

薄互层煤系气单井压裂合采的岩石力学地层理论初探

王建国^{1,2}, 李培博², 梁伟², 羊嘉杰², 桑树勋^{3,4}

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维
全国重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 碳中和研究院, 江苏 徐州 221008;
4. 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要: 薄互层煤系气藏指由一系列厚度较薄的沉积岩组成并在垂直向呈现复杂岩性分布特征的叠置含气储层。薄互层煤系气藏单井压裂合采同时贯通多岩性储层, 裂缝穿层扩展和层间干扰机理至今不明, 亟需建立薄互层煤系气单井压裂合采理论和技术框架, 解决其高效开采的理论问题。本文梳理分析了薄互层煤系气单井压裂合采面临的关键科学问题, 引入岩石力学地层理论的相关概念提出解决问题的思路, 以探讨煤系气单井压裂合采的岩石力学地层理论方法。研究表明: 应用岩石力学地层理论可建立起物理过程数值模拟与机器学习耦合的储层可压裂性预测框架, 结合分层抽样和 Vine Copula 虚拟样本生成方法识别储层最优压裂位置; 以岩石力学地层理论, 能很好地分析和揭示水力裂缝在煤系叠置储层中的穿层扩展规律, 结合构建的卷积神经网络升尺度方法可准确预测压裂后煤系储层渗透率; 应用建立的薄互层煤系气-水层间渗流理论模型阐明了层间和井筒干扰对合采效率的影响。这些初步形成了薄互层煤系气单井压裂合采的岩石力学地层理论框架。

关键词: 岩石力学地层; 薄互层煤系气; 可压裂性; 单井合采; 层间干扰

中图分类号: TE 122; TE 313 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)01-0065-18

Preliminary study on rock mechanics stratigraphy theory for single well fracturing and coproduction from thin interbedded coal measure gas reservoirs

WANG Jianguo^{1,2}, LI Peibo², LIANG Wei², YANG Jiajie², SANG Shuxun^{3,4}

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Carbon Neutrality Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 4. Jiangsu Key Laboratory of Coal-based Greenhouse Gas Control and Utilization, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Thin interbedded coal measures refer to a stacked gas-bearing reservoir with vertically complex lithological distribution of thin interbedded coal measure gas reservoirs. The hydraulic fracturing and gas extraction from this stacked gas-bearing reservoir are usually done

收稿日期: 2024-07-29 修回日期: 2024-10-23 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20240363

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42030810); 国家自然科学基金面上项目(51674246)

通信作者: 王建国(1962—), 男, 四川省广安市人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事煤系气开发、深地能源存储、地热资源开采、径向基无单元法等方面的研究。

E-mail: jgwang@cumt.edu.cn Tel: 15152105228

引用格式: 王建国, 李培博, 梁伟, 等. 薄互层煤系气单井压裂合采的岩石力学地层理论初探[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(1): 65-82.

WANG Jianguo, LI Peibo, LIANG Wei, et al. Preliminary study on rock mechanics stratigraphy theory for single well fracturing and coproduction from thin interbedded coal measure gas reservoirs[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 65-82.

with single well to penetrate these thin interbedded coal measure gas reservoirs. However, the mechanism of fracture penetration into these thin gas-bearing layers and the effect of interlayer interference on gas recovery efficiency are unclear. For an efficient recovery of thin interbedded coal measure gas, a theoretical framework is urgently required for the fracturing and extraction of thin interbedded coal gas with single well. This article proposes the key scientific issues on the coal measure gas recovery during single well fracturing and coproduction, outlines the problem solution strategy by introducing the concepts of rock mechanics stratigraphy, and finally presents our preliminary attempts in the rock mechanics stratigraphy theory for single well fracturing and coproduction of coal measure gas. Our research results so far indicate that rock mechanics stratigraphy theory can establish a coupling framework for reservoir fracability prediction by combining numerical simulations and machine learning. The optimal fracturing location of reservoirs can be identified by combining the stratified sampling and the virtual sample generation method of Vine Copula. The theoretical framework and model based on the rock mechanics stratigraphy theory can describe the hydraulic fracture penetrations into thin interbedded coal measure gas reservoirs, predict the permeability of coal gas reservoirs after fracturing, and explore the impact of interlayer and wellbore interference on gas coproduction efficiency. These form a preliminary framework of rock mechanics stratigraphy theory for single well fracturing and coproduction of thin interbedded coal measure gas.

Key words: rock mechanics stratigraphy; thin interbedded coal measure gas; fracability; single well coproduction; interbedded interference

薄互层煤系是指由一系列沉积岩组成,垂直向呈现复杂岩性分布特征的多重叠置含气储层^[1-2].与厚煤层相比,薄互层煤系单层厚度薄,主要以厚度为 0.3 m 以下的含气储层为主,但总含气储层厚度大,含气储层多,且可构成天然气优质复合储层^[3].薄互层煤系中含气储层与围岩有更大的接触表面积,有利于气体排出而转化为煤系游离气^[4].同时,薄互层储层更有利于天然裂隙发育,具有良好的复合成藏条件和开发基础^[5].煤系气是指薄互层煤系地层中煤、炭质泥页岩和暗色泥页岩生成的天然气,包括在煤和泥页岩等煤系源岩中滞留的煤层气、页岩气,以及从煤系源岩中运移出来,在煤系中或其外聚集形成的致密砂岩气、致密碳酸盐岩气和天然气水合物等^[6-8].海陆过渡相薄互层煤系储层(主要指煤、泥页岩和砂岩储层)具有厚度小、岩性组合多样、富水且垂向叠置的地质特征,开采单个储层产量低、开发成本高,达不到商业开采标准^[9].基于煤系储层的气-水赋存特性和分布特征,一些学者提出了煤系煤层气、页岩气、致密砂岩气等多种岩性储层单井合采的开采新思路^[10].

煤系储层压裂改造可以显著提高储层渗透率^[11-12],压裂过程中水力裂缝垂向扩展范围是决定压裂作业成败的关键^[13].为此,国内外学者采用

室内试验和数值模拟方法开展了一系列研究.结果表明,裂缝穿层扩展的行为受地应力分布、界面性质、施工参数和层间物性差异等因素的影响.层间地应力差越大,裂缝越容易穿过储层界面,当储层地应力远大于隔层的地应力时,裂缝能有效地穿过储层界面,增加储层连通性^[14-16].当储层界面胶结强度较大和摩擦系数较高时,裂缝易穿层扩展^[17-18].施工参数的差异也会影响裂缝穿层效果,其中压裂液的高黏度和高注入速率有利于水力裂缝在垂直方向上的延伸行为^[17,19].层间物性差异主要是不同岩性储层的力学性质差异,其中层间泊松比和断裂韧性的差异对缝高影响很小^[20-21],而弹性模量和抗拉强度的差异会影响缝内压力,从而影响裂缝穿层扩展^[22-25].相比于单一储层,煤系储层压裂机理复杂,层间弹性模量、抗拉强度和孔隙度等物性差异均会对裂缝穿层扩展效果产生影响,而传统的压裂理论及方法难以量化表征薄互层煤系气压裂效果.此外,准确预测储层可压裂性是确定有利压裂位置和压裂设计参数的重要支撑.因此亟需构建一套薄互层煤系的可压裂性评价-压裂改造理论和方法,量化表征储层可压裂性和层间差异对裂缝穿层扩展的影响.

目前,国内外学者针对煤系气合采提出了一些理论和数值模型,并对煤系储层的勘探开发开

展了大量现场试验研究,在一些地区已形成商业性开采气田。研究表明,层间非均质性、渗透率和压力差异均会在合采过程中影响合采储层气体压力和流动速度的分布规律^[26-27],且层间压力差和层厚可加剧层间干扰^[28]。同时,裂隙中的可动水和残余水也会直接影响合采效率^[29-32]。国内外现场试验研究表明,煤系气单井合采可满足其经济效益。其中,美国和澳大利亚分别在皮森斯盆地白河隆起和苏拉特盆地开展了煤层气与致密砂岩气合采的先导性试验,部分气井产量可达1万 m³/d 以上^[33-34]。国内在鄂尔多斯盆地和沁水盆地等地区也开展了一系列煤系储层天然气合采的工程试验并取得部分成功^[35-37]。相比于单一天然气储层,煤系多气合采储层岩性组合多样,储层渗透率、气体赋存状态不同,同时气-水层间流动和层间干扰均会对合采效果产生显著影响。因此,传统的天然气开发理论及方法难以满足煤系储层,特别是薄互层煤系储层的开发需求,亟需构建一套煤系储层单井合采的高效开发理论和方法。

薄互层煤系岩石力学地层理论研究将在岩石力学地层已有基本理论和方法框架基础上,从薄互层煤系单井压裂和合采研究入手,衔接非常规地质与储层工程理论^[38],聚焦岩石力学地层格架下储层裂隙表征、储层压裂改造特征、压裂储层的产能评价等非常规油气藏开发问题,揭示薄互层煤系气单井压裂合采的岩石力学地层控制机理,构建薄互层煤系气单井压裂合采的岩石力学地层理论体系。

目前国际上针对岩石力学地层的研究对象主要为海相地层,而针对具有煤、泥页岩、砂岩和致密灰岩等含气储层叠置共存特征的海陆过渡相和陆相地层的研究报道较少^[39]。因此,基于岩石力学地层的煤系气高效开发理论,有望成为突破煤系气开发技术瓶颈的重大理论突破口^[40]。为此,论文基于薄互层煤系气单井压裂合采关键科学问题,结合团队近年来基于岩石力学地层理论的研究成果,探讨煤系气单井压裂合采的岩石力学地层理论方法,为我国煤系气的高效开发提供理论参考。

1 煤系气单井压裂合采的关键问题

与常规煤层气开采类似,煤系储层的单井合采也需要钻井、射孔、压裂增渗、压裂液返排和气-水产出等工程技术手段^[41]。但煤系气合采时,一口井同时贯通煤系多种岩性储层,其储层可压裂性评价、压裂裂隙扩展规律、增渗效果和流体运移规律等与常规煤层气开采有较大差异,需进行针对性研究。

1.1 煤系储层压裂改造方法

煤系储层的增渗方式包括水力压裂、酸化处理、微生物辅助增渗、二氧化碳或氮气压裂、电磁波加热、燃爆压裂、超声波辅助开采和预裂缝导流剂优化等^[42-43]。其中水力压裂是工程中应用最广泛的增渗技术之一。

可压裂性是指储层压裂的难易程度和水力压裂获得体积改造的能力^[44]。储层可压裂性评价是水力压裂的前置工作,是确定有利压裂位置和压裂工程设计的重要支撑。根据可压裂性的不同定义,储层可压裂性评价方法主要有试验评价法和综合评价法^[45]。前者通过岩石力学试验或室内水力压裂试验直接测量裂缝起裂压力,以确定储层的可压裂性。但是试验评价法的样品尺度较小,不能准确反映储层尺度的可压裂性^[46],同时测试环境与原位的差异较大^[47-48],导致可压裂性评价不准确。综合评价法根据脆性指标、力学参数、物理特性等因素建立储层可压裂性综合评价指标。该方法考虑多种因素且形式简单,因而在储层可压裂性预测中得到广泛应用,但该方法以脆性指数作为主要评价指标,而可压裂性与脆性并不完全等同,因此影响了评价结果的准确性。与传统的储层可压裂性评价方法相比,数值模拟与机器学习相结合的方法可提供新的解决方案,并节省大量计算时间,但机器学习通常所需样本数量较大,目前难以获得充足的现场压裂数据来支撑机器学习。

水力裂缝的垂直扩展可以连接煤系相邻储层,增强煤系气的单井合采效率,但叠置储层中开展水力压裂还存在裂缝扩展控制难、地层流体干扰、应力干扰和温度干扰等问题^[49-50]。在薄互层叠置储层中,不同层位储层的力学性质均不相同,且水力裂缝要穿过不同储层的交界面,界面的刚度和强度特性都会影响裂缝的传播方向和传播速度。煤系不同位置储层的地应力状态差异较大,在压裂过程中会引起应力重分布,影响裂缝的扩展和形态,且由于储层中压力不同,压裂液可能优先进入压力较低的层位,难以实现均匀压裂。储层间的温度差异也会显著影响煤系储层水力裂缝的扩展规律。煤系储层水力压裂还可能会损害目标储层上层或下层储层,如地层破坏、砂堵等问题,因此需要精确控制压裂液的注入速率、裂缝扩展方向和扩展长度,以避免对非目标层位的伤害。综上所述,对水力裂缝在煤系储层中的垂向扩展规律及影响因素的深入认识和准确把握是煤系气高效

开发的基础条件。

1.2 煤系叠置含气储层等效渗透率预测

煤系储层中发育大量天然离散裂隙网络(Discrete Fracture Network, DFN),水力压裂将致使水力裂缝连通储层中的天然裂隙,形成人工裂隙-天然裂隙网络,为天然气的采出提供优势流动通道,提高煤系储层渗透率。

含裂隙网络煤系储层渗透率的变化规律预测难度较高。目前估算裂缝网络等效渗透率的升尺度方法主要有 2 种:统计分析估计法^[51]和基于数值模拟的渗透率预测法^[52]。统计分析估计法基于裂缝的几何性质预估等效渗透率,方法简单高效,但是该方法假设裂隙无限长且连通,与实际情况有差距,因此可能高估煤系储层的等效渗透率;而基于数值模拟的渗透率预测法可以描述复杂的孔隙-裂隙分布特征,适用于煤系储层中的复杂孔/裂隙网络,但该方法计算成本较高、计算效率低,难以有效应用于实际工程现场。目前亟需开发一种高效且低成本的方法,用来预测水力压裂后含气储层裂隙网络的等效渗透率。

1.3 煤系储层天然气单井合采

与煤系单一薄储层天然气开采相比,薄互层煤系储层天然气单井合采可以扩大煤系气开采范围,降低开采成本,提高单井天然气开采效率和延长开采寿命,被认为是提高煤系气产量的关键技术^[53]。但煤系气单井合采过程存在层间干扰,严重影响天然气产出效率^[54]。在层间干扰作用下,煤系

储层实际合采产气量往往低于分层分采的产量之和,甚至小于单层的产量^[55]。层间干扰可根据气体和水的流动路径分为 2 类:气-水通过可渗透夹层的跨层流动引起的气-水层间干扰和不同储层气-水在井筒中相互作用造成的井筒层间干扰。气-水通过可渗透夹层的跨层流动主要指含水层或高压储层中流体侵入低水饱和度或低压储层,影响气体和水的流动路径,影响合采产量。井筒层间干扰是由来自不同储层的气体和水在井筒中相互作用引起每个储层井底压力的动态变化,导致不同储层流体流入井筒的速度差异。影响这种速度差异的因素包括非均质参数、孔隙分布、井底压力、流体状态、流体压力、相饱和度、渗透率和原位应力状态等^[56]。在煤系气单井合采过程中,若一储层中压力较小,不同储层之间的巨大压力差将导致严重的层间干扰,甚至气体和水通过井筒倒灌进入低压储层。气-水层间流动和井筒层间干扰均会对合采产气效率产生显著影响。

煤、页岩和致密砂岩储层是煤系含气系统中天然气储量最丰富的 3 种储层,且这 3 种储层垂向叠置是海陆过渡相和陆相沉积环境含煤盆地的典型地质特征^[57]。为预测煤系储层的单井合采产量,国内外学者分别考虑不同的合采储层类型和不同影响因素,构建了一系列数值模型,如表 1 所示。已构建的煤系气合采理论及数值模型大多仅针对 1 种或 2 种岩性储层,不适用于薄互层煤系气的合采分析,且有些关键影响因素未被充分考虑。

表 1 煤系气合采数值模型及其影响因素
Table 1 Coal measure gas coproduction models and their influencing factors

数值模型 参考文献	煤系储层类型			关键影响因素				
	煤	页岩	致密砂岩	层间流动	井筒层间干扰	气-水两相流	气体吸附/解吸	孔隙变形
文献[58]	√	×	×	√	×	√	√	√
文献[59]	×	√	×	√	√	√	×	×
文献[60]	√	×	×	×	√	√	√	/
文献[61]	√	×	×	×	×	√	√	√
文献[62]	√	×	√	×	√	√	√	√
文献[63]	√	×	×	×	√	×	×	×
文献[64]	√	×	×	×	√	√	√	√
文献[65]	√	×	√	×	√	√	√	/
文献[66]	√	×	×	×	√	×	×	×
文献[67]	√	×	√	√	√	√	×	×
文献[68]	×	×	√	×	√	/	/	/
文献[69]	√	×	√	√	√	√	√	√
文献[70]	√	√	√	×	√	√	√	×
文献[71]	×	×	√	×	√	×	×	×
文献[72]	√	×	×	×	√	√	√	×
文献[73]	√	×	×	×	×	√	√	×

注:√代表考虑了该因素;×代表未考虑该因素;/代表不确定。

综上所述,薄互层煤系储层具有储层单元空间组合多样、地质构造特征复杂、储层裂隙发育、储层渗透性低、含气量高和储层间连通性差等特点.薄互层煤系气的单井压裂合采应基于构造应力环境和岩石力学地层单元特征,衔接煤系储层改造理论,重点解决储层可压裂性评价、压裂裂缝扩展规律分析、增渗效果评估、流体运移规律分析和合采产气量预测等问题.常规煤层气开采中采用的研究思路和方法难以适用,岩石力学地层可以结合非常规地质与储层工程理论,针对具有煤、致密砂岩和页岩等含气储层叠置共存特征的海陆过渡相和陆相地层展开研究工作,为煤系气的高效开采提供一种可行的解决思路.

2 薄互层煤系气单井压裂合采关键问题的解决思路

2.1 薄互层煤系气单井压裂合采的岩石力学地层方法

岩石力学地层理论是地质力学、沉积学和地

层学相互交叉的理论,其内涵包括沉积岩系岩石力学性质成因、岩石力学地层单元地层格架和岩石力学性质、地应力、岩石本构关系与表征方法,其经典外延为沉积岩层的变形破坏规律,包括褶曲、裂隙和断裂与地层破裂的相关性.基于岩石力学地层的薄互层煤系气单井压裂合采理论是岩石力学地层理论的新外延,聚焦于薄互层煤系气的开发,主要分为成藏响应和工程响应 2 部分,其理论的新进展主要在于煤系叠置储层可压裂性评价、水力压裂裂缝穿层扩展规律、压裂后增渗效果评估以及考虑储层叠置特征、气-水层间流动和井筒层间干扰等影响的煤系含气系统单井压裂合采理论与方法.基于岩石力学地层理论的薄互层煤系气开发流程见图 1.

首先,借助于地质观测、录井、测井测试分析等手段,查明薄互层煤系储层岩石力学地层单元空间分布、地质构造特征以及煤系气成藏特征(包括储层裂隙分布、储层渗透性、储层间连通性等),构建薄互层煤系储层岩石力学地质模型.

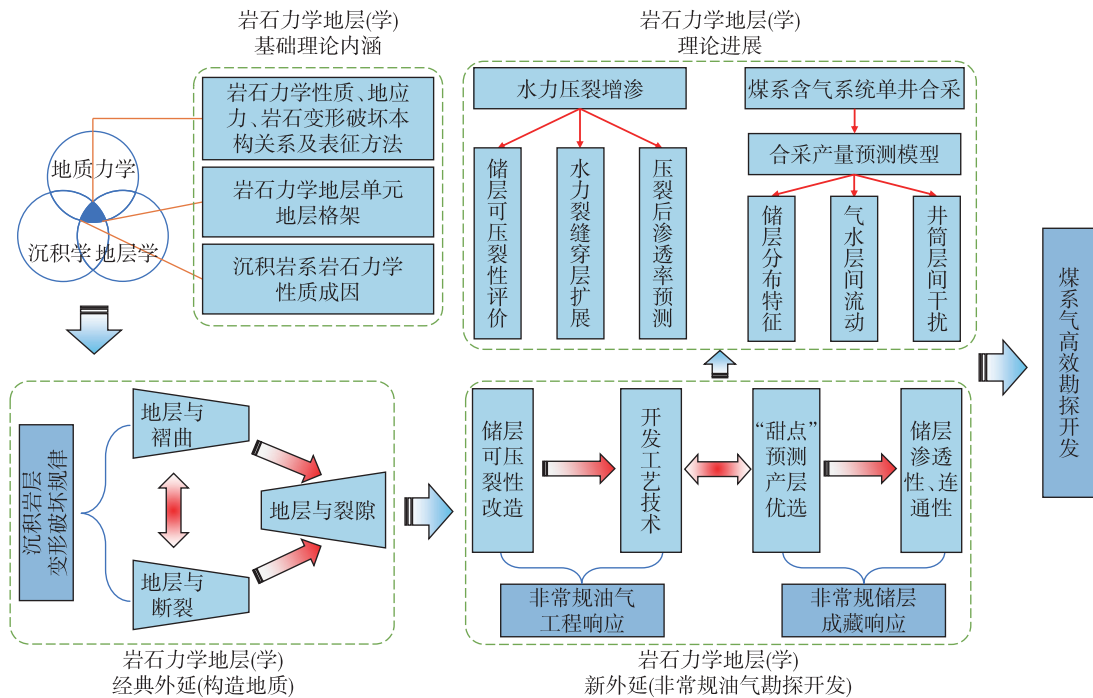


图 1 煤系气合采的关键科学问题解决思路与流程(根据文献[19]修改)

Fig. 1 The solution methods and processes of key scientific problems for coal measure gas coproduction

其次,基于 COMSOL with MATLAB 平台的二次开发功能,开展薄互层煤系储层压裂热-流-固-损伤耦合数值模拟和储层可压裂性表征,研究薄互层煤系储层关键地层单元的压裂裂缝起裂和扩展特征、储层间裂缝穿层扩展规律以及天然裂缝与压裂裂缝的关系,构建基于岩石力学地层单元空间分布、地质构造特征的薄互层煤系储层水

力压裂基础理论.

进一步通过 Python 平台的二次开发,开展薄互层煤系储层可压裂性预测和压裂后增渗效果评估,研究薄互层煤系储层地质力学特征对储层可压裂性、渗透率分布和气体流动规律的影响.最终以薄互层煤系储层单元空间分布和成藏特性为基础,以储层渗透性、连通性、气-水层间流动和层间

干扰为核心,建立薄互层煤系储层单井合采的岩石力学地层理论框架,初步形成定性与定量方法相结合的薄互层煤系储层单井压裂合采一体化研究方法。

2.2 煤系储层水力压裂理论

煤系不同岩性储层的可压裂性评价遵循如下步骤:首先,收集煤系储层的地质历史数据、岩石物理属性(如孔隙度、渗透率、脆性指数、矿物组成、密度等)、钻井与测井数据、历史压裂作业数据等信息。然后,清洗数据,处理缺失值、异常值,标准化或归一化数据,以便于训练机器学习模型。基于收集的数据,进一步通过统计分析、相关性分析或使用特征选择法来确定影响可压裂性的关键因素,选择适合的机器学习模型,划分训练集和测试集,使用交叉验证技术来调整模型参数,提高模型泛化能力,分析模型预测的重要参数,为工程开采实践提供科学依据。最后,将预测模型应用于煤系气的工程开采中,收集反馈数据并持续迭代优化预测模型。

构建煤系关键岩石力学地层单元(煤、页岩和致密砂岩储层)压裂理论与数值模型,研究不同地层单元裂缝扩展、破裂压力和渗透面积的演化规律,并评价不同岩石力学地层单元的压裂效果。进一步基于储层天然裂隙数据体,构建煤系气藏地质力学模型,开展叠置储层压裂模拟和储层诱导裂缝特征预测。从岩石力学地层控制与储层天然裂缝、压裂诱导裂缝匹配关系角度回答煤系储层压裂工艺的地质适配性问题,揭示煤系储层可改造性的变化规律,并进一步评价煤系储层改造后的渗透率演化规律。

2.3 煤系储层的气-水层间渗流理论

基于煤系岩石力学地层数据,针对夹层处气-水层间流动行为,建立煤系储层单井合采(主要为煤、页岩和致密砂岩)的气-水层间渗流理论模型,研究单井合采过程中气体压力、气-水饱和度、相对渗透率和储层气源贡献等参数的变化规律,揭示气-水层间流动、气-水相对渗透率、夹层渗透率和储层组合模式对煤系气合采产气效率的影响规律。

针对井筒层间干扰影响煤系气单井合采效率这一关键问题,建立煤系气单井合采井筒-储层耦合模型,考虑不同储层不同孔隙系统中的气体运移、气-水两相流动及储层与井筒的相互作用。分析井筒内气体流量和压力、不同储层气体的贡献以及层间干扰系数的变化规律,研究煤层初始气体

压力、初始含水饱和度和储层间距对层间干扰系数和三气合采效率的影响,揭示井筒层间干扰的产生机理。

3 煤系气合采关键科学问题的解决方案与实践

从煤系储层的可压裂性评价出发,首先建立数值模拟和机器学习耦合的储层可压裂性预测框架。在此框架下提出一种基于分层抽样和 Vine Copula 的小样本准确预测可压裂性的方法并建立考虑储层物性和地质构造的煤系气叠置储层压裂模型,研究了数据集大小对可压裂性预测精度的影响和不同影响因素对水力裂缝在煤系储层中的穿层扩展规律。然后基于卷积神经网络的离散裂缝网络升尺度方法预测压裂后煤系储层的渗透率。最后分别考虑层间流动和层间干扰,构建煤系储层的单井合采模型,研究提高储层抽采效率的办法和关键参数。

3.1 煤系储层可压裂性评价及水力压裂方法

机器学习方法预测煤系储层可压裂性具有快速且准确的优点,但问题在于需要大量的数据样本进行训练。为解决该问题,团队基于煤系不同岩性储层的力学特性,建立了数值模拟和机器学习耦合的储层可压裂性预测框架,并采用归一化的裂缝长度表征储层的可压裂性,公式如下:

$$L_n = \frac{L - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}}, \quad (1)$$

式中: L_n 为归一化裂缝长度; L 为实际裂缝长度; L_{\min} , L_{\max} 分别为实际裂缝长度的最小值和最大值。

首先,基于热-流-固-损伤数值模型定量表征煤系储层力学性质与可压裂性的相关性,生成机器学习训练数据集。其次,采用网格搜索和交叉验证(GS-CV)算法优化 XGBoost 模型,并用于可压裂性预测。最后,对不同埋深非常规天然气储层的可压裂性进行预测,并将预测结果与现场可压裂性数据进行对比。结果表明,热-流-固-损伤数值模型表征煤系储层的可压裂性有效且可靠;优化后的 XGBoost 模型仅使用 279 个实例就能准确预测深部储层可压裂性,具有较高的预测精度和泛化能力。不同埋深储层的可压裂性和储层最佳压裂区如图 2 所示。基于本文方法预测的最优压裂区(粉色区域)与压裂后裂缝密集分布区域(蓝色三角形密集区)高度重合,这证明了本文方法的合理性。该方法可以快速准确地预测不同岩性储层的

可压裂性,快速、高精度地确定有利压裂位置。

为进一步减小原始数据集大小对煤系储层可压裂性预测的限制,本文基于分层抽样和 Vine Copula 开发了一种新的虚拟样本生成(VSG)方法.该方法有助于 XGBoost 模型使用较小数据集快速且准确预测煤系深部储层的可压裂性,其实施过程如图 3 所示.首先对原始数据集进行预处理,去除测井数据集中的异常值后,对可压裂性数据及相关数据(例如黏聚力、内摩擦角、泊松比、最大水平主应力、最小水平主应力、剪切模量、垂直应力、抗压强度、剪切强度、抗拉强度和弹性模量)进行归一化处理.将预处理后的数据集随机分为训练数据集(占数据集 80%)和验证数据集(占数据集 20%).利用分层抽样生成小数据集,分别生成样本量为 400,200,100,50 和 30 个的小数据集.然后,根据新的 Vine Copula-VSG 方法,从一个小数据集生成一系列样本量分别为 2 000,4 000,6 000,8 000,10 000 和 20 000 个的虚拟数据集,其生成步骤如图 4 所示.通过 Vine Copula-VSG

方法生成虚拟样本后,以黏聚力、内摩擦角、泊松比、最大水平主应力、最小水平主应力、剪切模量、垂直应力、抗压强度、剪切强度、抗拉强度和弹性模量作为输入变量,构建 XGBoost 模型,预测储层可压裂性.利用优化后的 XGBoost 预测目标气藏的可压裂性,对比分析预测值与实际值,评估 XG-Boost 模型性能并确定最优虚拟数据集.研究表明,相比于 400 个原始样本的预测结果,从 400 个原始样本生成的虚拟数据集将预测精度从 0.819 18 提高到 0.987 86,将均方误差从 0.003 63 降低到 0.002 70,平均绝对误差从 0.047 84 降低到 0.038 98.这表明虚拟数据集可显著提高预测精度.分析虚拟数据集大小对原始数据集大小的敏感性可知,最佳虚拟数据集大小与原始数据集大小有关.总体而言,该煤系储层可压裂性方法突破了数据集大小的限制,可使用小数据集准确预测煤系储层的可压裂性,从而确定最佳压裂位置。

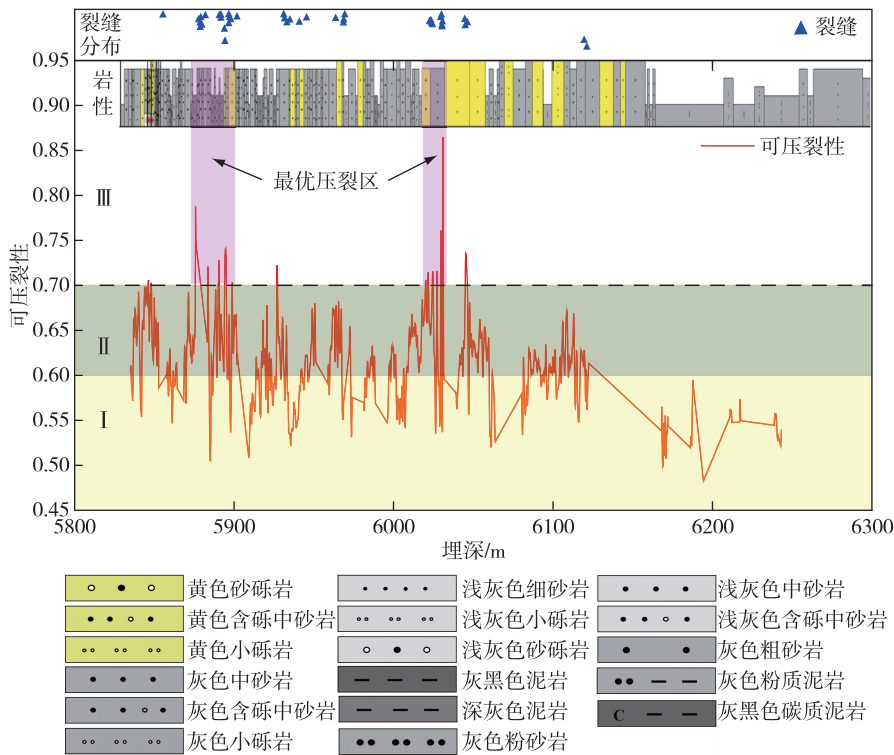


图 2 不同埋深储层的可压裂性和储层最佳压裂区
Fig. 2 Fracability of reservoirs along burial depth and optimal fracturing zones

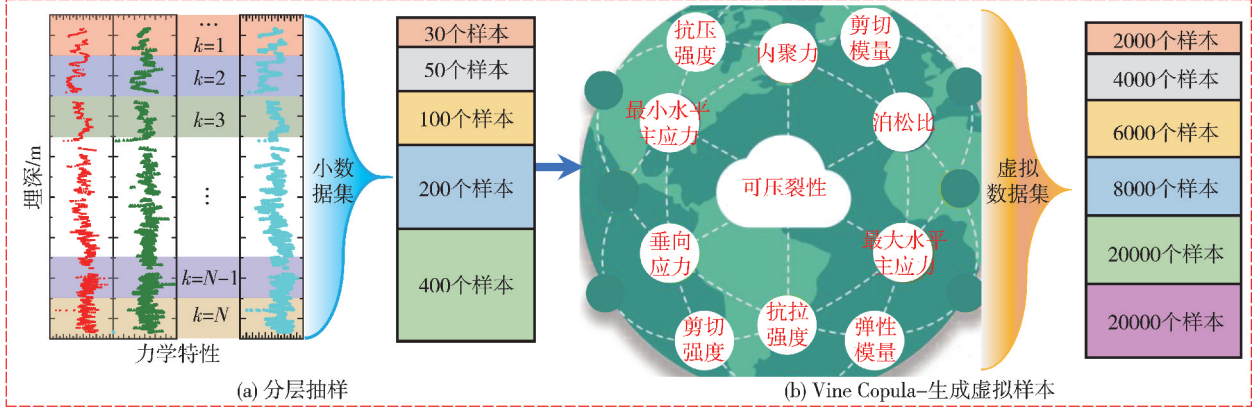
基于机器学习方法预测煤系储层可压裂性并确定最佳压裂位置后,还需正确认识煤系储层中水力裂缝的扩展规律.文献[74]基于煤系储层地质特征建立了煤系储层合层压裂的渗流-应力-损伤耦合模型,研究了弹性模量差异、应力状态、压裂液黏度、剪切和拉伸破坏模式对水力裂缝穿层

扩展的影响.通过与相关试验对比分析,验证了该模型模拟煤系不同岩性岩石水力压裂过程的合理性和准确性,对比分析结果如图 5 所示^[75-77].图 5a1~5a3 为不同岩性岩石水力压裂数值模拟结果,由图可见,随着水力压裂液的注入,井筒处开始产生裂缝,并在水力作用下进一步扩展形成主

裂缝,最终导致试件破坏.图 5b1~5b3 为相应的试验结果,经对比发现,数值模拟结果与试验结果一致性较好,说明数值模拟能够很好地再现裂缝

萌生和扩展的全过程,也说明了该水力压裂模型能够很好地模拟煤系不同岩性岩石水力压裂.

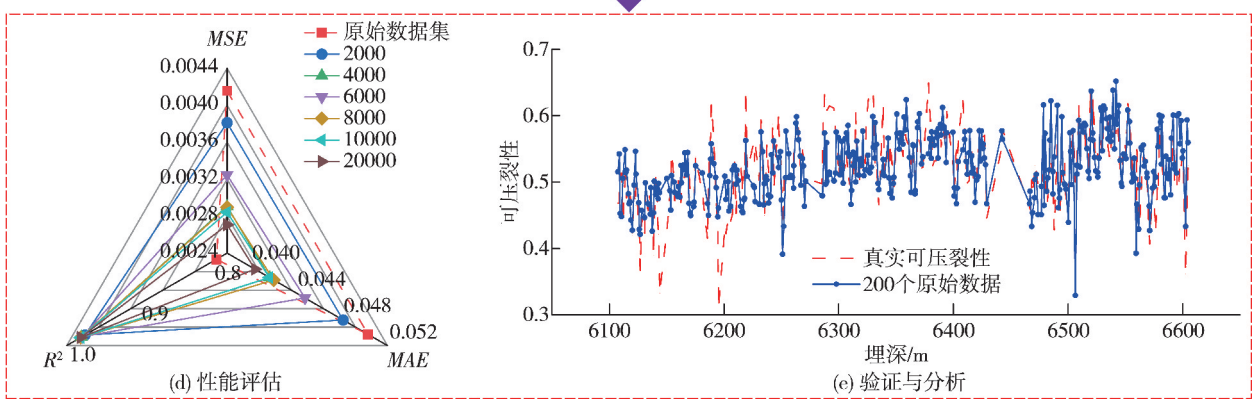
步骤1:小数据集 & 虚拟数据集生成



步骤2: 模型训练



步骤3: 评估 & 敏感性分析



注: N 表示将地层沿埋深方向平均分成了 N 层, k 表示第 k 层; MSE , MAE 和 R^2 分别为均方误差、平均绝对误差和决定系数.

图 3 小样本预测煤系储层可压裂性的流程

Fig. 3 Flowchart for predicting the fracability of coal measure reservoirs with small samples

提出相邻储层弹性模量比作为裂缝沿储层界面扩展的评价指标,如图 6 所示,其中 E_1 和 E_2 分别为相邻不同岩性储层的弹性模量. 研究表明,水力裂缝穿层扩展主要受注入压力和相邻储层弹性模量比控制,其变化过程可以划分为 4 个区域:未损伤区、未穿层扩展区、不稳定区和穿层扩展区. 未损伤区:当注入压力在非破裂压力范围内

时,储层没有损伤,此时注入压力小于储层起裂压力,裂缝未起裂. 未穿层扩展区:当注入压力超过非破裂范围时,裂缝起裂并扩展,岩石将发生损伤;同时相邻储层间的弹性模量比在不穿层扩展模量比范围内,因此裂缝只能在该岩性储层内扩展,不会穿过储层界面. 不稳定区:注入压力超过未破裂压力范围且相邻储层间弹性模量比超过不

穿层扩展模量比范围,但注入压力和弹性模量比均未达到穿层扩展临界值,因此在现有条件下裂缝无法穿过储层界面.穿层扩展区:注入压力超过未破裂压力范围且相邻储层间弹性模量比超过不穿层扩展模量比范围,当注入压力或弹性模量比达到穿层扩展临界值,裂缝穿过储层界面在相邻

储层内扩展.在不稳定区,在现有条件下裂缝无法穿过储层界面;在穿透区,裂缝将直接穿过储层界面.总的来说,水力裂缝穿层扩展是多个物理场相互作用的结果,主要受注入压力和相邻储层弹性模量比控制,当注入压力与弹性模量比的组合处于突破带时,裂缝能够穿过储层界面扩展.

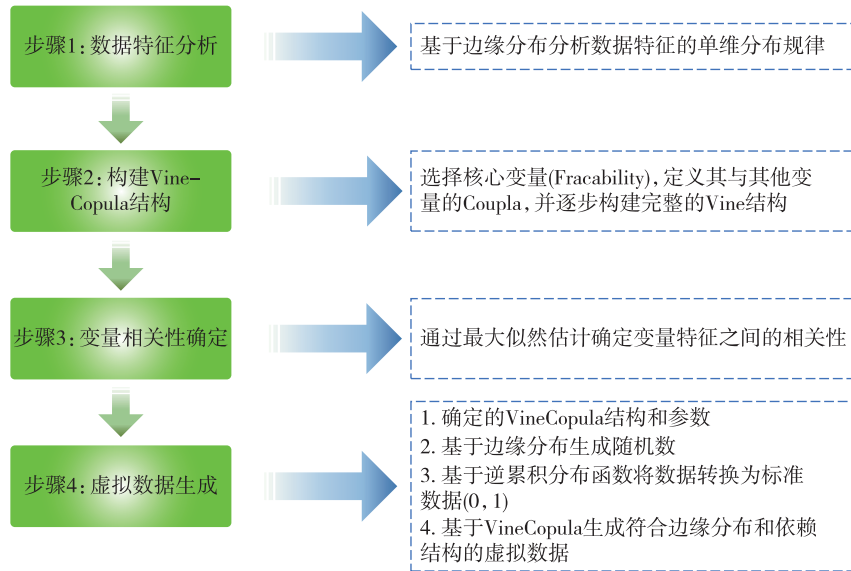


图 4 虚拟数据集生成步骤

Fig. 4 The step of virtual dataset generation

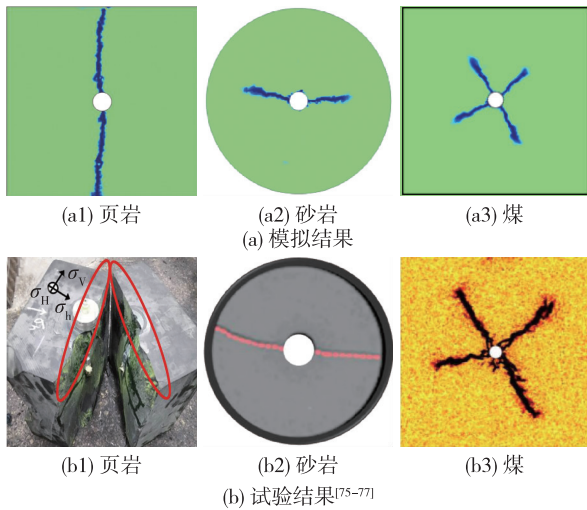


图 5 不同岩性岩石水力压裂数值模拟与试验结果对比
Fig. 5 Comparison between numerical simulations and experimental results of hydraulic fracturing in rocks with different lithologies

文献[78]基于煤系储层的构造特征建立考虑地应力梯度的应力强度因子模型,用地应力梯度来校正应力强度因子,提出地应力校正系数,研究地应力梯度对应力强度因子和裂缝起裂和垂向扩展的影响:

$$K_I^{\sigma_x} = F_1 \lambda \sigma_x \sqrt{\pi L}, \quad (2)$$

式中: $K_I^{\sigma_x}$ 为应力强度因子; F_1 为地应力作用下裂

缝的几何形状因子^[79],其大小与井眼尺寸、裂缝长度和垂直应力与水平应力的比值(σ_y/σ_x)有关; L 为初始裂缝的半长; λ 为地应力校正系数, $\lambda = 1 + (\lambda_0 h/H)$, h 为储层中任一点距其顶部的垂直深度 ($0 \leq h \leq H$), H 为储层厚度. 地应力梯度为水平地应力在单位埋深下的变化量,本文中地应力梯度以 λ_0 表征.

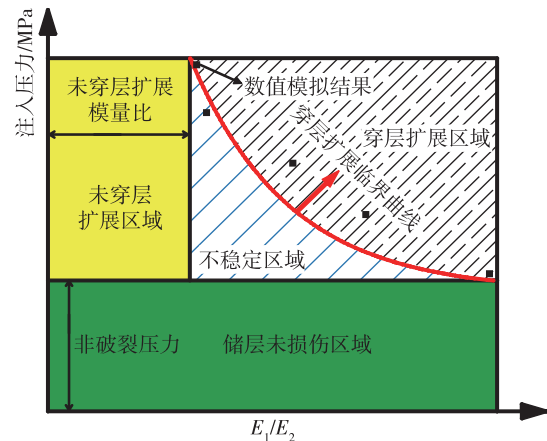


图 6 煤系储层水力裂缝穿层扩展概念分区^[74]

Fig. 6 Conceptual zoning of hydraulic fracture propagation through reservoir interface in coal measure reservoirs

研究表明,地应力梯度直接影响应力强度因子,造成裂缝不对称扩展.图 7a 给出了储层中

不同的地应力梯度. 图 7b 描述了不同水平应力梯度下应力强度因子与裂缝长度的关系. 在压裂初期(裂缝长度小于 0.05 m), 裂缝上、下尖端地应力差异较小, 因此两尖端应力强度因子差异较小. 随着裂缝长度的增加, 尖端地应力梯度变大, 这种应力差异导致应力强度因子差异增大. 此外, 地应力梯度越大, 应力强度因子差异越大, 在相同的初始

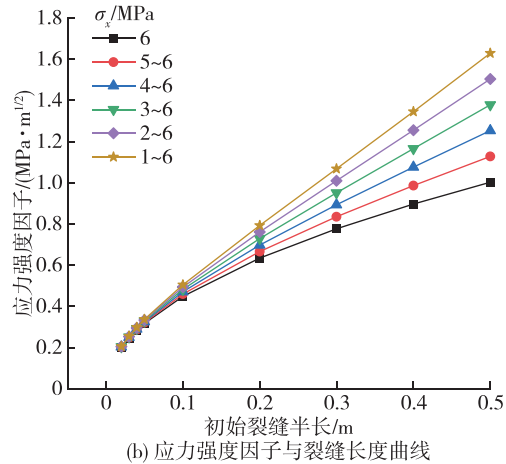
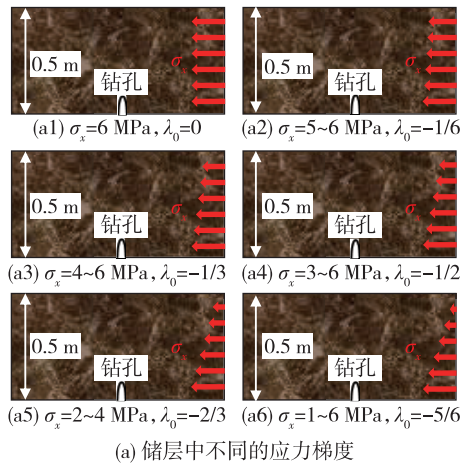


图 7 应力强度因子随裂缝长度的变化^[78]

Fig. 7 The variation of stress intensity factor with fracture length

3.2 煤系储层压裂后渗透率预测方法

预测煤系气单井合采产量, 需要评价煤系储层的水力压裂增渗效果, 特别预测压裂后渗透率的分布. 基于统计分析和物理模拟的传统等效渗透率计算方法在预测精度和速度方面均存在劣势, 文献[80]提出了一种基于多尺度卷积神经网络(MsNet)的离散裂缝网络(DFN)等效渗透率升尺度算法, 以加速复杂裂缝网络模型的等效渗透率模拟. 在多尺度卷积神经网络中采取了分组卷

裂缝条件下, 地应力校正因子 $\lambda_0=5/6$ 时的应力强度因子是 $\lambda_0=0$ 时的 1.63 倍. 在岩石断裂韧性一定的情况下, 应力强度因子越大, 断裂韧性增加越快, 裂缝越容易萌生和扩展. 综合以上分析得出结论: 构造运动引起的地应力梯度直接影响裂缝的垂向穿层扩展.

积结构, 并增加了不同大小($3\times 3, 5\times 5, 9\times 9, \dots, n\times n$)的卷积核以融合裂缝网络的多尺度特征, 同时增加了一个残差连接以避免过拟合并减少训练参数. 图 8 给出了该方法的计算流程, 其中, P_1 和 P_0 分别为左右两侧流体压力; k_{xx}, k_{xy}, k_{yy} 和 k_{yx} 分别为不同方向上的渗透率; K 为渗透率的张量形式; p 为孔隙压力; μ 为流体黏度; \vec{v} 为渗流速度.

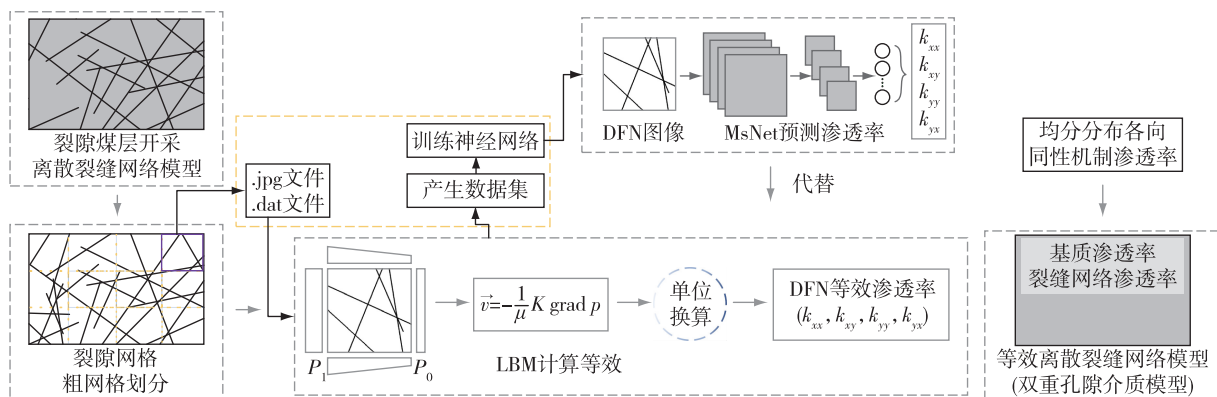


图 8 MsNet 升尺度算法流程(根据文献[80]修改)

Fig. 8 Workflow of MsNet upscaling algorithm

首先对模拟区域进行粗网格划分, 并通过 Ms-Net 预测得到每个网格内裂缝网络的等效渗透率, 然后用等效渗透率代替原有的裂缝网络进行模拟, 从而大大降低离散裂缝网络模型的计算成本,

克服基于流动数值模拟方法在计算等效渗透率时的耗时长和计算成本高等缺点. 将 MsNet 升尺度算法应用于一个单层裂隙煤层的气体流动模拟中, 通过加速裂隙储层气体流动模拟对基于多尺

度卷积神经网络的升尺度方法进行了评价. 通过多尺度卷积神经网络计算等效渗透率, 并将该 DFN 模型升级为等效的 DFN 模型(双重孔隙模型), DFN 模型耗时约 10 min, 而等效 DFN 模型耗时仅为 50 s 左右. 图 9 为等效 DFN 模型与 DFN 模型在第 100 d 的气体压力分布, 其中横纵轴分别表示储层的长和宽. 可以看出二者的模拟结果基本一致. 图 10 对比了第 100 d 时 2 种模型沿 x 方向的压力变化, 两者的压力曲线基本一致, 说明等效 DFN 模型能够很好地表示裂缝网络中气体流动细节. 该等效渗透率升尺度算法可有效应用于煤系储层压裂后的渗透率预测, 为煤系储层单井合采产气率预测提供支撑.

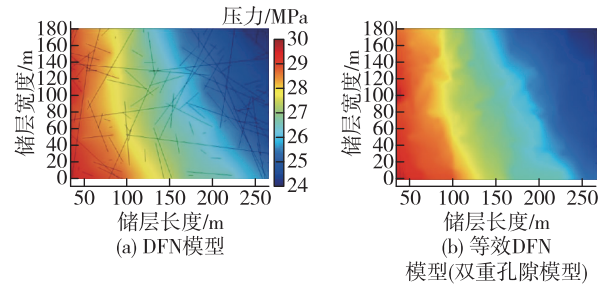


图 9 生产 100 d 时气体压力分布对比^[80]
Fig. 9 Gas pressure distribution at 100 d

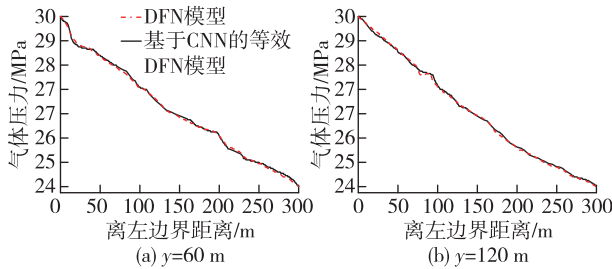


图 10 在水平线 $y=60$ m 和 $y=120$ m 上
气体压力的变化趋势^[80]

Fig. 10 The variation of gas pressure along two horizontal lines of $y=60$ m and $y=120$ m

3.3 煤系储层单井合采效率的影响因素

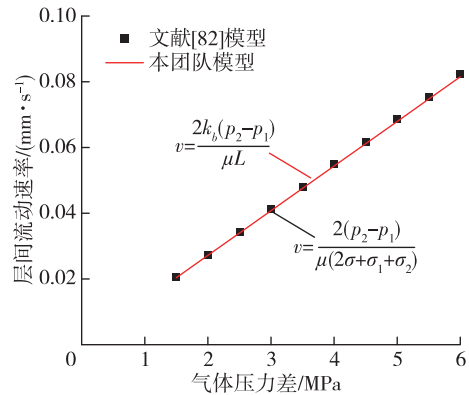
煤系储层单井合采过程中存在气-水层间流动并形成层间干扰. 团队已发表文献[81]建立了煤、页岩和致密砂岩叠置储层的三气合采数值模型, 引入煤系夹层处气-水层间流动速率(见式(3)), 综合考虑气-水层间流动、气-水两相流、不同孔隙系统气体运移机理和孔隙变形差异的影响, 研究了层间流动和气-水两相流等因素对煤系气合采的影响.

$$\begin{cases} N_{\text{gsl}} = \frac{-k_{\text{ip}} p_{\text{gs}} M_{\text{g}} (p_{\text{gs}} - p_{\text{gc}})}{RT \mu_{\text{g}} L}, \text{下边界} \\ N_{\text{wsl}} = \frac{-k_{\text{ip}} \rho_{\text{w}} (p_{\text{ws}} - p_{\text{wc}})}{\mu_{\text{w}} L}, \text{下边界} \end{cases} \quad (3)$$

式中: N_{gsl} 和 N_{wsl} 分别为气体和水的质量通量; k_{ip} 为夹层渗透率; M_{g} 为甲烷气体的摩尔质量; R 为理想气体常数; T 为储层温度; μ_{g} 和 μ_{w} 分别为气体和水的动力黏度; ρ_{w} 为水的密度; L 为夹层厚度; p_{gs} 和 p_{gc} 分别为页岩和煤裂隙中的气体压力; p_{ws} 和 p_{wc} 分别为页岩和煤裂隙中的水压力.

将通过该层间流动速率计算公式计算的结果与文献[82]模型的计算结果进行对比, 结果如图 11 所示, 2 种模型计算结果吻合较好. 从图 11 也可以发现, 煤系储层流体层间流动速率随夹层两侧压力差的增大而增大, 其线性变化是假定流动遵循 Darcy 定律, 且层间介质渗透率不变.

图 12 展示了合采过程中不同储层的气源贡献率. 储层气源贡献分为 2 个阶段: 第 1 阶段, 致密砂岩储层气源贡献最大, 但迅速降低; 第 2 阶段, 产气源主要来自页岩和煤储层, 但随着抽采时间两者的贡献也在发生变化. 在抽采 4 000 d 时, 煤储层气源贡献从 75% 下降至 25%, 页岩储层气源贡献增加至 71%.



注: v 为层间流动速率; p_1 、 p_2 分别为不同层的压力; σ 为两层之间低渗透页岩的壁面阻力; σ_1 、 σ_2 分别为不同层的渗流阻抗; k_b 为层间渗透率.

图 11 层间流动速率与现有模型的比较

Fig. 11 Comparison of crossflow rate in this study with the existing model

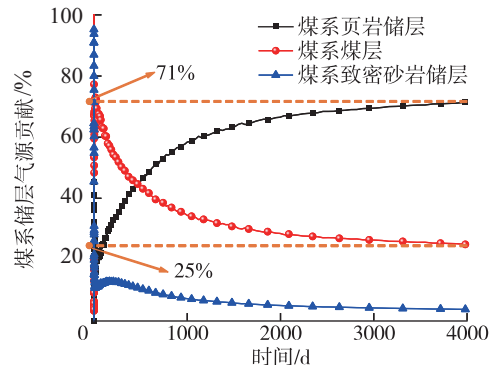


图 12 煤系单一储层的气源贡献(根据文献[81]修改)

Fig. 12 The source contributions of gas from each reservoir in coal measure

图 13 展示了层间流动对煤系储层三气合采产量的影响. 这里以页岩-煤-致密砂岩叠置储层为例 (即页岩为上覆岩层, 致密砂岩为下伏岩层) 来分析气-水层间流动对合采产气效率的影响, 3 种岩性储层初始压力状态相同. 结果表明, 忽略夹层处气-水层间流动将严重低估合采产气效率, 且合采

产气效率随夹层渗透率的降低而降低, 低于储层渗透率 2 个数量级及以上的夹层将对煤系储层三气合采产量有显著负面影响. 高渗透率储层相当于天然水平井, 可将相邻储层中气体和水快速运移至井筒; 增大高-低渗透储层间夹层的气-水垂向层间流速可有效提高煤系三气合采产气效率.

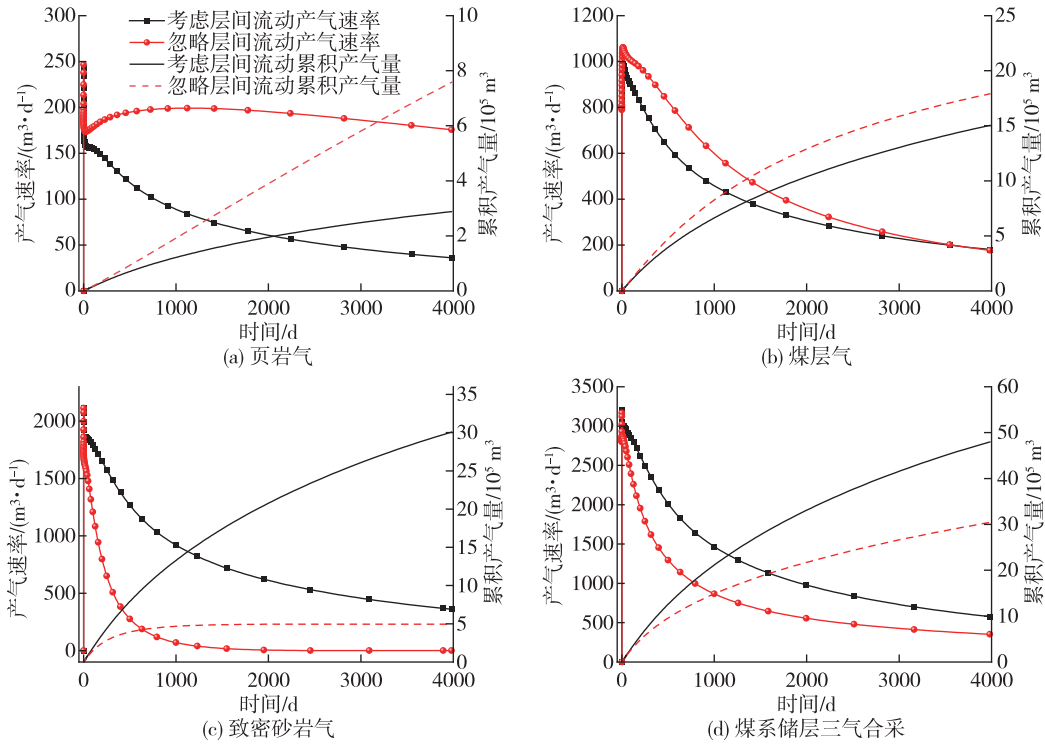


图 13 层间流动对煤系储层三气合采产量的影响^[81]

Fig. 13 Effect of crossflow on three-gas coproduction from coal measure reservoirs

更进一步, 团队基于黑勇士盆地叠置储层地质特征建立煤系三气合采井筒-储层耦合模型^[83], 并将黑勇士盆地煤层气合采产气速率与现场实测数据进行对比, 验证了模型的正确性 (见图 14), 并

探索了井筒层间干扰的产生机理及对合采效率的影响规律. 忽略煤系气单井合采过程中储层厚度和渗透率的动态变化, 进一步推导出煤系 i 储层的层间干扰系数 ξ_i 为

$$\xi_i = \frac{\frac{2\pi h_i k_i (p_{b,i} - p_i)}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}}}{\frac{2\pi h_{co,i} k_{co,i} (p_{cob,i} - p_{co,i})}{\mu \ln \frac{r_e}{r_w}}} = 1 - \frac{p_{cob,i} - p_{co,i}}{p_{bi} - p_i}, \quad (4)$$

式中: h_i , p_i 和 k_i 分别为 i 储层的厚度、压力和渗透率; $p_{b,i}$ 为 i 储层的井底压力; r_e 为排水半径; r_w 为井筒半径; 下标中“co”表示三气合采.

式(4)表明, 层间干扰系数与合采过程中井筒与储层的压力差直接相关. 井筒层间干扰变化规律及产生机理示意图 15. 层间干扰系数随煤系三气合采时间的推移逐渐减小, 其变化过程可分 3 个阶段: 气-水倒灌 (阶段 I)、强干扰 (阶段 II) 和弱干扰 (阶段 III). 在阶段 I, 煤系三气合采开始时层

间干扰系数最大. 在某些极端情况下, 井筒中压力大于低压储层压力, 高压储层中的气体和水甚至会倒灌进低压储层, 这将导致合采井中产量很低或者没有气体产出. 气-水倒灌是一种极其严重的层间干扰现象, 只有层间干扰系数大于 0.7 时才可能发生. 在阶段 II, 层间干扰对三气合采效率有显著地负面影响. 来自煤系不同储层的流体流入井筒并相互作用, 井筒压降较慢, 井筒与各储层间的压差小于独立生产时的压差, 该阶段层间干扰系

数一般在 0.1~0.7 之间. 在阶段Ⅲ, 层间干扰对煤系三气合采的产气效率影响较弱. 历经 3 个阶段开采之后, 煤系储层中气体压力逐渐降低, 且井筒与不同储层之间的压差也随合采时间推移逐渐减小. 这种较小的压差导致储层中流体以较低流速流入井筒, 来自储层的流体在井筒中的相互作用较弱. 同时, 流速较低意味着流体在井筒中停留时间更长, 进一步降低井筒中流体之间的相互作用. 这个阶段发生在长时间合采之后, 层间干扰系数将小于 0.1, 并逐渐降低到一个极小值, 甚至降为 0. 层间干扰系数受不同储层流入井筒流量的影响, 而影响流量的关键因素是井底压力的大小和储层的渗透率. 因此, 井筒压力是煤系储层单井合采过程中发生层间干扰现象的本质.

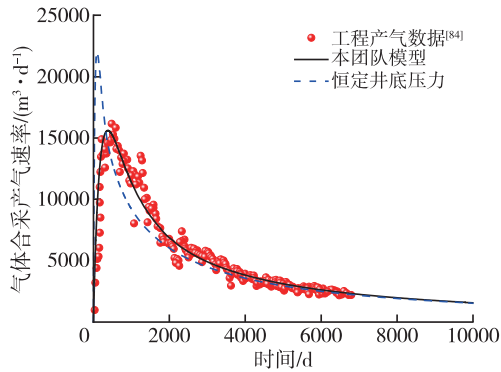


图 14 黑勇士盆地煤层气合采速率与现场数据的对比^[83]

Fig. 14 Comparison of gas coproduction rate with field data in the Black Warrior basin

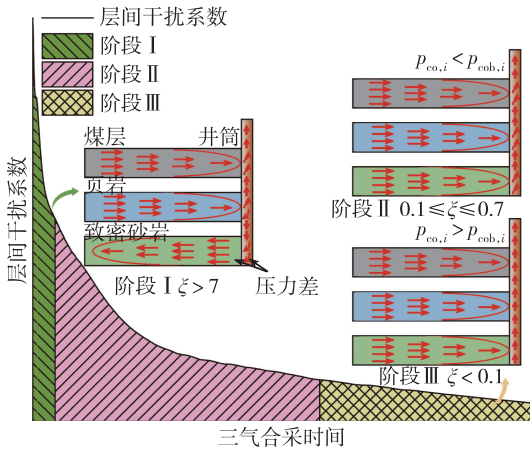


图 15 井筒层间干扰变化规律及产生机理示意^[81]

Fig. 15 Schematic diagram of the variation and mechanism of interlayer interference

4 结 论

1) 薄互层煤系气单井压裂合采机理是制约煤系气高效开采的关键科学问题, 岩石力学地层具有衔接非常规地质与储层工程理论的天赋属性和

优势, 为薄互层煤系气的单井压裂合采提供新的解决思路.

2) 薄互层煤系储层空间叠置和复合成藏具有独特性, 基于煤系岩石力学地层创新的构建薄互层煤系单井压裂合采的理论方法体系. 揭示煤系裂缝穿层扩展机理、气-水层间流动和井筒层间干扰对合采的影响规律.

3) 基于岩石力学地层理论, 建立数值模拟和机器学习相耦合的储层可压裂性预测框架, 并提出了一种基于分层抽样和 Vine Copula 的小样本可压裂性预测方法; 构建了卷积神经网络升尺度方法以预测压裂后煤系储层渗透率.

目前已经初步形成薄互层煤系气单井压裂合采的岩石力学地层理论框架. 但是, 我国煤系储层的地质构造复杂, 为简化计算, 本框架未考虑储层弱面(层理或天然裂缝)对裂缝穿层扩展的影响且假定储层是均匀多孔介质. 这些假定与储层的地质特征有较大差距. 如何考虑这些差距对单井压裂合采效率的影响, 以及如何在岩石力学地层理论框架中体现这些差距, 需进一步研究.

参考文献:

[1] QIN Y, MOORE T, SHEN J, et al. Resources and geology of coalbed methane in China: A review[J]. International Geology Review, 2017, 60(5/6): 777-812.

[2] 金 军, 秦 勇, 易同生, 等. 威宁地区下石炭统祥摆组: 一个潜在的薄互层煤系气新层系[J]. 地质论评, 2023, 69(5): 1879-1891.

JIN Jun, QIN Yong, YI Tongsheng, et al. Lower carboniferous Xiangbai Formation in Weining area: A potential new formation of thin interbedded coal measures gas[J]. Geological Review, 2023, 69(5): 1879-1891.

[3] 李乐忠. 低煤阶、薄互层煤层气的成藏特征及开发技术: 以澳大利亚苏拉特盆地为例[J]. 中国煤层气, 2016, 13(6): 15-19.

LI Lezhong. Reservoir formation characteristics and development technology for low rank CBM with thin interbed: Taking Surat Basin in Australia as an example[J]. China Coalbed Methane, 2016, 13(6): 15-19.

[4] 秦 勇, 申 建, 沈玉林, 等. 苏拉特盆地煤系气高产地质原因及启示[J]. 石油学报, 2019, 40(10): 1147-1157.

QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin, et al. Geological causes and inspirations for high production of coal measure gas in Surat Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(10): 1147-1157.

- [5] 李 耿. 煤系复合储层构型及其渗透性地质控制:以五九凹陷下白垩统大磨拐河组为例[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
LI Geng. Geological control of composite reservoir configuration and permeability in coal measure: A case of the lower cretaceous Damoguaihe Formation of Wujiu Depression, Hailar Basin [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [6] 李 伟, 申 建, 汪跃跃, 等. 深部煤系气合采产层组合判识方法及效果评价[J]. 石油学报, 2024, 45(5): 844-854.
LI Wei, SHEN Jian, WANG Yueyue, et al. Identification method of deep coal-measure gas coproduction layer combinations and its effect evaluation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 844-854.
- [7] LIANG W, WANG J, LEUNG C, et al. Opportunities and challenges for gas coproduction from coal measure gas reservoirs with coal-shale-tight sandstone layers: A review[J]. Deep Underground Science and Engineering, 2024. (2024-09-29) [2024-10-11] <https://doi.org/10.1002/dug2.12077>.
- [8] 邹才能, 杨 智, 黄土鹏, 等. 煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 433-442.
ZOU Caineng, YANG Zhi, HUANG Shipeng, et al. Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 433-442.
- [9] 苏现波, 王 乾, 于世耀, 等. 基于低负碳减排的深部煤系气一体化开发技术路径[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1931-1948.
SU Xianbo, WANG Qian, YU Shiyao, et al. Integrated development technology path for deep coal measure gas based on low-negative carbon emission reduction [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1931-1948.
- [10] 李 瑞, 金丽红, 夏彬伟, 等. 地面井分层卸压的煤系气合采原理及方式探讨[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 171-179.
LI Rui, JIN Lihong, XIA Binwei, et al. Exploring the principle and method for commingled production of coal-measure gas through layered pressure relief in surface wells [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 171-179.
- [11] 王 波, 张 兵, 米洪刚, 等. 临兴地区煤系多层合压工艺方案优化研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(8): 79-88.
WANG Bo, ZHANG Bing, MI Honggang, et al. Optimization of schemes for multi-reservoir commingled fracturing of coal measures in the Linxing block [J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(8): 79-88.
- [12] WANG Q, JIN Y, SU X B, et al. Characteristics and controlling factors of fluid interlayer crossflow through fractures in coal measure gas reservoirs: Implication for enhancing production [J]. Natural Resources Research, 2023, 33(3): 1227-1246.
- [13] 孟尚志, 侯 冰, 张 健, 等. 煤系“三气”采产层组压裂裂缝扩展物模试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 221-227.
MENG Shangzhi, HOU Bing, ZHANG Jian, et al. Experimental research on hydraulic fracture propagation through mixed layers of shale, tight sand and coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 221-227.
- [14] 易良平, 胡 滨, 李小刚, 等. 基于相场法的煤砂互层水力裂缝纵向延伸计算模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增 2): 706-716.
YI Liangping, HU Bin, LI Xiaogang, et al. Calculation model of hydraulic crack vertical propagation in coal-sand interbedded formation based on the phase field method [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Sup 2): 706-716.
- [15] 王士国, 金 衍, 谭 鹏, 等. 煤系页岩储层多气共采水力裂缝扩展规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2290-2296.
WANG Shiguo, JIN Yan, TAN Peng, et al. Experimental investigation on hydraulic fracture propagation of coal shale reservoirs under multi-gas coproduction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2290-2296.
- [16] WANG H, WU Z, WANG Y, et al. Investigation on crack propagation perpendicular to mortar-rock interface: Experimental and numerical [J]. International Journal of Fracture, 2020, 226(1): 45-69.
- [17] CONG R, YANG R, JING M, et al. Experimental investigation on hydraulic fracture propagation behaviors of coal-measure thin interbedded rocks [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(11): 9557-9573.
- [18] 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]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
TAN Peng. Mechanical behavior of hydraulic fracture vertical propagation for layered formation with multi-lithology combination [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [19] 李小刚, 贺宇廷, 杨兆中, 等. 纵向叠置多薄煤层压

- 裂裂缝竞争延伸数值模拟[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6):1669-1676.
- LI Xiaogang, HE Yuting, YANG Zhaozhong, et al. Numerical simulation of hydraulic fractures propagation in multiple thin coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6):1669-1676.
- [20] 熊健, 刘峻杰, 吴俊, 等. 致密储层压裂缝扩展规律与可压裂性评价[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10):1581-1591.
- XIONG Jian, LIU Junjie, WU Jun, et al. Fracture propagation law and fracability evaluation of the tight reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10):1581-1591.
- [21] 董卓, 唐世斌. 基于最大周向应变断裂准则定向射孔水力裂缝扩展研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11):4543-4553.
- DONG Zhuo, TANG Shibin. Oriented perforation hydraulic fracture propagation based on the maximum tangential strain criterion [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11):4543-4553.
- [22] 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 Rui, ZHANG Guangqing. 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.
- [23] ZHAO H F, CHEN M. Extending behavior of hydraulic fracture when reaching formation interface [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 74(1/2):26-30.
- [24] 汪文瑞, 张广清, 孙伟, 等. 岩性差异对裂缝穿层扩展的率相关断裂特征影响[J]. 岩土力学, 2024, 45(8):2311-2323.
- WANG Wenrui, ZHANG Guangqing, SUN Wei, et al. Influence of rock property difference on rate-dependent fracture characteristics during fracture passing through bedding [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(8):2311-2323.
- [25] SUN H R, WANG L, ZHANG R X, et al. Criterion for hydraulic fracture propagation behaviour at coal measure composite reservoir interface based on energy release rate theory [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-energy and Geo-resources, 2024, 10(1):153.
- [26] ZHAO Y L, ZHAO L, WANG Z M, et al. Numerical simulation of multi-seam coalbed methane production using a gray Lattice Boltzmann method [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 175:587-594.
- [27] 赵岩龙. 煤层气运移格子 Boltzmann 模型及层间干扰模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- ZHAO Yanlong. Lattice boltzmann model for CBM migration and simulation of interference in multi-layered coal seams [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.
- [28] WANG Z W, QIN Y, LI T, et al. A numerical investigation of gas flow behavior in two-layered coal seams considering interlayer interference and heterogeneity [J]. International Journal of Mining Science And Technology, 2021, 31(4):699-716.
- [29] 黄林岗, 林凌, 罗文嘉. 煤层气中甲烷扩散及水锁效应的分子动力学研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11):4124-4134.
- HUANG Lingang, LIN Ling, LUO Wenjia. A molecular dynamics study on coalbed methane diffusion and water-blocking effects [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11):4124-4134.
- [30] SHEN F, CHENG L S, SUN Q, et al. Evaluation of the vertical producing degree of commingled production via waterflooding for multilayer offshore heavy oil reservoirs [J]. Energies, 2018, 11(9):2428.
- [31] XU J F, HU X Z, NING B. Dynamic interference behaviors of arbitrary multilayer commingling production in heavy oil reservoirs with water flooding [J]. ACS Omega, 2021, 6(15):10005-10012.
- [32] 孟尚志, 李勇, 吴翔, 等. 煤层气和致密气合采产能方程及影响因素[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6):1709-1715.
- MENG Shangzhi, LI Yong, WU Xiang, et al. Productivity equation and influencing factors of co-producing coalbed methane and tight gas [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6):1709-1715.
- [33] OLSON T, HOBBS B, BROOKS R, et al. Paying off for Tom Brown in White River Dom Field's tight sandstone, deep coals [J]. The American Oil and Gas Reports, 2002, 10:67-75.
- [34] STEVEN S, BRUCE A, PETER C, et al. Coal petrology and coal seam gas contents of the Walloon Subgroup-Surat Basin, Queensland, Australia [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70(1/2/3):209-222.
- [35] 谢英刚, 孟尚志, 高丽军, 等. 临兴地区深部煤层气及致密砂岩气资源潜力评价[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2):21-24.
- XIE Yinggang, MENG Shangzhi, GAO Lijun, et al. Assessments on potential resources of deep coalbed

- methane and compact sandstone gas in Linxing Area [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43 (2): 21-24.
- [36] 王 坤, 张国生, 李志欣, 等. 山西省煤层气勘探开发现状与发展趋势[J]. *中国煤层气*, 2020, 17(6): 39-43.
WANG Kun, ZHANG Guosheng, LI Zhixin, et al. Current status and trends of coalbed methane exploration development in Shanxi province [J]. *China Coalbed Methane*, 2020, 17(6): 39-43.
- [37] 姚海鹏, 李 玲. 鄂托克旗煤系“三气”共采地质条件研究[J]. *中国战略新兴产业*, 2017(12): 71.
YAO Haipeng, LI Ling. Research on geological conditions for co-mining of “three gases” in coal measures of Etuoke Banner [J]. *China Strategic Emerging Industries*, 2017(12): 71.
- [38] 桑树勋, 周效志, 刘世奇, 等. 岩石力学地层理论方法及其煤系气高效勘探开发应用基础述评[J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 304-316.
SANG Shuxun, ZHOU Xiaozhi, LIU Shiqi, et al. A review of mechanical stratigraphy methodology and its application in high-efficient exploration and development of coal measure gas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96 (1): 304-316.
- [39] 熊 健, 吴建军, 刘向君, 等. 海陆过渡相地层不同岩性岩石力学特性研究: 以鄂尔多斯盆地东缘山西组为例[J]. *地球物理学进展*, 2024, 39(2): 759-769.
XIONG Jian, WU Jianjun, LIU Xiangjun, et al. Study on rock mechanical properties of different lithologies in marine continental transitional formation: A case study of the Shanxi Formation in the eastern margin of Ordos Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2024, 39(2): 759-769.
- [40] 桑树勋, 郑司建, 王建国, 等. 岩石力学地层新方法在深部煤层气勘探开发“甜点”预测中的应用[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1840-1853.
SANG Shuxun, ZHENG Sijian, WANG Jianguo, et al. Application of new rock mechanical stratigraphy in sweet spot prediction for deep coalbed methane exploration and development [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1840-1853.
- [41] 闫 霞, 徐凤银, 聂志宏, 等. 深部微构造特征及其对煤层气高产“甜点区”的控制: 以鄂尔多斯盆地东缘大吉地区为例[J]. *煤炭学报*, 2021, 46 (8): 2426-2439.
YAN Xia, XU Fengyin, NIE Zhihong, et al. Micro-structure characteristics of Daji area in east Ordos Basin and its control over the high yield dessert of CBM [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46 (8): 2426-2439.
- [42] 翟 成, 曲占庆, 邓守春, 等. 页岩储层甲烷原位燃爆压裂理论与技术研究进展[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(3): 435-455.
ZHAI Cheng, QU Zhanqing, DENG Shouchun, et al. Strategic conception and research progress of methane in-situ deflagration fracturing technology in shale reservoirs [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(3): 435-455.
- [43] 李 勇, 何建华, 邓虎成, 等. 深层页岩储层现今地应力场特征及其对页岩储层改造的影响: 以川南永川页岩气区块五峰-龙马溪组为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(3): 546-563.
LI Yong, HE Jianhua, DENG Hucheng, et al. The present-day in-situ stress filed characteristic of deep shale reservoirs and its effect on the reconstruction of shale reservoirs: A case study of the Yongchuan shale gas field in South Sichuan Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53 (3): 546-563.
- [44] XU W J, ZHAO J Z, XU J G. Fracability evaluation method for tight sandstone oil reservoirs [J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(6), 4277-4295.
- [45] ZENG F H, GONG G B, ZHANG Y, et al. Fracability evaluation of shale reservoirs considering rock brittleness, fracture toughness, and hydraulic fracturing-induced effects [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 229: 212069.
- [46] ANDREAS M. Transparent gelatin as a reservoir analogue: Dimensional scaling for hydraulic fracturing laboratory experiments [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 177: 105732.
- [47] 严 浩. 深层页岩水力压裂实验及复杂程度评价模型研究[D]. 成都: 西华大学, 2023.
YAN Hao. Research on deep shale hydraulic fracturing experiments and complexity evaluation model [D]. Chengdu: Xihua University, 2023.
- [48] 高明忠, 叶思琪, 杨本高, 等. 深部原位岩石力学研究进展[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(6): 895-903.
GAO Mingzhong, YE Siqu, YANG Bengao, et al. Progress in research on deep in situ rock mechanics [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(6): 895-903.
- [49] 潘 睿. 薄互层岩石断裂特性研究及在水力压裂中的应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
PAN Rui. Fracture characteristics of thin interbedded rocks and its application in hydraulic fracturing [D]. Beijing: China University of Petroleum (Bei-

- jing), 2021.
- [50] 陈东升, 纪洪广, 袁永忠, 等. 岩石非均质程度对水压致裂地应力测试方法影响的分析与讨论[J]. 地质力学学报, 2023, 29(3): 365-374.
CHEN Dongsheng, JI Hongguang, YUAN Yongzhong, et al. Influence of rock inhomogeneity degree on the crustal stress results measured by hydraulic fracturing method [J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(3): 365-374.
- [51] ODA M. Permeability tensor for discontinuous rock masses [J]. Geotechnique, 1985, 35(4): 483-495.
- [52] WANG L, LEI Q. A dual-scale fracture network model for computing hydro-mechanical properties of fractured rock [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 138: 104357.
- [53] 李奇贤, 许江, 彭守建, 等. 多压力系统气藏合采物理模拟研究进展评述[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 149-159.
LI Qixian, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Review on the progress for physical simulation for gas reservoirs co-production in multi-pressure system [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 149-159.
- [54] LIU G F, MENG Z, LUO D Y, et al. Experimental evaluation of interlayer interference during commingled production in a tight sandstone gas reservoir with multi-pressure systems [J]. Fuel, 2020, 262: 116557.
- [55] 郭晨, 秦勇, 易同生, 等. 煤层气合采地质研究进展述评[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 42-57.
GUO Chen, QIN Yong, YI Tongsheng, et al. Review of the progress of geological research on coalbed methane co-production [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 42-57.
- [56] 张雷, 郭建英, 栗褒, 等. 孔隙结构对低阶煤润湿性影响的分子模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(6): 1117-1127.
ZHANG Lei, GUO Jianying, LI Bao, et al. Molecular simulation in vestigation on the effect of pore structure on the wettability of low-rank coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(6): 1117-1127.
- [57] 谢英刚, 秦勇, 叶建平, 等. 临兴地区上古生界煤系致密砂岩气成藏条件分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 181-191.
XIE Yinggang, QIN Yong, YE Jianping, et al. Accumulation conditions of tight gas in the Upper Paleozoic of Linxing Block [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 181-191.
- [58] ZHANG X M, TONG D K, XUE L L. Numerical simulation of gas-water leakage flow in a two layered coalbed system [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(5): 692-698.
- [59] MILAD B, CIVAN F, DEVEGOWDA D, et al. Modeling and simulation of production from commingled shale gas reservoirs [C]// Unconventional Resources Technology Conference, August 12-14, 2013, Denver, Colorado, USA.
- [60] JIANG W, WU C F, WANG Q, et al. Interlayer interference mechanism of multi-seam drainage in a CBM well: An example from Zhucang syncline [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(6): 1101-1108.
- [61] TENG T, WANG J G, GAO F, et al. Impact of water film evaporation on gas transport property in fractured wet coal seams [J]. Transport in Porous Media, 2016, 113(2): 357-382.
- [62] MENG S Z, LI Y, WANG L, et al. A mathematical model for gas and water production from overlapping fractured coalbed methane and tight gas reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 171: 959-973.
- [63] ZHAO Y L, WANG Z M. Effect of interlayer heterogeneity on multi-seam coalbed methane production: A numerical study using a gray lattice Boltzmann model [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 174: 940-957.
- [64] SANTIAGO V, RIBEIRO A, HURTER S. Modeling the contribution of individual coal seams on commingled gas production [J]. SPE Production & Operations, 2021, 36(1): 245-261.
- [65] HUANG L, WANG X. Controlling factors towards co-production performance of coalbed methane and tight sandstone gas reservoirs [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(22): 2344.
- [66] WANG L, HE Y M, WANG Q, et al. Improving tight gas recovery from multi-pressure system during commingled production: An experimental investigation [J]. Natural Resources Research, 2021, 30(5): 3673-3694.
- [67] ZHAO S H, WANG Y B, LI Y, et al. Co-production of tight gas and coalbed methane from single wellbore: A simulation study from northeastern Ordos Basin, China [J]. Natural Resources Research, 2021, 30(2): 1597-1612.
- [68] CHAI X L, TIAN L, DONG P J, et al. Study on recovery factor and interlayer interference mechanism of multilayer co-production in tight gas reservoir with high heterogeneity and multi-pressure systems

- [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 210: 109699.
- [69] CUI G L, TAN Y L, CHEN T Y, et al. Multidomain two-phase flow model to study the impacts of hydraulic fracturing on shale gas production [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(4): 4273-4288.
- [70] LIU Y, WANG Y, XING X, et al. Numerical study on co-production characteristics of "Three Gases" in coal-measure strata[C]//*Proceedings of the Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, Singapore, 2022.
- [71] ZHONG G H, LI S, TANG D Z, et al. Study on co-production compatibility evaluation method of multilayer tight gas reservoir [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 108: 104840.
- [72] QUAN F K, WEI C T, LI R L, et al. Reservoir damage in coalbed methane commingled drainage wells and its fatal impact on well recovery [J]. *Natural Resources Research*, 2022, 32(1): 295-319.
- [73] JIN J, FANG X J, WU C F, et al. Impact factors and contributions of commingled production in multiple coal seams [J]. *Energy Science & Engineering*, 2022, 10(12): 4544-4565.
- [74] LI P B, WANG J G, LIANG W, et al. An analytical and numerical analysis for hydraulic fracture propagation through reservoir interface in coal-measure superimposed reservoirs [J]. *Sustainability*, 2023, 15(5): 4597.
- [75] TAN P, JIN Y, HAN K, et al. Vertical propagation behavior of hydraulic fractures in coal measure strata based on true triaxial experiment [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 158: 398-407.
- [76] HE J M, LIN C, LI X, et al. Experimental investigation of crack extension patterns in hydraulic fracturing with shale, sandstone and granite cores [J]. *Energies*, 2016, 9(12): 1080.
- [77] 盖迪, 朱万成, 魏晨慧, 等. 基于损伤力学理论的脉冲压裂模型及模拟研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(5): 945-950.
- GAI Di, ZHU Wancheng, WEI Chenhui, et al. Pulse fracturing model based on damage mechanics and its numerical simulation [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(5): 945-950.
- [78] LI P B, WANG J G, LIANG W, et al. Study on CO₂ fracturing in deep tight sandstone considering the in-situ stress gradient and thermal stress [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 174: 106599.
- [79] NEWMAN J C. An improved method of collocation for the stress analysis of cracked plates with various shaped boundaries [R]. NASA, 1971.
- [80] ZHU C H, WANG J G, SANG S X. A multiscale neural network model for the prediction on the equivalent permeability of discrete fracture network [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, 220: 111186.
- [81] LIANG W, WANG J G, LEUNG C F, et al. Impact of crossflow and two-phase flow on gas production from stacked deposits [J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(13): 8935-8948.
- [82] SUN H, GAO C. Well test analysis for multilayered reservoirs with formation crossflow [M]. Houston: Gulf Professional Publishing, 2017.
- [83] LIANG W, WANG J G, LI P B, et al. New insight to interlayer interference during three-gas co-production based on a wellbore-reservoir coupling model [J]. *Natural Resources Research*, 2023, 32(5): 2037-2052.
- [84] KARACAN C O. Single-well production history matching and geostatistical modeling as proxy to multi-well reservoir simulation for evaluating dynamic reservoir properties of coal seams [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2021, 241: 103766.

(责任编辑 沈春妮 全腾)