

致密砾岩储层力学特征与水力裂缝扩展机理研究进展

王剑波¹, 侯冰^{1*}, 滕卫卫², 李小迪¹, 刘见通¹, 梁宝兴², 张远凯², 魏云²

1 中国石油大学(北京)克拉玛依校区石油工程学院, 克拉玛依 834000

2 中国石油新疆油田分公司, 克拉玛依 834000

* 通信作者, binghou@vip.163.com

收稿日期: 2024-01-09; 修回日期: 2024-05-14

新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目基(2024D01A156)、国家重点研发计划(2022YFE0129800)、新疆维吾尔自治区“一事一议”引进战略人才项目(XQZX20240054)联合资助

摘要 砾岩油藏在我国储量超过 20 亿 t, 是我国油气能源的重要接替领域之一。但是, 砾岩储层含有大量砾石, 具有力学特征非均质性强、裂缝扩展路径差异大的特点, 压裂施工中实现均衡布缝的难度大, 用现有均匀岩石裂缝扩展理论难以有效解释, 需要探索适用于砾岩的相关理论与方法。针对砾岩储层特征和开发工程困境, 本文从岩石特征、研究方法、力学性质、裂缝扩展规律与水力压裂技术对策 5 个方面, 探讨了砾岩开发中的难题与对策。据此, 提出了综合细观尺度、常规尺度、大物模尺度、米级尺度、矿场尺度的多尺度分析方法, 并通过尺度升级将室内研究结果应用于油田现场的思路; 厘清了砾石、杂基以及胶结面是控制岩石力学参数与破裂规律的关键, 需建立弱胶结面模型来提高力学参数预测精度; 明确了砾岩裂缝扩展有穿砾和绕砾两种模式, 存在明显的过程区特征, 可参考双 K 断裂准则构建适用于砾岩的裂缝扩展模型, 预测起裂与扩展参数; 可压性评价要以地质工程一体化为指导思想, 综合岩石结构特征与多尺度力学参数来建立, 筛选储层并优化压裂施工方案。

关键词 砾岩; 地质工程一体化; 多尺度; 水力压裂; 可压性

中图分类号: TE384

Research progress on mechanical characteristics and hydraulic fracture propagation mechanism of tight conglomerate reservoirs

WANG Jianbo¹, HOU Bing¹, TENG Weiwei², LI Xiaodi¹, LIU Jiantong¹, LIANG Baoxing², ZHANG Yuankai², WEI Yun²

¹ College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 834000, China

² PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China

Received: 2024-01-09; Revised: 2024-05-14

Abstract Conglomerate oil reservoirs have reserves exceeding 2 billion tonnes in China and are one of the important replacement fields for oil and gas energy in China. However, conglomerate reservoirs contain a large amount of gravel, which

引用格式: 王剑波, 侯冰, 滕卫卫, 李小迪, 刘见通, 梁宝兴, 张远凯, 魏云. 致密砾岩储层力学特征与水力裂缝扩展机理研究进展. 石油科学通报, 2024, 09(06): 972-990

WANG Jianbo, HOU Bing, TENG Weiwei, LI Xiaodi, LIU Jiantong, LIANG Baoxing, ZHANG Yuankai, WEI Yun. Research progress on mechanical characteristics and hydraulic fracture propagation mechanisms of tight conglomerate reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2024, 09(06): 972-990. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.06.075

is very heterogeneous mechanically and has significant differences in crack propagation paths. It is difficult to achieve balanced distribution of fractures in fracturing, and it is difficult to effectively explain using existing theories of uniform rock crack propagation. Therefore, it is necessary to explore relevant theories and methods applicable to conglomerate. In response to the characteristics of conglomerate reservoirs and the difficulties in development engineering, this article explores the difficulties and countermeasures in conglomerate development from five aspects: rock characteristics, research methods, mechanical characteristics, fracture propagation and hydraulic fracturing technology. Based on this, a multi-scale analysis method was proposed for comprehensive mesoscale, conventional scale, large scale model, meter scale, and field scale, and the laboratory research results were applied to oilfield sites through scale upgrading; Clarifying the gravel, mixed base, and cementation surface is the key to controlling rock mechanical parameters and fracture patterns. It is necessary to establish a weak cementation surface model to improve the accuracy of mechanical parameter prediction; It has been clarified that there are two modes of conglomerate fracture propagation: through gravel and around gravel, with obvious process zone characteristics. A fracture propagation model suitable for conglomerate can be constructed based on the double K fracture criterion to predict the initiation and propagation parameters; The compressibility evaluation should be guided by the integration of geological engineering, integrating rock fabric characteristics and multi-scale mechanical parameters to establish, and optimize fracturing plans.

Keywords conglomerate; geology-engineering integration; multi scale; hydraulic fracturing; fracability

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.06.075

0 引言

砾岩油藏在我国丰富,四川盆地须家河组、渤海湾盆地沙河街组和孔店组、柴达木盆地地下干柴沟组、松辽盆地沙河子组、南襄盆地核桃园组、珠江口盆地文昌组砂砾岩、二连盆地阿尔善组与腾格尔组、准噶尔盆地沙湾和玛湖凹陷等多个盆地勘探成果显示,砾岩油气在我国的总储量超过 20 亿 t,是我国未来石油勘探开发的重大接替领域^[1-8]。尤其 2018 年准噶尔盆地玛湖凹陷 16.3 亿 t 油藏的突破性发现,极大的促进了我国砾岩油藏开发进程^[9]。勘探开发实践证明,水平井水力压裂是实现砾岩油藏高效开发的核心技

术^[10-11]。在工程实践中发现,如图 1a 所示,玛 131 井某平台多口水平井水力压裂微震解释裂缝显示,存在裂缝网络分布极不均匀,部分储层裂缝难以起裂导致改造不充分,增产效率较低^[12-14]。砾岩由砾石(粒径 ≥ 2 mm)、杂基(粒径 < 2 mm 的砂、粉砂、泥质等)、胶结物等组成。勘探开发中发现,不同生产区域的砾岩矿物组分差异极大,砾石几何特征(粒径、磨圆度、含量、分选性等)在储层中分布极不均匀^[15],具有极强的非均质性,水力裂缝尺度效应显著^[16-19]。如图 1b 所示,在细观尺度上,砾石和杂基的力学性质不同,裂缝尖端遇砾后的应力场和应变场演化极复杂,存在穿砾和绕砾等现象,无法用现有裂缝扩展理论准

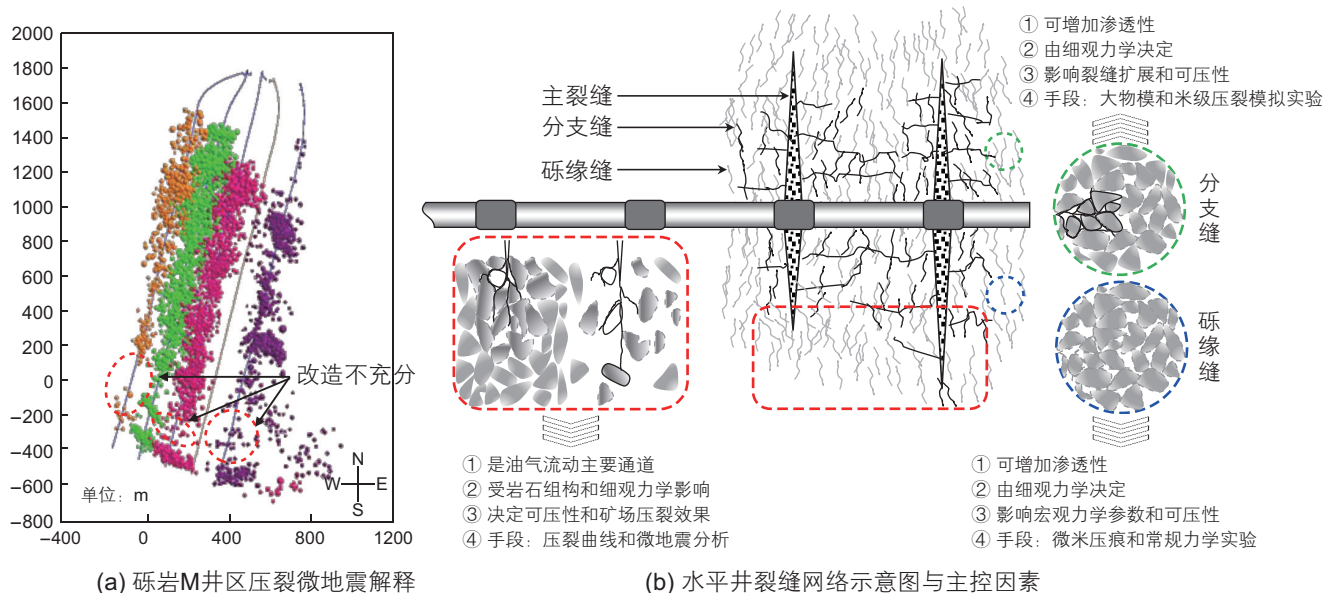


图 1 砾岩现场微震解释裂缝特征与缝网示意图

Fig. 1 Typical images of conglomerate and microseismic of fracture characteristics

确表征^[16-17, 20]。在宏观尺度上,砾石的几何特征和各组分细观力学性质的差异大,裂缝起裂均匀性差,部分裂缝难以起裂,压裂效果差^[21-24]。本文将从地质特征、研究方法、力学特征与裂缝扩展机理、相关理论与施工方案等方面,探讨强非均质砾岩的缝网形成规律与可压性评价方法,为水力压裂工艺措施提供理论支撑^[10-11, 25]。

1 砾岩储层岩石特征

砾岩属碎屑流沉积搬运堆积形成的岩层,沉积过程中地壳互动剧烈。以玛湖凹陷扇三角洲为例,经过多次旋回构造运动和多期次湖平面升降造就了沉积演化的多旋回性,在沉积体系内粗碎屑岩与洪泛平原和滨浅湖泥岩的交互沉积耦合,形成了较为复杂岩石储层组合与分布(如图 2 所示)^[8, 26-27]。复杂的沉积历史形成了横纵向组合序列,在不同的沉积成因下形成了岩性类型繁复的沉积单元^[28-29]。复杂的沉积过程使得储层受砾石(粒径、含量、成分、分选性、磨圆度)、杂基矿物组分和成岩作用(压实、胶结、溶蚀作用等)多重因素影响,岩相复杂,横向和纵向都显示岩性类型多样(如图 3 所示)^[30]。可见,玛湖砾岩储层发育有复杂的沉积相空间展布,按照不同的沉积单元分区分类是一种便于掌握各岩相岩石组分与结构特征的研究思路^[31]。

复杂的沉积导致其组分与结构类型多样,需要考虑以下 4 个方面因素:(1)各组分的性质,包括密度和力学性质;(2)几何特征,如相对含量、尺寸、形状、取向和分布;(3)拓扑特征,如空间排列分布;(4)相

互作用,主要是界面的胶结力问题^[32-33]。基于砾岩沉积成因导致的储层岩石特征,进一步分析岩石力学性质与裂缝扩展规律,是实现砾岩储层地质工程一体化开发的现实途径。

2 砾岩组构与力学特征研究方法

2.1 砾岩的组分与结构特征

不同矿物成分的砾石和杂基的力学性质差异极大,砾石形态直接决定了其几何特征,而砾石含量和颗粒间胶结强度也决定了其拓扑特征和相互作用。由此可见,分析砾岩的组分和结构特征,是研究砾岩力学性质与裂缝扩展规律的基础。

(1) 组分分析方法

根据现场砾石矿物成分分析发现,砾石主要为火成岩,其成分较为稳定。砾岩成分的差异主要体现在杂基部分。常规用于岩石矿物组分测定的方法有 EDS(电子显微镜)、XRD(X 衍射)、XRF(X 射线荧光) 3 类方法。由于砾岩具有尺度效应,我们推荐将 XRF、XRD、EDS 3 种方法结合,以实现岩石不同组分矿物成分的分析。XRF 分析尺度大,可分析砾岩中砾石的矿物和体积含量;XRD 计量矿物组分更加精确,可分析杂基中所含矿物成分和含量;EDS 定位精准可靠,分析砾石与杂基间胶结物的矿物类型。在实测时,可将砾石筛除后,采用 XRD 方法测试杂基组分,而后加入 EDS 分析的砾石结果反算,可得准确的全岩成分,并基于 EDS 结果明确其胶结物成分和胶结类型。综合 3 种手段可实现砾岩全岩矿物的全覆盖精确定量分析(如图 4 所示)。

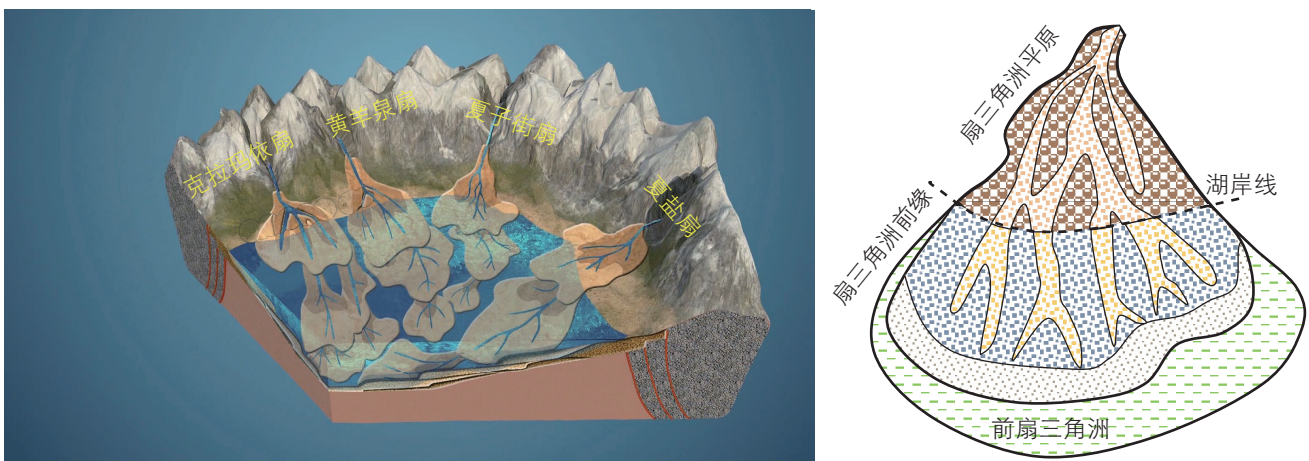


图 2 玛湖凹陷百口泉组砾岩储层沉积相特征

Fig. 2 Sedimentary facies characteristics of conglomerate reservoir in Baikouquan Formation of Mahu Depression

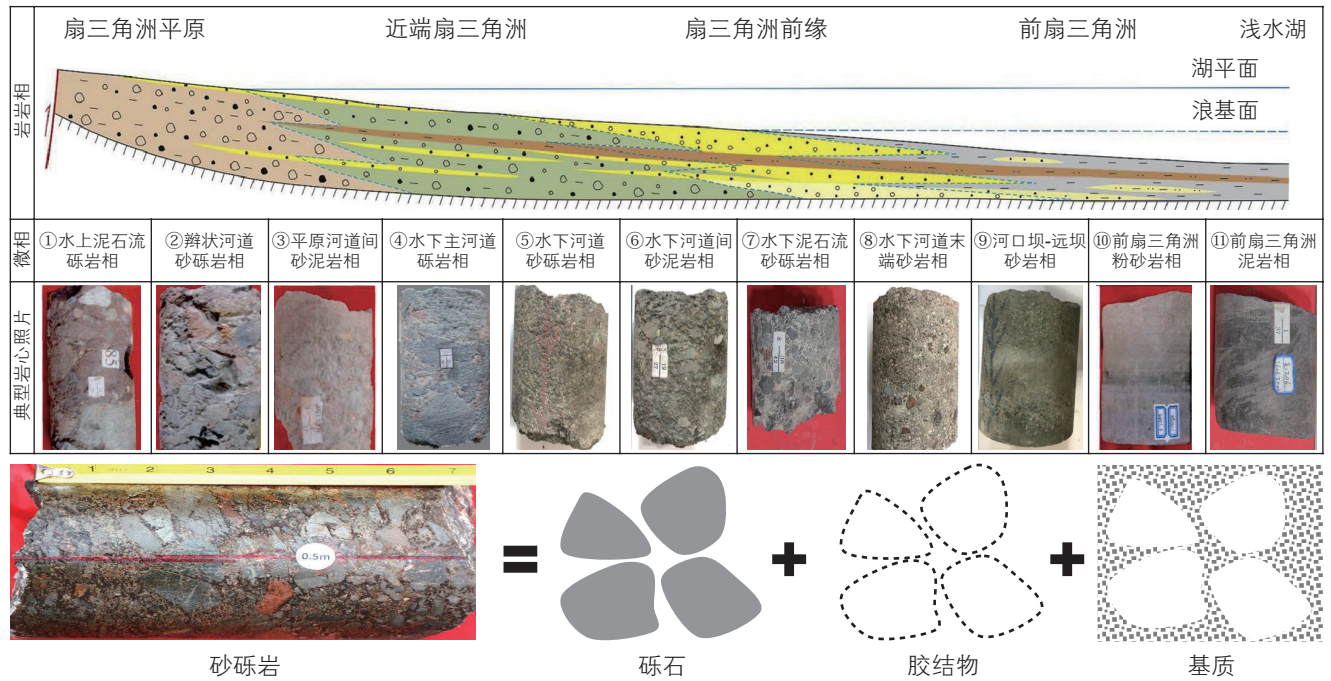
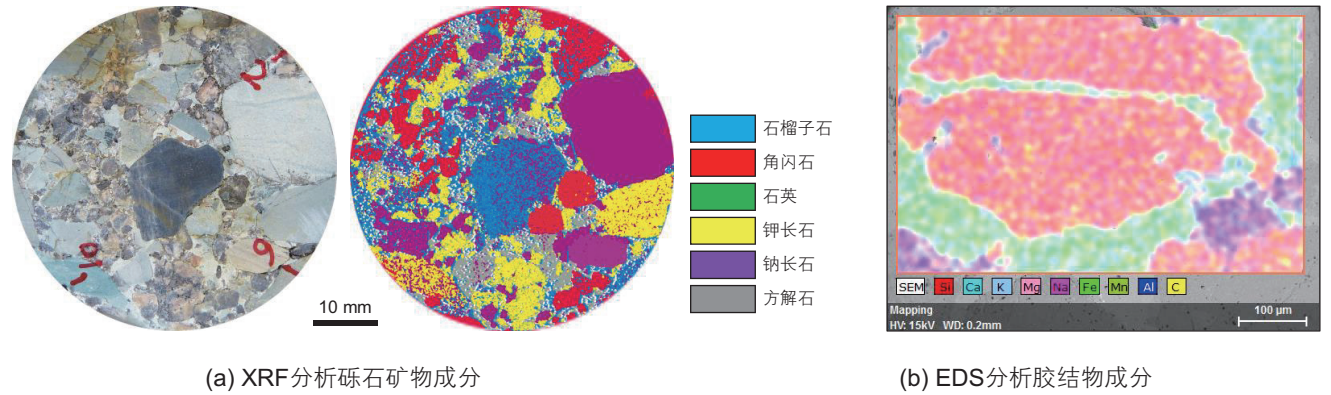


图3 扇三角洲沉积相横向剖面分类与代表性岩石照片

Fig. 3 Classification and representative rock photos of fan delta sedimentary facies cross section



(a) XRF分析砾石矿物成分

(b) EDS分析胶结物成分

(c) X衍射图谱与XRD分析结果

图4 砾岩组分与结构分析方法汇总

Fig. 4 Summary of analysis methods for composition and structure of conglomerates

(2) 结构分析方法

结构特征决定了砾岩的几何特征、拓扑特征、相互作用 3 个方面。评价砾岩结构特征的核心是砾石的形态、分选、含量等参数。针对砾石特征的常采用分析方法有数字筛析法和图像法。筛析法是通过将岩石样品破碎后进行筛分的方法。筛析法存在两个问题导致使用较少。一方面需要破坏样品使得岩性损耗较大,另一方面在砾石超过筛网网格尺寸时,只能采用直接测量砾石,计量过程繁琐且不准确。数字图像分析法需先采集图像,基于图像 RGB 值(红色、绿色、蓝色 3 种基本颜色亮度值)对图像通过多阈值区域分割,再网格划分得到不同矿物或砾石分布的网格。基于这些数字化网格,可实现与实际岩石的映射,准确计算砾石的特征参数(如图 5 所示)^[34-37]。

数字图像法准确性较高,适用于室内研究。但是对全井段的评价依然难以实现,需要发展测井评价方法。声波测井是潜在的方法之一,可以反映岩石内部结构。刘见通等人已针对玛湖 1 井区百口泉组砾岩开展了声学研究^[38]。通过声波的各向异性系数和声波频谱,初步构建了测试方法。受砾石含量和粒径的影响,声波穿过砾岩时存在较强的散射,含量越高,粒径越大,散射作用越强烈。砾石散射作用导致接收到的声波不再是直达波,而是多重散射干涉形成的声波。砾石散射降低了砂砾岩的超声波波速,等效均匀介质理论不适用于超声波在砾岩中的传播问题。波速非均质系数可以有效评价砂砾岩的细观特征,波速非均质系数增加,反映了砾石含量和粒径的增加及细观非均质性的增强,砾石支撑模式也从杂基支撑向砾石支撑过渡。但是将该方法应用于现场测井中还需要不断探索。

2.2 不同尺度力学性质实验研究方法

砾岩是典型的颗粒复合材料,砾石、杂基、胶结

物是其基本单元,其力学特征直接决定着裂缝在细观尺度上的起裂与扩展,也是宏观水力压裂缝网扩展规律的基础。从细观(或微观)到矿场的不同尺度之间,需要不同力学研究方法。目前在岩石力学方面的研究尺度主要包含如图 6 所示实验室和矿场两个方面。

实验室研究方面,包含了细观尺度、常规尺度、大物模尺度和米级尺度。针对细观尺度力学测试,陈平等提出采用三棱锥形压头压入岩石表面,来获取岩石中各组成相的弹性模量、硬度和断裂韧度^[39-42]。但是关于砾石与杂基之间的胶结强度测试是一个难题。王剑波等人获得了关于砾岩胶结强度测试装置和方法的发明专利,专门解决砾石与杂基胶结强度测试的问题^[43-44]。综合两种方法,细观上既可以获得各组分的力学参数,也可以获得组分间(砾石与杂基)的力学关系。

常规尺度包括单轴压缩、三轴压缩、抗拉强度测试等实验。单轴压缩和三轴压缩实验要求采用尽可能包裹全岩心应变测试的方法,如 LVDT(线性可变差动变压位置传感器)应变规。如采用电阻应变片测试,存在砾石和杂基间应变差异较大,结果不准确的问题。抗拉强度测试方面也需要注意,受砾石影响,采用巴西劈裂实验时裂缝难以沿直径形成单一裂缝,导致计算结果失准。针对这一问题,刘见通采用三点弯断裂实验的测试方法,获得了较好的实验结果,可测试断裂强度和裂缝遇砾扩展行为^[16]。

大物模实验的目的是为了进行水力压裂模拟,通过真三轴加载模拟原地应力,对比不同地应力差、压裂液、注入速率、注入液量等,分析各因素作用下的裂缝形态,对现场水力压裂施工参数予以优化^[45-48]。现有米级尺度是对 30 cm 级大物模实验的尺度放大,一定程度上弥补了大物模实现的尺度较小的问题。大物模和米级尺度水力压裂采用声发射监测监测裂缝扩

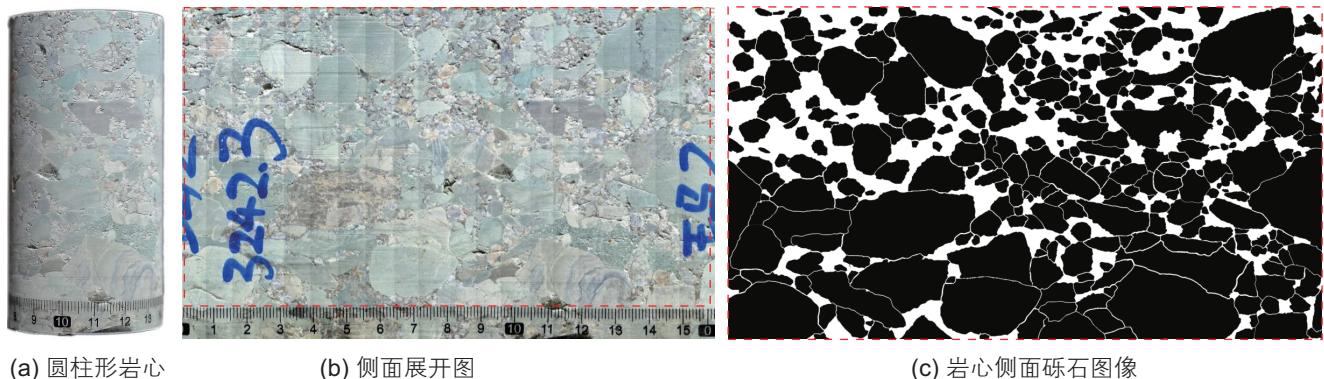


图 5 数字图像法分析砾石几何特征

Fig. 5 Analyzing the geometric characteristics of gravel using digital image method

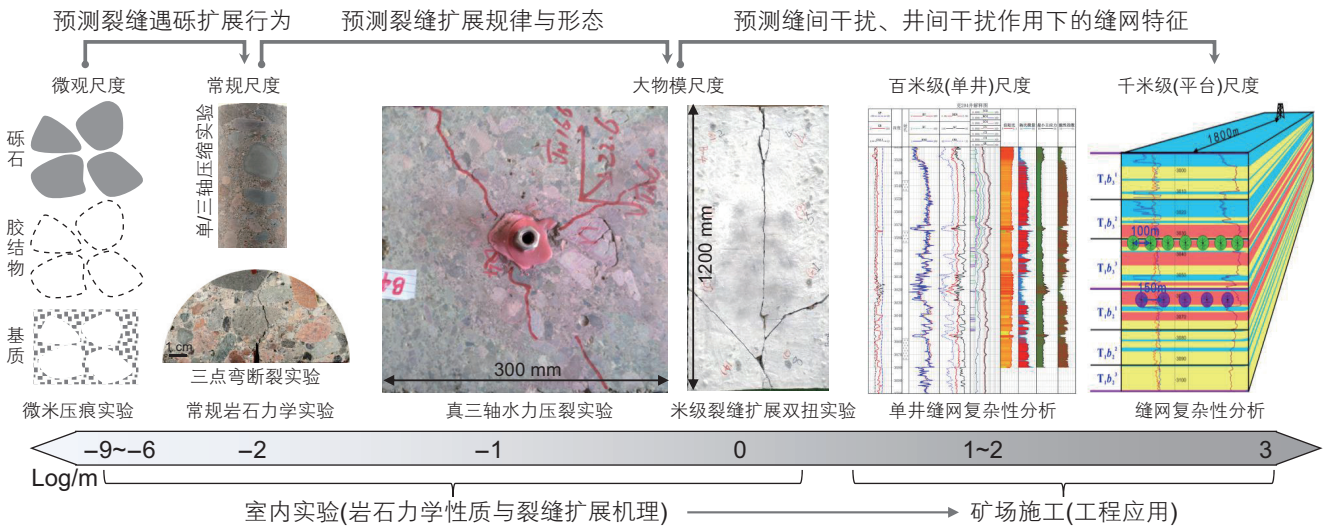


图6 砾岩岩石力学性质与裂缝扩展规律的多尺度研究方法

Fig. 6 Multiscale research method for mechanical properties and crack propagation law of conglomerate rocks

展过程,但是无法直观的裂缝扩展起裂、扩展、贯通全过程^[49]。我们通过调研发现双扭实验具有一定的优势,样品尺寸可升级到米级,且对设备要求较低。裂缝形成过程中样品表面的应变场可结合DIC在线测量,对于分析裂缝扩展过程和裂缝形态极具价值。

矿场尺度研究主要分为单井尺度和平台尺度。单井和平台分析方法较为相似,区别是平台需要考虑井间裂缝干扰问题。目前主要基于测井和录井资料分析井段沿程力学参数,来评估储层的裂缝形成潜力。压裂后裂缝形态评价需要结合多种分析方法。实验测试法有微地震监测、放射性元素示踪、井温测井、G函数分析等,目前已比较完善,可靠性较高。微地震反演结果具有较强的可视化效果,但计算结果误差较大,可信度还依赖于现场工程师的经验。其它实验测试法成本比较高,且测试结果裂缝的刻画并不直观。

2.3 尺度升级关键问题

综上所述,需着眼于砾岩颗粒复合带来的尺度效应,各研究尺度间如何关联是关键。从实验室的机理研究到工程应用,需要进行三次尺度升级(如图6所示)。第一次尺度升级以细观和常规尺度力学数据为基础,厘清砾岩力学性质与裂缝扩展的主控因素,形成力学参数预测和裂缝遇砾扩展行为理论模型,具体的需要考虑:①构成砾岩的砾石与杂基相对含量、尺寸、形状、取向和分布等;②砾石与杂基的力学性质;③砾石的拓扑特征,如砾石形态是随机还是定向排列分布;④砾石与砾石或砾石与杂基之间的胶结作用。基于这四个方面的细观力学数据,可采用等效介质理论

预测常规岩心测试获得的单轴抗压强度、弹性模量等水力压裂关键基础数据。第二次尺度升级以三点弯曲实验、大物模实验、米级尺度实验数据为基础,综合砾岩力学参数、遇砾扩展力学机理、单裂缝扩展规律,形成裂缝形态特征预测模型。在该升级过程中,需要结合三点弯实验数据,明确裂缝遇砾扩展行为,并以大物模水力压裂或米级拉伸裂缝扩展实验数据为基础,厘清砾岩中水力裂缝扩展的选择,形成计算裂缝起裂、扩展贯通形成宏观裂缝的两个断裂韧度参数的方法,预测裂缝的形态特征与关键参数。第三次尺度以前述两次尺度升级理论模型为基础,综合第二次尺度中的裂缝扩展数据、裂缝形态特征、矿场施工数据(如压裂曲线、微地震监测、光纤监测、示踪剂等各类数据,综合分析水力压裂起裂压力、缝网形态等),明确矿场中优化缝网复杂性和均匀性主控因素,优化压裂施工参数。

3 力学性质与与主控因素

3.1 力学参数与主控因素

砾石对砾岩力学性质的影响主要体现在砾石含量、尺寸、矿物成分、杂基与砾石的性质差异等方面。砾石粒径越大,砾岩的抗压强度和抗拉强度越低^[50-55]。单轴、三轴压缩实验和PFC(Particle Follow Code)数值模拟研究发现,砾石含量对砾岩的力学性质同样具有重要的影响^[17-20, 56]。随着砾石含量的增加,砾岩的弹性模量和抗压强度降低,而砾岩的塑性增强。杂基与砾石矿物成分也对砾岩的力学性质具有重要影响,胶

结越致密，砾岩的抗压强度越大。钙质胶结岩石强度总体高于泥质胶结，钙质含量的增加导致砾岩强度和断裂韧性的增加，而泥质含量的增加则会降低砾岩的抗压强度(如图 7 所示)^[14, 19, 55]。

砾石对砾岩力学性质的影响与砾石力学性质有关，高强度的砾石能够强化砾岩，提高砾岩强度^[54]。通过压入硬度和纳米压痕的方法对砾石与杂基的力学性质研究发现，砾岩的杂基和砾石在压入硬度、弹性模量和断裂韧度上存在较大差异^[17, 25, 50, 57]。砾石对裂缝的屏蔽作用与砾石与杂基强度差异有关，差异越大，屏蔽作用越强，易迫使裂缝绕砾扩展。

3.2 力学性质影响机理

砾岩中的砾石主要成分为火山岩，本身的力学强度较高，相比强度较低的杂基而言，砾岩不易变形和

破坏。二者强度的差异，导致在砾石和杂基胶结面上产生局部应力和局部应变，绕砾微裂纹孕育并最终宏观破坏。单轴压缩后岩样的CT扫描结果也证实了裂缝以绕砾为主，仅有极少量穿砾裂缝出现。裂缝形态呈现带状，且砾石含量越高，裂缝带越宽(如图 8 所示)^[17-18]。

随着围压的增加，砾岩有 3 种破裂模式：多条平行于轴向的裂缝(I类)，倾斜的裂缝带(II类)和砾石周围随机分布的砾缘缝(III类)。由于围压不同，第二种破裂模式可进一步细分为两种不同的破裂模式。在低围压下，裂缝带由岩石碎片和绕砾扩展的砾缘缝组成(II-1类)，属于碎片—砾缘缝型裂缝带；在中等围压条件下，裂缝带由砾石周围的砾缘缝组成，这些砾缘缝之间部分连通(II-2类)，属于砾缘缝型裂缝带。就总体形态而言，砾岩破裂产生的裂缝比均质岩石中的

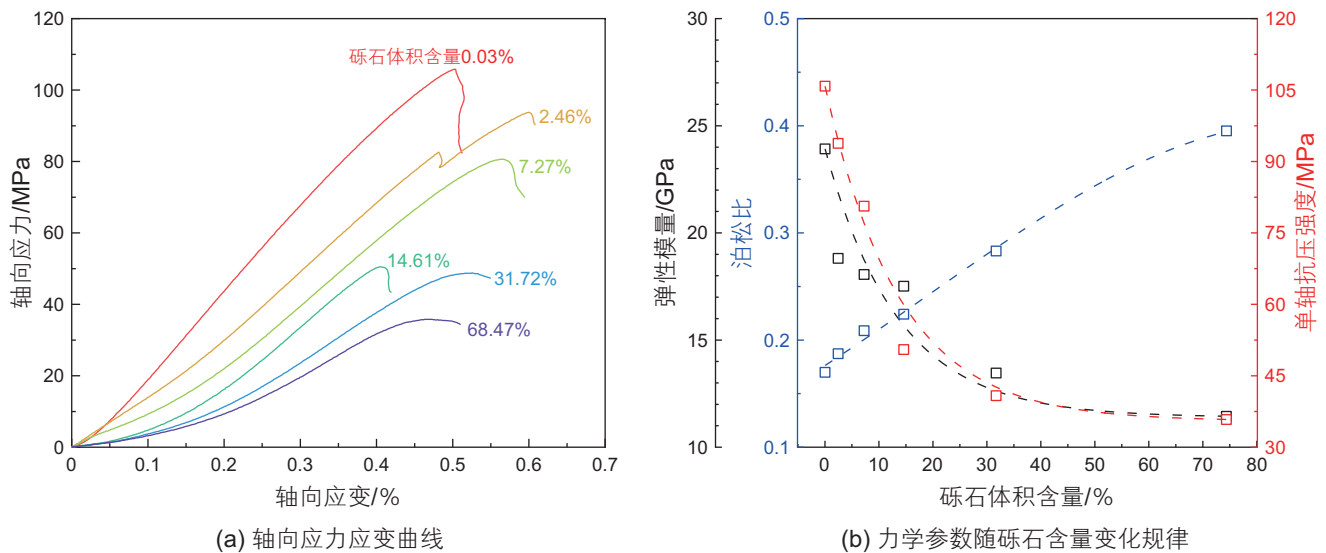


图 7 应力应变曲线和力学参数统计结果

Fig. 7 Stress-strain curves and statistical results of mechanical parameters

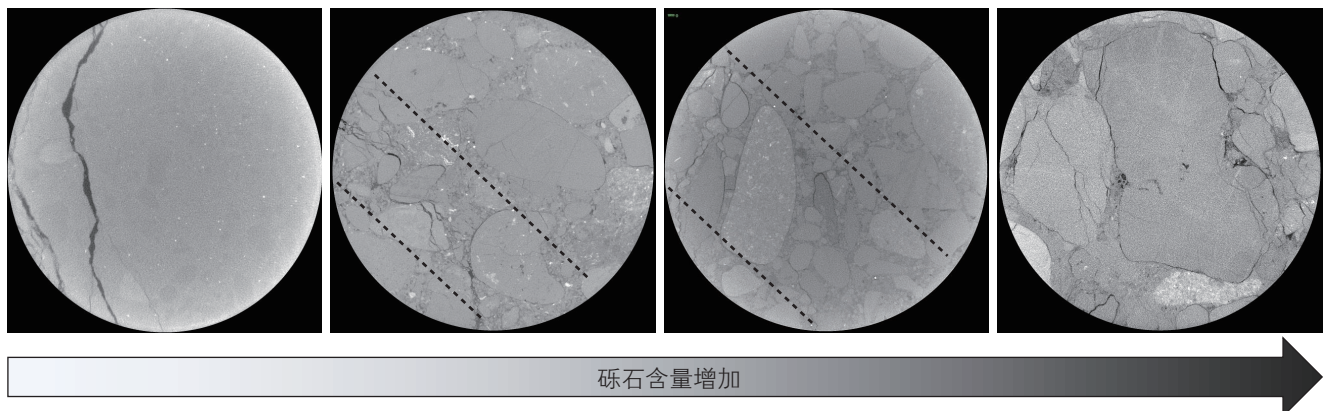


图 8 单轴压缩实验后样品横截面 CT 图像

Fig. 8 CT images of sample cross-section after uniaxial compression experiment

剪切破裂更为复杂(如图9所示)^[18, 58]。

3.3 力学参数预测方法

在为了预测岩石的力学参数, 学者们建立了大量的模型来解决这个问题。如基于岩石组分的Voigt模型、Reuss模型、Hill模型、Hashin-Shtrikman等平均模型。这一类模型以构成岩石的组分体积比、各组分力学性质为输入参数, 来预测岩石整体的力学参数^[59-65]。材料弹性模量的上限和下限通常根据Voigt并联模型和Reuss串联模型预测。Voigt并联模型基于材料的应变进行等效, 而Reuss串联模型则根据材料的应力进行等效, Hill证明这两个模型分别给出了复合材料弹性模量的上限和下限。由于考虑了组分之间的分布关系, 这类模型可以适用于不同夹杂含量的复合材料, 预测结果为一个范围^[66]。经常以上下限的形式给出, 无法给出预测值。

另一类方法考虑组分间的应力和应变的相互作用, 来预测宏观力学行为。如Eshelby等效夹杂理论、自洽方法、Mori-Tanaka方法、广义自洽方法、微分方法等^[57-76]。相较前一类方法, 具有一定的工程应用价值, 在复合材料领域得到了广泛应用。可以有效评估低夹杂复合材料的力学性质, 但通常要求夹杂含量低于30%, 甚至低于5%。在玛湖砾岩储层中, 多数砾岩的砾石含量都远高于此含量范围, 因而这类方法并不适用于砾岩储层, 需要探索高砾石含量下砾岩力学性质的预测模型。这类方法参数较多, 参数获取难度大, 目前以研究中经验获取为主。同时, 现有模型中未考虑到砾石和杂基胶结面为弱面的情况, 计算结果都不甚理想, 需要继续发展^[77-78]。

4 裂缝扩展规律与可压性评价

4.1 裂缝扩展规律

细粒砾岩和粗粒砾岩在裂缝扩展时表现出两种截然不同的规律^[79]。在细粒砾岩中, 裂缝主要受应力场控制, 而在粗粒砾岩地层中裂缝扩展时, 首先在砾石周围产生微裂缝, 然后裂缝聚集扩展, 并优先向砾石密集区延伸。如图10所示, 大量三点弯曲裂缝扩展实验也发现, 砾岩的裂缝扩展存在显著的过程区特征, 呈带状分布, 且与砾石粒径、含量、胶结类型相关^[16]。

通过真三轴水力压裂的大物模实验是掌握水力裂缝扩展规律的关键^[80]。砾岩储层的水力裂缝扩展规律较均质储层更复杂, 其裂缝形态不仅与地应力与施工参数有关, 还受到砾岩组分与结构特征影响^[55, 81]。杂基与砾石的力学性质差异越大, 砾石含量越高, 所形成的水力裂缝形态越复杂, 也越可能产生多个起裂点, 形成分支裂缝。在杂基与砾石的力学性质差异越大的砾岩储层中, 水力裂缝扩展的塑性特征越强。地应力对砾岩储层水力裂缝的扩展方向具有重要的控制作用。如图11所示, 随着砾石含量增加, 水力裂缝起裂随机性增加。裂缝扩展方向基本沿着垂直于最小水平地应力的方向, 但迂曲度随粒径增大而增加^[82-85]。注入排量对裂缝的复杂程度也有重要的影响, 随着注入排量的增加, 裂缝起裂点变少, 裂缝形态更简单。在砾岩细观结构对砾岩水力裂缝扩展的影响规律上, 通过真三轴水力压裂模拟实验获得的认识与通过三轴压缩实验和三点弯曲实验是相符合的。如图12所示, 基于非连续介质的离散元模拟研究获得了类似的认识。除此

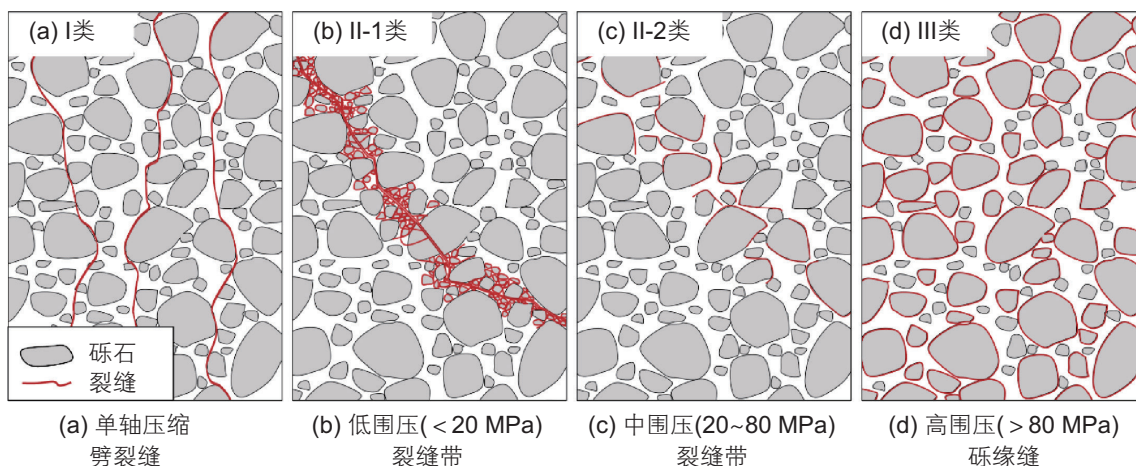


图9 不同围压下砾岩的破裂模式^[22]

Fig. 9 The fracture modes of conglomerate under different confining pressures^[22]

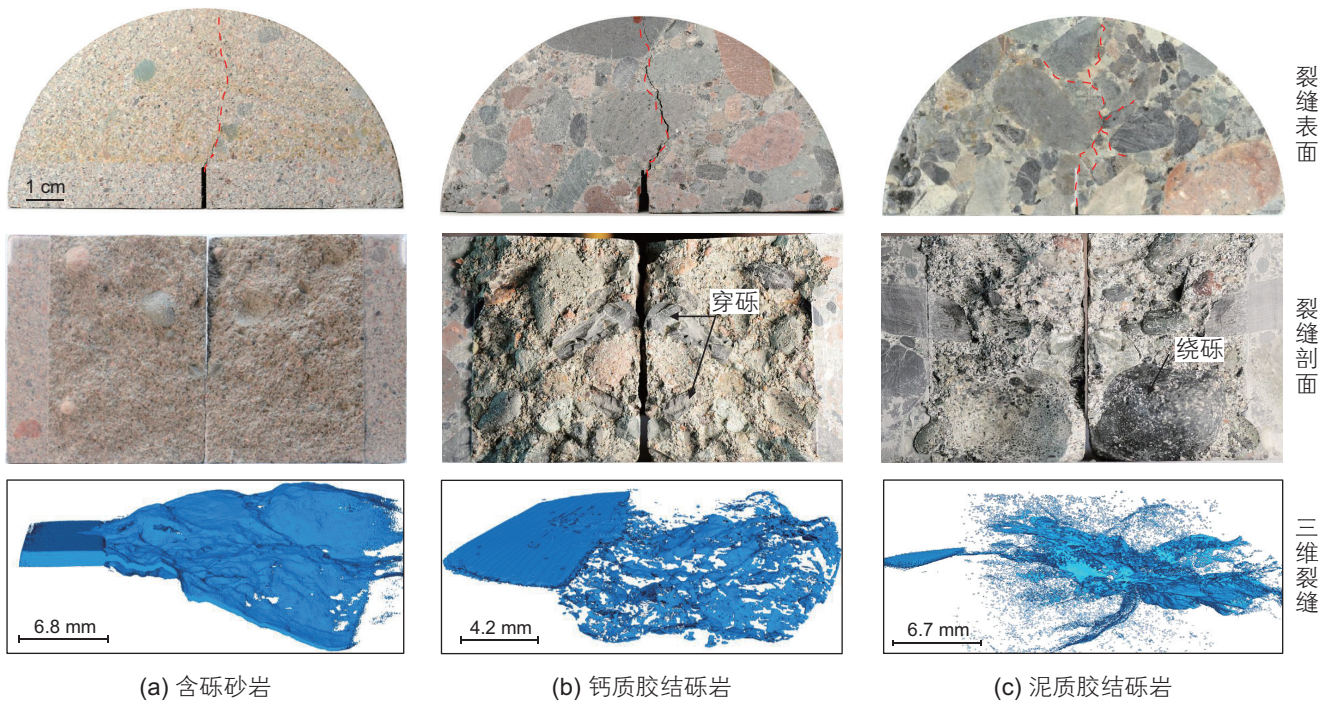


图 10 半圆盘三点弯曲实验裂缝照片

Fig. 10 Photos of cracks in the three-point bending experiment of a semi circular disk

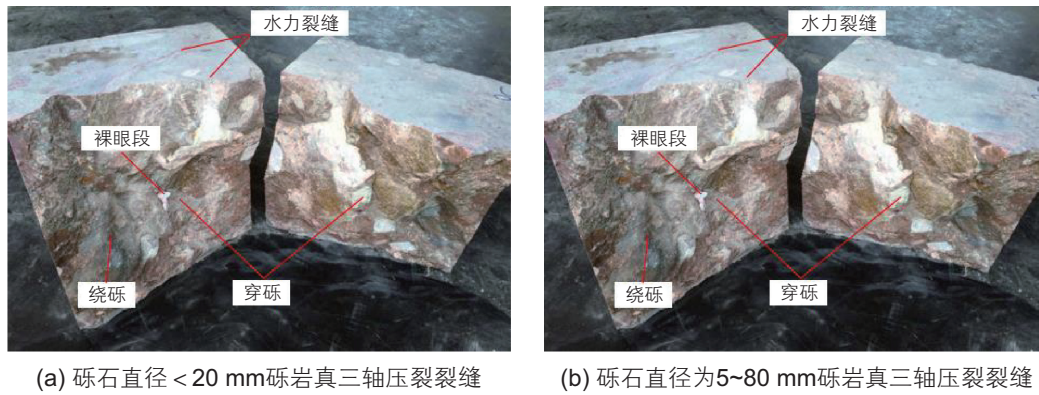


图 11 含不同粒径砾石的砾岩真三轴水力压裂裂缝形态^[47]

Fig. 11 Fracture morphology in true triaxial hydraulic fracturing experiment of conglomerate under different gravel sizes^[47]

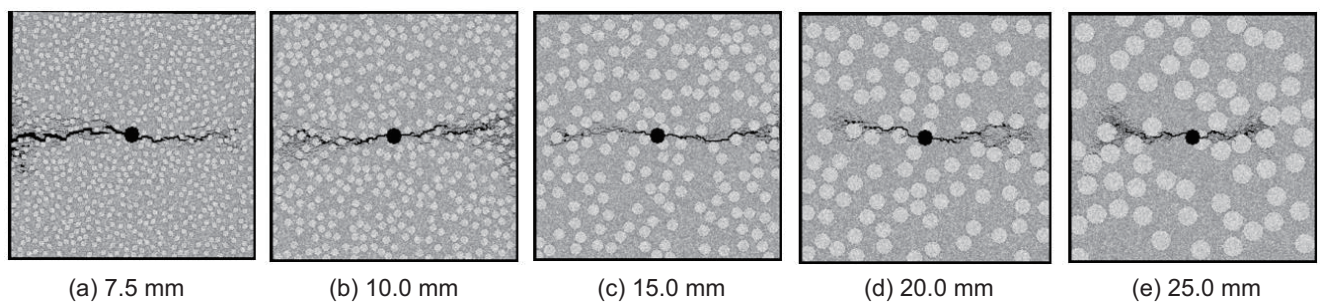


图 12 含不同粒径砾石模型的水力压裂裂纹扩展模式^[81]

Fig. 12 Numerically obtained fracturing propagation modes of samples under different gravel sizes^[81]

外发现，砾岩的裂缝起裂压力小于均质砂岩，随着砾石抗拉强度和弹性模量的增加，水力裂缝更倾向于沿

砾石周围扩展^[81,86]。

究其根本，砾岩的裂缝的遇砾扩展行为是导致裂

缝扩展的核心问题。首先,砾岩在受到外部施加应力后,砾石与杂基的变形并不完全同步,导致砾石与杂基间存在较大的形变差异而产生微裂缝。其次,砾石与杂基的胶结面往往是弱面,易被拉伸或剪切而破坏。所以,在裂缝形成的起裂阶段,存在止裂、绕砾、穿砾和被砾石吸附4种裂缝遇砾行为,形成了大量微裂缝。受不同遇砾行为影响,微裂缝贯通形成的宏观主裂缝迂曲度差异较大。

从形成过程可知,决定裂缝形态的关键因素有地应力、砾石含量、砾石粒径、砾石与杂基力学性质、砾石与杂基胶结强度等。储层应力差越大,裂缝在最大主应力方向的选择性更强,易穿砾沿着最大主应力方向扩展。在应力差较小时,粒径较大的砾石对裂缝扩展路径干扰,裂缝易在砾缘分叉扩展。砾石含量越高(粒径越大),裂缝尖端应变场不同于细粒均质岩石只有一个能量释放率奇异点,裂缝尖端存在多个能量释放率奇异点,裂缝形态分叉且复杂。砾石和杂基的力学性质差异越大,砾石与杂基的胶结强度越低,裂缝形态也出现的分叉更多,裂缝也越复杂。裂缝尖端的分叉也导致破裂压力较高,这些现象也在水力压裂施工中得到验证^[20, 87]。

4.2 现场水力裂缝扩展规律

砾岩储层的水力压裂曲线也反映出了砾岩裂缝扩展具有特殊性。与页岩不同,在提排量阶段,施工压力与时间的关系并非非线性^[44-47, 88-93]。砾岩压力提升阶段的非线性也反映了裂缝起裂的特征(如图13所示)。裂缝在起裂过程中,遇到砾石后,引起裂缝尖端形成砾缘的微裂缝带,裂缝钝化增宽,导致了非线性的现象^[23]。裂缝在延伸阶段,随着压裂液持续注入达到破

裂压力时,裂缝绕过砾石再向前延伸,如此反复,施工压力多次波动^[12, 94]。玛131井区的施工效果来看,砾石直径越大,非线性越明显,裂缝延伸阶段的压力波动越剧烈^[54, 95-96]。同时,在相同的水平主应力差时,粒径越大,施工压力也越大(如图14所示)^[11, 55]。

裂缝形态与加砂效率也与砾石相关。裂缝在扩展延伸时遇大粒径砾石发生偏转,由于粒径较大所以裂缝偏转距离较远,并且出现分支裂缝,增加了裂缝复杂程度。受砾石影响,裂缝较窄且迂曲度大,极易产生砂堵现象,需要优化加砂对策。水力压裂裂缝的形态与地应力、砾石(粒径、形态、含量、强度)、砾石与杂基胶结、压裂液等相关^[12, 21]。水平主应力差越小,水力裂缝遇砾转向越明显。砾石含量和粒径越大,分支裂缝越多,主裂缝迂曲度越大^[22, 55]。砾石强度的增加也增大了裂缝迂曲度和转向概率。砾石与杂基胶结面强度增加,水力裂缝明显变短,并难以转向。施工方面主要与压裂液性能相关,压裂液粘度的增加导致裂缝长度的增加和裂缝穿过砾石的偏转概率增大。

4.3 裂缝扩展理论

裂缝形成过程包括微裂缝起裂、微裂缝连通、形成宏观裂缝3个阶段,裂缝形成过程较长。裂缝的最终结果也显示,微裂缝与主裂缝同时发育,裂缝整体具有带状特征^[97]。自1920年Griffith提出裂缝扩展理论以来,针对不同的问题提出了线弹性断裂力学和非线性断裂力学。针对强非均质材料的非线性断裂问题,大量模型可供参考。虚拟裂缝模型由Hillerborg在1976年提出,其思想是把裂缝等效为两部分:完全裂开的真实裂缝区(无法提供拉应力)和微裂区的虚拟裂缝区(依然可以提供拉应力)^[98]。虚拟裂缝模型

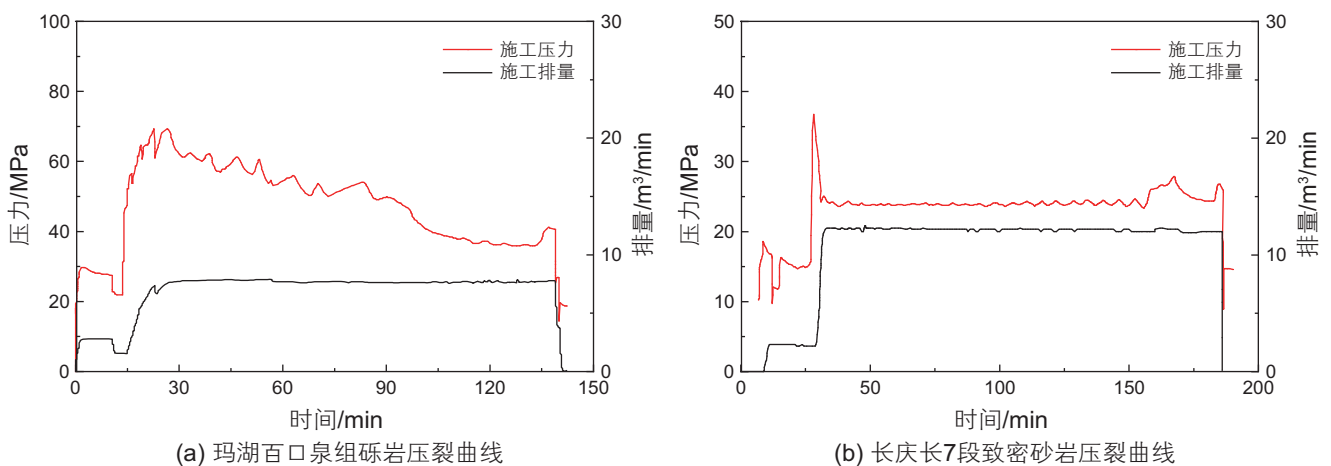


图13 不同储层的代表性压裂曲线

Fig. 13 Representative fracturing curves for different reservoirs

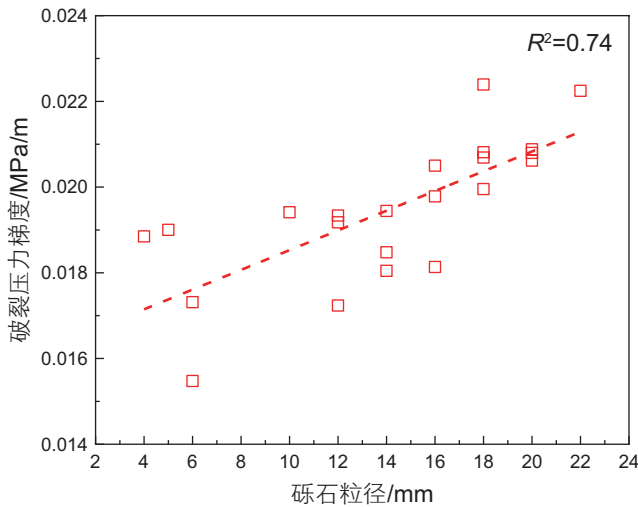


图 14 玛 131 井区砾岩储层破裂压力梯度与砾石粒径关系
Fig. 14 Relationship between fracture pressure gradient and gravel particle size of conglomerate reservoir in Ma 131 Well Area

借助断裂过程区消除缝尖应力的奇异性，该模型可以描述裂缝由微缝向宏观缝发展的全过程。但是存在过程区为线性和无法获得解析解的问题。裂缝带模型由 Bazant 在 1983 年提出，他认为断裂能弥散于表征裂缝的破裂带宽度范围内，并认为裂缝扩展过程是破裂带区域扩展的过程，参数的获取存在较大的难度，同时也无法获得解析解^[99]。两参数模型认为，在裂缝发展达到临界状态时，裂缝尖端强度因子达到材料断裂韧度，且裂缝尖端张开位移同时达到临界裂缝尖端张开位移^[100]。因此，两参数模型的两个控制参数是断裂韧度和临界裂缝尖端张开位移。两参数模型从断裂韧

度和缝面分开位移两个角度判断裂缝扩展的条件，考虑了断裂过程区粘聚力的作用，物理意义明确，判据简单。在两参数模型思路的基础上，结合粘聚裂缝模型和等效弹性裂缝模型提出，徐世烺提出了双 K 断裂准则^[101]。双 K 断裂准则利用起裂断裂韧度和失稳断裂韧度两个参数描述混凝土的断裂过程。混凝土缝尖应力强度在起裂断裂韧度之前，混凝土不发生断裂，以弹性变形为特征；达到起裂断裂韧度时，裂缝开始稳定扩展，并且在达到失稳韧度之前都处于裂缝稳定扩展阶段；达到失稳断裂韧度时，混凝土开始失稳扩展(如图 15 所示)。这些理论模型对于砾岩的研究极具参考价值。

从现有研究可以得出，水力压裂通常关注的是宏观大尺度裂缝扩展问题。但是砾岩不同于常见的均匀岩石，其裂缝扩展过程和最终形态，与细观力学相关的两个问题尤为关键：受砾石几何特征和细观力学性质控制的裂缝带区域，与起裂断裂韧度相关(对应起裂压力)；受砾石与杂基胶结面剥离后形成的主裂缝区域，由失稳断裂韧度控制(对应破裂压力)。必须掌握细观力学特征对宏观裂缝的影响规律，并基于此建立裂缝扩展力学模型，才能为水力压裂服务。既然砾岩的裂缝扩展存在起裂和失稳两个部分，可使用双 K 断裂准则似乎可以解决这个问题。结合砾岩特征参数，实现水力压裂裂缝的理论表征。

4.4 可压性评价方法

为了评价储层可压性，国内外提出了数十种方法，用以预测储层形成复杂缝网的潜力^[102-104]。这些方法

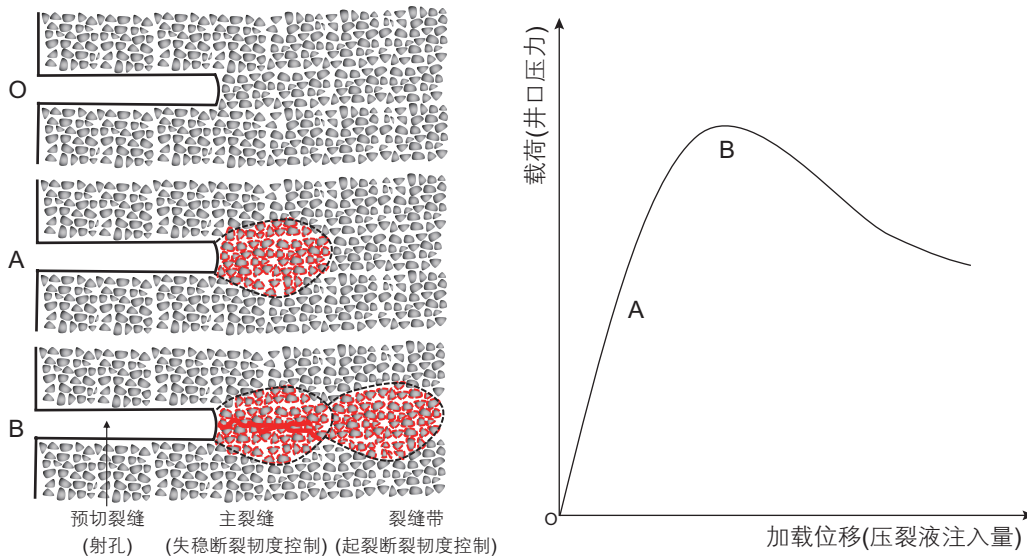


图 15 砾岩裂缝扩展过程示意图
Fig. 15 Diagram of conglomerate fracture process

共有 5 类：矿物成分法、弹性参数法、强度参数法、能量法。矿物成分法由 Jarvie 在 2007 年基于 Barnett 页岩提出，认为脆性矿物的含量决定了岩石的脆性特征，以此来表征页岩的可压性^[105]。该方法简单易操作，使用较为广泛。Rickman 在 2008 年通过大量数据统计发现，弹性模量和泊松比与岩石的脆性密切相关，提出了弹性参数法。采用测井数据容易获取到这两参数，所以该方法在工程实践中使用最为广泛^[106]。Hucka 在 1974 年提出的基于岩石单轴抗压强度和单轴抗拉强度的脆性评价方法，也为非常规油气的开发提供了一种新的思路^[107]。在此基础上，袁俊亮等人结合了断裂韧度提出了新型的可压性评价方法^[108]。能量法是基于应力—应变曲线进行评价，该理论认为岩石的断裂能包括了压缩阶段积累的弹性能和外部额外提供的能量，以额外能量的多寡评价岩石的脆性程度，理想脆性材料额外能量近乎为 0，相应的岩石可压性好^[109]。

根据现有应力应变曲线的评价方法得出砾岩塑性较强的结论，但其本质是大量砾缘微裂缝的发育，导致宏观上体现出较大的变形，塑性较强，可压性较低。但是，砾缘微裂缝依然可提高储层渗透性，对可压性来讲是有益的。这个矛盾的核心是，砾石与杂基力学差异大，砾岩非均质性强，不能按照现有均质岩石的评价方法。需要构建考虑岩石组构特征和细观力学性

质的可压性评价新方法，以适应砾岩的特殊性。为此，解决砾岩可压性评价的关键是地质工程一体化^[103]。砾岩的裂缝扩展与其组构特征密切相关，可压性评价的基础是对其储层地质特性的认识。地质甜点既需要按照传统的含油性进行评价，还需要考虑矿物组分、砾石与杂基配比、砾石几何特征、地应力等，也需要甜点分类。工程甜点要考虑以上因素对水力压裂缝网形成的影响，以及如排量、压裂液类型等施工参数的影响。结合两方面的可压性评价是实现优质储层筛选的基础^[110-111]。

4.5 压裂参数与工艺方案优化进展

玛湖地区百口泉组储层天然裂缝不发育，岩石偏塑性，水平两向应力差较大，特别是砾石含量比较高的储层，水力压裂微裂缝(分支裂缝)发育，但裂缝延伸距离不足，改造规模小^[112-116]。在工程实际中采用了小井距、小簇间距密切割压裂工艺，抑制主缝过度扩展，增强了缝间的应力干扰作用，迫使裂缝转向促生分支缝，增大改造效率。压裂液采用高黏度材料，减小砾缘微裂缝导致的滤失现象，提高缝内净压力。同时增加压裂液排量以增大缝宽，以减小绕砾迂曲出现砂堵的概率^[24]。以玛 131 井区为例，如图 16 所示微地震监测结果显示，采用该工艺后缝网复杂性增加。

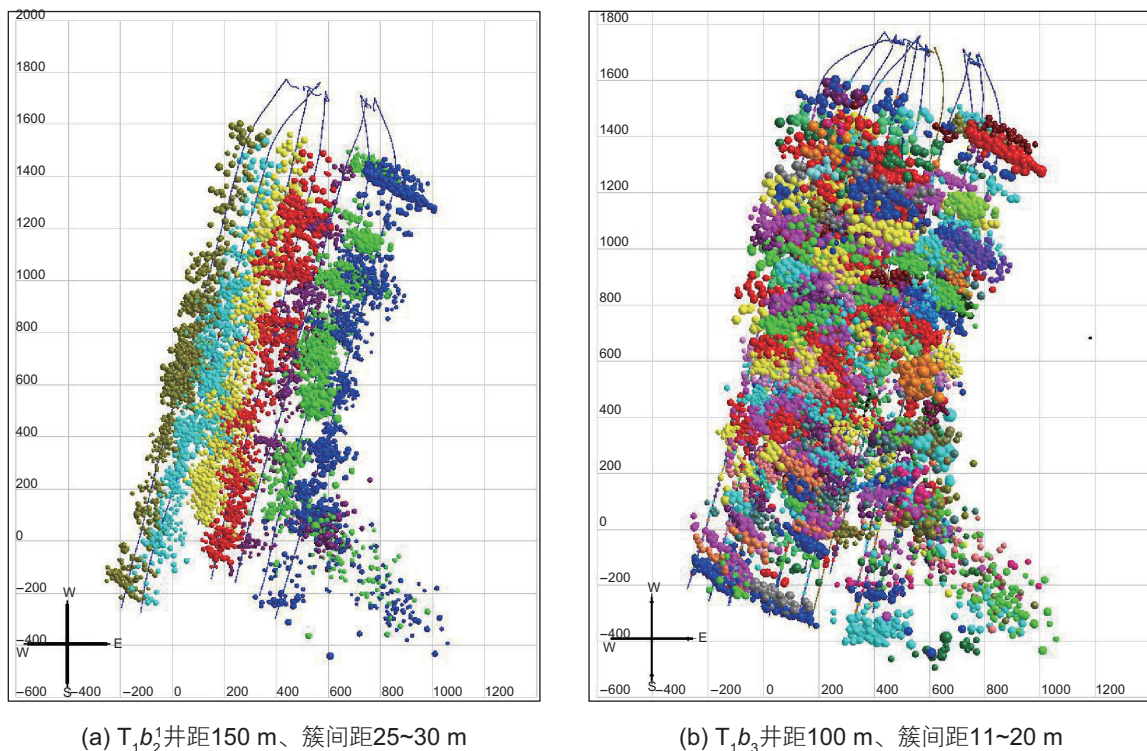


图 16 玛 131 井区压裂施工微地震评价缝网效果

Fig. 16 Microseismic evaluation of fracture network effect during fracturing construction in Ma 131 well area

随着压裂缝的簇间距逐渐缩小,产量逐渐上升:平均簇间距由30 m降至11 m,300天平均累计产油增加37.5%^[103]。因此,小井距、小簇间距、高黏、高排量是提高砾岩储层改造效率的关键技术措施,可在砾岩储层压裂施工中推广。

5 结论与展望

综合现有研究和水力压裂施工资料来看,砾岩储层的水力压裂理论体系的研究存在5方面难题:①砾岩储层的分类存在地质分类与工程力学性质分类的脱节,需要地质工程一体化优化分类方案;②砾岩储层岩石力学测试方法需要完善,以满足水力裂缝扩展的多尺度特征研究需求;③砾岩力学性质与裂缝扩展规律受到砾石含量、粒径、组分与胶结差异等影响,岩石变形与裂缝扩展机理的阐述不够深入,需发展新理论实现准确表征;④现有可压性评价方法是基于较为均匀的页岩提出来的,应用于强非均质砾岩难以适应;⑤砾岩储层受快速沉积影响,岩相变化快,层间、井间储层间差异大,压裂对策缺乏针对性。因此,需要探究实验测试新方法、裂缝扩展新理论、可压性评价新方法、水力压裂新工艺,以系统解决严重制约砾岩储层开发效率的瓶颈问题。具体包括以下解决思路:

(1)砾岩组分与结构特征的刻画是其一切力学研

究的基础工作,需结合XRF、SEM、XRD、CT和数字图像等多种分析方法,掌握砾岩组分(如砾石粒径、含量、形状、分选性、矿物成分)和结构特征(如支撑模式、胶结类型),并结合岩石力学特征进行储层分类,实现地质工程一体化。

(2)构建细观尺度、常规尺度、大物模尺度、米级尺度、矿场尺度的多尺度分析方法,并形成细观向常规、常规向大物模和米级、米级向矿场的三次尺度升级理论,在揭示裂缝起裂、扩展、失稳动态动态全过程的基础上,厘清控制裂缝起裂压力和形态特征的关键参数。

(3)可参考双 K 非线性断裂力学理论,基于砾岩组构特征与各尺度力学参数分析缝尖遇砾行为,建立裂缝起裂断裂韧度和失稳断裂韧度计算方法,以起裂和扩展两个参数共同构成适用于砾岩储层的裂缝扩展力学模型,以预测水力压裂裂缝形态和破裂压力。

(4)结合水力压裂施工实际效果,考虑砾岩组构特征与多尺度力学参数,分析砾岩储层控制砾岩储层缝网复杂性的关键参数,构建裂缝形态复杂性的定量评价方法,为储层的可压性评价提供新方法。

(5)针对不同砾岩储层的缝网扩展和支撑剂铺置规律,以造长主缝、减少滤失、防止砂堵为目标,小井距、小簇间距、高黏、高排量是提高砾岩储层改造效率的关键技术措施,以提高水力压裂施工效果。

参考文献

- [1] 边会媛,韩博华,王飞,等.柴北缘牛东地区砂砾岩储层特征及分类评价[J].西安科技大学学报,2020,40(5):148-155.[BIAN H Y, HAN B H, WANG F, et al. Characteristics and classification evaluation of sandstone and conglomerate reservoirs in the Niudong Area of the Northern Margin of Qaidam Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(5): 148-155.]
- [2] 陈海峰,王凤启,王民.徐家围子断陷沙河子组致密砂砾岩气藏特征与资源潜力[J].中南大学学报:自然科学版,2018,49(1):141-149.[CHEN H F, WANG F Q, WANG M. Characteristics and resource potential of tight sandstone and conglomerate gas reservoirs in the Shahezi Formation of the Xujiaweizi Fault Depression[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2018, 49(1): 141-149.]
- [3] 国建英,齐雪宁,侯连华,等.渤海湾盆地特低渗—致密砂(砾)岩天然气成因及成藏模式[J].天然气地球科学,2022,33(2):181-194.[GUO J, QI X N, HOU L H, et al. Origin and reservoir forming model of ultra-low permeability tight sandstone(conglomerate) gas in Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(2): 181-194.]
- [4] 南洋宇,谭茂金,张延华,等.元坝须三段致密含钙砂砾岩地层测井响应特征及岩性识别方法[J].科学技术与工程,2021,21(3):969-978.[NAN Z Y, TAN M J, ZHANG Y H, et al. Logging response characteristics and lithological identification method of dense calcium bearing sand conglomerate formation in the Xusan Formation of Yuanba[J]. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(3): 969-978.]
- [5] 田立新,施和生,刘杰,等.珠江口盆地惠州凹陷新领域勘探重大发现及意义[J].中国石油勘探,2020,25(4):22-30.[TIAN L X, SHI H S, LIU J, et al. Significant discovery and significance of new field exploration in Huizhou Sag, the pearl river mouth basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(4): 22-30.]
- [6] 袁玉哲,罗家群,朱颜,等.南襄盆地泌阳凹陷和南阳凹陷油气勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2021,42(3):364-373.[YUAN Y Z, LUO J Q, ZHU Y, et al. Exploration history and enlightenment of oil and gas in biyang depression and Nanyang Depression of Nanxiang Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3): 364-373.]

- [7] 赵贤正, 降栓奇, 淡伟宁, 等. 二连盆地阿尔凹陷石油地质特征研究[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(1): 12–17. [ZHAO X Z, JIANG S Q, DAN W N, et al. A study on the petroleum geological characteristics of the Al Depression in the Erlian Basin[J]. Lithological oil and gas reservoirs, 2010, 22(1): 12–17.]
- [8] 匡立春, 吕焕通, 齐雪峰, 等. 准噶尔盆地岩性油气藏勘探成果和方向[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 32–37. [KUANG L C, LV H T, QI X F, et al. Exploration results and direction of lithologic reservoirs in the Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 32–37.]
- [9] 唐勇, 郭文建, 王霞田, 等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 127–137. [TANG Y, GUO W J, WANG X T, et al. New breakthroughs and revelations in exploration of conglomerates in Mahu Depression[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 127–137.]
- [10] 杜洪凌, 许江文, 李岫, 等. 新疆油田致密砂砾岩油藏效益开发的发展与深化——地质工程一体化在玛湖地区的实践与思考[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(2): 15–26. [DU H L, XU J W, LI Y, et al. Development and deepening of benefit development of tight glutenite reservoirs in Xinjiang Oilfield – practice and thinking of geoprofessions geological engineering integration in Mahu Area[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 15–26.]
- [11] 刘涛, 石善志, 郑子君, 等. 地质工程一体化在玛湖凹陷致密砂砾岩水平井开发中的实践[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(2): 90–103. [LIU T, SHI S Z, ZHENG Z J, et al. Practice of geoprofessions geological engineering integration in the development of tight glutenite horizontal wells in Mahu Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 90–103.]
- [12] RUI Z, GUO T, FENG Q, et al. Influence of gravel on the propagation pattern of hydraulic fracture in the glutenite reservoir[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 165(627–639).
- [13] 许江文, 李建民, 邹元月, 等. 玛湖致密砾岩油藏水平井体积压裂技术探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 241–249. [XU J W, LI J M, WU Y Y, et al. Exploration and practice of Horizontal Well Volume Fracturing Technology in Mahu Tight Conglomerate Reservoir[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 241–249.]
- [14] 孟庆彬. 极弱胶结岩体结构与力学特性及本构模型研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社有限责任公司, 2018. [MENG Q B. Mechanical properties and constitutive model of extremely weak cemented rock mass[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press Co., Ltd., 2018.]
- [15] 张昌民, 王绪龙, 朱锐, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组岩石相划分[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(5): 604–614. [ZHANG C M, WANG X L, ZHU R, et al. Lithofacies division of Baikouquan Formation in Mahu Sag, the Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(5): 604–614.]
- [16] LIU J, GE H, ZHANG Z, et al. Influence of mechanical contrast between the matrix and gravel on fracture propagation of glutenite[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208(109639).
- [17] WANG J, GE H, LIU J, et al. Effects of gravel size and content on the mechanical properties of conglomerate[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(4): 2493–2502.
- [18] LI J, DUAN K, MENG H, et al. On the mechanical properties and failure mechanism of conglomerate specimens subjected to triaxial compression tests[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(2): 973–995.
- [19] ZHANG Z X, GE H K, WANG J B, et al. Influence of gravel content and cement on conglomerate fracture[J]. Petroleum Science, 2023, 20(3): 1724–1741.
- [20] LUO S, GE H, WANG J, et al. Numerical simulation study on the crack propagation of conglomerate[J]. Royal Society Open Science, 2021, 8(7): 202178–202191.
- [21] 李国欣, 覃建华, 鲜成钢, 等. 致密砾岩油田高效开发理论认识关键技术与实践——以准噶尔盆地玛湖油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1185–1197. [LI G X, QIN J H, XIAN C G, et al. Key technology and practice of efficient development theory of tight conglomerate oilfield – take Mahu Oilfield in the Junggar Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1185–1197.]
- [22] LIU J, WANG J, GE H, et al. Effect of gravel on rock failure in glutenite reservoirs under different confining pressures[J]. Petroleum Science, 2023, 20(5): 3022–3036.
- [23] 唐慧莹, 梁海鹏, 张烈辉, 等. 砾岩储层水力裂缝扩展形态及影响因素[J]. 石油学报, 2022, 43(6): 871–884. [TANG H Y, LIANG H P, ZHANG L H, et al. The morphology and influencing factors of hydraulic fracture propagation in conglomerate reservoirs[J]. Journal of Petroleum, 2022, 43(6): 871–884.]
- [24] 臧传贞, 姜汉桥, 石善志, 等. 基于射孔成像监测的多簇裂缝均匀起裂程度分析——以准噶尔盆地玛湖凹陷致密砾岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 394–402. [ZANG C Z, JIANG H Q, SHI S Z, et al. Analysis of uniform fracture initiation degree of multiple clusters of fractures based on perforation imaging monitoring: a case study of tight conglomerate in Mahu Sag, the Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 394–402.]
- [25] 张兆鹏, 张士诚, 石善志, 等. 基于纳米压痕实验和均匀化方法评价砾岩多尺度力学性质——以玛湖凹陷南斜坡致密砾岩储层为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 926–940. [ZHANG Z P, ZHANG S C, SHI S Z, et al. Evaluation of Multi-scale mechanical

- properties of conglomerate based on nanoindentation experiments and homogenization methods: Taking the dense conglomerate reservoir on the southern slope of Mahu Depression as an example[J]. *Journal of Rock mechanics and Engineering*, 2022, 41(5): 926–940.]
- [26] 金爱民, 高兴友, 楼章华, 等. 准噶尔盆地玛湖—盆 1 井西复合含油气系统侏罗系地下水动力场的形成与演化[J]. *地质科学*, 2006, 41(4): 549–563. [JIN A M, GAO X Y, LOU Z H, et al. Formation and evolution of Jurassic Groundwater Dynamic Field of Mahu Basin 1 Well West composite petroleum system in the Junggar Basin[J]. *Geological Sciences*, 2006, 41(4): 549–563.]
- [27] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区三叠系百口泉组扇控大面积岩性油藏勘探实践[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(6): 14–23. [KUANG L C, TANG Y, LEI D W, et al. Exploration practice of fan controlled large-area lithologic oil reservoir in Triassic Baikouquan formation in Slope Area of Mahu Sag, the Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(6): 14–23.]
- [28] 袁晓光. 玛湖北斜坡区三叠系百口泉组砂砾岩储层特征研究[D]. 武汉: 长江大学, 2016. [YUAN X G. Study on the characteristics of sandstone and conglomerate reservoirs in the Baikouquan Formation of the Triassic System in the Ma Hubei Slope Area[D]. Wuhan: Yangtze University, 2016.]
- [29] 王晓辉. 准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系百口泉组储层特征研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016. [WANG X H. Research on reservoir characteristics of Triassic Baikouquan Formation in Mahu Sag, the Junggar Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.]
- [30] 冯有良, 吴河勇, 刘文龙. 徐家围子断陷下白垩统营城组四段层序地层与沉积体系发育特征[J]. *沉积学报*, 2011, 29(5): 889–905. [FENG Y L, WU H Y, LIU W L. Sequence stratigraphy and sedimentary system development characteristics of the fourth member of the Lower Cretaceous Yingcheng Formation in the Xujiaweizi Fault Depression[J]. *Journal of Sedimentation*, 2011, 29(5): 889–905.]
- [31] 滕卫卫, 王辉. 玛湖凹陷西部斜坡区二叠系乌尔禾组厚层砂砾岩沉积相及储层特征[J]. *新疆地质*, 2021, 39(1): 99–103. [TENG W W, WANG H. Sedimentary facies and reservoir characteristics of thick sandstone and gravel in the western slope area of Mahu Depression, Permian Wuerhe Formation[J]. *Xinjiang Geology*, 2021, 39(1): 99–103.]
- [32] HUBBARD S M, ROMANS B W, GRAHAM S A. Deep - water foreland basin deposits of the Cerro Toro Formation, Magallanes basin, Chile: architectural elements of a sinuous basin axial channel belt[J]. *Sedimentology*, 2008, 55(5): 1333–1359.
- [33] 南策文. 非均质材料物理: 显微结构-性能关联[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [NAN C W. Heterogeneous material physics: Microstructural performance correlation[M]. Beijing: Science Press, 2005.]
- [34] 陈红, 唐立模, 陈珺, 等. 基于 RGB 图像的泥沙颗粒粒径测试技术研究[J]. *泥沙研究*, 2015, 1): 25–29. [CHEN H, TANG L M, CHEN J, et al. Research on sediment particle size testing technology based on RGB images[J]. *Sediment Research*, 2015, 1): 25–29.]
- [35] 于庆磊, 唐春安, 唐世斌. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术及初步应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3): 551–559. [YU Q L, TANG C A, TANG S B. The characterization technology of rock heterogeneity based on digital images and its preliminary application[J]. *Journal of Rock mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 551–559.]
- [36] 周健, 余荣传, 贾敏才. 基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(12): 2047–2052. [ZHOU J, YU R C, JIA M C. Measurement of microstructure parameters in sand model experiments based on digital image technology[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(12): 2047–2052.]
- [37] 朱万成, 康玉梅, 杨天鸿, 等. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术在流固耦合分析中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(12): 2087–2091. [ZHU W C, KANG Y M, YANG T H, et al. Application of digital image based rock heterogeneity characterization technology in Fluid-structure interaction analysis[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(12): 2087–2091.]
- [38] LIU J, GE H, MOU S, et al. Characterization of meso-structure of glutenite reservoirs by ultrasonic characteristics and the velocity heterogeneity[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208(B): 109436.
- [39] 陈平, 韩强, 马天寿, 等. 基于微米压痕实验研究页岩力学特性[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 662–670. [CHEN P, HAN Q, MA T S, et al. Research on mechanical properties of shale based on microindentation experiment[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 662–670.]
- [40] 董力琿. 基于微米压痕的页岩软化特性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. [DONG L H. Research on the softening characteristics of shale based on micro indentation[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.]
- [41] 刘圣鑫, 王宗秀, 张林炎, 等. 基于纳米压痕的页岩微观力学性质分析[J]. *实验力学*, 2018, 33(6): 957–968. [LIU S X, WANG Z X, ZHANG L Y, et al. Analysis of micro mechanical properties of shale based on nanoindentation[J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 33(6): 957–968.]
- [42] 时贤, 蒋恕, 卢双舫, 等. 利用纳米压痕实验研究层理性页岩岩石力学性质——以渝东南酉阳地区下志留统龙马溪组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(1): 155–164. [SHI X, JIANG S, LU S F, et al. Study on mechanical properties of rock mechanics of bedded shale by nano indentation experiment[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 155–164.]
- [43] 张婧茹, 闫伟, 王剑波, 等. 砾石级配参数对砾岩力学性质和裂缝扩展规律的影响[J]. *石油科学通报*, 2024, 9(5): 798–807. [ZHANG J R, YAN W, WANG J B, et al. The influence of gravel grading parameters on the mechanical properties and crack propagation laws of gravel[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2024, 9(5): 798–807.]
- [44] 宫兆波, 寇根, 周伟, 等. 砾岩胶结强度测试装置及方法[P]. 北京: CN201910369299.0, 2021–03–09. [GONG Z B, KOU G, ZHOU

- W, et al. Testing device and method for bond strength of conglomerate[P]. Beijing: CN201901369299.02021-03-09.]
- [45] 蔡峰, 于鹏, 马衍坤, 等. 砂砾岩油气储层水力压裂强化增透裂隙扩展特性试验研究[J/OL]. 岩土力学, 2019, (6): 1-8. [CAI F, YU P, MA Y K, et al. Experimental study on fracture propagation characteristics of enhanced fracking in glutenite oil and gas reservoirs[J]. Soil mechanics, June 2019, (6): 1-8.]
- [46] 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. Simulation and analysis of large-scale true triaxial fracking[J]. Journal of Rock mechanics and Engineering, 2000(S1): 868-872.]
- [47] 李宁, 张士诚, 马新仿, 等. 砂砾岩储层水力裂缝扩展规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2383-2392. [LI N, ZHANG S C, MA X F, et al. Experimental study on the expansion law of hydraulic fractures in sandstone reservoirs[J]. Journal of Rock mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2383-2392.]
- [48] JU Y, CHEN J, WANG Y, et al. Numerical analysis of hydrofracturing behaviors and mechanisms of heterogeneous reservoir glutenite, using the continuum - based discrete element method while considering hydromechanical coupling and leak - off effects[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(5): 3621-3644.
- [49] 付海峰, 才博, 修乃岭, 等. 含层理储层水力压裂缝高延伸规律及现场监测[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(11): 1610-1621. [FU H F, CAI B, XIU N L, et al. High extension law and field monitoring of hydraulic fracturing in bedded reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(11): 1610-1621.]
- [50] 刘向君, 熊健, 梁利喜, 等. 玛湖凹陷百口泉组砂砾岩储集层岩石力学特征与裂缝扩展机理[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 83-91. [LIU X J, XIONG J, LIANG L X, et al. Rock mechanics characteristics and fracture propagation mechanism of Baikouquan Formation glutenite reservoir in Mahu Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 83-91.]
- [51] 樊海柱. 西域砾岩结构特性及力学特性的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016. [FAN H Z. Experimental study on the structural and mechanical properties of conglomerate in the Western Regions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.]
- [52] 李鹏, 熊健, 晏奇, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组岩性对岩石力学特性的影响[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 569-578. [LI P, XIONG J, YAN Q, et al. Influence of lithology of Permian Fengcheng Formation on rock mechanics in Mahu Sag, the Junggar Basin[J]. Petroleum Experimental Geology, 2022, 44(4): 569-578.]
- [53] 李皋, 王智辉, 刘厚彬, 等. 库车河剖面砾岩层的岩石力学性质[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5306-5310. [LI G, WANG Z H, LIU H B, et al. Rock mechanics properties of conglomerate in Kuqa River section[J]. Science, Technology and Engineering, 2021, 21(13): 5306-5310.]
- [54] 张文, 高阳, 梁利喜, 等. 砾岩油藏岩石力学特征及其对压裂改造的影响[J]. 断块油气田, 2021, 28(4): 541-545. [ZHANG W, GAO Y, LIANG L X, et al. Rock mechanics characteristics of conglomerate reservoir and its influence on fracturing modification[J]. Block oil and gas fields, 2021, 28(4): 541-545.]
- [55] 马东东, 罗宇杰, 胡大伟, 等. 粒径分选性与围压对砂砾岩水力压裂破裂影响机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2264-2273. [MA D D, LUO Y J, HU DAWEI, et al. Study on the influence mechanism of particle size sorting and confining pressure on fracking fracture of glutenite[J]. Journal of Rock mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2264-2273.]
- [56] KHANLARI G, HEIDARI M, NOORI M. The effect of petrographic characteristics on engineering properties of conglomerates from Famenin Region, Northeast of Hamedan, Iran[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(01): 2609-2621.
- [57] 刘先珊, 许明, 熊卫红. 颗粒刚度变化对胶结砂岩力学响应的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(11): 1427-1435. [LIU X S, XU M, XIONG W H. The effect of particle stiffness changes on the mechanical response of cemented sandstone[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(11): 1427-1435.]
- [58] 刘先珊, 董存军. 三维颗粒流数值模型的胶结砂岩力学特性[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(2): 37-44. [LIU X S, DONG C J. Mechanical properties of cemented sandstone in three-dimensional Grain flow numerical model[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(2): 37-44.]
- [59] QIAN K R, LIU T, LIU J Z, et al. Construction of a novel brittleness index equation and analysis of anisotropic brittleness characteristics for unconventional shale formations[J]. Petroleum Science, 2020, 17(1): 70-85.
- [60] NHABANGA O J, RINGROSE P S, HOLT R M. Use of rock - physics analysis of well logs to determine compaction history of Cretaceous shales in the Rovuma basin, Offshore Mozambique[J]. Geophysical Prospecting, 2021, 69(6): 1282-1294.
- [61] NEZHAD M M, ZHU H, WOODY JU J, et al. A simplified multiscale damage model for the transversely isotropic shale rocks under tensile loading[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2016, 25(5): 705-726.
- [62] LIU N, FU L Y. Elastic characteristics of digital cores from Longmaxi shale using lattice spring models[J]. Communications in Computational Physics, 2020, 28(1): 518-538.
- [63] HU Q, CHEN X, GUO Y. A rock physics model of kerogen inclusions in shale; proceedings of the 2013 SEG Annual Meeting, F, 2013[C]. OnePetro.
- [64] HERRMANN J, RYBACKI E, SONE H, et al. Deformation experiments on Bowland and Posidonia Shale—part I: strength and Young's modulus at ambient and in situ pc-T conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(12): 3645-3666.

- [65] HASHIN Z. The spherical inclusion with imperfect interface[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1991, 58(pp): 444–449.
- [66] MAVKO G, MUKERJI T, DVORKIN J. *The rock physics handbook*[M]. Cambridge: Cambridge university press, 2020.
- [67] ZIMMERMAN R W. Elastic moduli of a solid with spherical pores: New self-consistent method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(6): 339–343.
- [68] GOMMERS B, VERPOEST I, HOUTTE P V. The Mori–Tanaka method applied to textile composite materials[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(6): 2223–2235.
- [69] ESHELBY J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1957, 241(1226): 376–396.
- [70] BENVENISTE Y. The effective mechanical behaviour of composite materials with imperfect contact between the constituents[J]. *Mechanics of Materials*, 1985, 4(2): 197–208.
- [71] ZHAO J, ZHANG D, WU T, et al. Multiscale approach for mechanical characterization of organic-rich shale and its application[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(1): 1–19.
- [72] YIN L, YIN X, ZONG Z. A new rock physics model of shale on the theory of Micro-Nano pores; proceedings of the EAGE 2020 Annual Conference & Exhibition Online, F, 2020[C]. *European Association of Geoscientists & Engineers*.
- [73] VASIN R N, WENK H R, KANITPANYACHAROEN W, et al. Elastic anisotropy modeling of kimberidge shale[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(8): 3931–3956.
- [74] LI Y, CHEN J Q, YANG J H, et al. Determination of shale macroscale modulus based on microscale measurement: A case study concerning multiscale mechanical characteristics[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(3): 1262–1275.
- [75] GIRAUD A, HUYNH Q V, HOXHA D, et al. Application of results on Eshelby tensor to the determination of effective poroelastic properties of anisotropic rocks-like composites[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(11–12): 3756–3772.
- [76] WANG Z, ZHANG Q, LIU J, et al. Effective moduli of rocks predicted by the Kuster–Toksöz and Mori–Tanaka models[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2021, 18(4): 539–557.
- [77] ZHONG Z, MEGUID S. On the elastic field of a spherical inhomogeneity with an imperfectly bonded interface[J]. *Journal of elasticity*, 1997, 46(2): 91–113.
- [78] 宋朝阳, 宁方波. 弱胶结类岩石细观结构参数与其宏观力学行为的关联性研究进展[J]. *金属矿山*, 2018(12): 1–9. [SONG C Y, NING F B. Research progress on the correlation between microstructure parameters and macroscopic mechanical behavior of weakly cemented rocks[J]. *Metal Mines*, 2018(12): 1–9.]
- [79] HOU B, ZENG C, CHEN D, et al. Prediction of wellbore stability in conglomerate formation using discrete element method[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2017, 42(1): 1609–1619.
- [80] 侯冰, 张其星, 陈勉. 页岩储层压裂物理模拟技术进展及发展趋势[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(5): 66–77. [HOU B, ZHANG Q X, CHEN M. Progress and development trends of physical simulation technology for shale reservoir fracturing[J]. *Petroleum Drilling Technology*, 2023, 51(5): 66–77.]
- [81] 李连崇, 李根, 孟庆民, 等. 砂砾岩水力压裂裂缝扩展规律的数值模拟分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(5): 1501–1507. [LI L C, LI G, MENG Q M, et al. Numerical simulation analysis of fracture propagation law of fracking in glutenite[J]. *Soil mechanics*, 2013, 34(5): 1501–1507.]
- [82] 鞠杨, 杨永明, 陈佳亮, 等. 低渗透非均质砂砾岩的三维重构与水压致裂模拟[J]. *科学通报*, 2016, 61(1): 82–93. [JU Y, YANG Y M, CHEN J L, et al. 3D reconstruction and hydraulic fracturing simulation of low-permeability heterogeneous sandstone[J]. *Science Bulletin*, 2016, 61(1): 82–93.]
- [83] 刘见通. 玛湖砾岩储层破裂过程与水力压裂裂缝扩展规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022. [LIU J T. Study on the fracturing process and hydraulic fracturing crack propagation law of Mahu conglomerate reservoir[D]. *China University of Petroleum(Beijing)*, 2022.]
- [84] 徐泽昊, 刘向君, 梁利喜, 等. 砾岩油藏压裂裂缝遇砾扩展行为机理[J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(3): 115–127. [XU Z H, LIU X J, LIANG L X, et al. Mechanism of fracture propagation in fractured conglomerate reservoirs when encountering gravel[J]. *Oil and Gas Geology and Recovery*, 2023, 30(3): 115–127.]
- [85] 刘鹏. 砂砾岩水压致裂机理的实验与数值模拟研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017. [LIU P. Experimental and numerical simulation study on hydraulic fracturing mechanism of gravel rock[D]. *Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing)*, 2017.]
- [86] SHI X, QIN Y, XU H, et al. Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in conglomerate reservoirs[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 248: 107738.
- [87] 罗攀, 李勇明, 江有适, 等. 砂砾岩水力裂缝延伸路径模拟研究[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(5): 103–106. [LUO P, LI Y M, JIANG Y S, et al. Simulation study on the extension path of hydraulic fractures in gravel[J]. *Oil and Gas Geology and Recovery*, 2013, 20(5): 103–106.]

- [88] ZHOU B, GE H, ZHOU W, et al. Experimental study of the main influencing factors in mechanical properties of Conglomerate[J]. *Earthquake Res China*, 2020, 34(3): 430–451.
- [89] 卿龙邦, 李庆斌, 管俊峰. 混凝土断裂过程区长度计算方法研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(4): 197–201. [QING L B, LI Q B, GUAN J F. Research on the calculation method for the length of concrete fracture process zone[J]. *Applied mechanics*, 2012, 29(4): 197–201.]
- [90] 何其胜, 王贵君. 砂砾岩水压致裂机理及数值仿真研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(6): 45–49. [HE Q S, WANG G J. Research on the mechanism and numerical simulation of hydraulic fracturing in sandstone[J]. *Journal of China Three Gorges University(Natural Science Edition)*, 2020, 42(6): 45–49.]
- [91] 姚武, 吴科如. 混凝土断裂过程区理论模型研究[J]. *大连理工大学学报*, 1997(S1): 15–22. [YAO W, WU K R. Research on the theoretical model of concrete fracture process zone[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1997(S1): 15–22.]
- [92] 张子麟, 陈勇, 张全胜, 等. 致密砂砾岩压裂裂缝遇砾扩展模式的数值模拟研究[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(4): 132–138. [ZHANG Z L, CHEN Y, ZHANG Q S, et al. Numerical simulation study on the propagation mode of fractures encountering gravel in dense sandstone fracturing[J]. *Oil and Gas Geology and Recovery Factor*, 2019, 26(4): 132–138.]
- [93] 赵鹏, 谢凌志, 杨春和, 等. 基于弥散式裂缝模型的水力压裂研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 2015(S1): 2593–2600. [ZHAO P, XIE L Z, YANG C H, et al. Research on fracking based on dispersion fracture model[J]. *Journal of Rock mechanics and Engineering*, 2015, 2015(S1): 2593–2600.]
- [94] WU Y H, SUN Q Q, LIU Q H, et al. Propagation mechanism study of hydraulic fracture in low permeability glutenite reservoir[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 868(1): 618–623.
- [95] 熊健, 林海宇, 唐勇, 等. 砂砾岩油藏影响压裂效果关键地质力学因素研究及应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(5): 1048–1059. [XIONG J, LIN H Y, TANG Y, et al. Research and application of key geomechanical factors influencing fracturing effectiveness in sandstone reservoir[J]. *Petroleum Geophysical Exploration*, 2021, 56(5): 1048–1059.]
- [96] 应战江, 苗勇, 覃忠, 等. 永北砂砾岩油藏水力压裂技术研究与应用[J]. *石油地质与工程*, 2014, 28(1): 115–117. [YING Z J, MIAO Y, QIN Z, et al. Research and application of fracking technology in Yongbei glutenite reservoir[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2014, 28(1): 115–117.]
- [97] 于晓中, 谯常忻, 周群力. 岩石和混凝土断裂力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991. [YU X Z, QIAO C X, ZHOU Q L. *Fracture mechanics of rock and concrete*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991.]
- [98] HILLERBORG A, MODÉER M, PETERSSON P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. *Cement and Concrete Research*, 1976, 6(6): 773–781.
- [99] BAŽANT Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concrete[J]. *Matériaux et construction*, 1983, 16(1): 155–177.
- [100] JENQ Y, SHAH S P. A fracture toughness criterion for concrete[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(5): 1055–1069.
- [101] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [XU S Y. *Fracture mechanics of concrete*[M]. Science Press, 2011.]
- [102] 王英伟, 梁利喜, 邹正银, 等. 玛湖凹陷百口泉组砾岩脆性特征及其影响因素分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(24): 10544–10549. [WANG Y W, LIANG L X, ZOU Z Y, et al. Brittleness characteristics and influencing factors of conglomerate in Baikouquan formation of Mahu depression[J]. *Science Technology&Engineering*, 2022, 22(24): 10544–10549.]
- [103] 覃建华, 张景, 蒋庆平, 等. 玛湖砾岩致密油甜点分类评价及其工程应用[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(2): 110–119. [QIN J H, ZHANG J, JIANG Q P, et al. Classification and evaluation of Tight oil desserts in Mahu conglomerate and its engineering application[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 110–119.]
- [104] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(8): 1680–1685. [LI Q H, CHEN M, JIN Y, et al. Indoor evaluation method and improvement of shale brittleness[J]. *Journal of Rock mechanics and Engineering*, 2012, 31(8): 1680–1685.]
- [105] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475–499.
- [106] RICKMAN R, MULLEN M, PETER E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the barnett shale[C]. *Society of Petroleum Engineers*, 2008.
- [107] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods; proceedings of the International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, F, 1974[C]. Elsevier.
- [108] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 523–527. [YUAN J L, DENG J G, ZHANG D Y, et al. Fracturability evaluation technology of shale gas reservoir[J]. *Journal of Petroleum*, 2013, 34(3): 523–527.]
- [109] 张军, 艾池, 李玉伟, 等. 基于岩石破坏全过程能量演化的脆性评价指数[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(6): 1326–1340. [ZHANG J, AI C, LI Y W, et al. Brittleness evaluation index based on the energy evolution of the entire process of rock failure[J]. *Journal of Rock mechanics and Engineering*, 2017, 36(6): 1326–1340.]
- [110] 刘向君, 王小军, 赵保伟, 等. 砂砾岩储集层水力压裂裂缝扩展规律与可压性评价[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(2): 169–177. [LIU X J, WANG X J, ZHAO B W, et al. Expansion law and compressibility evaluation of hydraulic fracturing fractures in sandstone

- reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(2): 169–177.]
- [111] 杨琨, 罗山贵, 花凌旭, 等. 致密砾岩油藏压裂甜点预测研究——以玛 18 井区为例[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(32): 14174–14183. [YANG K, LUO S G, HUA L X, et al. Prediction of sweet spots during fracturing in tight conglomerate oil reservoirs: A case study of Ma 18 well area[J]. Science and Technology and Engineering, 2022, 22(32): 14174–14183.]
- [112] 李浩楠, 师耀利, 姚振华, 等. 玛 18 井区低渗透砂砾岩油藏水平井优化设计及产能预测[J]. 特种油气藏, 2021, 28(6): 83–90. [LI H N, SHI Y L, YAO Z H, et al. Optimization design and productivity prediction of horizontal wells in low permeability sandstone reservoir in Ma 18 well block[J]. Special oil and gas reservoirs, 2021, 28(6): 83–90.]
- [113] 黄兴龙, 徐阳, 曾彦强, 等. 玛 131 井区低渗透砂砾岩油藏水平井优化设计研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(3): 97–101. [HUANG X L, XU Y, ZENG Y Q, et al. Optimization design of horizontal wells in low permeability sandstone reservoir in Ma 131 well area[J]. Special oil and gas reservoirs, 2018, 25(3): 97–101.]
- [114] 陈子晗. 砂砾岩油藏多段压裂水平井开发方式研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017. [CHEN Z H. Research on the development method of multi stage fracturing horizontal wells in sandstone reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2017.]
- [115] 郭金鹏. 玛湖砂砾岩油藏水平井体积压裂参数优化设计研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. [GUO J P. Research on optimization design of volume fracturing parameters for horizontal wells in Mahu sandstone reservoir[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.]
- [116] 李建民, 吴宝成, 赵海燕, 等. 玛湖致密砾岩油藏水平井体积压裂技术适应性分析[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 250–259. [LI J M, WU B C, ZHAO H Y, et al. Adaptability analysis of volume fracturing technology for horizontal wells in Mahu tight conglomerate reservoir[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 250–259.]

(编辑 杨雅露)

第一作者: 王剑波 (1989 年—), 博士、讲师, 从事油气岩石力学与水力压裂技术研究, gsggwjb@163.com。

通信作者: 侯冰 (1979 年—), 博士、教授, 从事深层水力压裂多场耦合岩石力学基础及应用研究, binghou@vip.163.com。