

文章编号: 0253-2697(2024)05-0875-14 DOI:10.7623/syxb202405009

综述

深部破碎地层井壁失稳机理 研究进展与攻关对策

杨斌¹ 许成元² 张浩¹ 郭予凡¹ 杨建³ 李越¹ 赵建国¹

(1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室 四川成都 610059;

2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室 四川成都 610050;

3. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司工程技术研究院 四川德阳 618300)

摘要:深部破碎地层井壁失稳极易诱发卡钻和井眼填埋等事故,威胁安全高效钻井。基于研究进展和存在问题总结了井壁失稳的地层—井眼跨尺度建模与静/动力学模拟研究思路,并提出后续研究着力点:①攻关离散—连续耦合建模与数值模拟方法,实现地层—井眼跨尺度建模和井周岩体破碎特征精细表征;②明确深部高应力高温与钻井液耦合作用下岩块摩擦系数变化规律,揭示其对破碎井壁应力传递和稳定性影响机制;③开展岩石裂缝亚临界扩展机理探索,在分子尺度上阐明岩石裂缝尖端胶结破坏与亚临界扩展力学机制,揭示井壁失稳时间滞后效应;④从轨迹延伸和动载荷冲击等方面开展失稳动态演化模拟,揭示钻井工程因素对井壁静/动力学失稳的影响机制;⑤升级井壁失稳大尺寸物理模拟实验设备与方法,结合力链理论探索破碎井壁承压演化机制和掉块/垮塌规律。最后,提出基于地层参数、工程静力学和动力学参数的井壁失稳风险评估框架思路,支撑破碎地层井壁失稳预测与防控。

关键词:破碎地层;井壁失稳;跨尺度建模;离散—连续;亚临界扩展

中图分类号:TE256

文献标识码:A

Research progress on mechanism of wellbore instability in deep fractured formations and related countermeasures

Yang Bin¹ Xu Chengyuan² Zhang Hao¹ Guo Yufan¹ Yang Jian³ Li Yue¹ Zhao Jianguo¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Sichuan Chengdu 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610050, China; 3. Engineering and Technology Research Institute, PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Sichuan Deyang 618300, China)

Abstract: Wellbore instability in fractured formations of deep and ultra-deep wells can easily induce accidents such as drill pipe sticking and borehole fillings, thus threatening the safe and efficient drilling. Based on research progress and existing problems, the paper puts forward a research idea of stratigraphy-wellbore cross-scale modeling and static/dynamic simulation in case of wellbore instability. Moreover, five key points are proposed as follows: (1) To make a breakthrough in the discrete-continuous coupling modeling and numerical simulation methods, with the aim of achieving stratigraphy-wellbore cross-scale modeling and fine description of fractured rock mass around the well. (2) To clarify the changing law of rock friction coefficient under the coupling effect of high stress and temperature and drilling fluid in deep layers, and further reveal the influence mechanism of friction coefficient on stress transfer and macroscopic stability of the broken wellbore rock. (3) To explore the mechanism of subcritical propagation in rock cracks, with the aim of clarifying the mechanical mechanism of bond failure at crack tip under molecular scale, and revealing the time lag effect of wellbore instability. (4) To carry out the dynamic evolution simulation of wellbore instability in terms of borehole trajectory extension and local dynamic load impact, and further reveal the influence mechanism of engineering factors on the static/dynamic instability of wellbore. (5) To upgrade the large-scale physical model experimental equipment and methods for wellbore instability, and further explore pressure-bearing evolution mechanism and rocks falling/collapse laws for fractured wellbore by use of force chain theory. Finally, the paper proposes a wellbore instability risk assessment framework based on formation parameters, engineering statics and dynamic parameters, providing support for the prediction, prevention and control of wellbore instability in fractured formations.

Key words: fractured formation; wellbore instability; cross-scale modeling; discrete-continuous method; subcritical crack propagation

基金项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(No. U19A2097)、国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 52104003)和国家自然科学基金面上项目(No. 52374005)资助。

第一作者:杨斌,男,1989年12月生,2018年获西南石油大学油气田开发工程专业博士学位,现为成都理工大学副教授,主要从事岩石力学与井壁稳定、防塌防漏与储层保护研究。Email: yangbin19@cdut.edu.cn

通信作者:张浩,男,1976年2月生,2006年获西南石油大学油气田开发工程专业博士学位,现为成都理工大学教授,主要从事非常规油气储层保护与改造技术研究。Email: zhanghao@cdut.edu.cn

引用:杨斌,许成元,张浩,郭予凡,杨建,李越,赵建国.深部破碎地层井壁失稳机理研究进展与攻关对策[J].石油学报,2024,45(5):875-888.

Cite: YANG Bin, XU Chengyuan, ZHANG Hao, GUO Yufan, YANG Jian, LI Yue, ZHAO Jianguo. Research progress on mechanism of wellbore instability in deep fractured formations and related countermeasures[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(5): 875-888.

中国深部油气资源主要分布在塔里木、四川、鄂尔多斯、准噶尔、柴达木等盆地。根据2015年全国油气资源评价结果,中国深层—超深层油气资源达 763×10^8 t油当量,占到全国油气资源总量的35%^[1],其中埋深大于8 000 m的剩余资源达 176×10^8 t油当量,占总剩余资源量的33%^[2]。目前塔里木盆地和四川盆地油气资源勘探开发深度均已突破9 000 m,并正向“万米”特深层进军。中国已成为世界深部油气勘探开发领域最活跃的地区之一,深部油气资源正逐步成为增储上产的主体^[3]。

深部地层地质年代老,经历多期构造运动^[4],在构造变形强烈区域容易形成破碎带。同时,破碎带地层岩体完整性差,地应力分布复杂,力学性质难以准确评估^[5]。工程实践表明,深部地层钻井遭遇破碎带的概率显著上升,且钻遇后普遍发生井壁失稳。但由于失稳机理认识不清,难以制定针对性的控制对策,破碎地层井壁极易发生大规模掉块垮塌,导致卡钻和井眼填埋等复杂/恶性事件。如塔里木油田顺北5-3井^[6]钻遇破碎带,导致垮塌侧钻4次,损失时间为240 d;该工区另外5口井^[7]钻遇奥陶系碳酸盐岩破碎带,井壁垮塌掉块导致侧钻10余次,单井损失时间最长达242 d。四川盆地川西凹陷设计井深超7 000 m的探井钻遇砂岩—页岩交错互层且夹煤层的破碎带,二开处理井壁掉块和卡钻耗时120 d,三开在4 623 m附近井壁严重垮塌并导致井眼填埋报废。川南地区深层页岩气井区6口水平井在页岩层段钻遇破碎带,井壁掉块和卡钻导致平均损失钻时30.7 d,多口井填眼侧钻或提前下套管固井。破碎地层高频次发生的严重井壁失稳事件已成为阻碍深部地层高效安全钻井的瓶颈之一。

目前的井壁失稳机理研究主要基于连续介质力学方法,对于完整性地层,学者们先后建立了考虑应力作用^[8-9]、化学作用^[10-11]、流—固^[12-13]、流—固—化^[14-15]和流—固—化—热^[16]多场耦合等系列井壁失稳模型;对于层理/裂缝性地层,模型进一步考虑弱面产状、力学各向异性,以及井斜、方位等因素^[17-20]。这类以井眼截面或单元体分析代表整个井段的失稳分析模式在完整性地层研究中可以兼具精度与效率,应用于钻井失稳预测与防控也具有显著成效。但破碎地层岩体离散程度高,变形及应力高度不连续,岩块胶结弱或无胶结,“以局部推断整体”的分析路径难以满足破碎地层井壁失稳研究需求。

笔者以地质—工程一体化研究思路为指引,在总结目前破碎地层井壁失稳机理研究现状的基础上,从破碎地层与井眼跨尺度建模、井壁破碎岩块间力学作用机制、大尺寸物理模拟与数值模拟、地质—工程失稳风险评价等方面探索提出深部破碎地层井壁失稳机理研究攻关对策。以期丰富破碎地层井壁失稳研究路径与方法,深化井壁失稳本质规律认识,促进深部地层安全高效钻井技术发展。

1 钻井井壁失稳理论研究进展

钻井井壁稳定性研究经历了从完整性地层到弱面发育地层再到破碎地层,从力学失稳到化学失稳再到多场耦合的发展历程,国内外学者围绕岩石力学化学性质、本构模型与破坏准则、数值模拟分析方法等开展了大量研究工作。

1.1 连续介质力学井壁失稳机理研究

根据经典静力学理论,钻头破碎地层形成井眼后,井周应力场重新分布,如果重分布后局部应力值超过岩石屈服强度,井壁失稳发生。针对各类地层岩石,学者们先后建立了线弹性解析模型^[8]、弹塑性模型^[9]、孔隙弹性模型^[12]、热孔隙弹性模型^[13]、化学孔隙弹性模型^[14]、化学孔隙热弹性模型^[16]和双重化学—孔隙弹性模型^[15]等多种本构模型,形成了Mohr-Coulomb准则、Drucker-Plager准则、Mogi-Coulomb准则、修正Lade准则、Hoek-Brown准则等井壁失稳破坏判定准则^[21-24]。对于连续性/完整性地层,选取相适应的本构模型和失稳判定准则,能够有效应对钻井过程中遇到的大多数井壁失稳问题。

伴随地层岩体完整性变差,弱面(主要指层理和天然裂缝面)失稳成为井壁失稳的典型表现形式(图1)。含弱面岩石的强度和弹性参数等表现出明显的各向异性^[25]。弱面地层井壁稳定性研究同样遵循着从纯力学(考虑单一或成组弱面)到流—固、流—固—化、热—流—固和流—固—化—热多场耦合的发展趋势。Aadnoy^[17]首先提出含弱面井壁稳定性求解方法,后来进一步发展形成了考虑成组/多弱面^[18-19,26]、强度、弹性、形变参数各向异性和井斜方位等^[27-28]的弱面失稳模型。在多场耦合方面,梁利喜等^[29]基于多孔弹性力学建立了力学—渗流耦合弱面井壁稳定模型。邓媛等^[30]考虑水化对岩石本体和层理面强度弱化,建立了层理页岩井壁坍塌压力模型,揭示了水化应变、层理面

产状和钻井时间等对坍塌压力的影响规律。马天寿等^[20]将热—流—固耦合与单弱面强度准则相结合,分析了温度、渗流作用、弱面力学各向异性对页岩地层坍塌压力的影响。曹文科等^[28]实验评价了弱面强度随含水量变化趋势,建立了力学—渗流—化学耦合弱面失稳模型,分析层理性地层钻井后期井壁失稳问题。

Ekbote 等^[16]在考虑渗流效应和泥页岩水化的基础上,进一步将温度场耦合进本构方程,建立了流—固—化—热全耦合控制方程。Cheng 等^[31]进一步考虑高温钻井液浸泡对页岩基质和层理的强度弱化,构建了流—固—化—热全耦合弱面失稳模型,并预测了任意井斜方位下的井壁坍塌压力。

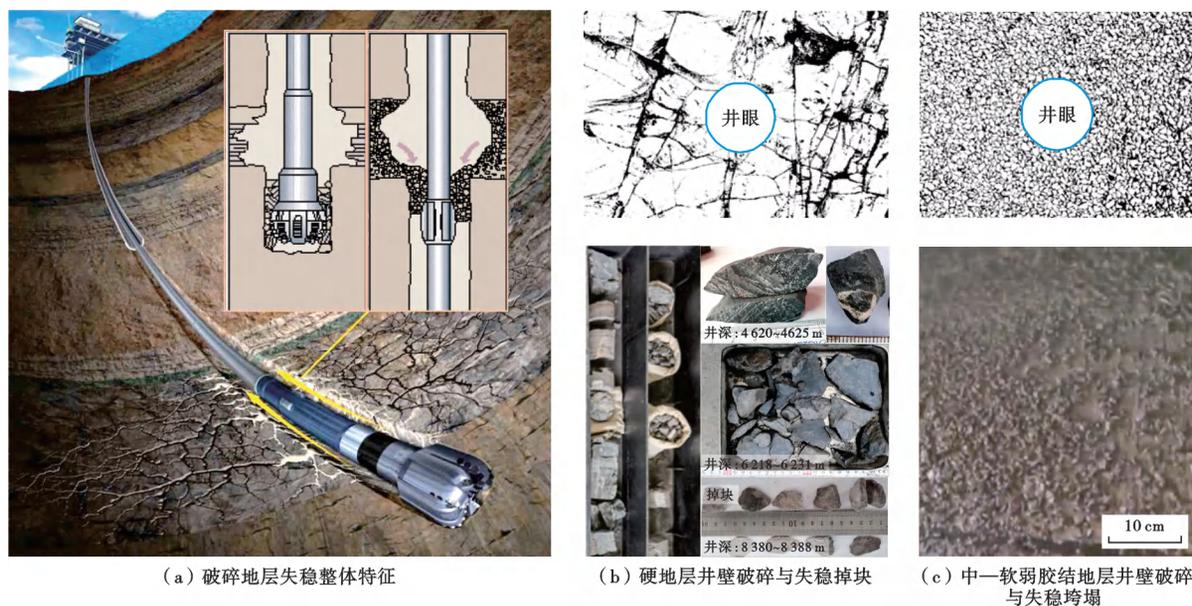


图1 深部破碎地层井周岩体破碎特征与井壁掉块垮塌失稳示意

Fig. 1 Characteristics of rock fragmentation around wells in deep fractured formations and schematic diagram of wellbore collapse and instability caused by falling rocks

1.2 岩石摩擦对井壁稳定性影响研究

摩擦系数是评价岩石摩擦强度的核心指标,其大小受岩性、矿物、结构面粗糙度、应力和流体作用等多种因素影响^[32]。常见岩石平整摩擦面的摩擦系数在0.4~0.9,其差异性在细观上主要源于矿物颗粒大小、形态、排列特征和颗粒胶结等,比如泥页岩的摩擦系数通常小于砂岩,页岩平行层理面摩擦系数通常小于垂直层理面,细砂岩通常小于中砂—粗砂岩^[33-35]。

摩擦弱化效应是近年来研究岩石摩擦行为的热点^[36]。在地震、岩土和滑坡等领域,大量实验测试表明,高应力条件下岩石的摩擦系数将明显降低^[37-38]。Li 等^[39]通过实验测试也表明,页岩、碳酸盐岩和砂岩的摩擦系数随摩擦面正应力升高而明显降低,其中含弱结构面岩样的摩擦系数可降至0.2以下。钻井液作用同样可能弱化井壁围岩摩擦强度:①钻井液对摩擦面具有润滑效应,比如钻井液浸润的页岩摩擦系数平均降幅在约30%^[40];同时,地层在高温条件下岩石与钻井液可能发生复杂的物理化学作用,降低基质及弱结构面的摩擦系数和黏聚力^[41-42]。②钻井液侵入裂缝性/破碎性地层,将产生明显的水力尖劈效应,表现为流体压

力增大,有效应力减小,进而降低结构面摩擦强度,加剧井壁失稳^[43-44]。大量数值模拟研究也表明^[16,20,28,30,44],对于含弱面地层,岩石摩擦系数降低将显著增加井壁失稳风险。

1.3 基于离散元方法的井壁失稳研究

离散元方法也被称为散体单元法,是一种由 Cundall^[45]提出并广泛应用于岩土、采矿和石油工程等领域研究散体或胶结材料力学行为的数值模拟方法。侯冰等^[46]采用离散元方法进行了砾石层井壁建模,探讨了不同砾石粒径分布下井周裂缝扩展和井壁破坏特征。Karatela 等^[47]结合离散元方法和测井解释剖面,建立了破碎地层近井带的三维物理模型,但该模型尺度有限,并未考虑远离井壁区域围岩对井壁稳定性的作用。Wu 等^[48]实现了二维平面上井壁失稳物理模型的离散元-有限元耦合建模,但模型中未涉及对复杂结构面的处理。Duan 等^[49]考虑页岩各向异性特征,采用 PFC 软件模拟研究了层理倾角、地应力、井眼方位和尺寸等因素对井壁稳定性的影响。Park 等^[50]模拟研究了各向同性页岩裂缝亚临界扩展指数和钻井液密度对井壁临界失稳周期的影响。Zhao 等^[51]研究了离

散岩块尺寸对井壁失稳规模和井眼扩径率的影响,并提出了井壁稳定系数概念,用以界定钻井液密度增加对破碎地层井壁稳定性的正面或负面作用。

1.4 存在的局限性

岩石强度与岩体结构共同决定井壁承压能力与稳定状态。从常规地层到裂缝性再到破碎地层,井周岩体完整性逐步变差,破碎地层在井眼尺度上已具有离散介质特征,维持井壁稳定的地质环境明显恶化。同时,工程实践表明^[7,52],破碎地层井壁对井眼轨迹、压力波动、钻柱碰撞摩擦和钻井液冲刷等外部作用力的响应更为迅速直接,工程因素诱发井壁失稳的风险显著增大。针对深部破碎地层钻井地质—工程环境,现有井壁失稳研究尚存在如下问题:

(1) 深部破碎地层井壁失稳物理模型亟待优化升级。破碎地层井壁稳定性受井壁—近井带—远井带跨尺度地质—工程环境的显著影响。但目前缺少既能实现井周岩体破碎特征精细表征,又能兼顾宏观地层起伏、岩性分层、断层和复杂井眼轨迹等的井眼建模方法,井壁失稳机理研究缺少可靠的物理模型载体。

(2) 深部地层井壁破碎岩块的摩擦行为及对井壁稳定性影响机制研究亟待深入。离散岩块相互挤压产生摩擦力是维持破碎地层井壁稳定的关键。目前,深部地层高应力高温与钻井液耦合作用下岩块摩擦系数变化规律仍有待揭示,摩擦系数变化将如何影响井周岩块间应力的传递与分布、井壁宏观稳定性,相关研究尚鲜有报道。

(3) 复杂地质背景下,井壁稳定性对工程环境的响应机制研究尚显薄弱。现有失稳模型主要从井斜、方位,以及钻井液对井壁的有效支撑与岩石强度弱化等方面评价工程因素对井壁稳定性的影响。破碎地层钻井过程中井眼轨迹形态、延伸阶段、井筒动载荷冲击等工程因素对井壁稳定性的影响同样显著,但目前仍缺乏相关研究。

(4) 缺少适用于破碎地层井壁失稳机理探究的理论技术方法。现有研究主要采用连续介质理论分析井壁失稳的力学—化学等多场耦合作用机制,但针对破碎地层,采用何种理论技术方法观测、描述井壁离散岩块间的力与位移传递机制,预测井周应力分布,如何制定/选取井壁失稳判定准则,相关理论技术方法的缺失仍亟待填补。

2 深部破碎地层井壁失稳研究思路

常规深层超深层和深层页岩气钻井面临地质与工程的双重复杂特征。在地质上,构造作用可能导致深部地层断层、构造挠曲、小/微断裂增加[图 2(a)],

局部发育小型破碎带,且在纵向上地层岩性差异大[图 2(b)],在横向上地层起伏较大。工程方面,深部地层钻井为了缩减井身结构开次,必然存在长裸眼层段;为了保证入靶质量和优质储层钻遇率,时常增加井眼轨迹空间复杂度,并可能由于地层或地质导向原因,频繁穿层且在局部形成大曲率井段[图 2(d)]。对于深部破碎地层,工程因素叠加地层的破碎、弱胶结和不连续特征,以及地应力场的复杂性,其失稳机理模型一方面需要考虑更为宏观的地质—工程背景,另一方面也需要在细观尺度上更加精细地描述井壁岩石的胶结与破碎特征。

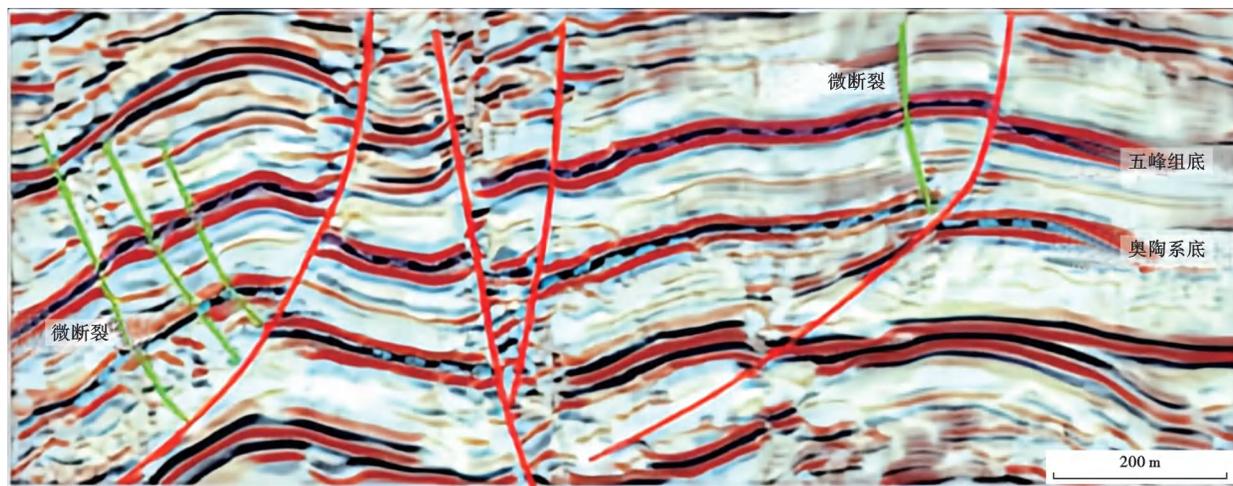
采用涵盖井壁—近井带—远井带地层与井眼信息的跨尺度井壁失稳物理模型建模与模拟思路,有助于解决深部破碎地层钻井井壁失稳机理研究面临的难题。首先需要结合地震与测录井资料,明确目标层段的地层起伏延展、小层与岩性、断层与裂缝发育等特征,支撑地质模型的建立。再结合井眼轨迹设计参数,在地质模型中生成与实钻三维井眼轨迹相同的模拟井眼,从而建立宏观地层—井眼模型。进一步根据裂缝预测与岩心观测等资料,明确井壁—近井带岩体的裂缝密度、倾角、方位和胶结强度等信息,支撑在井眼尺度上的岩体破碎特征精细建模。然后,根据室内实验和测井解释数据等对各小层、断层与裂缝面单元实体等进行差异化的基础物性与岩石力学参数赋值。最后,对模型施加外部(地应力与渗流)与内部(井筒液柱压力与渗流)初始条件,模拟实钻井眼延伸过程和静/动力学载荷,进行井周应力分布、井壁稳定性评价与掉块垮塌失稳机理等研究。

3 深部破碎地层井壁失稳攻关对策

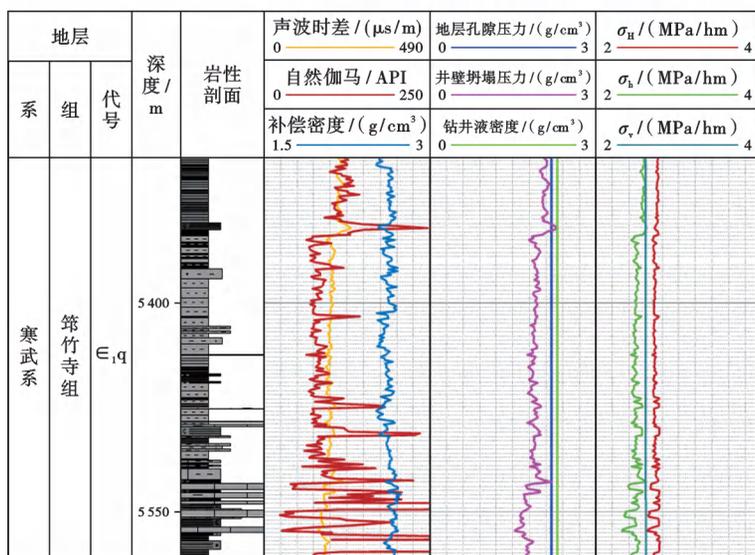
3.1 离散—连续耦合建模

模拟远场地应力、断层、地层产状、岩性变化和井眼轨迹等宏观因素对破碎地层井壁稳定性的影响,首先需进行地层—井眼跨尺度建模(图 3),有限差分等连续介质力学方法能够兼顾模型精度与计算效率。同时,为了精细描述破碎地层井周岩体离散与胶结特征,可采用离散元方法进行井壁—近井带建模,该方法在离散裂缝网络、弱面胶结、井壁大变形和细观力学分析等方面具有显著优势^[46-47,50]。离散元法通常适用于局部小区域精细模拟,在大尺度物理建模及计算效率方面有限差分等连续介质方法更具优势^[53]。

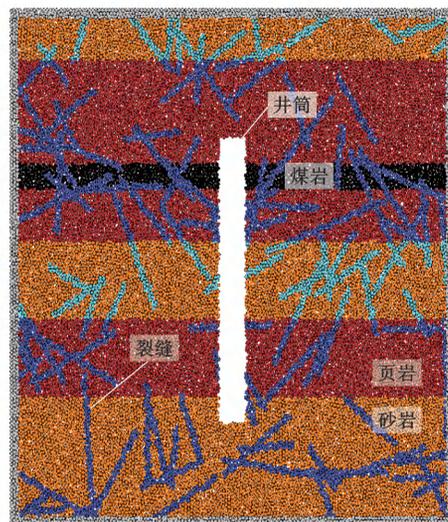
基于离散与连续介质方法的各自优势,离散—连续耦合方法是实现破碎地层井眼跨尺度建模的有效途径。在岩土、边坡和巷道工程等领域,离散—连续耦合法已成为分析大尺度工程对象中局部破碎块体(如大



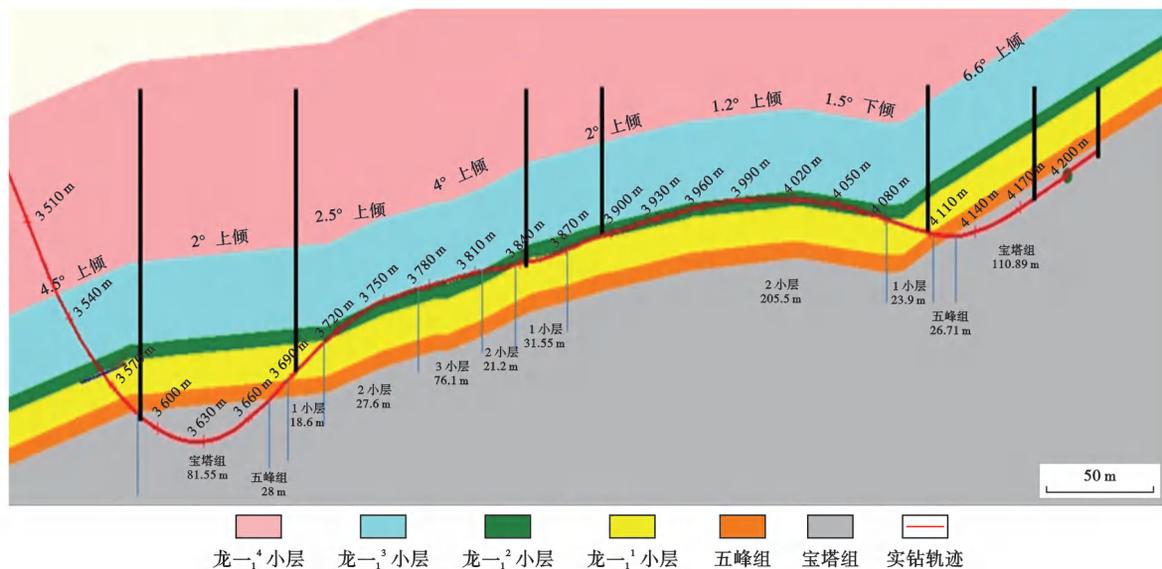
(a) 地层微断裂发育特征



(b) 实钻地层纵向非均质性



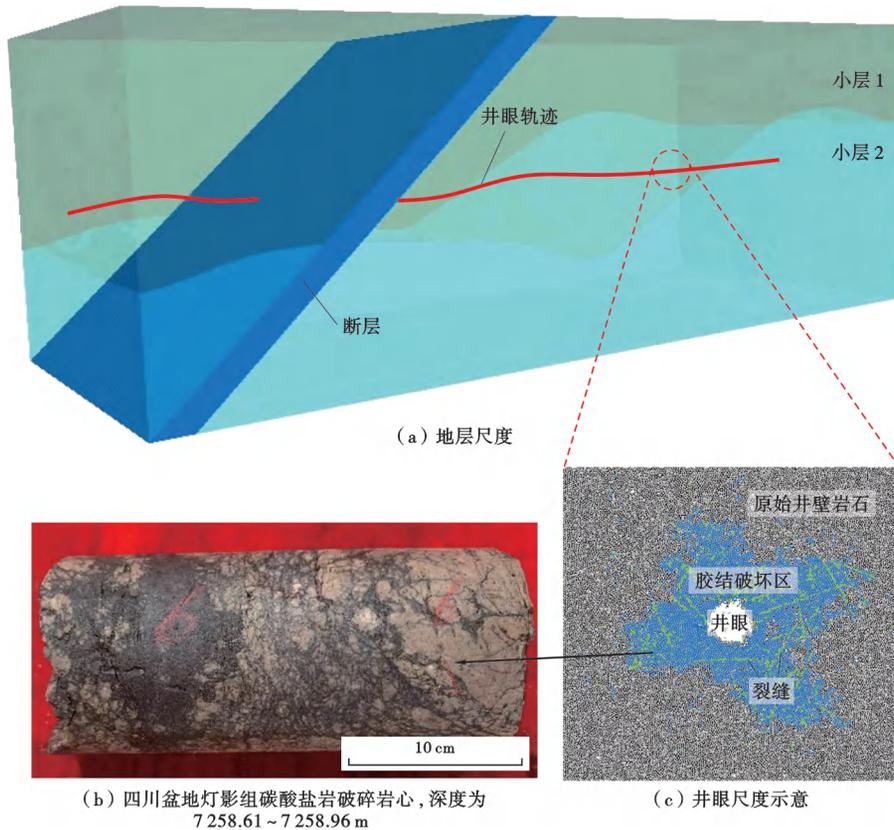
(c) 模型中岩性变化和裂缝发育特征



(d) 实钻井轨迹与地层耦合关系

图 2 深部地层钻井面临的复杂地质—工程背景

Fig. 2 Complex geologic-engineering context for drilling in deep formations



(b) 四川盆地灯影组碳酸盐岩破碎岩心, 深度为 7 258.61 ~ 7 258.96 m

图 3 破碎地层跨尺度地层—井眼物理模型示意

Fig. 3 Schematic diagram of cross-scale physical modeling of formation and borehole in fractured formations

型滑坡)运移规律的重要手段^[54]。如图 4 所示,在完成远井带有限差分 and 井壁—近井带离散元建模后,关键在于离散—连续耦合墙体的生成,并通过墙体实现速度、位移与力学信息的交互。其中, P_1 、 P_2 、 P_3 为单元节点; V_1 、 V_2 、 V_3 为耦合墙体顶点。该过程可具体通过等效力系统方法实现^[54-55],即采用等效力方法将离散域中颗粒作用于耦合墙体的接触力和弯矩分配到墙体的顶点,而墙体顶点同时附着于有限差分实体单元的网格节点,并与单元网格点同步运动,从而将力与

力矩传递到连续域参与计算;同时,连续域节点带动墙体运动,再将位置与速度信息传递到离散域,最终通过墙体的信息交互实现离散域与连续域的耦合模拟。

3.2 破碎地层岩块摩擦

破碎地层井壁岩块间胶结强度低,甚至无胶结,岩块间摩擦作用是井壁抵抗剪切滑移并维持稳定的关键。深部破碎地层岩块摩擦行为研究主要包括:①深部高应力—高温—钻井液耦合作用下,岩块摩擦系数

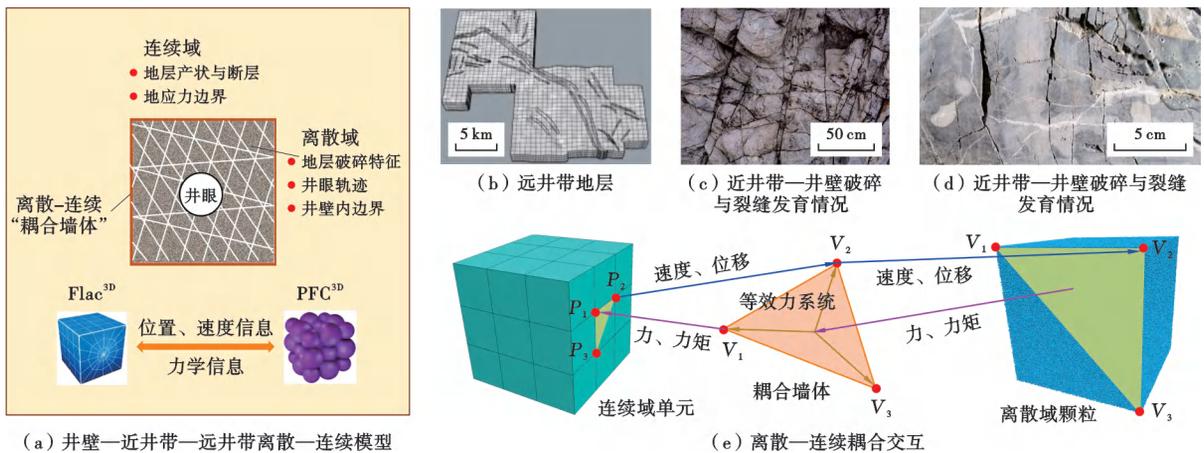


图 4 离散—连续耦合建模与数值模拟原理框架

Fig. 4 Principle framework for discrete-continuous coupled modeling and numerical simulation

的变化规律;②摩擦系数的大小及变化将如何影响井周破碎岩块间的力传递、应力分布和整体抗剪切失稳能力。

1.2节总结了中—浅层条件下岩石裂缝面粗糙度、岩性和正应力等因素对摩擦系数的影响趋势。在深部地层条件下,前述认识可能存在较大偏差。根据Byerlee定律^[56],当正应力增大到200 MPa以后,干燥岩石摩擦系数受滑动面的岩性、粗糙度等的影响将越来越弱,不同岩性和粗糙程度的摩擦面将趋于一个稳定且相近的摩擦系数(取值约0.6)。但上述规律不适用于摩擦面为黏土等软矿物或有流体侵入的情况^[57],而深部破碎地层普遍发育各类含充填矿物的弱结构面,井壁岩块间的摩擦也恰好处于高应力和钻井液侵入环境。前期单项实验(图5、图6)也表明,钻井液作用后,相同条件下岩石摩擦系数显著降低;对于黏土矿物含量高或裂缝充填方解石的岩样,其摩擦系数也显著低于基质摩擦面^[39-40]。

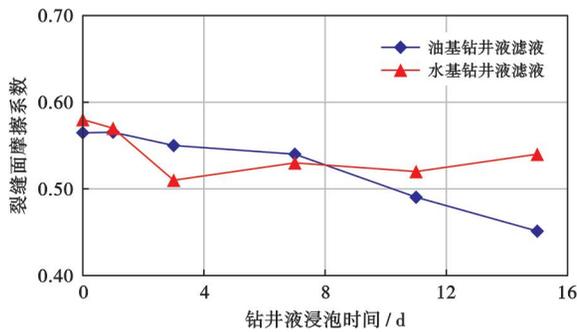


图5 钻井液作用后龙马溪组页岩摩擦系数变化

Fig. 5 Changes in friction coefficient of Longmaxi Formation shale under the action of drilling fluid

在干燥条件下,在500℃以下时大多数岩石的摩擦特性几乎不受温度的影响,若温度继续升高,摩擦系数将逐渐降低^[57]。地震相关研究表明,断层滑动摩擦产生大量的热(温度500℃以上),高温可能导致部分矿物熔融,产生假玄武玻璃、石墨化断层泥等,滑动面的摩擦系数可能降至0.1以下^[58-59]。深部地层钻井通常不会触及如此高温、高速的滑动摩擦条件,但存在高温、高应力与复杂流体环境的耦合,高温能够增强侵入钻井液与摩擦面的物理化学作用,使摩擦系数的变化规律更为复杂。目前对此的实验与机理研究尚鲜有报道,极有必要开展模拟深部地层高应力—高温—钻井液耦合作用下的岩石摩擦系数测试与分析,为破碎地层井壁稳定性评价提供可靠的关键力学参数。

对于高度离散化的破碎地层,摩擦系数大小对井周岩体受力状态与稳定性具有全方位的影响。在微观尺度上,摩擦系数决定着岩块接触面的抗剪切滑移强

度和应力的传递路径与效率。宏观上,摩擦系数是控制破碎地层离散块体间接触力网络的优势方位、结构复杂度和非均匀性等的关键参数。在相同的外部载荷条件下,上述参数将决定井周围岩是保持稳定还是发生失稳,是定向崩落、有限掉块还是大面积垮塌。因此,明确摩擦系数对井周破碎岩块间应力传递和宏观稳定性的影响机制,有助于揭示破碎地层井壁失稳机理和掉块或垮塌规律。

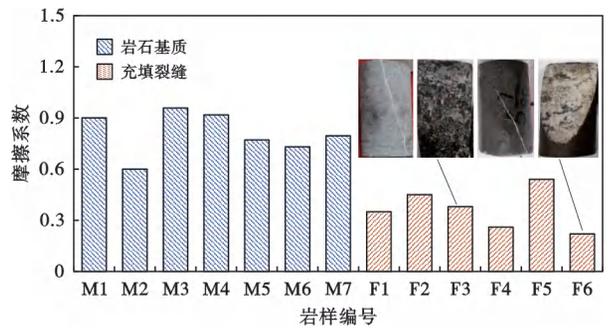


图6 四川盆地雷口坡组深层碳酸盐岩摩擦系数

Fig. 6 Friction coefficients of deep carbonate rocks in Leikoupo Formation, Sichuan Basin

3.3 裂缝亚临界扩展

完整性/破碎性地层井壁失稳通常并非发生在钻头破岩形成新井眼瞬间,而是在井眼形成后相当长(数小时至数十日)时间内发生掉块或垮塌^[60-62]。这种滞后效应显著增大了井壁失稳的预测与防控难度,放大了失稳导致卡钻或埋钻的风险,严重威胁安全高效钻井。时间滞后效应产生的根源之一在于失稳前井壁裂缝可能经历了缓慢的亚临界扩展过程。根据Griffith理论,裂缝亚临界扩展^[63]指流体介质与应力持续作用下,小尺度裂缝受到明显低于岩石断裂韧性的应力强度因子驱动而发生的缓慢扩展现象,其扩展速率比岩石断裂速率低数个量级。经典的裂缝亚临界扩展速率理论公式为^[64]:

$$u = 2a_0 v_0 \exp\left(-\frac{\Delta F^*}{kT}\right) \sinh\left[\frac{\alpha(G - G_E)}{kT}\right] \quad (1)$$

应力场主要通过裂缝尖端机械能释放率影响裂缝亚临界扩展速率,流体分子可通过吸附作用降低键断裂的能量势垒,从而促进裂缝扩展,温度升高对上述两者均有促进作用^[65],宏观上则表现为促进岩石—流体相互作用,加速裂缝亚临界扩展,进而加剧井壁失稳风险。

裂缝亚临界扩展室内实验主要采用双扭试件法^[66]。对裂缝亚临界扩展数据进行处理分析^[67]:

$$u = A \left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^n \quad (2)$$

通常岩石裂缝的亚临界扩展速率在 10^{-4} m/s量

级以下(图7)。周义^[68]测得致密砂岩的裂缝亚临界扩展指数为38~57,页岩的测试值最高可达80以上^[69],该值越大表明岩样内部微裂缝越发育、胶结强度越弱,发生裂缝亚临界扩展的趋势越强。Atkinson等^[70]对石英砂岩、灰岩和花岗岩等在不同温度下的裂缝亚临界扩展实验分析表明,温度越高,裂缝亚临界扩展指数越大,扩展速率越快^[71],与式(1)的预测趋势符合。

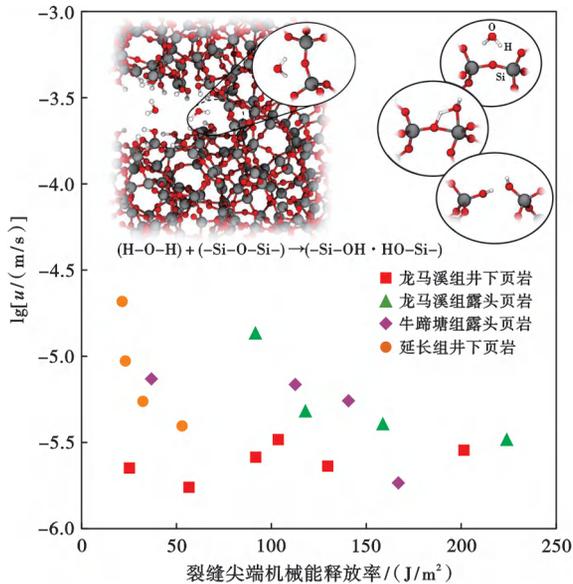


图7 海相/陆相页岩裂缝亚临界扩展速率^[72]

Fig. 7 Subcritical crack growth rates of fractured marine/terrestrial shales

岩石的裂缝亚临界扩展特征主要通过应力腐蚀模型^[73],借助离散元模拟方法,建立与岩石宏观力学特性和井壁稳定性^[50]的联系。在具体的岩石变形破坏或井壁失稳模拟中,首先通过裂缝亚临界扩展速率测

试确定基础实验参数,再基于实验结果反演岩石颗粒胶结破坏与应力和时间等变量的函数关系,并以此为基础模型,模拟复杂应力及流体作用下岩石的宏观变形破坏力学过程。目前,部分学者^[50,73-74]及笔者基于该方法已实现了对高应力条件下岩石蠕变、渗透率演化和均质地层井壁失稳的有效模拟(图8,图9)。

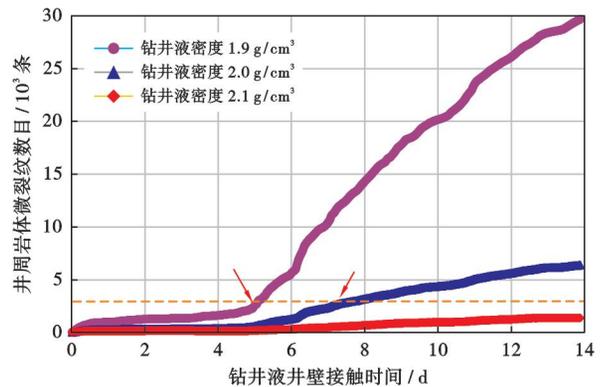


图8 井周裂缝条数随时间变化曲线

Fig. 8 Number of cracks versus drilling fluid soaking time around wellbore

深部破碎地层发育大量小尺度天然裂缝和胶结强度低的弱结构面,在钻井复杂工况下,易发生裂缝慢速扩展与延伸。采用裂缝亚临界扩展实验测试方法,基于裂缝亚临界扩展指数与扩展速率能够定量评价破碎地层岩石的微裂缝发育程度和胶结强度^[50,66,69],有效描述岩石在微观上的胶结破坏过程,预测裂缝扩展对应力、温度和流体介质等物理化学因素变化的响应规律,支撑建立考虑裂缝亚临界扩展的井壁失稳模型,揭示深部破碎地层井壁失稳的时间滞后效应与掉块垮塌规律。

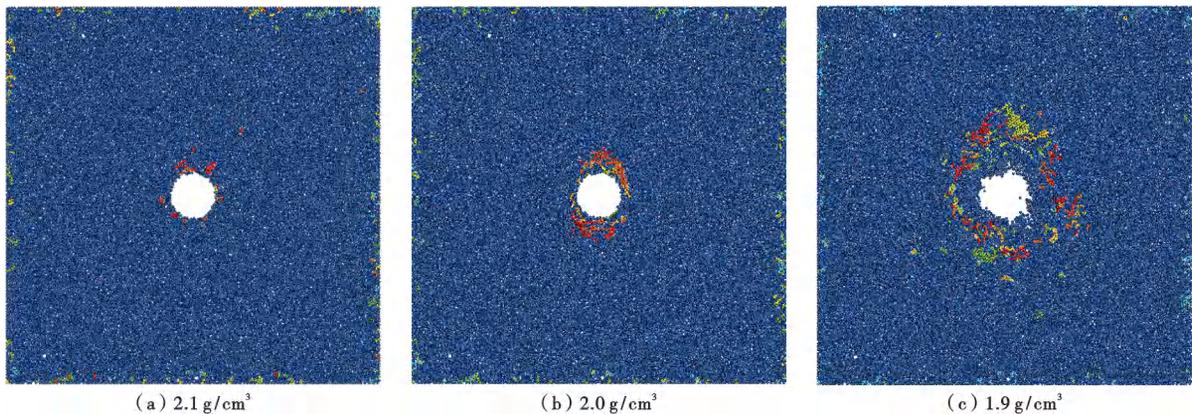


图9 不同钻井液密度下页岩井壁破碎特征

Fig. 9 Shale wellbore failure characteristics under different drilling fluid densities

3.4 井壁失稳动态演化

深部破碎地层钻井井壁失稳动态演化包含两个方面,一是同一井段在不同井眼延伸阶段或同一时刻不

同井段的失稳风险演变,但此处实质上是进行井壁静力学失稳对比分析。如图10所示,对于连续性差且井眼轨迹复杂的破碎层段,当井眼从A阶段延伸到B阶

段时,根据“应力壳”原理^[55,75],井壁上 P_1 点的应力状态可能发生恶化,进而由稳定变为失稳状态;在 B 阶段,井眼轨迹上 P_1 和 P_2 虽然所处的远场地应力和岩石力学性质相近,但可能由于位置及井壁破碎情况不

同,导致受力状态和稳定性存在明显差异。上述随井眼延伸过程井壁稳定状态的动态演化分析,在现有基于井眼横截面或局部单元体的失稳评价中往往未受到足够的重视。

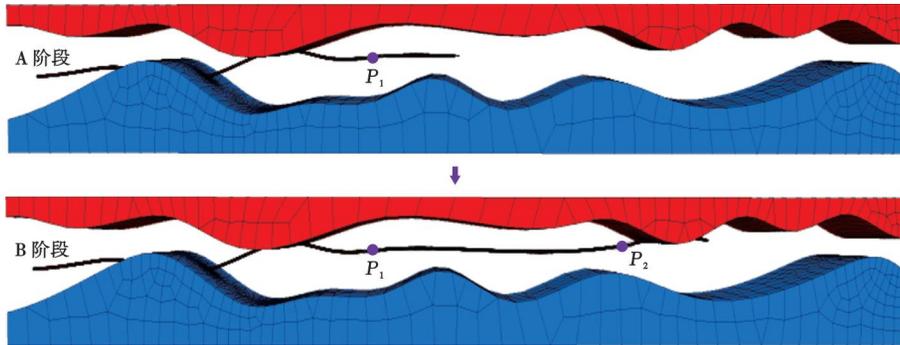


图 10 长裸眼水平段井眼轨迹穿行示意

Fig. 10 Schematic diagram of borehole trajectory in long open hole horizontal section

井壁失稳动态演化的第 2 个方面指在动载荷持续作用下,井壁稳定性的演变,该过程实质是井壁动力学失稳研究。破碎地层岩块胶结强度低,钻柱上提下放对井壁的碰撞摩擦、井筒压力波动、钻井液冲刷(泵排量过大或切力过高)等均可能导致井壁失稳,且这类动力学失稳在实际钻井过程中越来越突出^[6-7,52]。把动载荷作用纳入失稳模型将是破碎地层井壁失稳机理研究与失稳预测的关键。如能考虑破碎岩块尺寸分布、摩擦特性和力学强度等因素,有助于进一步探索局部动载荷在井壁围岩中的传递衰减规律,定量评价其扰动强度和影响范围,计算由动载荷冲击引起的井壁附加坍塌压力,为深部破碎地层井壁动力学失稳的预测与防控提供有效指导。

3.5 井壁力链网络结构表征

深部破碎地层离散程度高,井壁围岩位移和应力分布的连续性差,现有井壁失稳分析手段往往难以适用于破碎井壁的失稳机理分析。在岩土工程和煤矿等矿山开采领域^[53-55,76],力链分析理论与方法常被用于边坡、顶煤与覆岩等的稳定性研究。已有研究表明,力链是非连续介质传递载荷的主要形式,可以作为探究破碎地层宏观力学行为和细观相互作用机理的桥梁^[76-79],弥补采用连续介质力学方法研究破碎地层井壁失稳的局限性。具体来讲,破碎地层井壁围岩的应力分布特征可以通过力链的强弱、密度、方向系数和承载不均匀度等参数进行表征。以井壁失稳为例(图 11),局部区域的力链强度若达到极限强度,则宏观表现为该位置的岩体结构破坏。

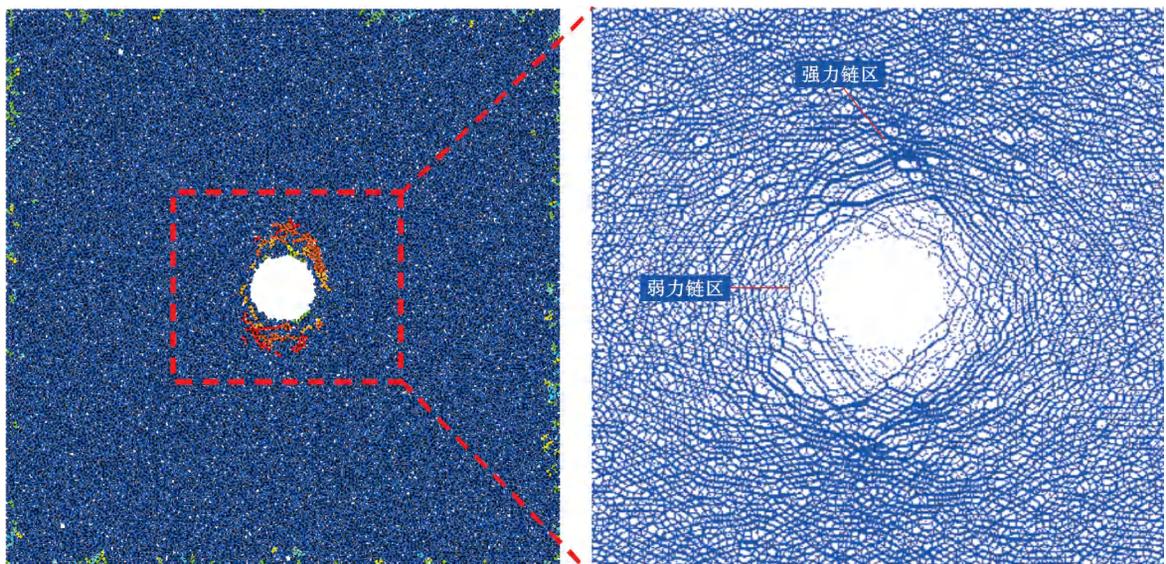


图 11 井壁失稳区域与力链特征关联性

Fig. 11 Correlation between wellbore instability regions and force chain characteristics

采用力链分析方法,引入力链网络结构表征参数,有助于直观定量地描述井眼延伸过程井周应力场和破碎岩块接触关系的演变过程,揭示破碎地层井壁的承压演化机制和失稳规律。厘清井周力链网络结构演变与掉块垮塌的内在联系,建立力链网络结构参数与井壁失稳间的关联模型,有望形成以力链理论为基础的破碎地层井壁失稳判据,解决深部破碎地层井壁失稳研究的关键难题之一。

3.6 大尺寸物理模拟

缺乏失稳物理模拟实验测试装备与方法是深部破碎地层井壁失稳机理的另一难点。对于完整性较好的连续性地层,现有常规岩石力学测试方法等已能够较好地满足研究需求。但由于破碎地层岩体结构复杂、连续性差,最小表征单元体的尺寸可能会显著大于完整性地层。同时,现有井壁失稳物理模拟实验方法尚难以模拟破碎地层岩体弱结构面和钻井参数等对井壁稳定性的影响。为此,笔者团队研发了可用于深部破碎地层井壁失稳实验模拟的真三轴多物理场深部资源

钻采实验测试系统(图 12),以及能够有效表征破碎地层井壁—近井带—远井带地质—工程环境的大尺寸岩样设计与制备方法。

在井壁失稳物理模拟大尺寸岩样制备环节,可以通过井下岩心破碎块体和钻井返出掉块统计确定岩块尺寸范围,并根据相似准则进一步确定模拟岩块的尺寸分布;井周破碎岩块的胶结强度可以通过真实岩样与模拟岩样胶结面的细观力学参数对比测试进行标定和校正。在大尺寸物理模拟实验中,改变三向主应力、模拟裸眼段长度、近井带岩块尺寸级配和胶结强度等参数,能够模拟深部地层的复杂地质力学环境和井壁破碎特征;调整钻压、转速、液柱压力和井底钻头振动参数等,能够模拟井眼延伸过程中工程因素对井壁稳定性的影响。大尺寸井壁失稳物理模拟实验有助于加深对破碎地层井壁失稳特征与规律的直观认识,辅助井壁失稳数值模型的验证与优化,为失稳机理揭示提供关键实验证据,是深部破碎地层井壁失稳研究的关键实验技术。

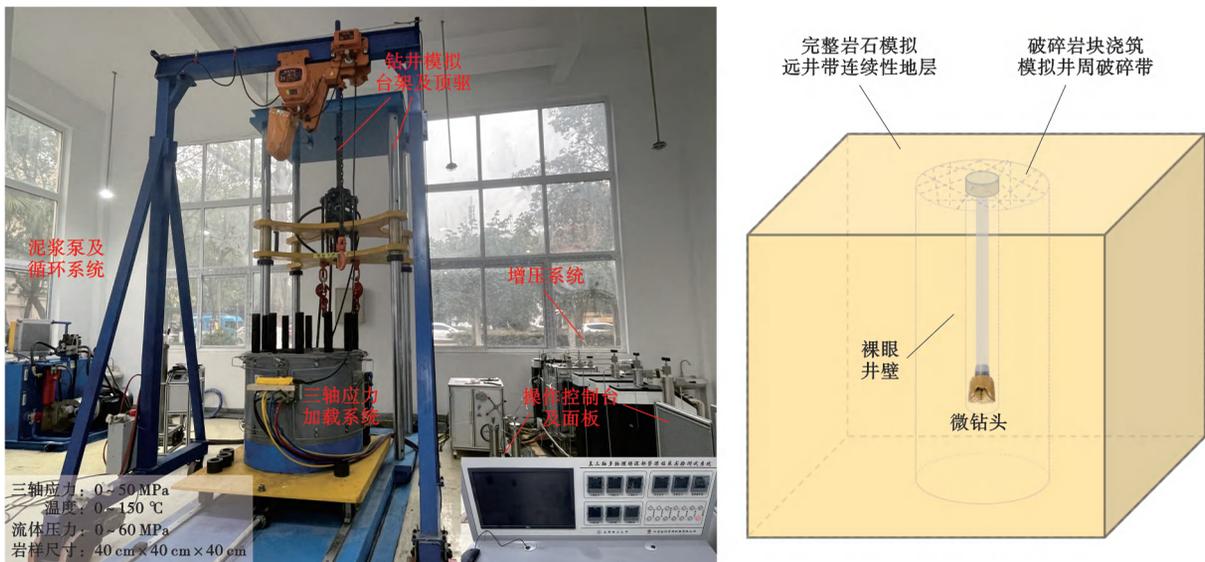


图 12 真三轴多物理场深部资源钻采实验测试系统

Fig. 12 The multiphysics true triaxial test system for drilling and production of deep resources

4 深部破碎地层井壁失稳风险评价

深部破碎地层井壁失稳具有复杂的地质—工程背景,失稳的发生受到地层参数、工程静力学和动力学参数的共同影响。由于深部破碎地层岩体胶结强度弱、宏观强度偏低,钻柱载荷大,钻井液密度与黏度均偏高,产生的井筒压力波动和井壁冲刷作用均较强,实钻过程钻柱碰撞摩擦等动力学参数对破碎带井壁稳定性的影响相比完整性地层更为显著。笔者初步总结了 3

大类 8 小类 24 个子项综合评价破碎地层的井壁失稳风险(图 13)。在此基础上,基于机器学习等方法进行井壁坍塌压力和井眼扩径率的智能预测,以及掉块诱发卡钻等失稳衍生风险的评价。每个子项指标的取值范围和权重比例有待通过井壁失稳机理认识深化和工程试验进行确定和优化。随着数据库的丰富和数据质量的提升,可以通过大数据分析和机器学习等人工智能手段对模型进行迭代升级,提升模型预测精度并拓展其应用边界。

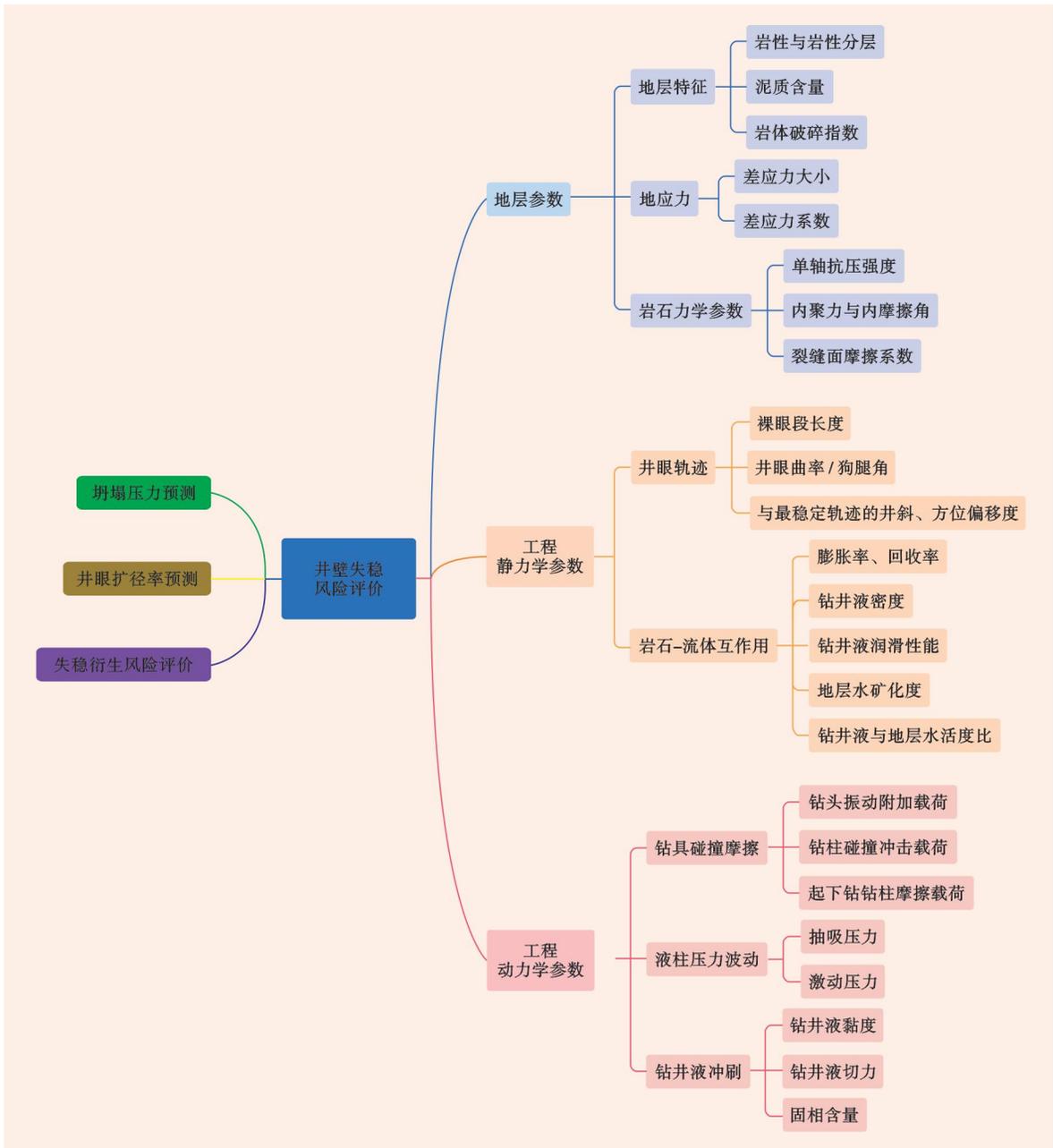


图 13 破碎地层井壁失稳风险评价框架

Fig. 13 Framework for evaluating the risk of wellbore instability in fractured formations

5 结 论

(1) 基于离散—连续耦合法,建立涵盖复杂井眼轨迹、地层和井周岩体破碎特征的跨尺度井壁失稳物理模型,是开展破碎地层井壁失稳地质—工程一体化研究的关键基础。

(2) 升级井壁失稳大尺寸物理模拟实验设备与方法,结合力链理论可有效支撑破碎井壁承压演化机制和失稳机理攻关;岩块摩擦特性与井壁裂缝亚临界扩展可作为揭示井壁失稳时间滞后效应和井壁掉块垮塌失稳规律的关键着力点;探索工程因素对井壁静/动力学失稳的影响机制,有助于深化长裸眼井段井壁稳定

性动态演化规律认识。

(3) 依托于机理认识深化,建立涵盖地层特征与地质力学参数、工程静/动力学参数的井壁失稳风险综合评价模型,支撑井壁坍塌压力、井眼扩径率和失稳衍生风险的智能预测与评价。通过与大数据和机器学习等人工智能手段的交叉融合,有望进一步形成井壁失稳风险早期快速识别和失稳防控辅助决策系统,支撑深部破碎地层安全高效钻井。

符号注释: u —裂缝亚临界扩展速率, m/s ; G —裂缝扩展过程的机械能释放率, J/m^2 ; G_E —裂缝临界状态的机械能释放率, J/m^2 ; ΔF^* —裂缝尖端流体分子

吸附活化能, J ; α —活化面积, m^2 ; a_0 —原子间的晶格间距, m ; ω_0 —基础晶格频率, s^{-1} ; k —玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} J/K$; T —环境温度, K ; A —与实验条件相关的常数, m/s ; K_I 、 K_{IC} —任意时刻裂缝尖端应力强度因子和岩石材料临界断裂韧性, $MPa \cdot m^{0.5}$; n —裂缝亚临界扩展指数; σ_H —最大水平主应力梯度; MPa/hm ; σ_h —最小水平主应力梯度; MPa/hm ; σ_v —垂向应力梯度; MPa/hm 。

参 考 文 献

- [1] 贾承造. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 1-12.
JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 1-12.
- [2] 何登发, 贾承造, 赵文智, 等. 中国超深层油气勘探领域研究进展与关键问题[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1162-1172.
HE Dengfa, JIA Chengzao, ZHAO Wenzhi, et al. Research progress and key issues of ultra-deep oil and gas exploration in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1162-1172.
- [3] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 533-546.
HE Zhiliang, MA Yongsheng, ZHU Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533-546.
- [4] 李建忠, 陶小晚, 白斌, 等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 52-67.
LI Jianzhong, TAO Xiaowan, BAI Bin, et al. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 52-67.
- [5] 翟科军, 寇春松, 陈修平, 等. 断裂带破碎地层井壁稳定机理的离散元法分析[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(5): 559-565.
ZHAI Kejun, KOU Chunsong, CHEN Xiuping, et al. Analyzing well instability mechanisms in broken formations of faulted zones based on discrete element method[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(5): 559-565.
- [6] 王伟吉, 李大奇, 金军斌, 等. 顺北油气田破碎性地层井壁稳定技术难题与对策[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(13): 5205-5212.
WANG Weiji, LI Daqi, JIN Junbin, et al. Technical problems and measures of wellbore stability of broken formation in Shunbei oil and gas field[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(13): 5205-5212.
- [7] 金军斌, 欧彪, 张杜杰, 等. 深部裂缝性碳酸盐岩储层井壁稳定技术研究现状及展望[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2021, 18(6): 47-54.
JIN Junbin, OU Biao, ZHANG Dujie, et al. Research status and prospect of borehole stability technology in deep fractured carbonate reservoirs[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2021, 18(6): 47-54.
- [8] HUBBERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. Transactions of the AIME, 1957, 210(1): 153-168.
- [9] WESTERGAARD H M. Plastic state of stress around a deep well[J]. Elasticity, 1940, 27: 1-5.
- [10] LOW P F, ANDERSON D M. Osmotic pressure equations for determining thermodynamic properties of soil water[J]. Soil Science, 1958, 86(5): 251-253.
- [11] YEW C H, CHENEVERT M E, WANG C L, et al. Wellbore stress distribution produced by moisture adsorption[J]. SPE Drilling Engineering, 1990, 5(4): 311-316.
- [12] DETOURNAY E, CHENG A H D. Poroelastic response of a borehole in a non-hydrostatic stress field[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, 25(3): 171-182.
- [13] GAO Jiajia, DENG Jingen, LAN Kai, et al. Poroelastoeffect on wellbore stability in transversely isotropic medium subjected to local thermal non-equilibrium[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 96: 66-84.
- [14] YU Mengjiao, CHENEVERT M E, SHARMA M M. Chemical-mechanical wellbore instability model for shales; accounting for solute diffusion[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 38(3/4): 131-143.
- [15] NGUYEN V X, ABOUSLEIMAN Y N. Poromechanics response of inclined wellbore geometry in chemically active fractured porous media[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(11): 1281-1294.
- [16] EKBOTE S, ABOUSLEIMAN Y. Porochemoelastoeffect solution for an inclined borehole in a transversely isotropic formation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(5): 522-533.
- [17] AADNOY B S. Modeling of the stability of highly inclined boreholes in anisotropic rock formations[J]. SPE Drilling Engineering, 1988, 3(3): 259-268.
- [18] DING Yi, LUO Pingya, LIU Xiangjun, et al. Wellbore stability model for horizontal wells in shale formations with multiple planes of weakness[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 52: 334-347.
- [19] 刘志远, 陈勉, 金衍, 等. 多弱面地层水平井裸眼井壁垮塌量计算模型[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 102-107.
LIU Zhiyuan, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Calculation model for bore-hole collapse volume of a horizontal openhole in multiple-weak-plane formation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 102-107.
- [20] 马天寿, 陈平. 页岩地层中孔隙热弹性井眼稳定力学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 3613-3623.
MA Tianshou, CHEN Ping. Poroelastoeffect mechanical model of wellbore stability in shale formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3613-3623.
- [21] 高永海, 尹法领, 张党生, 等. 水合物储层水平井钻井井筒—储层耦合模型与井壁稳定性分析[J]. 石油学报, 2023, 44(7): 1151-1166.
GAO Yonghai, YIN Faleng, ZHANG Dangsheng, et al. Wellbore-reservoir coupling model and borehole stability analysis of horizontal well drilling in hydrate reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1151-1166.
- [22] AL-AJMI A M, ZIMMERMAN R W. Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(3): 431-439.
- [23] OKLAND D, COOK J M. Bedding-related borehole instability in high-angle wells[R]. SPE-47285-MS, 1998.
- [24] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[C]// Proceedings of NARMS-Tac. Toronto: NARMS-Tac, 2002: 267-273.
- [25] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 基于直剪试验的页岩强度各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 874-883.
HENG Shuai, YANG Chunhe, ZENG Yijin, et al. Anisotropy of shear strength of shale based on direct shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 874-883.

- [26] 金衍,陈勉,陈治喜,等. 弱面地层的直井井壁稳定力学模型[J]. 钻采工艺,1999,22(3):13-14.
JIN Yan, CHEN Mian, CHEN Zhixi, et al. Mechanics model of sidewall stability of straight wells drilled through weakly consolidated formations[J]. *Drilling & Production Technology*, 1999, 22(3): 13-14.
- [27] 黄荣樽,陈勉,邓金根,等. 泥页岩井壁稳定力学与化学的耦合研究[J]. 钻井液与完井液,1995,12(3):15-22.
HUANG Rongzun, CHEN Mian, DENG Jingen, et al. Study on shale stability of wellbore by mechanics coupling with chemistry method [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 1995, 12(3): 15-22.
- [28] 曹文科. 力学-化学-热耦合作用对各向异性页岩井壁稳定性影响规律研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2017.
CAO Wenke. Study of mechanical-chemical-thermal coupling effect on wellbore stability in anisotropic shale formation [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [29] 梁利喜,丁乙,刘向君,等. 硬脆性泥页岩井壁稳定渗流-力化耦合研究[J]. 特种油气藏,2016,23(2):140-143.
LIANG Lixi, DING Yi, LIU Xiangjun, et al. Seepage-mechano-chemistry coupling of wellbore stability in hard-brittle shale[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(2): 140-143.
- [30] 邓媛,何世明,邓祥华,等. 力化耦合作用下的层理性页岩气水平井井壁失稳研究[J]. 石油钻探技术,2020,48(1):26-33.
DENG Yuan, HE Shiming, DENG Xianghua, et al. Study on wellbore instability of bedded shale gas horizontal wells under chemo-mechanical coupling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 26-33.
- [31] CHENG Wan, JIANG Guosheng, LI Xiaodong, et al. A poroelastomothermoelastic coupling model for continental shale wellbore stability and a case analysis[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 182: 106265.
- [32] TEMBE S, LOCKNER D A, WONG T F. Effect of clay content and mineralogy on frictional sliding behavior of simulated gouges: binary and ternary mixtures of quartz, illite, and montmorillonite[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2010, 115(B3): B03416.
- [33] KOHLI A H, ZOBACK M D. Frictional properties of shale reservoir rocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(9): 5109-5125.
- [34] 时贤,程远方,蒋恕,等. 页岩微观结构及岩石力学特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):3439-3445.
SHI Xian, CHENG Yuanfang, JIANG Shu, et al. Experimental study of microstructure and rock properties of shale samples[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 3439-3445.
- [35] BONNELYE A, SCHUBNEL A, DAVID C, et al. Strength anisotropy of shales deformed under uppermost crustal conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(1): 110-129.
- [36] 单俊芳,徐松林,张磊,等. 岩石节理动摩擦过程中的声发射和产热特性研究[J]. 实验力学,2020,35(1):41-57.
SHAN Junfang, XU Songlin, ZHANG Lei, et al. Investigation on acoustic emission and heat production characteristics on joint surfaces due to dynamic friction[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(1): 41-57.
- [37] 姚路,马胜利. 断层同震滑动的实验模拟-岩石高速摩擦实验的意义、方法与研究进展[J]. 地球物理学进展,2013,28(2):607-623.
YAO Lu, MA Shengli. Experimental simulation of coseismic fault sliding-significance, technological methods and research progress of high-velocity frictional experiments[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(2): 607-623.
- [38] HU Wei, HUANG Runqiu, MCSAVENEY M, et al. Mineral changes quantify frictional heating during a large low-friction landslide[J]. *Geology*, 2018, 46(3): 223-226.
- [39] LI Daqi, YANG Bin, JIN Junbin, et al. Friction coefficients calculation via surface roughness characterization for tight sedimentary rocks[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48(7): 9287-9298.
- [40] YAN Xiaopeng, YOU Lijun, KANG Yili, et al. Impact of drilling fluids on friction coefficient of brittle gas shale[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 106: 144-152.
- [41] 康毅力,杨斌,李相臣,等. 页岩水化微观作用力定量表征及工程应用[J]. 石油勘探与开发,2017,44(2):328-335.
KANG Yili, YANG Bin, LI Xiangchen, et al. Quantitative characterization of micro forces in shale hydration and field applications[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(2): 301-308.
- [42] 腾俊洋,唐建新,张宇宁,等. 单轴压缩下层状含水页岩损伤破坏过程及特征[J]. 岩土力学,2017,38(6):1629-1638.
TENG Junyang, TANG Jianxin, ZHANG Yuning, et al. Damage process and characteristics of layered water-bearing shale under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(6): 1629-1638.
- [43] LABENSKI F, REID P, SANTOS H. Drilling fluids approaches for control of wellbore instability in fractured formations[R]. SPE-85304-MS, 2003.
- [44] YOU Lijun, KANG Yili, CHEN Zhangxin, et al. Wellbore instability in shale gas wells drilled by oil-based fluids[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 72: 294-299.
- [45] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]//Proceedings of the International Symposium on Rock Fracture. Nancy: ISRM, 1971: 129-136.
- [46] 侯冰,金衍,李松,等. 不同粒径特征的砾石层井壁围岩破坏机制[J]. 天然气工业,2015,35(11):66-70.
HOU Bing, JIN Yan, LI Song, et al. Failure mechanisms of borehole wall rocks in gravel beds with different grain sizes[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(11): 66-70.
- [47] KARATELA E, TAHERI A. Three-dimensional hydro-mechanical model of borehole in fractured rock mass using discrete element method[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 53: 263-275.
- [48] WU Huanran, ZHAO Jidong, GUO Ning. Multiscale insights into borehole instabilities in high-porosity sandstones[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(5): 3450-3473.
- [49] DUAN Kang, WU Wei, KWOK C Y. Discrete element modelling of stress-induced instability of directional drilling boreholes in anisotropic rock[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 55-67.
- [50] PARK N, OLSON J E, HOLDER J. Stress-corrosion cracking as an alternative time-dependent shale-stability model [J]. *SPE Drilling & Completion*, 2010, 25(2): 168-176.
- [51] ZHAO Haifeng, CHEN Mian, LI Yawei, et al. Discrete element model for coal wellbore stability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 54: 43-46.
- [52] 杨玉贵,蔡文军,幸雪松,等. 渤中区块破碎性地层井壁失稳机理及对策[J]. 科学技术与工程,2023,23(22):9476-9483.
YANG Yugui, CAI Wenjun, XING Xuesong, et al. Mechanism

- and countermeasure of wellbore instability of fractured formation in Bozhong block[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(22): 9476-9483.
- [53] 贾敏才, 陈纯, 吴邵海. 冲击荷载作用的离散-连续耦合数值模拟[J]. *水利学报*, 2016, 47(8): 1079-1086.
JIA Mincai, CHEN Chun, WU Shaohai. Discrete and continuous coupling numerical simulation of the impact loading[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(8): 1079-1086.
- [54] 田涯, 涂立啸, 周伟, 等. 基于离散-连续耦合计算的露天矿边坡失稳特征与影响研究[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(8): 230-236.
TIAN Ya, TU Lixiao, ZHOU Wei, et al. Study on slope instability characteristics and influence of open-pit mine based on discrete-continuous coupling calculation[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(8): 230-236.
- [55] 高峰, 谭绪凯, 陈晓宇, 等. 基于离散-连续耦合方法的隧道压力拱特性研究[J]. *计算力学学报*, 2020, 37(2): 218-225.
GAO Feng, TAN Xukai, CHEN Xiaoyu, et al. Research on tunnel pressure arch based on coupled discrete and continuous method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, 37(2): 218-225.
- [56] BYERLEE J. Friction of rocks[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116(4): 615-626.
- [57] 陈颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
CHEN Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. *Rock physics*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [58] 王焕, 李海兵, 张蕾, 等. 龙门山断裂带假玄武玻璃特征及断层弱化机制的探讨[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(5): 1698-1714.
WANG Huan, LI Haibing, ZHANG Lei, et al. Pseudotachylytes in the Longmen Shan fault zone and fault weakening mechanisms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(5): 1698-1714.
- [59] WANG Huan, LI H B, DI TORO G, et al. Melting of fault gouge at shallow depth during the 2008 MW 7.9 Wenchuan earthquake, China [J]. *Geology*, 2023, 51(4): 345-350.
- [60] 左京杰, 张振华, 姚如钢, 等. 川南页岩气地层油基钻井液技术难题及案例分析[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(3): 294-300.
ZUO Jingjie, ZHANG Zhenhua, YAO Rugang, et al. Technical difficulties and case study of oil base drilling fluid operation in shale gas drilling in south Sichuan[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(3): 294-300.
- [61] 鲜保安, 高德利, 徐凤银, 等. 中国煤层气水平井钻完井技术研究进展[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1974-1992.
XIAN Bao'an, GAO Deli, XU Fengyin, et al. Research progress of coalbed methane horizontal well drilling and completion technology in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1974-1992.
- [62] HORSRUD P, HOLT R M, SONSTEBO E F, et al. Time dependent borehole stability: laboratory studies and numerical simulation of different mechanisms in shale[R]. SPE-28060-MS, 1994.
- [63] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1921, 221: 163-198.
- [64] WIEDERHORN S M, BOLZ L H. Stress corrosion and static fatigue of glass[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1970, 53(10): 543-548.
- [65] LAWN B R. *Fracture of brittle solids*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [66] 万琳辉, 曹平, 黄永恒, 等. 水对岩石亚临界裂纹扩展及门槛值的影响研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(9): 2737-2742.
WANG Linhui, CAO Ping, HUANG Yongheng, et al. Study of subcritical crack growth of rocks and threshold values in different environments[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2737-2742.
- [67] CHARLES R J. Static fatigue of glass. I[J]. *Journal of Applied Physics*, 1958, 29(11): 1549-1553.
- [68] 周义. 流体作用下致密砂岩的亚临界裂纹扩展规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
ZHOU Yi. Study on subcritical crack propagation of tight sandstone under fluid[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [69] SWANSON P L. Subcritical crack growth and other time- and environment-dependent behavior in crustal rocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B6): 4137-4152.
- [70] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B6): 4077-4114.
- [71] NARA Y, KANEKO K. Sub-critical crack growth in anisotropic rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(3): 437-453.
- [72] RODRIGUES B P, HÜHN C, ERLEBACH A, et al. Parametrization in models of subcritical glass fracture: activation offset and concerted activation[J]. *Frontiers in Materials*, 2017, 4: 20.
- [73] POTYONDY D O. Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(5): 677-691.
- [74] 胡光辉, 徐涛, 陈崇枫, 等. 基于离散元法的脆性岩石细观蠕变失稳研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(9): 26-36.
HU Guanghui, XU Tao, CHEN Chongfeng, et al. A microscopic study of creep and fracturing of brittle rocks based on discrete element method[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(9): 26-36.
- [75] 刘万荣. 采场围岩力链成壳机制及力学特征研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
LIU Wanrong. Mechanical characteristics and the shell formation mechanism of the force chain of surrounding rock in stope[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [76] 杨柳, 李飞, 王金安, 等. 综放开采顶煤与覆岩力链结构及演化特征[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(8): 2144-2154.
YANG Liu, LI Fei, WANG Jinan, et al. Structures and evolution characteristics of force chains in top coal and overlying strata under fully mechanized caving mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2144-2154.
- [77] 王金安, 杨柳, 李飞. 散体介质复杂力链网络演化持续同调拓扑研究[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(5): 728-736.
WANG Jinan, YANG Liu, LI Fei. Topological study of persistent homology on complicated force chain network evolution in granular media[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(5): 728-736.
- [78] 陈世达, 汤达祯, 侯伟, 等. 深部煤层气地质条件特殊性与储层工程响应[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1993-2006.
CHEN Shida, TANG Dazhen, HOU Wei, et al. Geological particularity and reservoir engineering response of deep coalbed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1993-2006.
- [79] 周世琛, 周博, 薛世峰, 等. 基于离散元法的天然气水合物沉积物剪切带演化机理[J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 101-111.
ZHOU Shichen, ZHOU Bo, XUE Shifeng, et al. Mechanisms of shear band propagation in gas hydrate-bearing sediments based on DEM[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 101-111.