

油页岩储层改造技术研究进展与建议

王文焯¹, 翟梁皓^{2*}, 荀 杨¹, 李 灏³, 彭召翠², 肖雨果²

(1. 长春工程学院工程管理学院, 吉林 长春 130021; 2. 长春工程学院勘查与测绘工程学院, 吉林 长春 130021; 3. 长春工程学院工商管理学院, 吉林 长春 130021)

摘要:油页岩是一种富含有机物的沉积岩,我国已探明的油页岩资源储量位居世界第三位,实现油页岩资源的商业化开发是保证我国能源安全的重要举措之一。油页岩地下原位转化法开采具有绿色环保、占地面积小、可开发深部油页岩资源等优点,是实现中深层油页岩资源高效开发的重要技术手段。文章介绍了水力压裂、超临界CO₂压裂、酸化压裂、清水压裂等储层改造技术在油页岩原位开采过程中的应用情况和研究成果,并对比了4种储层改造技术的优缺点。同时,重点阐述了目前油页岩水力压裂技术在实验研究、数值模拟及先导试验研究方面的应用及进展。最后,论述了目前油页岩储层改造技术的不足与未来发展方向。

关键词:油页岩; 储层改造; 水力压裂; 地下原位转化

中图分类号:P634;TD83 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0012-10

Research progress and suggestion of oil shale reservoir reconstruction technology

WANG Wenxuan¹, ZHAI Lianghao^{2*}, XUN Yang¹, LI Hao³, PENG Zhaocui², XIAO Yuguo²

(1. School of Engineering Management, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China; 2. School of Surveying and Mapping Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China; 3. School of Business Management, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China)

Abstract: Oil shale reservoirs are a kind of sedimentary rocks rich in organic matter. The proven reserves of oil shale resources in China rank third in the world. Realizing the commercial development of oil shale resources is one of the important measures to ensure the energy security of our country. Oil shale underground in-situ conversion process has the advantages of green environmental protection, small footprint and can develop deep oil shale resources. It is an important technical means to realize the efficient development of middle and deep oil shale resources. This paper introduces the application and research results of hydraulic fracturing technology, supercritical CO₂ fracturing technology, acidizing fracturing technology and clear water fracturing technology in the process of in-situ exploitation of oil shale, and compares the advantages and disadvantages of four kinds of reservoir reconstruction technology. Meanwhile, the current applications and progress of hydraulic fracturing technology in experimental research, numerical simulation and pilot test project are highlighted. Finally, the deficiency and future development direction of oil shale reservoir reconstruction technology are discussed.

Key words: oil shale; reservoir reconstruction; hydraulic fracturing; underground in-situ conversion process

收稿日期:2024-08-10; 修回日期:2024-10-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.002

基金项目:吉林省自然科学基金项目“干热岩采热过程裂缝网络形态演变机制研究”(编号:YDZJ202301ZYTS228);长春工程学院大学生创新创业训练计划资助项目(编号:202311437024)

第一作者:王文焯,女,汉族,2004年生,本科生,工程造价专业,研究方向为非常规油气资源钻采技术,吉林省长春市朝阳区同志街3066号,2959348224@qq.com。

通信作者:翟梁皓,男,满族,1990生,讲师,博士,地质工程专业,研究方向为非常规油气资源钻采技术、岩石破碎技术,吉林省长春市朝阳区同志街3066号,zlh@ccit.edu.cn。

引用格式:王文焯,翟梁皓,荀杨,等.油页岩储层改造技术研究进展与建议[J].钻探工程,2025,52(3):12-21.

WANG Wenxuan, ZHAI Lianghao, XUN Yang, et al. Research progress and suggestion of oil shale reservoir reconstruction technology[J]. Drilling Engineering, 2025,52(3):12-21.

0 引言

随着社会的发展,油页岩等非常规油气资源已经成为当前资源开发领域重点关注的对象,为了应对能源消耗带来的生态与经济压力,我国政府近年来积极推进能源结构调整^[1]。现有数据表明,我国煤炭用量占比高,常规油气资源总量匮乏,油气对外依存度逐年升高^[2]。因此,非常规油气资源的高效开发和利用对保障国家能源安全具有重要意义。非常规油气资源包括油页岩、页岩油气、油砂、天然气水合物、致密油气以及煤层气等^[3]。其中,油页岩作为传统石油资源的重要替代资源之一,在国内储量丰富。我国油页岩资源储量约为 7.199×10^{11} t,折合成页岩油约为 4.76×10^{10} t^[4],埋深 ≤ 300 m、适合露天开采或井工开采的油页岩资源较少,埋深300~1000 m的油页岩资源占比高达86%,这部分油页岩资源的开发高度依赖原位开采技术的突破^[5]。

传统的地面干馏技术开采油页岩资源存在环境破坏和无法高效开采深部油页岩资源等问题,而地下原位转化技术(In-situ Conversion Process, ICP)因在地下高温热解油页岩而被认为是未来油页岩资源开发的重要保障技术之一^[6]。但由于油页岩储层具有极低的孔隙度和渗透率,地下原位转化前需要通过储层改造提高油页岩储层的渗透率,为热传递和热解产物的运移提供高渗透性的通道。目前,常用的地下原位转化技术包括局部化学反应加热、传导加热、辐射加热和对流加热等工艺手段。本文梳理和总结了油页岩储层改造技术现有的研究成果,分析了油页岩储层改造技术的不足,进而针对性的提出了解决思路与改进方法。

1 地下原位转化技术

由于油页岩储层导热效率低,导致储层加热效率极低,需通过储层改造形成裂缝网络^[7]。美国壳牌公司的ICP技术通过井下电加热法将油页岩均匀加热至裂解温度,从而提取油气资源^[8-9]。此技术对油页岩储层厚度要求较高,因此在我国应用和推广受限^[10]。

针对国内油页岩特性,我国已经研发出了多种原位转化方法,包括近临界水法(SCW)、局部化学反应法(TSA)、高压-工频电加热法(HVF)、压裂燃烧法、原位注蒸汽法(MTI)、水平井电加热轻质化法和自生热法原位转化技术(ATS)^[11]。经过现场

试验,压裂燃烧法和局部化学反应法已经实现了对油页岩油和气的原位转化过程。

近临界水法(SCW)是利用热传导介质和水溶解催化剂进行原位开采的方法,可以重点应用于低品位、深埋藏油页岩的油气提取。该技术能够绿色高效转化有机质,但通常只适用于埋深在500~1500 m之间的油页岩储层^[12]。

局部化学反应法(TSA)的工艺流程见图1^[13],将热解分为水分蒸发、有机质分解和无机矿物分解3个阶段,利用空气在预热后触发油页岩内部化学反应,这种技术操作简单且产油效率高,但并不适用于水平井,目前仍存在技术限制,且受环境因素影响较大^[14]。

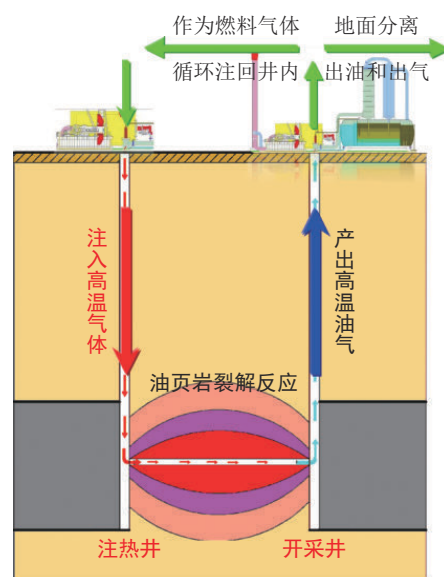


图1 吉林大学 TSA 技术原理^[13]

Fig.1 Schematic diagram of TSA

油页岩自生热法原位转化技术(ATS)的热触发过程是利用氮气预热-空气触发的方式,利用高温载热介质与氧气发生化学反应来供热,从而提高油页岩的产油效率,有利于提高裂缝渗流能力,其地下原位裂解阶段示意图见图2。徐绍涛^[15]重点研究了桦甸油页岩的氧化辅助热解反应,发现通过对温度的调控,可以促进油页岩热解、提高采集效率。但自生热法原位转化技术(ATS)开发成本面临挑战,需综合评估地质条件和经济因素。因此,实际开发过程中应综合考虑工艺合理性与经济可靠性,合理选择上述转化技术,确保油页岩高效、环保和商业化的开采。

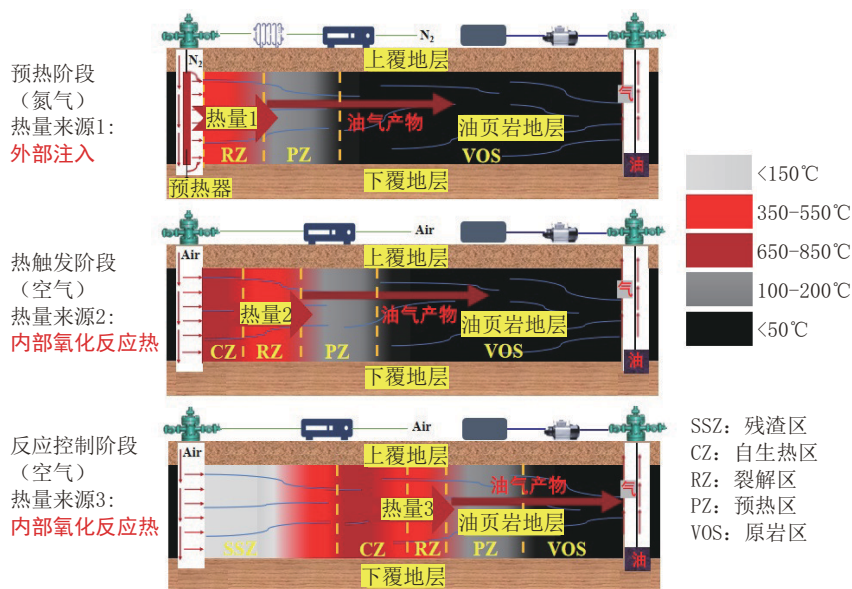
图2 ATS技术地下原位裂解主要阶段^[15]

Fig.2 Three stages in the construction of ATS technology

2 储层改造技术

上述原位转化技术高度依赖储层内部的连通性,而储层改造技术被认为是有效提高储层渗透性和连通性的有效途径之一。目前,油页岩常见的储层改造技术包括水力压裂技术、超临界CO₂压裂技术、酸化压裂技术、清水压裂技术等多种方式。

2.1 水力压裂技术

水力压裂技术是将带有黏度的高压流体泵入地下,促使多孔岩石在原位发生破碎并产生复杂的裂缝网络,从而提高储层的连通性和渗透性,迫使页岩油和混合氢化物流向生产井^[16],水平井射孔完井水力压裂示意图见图3。

在水力压裂技术研究方面,孙友宏等对水力压裂技术提高地层渗透性的原理及实践进行了系统

总结,在此基础上,提出了地下原位转化与钻采必须突破的3大关键技术^[13]。苗芷苒等^[17]通过建立缝网模型,发现裂缝易沿倾角较大的天然裂缝转移,并得出了使缝网复杂程度最大的最优天然裂缝面摩擦因数。沈永星等^[18]通过研究天然裂缝对水力压裂裂缝的影响,发现水平应力差、裂缝交叉点以及相交角对间断现象的出现有直接影响,天然裂缝长度对裂缝宽度和面积有较大影响。李彦伟等^[19]通过研究层理特征对水力压裂裂缝的影响,发现层理厚度大、层理间距大和地应力场小,有助于热渗流通道的建立,对旬邑地区油页岩水力压裂提供了施工指导。侯梦如等^[20]研究了矿物界面刚度对水力压裂裂缝的影响,得出了在刚度较小的情况下应优先进行水力压裂的结论。衡帅等^[21]通过研究油页岩断裂韧性各向异性,发现材料的各向异性与弹性常数、层理面断裂和断裂路径偏移均有关系,油页岩在垂直层理方向断裂韧性较大。

水力压裂技术具有成本较低及节省时间的优势,利用水力压裂技术能够提高能源的采集效率^[22-23]。

2.2 超临界CO₂压裂技术

超临界CO₂压裂技术是将超临界CO₂流体作为压裂液,利用高压泵将超临界状态的CO₂泵送到钻井中,进而实现页岩油的高效提取与商业化开发^[24],液态CO₂前后压裂形态见图4^[25]。孙宝江

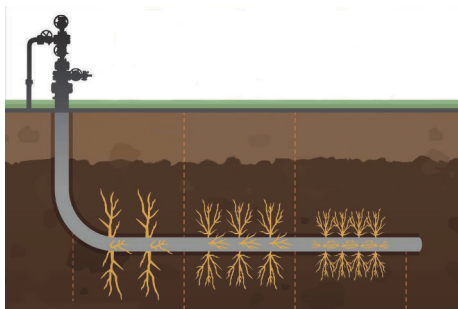
图3 水平井射孔完井水力压裂^[16]

Fig.3 Hydraulic fracturing for perforation completion in horizontal wells

等^[26]通过研究井筒内 CO_2 流动参数的变化规律,得出了井筒温度和压力条件下最优计算方法,并且发现钻杆内和环空中 CO_2 的密度、黏度和导热系数与井底深度呈负相关。程宇雄等^[27]研究了超临界 CO_2 喷射压裂技术,进行了SC- CO_2 喷射压裂作业时环空、孔眼和裂缝中的流场数值模拟研究。田时锋等^[28]经过巴西劈裂实验得出超临界 CO_2 作用会弱化页岩抗拉强度,且产生裂缝形态复杂,抗拉强度减小对地层页岩开采不利。王迎港等^[29]通过分析压

裂裂缝起裂压力特征,对低渗透性油页岩储层改造提供了技术支撑。付虹等^[30]配制出了最优条件下超临界 CO_2 增稠剂,改善了驱油效果,提高采油效率。刘卫彬等^[31]通过将超临界 CO_2 与水力携砂复合体积压裂工艺相结合,成功实施了吉页油1HF井水平井压裂。延长石油于2017年在延安X区块进行了超临界 CO_2 现场压裂试验,结果表明:井下温度达标,裂缝起裂密集,但容易出现堵砂,造成井口超压^[32]。

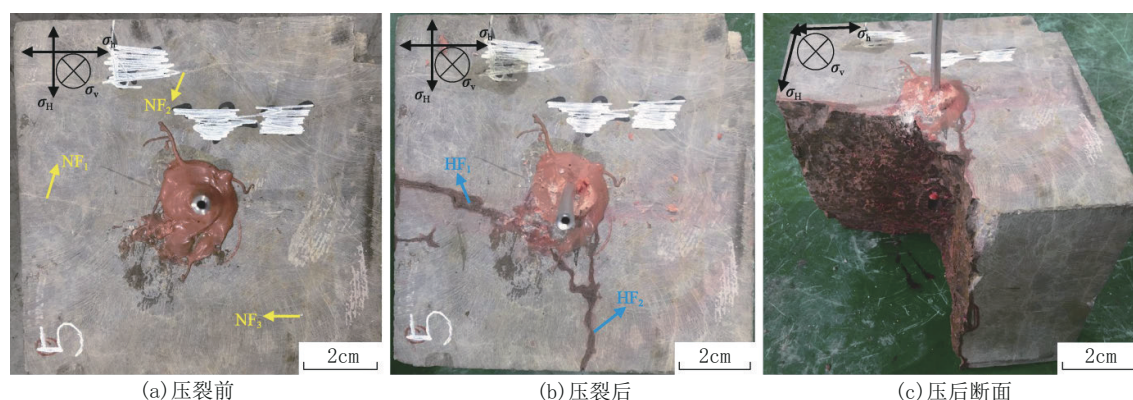


图4 液态 CO_2 前后压裂形态^[25]

Fig.4 Fracturing morphology before and after liquid CO_2

目前,超临界 CO_2 还存在摩阻高、黏度低、扩散性强、压裂过程中滤失量大等缺点,前置 CO_2 酸化压裂工艺的增产改造机理仍尚不明确^[25],未来可以通过制备环保高效减阻剂等手段进行改进。

2.3 酸化压裂技术

酸化压裂技术是在水力压裂的基础上增加酸化压裂液,对岩石物理性质进行改良,优化压裂效果的技术^[33]。主要分为普通酸化压裂技术和深度酸化压裂技术^[34],其中深度酸化压裂可以形成较长酸化压裂裂缝,应用较为广泛^[35]。深度酸化压裂技术又分为前置液酸化压裂技术和多级注入酸化压裂技术^[36]。吴亚红等^[37]对塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩岩心进行压裂实验,得出了复合酸化压裂技术有较好导流效果的结论。张辉^[38]模拟测试了水力压裂和酸化压裂对充填性天然裂缝和非充填性裂缝的导流能力,得出充填性天然裂缝可以通过酸蚀获得有效导流效果的结论。牟春国等^[39]提出了将酸液与压裂液相结合,交替注入、缝内转向的深度酸化压裂技术改造思路。周林波等^[40]提出了自支撑酸化压裂技术,同时进行软件模拟,对于高温超

深井酸化压裂具有重要意义。苗娟等^[33]针对低孔低渗碳酸盐岩储层,优化了酸化压裂技术体系,压裂效果较为明显。路建萍等^[41]通过处理反排液得到了最佳降黏工艺,有效达标处理了酸化压裂反排液。姜鹏飞^[42]提出了油页岩酸化压裂-注高温氮气原位裂解的工艺方法,在吉林省安农油页岩矿区进行了实地试验,向加热井中注入氮气进行高温热解,并利用软件模拟进行了参数优化。刘昆岩^[43]通过酸化处理显著提升油页岩孔隙度与渗透性,开辟了复杂裂缝网络形成的新途径。

酸化压裂技术由于其酸液具有强腐蚀性,对环境污染较大,当酸化压裂液注入地层后不易进行中和降解。对于酸化压裂反排液处理工艺也较为复杂,需满足多方面要求才能达到回注水的标准^[3]。

2.4 清水压裂技术

清水压裂技术是将减阻剂、黏性稳定剂和表面活性剂加入清水中^[44],作为压裂液注入裂缝使其延伸,从而从地下汲取油气资源的技术^[45]。范俊梅等^[46]制备了掺锰超轻支撑剂,降低了清水压裂支撑剂的视密度,优化了清水压裂技术。罗攀等^[47]对比

了CO₂和清水压裂特征,发现清水压裂方式增压速度快,更易形成简单裂缝网络。张龙胜等^[48]自制了一种自悬浮支撑剂进行清水压裂试验,有效满足了施工需求并减轻储层伤害。自悬浮支撑剂清水压裂目前已经在准噶尔盆地玛湖凹陷地区进行了现场应用,通过改变连续携砂液类型,发现与高黏胶液对比井相比,清水试验井的累产油量大大提高^[49]。

清水压裂技术造缝强度低、压裂裂缝宽度不足,且清水压裂液携砂能力较差导致其导流能力有限,因此,该技术在油页岩储层改造方面应用较少^[22]。

3 油页岩储层改造水力压裂技术与进展

通过对比以上几种压裂技术,发现相较水力压裂技术,超临界CO₂技术目前仍在初期研究阶段,经济成本高,且压裂流体进入井下后很难维持其超临界状态^[50];酸化压裂技术的压裂液不易降解,对环境和地下水存在污染的风险;清水压裂技术裂缝导流能力有限。目前,低渗油气藏主要开采方式为水力压裂技术。为进一步深入探索水力压裂技术的各研究领域,聚焦于水力压裂技术在实验、数值模拟以及先导试验研究方面的具体进展进行重点介绍。

3.1 水力压裂实验研究

在水力压裂实验研究方面,2014年,王维结合室内模拟实验与数值模拟方法,分析了油页岩水力压裂过程中的裂缝扩展情况,特别关注了起裂压力与各主应力间的关系,为进一步优化压裂工艺提供了理论支撑^[51]。2015年,王聪等^[52]针对油页岩储层改造技术提出了新思路,强调通过技术创新提高开采效率,开启了储层改造技术的深入研究。同年,高帅等^[53]利用实验台对桦甸不同深度油页岩进行压裂实验,得出破裂压力随深度线性增加,三向应力差异较小时更容易出现裂缝网络的结论,可在未来生产中帮助确定压裂条件、优化开采方案。2017年,高帅的研究表明,地应力差异与压裂液排量对复杂裂缝网络的形成有着至关重要的影响,这标志着对油页岩水力压裂机理的认识达到了一个新的层次^[3]。2018年,范濛等^[54]通过开展室内真三轴水力压裂实验,分析了水力压裂裂缝扩展行为的泵压曲线,识别了水力裂缝的起裂行为和其与天然裂缝

的沟通。2019年,张健等^[55]进行了立方体试样模拟页岩水力压裂,分析注射方向等因素对裂缝影响。结合水压曲线和压力条件分析裂纹发育,为提高页岩体积改造提供途径,有助于未来优化水力压裂实验设计、深入理解裂缝成因并指导工程实践。同年,张树翠等^[56]建立了非均质各向异性模型,模拟了层理方位、层理面强度对压裂裂缝的扩展方向和扩展速度,有效优化了储层改造压裂方案。2020年,张颖^[57]关注到层理结构对水力裂缝扩展的独特影响,通过室内实验揭示了这一自然特征如何制约或促进裂缝路径的选择。同年,郭培峰等^[58]通过物理模拟实验,研究了水力压裂裂缝扩展规律及与天然裂缝相交判断准则。2022年,王都等^[59]发现采用三点弯曲半圆盘的油页岩断裂韧性测试方法,有利于研究深层页岩复杂缝网形成。同年,朱颖综合考虑油页岩微观结构特征,探究了微尺度下的裂缝起裂机制,为个性化压裂方案设计提供了新视角^[7]。2023年,李德康等^[60]将一种发声流程模板用于大尺度页岩主动源发声检测中,为页岩开采风险评估提供理论支撑。

油页岩本身作为典型的横贯各向同性介质,压裂后模型内部裂缝形态的无损反演方法存在局限性,其裂缝的起裂与扩展行为预测结果可能无法精准指导实际的压裂作业。同时,由于油页岩非均质性和实验假设条件限制,不同加载条件和内部裂缝形态反演方法导致油页岩在压裂实验过程中不可避免地出现误差,因此,需要在实验设计过程中综合考虑各种潜在影响因素。

3.2 水力压裂数值模拟研究

2018年,杜书恒等^[61]通过对水力压裂裂缝非对称延伸过程展开数值模拟研究,发现全缝长压裂模拟技术有利于非均质性储层改造研究的开展。同年,朱江等^[62]提出了渗透与劈裂注浆结合的技术路线,利用RFPA软件模拟了水力裂缝扩展的行为,为改善油页岩裂解区的密封效果提供了可行方案。2019年,沈国军等^[63]采用不同排量、不同黏度压裂液,对汪清地区油页岩裂缝宽度以及长度进行了水力压裂数值模拟研究,发现压裂液排量对裂缝扩展长度的影响尤其显著。同年,陈强^[64]的研究进一步验证了地应力、压裂液排量等因素对水力裂缝起裂与扩展状态的影响,并运用ABAQUS软件深入分析了不同压裂工况下的裂缝形态变化。同年,王英

英等^[65]运用仿真模拟软件,确定了在采用对流加热技术时,生产井的最佳位置、连线的布局走向及开放裂隙对于加热效果的影响。2023年,杨立红等^[66]以旬邑地区油页岩为例,开展数值模拟研究,结果显示直井与水平井开发效果差异大,水平井在产油量、能量回报率等方面远优于直井,并且得到了两者最优关井时间。

数值模型的边界条件对油页岩水力压裂模拟结果具有显著影响。如果模拟初始设定条件,包括位置和大小,与实际储层条件不一致,容易导致模拟结果出现偏差。此外,无论是采用有限差分法、有限元法或扩展有限元法等,这些方法本身就存在精度低、难以模拟水力裂缝交叉以及计算收敛性差等问题。

3.3 油页岩原位转化先导工程中的水力压裂技术应用

2017年,白文翔等对松辽盆地农安县油页岩资源进行了勘探调查,采用吉林大学TSA原位裂解技术在该地区进行了射孔压裂,实地应用情况良好,为后续油页岩的开采提供了技术指导^[67]。2019年,吉林大学在松辽盆地扶余市成功实施了油页岩原位热解先导试验工程,首次使用环保的水基冻胶体系压裂液,并结合微地震监测技术,对双井水平压裂过程进行了精确控制,形成了有效裂缝网络,提高了储层的渗透性,为后续油气的产出和开采提供了先决条件^[64]。

4 结论和建议

高效的原位转化技术是油页岩资源商业化开发的关键,本文综述了油页岩储层改造技术的最新进展,重点对比分析了水力压裂、超临界CO₂压裂、酸化压裂和清水压裂四种技术。对水力压裂技术在实验、数值模拟和先导试验研究方面的现状进行了总结,强调了环境友好型开采策略的重要性,并提出以下不足之处及研究建议:

(1)油页岩长期高温原位开采过程中,对于油层处理方法以及开采后地层环境污染关注较少,油页岩开采时资源环保制约因素多。因此,亟待围绕污染物迁移理论进行深入研究,应充分利用现场周围的环境条件对油页岩开采后环境污染进行充分回收利用和处理。例如,对于开采后固态废弃物分类处理后挖坑填埋,对于污水采用化学处理的方

法,进行沉淀、过滤及氧化还原中和等方式,确保其符合回收标准,以促进资源的循环利用。

(2)需要重点关注油页岩的非均质性及层理构造发育的影响。油页岩作为非均质材料,且不同地区表现的物理特性不同。因此,水力压裂裂缝扩展行为研究应重点针对油页岩非均质特性,综合考虑不同地区的油页岩物理特性对裂缝扩展行为的影响,从而提高水力压裂裂缝的起裂状态与扩展行为预测的准确性,进而提高油页岩开采效率。

(3)油页岩储层作为典型的多孔渗流介质,孔隙渗透性、流动方向与流动速度等因素共同作用,导致热解产物的运移规律极为复杂,这也对压裂方案设计的合理性提出了更高的要求。未来需要结合不同地区油页岩的储层流动特性,围绕压裂液性能参数、压裂工艺参数以及热解产物渗流场的演化规律展开研究,优化原有的井型设计方案,从而提高储集层的改造效率。

(4)目前,由于工艺条件以及设备限制,油页岩原位改造技术成本仍然面临着挑战,结合我国油页岩储层特点,应重点攻克水平井分段多簇大规模体积压裂技术。该技术可以有效提高油页岩开采效率和单井产量,并有效降低开采成本,未来可通过工艺优化、压裂参数调整、对设备进行创新等方面对现有压裂技术进行优化。同时,油页岩缝网形态的变化规律和演化机制尚未明确。为此,需通过建立缝网三维模型系统揭示其动态演化特征,改进实时监测技术以实现裂缝扩展行为和缝网形态的实时反馈,加强油页岩基础物理性质研究,从而为精准预测缝网形态、优化储层改造方案提供理论支撑。

参考文献(References):

- [1] 薛睿, 蹇茹. 我国能源化工产业经济发展现状与建议——评《2021中国能源化工产业发展报告》[J]. 分析测试学报, 2023, 42(10): 1396.
XUE Rui, JIAN Ru. Current situation and suggestions on the economic development of China's energy and chemical industry: Comment on the 2021 Report on the Development of China's Energy and Chemical Industry[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2023, 42(10): 1396.
- [2] 陈赛. 进口短缺情景下我国石油能源系统韧性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
CHEN Sai. Study on resilience of China's oil energy system under import shortage scenario[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.

- [3] 高帅. 油页岩水平井水力压裂裂缝起裂与延伸机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
GAO Shuai. Study on crack and extension mechanism of oil shale hydraulic fracturing in horizontal well[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [4] 马跃, 向卿谊, 丁康乐. 国内外油页岩工业发展现状[J]. 世界石油工业, 2024, 31(1): 16-25.
MA Yue, XIANG Qingyi, DING Kangle. Development of oil shale at home and abroad[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(1): 16-25.
- [5] 郭旭升, 李王鹏, 申宝剑, 等. 中国石化探区和邻区油页岩原位开采选区评价[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(1): 1-10.
GUO Xusheng, LI Wangpeng, SHEN Baojian, et al. Selection evaluation of in-situ exploitation of oil shale in Sinopec exploration areas and adjacent areas[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(1): 1-10.
- [6] 翟梁皓. 油页岩水平井射孔完井水力压裂裂缝起裂与扩展机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
ZHAI Lianghao. Study on the Initiation and extension mechanism of hydraulic fracturing in the perforated oil shale horizontal well[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [7] 朱颖. 油页岩层理对其力学特性及裂缝起裂与扩展的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
ZHU Ying. Study on the influence of oil shale bedding planes on its mechanical properties, fracture initiation and extension[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [8] 彼得·万·米尔斯, 埃里克·彼里·迪·罗费格纳克, 哈罗德·杰·维尼加尔, 等. 传导加热地下油页岩以赋予其渗透性并随后采油: CN87100890.4 [P]. 1987-08-31.
Peter Wan Mills, Eric Perry Dillo Fagnak, Genigal Harold, et al. Conduction heating underground oil shale to give it permeability and subsequent oil recovery: CN87100890.4 [P]. 1987-08-31.
- [9] 汪友平, 王益维, 孟祥龙, 等. 美国油页岩原位开采技术与启示[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(6): 55-59.
WANG Youping, WANG Yiwei, MENG Xianglong, et al. Enlightenment of American's oil shale in-situ retorting technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(6): 55-59.
- [10] 刘召君, 柳蓉, 孙平昌, 等. 中国典型盆地油页岩特征及赋存规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 313-325.
LIU Zhaojun, LIU Rong, SUN Pingchang, et al. Oil shale characteristics and distribution in typical basins of China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 313-325.
- [11] 孙友宏, 郭威, 李强, 等. 中国油页岩原位转化技术现状与展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 475-490.
SUN Youhong, GUO Wei, LI Qiang, et al. Current status and prospects of oil shale in-situ conversion technology in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 475-490.
- [12] 马中良, 郑伦举, 赵中熙, 等. 吉林桦甸油页岩原位近临界水热解开采室内实验[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(12): 55-61.
MA Zhongliang, ZHENG Lunju, ZHAO Zhongxi, et al. Laboratory experiment of in-situ conversion process in near-critical water of huadian oil shale of Jilin[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(12): 55-61.
- [13] 孙友宏, 郭威, 邓孙华. 油页岩地下原位转化与钻采技术现状及发展趋势[J]. 钻探工程, 2021, 48(1): 57-67.
SUN Youhong, GUO Wei, DENG Sunhua. The status and development trend of in-situ conversion and drilling exploitation technology for oil shale[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(1): 57-67.
- [14] 白奉田. 局部化学法热解油页岩的理论及室内试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
BAI Fengtian. Theoretical and experimental research of oil shale pyrolysis triggered by topochemical heat [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [15] 徐绍涛. 油页岩自生热法原位热触发理论与实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
XU Shaotao. Theoretical and experimental study on thermal initiation process of autothermic pyrolysis in-situ conversion technology for oil shale[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [16] 何强, 李凤霞, 史爱萍, 等. 基于三维CT重构的油页岩复杂水力裂缝网络分形表征[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 116-123.
HE Qiang, LI Fengxia, SHI Aiping, et al. Fractal characterization of complex hydraulic fracture networks of oil shale via 3D CT reconstruction[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 116-123.
- [17] 苗芷芃, 吴涛, 张荣军, 等. 致密油体积压裂复杂缝网形成规律数值模拟研究[J]. 石油机械, 2022, 50(12): 96-102.
MIAO Zhipeng, WU Tao, ZHANG Rongjun, et al. Numerical simulation on formation law of complex fracture network by volume fracturing in tight oil reservoir[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(12): 96-102.
- [18] 沈永星, 冯增朝, 周动, 等. 天然裂缝对页岩储层水力裂缝扩展影响数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 195-202.
SHEN Yongxing, FENG Zengchao, ZHOU Dong, et al. Study on numerical simulation of effect on natural fractures to hydraulic fracture propagation in shale reservoirs[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 195-202.
- [19] 李彦伟, 朱超凡, 曾壹坚, 等. 层理特征对油页岩水力压裂裂缝扩展规律影响的数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11): 44-54.
LI Yanwei, ZHU Chaofan, ZENG Yijian, et al. Numerical simulations of the effects of bedding planes on hydraulic fracture propagation law in oil shale[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(11): 44-54.
- [20] 侯梦如, 梁冰, 孙维吉, 等. 矿物界面刚度对页岩水力压裂裂缝扩展规律的影响研究[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(1): 100-107.
HOU Mengru, LIANG Bing, SUN Weiji, et al. Influence of mineral interface stiffness on fracture propagation law of shale hydraulic fracturing [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(1): 100-107.
- [21] 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 Shuai, YANG Chunhe, GUO Yintong, 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.
- [22] 王永辉, 卢拥军, 李永平, 等. 非常规储层压裂改造技术进展及应用[J]. 石油学报, 2012, 33(S1):149-158.
WANG Yonghui, LU Yongjun, LI Yongping, et al. Progress and application of hydraulic fracturing technology in unconventional reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (S1): 149-158.
- [23] 徐龙潭, 何少林, 苑宏英, 等. 油页岩原位开采对地下水水质影响的研究进展[J]. 工业水处理, 2023, 43(6):7-14.
XU Longtan, HE Shaolin, YUAN Hongying, et al. Research progress on the effect of in-situ oil shale exploitation on groundwater quality [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43 (6): 7-14.
- [24] 冯金禹, 闫铁, 孙士慧, 等. 超临界二氧化碳钻井技术的研究进展[J]. 现代化工, 2018, 38(6):11-14.
FENG Jinyu, YAN Tie, SUN Shihui, et al. Research progress of supercritical carbon dioxide drilling technology [J]. Modern chemical industry, 2018, 38(6):11-14.
- [25] 郭建春, 詹立, 苟波, 等. 不同相态二氧化碳前置酸压碳酸盐岩裂缝形成规律[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3):639-645.
GUO Jianchun, ZHAN Li, GOU Bo, et al. Formation of fractures in carbonate rocks by pad acid fracturing with different phases of carbon dioxide [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3):639-645.
- [26] 孙宝江, 孙小辉, 王志远, 等. 超临界CO₂钻井井筒内流动参数变化规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(3):88-95.
SUN Baojiang, SUN Xiaohui, WANG Zhiyuan, et al. Flow behavior analysis during supercritical CO₂ drilling: consideration of varying thermo-physical properties of CO₂ in wellbore [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(3):88-95.
- [27] 程宇雄, 王海柱, 黄中伟, 等. 超临界CO₂喷射压裂射流密封机理[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10):3926-3931.
CHENG Yuxiong, WANG Haizhu, HUANG Zhongwei, et al. Isolation mechanism during supercritical carbon dioxide jet fracturing [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (10):3926-3931.
- [28] 田时锋, 周军平, 鲜学福, 等. 超临界CO₂作用下页岩抗拉强度的变化规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7):2728-2736.
TIAN Shifeng, ZHOU Junping, XIAN Xuefu, et al. Effect of supercritical CO₂ on alteration of tensile strength of shale [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7):2728-2736.
- [29] 王迎港, 穆景福, 孙晓, 等. 陆相页岩CO₂压裂裂缝起裂和扩展特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(3):875-882.
WANG Yinggang, MU Jingfu, SUN Xiao, et al. Experimental study on fracture initiation and propagation characteristics of continental shale by CO₂ fracturing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(3):875-882.
- [30] 付虹, 宋考平, 刘明熹, 等. 超临界二氧化碳增稠剂的制备与驱油效果评价[J]. 油田化学, 2023, 40(2):312-316.
FU Hong, SONG Kaoping, LIU Mingxi, et al. Preparation and oil displacement effect evaluation of supercritical carbon dioxide thickener [J]. Oilfield Chemistry, 2023, 40(2):312-316.
- [31] 刘卫彬, 徐兴友, 刘畅, 等. 超临界CO₂+水力携砂复合体积压裂工艺对陆相页岩储层的改造机理及效果[J]. 石油学报, 2022, 43(3):399-409.
LIU Weibin, XU Xingyou, LIU Chang, et al. The stimulation mechanism and performance analysis of supercritical CO₂ and hydraulic sand-carrying composite volume fracturing technology on continental shale reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(3):399-409.
- [32] 王海柱, 李根生, 郑永, 等. 超临界CO₂压裂技术现状与展望[J]. 石油学报, 2020, 41(1):116-126.
WANG Haizhu, LI Gensheng, ZHENG Yong, et al. Present situation and prospect of supercritical CO₂ fracturing technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1):116-126.
- [33] 苗娟, 何旭晟, 王栋, 等. 水平井精细分段深度酸化压裂技术研究与应用[J]. 特种油气藏, 2022, 29(2):141-148.
MIAO Juan, HE Xusheng, WANG Dong, et al. Study and application of fine segmented deep acid fracturing technology for horizontal wells [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29 (2):141-148.
- [34] 朱丽君, 刘国良. 酸化压裂工艺技术综述[J]. 安徽化工, 2015, 41(2):9-12.
ZHU Lijun, LIU Guoliang. Summary of acidizing fracturing technology [J]. Anhui Chemical Industry, 2015, 41(2):9-12.
- [35] 李富俊, 张烨. 复合酸压工艺技术在塔河油田的研究与应用[J]. 天然气勘探与开发, 2010, 33(4):73-76.
LI Fujun, ZHANG Ye. Composite acid fracturing and its application to tahe oilfield [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2010, 33(4):73-76.
- [36] 刘书源. 酸化压裂液作用下油页岩的损伤特性[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
LIU Shuyuan. Damage properties of oil shale under acidizing fracturing fluid [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [37] 吴亚红, 吴虎, 王明星, 等. 基于导流能力评价实验的复合酸化压裂技术[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31):12776-12781.
WU Yahong, WU Hu, WANG Mingxing, et al. Composite acid fracturing technology based on flow conductivity evaluation experiments [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(31):12776-12781.
- [38] 张辉. 超深裂缝性碎屑岩储层天然裂缝激活研究[J]. 特种油气藏, 2021, 28(2):133-138.
ZHANG Hui. Study on the activation of natural fractures in ultra-deep fractured clastic reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(2):133-138.
- [39] 牟春国, 卞聃, 何平, 等. 奥陶系深层碳酸盐岩酸压机理与深度酸压工艺优化[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(4):113-119.
MU Chunguo, KUANG Dan, HE Ping, et al. Acid-fracturing mechanism and deep acid-fracturing technique optimization of Ordovician deep carbonate rocks [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(4):113-119.
- [40] 周林波, 刘红磊, 李丹, 等. 碳酸盐岩油藏高温超深井高导流自支撑酸化压裂技术[J]. 特种油气藏, 2022, 29(3):144-149.
ZHOU Linbo, LIU Honglei, LI Dan, et al. Acid fracturing technology for high-conductivity unpropped fractures in ultra-deep wells with high temperature in carbonate reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(3):144-149.

- [41] 路建萍,沈燕宾,王佳,等.油田酸化压裂返排液的回注处理技术研究[J].应用化工,2022,51(6):1685-1690.
LU Jianping, SHEN Yanbin, WANG Jia, et al. Research on injection treatment technology of acidizing fracturing flowback fluid in oilfield[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(6): 1685-1690.
- [42] 姜鹏飞.油页岩酸化压裂注热裂解原位转化实验研究[D].长春:吉林大学,2016.
JIANG Pengfei. Experimental research on oil shale in-situ conversion by acid fracturing-heat injection[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [43] 刘昆岩.酸损伤下油页岩物理力学性质演变及其对裂缝扩展行为的影响[D].长春:吉林大学,2024.
LIU Kunyan. Evolution of oil shale physico-mechanical properties under acid damage and its effect on fracture extension behavior[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [44] 郭凯,秦大伟,张洪亮,等.页岩气钻井和储层改造技术综述[J].内蒙古石油化工,2012(4):93-94.
GUO Kai, QIN Dawei, ZHANG Hongliang, et al. Summary of shale gas drilling and reservoir reconstruction technology[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012(4): 93-94.
- [45] 赵明伟,闫若勤,李阳,等.滑溜水压裂液减阻剂减阻性能评价综合性实验设计[J].实验技术与管理,2022,39(4):66-69,76.
ZHAO Mingwei, YAN Ruolin, LI Yang, et al. Comprehensive experimental design on evaluating drag reduction performance of slickwater fracturing fluid drag reduction agent[J]. Experimental Technology and Management, 2022, 39(4): 66-69, 76.
- [46] 范俊梅,刘丹,王显光,等.掺锰超轻支撑剂的制备及性能研究[J].过程工程学报,2020,20(11):1336-1343.
FAN Junmei, LIU Dan, WANG Xiangang, et al. Study on the preparation and performance of Mn-doped ultra-low density proppants[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(11): 1336-1343.
- [47] 罗攀,孙晓,贺沛,等.CO₂与清水的压裂特征对比[J].大庆石油地质与开发,2023,42(4):90-98.
LUO Pan, SUN Xiao, HE Pei, et al. Fracturing characteristics comparison of CO₂ and fresh water[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(4): 90-98.
- [48] 张龙胜,秦升益,雷林,等.新型自悬浮支撑剂性能评价与现场应用[J].石油钻探技术,2016,44(3):105-108.
ZHANG Longsheng, QIN Shengyi, LEI Lin, et al. Property evaluation and field applications of a new Self-Suspending proppant[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 105-108.
- [49] 任洪达,董景锋,高靓,等.新疆油田玛湖砂岩储层自悬浮支撑剂现场试验[J].油气藏评价与开发,2023,13(4):513-518.
REN Hongda, DONG Jingfeng, GAO Liang, et al. Field test of self-suspending proppant at Mahu sandstone reservoir in Xinjiang Oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 513-518.
- [50] 丁文刚,许冬进,郑光洪,等.二氧化碳在能源开发应用中的研究进展[J].现代化工,2023,43(3):13-17,21.
DING Wengang, XU Dongjin, ZHENG Guanghong, et al. Research progress on application of carbon dioxide in energy development[J]. Modern chemical industry, 2023, 43(3): 13-17, 21.
- [51] 王维.油页岩水力压裂数值模拟及实验研究[D].长春:吉林大学,2014.
WANG Wei. Numerical simulation and experimental research on the oil shale hydraulic fracturing[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [52] 王聪,陈晨,孙友宏,等.农安油页岩水力压裂模拟及实验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):7-11.
WANG Cong, CHEN Chen, SUN Youhong, et al. Simulation of oil shale hydraulic fracturing in Nong'an and the experimental study[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(11): 7-11.
- [53] 高帅,陈晨,王维,等.桦甸地区油页岩水力压裂模拟实验研究[C]//第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流会论文集.哈尔滨,2015:584-590.
GAO Shuai, CHEN Chen, WANG Wei, et al. Experimental study on hydraulic fracturing of oil shale in Huadian area[C]// Proceedings of the 18th National Annual Conference on Technical Exchange of Prospecting Engineering (Geotechnical drilling Engineering). Harbin, 2015: 584-590.
- [54] 范濛,金衍,付卫能,等.水力裂缝扩展行为的声发射特征实验研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S2):3834-3841.
FAN Meng, JIN Yan, FU Weineng, et al. Experimental study on fracture propagation behavior based on acoustic emission characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 3834-3841.
- [55] 张健,张国祥,李良,等.页岩水力压裂模拟实验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(4):541-545.
ZHANG Jian, ZHANG Guoxiang, LI Liang, et al. Simulation tests on shale hydrofracture[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2019, 42(4): 541-545.
- [56] 张树翠,孙可明.储层非均质性和各向异性对水力压裂裂纹扩展的影响[J].特种油气藏,2019,26(2):96-100.
ZHANG Shucui, SUN Keming. Hydraulic fracturing crack propagation under various reservoir heterogeneity and anisotropy[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 96-100.
- [57] 张颖.层理对油页岩水力压裂裂缝扩展的影响研究[D].长春:吉林大学,2020.
ZHANG Ying. The effect of bedding on fracture propagation of hydraulic fracturing in oil shale[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [58] 郭培峰,周文,邓虎成,等.致密储层压裂真三轴物理模拟实验及裂缝延伸规律[J].成都理工大学学报(自然科学版),2020,47(1):65-74.
GUO Peifeng, ZHOU Wen, DENG Hucheng, et al. Real tri-axial physical simulation experiment of fracturing and the law of fracture extension in tight reservoir[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 2020, 47(1): 65-74.
- [59] 王都,张华礼,彭钧亮,等.基于三点弯曲半圆盘法测定页岩断裂韧性的标准化[J].天然气工业,2022,42(S1):77-81.
WANG Dou, ZHANG Huali, PENG Junliang, et al. Standardization of determination of shale fracture toughness based on three-point bending semi-disk method[J]. Natural Gas In-

- dustury, 2022, 42(S1):77-81.
- [60] 李德康, 贺正然, 张作冬, 等. 一种改进的声发射模板识别流程及其在大尺度页岩水力压裂主被动观测实验中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2023, 66(10):4386-4401.
- LI Dekang, HE Zhengran, ZHANG Zuodong, et al. A new template matching based acoustic emission detection procedure and its application in laboratory hydraulic fracturing experiment [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(10):4386-4401.
- [61] 杜书恒, 庞姗, 师永民. 水力压裂缝动态非对称延伸过程数值模拟[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(4):106-114.
- DU Shuheng, PANG Shan, SHI Yongmin. Numerical simulation of dynamic asymmetric extension process in hydraulic fracturing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(4):106-114.
- [62] 朱江, 张楠, 陈晨, 等. 地应力对油页岩地层劈裂注浆裂隙扩展的影响[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(10):32-39.
- ZHU Jiang, ZHANG Nan, CHEN Chen, et al. Influence of ground stress on fracture propagation of split grouting in oil shale formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):32-39.
- [63] 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):69-74.
- SHEN Guojun, CHEN Chen, GAO Shuai, et al. Numerical simulation on the effect of fracturing fluid on oil shale fracture propagation[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(32):69-74.
- [64] 陈强. 油页岩原位转化垂直井水力压裂裂缝起裂与扩展规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- CHEN Qiang. Study on fracture initiation and propagation of hydraulic fracturing in vertical well of oil shale in-situ conversion [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [65] 王英英, 薛林福, 孙旭. 油页岩原位开采中裂隙与井组相对位置及其产状对加热效果的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(35):141-147.
- WANG Yingying, XUE Linfu, SUN Xu. Impact of fracture occurrence and relative position on the heating effect in oil shale in-situ mining[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(35):141-147.
- [66] 杨立红, 朱超凡, 曾皓, 等. 油页岩自生热原位转化直井与水平井开发效果数值模拟——以鄂尔多斯盆地旬邑地区油页岩为例[J]. 石油学报, 2023, 44(8):1333-1343.
- YANG Lihong, ZHU Chaofan, ZENG Hao, et al. Numerical simulation analysis on the development effect of vertical well and horizontal well during oil shale autothermic pyrolysis in-situ conversion process: A case study of oil shale in Xunyi area, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8):1333-1343.
- [67] 白文翔, 孙友宏, 郭威, 等. 吉林农安油页岩地下原位裂解先导试验工程[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(S1):193-198.
- BAI Wenxiang, SUN Youhong, GUO Wei, et al. Pilot test project of underground in-situ cracking of Nong'an oil shale in Jilin province[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(S1):193-198.

(编辑 王跃伟)