侯腾飞等^[3](2018)通过复杂缝网实验分析了支撑剂分布均匀性,发现支撑剂在分支缝端部富集,主缝中部密度较低,导致导流能力分布不均。在应力敏感性实验中,吴建发等^[4](2022)研究表明,在低应力环境下($<20\text{MPa}$),导流能力仅下降10%~15%,而在高应力环境下($>30\text{MPa}$),导流能力损失可达50%~60%;韩慧芬等^[5](2018)通过长期实验发现,支撑裂缝在持续应力作用下导流能力呈指数衰减,30天后仅保留初始值的40%。在压裂液伤害实验中,袁旭等^[6](2020)发现压裂液与黏土矿物发生水化反应,导致导流能力损失可达60%,且残渣含量超过5%时,导流能力下降30%以上,返排效率低于70%时,导流能力损失显著增加。

研究表明,高强度支撑剂在高应力环境下更能维持裂缝导流能力,支撑剂嵌入深度、分布均匀性、应力敏感性、压裂液伤害是影响导流能力的关键因素,优化支撑剂注入工艺和压裂液配方可有效改善导流能力^[19]。

2 支撑水力裂缝

支撑裂缝通过人工支撑剂维持导流能力,其性能受多因素制约:在支撑剂类型与粒径研究中,刘学伟等^[1](2020)指出,陶粒支撑剂具有高强度、低密度的特点,适用于高应力环境,但其成本较高,且大粒径颗粒易在狭窄裂缝中桥堵;石英砂成本低,但强度较低,易在高应力下破碎,优化粒径分布是提高其性能的关键;树脂涂层砂结合了高强度与低成本的优势,但其长期稳定性仍需进一步研究。在非均匀分布与沉降研究中,高金剑^[7](2016)通过实验发现,支撑剂在裂缝中的沉降速度受流体黏度和颗粒密度影响显著,且支撑剂在分支缝端部富集,主缝中部导流能力下降50%,优化注入工艺可改善分布均匀性。在应力闭合与嵌入研究中,陈冬等^[2](2018)建立的压实-嵌入耦合模型表明,支撑剂嵌入深度与岩石硬度呈负相关,硬岩中导流能力损失更低。研究表明,支撑剂类型、粒径分布及注入工艺是影响裂缝导流能力的关键因素,优化支撑剂组合和注入参数可显著提高导流能力^[20]。

3 自支撑裂缝

自支撑裂缝依赖天然粗糙面或酸蚀作用维持导流能力,其优势在于无需额外支撑剂:在自支撑裂缝研究中,苟兴豪等^[8](2017)通过实验发现,页岩储层中的天然裂缝表面通常具有不规则的微凸体结构,这些微凸体在剪切滑移过程中相互咬合,形成自支撑效应,且当微凸体高度达到裂缝宽度的10%~20%时,导流能力可达到支撑裂缝的70%以上。杨柳等^[9](2020)研究表明,在剪切滑移过程中,裂缝表面的微凸体发生相对位移,形成复杂的流动通道,尤其是在低应力环境下($<20\text{MPa}$),导流能力可提高30%~50%。然而,曹海涛等^[10](2019)通过实验发现,尽管天然粗糙面在短期内能有效维持导流能力,但在持续应力作用下,微凸体逐渐磨损,裂缝闭合程度增加,导流

能力呈指数衰减,30天后自支撑裂缝的导流能力仅保留初始值的40%。

在酸压自支撑裂缝研究中,卢云霄等^[11](2020)通过实验发现,酸液与裂缝表面的碳酸盐矿物发生化学反应,生成可溶性盐类和气体,形成不规则的酸蚀沟槽,当酸液浓度为15%时,沟槽深度可达0.5mm~1mm,导流能力提高50%以上。王雷等^[12](2017)研究表明,采用缓速酸液可延长反应时间,提高沟槽的均匀性,同时分段注入酸液可避免局部过度溶解,确保裂缝导流能力的均匀分布。然而,实验数据显示,30天后酸蚀沟槽逐渐闭合,导流能力下降40%~60%,未来需结合矿物改性和应力调控技术,进一步提高酸压裂缝的长期导流能力。

在闭合应力敏感性研究中,曹海涛等^[10](2019)的实验表明,在低应力环境下($<20\text{MPa}$),自支撑裂缝的导流能力表现良好,在10MPa围压下可达支撑裂缝的80%。然而,在高应力环境下($>30\text{MPa}$),自支撑裂缝的导流能力衰减较快,在50MPa围压下,导流能力损失可达60%~70%。长期应力作用下,自支撑裂缝的导流能力呈指数衰减,30天后仅保留初始值的40%。未来需结合酸压工艺和矿物改性技术,提高自支撑裂缝的长期稳定性。

研究表明,自支撑裂缝依赖天然粗糙面和酸蚀沟槽维持导流能力,但其长期稳定性较差,需进一步优化工艺和技术以提高其性能。

4 裂缝导流能力模型

围绕页岩储层压裂裂缝导流能力模型,近年来多位学者针对不同影响因素建立了多种模型,推动了压裂技术的理论发展与实践优化。陈冬等^[2](2018)建立压实与嵌入作用下的导流能力模型。该模型揭示了长期闭合应力作用下,支撑剂颗粒与裂缝壁面发生机械嵌入及塑性变形,导致裂缝宽度减小、导流能力衰减的机理。通过引入岩石硬度、支撑剂强度及应力-应变关系,模型可量化不同地质条件下导流能力的长期稳定性。其应用价值在于指导压裂设计中支撑剂粒径与强度的选择,例如在高闭合应力储层中优先选用高强度的陶粒支撑剂,以降低嵌入深度,维持裂缝有效导流通道。周小金等^[13](2018)提出支撑剂破碎后堵塞孔隙喉道的动态计算模型。该模型结合破碎概率函数与颗粒运移方程,分析高压环境下支撑剂破碎产生的细颗粒对微纳级孔隙喉道的堵塞效应,进而量化导流能力的阶段性下降规律。研究发现,支撑剂圆度低或抗压强度不足时,破碎产生的棱角状细颗粒更易形成桥堵。该模型为优化支撑剂材料(如覆膜支撑剂)及控制施工压力提供了理论依据,可减少因破碎导致的导流能力损失。郭建春等^[18](2025)研究通过建立综合考虑支撑剂粒度组成、变形、嵌入及裂缝壁面蠕变的导流能力模型,揭示了多因素耦合作用下的裂缝导流机制。模型验证表明,支撑剂粒径分布对导流能力影响显著:低闭合应力下,大粒径支撑剂

占比高可提升导流能力;而高闭合应力时,组合粒径支撑剂可有效减缓导流能力下降幅度(如60MPa应力下,1000天时导流能力较100天下降54%)。此外,支撑剂与裂缝壁面的弹性模量越大,其变形与嵌入量越小,导流能力越高;提高支撑剂黏接率可减少嵌入的不利影响。研究强调裂缝蠕变随时间与应力增加而加剧,需在长期预测中予以重视,建议在高应力条件下优先采用组合粒径支撑剂以优化导流性能。侯腾飞^[3](2018)在其博士研究中聚焦裂缝非均匀支撑对导流能力的影响,建立三维裂缝网络导流能力计算模型。该模型耦合流体力学与颗粒运移方程,模拟支撑剂在分支裂缝中的差异化沉降过程,揭示“主缝高导流、微缝低导流”的非均匀分布规律。通过引入分形维数表征裂缝复杂度,模型可量化裂缝网络的有效导流面积,为暂堵转向压裂技术参数设计(如暂堵剂用量)提供理论支撑。综上,裂缝导流能力模型的精细化与多学科融合,将持续推动页岩油气高效开发与绿色转型。

5 裂缝导流能力数值模拟

数值模拟技术为复杂裂缝导流能力预测提供高效手段:在离散元方法(DEM)研究中,高庆庆等^[14](2019)通过将支撑剂颗粒视为离散单元,并求解牛顿运动方程模拟其运动轨迹,揭示了支撑剂在裂缝中的迁移和分布规律。模拟结果表明,支撑剂在分支缝端部富集,主缝中部导流能力下降50%。在格子-玻尔兹曼方法(LBM)研究中,徐加祥等^[15](2020)将流体视为离散的粒子群,通过碰撞和迁移过程模拟其流动行为,分析了裂缝表面粗糙度对流动的影响,模拟结果表明,微凸体高度增加10%,导流能力提升15%。在三维缝网模拟研究中,杜旭林等^[16](2022)开发了三维离散缝网模型,模拟了裂缝扩展和导流能力的动态变化,结果表明,天然裂缝与人工裂缝的交互作用可显著提高导流能力。研究表明,离散元方法和格子-玻尔兹曼方法能够有效模拟支撑剂迁移和流体流动行为,而三维缝网模拟为复杂裂缝网络的导流能力研究提供了重要工具,未来需进一步结合多物理场耦合模型,提高模拟精度和应用范围。

6 结论

通过对页岩储层水力裂缝导流能力的系统研究,得出以下主要结论:支撑裂缝的导流能力受支撑剂性能、应力敏感性和压裂液伤害的共同影响,高强度支撑剂在高应力环境下表现优异,但成本较高;自支撑裂缝依赖天然粗糙面或酸蚀沟槽维持导流能力,但其长期稳定性较差;经典立方定律修正模型和破碎-堵塞耦合模型显著提高了导流能力的预测精度,离散元方法(DEM)和格子-玻尔兹曼方法(LBM)等数值模拟技术为复杂裂缝导流能力研究提供了高效工具。未来研究方向包括开发多尺度实验技术、构建多物理场耦合模型、研究自支撑裂缝长期稳定性以及应用智能化压裂设计技术^[17]。实际应用建议包括优化支撑剂

组合、改进压裂液配方、推广酸压技术和加强现场监测^[21]。尽管研究存在实验条件局限、模型简化误差和数据获取难度等局限性,但其对页岩气开发行业的理论、实践和技术贡献显著,未来需结合多尺度实验、多物理场耦合模型和智能化技术,进一步推动页岩储层水力压裂技术的发展。

基金项目:论文受大学生科技创新训练计划项目《深层页岩水力裂缝支撑剂嵌入机理及导流能力模型研究》资助,项目编号2024201006。

【参考文献】

- [1]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.
- [2]陈冬,王楠哲,叶智慧,等.压裂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.
- [3]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.
- [4]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.
- [5]韩慧芬,彭均亮,吴建,等.页岩支撑裂缝长期导流能力测试方法及测试装置改造[J].钻采工艺,2018,41(1):55-58.
- [6]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.
- [7]高金剑.复杂缝网支撑剂沉降规律及导流能力研究[D].山东:中国石油大学(华东),2016.
- [8]苟兴豪.页岩自支撑裂缝导流能力模型研究[D].四川:西南石油大学,2017.
- [9]杨柳,石富坤,赵逸清,等.页岩储层黏土矿物对裂缝导流能力伤害的影响[J].科学技术与工程,2020,20(1):153-158.
- [10]曹海涛,詹国卫,赵勇,等.川南深层页岩气藏支撑与自支撑裂缝导流能力对比[J].科学技术与工程,2019,19(33):164-169.
- [11]卢云霄,卢聪,郭建春,等.川中地区灯四段碳酸盐岩酸压自支撑裂缝导流能力实验[J].油气井测试,2020,29(1):7-12.
- [12]王雷,王琦.页岩气储层水力压裂复杂裂缝导流能力实验研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2017,32(3):73-77.
- [13]周小金,周拿云,荆晨.考虑支撑剂破碎堵塞孔隙喉道的裂缝导流能力计算模型[C].四川:中国石油西南油气田公司页岩气研究院,2018.
- [14]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.
- [15]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.

[16]杜旭林,程林松,牛焱昱,等. 考虑水力压裂缝和天然裂缝动态闭合的三维离散缝网数值模拟[J]. 计算物理,2022,39(4):453-464.

[17]蒋廷学,周健,张旭,等. 深层页岩气井裂缝扩展及导流特性研究及展望[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2017,47(11):33-40.

[18]郭建春,曾凡辉,赵志红. 页岩储层压裂组合支撑剂导流能力预测模型及应用研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2025(3):1-8.

[19]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.

[20]王桂庆. 页岩储层吸水特征及其对裂缝导流能力的影响[J]. 断块油气田,2020,27(1):95-98.

[21]朱维耀,刘青,岳明,等. 考虑支撑剂裂缝导流能力计算及缝内支撑剂运移模拟[J]. 石油与天然气化工,2019,48(2):75-78.

作者简介:刘程州(2004.9—),男,民族:汉,籍贯:重庆梁平,所在院校:重庆科技大学石油与天然气工程学院,专业:石油工程,现在身份:学生。