

引用格式: 成海, 张逸群, 王印, 等. 超深定向井地质工程力学耦合机理研究进展与认识[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 593-599.

CHENG Hai, ZHANG Yiqun, WANG Yin, et al. Progress and understanding on geology-drilling engineering-mechanics coupling mechanism of ultra-deep directional wells[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 593-599.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.04.009

超深定向井地质工程力学耦合机理研究进展与认识

成海¹, 张逸群², 王印³, 刘超³

(1. 中国石化石油工程技术服务有限公司, 北京 100020; 2. 中国石油大学(北京), 北京 102249;
3. 中国石化经纬有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 超深定向井是开发深层、超深层油气的重要手段, 但深部地层在地形地貌、地层岩性、压力系统、储层流体和工程力学特征等方面存在的复杂性, 使超深定向井钻完井工程面临着巨大的挑战。因此, 开展超深定向井地质工程力学耦合机理研究对于高效开发深层、超深层油气具有重要意义。从超深复杂构造条件下的三维地质建模、地层岩石力学和地应力的评估、超深复杂岩性多成因地层压力预测以及超深定向井地层-钻头-钻柱耦合力学计算4个方面对超深定向井地质工程力学耦合机理研究进行了梳理总结, 分析认为: 由于深层地质力学具有抽象性和较强的各向异性, 导致了目前地质力学成果很难实际应用在超深定向井钻井中。对此, 需要深入开展微观-介观-宏观多尺度耦合研究, 充分利用人工智能及大数据进行三维地质建模; 通过岩石力学和大数据等手段, 创新融合理论与新技术, 综合实验测试与现场数据, 建立地应力预测的新方法; 深入开展随钻测量技术研究, 建立地层孔隙压力预测及监测数据平台; 基于地质资料及人工智能平台, 优选钻井参数、钻具组合, 建立超深定向井钻柱-钻头-岩石系统动力学模型, 为中国安全高效开展深层、超深层定向井钻井提供理论支撑与技术指导。

关键词: 地质工程力学耦合机理; 超深定向井; 三维地质建模; 地应力; 地层-钻头-钻柱力学耦合

中图分类号: TE19

文献标识码: A

Progress and understanding on geology-drilling engineering-mechanics coupling mechanism of ultra-deep directional wells

CHENG Hai¹, ZHANG Yiqun², WANG Yin³, LIU Chao³

(1. Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing 100020, China; 2. China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;
3. Sinopec Matrix Corporation, Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: Deep and ultra-deep oil and gas exploration and development are key strategic areas in China's energy sector, with ultra-deep directional drilling serving as a crucial technology for accessing these resources. However, the challenges of drilling and completing ultra-deep directional wells are substantial due to complex topography, diverse formation lithologies, varying pressure systems, reservoir fluid characteristics, and the engineering mechanics of deep formations. To address these challenges and enhance the safe and efficient development of deep oil and gas resources in China, this paper introduces the concept of a geology-drilling engineering-mechanics coupling mechanism for ultra-deep directional wells. The paper systematically reviews the progress and identifies existing problems in the geology-drilling engineering-mechanics coupling mechanism of ultra-deep oil and gas drilling. It also proposes directions for future research and development. It is emphasized that research on the coupling mechanism in China is still in its early stages and requires further integration of geology, mechanics, and engineering disciplines to develop efficient drilling technologies suitable for ultra-deep directional wells.

Keywords: geology-drilling engineering-mechanics coupling mechanism; ultra-deep directional well; 3D geological modeling; geostress; rock-bit-drill string mechanical coupling

国际上通常将超过4 500 m深的地层视为深层, 而中国则根据地区特性, 将3 500 m和4 500 m定义为深层和超深层的界限^[1-2]。在钻井工程和非常规油气领域, 普遍

将埋深超过6 000 m的地层定义为超深层^[3-4]。近年来, 中国西部地区的油气勘探取得了显著突破, 尤其是超深层油气已成为中国油气勘探、开发和储量增长的主要方

收稿日期: 2023-11-20。

第一作者简介: 成海(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事钻井工程技术研究与管理工。地址: 北京市朝阳区吉市口路9号, 邮政编码: 100020。

E-mail: chengh.os@sinopec.com

基金项目: 山东省博士后创新人才支持计划“地壳置换作用(Relamination)及其成因机制探讨: 以Song Ma造山带为例”(SDBX2023080)。

向。初步估计,中国深层和超深层油气占全国油气资源总量的34%^[5-6]。因此,加速深层和超深层油气的勘探和开发对于扩大储量、稳定产量、寻找新领域、拓展领域以及确保国家能源安全具有重要意义^[6-7]。

中国已探明的深层和超深层油气田通常规模庞大,资源丰富,储量一般在亿吨或千亿立方米以上。随着国内一系列超深井的投入使用,塔里木盆地和四川盆地等地区已取得了高产的工业油气^[8]。然而,超深定向井当前普遍面临着地质和工程上的双重挑战。复杂的地形地貌、地层岩性、压力系统、储层流体及工程力学特性等因素使得工程情况变得复杂。与此同时,钻井工程也面临着一系列挑战,包括钻进速度缓慢、定向和轨迹控制难度大、周期长、成本高、风险高、设计优化困难及工程质量控制问题^[9]。因此,超深定向井的钻井工程对地层压力预测、钻头选择、钻具组合、井壁稳定等方面提出了更高的要求。

当前,地质研究与钻井工程实践之间的密切结合尚显不足。虽然已提出地质工程一体化理念,但地质因素在钻井工程中的影响仍未得到深入研究,导致在实际施工中这些因素常被忽视。现有的地质工程一体化方法未能完全满足超深定向井钻探的复杂需求,这主要体现在:①对引发钻井工程中复杂问题的地质因素和机理缺乏深入探究,未能有效量化钻探过程中的安全风险和难度;②深部地层的特殊地质条件,如古老岩体和特殊岩石类型,对钻井影响的机制研究不足,使得超深层钻探频繁遭遇复杂故障,甚至面临重大风险;③地质工程力学耦合的研究尚不明确,地层岩石与钻头-钻柱的力学模型尚未完善,影响了超深定向井的造斜效果和轨迹控制精度。

针对上述问题与需求,基于超深定向井钻井工程中地质工程力学耦合机理的研究,系统综述了目前超深定向井钻井工程中地质工程力学耦合机理的初步研究进展以及存在问题,同时提出了超深定向井地质工程力学耦合研究方向及认识,以期对超深层油气的勘探开发提供高效的技术支撑。

1 地质工程力学耦合研究的内涵

地质工程力学是地学、力学和工程科学的交叉学科,遵循以地学为基础、以力学为手段、以工程为目的的基本思路,将各个学科有机联系起来,才能推动地质工程力学的发展。地质工程力学的研究主要包括建立合理的地质体力学模型及可靠的计算方法,通过传统的有限元、离散元等方法分别基于连续、非连续介质的力学模型,构建定量描述地质体非连续、非均匀、流固耦合及未知的初始状态的地质力学模型^[10]。

随着中国新发现油气资源品质不佳和老油田资源面临枯竭等问题的浮现,国家能源安全问题日益严峻。石油公司为了提高储层钻遇率、单井气产量和估算最终开采量(EUR),尝试将地质、力学与工程科学相结合,并在油气勘探开发过程中实施地质工程一体化,取得了较好的现场应用效果。地质工程一体化技术依托于三维模型,融合地质学、油藏工程和方案研究,实现从钻井到完井的全过程管理^[11]。近年来,地质工程一体化在四川盆地页岩气、鄂尔多斯盆地致密油的开发过程中,取得较好的应用效果。但是,在西部超深层油气的开发中,由于高温、高压和高地应力环境,一体化技术遇到了挑战^[12],特别是钻进过程中高频发生的井下复杂故障及井控安全风险。

基于此,针对超深层油气勘探开发地质与工程特点,深化研究高温、高压、高地应力环境下储层地质特征、岩石力学性质及工程力学,弥补地质工程一体化技术中对超深层地质-力学-工程之间相互作用机理与影响研究的不足。地质工程力学耦合的核心理念是以综合地质研究为基础,以力学为桥梁,连接地质模型与钻井工程力学,研究地质学、岩石力学及工程力学在钻井施工过程中各因素之间的相互影响与相互制约因素,以达到安全建井、提速提效。

在超深油气勘探开发过程中,相较于浅层,超深层地层压力、温度显著增大。而地层压力及温度的增大导致深部岩石处于强约束状态,使岩石的抗压强度、硬度、泊松比、杨氏模量及塑性系数等发生变化,对岩石可钻性造成正面或负面影响。通过地质与钻井工程耦合,研究深部岩石的破裂、摩擦、流变、失稳以及脆性-延性转变等方面的表现,指导钻井工程的施工及井壁稳定方面的分析。另外,深部地层往往经历复杂的构造历史,地质构造复杂,造成深部岩石载荷的复杂性。在多数情况下,力学系统的受力状况是未知的,在这种情况下钻头与岩石作用的力学模型无法确定。通过地质-钻井工程-力学的耦合研究,确定深部构造情况,进而研究地层-钻头-钻柱力学的模型建立及计算。由此,将地质工程力学耦合研究扩展为4个主要研究内容:①复杂构造条件下的地层岩性和层位信息预测及三维地质建模;②对地层岩石力学和地应力的评估;③对地层孔隙压力、坍塌压力和破裂压力的预测;④地层-钻头-钻柱力学耦合计算。

目前中国对地质工程力学耦合机理研究处于起步阶段,但是通过对地质工程力学耦合研究,深入理解超深定向井钻井工程中地质模型与岩石破碎机理、钻柱-井壁-钻头-岩石系统动力学行为,以实现超深层油气的安全高效钻井。

2 超深定向井地质工程力学耦合机理研究进展

2.1 超深复杂构造条件下的三维地质建模

超深层油气储层的形成较早,经历了多次构造作用,导致其地质结构异常复杂。储层中广泛分布的天然裂缝系统、层理裂隙以及由于地震资料分辨率低造成的微褶皱、小断层和小破碎带难以解释^[13],这给钻井工程带来了巨大挑战。因此,地层岩性和层位信息的精确预测对于井位的选择、井眼轨迹设计及调整至关重要。精细的三维地质建模技术能有效描绘地下地质体的分布、储层的三维空间特征和断层及裂缝网络^[14],有助于降低钻井风险。

三维地质建模的概念最早由加拿大学者提出。这一技术通过集成空间信息管理、地质解释、地质统计和图像可视化,支持地质信息的三维可视化表示,以辅助地质空间分析和决策。自提出以来,国际上的地质和计算机专家在理论方法、软件开发及应用上获得了显著进步。经过30年的发展,已提出多种地质体三维重构方案,开发出众多软件,如Petrel、Geoframe等,其中Petrel在油藏地质领域应用最广泛(表1)。中国学者虽然对三维地质建模技术研究较晚,但也取得了快速发展和实际应用成果,提出了多种技术方法和数据模型,适用于油藏、矿山、地质灾害和城市地下空间等领域。尽管国产三维地质建模软件发展迅速,但在应用效果和普及程度上仍有待提高。

三维地质建模分为两大类:一是三维地质构造建模,涵盖地层岩石、断裂等地质体的空间形态;二是属性建模,包括电阻率、孔隙度等物理化学参数的空间分布。当前的三维建模技术多聚焦于简单地质结构的建模和属性表达,但在地层结构和内部属性的综合表达、管理及复杂

地质构造(如褶皱、断层)的精细建模方面尚存在不足,特别是复杂构造模型的属性精细表达还需完善。Petrel软件集成了多种数据模型和算法,能够一体化、快速、自动构建三维地质结构和属性模型,特别适用于油藏的三维地质建模^[15]。

2.2 地层岩石力学和地应力的评估

岩石力学主要研究岩石破碎、稳定应力条件以及在不同物理环境中各种应力状态下的变形、破坏规律。通过分析岩石的成分、结构、应力等参数,岩石力学揭示了岩体的力学行为和应力状态^[16]。研究方法主要包括实验(室内、野外试验和原型监测)和理论分析。其中,科学实验是理论研究的基础,而理论分析则探讨岩石的变形、强度等特性。近年来,岩石力学模型的研究已从传统的弹性、塑性理论扩展到非连续介质理论^[17-18]。

应力,即岩体在自然条件下的内应力,通常由重力应力、构造应力等因素构成。在油气勘探开发中,地应力研究对井网部署、井壁稳定性等方面至关重要。地应力的测量和预测方法包括定性分析(利用地质或地震资料,可以大致地估计地应力场分布,但精度不高^[19-20])、现场测试(如水力压裂测试,可以精确地得出地层深部某处的地应力,但很难精确地得出整个地应力场,并且价格昂贵,测点少^[21-22])、岩心测试(如声发射、差应变分析法,由于岩心数量有限,得不到地应力的分布^[23-24])以及基于现有资料的地应力场计算(如测井解释、地震参数反演分析^[25])。然而,直接测量地应力的方法尚不存在,现场测试能提供相对精确的最小地应力值,其他方法多基于岩石形变或相关物理量进行反演。

地应力测量的众多方法中,严格上来说,真正能直接测量出地应力的方法还没有。现场测试的水力压裂法能得到一个相对精确最小地应力值,其他基于岩心测试、地

表1 三维建模主要软件及其优缺点

Table 1 Main software of 3D modeling and its advantages and disadvantages

对比项目	Petrel	Gocad	FCM	RMS	FastTracker
功能	构造建模, 油气藏建模	地震解释与反演, 速度建模, 构造建模, 数值模拟	油气藏确定性建模	构造建模, 油气藏建模, 数值模拟	油气藏建模
基于平台	Windows	Windows, Linux, Solaris, SGJ	Windows	Solaris, SGJ	Windows
可拓展性	任意拓展	任意拓展	无拓展	无拓展	无拓展
系统开放性	具有用户自己开发插件功能	开发版具有用户自己开发插件功能	—	—	—
可视化性能	三维可视化功能强	三维可视化功能强	二维显示为主	三维可视化功能较好	三维可视化功能较好
复杂构造处理能力	强	强	差	较强	一般
建模速度	快	快	较快	慢	较快

球物理资料的方法一般都是根据岩石形变或相关物理量来反演其地应力状态^[26]。地应力预测最常见的方法为测井数据计算法,该方法经过不断矫正和完善,已经在实际应用中取得较好的应用效果^[27-28]。但是测井方法局限于已钻井的井筒周围,其对三维空间的地应力分布预测不足,无法对未钻井进行预测。为了解决这一问题,利用地震数据反演空间地应力场正成为地应力预测的发展趋势。地震数据计算地应力主要是利用声波在岩石中传播的特性,提取岩石物理参数,从而反演得到地应力分布^[25]。目前,地震资料的地应力预测方法主要为基于反射系数反演、地震曲率属性和岩石物理建模,都能得到三维的地应力场模型^[25]。

2.3 超深复杂岩性多成因地层压力预测

随着勘探开发的深入,盆地内的异常压力越来越多被发现^[29-30]。在超深层油气勘探开发过程中,由于超深层复杂的构造演化背景,导致超深层油气具有更加复杂的流体及地层压力系统。在超深层油气钻井工程中,地层压力的准确预测可以保障钻井安全并且提高钻井成功率,防止钻井事故发生^[31]。

2.3.1 碳酸盐岩地层压力预测

碳酸盐岩地层超压预测目前仍然是国内外的难点问题^[32-33]。通过研究探索不同于碎屑岩超压预测的理论和计算方法,分析碳酸盐岩地层超压形成及演化机制,基于多孔介质弹性力学理论^[34],开展碳酸盐岩超压弹性参数、纵横波速度实验等岩石物理模拟实验,分析碳酸盐岩地层的岩石与流体的应力-应变关系,建立适用于碳酸盐岩地层孔隙压力预测理论模型,利用多种岩石物理模型、岩石物性参数与纵、横波速度求取开展地层超压预测所需的岩石弹性参数,并用实测数据检验了可行性并开展了误差分析^[35-36]。

目前来看,构造作用以及生烃作用是形成碳酸盐岩地层超压的重要因素,基于多孔介质弹性理论建立碳酸盐岩地层压力计算模型^[35-36]:

$$p_p = \left[\frac{(1-\varphi)C_b(p_o - p_{pm})}{(1-\varphi)C_b - \varphi C_p} \right]^{0.953} \quad (1)$$

$$C_b = \frac{3\Delta t_s^2 \Delta t_p^2}{\rho(3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2)}, \quad C_p = \frac{10^{-6}}{0.444 + 0.131 \ln \varphi} \quad (2)$$

式(1)一式(2)中: p_p 为孔隙压力,单位MPa; φ 为孔隙度,%; C_b 为岩石骨架压缩系数,单位 MPa^{-1} ; C_p 为岩石孔隙体积压缩系数,单位 MPa^{-1} ; p_o 为静岩压力,单位MPa; p_{pm} 为静水压力,单位MPa; ρ 为岩石骨架密度,单位 g/cm^3 ; Δt_s 为横波声波时差,单位 $\mu\text{s/m}$; Δt_p 为纵波声波时差,单位 $\mu\text{s/m}$ 。

2.3.2 多成因模式的泥页岩地层压力综合预测

泥页岩地层的异常高压成因机制复杂,包括不平衡压实、生烃作用、水热增压和构造运动等多种因素。对超压形成机制可以通过以下步骤来判别:首先,提取纯泥岩的声波速度、密度、电阻率等数据。其次,分析声波速度和密度的变化,判断反转现象并提取相关数据。最后,结合区域构造背景和应力测量结果,判定是否存在再次加载(构造作用)。

目前,国内外常用且使用效果较好的地层压力预测方法主要有Fillippone法^[37]、Bowers法^[38]和Eaton法^[39]这3种方法。其中,Fillippone法是根据声波速度与孔隙压力的相关性来预测地层压力^[37];Bowers法通过创建加载和卸载曲线,构建异常高压与声波速度之间的曲线关系^[38]。然而,Fillippone法和Bowers法的计算公式中都涉及多个经验参数,且地域特性明显,因此,在缺乏测量数据校准的情况下,参数的准确性存疑,这直接影响预测结果的精度和应用限制。Eaton法是基于有效地应力和泥岩压实理论,通过构建孔隙压力和声波时差、速度等参数的关系,来计算出目的层位地层压力。由于涉及参数少,因此,该方法实现起来比较容易,应用的范围也是最广(表2)。

2.4 超深定向井地层-钻头-钻柱耦合力学

地层-钻头-钻柱耦合力学分析技术是钻井工程技术人员和学者们研究的热点(表3)。钻柱动力学研究初期,受研究方法及对动力学问题的限制,以高宝奎等^[40]、刘清友等^[41]为代表的学者们,主要利用解析法、室内实验或现场试验等方法对研究钻柱的某一运动状态单独进行建模及求解,对边界条件影响钻柱运动状态的主要因素等问题进行了深入研究。解析法研究钻柱动力学特性的劣势在于:随着定向井井深的增加,超深地层钻柱系统受力更加复杂,其动力学微分方程通常难以获得解析解。解析法的不确定性与求解难度大,促使国内外学者采用实验法研究钻柱动力学问题。

基于Hamilton(汉密尔顿流体力学)原理,考虑环空钻井液压差、钻井液阻尼、钻柱与井壁接触碰撞及屈曲等因素,建立三维全井钻柱振动有限元模型,实现了钻柱纵-横-扭耦合,计算得到任意钻井参数/钻具组合下的三维全井钻柱动力学特性。在柔体动力学的Hamilton框架下建立了钻柱系统的动力学方程,考虑钻柱与井壁之间的接触非线性、钻井液黏滞阻尼作用以及钻头-岩石相互作用模型,采用节点约束技术,建立了超深定向井钻头-导向工具-钻柱耦合系统动力学方程。

表2 地层孔隙压力测井计算方法对比
Table 2 Comparison of methods for formation pore pressure calculated by logging data

	原理	优点	缺点
等效深度法	正常压实的地层,声波时差曲线有一条明显的压实趋势线;而异常压实区,声波时差曲线往往偏离正常压实趋势线	简单,容易计算	仅适用于“不平衡压实过程导致的地层欠压实”高压的情况
Eaton法	与等效深度法相似,基于正常压实理论构建正常压实趋势线,引入压实校正系数C(Eaton指数)	Eaton指数与地层埋深、声波时差间具有较好相关性,精度高,且计算相对简单	Eaton指数受制岩性、成岩作用及流体类型,须用实测压力数据矫正
Fillippone法	通过获取上覆岩层压力和有效应力,则可以得到地层孔隙压力;岩石力学参数与岩石的有效应力具有密切联系	理论基础较完善,其预测精度比等效深度法高,且不受岩性和异常压力形成机制的影响	需要大量的测井数据、实验数据;且没有考虑到其他机制对地层孔隙压力的影响
Bowers法	利用垂直有效应力与声波速度间的原始加载及卸载曲线方程直接计算出垂直有效应力,结合上覆岩层压力便可求取地层孔隙压力	不需构建正常压实趋势方程,能够计算非连续沉积地层的孔隙压力,且不受制于地层压力成因是否异常	在井资料或测压资料缺少的地区应用受限
经验统计模型	利用测井资料精准地计算地层的孔隙度和泥质含量,再结合声波时差测井获取的声波传播速度,便可计算地层孔隙压力	不受岩性和异常压力成因机制的影响,对复杂岩性剖面和压力成因地区有较大的优势,地区适用性好	涉及的参数较多,各参数的误差相互叠加致使地层孔隙压力预测精度难以保障

表3 主要钻柱动力学计算方法
Table 3 Main calculation methods of drill string dynamics

研究方法	特点	劣势
底部钻具组合二维振动方程	求解快速	不确定性与求解难度大
实验法	采用真实钻头破岩钻井,分析了岩石特性、钻压、转速对钻柱黏滑振动影响	忽略钻柱与井壁接触,不适用于定向钻井分析
底部钻具动力学方程	考虑井眼曲率、钻柱与井壁接触、钻井液黏滞阻尼影响	计算时间较长

3 存在问题及发展方向

地质工程力学耦合机理的研究尚处于初期阶段,其研究方法和工具仍待完善。尽管地质学、力学和工程科学领域已有众多研究成果和创新性认识,但这些成果在超深定向井钻井领域的实际应用上还存在困难。主要原因包括:地质学研究大多停留在定性和理论层面,缺少实用的定量分析工具;此外,超深层地质结构的复杂性及岩层和地应力的变异性,使得现有的研究成果难以直接应用于具体钻井项目。

3.1 三维地质建模发展方向

地质认识是超深层钻探的基础,精细的“甜点”空间展布模型以及三维裂缝模型可以帮助超深层钻探进行优化设计和降低工程风险。由于中国超深层油气藏地质构造复杂,目前地震资料分辨率低,无法有效识别出大量的微褶皱、小断层、小破碎带以及缝洞体系(表4)。空间上,超深层岩石力学性质和地应力各向异性强,天然裂缝发育差异大,现有的研究资料难以精细描述超深层储层各项参数的三维展布特征^[14]。利用CT扫描、显微设备观

测、岩心与露头识别等多种手段,建立微观-介观-宏观多尺度耦合研究方法,充分利用人工智能、大数据挖掘技术、新设备的研究,提高地震资料的分辨率下,构建更精确的地质模型。

3.2 地应力预测发展方向

地应力的准确预测对于井壁稳定、高效的压裂和油气勘探开发至关重要。直接地应力测量虽准确可靠,但成本较高。为了有效识别地应力场并降低成本,建议采取地应力的联合测量策略。例如,水力压裂法能够精确测定地应力,但其成本较高;而测井和地震数据则能提供连续的地应力分布信息,但精度有限。未来的发展趋势之一是结合岩石力学理论和大数据方法,整合测试、实验、勘探和开发数据,探索新的地应力场预测及其不确定性表征方法。

3.3 三压力预测发展方向

准确预测地层压力对油气高效安全开发十分关键,直接影响钻井安全和油井生产效率。目前,孔隙压力的预测主要依赖地球物理数据,但在超深层的复杂地质环境中,这些预测模型的精度和适用性还需提升。随着测

表4 断层识别方法对比
Table 4 Comparison of fault identification methods

方法	项目	操作原理	优点	缺点
传统断层识别方法	常规地震剖面	肉眼识别地震资料中反射层位的位移或中断、横向上不连续等断层特征	操作简单	周期长、主观性强,复杂断层可信度低
	井断点引导	在准确的断点时深转换前提下,井点处断层位置确定,通过井断点引导识别断层信息	准确识别出小断距断层	对于井网密度要求较高
基于地震属性的断层识别方法	相干体属性	将三维地震振幅数据转换为不连续特征的相干体属性数据,断层等表现为低相干值	算法成熟,计算速度快	相干的差异不一定严格对应断层
	曲率属性	将三维地震资料通过求导,以二维曲率算法为基础,利用网格拟合二次曲面	算法成熟,抗噪性高,可视化功能好	易受解释及软件等因素的影响,地震资料并没有参与计算
	方差体	通过计算相邻地震道之间的方差来表示各个地震道反射特征的差异,从而识别断层	抗噪声能力强,大断层识别效果好	计算速度慢,微小断层识别效果较差
断层的自动识别方法	蚂蚁追踪	在地震数据体中,“蚂蚁”会在满足预设断裂条件处散播“信息素”并聚集,实现对目标断层的识别与追踪	断层识别速度与精度较好	需要反复调试参数

控技术的进步,随钻测量的精度不断提高,将测井、录井和地震资料与大数据平台及人工智能技术相结合,可以建立基于钻前压力预测模型的随钻三压力监测系统,从而更准确地预测和监测地层孔隙压力。

3.4 地层-钻头-钻柱动力学耦合发展方向

地层-钻头-钻柱的动力学耦合对实现超深层定向井的高效钻进至关重要。超深层地质结构的复杂性,如自然造斜、地层硬度变化和砾石覆盖等,会在钻进过程中给钻头带来非预期的扰动和震荡,导致轨迹偏离和钻柱振动。这就要求更加精确地理解地层边界条件对钻柱运动的影响。精细的地质模型和岩石力学研究为此提供关键参数。研究钻柱系统的动力学,建立超深定向井的钻柱-钻头-岩石系统动力学模型,可以建立钻井参数、钻具组合和地层特性对钻柱动力的影响规律,并完成对钻柱系统的动力学的定量分析。

在人工智能和大数据技术广泛应用的背景下,应用这些技术于钻井工程将成为提升超深层定向井钻井速度的关键。利用大数据技术,结合地质、地球物理、钻完井和生产数据进行细致的地质工程力学建模,并开发地质工程力学一体化设计及优化平台。通过多学科联合攻关研究,将传统学科与最新的数据科学理论技术相结合,解决超深层油气钻井工程的关键技术难题,是超深定向井地质工程力学耦合机理钻井技术研究与发展的重点。

4 结论

超深定向井地质工程力学耦合研究是以地质为基础,根据超深地层地质特征对钻井方案进行优化调整,以确保钻井作业安全高效。由于超深层油气藏地质构造复

杂,定向井面临钻速下降、井壁掉块垮塌严重、水平井井眼轨迹控制难等技术难题,迫切需要开展地质工程力学耦合研究,以达成超深层油气的安全高效勘探开发。现阶段,中国地质工程力学耦合研究刚刚起步,地质学、力学和工程科学还需要深度融合,针对复杂的现场工况,深入开展精细三维地质模型、地应力及地层压力模型、地层-钻头-钻柱耦合力学模型研究,迭代升级软件智能大数据平台,建立一套进行地质工程力学耦合机理研究的数学模型和软件应用的科学系统方法,为中国深层、超深层油气开发、超深定向井安全高效钻井技术提供理论支撑与技术指导。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国土资源部. 石油天然气储量计算规范: DZ/T 0217—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification for calculation of petroleum and natural gas reserves: DZ/T 0217—2005[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2005.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 石油天然气钻进工程术语: GB/T 28911—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Vocabulary of drilling engineering for the petroleum and natural gas: GB/T 28911—2012[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2012.
- [3] 中华人民共和国国土资源部. 页岩气资源储量计算与评价技术规范: DZ/T 0254—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Regulation of shale gas resources/reserves estimation: DZ/T 0254—2014[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2014.
- [4] 贾承造, 张永峰, 赵霞. 中国天然气工业发展前景与挑战[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 1-11.
JIA Chengzao, ZHANG Yongfeng, ZHAO Xia. Prospects of and challenges to natural gas industry development in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2): 1-11.
- [5] 李剑, 余源琦, 高阳, 等. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 403-417.

- LI Jian, SHE Yuanqi, GAO Yang, et al. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 403-417.
- [6] 戴金星, 黄世鹏, 刘岩, 等. 中国天然气勘探开发60年的重大进展[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 689-698.
- DAI Jinxing, HUANG Shipeng, LIU Yan, et al. Significant advancement in natural gas exploration and development in China during the past sixty years[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 689-698.
- [8] 李勇, 徐珂, 张辉, 等. 塔里木盆地超深层油气钻探工程的特殊地质因素[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(3): 88-98.
- LI Yong, XU Ke, ZHANG Hui, et al. Special geological factors in drilling engineering of ultra-deep oil and gas reservoir in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(3): 88-98.
- [9] 李阳, 薛兆杰, 程喆等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57.
- LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45-57.
- [10] 李世海, 李晓, 刘晓宇. 工程地质力学及其应用中的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1125-1140.
- LI Shihai, LI Xiao, LIU Xiaoyu. Some issues in engineering geomechanics and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1125-1140.
- [11] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 1-5.
- HU Wenrui. Geology-engineering integration—a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1-5.
- [12] 贾长贵, 卞晓冰. 高温高压高应力页岩气井丁页2HF井成功压裂[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 25.
- JIA Changgui, BIAN Xiaobing. HPHT shale gas well hydraulic fracturing in Dingye 2HF[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 25.
- [13] 徐中华, 郑马嘉, 刘忠华, 等. 川南地区龙马溪组深层页岩岩石物理特征[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1-11.
- XU Zhonghua, ZHENG Majia, LIU Zhonghua, et al. Petrophysical properties of deep Longmaxi Formation shales in the southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1100-1110.
- [14] 刘清友, 朱海燕, 陈鹏举. 地质工程一体化钻井技术研究进展及攻关方向——以四川盆地深层页岩气储层为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 178-188.
- LIU Qingyou, ZHU Haiyan, CHEN Pengju. Research progress and direction of geology-engineering integrated drilling technology: A case study on the deep shale gas reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 178-188.
- [15] 陈麒玉. 基于多点地质统计学的三维地质体随机建模方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- CHEN Qiyu. Three-dimensional stochastic modeling method of geological entities based on multiple-point geostatistics[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [16] 李皋, 张毅, 杨旭. 油气勘探开发中的工程地质力学问题及研究方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2023, 45(3): 72-80.
- LI Gao, ZHANG Yi, YANG Xu. Engineering geological mechanics issues and research methods in oil and gas exploration and development[J]. Journal of Southeast Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(3): 72-80.
- [17] 曹东升, 曾联波, 黄诚, 等. 多尺度岩石力学层对断层和裂缝发育的控制作用[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2535-2556.
- CAO Dongsheng, ZENG Lianbo, HUANG Cheng, et al. Control of multi-scale mechanical stratigraphy on development of faults and fractures[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2535-2556.
- [18] 甘仁忠, 熊健, 彭妙, 等. 陆相页岩储集层岩石力学特性及能量演化特征[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(4): 472-478.
- GAN Renzhong, XIONG Jian, PENG Miao, et al. Rock mechanical properties and energy evolution of continental shale reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(4): 472-478.
- [19] 黄继新, 彭仕宓, 王小军, 等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 65-69.
- HUANG Jixin, PENG Shimi, WANG Xiaojun, et al. Application of imaging logging data in the research of fracture and ground stress[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 65-69.
- [20] 邹贤军, 陈亚琳. 四川盆地涪陵地区龙马溪组页岩横向各向同性地应力测井评价方法[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(12): 1775-1780.
- ZOU Xianjun, CHEN Yalin. Geostress logging evaluation methods of Longmaxi Formation shale in Fuling area based on transversely isotropic model, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(12): 1775-1780.
- [21] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- CAI Meifeng. Principles and techniques of geostress measurement[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [22] 葛洪魁, 林英松, 王顺昌. 地应力测试及其在勘探开发中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(1): 94-99.
- GE Hongkui, LIN Yingsong, WANG Shunchang. Geostress testing and its application in petroleum exploration and development[J]. Journal of the University of Petroleum (Science & Technology Edition), 1998, 22(1): 94-99.
- [23] 杨东辉, 赵毅鑫, 张村, 等. 循环加载对沉积岩岩石 Kaiser 效应影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2697-2708.
- YANG Donghui, ZHAO Yixin, ZHANG Cun, et al. Experimental study on the influence of cyclic loading on Kaiser effect of sedimentary rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2697-2708.
- [24] ERT M K, WILLIS D G. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. Transactions of the AIME, 1957, 210(1): 153-168.
- [25] 印兴耀, 马妮, 马正乾, 等. 地应力预测技术的研究现状与进展[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 488-504.
- YIN Xingyao, MA Ni, MA Zhengqian, et al. Review of in-situ stress prediction technology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(4): 488-504.
- [26] 尹虎, 李黔, 李建涛, 等. 利用套管变形量进行地应力反演[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 54-57.
- YIN Hu, LI Qian, LI Jiantao, et al. Inversion of in-situ stress with the amount of casing deformation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 54-57.
- [27] 夏宏泉, 刘畅, 李高仁, 等. 基于测井资料的TIV地层水平地应力计算方法[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 67-72.
- XIA Hongquan, LIU Chang, LI Gaoren, et al. A logging data-based calculation method for the horizontal TIV formation in-situ stress[J].