

引文: 范翔宇, 蒙承, 张千贵, 等. 超深地层井壁失稳理论与控制技术的研究进展[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 159-176.
FAN Xiangyu, MENG Cheng, ZHANG Qiangui, et al. Research progress in the evaluation theory and control technology of wellbore instability in ultra-deep strata[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 159-176.

超深地层井壁失稳理论与控制技术研究进展

范翔宇^{1,2} 蒙承¹ 张千贵^{2,3} 马天寿^{2,3} 李柱正⁴
王旭东⁵ 张惊喆⁶ 赵鹏斐¹ 邓健³ 周桂全¹

1. 西南石油大学地球科学与技术学院 2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室·西南石油大学
3. 西南石油大学石油与天然气工程学院 4. 中国石油川庆钻探工程有限公司地质勘探开发研究院
5. 中国石油西南油气田公司工程技术研究院 6. 中国石油西南油气田公司勘探事业部

摘要: 超深地层是我国油气勘探开发的重要领域,但因超深地层复杂地质环境导致的井壁失稳已经成为制约超深地层油气资源动用的重大技术难题之一。为此,从地质和工程2个方面系统总结分析了超深地层井壁失稳机理,进而分析了超深地层岩石物理力学实验及本构方程、地应力测量与地层压力预测等地质力学参数评价技术,并探讨了超深地层井壁稳定性评价理论与控制技术的研究进展,最后提出了促进超深地层钻井理论技术发展的建议。研究结果表明:①加强还原超深地层环境的岩石物性、力学和物理模拟实验研究,耐高温高压地应力和井筒压力测量仪器研发,是认识超深地层极端环境下岩石与地质力学特性的关键;②高温高压条件下的多场耦合岩石力学理论是构建超深地层井壁稳定性评价技术体系的基础;③攻关融合超深地层钻井的大尺寸多开井身结构设计和、抗高温高压钻井液体系、防漏堵漏工艺与材料、精细控压钻井理论与工具等井壁稳定控制技术是实现超深井钻井提质增效的前提。结论认为,超深地层井壁失稳理论与控制技术的发展不仅推动了我国油气勘探朝着超深地层进军,还有力推动了深地工程科学考察、超深层油气勘探开发理论与装备的迭代与升级。

关键词: 超深地层; 油气钻井; 井壁稳定性; 地质参数评价; 岩层控制

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.01.015

Research progress in the evaluation theory and control technology of wellbore instability in ultra-deep strata

FAN Xiangyu^{1,2}, MENG Cheng¹, ZHANG Qiangui^{2,3}, MA Tianshou^{2,3}, LI Zhuzheng⁴,
WANG Xudong⁵, ZHANG Jingzhe⁶, ZHAO Pengfei¹, DENG Jian³, ZHOU Guiquan¹

(1. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation/Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 4. CCDC Geological Exploration & Development Research Institute, Chengdu, Sichuan 610051, China; 5. Engineering Technology Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610017, China; 6. Exploration Division, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.1, p.159-176, 1/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Ultra-deep strata is an important field of oil and gas exploration and development in China. Wellbore instability caused by complex geological environment is one of the huge challenges restricting the exploitation of oil and gas resources in such strata. In this paper, the mechanism of wellbore instability in ultra-deep strata is analyzed from the geological and engineering perspectives. Then, the petrophysical-mechanical experiments and the geomechanical parameter evaluation technologies such as constitutive equation, in-situ stress measurement and formation pressure prediction for ultra-deep strata are investigated, and the wellbore stability evaluation theory and control technology for ultra-deep strata are discussed. Finally, some suggestions are put forward to promote the drilling theory and technology for ultra-deep strata. The results are obtained in three aspects. First, the petrophysical, mechanical and physical simulation experimental studies on the environment of ultra-deep strata and the research and development of in-situ stress and wellbore pressure measurement instruments for high-temperature and high-pressure conditions are crucial to understanding the rock and geomechanical properties of ultra-deep strata in extreme environment. Second, the multi-field coupled rock mechanics theory under high temperature and high pressure is the basis for establishing a technical system of wellbore stability evaluation on ultra-deep strata. Third, the integration of wellbore instability control technologies such as multi-section casing program design for large-sized boreholes, HTHP drilling fluid system, leakage prevention and plugging techniques and materials, and theory and tool for precisely managed pressure drilling is a prerequisite for safe and efficient drilling of ultra-deep wells. In conclusion, the development of the evaluation theory and control technology of wellbore instability in ultra-deep strata promotes the drilling of ultra-deep wells in China, and also drives the update and upgrade of theory and equipment for deep engineering survey and ultra-deep oil and gas exploration and development.

Keywords: Ultra-deep strata; Oil and gas drilling; Wellbore stability; Geological parameter evaluation; Strata control

基金项目: 国家自然科学基金“深部火山岩体井周多尺度力学失稳机理及钻井低力学扰动点的地层空间分布规律研究”(编号: 42172313), 四川省自然科学基金“四川盆地深层多级裂缝性页岩水平井力-化耦合失稳机理及稳定性评价方法研究”(编号: 24NSFSC1725)。

作者简介: 范翔宇, 1974年生, 教授, 博士研究生导师, 博士, 本刊编委; 主要从事油气井工程测录井、油气井工程岩石力学、工程信息与控制等方面的教学与科研工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区新都大道8号。ORCID: 0000-0002-1886-6318。E-mail: 93334271@qq.com

通信作者: 张千贵, 1982年生, 副研究员, 硕士研究生导师, 本刊青年编委; 主要从事储层地质力学评价、油气井岩石力学、岩体工程稳定性等方面的教学与科研工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区新都大道8号。ORCID: 0000-0002-7461-9880。E-mail: qgzhang@swpu.edu.cn

0 引言

为了深地科学考察、深层油气资源动用,我国油气钻探正在向深层、超深地层发展。根据 2015 年全国油气资源动态评价成果数据显示,深层、超深地层油气资源量达 671×10^8 t (油当量),占油气资源总量的 34%,39% 剩余石油和 57% 剩余天然气资源分布在超深地层^[1]。超深地层油气勘探开发已成为油气工程领域的热点。截至 2022 年,塔里木盆地“深地工程”已经完钻 160 口垂深超过 8 000 m 的超深井;四川盆地完钻垂深超过 6 000 m 的超深井有 130 口,垂深超过 8 000 m 的超深井有 12 口^[2]。超深地层的地质环境复杂,易导致井壁坍塌掉块、溢流和漏失等井下事故,给超深地层提质增效钻井带来巨大挑战。例如太和 1 井钻遇寒武系高台组盐膏岩层发生蠕变,非生产时效达 42%,其中井壁失稳卡钻损失时间占 12%^[3];顺北油气田钻进奥陶系碳酸盐岩破碎性地层时,井壁坍塌掉块严重,单井事故处理时间最长达 285 d^[4]。因此,开展超深地层井壁失稳理论与控制技术研究对推动超深地层油气资源的高效开发具有重要意义。

我国超深地层钻井始于 20 世纪 70 年代,目前已逐渐形成具有较高工程实用性的钻完井技术。但依然存在许多尚未攻克的难题,尤其是超深井钻井过程中的井壁失稳事故频发,导致钻井风险高、周期长、成本高,严重制约了超深地层油气资源勘探开发。为此,笔者总结了我国超深地层钻井工程问题、井壁失稳影响因素及机理,分析了超深地层岩石物理力学与地质力学测试技术及理论、井壁失稳评价理论和控制技术等方面的研究进展,最后提出了促进超深地层井壁失稳理论与控制技术发展的建议。

1 钻井主要工程问题与井壁失稳原因

1.1 超深地层钻井的主要工程问题

1978 年,女基井(井深 6 011 m)的开钻开启了我国超深地层钻井的序幕。然而,超深井钻井过程中井下复杂事故多发,钻井安全问题突出,主要工程问题包括:①超深井纵向上存在多套压力系统,必封点多,井身结构设计难度大;②超深钻井揭开地层层序多,涵盖破碎带、异常高压盐水层、巨厚盐膏层等复杂地层,井壁坍塌、掉块、漏失和溢流等事故频发;③由于超深井井眼设计尺寸显著增大,同等深度大尺寸岩屑明显增多,钻头破岩与岩屑摩擦

造成井筒局部温度异常升高,井壁失稳机制更为复杂,井眼坍塌问题更加严峻;④高温、高压、高盐条件下钻井液材料极易失效,其流变性及其沉降稳定性变差,导致维持井壁稳定与防漏堵漏难度增大;⑤关键钻井工具及仪器无法适应超深地层勘探极端工况,失效率高;⑥超深地层机械钻速低,现有钻头地层适应性较差、磨损严重、使用寿命短,导致钻井周期长。在上述超深井钻井的 6 种类型工程问题中,前 4 种问题均与井壁失稳密切相关。由此可见,因超深地层复杂地质环境与大尺寸井身结构导致的井壁失稳问题是制约超深井钻井提质增效的关键,深化超深地层井壁失稳机理、井壁稳定性评价与控制理论及技术研究是有效推进超深地层油气资源动用的攻关重点。我国超深地层主要钻井工程问题如表 1 所示。

1.2 超深地层井壁失稳机理分析

超深地层具有成岩环境复杂、裂缝发育、岩性差异大、高温高压等特征^[18],多因素叠合及相互作用给钻井作业带来极大挑战,甚至造成不能钻达目标地层。笔者通过对四川盆地与塔里木盆地超深井井壁失稳案例分析,总结了超深地层井壁失稳因素和机理,导致超深井失稳的主要原因可分为地质因素和工程因素两类,分别如表 2 和表 3 所示。

超深地层井壁失稳的地质因素是客观存在的,超深地层的地质环境复杂,其特征难以准确掌握是导致井壁失稳的主要客观因素。实际钻井作业中,与复杂地层不匹配或不合理的工艺设计、材料配置与工程施工,是导致超深地层井壁失稳的关键诱导因素。综合地质与工程因素分析可知,在厘清超深地层复杂地质物理力学特征并实施有效稳定性评价的基础上,需要针对性地开展精细化钻井工艺设计、研制适合的技术产品,形成地质工程一体化的成套工艺技术并严格实施管理,方能实现超深地层安全高效钻井。笔者研究发现,当前在超深地层岩石物理力学和地质力学特性、井壁稳定性评价与控制理论技术等方面已取得了一些研究成果,详细论述如下。

2 岩石物理力学及地质力学研究进展

2.1 超深地层岩石物理特性

岩石的物理特性是指岩石各相组成部分的相对比例关系不同所表现的物理状态^[10]。超深地层岩石受到高温高压耦合作用,为了探究超深地层岩石物理性质与浅层岩石的差异,并考虑岩石的孔隙结构

表 1 我国超深地层主要钻井工程问题统计表

盆地	工程问题	典型案例
四川	井身结构设计难度大	太和气区沙溪庙组—震旦系灯影组存在 6 套压力系统（压力系数 1.10 ~ 2.29），高低压互层且缝洞发育，井漏、气侵同存现象频发，以致地层必封点多，井身结构设计困难 ^[3,5]
	钻至复杂地层井壁坍塌、漏失和溢流等事故频发	川西地区莲花山构造沙湾组—峨眉山玄武岩组，多次出现井漏、失返性漏失、垮塌、卡钻等问题，平均井径扩大率 46.67% ^[6-7]
	大尺寸岩屑增多、井筒局部温度升高、井壁坍塌失稳严峻	四川盆地深地川科 1 井设计井深 10 520 m，按二开 32"、三开 17" 的井眼直径钻井，二、三开钻井过程中均出现大尺寸岩屑，破岩与岩屑摩擦导致井筒异常高温，严重影响钻井液性能，造成携岩和井壁稳定性控制困难，井壁坍塌失稳严峻
	钻井工具失效率高	川西地区双鱼石构造 SYX13X 井钻进栖霞组，因高温（温度达 160 ℃）导致定向仪器无信号而起钻 3 次 ^[8]
	地层机械钻速低	四川盆地长兴组底部地层硅质含量高，地层可钻性差，如川深 1 井平均机械钻速仅有 0.50 m/h ^[9-10]
塔里木	钻井液性能下降，维持井壁稳定难度增大	顺北油田顺北 5-1X 等 5 口井钻进奥陶系碳酸盐岩地层时，多次出现漏失、溢流、井壁坍塌掉块、阻卡等问题，共侧钻 10 余次，单井损失时间最长达 285 d ^[4,11]
	钻井工具失效率高，超深井钻具载荷大，易损坏	顺北油田碳酸盐岩储层温度大于 163 ℃，TEL-185 型和 APS175 型定向仪器使用寿命仅 30 h ^[12] 轮深 2 井发生钻具刺漏和断钻铤各 1 次，塔深 1 井发生断钻铤和断钻杆事故各 1 次 ^[13]
	地层机械钻速低	顺北油田奥陶系及以下地层白云岩、石灰岩平均日进尺为 13 m，平均单只钻头进尺为 109.3 m，平均机械钻速仅为 1.58 m/h ^[14]
准噶尔	防漏堵漏难度大	MS1 井钻至百口泉组以后，发生 20 次井漏，共漏失钻井液 1 711.10 m ³ ^[15]
	钻至复杂地层井壁坍塌、掉块事故频发	征 11 井清水河组以深地层钻进期间，平均井径扩大率为 17.33%，最高达 36.26%，累计发生 4 次短起下遇阻和 2 次电测遇阻情况 ^[16]
	地层机械钻速低	成 6 井钻遇三叠系和二叠系地层时平均机械钻速仅 1.31 m/h，平均单只钻头进尺 183.90 m ^[17]

注：1"=25.4 mm。

表 2 超深地层井壁失稳地质因素分析表

地质因素	失稳机理	典型案例
泥页岩水化作用导致岩石力学性质劣化	深层泥页岩脆性矿物含量更高，钻井流体中的水分子、活性成分与岩石矿物之间水化反应，导致泥页岩力学性质劣化 ^[19-20]	顺北油气田 12 口井钻至柯坪塔格组和桑塔木组地层时，由于水化作用而发生井眼失稳，造成 3 口井填井侧钻，累计损失钻井时间 286 d ^[14]
高温高压导致的岩石力学性质劣化	岩石颗粒热胀差异导致超深地层岩石内部微裂缝发育，在高围压耦合作用下岩石向延性转化，且遇到相对低温钻井液时易冷却致裂，易导致井眼变形或坍塌、掉块 ^[21-22]	四川盆地蓬深 6 井钻遇灯影组碳酸盐岩地层时，多次发生由井眼变形导致的扭矩突增和划眼现象
强烈构造运动造成的地层不完整	超深地层经历了多期次复杂构造运动，深部岩石损伤，形成破碎性地层，沿微裂缝、层理等弱面结构易发生剪切破坏，井壁稳定性差 ^[4]	顺北油气田顺北 W-3 井在钻至奥陶系碳酸盐岩破碎带时井壁坍塌掉块严重，因坍塌侧钻 4 次，单井损失时间达 240 d ^[23]
地层压力系统复杂多变	超深井揭开地层层序多，压力系统复杂多变，安全密度窗口窄，甚至无安全密度窗口	蓬莱气区 JT1 井在龙潭组—筇竹寺组安全密度窗口仅有 0.04 g/cm ³ ，共钻遇 8 次气测异常、3 次气侵和 6 次井漏 ^[24]

特征可以通过岩石的声学性质变化间接反映^[30-31]，学者们设计研发了一些模拟高温高压环境的岩石物性与声学实验装置。例如，谢玉洪等^[32]研制了可实现温度 170 ℃的 FC-040 型地层条件岩石物性参数测试系统；耿建华等^[33]研制了可实现温度 200 ℃和围压 200 MPa 的岩石声学测试系统。依托高温高压岩石物性测试设备的实验研究，人们逐渐意识到，高温高压对岩石物性具有显著影响。例如，岩石纵、横波速度随温度升高而下降，随围压升高而增加；随着

温度和压力的增加，岩石孔隙度和渗透率总体上将降低，其中高围压是导致岩石物性变差的主要原因，高温产生的热膨胀效应会一定程度上抑制孔隙度和渗透率的降低^[34]。

目前，高温高压岩石物理特性实验测试技术和研究成果虽然取得一些突破，但适用于超深地层极端温压条件下的实验技术仍面临巨大挑战，主要问题包括：①在超过温度 200 ℃和围压 100 MPa 条件下，液压油侧向加压的稳定性难以维持；②位移传感器

表 3 超深地层井壁失稳工程因素分析表

工程因素	失稳原因	典型案例
起下钻速度突变	由起下钻速度突变引起的抽吸压力或激动压力，打破井壁原有应力平衡，可能导致井壁劈裂或垮塌 ^[25]	—
钻柱振动	钻柱振动引起的钻柱碰击井壁会产生微裂缝并逐步扩展延伸，最终导致井壁发生掉块、垮塌	顺北油气田超过 6 800 m 的辉绿岩层段，钻柱转速由 30 ~ 40 r/min 增至 40 ~ 50 r/min 时，井径扩大率增加 12.8% ^[26]
钻柱扰动	钻柱旋转时，钻柱与钻井液之间的粘滞作用会对井壁岩石产生周向扰动，在长时间周向扰动作用下，井壁发生坍塌掉块 ^[27]	—
钻井液性能失稳	高温高压下钻井液易出现处理剂降解、絮凝和材料失效等问题，导致钻井液性能难调控，甚至出现失效现象，从而引发井壁失稳 ^[28]	川深 1 井四开一五开井段地层温度大于 180 ℃，钻井液防塌性能劣化，导致龙马溪组、洗象池组和灯影组地层多次发生井壁垮塌、掉块 ^[29]

和加载油缸等精密元件的耐高温性不足，长时间高温状态会导致测量精度下降；③为维持系统在高温下的稳定性，大部分关键仪器构件都需采用耐高温材料，造价过于昂贵。此外，塔里木盆地超深井储层深度介于 7 200 ~ 8 800 m，实测温度介于 160 ~ 209 ℃，孔隙压力介于 89 ~ 129 MPa，围压达 230 MPa^[35-36]，当前的实验技术尚无法完全满足地层真实条件，这也限制了超深地层环境下岩石物理特性及其相互约束机制的认识，制约了对超深井钻探、超深储层改造和储量计算等多方面的合理评价。

2.2 超深地层岩石力学特性及本构方程

2.2.1 超深地层岩石力学特性

超深地层岩石力学参数是超深地层钻井与压裂设计的重要依据。早期岩石力学性质实验设备无法实现温压耦合加载，一般使用热处理后冷却至室温的岩石试样进行单轴压缩^[37]、伪三轴压缩^[38]及真三轴压缩^[39]等力学试验。然而，岩石的热损伤特性是不可逆的，高温处理后实验结果无法准确反映高温状态时的岩石特性。为此，学者们研发了系列实时高温高压岩石力学测试系统，例如：马啸等^[40]研制了可实现温度最高 460 ℃、围压最大 200 MPa 条件下的“三刚型”高温真三轴试验系统；刘造保等^[41]研制了能实现温度最高 250 ℃、最小主应力 70 MPa 的“两刚一柔型”真三轴时效力学试验系统。

依托实验技术的发展，卢运虎等^[42-44]针对深层—超深层砂岩、页岩和碳酸盐岩开展了系列模拟地层真实环境的高温高压岩石力学实验。研究发现：在超深地层的超高温条件下，岩石内部分胶结矿物结构被高温破坏，粘结力明显降低，矿物颗粒受热膨胀，矿物颗粒边界形成新的微裂缝，导致岩石初始缺陷扩大，岩石力学性质显著变差^[45]。而高应力环境对岩

石力学特性的影响主要体现在：岩石变形特征从硬性逐渐向塑延性发展^[37]；岩石破坏特征逐渐从张拉破坏向单斜面剪切或“X”共轭剪切破坏发展^[46]；岩石弹性模量、体积模量、拉梅常数和强度将逐渐增大，岩石泊松比将逐渐降低^[47-48]。总体而言，超深地层极端温压条件下，岩石力学行为逐渐由弹—脆性向塑—延性发展，岩石力学性质主要受应力控制。在考虑耦合热应力劣化、岩石矿物和原生缺陷影响时，岩石变形、强度和破坏等特征更加复杂，当前超深地层极端温压条件下岩石力学特性变化规律与机制的研究仍需要进一步完善。

2.2.2 超深地层岩石本构方程

超深地层极端环境下岩石力学性质和变形破坏机制明显区别于常温状态下的岩石，导致其本构方程也存在巨大差异。高温高压条件下岩石本构方程主要可以分为 3 类：①基于损伤理论和热弹性理论建立的热弹塑性损伤模型^[49]；②基于蠕变试验和热粘塑性理论建立的流变模型^[50]；③基于统计分布建立的岩石热损伤本构模型^[51]。其中，统计损伤本构模型能对岩石热损伤产生的缺陷量化，更清晰地阐述岩石损伤的力学机制，该类模型被更多学者推广。

虽然高温高压下岩石本构理论已取得突出成果，但当前仍存一些不足：①现有研究多聚焦于高温作用下宏观岩石强度和变形特性规律研究，缺乏宏观—细观—微观多尺度的岩石物理力学演化机制研究理论成果，导致岩石热力损伤机理的解释不清晰^[52]；②高温作用下，岩石热损伤规律在应力—应变关系上表现出非线性特征，经典的破坏准则难以描述其变化过程；③统计损伤本构模型参数需要结合大量实验数据，通过回归分析法确定，具有部分参数物理意义模糊、耗时费力等缺陷。

2.3 超深地层地应力测量方法

地应力是地壳岩石中形成的天然内应力，具有多来源性特征，是影响井壁稳定性的重要因素^[53-55]。目前，地应力测量可以分为绝对和相对应力测量两种^[56]，绝对应力测量直接获得地壳岩体的应力大小，而相对测量即应力监测，是为获取地应力随时间、空间变化而变化的规律特征^[57-58]，具体分类如图 1 所示。

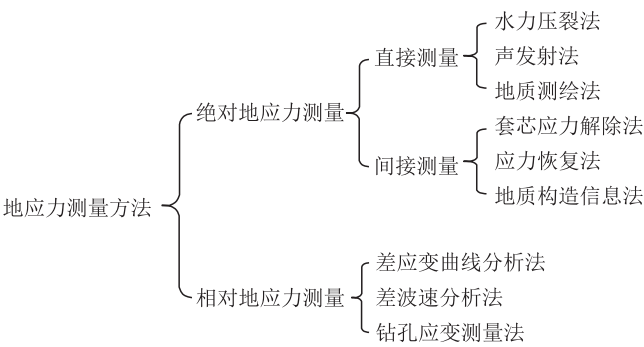


图 1 地应力测量方法分类图

(资料来源：据本文参考文献 [56])

受限于超深地层巨大的埋藏深度，且仅通过井筒与地面连接，大部分地应力测量方法无法应用于超深地层。目前，适用于超深地层地应力测量的方法主要包括水力压裂法和基于岩心的室内实验法，如应力恢复法。水力压裂法是通过一对封隔器对目的层段进行密封，然后向密封段注入高压流体，直至地层发生破裂，据此推测地层应力，其测量系统示意图如图 2 所示。水力压裂法具有操作简单、准确性高、能够连续重复测量等优点，但水力压裂法的基本假设中钻孔轴线必须平行于其中一个主应力方向，这在

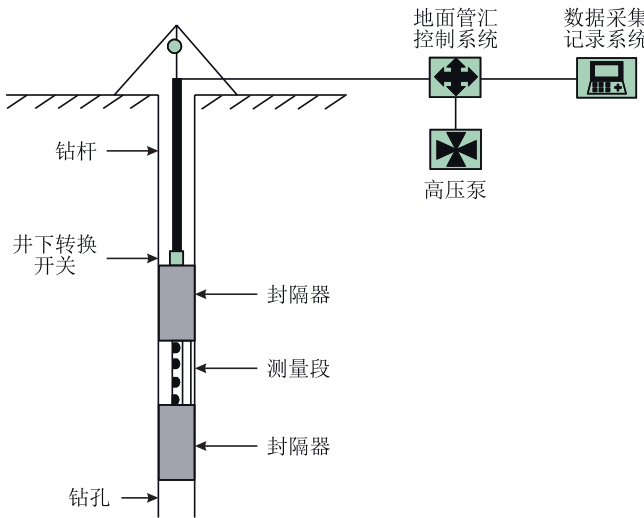


图 2 水力压裂法测量系统示意图

(资料来源：据本文参考文献 [57])

实际中很难完全满足，测量精度会受到一定影响^[59-60]。此外，适应超深地层环境条件的水力压裂设备更复杂，一定程度上将降低测试效率和精度，且测量成本显著提高。

基于岩心实验的非弹性应变恢复法（Anelastic Strain Recovery Method，简称 ASR 法），也在超深地层地应力测量中展现出了良好效果。超深地层高温高压环境下，岩石具有流变性，应力卸荷将发生应变恢复，恢复阶段包括弹性应变恢复和非弹性应变恢复，岩石流变性应力应变关系如图 3 所示。ASR 法是根据应力释放后岩石的非弹性恢复应变与原地应力状态成比例函数关系，通过非弹性应变恢复大小及应变方向计算原始地应力^[61]。孙东生等^[62]将 ASR 法用于塔里木盆地超深地层地应力测量，获得了 SN-X 井 7 000 m 深度的地应力信息。ASR 法通过对岩心径向和轴向应变恢复的测量，直接获得主应变方向，缺陷在于主应力值计算难度大，对不同岩性的本构模型准确性要求高。此外，由于超深地层取心耗时长，导致非弹性恢复应变的部分信息缺失，会降低地应力测量结果的准确性。

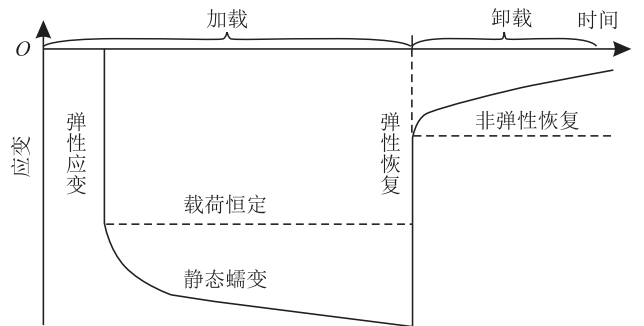


图 3 岩石流变性应力应变图

(资料来源：据本文参考文献 [61])

2.4 高温高压地层压力预测

地层压力是地层孔隙流体承受的来自上覆载荷的压力，其准确预测是优化钻井工艺设计的基础^[63]。随着塔里木盆地、四川盆地超深地层及莺歌海盆地高温高压含油气地层的勘探开发，高温高压环境下地层压力预测技术得到了快速发展。蔡军等^[63]引入三维地质应力模拟技术，获得了较为精细的三维地层三压力预测结果，改变了传统的单井点地层压力预测模式。彭海龙等^[64]建立了不同区域、不同构造的正常压实速度趋势线，有效提高了南海琼东南盆地深水高温高压地区地层压力预测精度。刘爱群等^[65-66]通过改进传统地层压力预测公式，综合利用多种预测

技术,也成功完成了高温高压地层压力的准确预测。

此外,随钻地层压力监测技术也日趋成熟,高温高压井随钻压力预测技术可实现对钻头以下 100 ~ 300 m 范围内地层压力的实时预测,在高温高压地层钻井中取得了良好应用效果。地层压力预测可划分为钻前预测、随钻监测和钻后分析 3 个阶段^[67],具体工作流程如图 4 所示。中海油湛江分公司利用 Geoservices 公司研发的高温高压井地层压力随钻监测 EquiPoise 系统,地层压力实时预测精度达到了 94%^[68]。

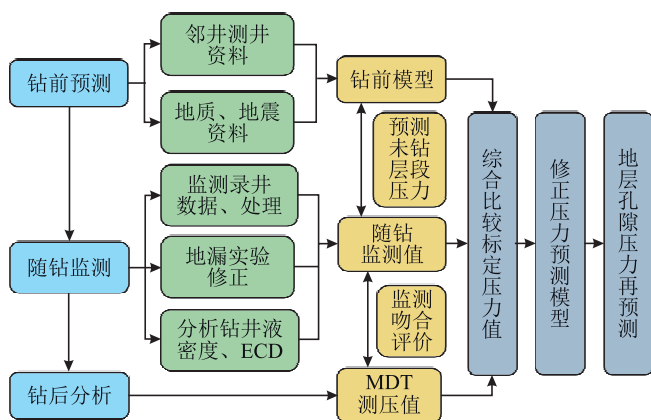


图 4 高温高压井地层压力预测流程图

(资料来源:据本文参考文献[67])

目前地层压力预测理论多以砂泥岩沉积地层为基础,具有明显局限性,在非均质强、裂缝发育的碳酸盐岩地层中预测效果仍不理想。而超深地层环境更复杂,地层异常压力成因及分布规律更难以厘清,导致现有的地层压力预测技术较难适用于超深地层。

3 井壁稳定性评价理论研究进展

井壁稳定性研究是评价井周岩石对周围诱导应力集中反应的结果,对于高效、安全钻井具有重要意义^[69]。岩石物理力学特性、地应力和地层压力等不可控参数的精确获取是井壁稳定性评价的前提,其实验评价技术和设备的进步推动了超深地层井壁稳定性评价理论的发展逐渐由早期纯力学理论向理化耦合理论、多场耦合理论发展^[18,70]。

3.1 超深地层岩石与钻井液物理化学作用理论

钻井液与钻开地层岩石接触后进入地层并发生物理化学反应,会影响井壁稳定性,尤其在泥页岩地层最为显著。泥页岩吸附/解吸水的能力是影响其力学性质的主要原因之一。Yew 等^[71]将泥页岩中水

的运动视为热扩散,在假设岩石渗透率为各向同性的基础上,提出了泥页岩的吸水模型:

$$\frac{C}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) = \frac{\partial W}{\partial t} \quad (1)$$

式中 r 表示吸收水的半径, m; W 表示水含量; t 表示时间, h; C 表示材料的吸附常数。

黏土矿物吸附水后会膨胀,弱化了胶结性,导致岩石弹性模量、力学强度等参数降低^[72],加剧了井眼垮塌风险。黏土矿物的水化/脱水主要为表面水化/脱水和渗透水化/脱水两种机制^[73]。表面和渗透水化都可以导致岩石体积应变发生变化,称为结晶和渗透溶胀。如果岩石被水化,就会发生膨胀^[74-75],如果被脱水,就会发生收缩。Cygan 等^[76]提出了黏土矿物的 Clayff 力场来描述蒙脱石-水的相互作用,将其总势能分为键结和非键结相互作用:

$$E^{\text{total}} = E^{\text{bs}} + E^{\text{ab}} + E^{\text{co}} + E^{\text{va}} \quad (2)$$

式中 E^{total} 表示总势能, J; E^{bs} 和 E^{ab} 分别表示键结作用的键伸缩和键角弯曲项势能, J; E^{co} 和 E^{va} 分别表示非键结作用的长程静电作用和短程相互作用势能, J。 E^{co} 和 E^{va} 可通过下式计算得到:

$$E_{ij}^{\text{co}} = \frac{e^2 q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} \quad (3)$$

$$E_{ij}^{\text{va}} = \epsilon_{ij} \left[\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^{12} - 2 \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^6 \right] \quad (4)$$

式中 e 表示电子荷, C; q_i 和 q_j 分别表示原子 i 和 j 的电荷, C; ϵ_0 为介电常数, F/m; r_{ij} 表示原子 i 和原子 j 的距离, m; ϵ_{ij} 表示势阱深度, m; σ 表示势能取最小值的原子距离, m。不同类原子间的距离参数 σ_{ij} 通过算术平均获得,能量参数 ϵ_{ij} 通过几何平均获得。

超深地层钻井时,高温地层遇到低温钻井液时发生冷却收缩,在岩石内部产生新裂纹,为钻井液的侵入提供了通道,此时岩石水化作用与浅部地层存在较大差异。Zheng 等^[77-79]研究了温度压力对蒙脱石水化后晶体力学参数的影响规律,发现高温条件下蒙脱石层间水分子和阳离子的流动能力增强,蒙脱石的水化膨胀效应更明显,而高压环境会降低水分子和阳离子的扩散系数,减弱蒙脱石晶体与水分子的相互作用,从而抑制岩石力学性质劣化。目前,钻井液与岩石的物理化学研究多集中于水化作用对岩石宏观强度劣化效应的表征。但宏观尺度上很难揭示超深地层环境及流体性质(地层流体和钻井液)与岩石力学参数的内在联系,阻碍了岩石微裂纹一

细观损伤—宏观强度劣化之间关系的建立, 难以在宏观尺度上准确量化超深地层环境及流体性质与岩石间物理化学作用对井壁稳定性的影响。

3.2 纯力学和力化耦合井壁稳定性评价

1940年, Westergaard^[80]基于均质各向同性弹性体地层假设, 首次建立了井壁稳定力学模型。随后, 学者们构建了弹性/弹塑性理论^[81]、多孔弹塑性理论^[82]、损伤力学理论^[83]等井壁稳定性评价模型。此外, 人们还意识到钻井液与亲水性矿物的水化作用也是导致井壁失稳的重要因素^[18]。学者们根据泥页岩水化膨胀特征建立了水化模型, 并开展了吸水量与距离和时间的关系、含水量对岩石力学性质的影响等方面的研究^[84-85]。此后, 学者们从力—化学耦合角度出发针对井壁稳定问题开展了大量研究, 主要包括3个方面: ①水化作用产生的膨胀应力; ②吸水后岩石强度变化^[86]; ③由化学渗透作用引起岩石内部孔隙压力变化而导致的附加应力^[87-89]。当前, 这方面的研究主要是为了攻克中浅层页岩气储层安全建井难题, 考虑亲水性矿物水化力学耦合的井壁稳定性研究成果尚未综合考虑高温高压环境的影响, 对超深地层井壁稳定性评价的适应性有所不足。

3.3 多场耦合井壁稳定评价理论

超深地层岩性复杂, 层理、节理和裂缝等弱面结构发育形成强各向异性, 且多含亲水性矿物地层易水化。新钻开地层将受到温度场、应力场、渗流场、化学场等多物理场耦合作用, 使超深地层井壁稳定性评价问题变得极为复杂^[90-91]。多场耦合下井壁稳定研究是以岩石结构场和应力场为基础, 结合岩石变形机制(如热弹性变形、孔隙—热弹性变形等), 考虑孔隙介质的热膨胀性质、温度对化学势的影响、化学渗透和热渗透对溶质和溶液流动规律的影响进行分析(图5)^[92]。多场耦合作用下井壁稳定评价理论主要包括: 岩石本构方程、流体渗流方程、溶质扩散方程、热传导和热对流方程等, 如式(5)~(8)所示^[93]:

$$\left(k + \frac{G}{3}\right) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + G \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{m}(\alpha' \nabla p - \chi \nabla C^s + \gamma_1 \nabla T) = 0 \quad (5)$$

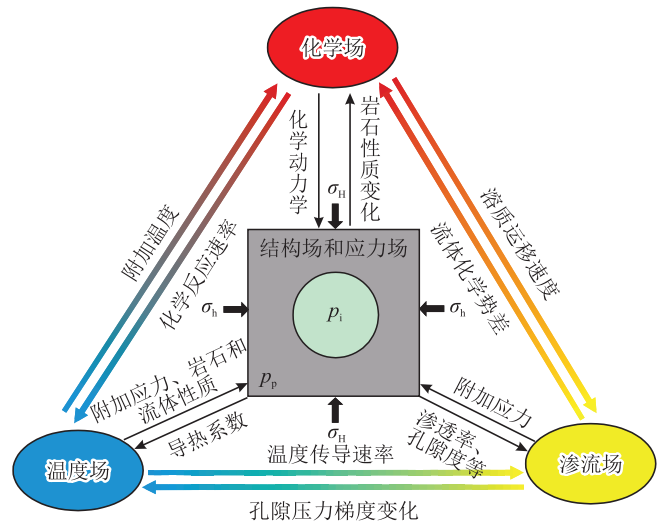
$$\alpha(\nabla \dot{\mathbf{u}}) + B \dot{p} + \chi' \dot{C}^s + \gamma_2 \dot{T} - \frac{K}{\eta} \nabla^2 p + \frac{K}{\eta} L_D \nabla^2 C^s = 0 \quad (6)$$

$$\varphi \dot{C}^s + D^s \nabla^2 C^s - C^s D^T \nabla^2 T = 0 \quad (7)$$

$$\dot{T} - C^T \nabla^2 T = 0 \quad (8)$$

式中 k 表示体积模量, MPa; G 表示弹性剪切模量, MPa; $\mathbf{u}$ 表示位移矢量, m; $\dot{\mathbf{u}}$ 表示 $\mathbf{u}$ 的一阶导数;

$\mathbf{m}$ 表示特定算数矩阵; α 表示应力与地层孔隙压力偏微分值, 无量纲; α' 表示 α 的衍生特殊值, 无量纲; p 表示压力, MPa; $\dot{p}$ 表示 p 的一阶导数; χ 和 χ' 分别表示特殊计算值, 无量纲; C^s 表示溶质相对含量, 无量纲; $\dot{C}^s$ 表示 C^s 的一阶导数; γ_1 和 γ_2 分别表示溶质和稀释剂含量相关的系数, 无量纲; T 表示温度, °C; $\dot{T}$ 表示温度的一阶导数; B 表示溶液组分含量值, 无量纲; K 表示渗透率, mD; η 表示流体黏度, mPa·s; L_D 表示与密度、溶质含量等相关的系数, 无量纲; φ 表示孔隙度; D^s 表示溶质扩散系数, m²/s; D^T 表示热力扩散系数, m²/s; C^T 表示热扩散率, m²/s。



p_p 、 p_i —地层压力和井筒压力; σ_H 、 σ_h —最大、最小水平地应力。

图5 井壁稳定多场耦合分析示意图

(资料来源: 据本文参考文献[93])

由于超深地层的复杂地质环境和岩石本身缺陷, 综合考虑多场耦合影响的井壁稳定性评价模型构建难度极大, 相关成果还相对较少。学者们针对影响超深地层井壁稳定性的关键因素, 重点关注热—流—固耦合作用, 建立了一些在超深地层稳定性评价中具有较好适应性的计算模型。张亚云等^[94]针对顺北油气田 7 500 m 超深破碎性地层井壁失稳问题, 建立了考虑多弱面效应的力—化耦合模型; 张健等^[95]基于杜哈梅原理将井壁温度随时间变化的边界条件耦合进温度—应力场中, 建立了时变温度边界下热—流—固多场耦合井壁稳定性计算模型, 对克深地区 7 000 m 超深裂缝性地层井壁稳定性实施了评价。

虽然超深地层多场耦合井壁稳定性评价研究已取得了一些成果, 但仍存在许多局限性。目前, 多场耦合井壁稳定性评价模型建立的思路主要有两

种：一是基于能量守恒原理，二是基于应力叠加原理。前者难以解释化学能和岩石变形之间的关系，而后者将岩石视为了完全刚性材料，其力学意义不严格，失去了真正耦合内涵^[96]。多场耦合研究极具复杂性，耦合模型涉及参数更多且难以通过实验室测定，限制了耦合模型的实用性，这也导致大量学者仍采用纯力学模型研究超深地层井壁稳定性^[97]。总的来说，高温高压环境下井壁稳定性研究是超深地层安全、高效钻井的重要基础，加强高温高压条件下岩石力学特性、井筒稳态和非稳态温度分布规律、复杂地层应力和地层压力等研究，有助于形成更加可靠和实用的井壁稳定性评价理论，并且依托井壁稳定性评价理论的发展和实际应用，可有力支撑超深地层井壁稳定性控制技术和工艺产品的研发。

3.4 基于数据驱动的井壁稳定评价方法

由于深层、超深地层地质条件复杂，地质力学参数和岩石物理力学参数不确定性强，获取难度大，导致井壁稳定性分析结果准确度低，一些学者采用定量风险分析方法，研究井壁稳定评价模型输入参数的不确定性特征，以获取更加可靠的井壁失稳风险评价结果^[98]。例如，Aadnoy和Looyeh^[99]使用定量风险分析方法评估关键输入参数的不确定性对垂直井眼稳定性的影响；Ma等^[100-101]提出了基于可靠性理论的井壁失稳风险评价方法，结合蒙特卡罗模拟评估井眼失稳风险。井壁失稳风险评价法通过能量化输入参数对井壁稳定评价结果的不确定程度，以此提高井壁稳定评价的准确度。此外，一些学者借助于机器学习的高效数据处理能力，利用神经网络法、决策树法、回归分析法、支持向量机法等分析测井数据，以实现井壁稳定性的快速预测。例如，Zahiri等^[102]以测井数据为输入参数，采用支持向量机法建立了直井安全钻井液密度窗口预测模型；马天寿等^[103]通过随机采样法生成用于机器学习训练的基础参数，利用随机森林、多项式回归等模型，实现了斜井坍塌压力预测。

相较于传统预测方法，基于数据驱动的井壁稳定评价方法避免了繁琐的计算过程，对岩石力学参数资料的依赖程度低，为井壁稳定评价问题提供了一种新思路。但该方法对训练和验证数据集样本数量要求较高，目前仅能保证地质条件相似的邻井区井壁稳定预测的精度，对于当前样本数据较为匮乏的超深地层井壁稳定性评价尚存在泛化能力不足的问题。

4 超深井井壁稳定控制技术研究进展

针对四川盆地、塔里木盆地超深井钻井所面临的埋藏深、多层序、压力系统复杂、高温高压等特点，我国在超深井井壁稳定控制技术方面开展了持续攻关，形成了非常规井身结构优化、抗高温高压钻井液、防漏堵漏和精细控压钻井等核心超深井井壁稳定控制技术。

4.1 非常规井身结构优化

超深井井身结构设计的核心是要提高钻井的成功率，满足地质设计要求。针对超深地层钻井过程中面临的地质条件复杂、含多套压力系统、必封点多等问题，大尺寸套管下入深度应尽量深，以便在钻遇到复杂层位时具备足够的套管层次储备以及及时封隔，且保证达到完钻井深时井眼足够大^[104]。目前已形成了一些适用于塔里木盆地、四川盆地超深井的非常用井身结构优化设计方案。例如，根据塔里木盆地山前、塔北和塔中区块的不同地质特点、压力体系等，形成了多套“塔标”井身结构优化方法（图6），解决了多套断层、盐层复杂地质条件下的井身结构设计难题，满足了塔里木盆地超深井钻井安全、高效、提产增效的需求^[32,105]。针对四川盆地超深地层层序多、压力系统复杂、地质不确定因素多等难题。攻关外径介于114.3~365.1 mm共10种非常规套管及钻头、钻柱、井口装置等多种配套技术，形成了“五开五完”、“六开六完”和“导管+六开六完”3种模式为主的非常规井身结构模式（表4）^[3,106-108]。通过拓展井身结构和套管层次、增加钻井开次，有效解决了常规井身结构套管层次不足、无法完全封隔复杂层段的问题。此外，非常规井身结构模式同时兼顾钻井安全和提速需求，模式相互之间可灵活调整，能够有效降低钻井成本。随钻井深度不断增大，钻遇地层的岩性和压力系统等更加复杂，高温高压问题更加尖锐，必封点更多，仍存在井身结构层次不足的风险。

4.2 抗高温高压钻井液技术

超深地层高温高压环境下，钻井液面临处理剂稳定性差、材料易失效等难题，尤其是钻遇高压盐水层时，在盐水侵入和高温高压联合作用下，将导致钻井液密度下降且性能极难调控，进而难以维持超深地层井壁稳定^[109]。为此，超深地层钻井液研究关注的焦点主要是增强钻井液在高温高压高含盐等恶劣环境下的综合性能。目前，我国已研制成多种

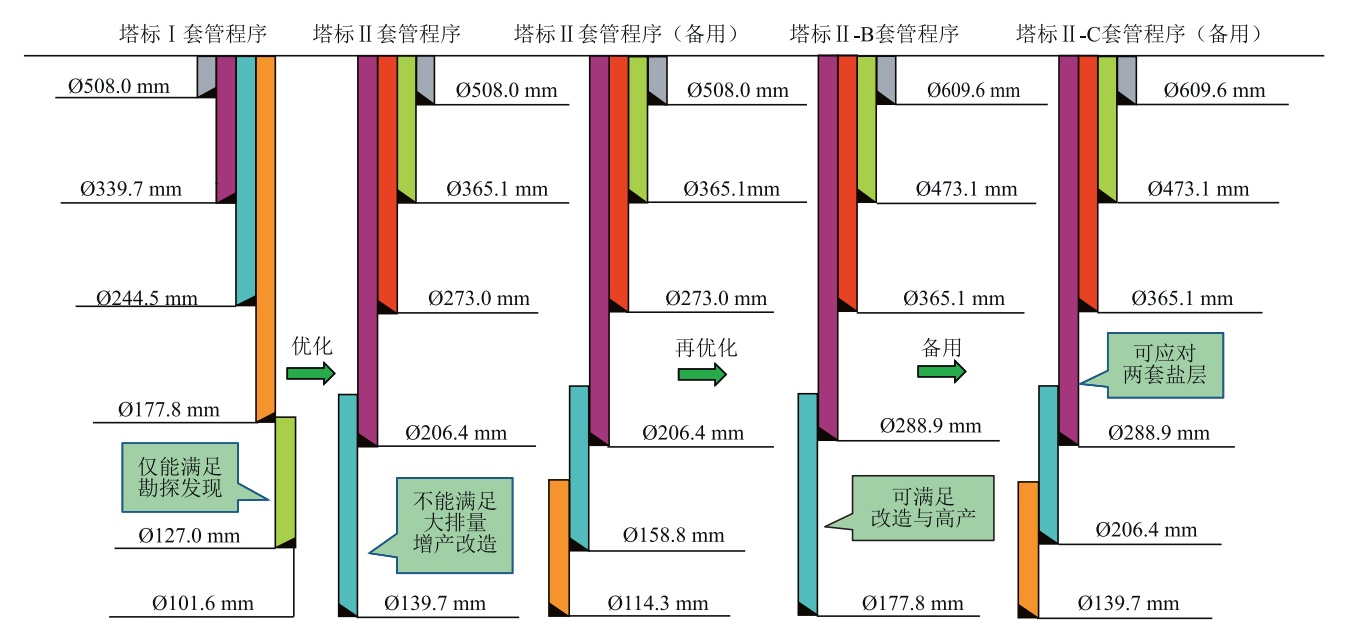


图 6 塔里木油田井身结构优化图
(资料来源：据本文参考文献 [28])

表 4 四川盆地深井超深井典型非常规井身结构表

开钻程序	CS1 井	LT1 井	WT1 井	LG70 井	ST7 井	ZS101 井	PS2 井
导管	914.4×720	914.4×720	914.4×720	—	—	—	914.4×720
一开	660.4×508	660.4×508	660.4×508	660.4×508	660.4×508	660.4×508	660.4×508
二开	444.5×365.1	444.5×365.10	444.5×365.10	444.5×365.10	444.5×365.10	455.0×374.65	455.0×374.65
三开	320.7×(273.1+279.4)	333.38×273.05	333.38×273.05	333.38×273.05	333.38×273.05	333.4×282.58	333.4×282.58
四开	241.3×(193.7+206.4)	241.3×219.08	241.3×219.08	241.3×219.08	241.3×177.80	241.3×184.15	241.3×206.38
五开	165.1×139.7	190.5×168.28	190.5×168.28	190.5×168.28	149.2×127.00	149.2×127.00	165.1×139.70
六开	114.3(备用)	135.5×114.3	135.5×114.3	139.7×114.3	—	—	—

注：资料来源于本文参考文献 [10]；表中数据为井眼直径 (mm) × 套管直径 (mm)。

抗高温高密度油基钻井液核心处理剂，包括有机土、主 / 辅乳化剂、降滤失剂、纳微米封堵剂和可膨胀堵漏材料等，各项主要技术指标比肩国外产品，并形成了高密度油基钻井液封堵防塌技术、防漏堵漏技术、流形调控技术等^[32,110-111]。同时，研制了满足抗 45% 盐水污染、抗温大于 220 ℃、密度 2.60 g/cm³ 的油基钻井液体系，突破了高温高压盐水污染引起钻井液失效的重大技术难题。上述技术成果与产品在塔里木库车山前、西南和新疆南缘深层超深地层应用 200 余井次，大幅度减少了高压盐水侵、破碎带、大段泥岩的井壁失稳问题^[112-114]。

超深井抗高温水基钻井液体系研究也取得了明显突破。例如，毛惠等^[115]研制出 SDT10、SDT11 抗高温钻井液关键处理剂，形成了抗 248 ℃超高温

水基钻井液体系和抗 220 ~ 240 ℃超高温、密度达 2.46 ~ 2.55 g/cm³ 的超高密度水基钻井液体系。杨文权等^[116]以降滤失剂 BH-HFL 和纳米润滑防塌剂 BH-RDJ 为主剂构建的抗 230 ℃的低固相钻井液，在华北油田安 X-3 井 6 300 m 井段（温度接近 230 ℃）表现出良好流变性能。此外，我国已成功研发了多种抗高温降滤失剂、增 / 降黏剂、润滑剂、防塌封堵剂等核心处理剂，形成以超高温高密度水基、胺基、有机盐钻井液为代表的高性能水基钻井液技术系列。该钻井液体系抗温达到 220 ℃、密度可达 2.40 g/cm³，高温高压滤失量小于等于 12 mL，且悬浮稳定性好，在我国塔里木、西北、西南以及海外等区块推广应用 500 余口井，有效解决了超高温高压条件下钻井液滤失、流变和沉降稳定性性能调控等难题^[28]。

4.3 防漏堵漏技术

针对超深地层的盐顶漏封、盐间薄弱地层、强水敏性泥岩地层和裂缝性地层等复杂地层井漏，当前已形成了多种防漏堵漏技术，如高强度承压堵漏技术、交联成膜堵漏技术、高失水固结堵漏技术和化学固结堵漏技术等^[28]。高强度承压堵漏技术具有抗压 60 MPa、抗温大于等于 200 ℃、密度可调控和较好的化学稳定性等特点，可有效封堵 5.0 ~ 8.0 mm 缝板，增强盐膏层的承压能力，平均承压约 20 MPa。该技术在塔里木盆地吐北 401 井、克深 133 井和克深 605 井等多口井的盐层（最大井深 7 458.0 m）进行了应用，一次堵漏成功率高，盐层承压能力最高

提高了 8.2 MPa^[117]。交联成膜堵漏技术、化学固结堵漏技术，可实现抗温 180 ℃、承压强度大于等于 20 MPa，有效解决裂隙性漏失层堵漏和地层骨架强度低等难题，相关技术在新疆、四川、甘陕等多个地区应用，一次承压堵漏成功率达 90% 以上^[118-119]。高失水固结堵漏技术可解决漏失尺寸不明确的渗滤性漏失和毫米级裂缝堵漏难题，具有封堵速度快（时间小于 30 s）、承压强度高（可达 18 MPa）和不易复漏等特点^[28]。该技术应用于顺北 5-9 井，共计堵漏 7 次，一次成功率达 100%，较邻井的井漏复杂时间减少了 81%^[120]。典型堵漏材料及其作用机理如表 5 所示。

表 5 典型堵漏材料及其作用机理分析表

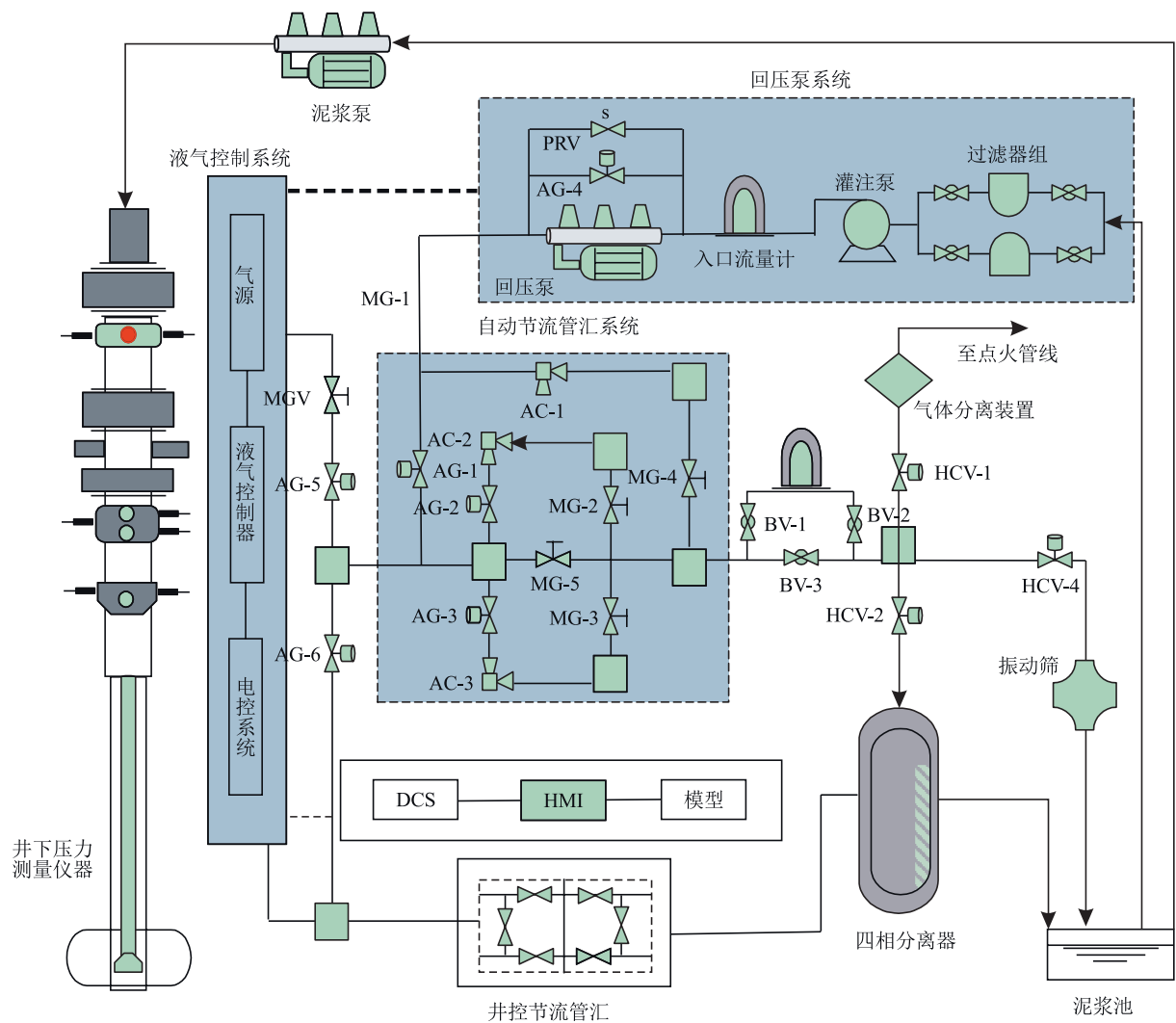
类型	典型堵漏材料	作用机理	优点	缺点
桥接类	核桃壳、云母片、锯末等	架桥堆积卡堵裂缝通道	来源广、成本低、施工工艺简单	配方复杂、适应性较差，承压能力差、易重复漏失
高失水类	黏土、粉煤灰、碳酸钙等	快速失水在裂缝内形成封堵层	见效快、成功率高	失水速率控制性差，堵漏塞强度低
吸液膨胀类	亲水 / 亲油树脂、预交联凝胶颗粒等	吸液膨胀卡堵裂缝通道	具有良好的变形性、适应性	延时效果和抗温性能较差、承压强度低
柔性凝胶类	聚丙烯类凝胶、生物凝胶等	生成凝胶体，填塞裂缝空间	具有良好的变形性、适应性，承压强度高	抗高温、抗盐能力差
可固化类	触变水泥、矿渣、聚氨酯等	井下反应生成高强度固结体	承压封堵性好、成本低、工艺简单	易被稀释，固化时间和速率的控制性差
智能材料	形状记忆聚合物 / 金属、温敏凝胶等	受环境刺激自行发生物理化学反应，封堵裂缝	适应性强、承压强度高、具有可降解性	抗高温性能差

4.4 精细控压钻井技术

精细控压钻井技术能够实现不同工况下环空压力的精确控制，以及对井口回压全过程自动调控，进而有效解决窄安全钻井液密度窗口地层钻进过程中的“涌漏”难题^[10,121]，该技术原理如图 7 所示。目前，我国研发了 PCDS、CQMPD、XZMPD 等系列精细控压钻井系统，形成了适应窄安全钻井液密度窗口、缝洞型碳酸盐岩、低渗特低渗、高压盐水层等复杂地层的欠平衡 / 近平衡控压钻井技术，实现了秒级调节、井底压力精度 0.2 MPa 的高速高精度控制。相关技术先后在我国塔里木、华北、西南和辽河等油气田成功开展工业化、规模化应用与服务，显著降低了钻井周期、复杂井段井控风险^[10,122-123]。精细控压钻井技术的推广应用有效解决了复杂地层的井控难题，保障了复杂地层压力系统与窄安全钻井液密度窗口地层的安全钻井。例如，塔里木油田碳酸盐岩地层水平井段实现了穿越多套缝洞组合地层，水平井延伸提高 210% 以上；华北牛东地区获得了 NP23-P2003 等

井目的层“零漏失、零复杂”的佳绩，减少钻井液漏失 2 000 m³ 以上，机械钻速提高 125%；四川盆地磨溪—高石梯区块灯影组平均单井漏失量降低 85%，处理复杂时间降低 90%^[124]。

非常规井身结构优化技术实现了井身结构层次进一步完善，推进了地质工程一体化设计理念，更好地应对了超深地层复杂状况。抗高温高压钻井液技术提高了井筒工作液在超深地层极端环境下的稳定性，保障了钻完井工作的顺利推进。超深地层防漏堵漏技术有效解决裂隙性、骨架强度低等复杂地层的防漏堵漏难题。精细控压钻井技术有效解决复杂压力系统地层和窄安全钻井液密度窗口地层在钻进过程中的“涌漏”难题。上述系列井壁稳定性控制技术在浅中地层钻井中应用已取得了良好的效果，超深地层的推广应用还需推进相关基础理论与耐高温高压产品的研发。依托于相关理论技术的持续攻关，必将有力支撑我国超深井安全高效钻进，加速超深地层油气资源的勘探开发进程。



DCS—分布式控制系统；HMI—人机界面；PRV—溢流阀；MGV—手动平板阀；AC-1、AC-2、AC-3—辅助节流阀、主节流阀、备用节流阀；AG-1～AG-4—气控平板阀，AG-5和AG-6—液控平板阀；MG-1～MG-5—手动平板阀；BV-1～BV-3—手动平板阀；HCV-1～HCV-4—球阀。

图 7 精细控压钻井技术原理图
(资料来源：据本文参考文献 [123])

5 发展建议

我国超深井钻井技术发展迅速，目前已基本形成 8 000 m 超深井钻井技术体系，8 000 m 超深井钻探已成常态化。可见，超深地层井壁失稳理论与控制技术得到了长足发展，但仍存在部分技术瓶颈未完全突破，且随深部油气勘探开发进一步向万米储层进军，超深地层井壁稳定性问题仍将面临严峻挑战。持续完善、创新超深井井壁失稳与控制理论及技术，能够更好支撑超深地层油气勘探开发，实现增储上产和降本增效。为此，笔者结合当前油气勘探开发向更深地层发展的迫切需求和上述理论与技术的发展现状分析，提出几点促进超深地层井壁失稳理论与控制技术发展的建议。

- 1) 持续完善超深地层岩石物理力学参数测试评价技术，加强高温高压岩石物理力学实验研究。攻关研发满足抗 220 ℃和 230 MPa 以上的高温高压岩石物理力学实验系统。强化还原超深地层环境下岩石物性、力学和物理模拟实验，获取反映超深地层岩石真实性质的基础参数，建立考虑超深地层温度和压力的岩石物理力学参数、地质力学参数评价方法，以丰富超深地层岩石物理力学参数数据库。
- 2) 推进耐高温高压地应力和井筒压力测量仪器研发，发展超深地层地应力与地层压力评价理论技术。增强地应力和井筒压力测试系统的智能化、自动化及集成化水平，保障测量系统在超深地层高温高压环境下的工作稳定性和测量精度。提高数据利用效率，结合数值模拟研究明确超深地层地应力和地层

压力主要影响因素。针对碳酸盐岩、火成岩等复杂岩性地层,利用机器学习和人工智能等方法,通过不断学习形成适应超深地层环境的地应力和地层压力预测模型,以此提高预测精度。发展地应力与地层压力多方法综合评价技术,克服单一方法评价局限,提高评价结果的可靠性。

3) 发展高温高压环境下多场耦合岩石力学理论,形成超深地层客观地质环境与工程条件耦合一体化井壁稳定性评价理论体系。针对超深地层高温高压环境特点,建立耦合多场环境的岩石力学模型。形成更为完善考虑地质客观多因素影响,以及钻井液作用、钻井应力和温度扰动、井筒压力扰动等多场多因素耦合地质工程一体化井壁稳定性评价理论模型,进而借助计算机数值模拟求解实现超深地层井壁稳定性的精细化评价。此外,强化数据驱动的井壁稳定评价理论研究,推进超深地层井壁稳定评价理论的智能化发展,进一步提高评价结果的可靠性。

4) 持续攻关超高温高压环境下钻井液理论技术,提升钻井液处理剂抗高温高压性能,完善超高温高密度钻井液体系。进一步加强钻井液的抗高温高压作用机理研究,攻关核心处理剂降解、吸附和稳定性机理及性能调控技术研究,攻关形成抗 240 °C 以上的高密度水基钻井液体系和抗 300 °C 以上的油基钻井液体系,提高钻井液在超高温、超高压及高盐等恶劣环境下的持续稳定工作能力。

5) 完善超高温高压条件下防漏堵漏技术理论,提高防漏堵漏材料的抗高温高压性能。进一步加强防漏堵漏材料的高温高压作用机理研究,解决超深地层防漏堵漏材料易老化、材料结构和力学性质不稳定的问题,突破超深地层堵漏成功率低和封堵效果不佳的技术瓶颈。形成防漏堵漏材料优选方法,研发针对性强的复合材料,提高超深地层一次堵漏成功率。

6) 推进适应超深地层复杂地质环境的精细控压钻井理论技术研发,研制耐高温高压控压钻井配套设备。控压钻井技术的核心是井下实时监测系统,超深地层钻井对井下监测仪器的耐高温高压、长寿命和稳定性要求苛刻。因此,亟需深化攻关针对超深地层复杂地质环境的控压钻井理论技术,优化精细控压配套工艺,加强耐高温高压配套设备研发,提高井下数据测量精度和传输速度。

参 考 文 献

[1] 国土资源部油气资源战略研究中心. 全国油气资源动态评价—2015[M]. 北京: 中国大地出版社, 2017.

Strategic Research Center of Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources. National petroleum resource assessment—2015[M]. Beijing: China Land Press, 2017.

- [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] 伍贤柱, 万夫磊, 陈作, 等. 四川盆地深层碳酸盐岩钻井井技术实践与展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 97-105.
WU Xianzhu, WAN Fulei, CHEN Zuo, et al. Drilling and completion technologies for deep carbonate rocks in the Sichuan Basin: Practices and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 97-105.
- [4] 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.
- [5] 李涛, 苏强, 杨哲, 等. 川西地区超深井钻井完井技术现状及攻关方向[J]. 石油勘探技术, 2023, 51(2): 7-15.
LI Tao, SU Qiang, YANG Zhe, et al. Current practices and research directions for drilling and completion technologies for ultra-deep wells in western Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 7-15.
- [6] 杨博仲, 汪瑶, 叶小科. 川西地区复杂超深井钻井技术[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 27-30.
YANG Bozhong, WANG Yao, YE Xiaoke. Drilling technology for complex ultradeep wells at West Sichuan area[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 27-30.
- [7] 韩烈祥. 川渝地区超深井钻井完井技术新进展[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(5): 555-561.
HAN Liexiang. New progress of drilling and completion technologies for ultra-deep wells in the Sichuan-Chongqing area[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(5): 555-561.
- [8] 刘宝军, 曹思阁, 陈友生. 川东盐下复杂超深井井身结构设计与实践——以楼探1井为例[C]//第31届全国天然气学术年会(2019)论文集(05 钻井工程). 合肥: 中国石油学会天然气专业委员会, 2019: 25-32.
LIU Baojun, CAO Sige, CHEN Yousheng. Well structure design and practice of complex ultra-deep pre-salt well in eastern Sichuan—take Lou Tanyi 1 Well as an example[C]//Proceedings of the 31st National Natural Gas Annual Conference (05 Drilling and Completion Engineering). Hefei: Natural Gas Professional Committee of China Petroleum Society, 2019: 25-32.
- [9] 叶金龙, 沈建文, 吴玉军, 等. 川深1井超深井钻井提速关键技术[J]. 石油勘探技术, 2019, 47(3): 121-126.
YE Jinlong, SHEN Jianwen, WU Yujun, et al. Key techniques of drilling penetration rate improvement in ultra-deep well

- Chuanshen-1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 121-126.
- [10] 邓虎, 贾利春. 四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望 [J]. *天然气工业*, 2022, 42(12): 82-94.
- DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: Current status, challenges and prospects[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(12): 82-94.
- [11] 刘湘华, 刘彪, 杜欢, 等. 顺北油气田断裂带超深水平井优快钻井技术 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(4): 11-17.
- LIU Xianghua, LIU Biao, DU Huan, et al. Optimal and fast drilling technologies for ultra-deep horizontal wells in the fault zones of the Shunbei oil & gas field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(4): 11-17.
- [12] 于洋, 南玉民, 李双贵, 等. 顺北油田古生界钻井提速技术 [J]. *断块油气田*, 2019, 26(6): 780-783.
- YU Yang, NAN Yumin, LI Shuangui, et al. Technology for increasing drilling speed of Paleozoic stratum in Shunbei Oilfield[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2019, 26(6): 780-783.
- [13] 王学龙, 何选蓬, 刘先锋, 等. 塔里木克深9气田复杂超深井钻井关键技术 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 15-20.
- WANG Xuelong, HE Xuanpeng, LIU Xianfeng, et al. Key drilling technologies for complex ultra-deep wells in the Tarim Keshen 9 gas field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 15-20.
- [14] 林永学, 王伟吉, 金军斌. 顺北油气田鹰1井超深井段钻井液关键技术 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 113-120.
- LIN Yongxue, WANG Weiji, JIN Junbin. Key drilling fluid technology in the ultra deep section of Well Ying-1 in the Shunbei oil and gas field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 113-120.
- [15] 何立成, 唐波. 准噶尔盆地超深井钻井技术现状与发展建议 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(5): 1-8.
- HE Licheng, TANG Bo. The up to date technologies of ultra-deep well drilling in Junggar Basin and suggestions for further improvements[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(5): 1-8.
- [16] 舒刚, 孟英峰, 李红涛, 等. 裂缝内钻井液的漏失规律研究 [J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(6): 29-32.
- SHU Gang, MENG Yingfeng, LI Hongtao, et al. Leakage laws research of drilling fluid in fracture reservoir[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(6): 29-32.
- [17] 孙家祥, 赵洪山, 马莉. 准噶尔盆地征10井超深井钻井关键技术 [J]. *石油机械*, 2023, 51(5): 17-24.
- SUN Jiaxiang, ZHAO Hongshan, MA Li. Key drilling technologies for ultra-deep Well Zheng 10 in Junggar Basin[J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(5): 17-24.
- [18] ZHANG Qiangui, RAN Jiawei, FAN Xiangyu, et al. Mechanical properties of basalt, tuff and breccia in the Permian system of Sichuan Basin after water absorption—implications for wellbore stability analysis[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(4): 2059-2080.
- [19] 金衍, 薄克浩, 张亚洲, 等. 深层硬脆性泥页岩井壁稳定性力学化学耦合研究进展与思考 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(4): 159-169.
- JIN Yan, BO Kehao, ZHANG Yazhou, et al. Advancements and considerations of chemo-mechanical coupling for wellbore stability in deep hard brittle shale[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 159-169.
- [20] ZHANG Qiangui, WANG Lizhi, FAN Xiangyu, et al. Mechanical properties of lamellar shale considering the effect of rock structure and hydration from macroscopic and microscopic points of view[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1026.
- [21] 蔚宝华, 卢晓峰, 王炳印, 等. 高温井地层温度变化对井壁稳定性影响规律研究 [J]. *钻井液与完井液*, 2004, 21(6): 15-18.
- WEI Baohua, LU Xiaofeng, WANG Bingyin, et al. Law of temperature influence on wellbore stability in hot well[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2004, 21(6): 15-18.
- [22] 李映涛, 漆立新, 张哨楠, 等. 塔里木盆地顺北地区中一下奥陶统断溶体储层特征及发育模式 [J]. *石油学报*, 2019, 40(12): 1470-1484.
- LI Yingtao, QI Lixin, ZHANG Shaonan, et al. Characteristics and development mode of the Middle and Lower Ordovician fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(12): 1470-1484.
- [23] 金军斌, 张杜杰, 李大奇, 等. 顺北油气田深部破碎性地层井壁失稳机理及对策研究 [J]. *钻采工艺*, 2023, 46(1): 42-49.
- JIN Junbin, ZHANG Dujie, LI Daqi, et al. Study on the wellbore instability mechanisms and drilling fluid countermeasures of deep fractured formation in Shunbei oil and gas field[J]. *Drilling & Production Technology*, 2023, 46(1): 42-49.
- [24] 夏连彬, 胡锡辉, 李文哲, 等. 蓬莱气区超深井钻井提速技术 [J]. *天然气勘探与开发*, 2023, 46(1): 91-96.
- XIA Lianbin, HU Xihui, LI Wenzhe, et al. Technologies of ROP improvement in ultra-deep wells, Penglai gas area[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2023, 46(1): 91-96.
- [25] 王李昌, 王成善, 张金昌. 科学深井井壁稳定性机理分析及方法研究 [J]. *地质装备*, 2019, 20(4): 25-28.
- WANG Lichang, WANG Chengshan, ZHANG Jinchang. Mechanism analysis and method study of scientific deep well wall stability[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2019, 20(4): 25-28.
- [26] 李凡, 李大奇, 金军斌, 等. 顺北油气田辉绿岩地层井壁稳定钻井液技术 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(2): 61-67.
- LI Fan, LI Daqi, JIN Junbin, et al. Drilling fluid technology for wellbore stability of the diabase formation in Shunbei oil & gas field[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(2): 61-67.
- [27] 董书鑫, 孙元伟, 赵益忠, 等. 泥页岩井壁稳定工程因素影响规律分析 [J]. *山东化工*, 2021, 50(19): 196-197.
- DONG Shuxin, SUN Yuanwei, ZHAO Yizhong, et al. Analysis on the influence of engineering factors on wellbore stability of mud shale[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2021, 50(19): 196-197.
- [28] 苏义脑, 路保平, 刘岩生, 等. 中国陆上深井超深井钻井完井技术现状及攻关建议 [J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(5): 527-542.
- SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. *Oil Drilling &*

- Production Technology, 2020, 42(5): 527-542.
- [29] AHRENS T J. Rock physics & phase relations[M]. Washington DC: American Geophysical Union, 1995.
- [30] 范翔宇, 段美恒, 张千贵, 等. 页岩层理与含水率对声波传播影响的实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 53-61.
- FAN Xiangyu, DUAN Meiheng, ZHANG Qiangui, et al. An experimental study on the effects of shale stratification and hydration on the transmission of acoustic waves[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(2): 53-61.
- [31] 刘向君, 段茜, 梁利喜, 等. 基于邻点融合方法的碳酸盐岩孔隙结构统计模型及其声学响应特性[J]. 天然气工业, 2023, 43(4): 43-50.
- LIU Xiangjun, DUAN Qian, LIANG Lixi, et al. A statistical model of pore structure and acoustic response characteristics of carbonate rocks based on the adjacent interfusion method[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4): 43-50.
- [32] 谢玉洪, 单钰铭, 李绪深, 等. 温度、压力对莺—琼盆地储层岩石物性影响的实验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 218-224.
- XIE Yuhong, SHAN Yuming, LI Xushen, et al. Experimental study on effects of temperature and stress on properties of reservoir rocks in Yinggehai and Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(2): 218-224.
- [33] 耿建华, 赵峦, 麻纪强, 等. 超深碳酸盐岩油气储层岩石弹性性质高温高压超声实验研究[J]. 地球物理学报, 2023, 66(9): 3959-3974.
- GENG Jianhua, ZHAO Luanxiao, MA Jiqiang, et al. High-temperature and high-pressure ultrasonic experimental studies on elastic properties of ultra-deep carbonate reservoir rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(9): 3959-3974.
- [34] SUN Chuanxiang, NIE Haikuan, SU Haikun, et al. Porosity, permeability and rock mechanics of Lower Silurian Longmaxi Formation deep shale under temperature-pressure coupling in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 85-98.
- [35] 杨学文, 田军, 王清华, 等. 塔里木盆地超深层油气地质认识与有利勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 17-28.
- YANG Xuewen, TIAN Jun, WANG Qinghua, et al. Geological understanding and favorable exploration fields of ultra-deep formations in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 17-28.
- [36] 汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
- WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [37] SUN Qiang, ZHANG Weiqiang, XUE Lei, et al. Thermal damage pattern and thresholds of granite[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 2341-2349.
- [38] MASRI M, SIBAI M, SHAO J F, et al. Experimental investigation of the effect of temperature on the mechanical behavior of Tournemire shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 185-191.
- [39] AKDAG S, KARAKUS M, TAHERI A, et al. Effects of thermal damage on strain burst mechanism for brittle rocks under true-triaxial loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(6): 1657-1682.
- [40] 马啸, 马东东, 胡大伟, 等. 实时高温真三轴试验系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(8): 1605-1614.
- MA Xiao, MA Dongdong, HU Dawei, et al. A real-time high-temperature true triaxial test system and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(8): 1605-1614.
- [41] 刘造保, 王川, 周宏源, 等. 岩石高温高压两刚一柔型真三轴时效力学试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2477-2486.
- LIU Zaobao, WANG Chuan, ZHOU Hongyuan, et al. A true triaxial time-dependent test system with two rigid and one flexible loading frame for rock under real-time high temperature and high pressure and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2477-2486.
- [42] 卢运虎, 金衍, 陈勉, 等. 高温高压耦合下含不同倾角充填缝砂岩的强度实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊1): 2668-2679.
- LU Yunhu, JIN Yan, CHEN Mian, et al. Experimental study on strength of sandstone with different fracture angles and different filling methods under high-temperature and high-pressure coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 2668-2679.
- [43] 张文, 刘向君, 梁利喜, 等. 高温下页岩三轴压缩实验及井壁稳定研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 62-70.
- ZHANG Wen, LIU Xiangjun, LIANG Lixi, et al. Triaxial compression experiment and wellbore stability study of shale under high temperature[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 62-70.
- [44] 安康. 超深层碳酸盐岩力学实验及井壁坍塌压力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2022.
- AN Kang. Mechanical experiment of ultra-deep carbonate rock and research on collapse pressure of well[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2022.
- [45] 尹土兵, 李夕兵, 宫凤强, 等. 温压耦合作用下岩石动态破坏过程和机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 2814-2820.
- YIN Tubing, LI Xibing, GONG Fengqiang, et al. Study of dynamic failure processes and mechanism of rock subjected to coupling temperature and pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2814-2820.
- [46] 李庆辉, 李少轩. 超深层砂岩储层岩石力学特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 948-957.
- LI Qinghui, LI Shaoxuan. Experimental study on mechanical properties of ultra-deep sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 948-957.
- [47] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩

- 石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
- HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [48] 陈颢, 黄庭芳. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 10-165.
- CHEN Yong, HUANG Tingfang. Petrophysics[M]. Beijing: Peking University Press, 2001: 10-165.
- [49] 张岩, 李宁, 于海鸣, 等. 温度应力对裂隙岩体强度的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊1): 2660-2668.
- ZHANG Yan, LI Ning, YU Haiming, et al. Research on influence of thermal stress on fractured rock mass strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2660-2668.
- [50] 赵延林, 唐劲舟, 付成成, 等. 岩石黏弹塑性应变分离的流变试验与蠕变损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1297-1308.
- ZHAO Yanlin, TANG Jinzhou, FU Chengcheng, et al. Rheological test of separation between viscoelastic-plastic strains and creep damage model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1297-1308.
- [51] 李天斌, 高美奔, 陈国庆, 等. 硬脆性岩石热-力-损伤本构模型及其初步运用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1477-1484.
- LI Tianbin, GAO Meiben, CHEN Guoqing, et al. A thermal-mechanical-damage constitutive model for hard brittle rocks and its preliminary application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1477-1484.
- [52] 吴星辉, 李鹏, 郭奇峰, 等. 热损伤岩石物理力学特性演化机制研究进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(5): 827-839.
- WU Xinghui, LI Peng, GUO Qifeng, et al. Research progress on the evolution of physical and mechanical properties of thermally damaged rock[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(5): 827-839.
- [53] ZOBACK M D, BARTON C A, BRUDY M, et al. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 1049-1076.
- [54] FAN Xiangyu, ZHANG Qiangui, DUAN Meiheng, et al. Mathematical model for calculating the horizontal principal stress of a faulted monoclinical structure in southwest Qaidam Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(11): 2697-2729.
- [55] 范翔宇, 么勃卫, 张千贵, 等. 基于声波信号预测 Kaiser 应力点的水平地应力[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 40-48.
- FAN Xiangyu, YAO Bowei, ZHANG Qiangui, et al. Study on the calculated method of horizontal in-situ stress based on the Kaiser stress point predicted by acoustic signal[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(2): 40-48.
- [56] 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.
- [57] 许忠淮. 地应力研究现状与展望[J]. 地球科学进展, 1990, 5(5): 27-34.
- XU Zhonghuai. Current situation and prospect of geostress research[J]. Advances in Earth Science, 1990, 5(5): 27-34.
- [58] 赖锦, 白天宇, 肖露, 等. 地应力测井评价方法及其地质与工程意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 1033-1043.
- LAI Jin, BAI Tianyu, XIAO Lu, et al. Well-logging evaluation of in-situ stress fields and its geological and engineering significances[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 1033-1043.
- [59] 段洋, 李琴, 贾艳芬, 等. 北美非常规储层地应力预测技术发展现状与趋势[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(2): 43-50.
- DUAN Yang, LI Qin, JIA Yanfen, et al. Development status and trend of in-situ stress prediction technology for unconventional reservoirs in North America[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2023, 37(2): 43-50.
- [60] 苏宏刚, 罗黎明. 地应力测试技术研究现状[J]. 陕西煤炭, 2023, 42(1): 59-62.
- SU Honggang, LUO Liming. Research status of ground stress test technology[J]. Shaanxi Coal, 2023, 42(1): 59-62.
- [61] 张小林, 应黎, 赵冬安. 超深勘察钻孔 ASR 法地应力测试技术应用[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版): 1-10[2023-01-04]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220118>. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220118.
- ZHANG Xiaolin, YING Li, ZHAO Dongan. Application of in-situ stress measurement technology of ultra deep survey borehole ASR method[J/OL]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition): 1-10[2023-01-04]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220118>. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220118.
- [62] 孙东生, 吕海涛, 王连捷, 等. ASR 和 DITF 法综合确定塔里木盆地 7km 深部地应力状态[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 383-391.
- SUN Dongsheng, LYU Haitao, WANG Lianjie, et al. Determination of the in-situ stress state at 7 km depth under Tarim Basin by ASR and DITF methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 383-391.
- [63] 蔡军, 李文拓, 刘鹏, 等. 琼东南盆地深水区探井随钻压力监测技术与应用[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 99-105.
- CAI Jun, LI Wentuo, LIU Peng, et al. Research and application of while-drilling pressure-monitoring technology in exploration wells of deep water area, Qiongdongnan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(10): 99-105.
- [64] 彭海龙, 刘兵, 赫建伟, 等. 深水盆地高温高压环境下的地层压力预测方法[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 24-30.
- PENG Hailong, LIU Bing, HE Jianwei, et al. A formation pressure prediction method for deepwater basins under high temperatures and high pressures[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 24-30.
- [65] 刘爱群, 周家雄, 范彩伟, 等. 莺琼盆地高温超压地层钻前压力预测面临的问题与对策[J]. 天然气工业, 2015, 35(2): 21-26.
- LIU Aiqun, ZHOU Jiaxiong, FAN Caiwei, et al. Pre-drilling pressure prediction problems and solutions in the HTHP strata

- of the Yinggehai-Qiongdongnan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(2): 21-26.
- [66] 屈大鹏, 陈超, 王明飞, 等. 川东南地区基于海相泥页岩地层的压力系数预测——以丁山区块为例[J]. *物探与化探*, 2016, 40(2): 349-352.
- QU Dapeng, CHEN Chao, WANG Mingfei, et al. Researches based on the prediction methods of marine-shale pressure coefficients in southeastern Sichuan Basin: A case study of DS area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(2): 349-352.
- [67] 孙东征, 杨进, 杨翔骞, 等. 地层压力随钻预测技术在高温高压井的应用[J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(6): 746-751.
- SUN Dongzheng, YANG Jin, YANG Xiangqian, et al. Application of formation pressure prediction while drilling technology in HTHP wells[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(6): 746-751.
- [68] HUANG Yi, LUO Ming, LI Wentuo, et al. Application of formation pressure while drilling prediction technology in offshore HTHP wells[C]//ARMA-CUPB Geothermal International Conference. Beijing: American Rock Mechanics Association, 2019: ARMA-CUPB-19-6386.
- [69] KANG Yongfeng, YU Mengjiao, MISKA S, et al. Wellbore stability: A critical review and introduction to DEM[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 2009: SPE-124669-MS.
- [70] YANG Xu, SHI Xiangchao, MENG Yingfeng, et al. Wellbore stability analysis of layered shale based on the modified Mogi-Coulomb criterion[J]. *Petroleum*, 2020, 6(3): 246-252.
- [71] 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.
- [72] ZHANG Qiangui, FAN Xiangyu, CHEN Ping, et al. Geomechanical behaviors of shale after water absorption considering the combined effect of anisotropy and hydration[J]. *Engineering Geology*, 2020, 269: 105547.
- [73] ROSHAN H, EHSANI S, MARJO C E, et al. Mechanisms of water adsorption into partially saturated fractured shales: An experimental study[J]. *Fuel*, 2015, 159: 628-637.
- [74] FAN Xiangyu, HE Liang, ZHANG Qiangui, et al. Effect of hydration on pore structure and physical properties of Permian basalt and tuff in Sichuan Basin during pressurized imbibition[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 213: 110322.
- [75] ZHANG Qiangui, YAO Bowei, FAN Xiangyu, et al. A failure criterion for shale considering the anisotropy and hydration based on the shear slide failure model[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(4): 447-462.
- [76] CYGAN R T, LIANG Jianjie, KALINICHEV A G. Molecular models of hydroxide, oxyhydroxide, and clay phases and the development of a general force field[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(4): 1255-1266.
- [77] ZHENG Y, ZAOUI A. Temperature effects on the diffusion of water and monovalent counterions in the hydrated montmorillonite[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2013, 392(23): 5994-6001.
- [78] CAMARA M, XU Jiafang, WANG Xiaopu, et al. Molecular dynamics simulation of hydrated Na-montmorillonite with inorganic salts addition at high temperature and high pressure[J]. *Applied Clay Science*, 2017, 146: 206-215.
- [79] 张亚云, 陈勉, 邓亚, 等. 温压条件下蒙脱石水化的分子动力学模拟[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(10): 1489-1498.
- ZHANG Yayun, CHEN Mian, DENG Ya, et al. Molecular dynamics simulation of temperature and pressure effects on hydration characteristics of montmorillonites[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(10): 1489-1498.
- [80] WESTERGAARD H M. Plastic state of stress around a deep well[J]. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, 1940, 27: 387-391.
- [81] WANG Bo, SUN Jinsheng, SHEN Feng, et al. Mechanism of wellbore instability in continental shale gas horizontal sections and its water-based drilling fluid countermeasures[J]. *Natural Gas Industry B*, 2020, 7(6): 680-688.
- [82] GAO Jiajia, DENG Jingen, LAN Kai, et al. Porothermoelastic effect 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.
- [83] 邓金根, 张洪生. 钻井工程中井壁失稳的力学机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 3-80.
- DENG Jingen, ZHANG Hongsheng. The mechanical mechanism of wellbore instability in drilling engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 3-80.
- [84] LIU Xiangjun, DING Yi, RANJITH P G, et al. Hydration index and hydrated constitutive model of clay shale using acoustic frequency spectrum[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(5): 1748-1766.
- [85] 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): 15-21.
- 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): 15-21.
- [86] ZHANG Qiangui, YAO Bowei, FAN Xiangyu, et al. A modified Hoek-Brown failure criterion for unsaturated intact shale considering the effects of anisotropy and hydration[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 241: 107369.
- [87] FAN Xiangyu, ZHANG Mingming, ZHANG Qiangui, et al. Wellbore stability and failure regions analysis of shale formation accounting for weak bedding planes in ordos basin[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 77: 103258.
- [88] ZHANG Qiangui, JIA Wenyu, FAN Xiangyu, et al. A review of the shale wellbore stability mechanism based on mechanical-chemical coupling theories[J]. *Petroleum*, 2015, 2(1): 91-96.
- [89] LIU Xiangjun, ZENG Wei, LIANG Lixi, et al. Wellbore stability analysis for horizontal wells in shale formations[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 31: 1-8.

- [90] 何世明, 陈俞霖, 马德新, 等. 井壁稳定多场耦合分析研究进展[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 81-92.
HE Shiming, CHEN Yulin, MA Dexin, et al. A review on wellbore stability with multi-field coupling analysis[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(2): 81-92.
- [91] 李文达. 裂缝性地层井壁稳定多场耦合机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
LI Wenda. The research on mechanism of wellbore stability in fractured formation considering multi-field coupling[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [92] 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.
- [93] 马天寿, 陈平. 层理性页岩水平井井壁稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1375-1383.
MA Tianshou, CHEN Ping. Analysis of wellbore stability for horizontal wells in stratification shale[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(4): 1375-1383.
- [94] 张亚云, 李大奇, 高书阳, 等. 顺北油气田奥陶系破碎性地层井壁失稳影响因素分析[J]. 断块油气田, 2022, 29(2): 256-260.
ZHANG Yayun, LI Daqi, GAO Shuyang, et al. Analysis on influencing factors of wellbore instability of Ordovician fractured formation in Shunbei oil and gas field[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(2): 256-260.
- [95] 张健. 超深裂缝性地层井壁失稳机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
ZHANG Jian. Study on the mechanism of wellbore instability in ultra-deep fractured formation[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [96] 丰全会, 程远方, 张建国. 井壁稳定的弹塑性模型及其应用[J]. 石油钻探技术, 2000, 28(4): 9-11.
FENG Quanhui, CHENG Yuanfang, ZHANG Jianguo. Elastic & plastic model for borehole stability and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(4): 9-11.
- [97] 赵志国. 顺北1井区桑塔木组火成岩侵入体井壁稳定技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
ZHAO Zhiguo. Study on wellbore stability of igneous rock intrusion in Sangtamu Formation in Shunbei No.1 Well area[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [98] 马天寿, 张赞, 邱艺, 等. 基于可靠度理论的斜井井壁失稳风险评价方法[J]. 石油学报, 2021, 42(11): 1486-1498.
MA Tianshou, ZHANG Yun, QIU Yi, et al. Risk evaluation method of borehole instability of deviated wells based on reliability theory[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1486-1498.
- [99] AADNØY B S, LOOYEH R. Petroleum rock mechanics: Drilling operations and well design[M]. Boston: Gulf Professional Publishing, 2012.
- [100] MA Tianshou, ZHANG Yun, QIU Yi, et al. Effect of parameter correlation on risk analysis of wellbore instability in deep igneous formations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208(Part C): 109521.
- [101] 陈颖杰, 邓传光, 马天寿. 井壁失稳风险的可靠度理论评价方法[J]. 天然气工业, 2019, 39(11): 97-104.
CHEN Yingjie, DENG Chuanguang, MA Tianshou. A risk assessment method of wellbore instability based on the reliability theory[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(11): 97-104.
- [102] ZAHIRI J, ABDIDEH M, GOLAB E G. Determination of safe mud weight window based on well logging data using artificial intelligence[J]. Geosystem Engineering, 2019, 22(4): 193-205.
- [103] 马天寿, 张东洋, 杨赞, 等. 基于机器学习模型的斜井坍塌压力预测方法[J]. 天然气工业, 2023, 43(9): 119-131.
MA Tianshou, ZHANG Dongyang, YANG Yun, et al. Machine learning model based collapse pressure prediction method for inclined wells[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(9): 119-131.
- [104] 杨沛, 刘洪涛, 李宁, 等. 塔里木油田超深井钻井设计及优化技术——以亚洲最深井轮探1井为例[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 126-135.
YANG Pei, LIU Hongtao, LI Ning, et al. Drilling design and optimization technology of ultra-deep wells in the Tarim Oilfield: A case study of Well Luntan 1, the deepest well in Asia[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 126-135.
- [105] 田军, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2021, 42(8): 971-985.
TIAN Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 971-985.
- [106] 邹灵战, 毛蕴才, 刘文忠, 等. 盐下复杂压力系统超深井的非常规井身结构设计——以四川盆地五探1井为例[J]. 天然气工业, 2018, 38(7): 73-79.
ZOU Lingzhan, MAO Yuncui, LIU Wenzhong, et al. Unconventional casing programs for subsalt ultra-deep wells with a complex pressure system: A case study on Well Wutan 1 in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(7): 73-79.
- [107] 陈宗琦, 刘湘华, 白彬珍, 等. 顺北油气田特深井钻井完井技术进展与发展思考[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 1-10.
CHEN Zongqi, LIU Xianghua, BAI Binzhen, et al. Technical progress and development consideration of drilling and completion engineering for ultra-deep wells in the Shunbei oil & gas field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 1-10.
- [108] 张敏, 丁群洋, 曹立明. 元坝区块超深井钻井提速关键技术应用[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(1): 92-96.
ZHANG Min, DING Qunyang, CAO Liming. Application of key technology for increasing drilling speed of ultra-deep wells in Yuanba Block[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(1): 92-96.
- [109] 刘锋报, 孙金声, 王建华. 国内外深井超深井钻井液技术现状及发展趋势[J]. 新疆石油天然气, 2023, 19(2): 34-39.
LIU Fengbao, SUN Jinsheng, WANG Jianhua. A global review of technical status and development trend of drilling fluids for

- deep and ultra-deep wells[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023, 19(2): 34-39.
- [110] 王中华. 国内钻井液技术进展评述[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 95-102.
WANG Zhonghua. Review of progress on drilling fluid technology in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 95-102.
- [111] 刘政, 李俊材, 蒋学光. 强封堵高密度油基钻井液在新疆油田高探 1 井的应用[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(4): 467-474.
LIU Zheng, LI Juncai, JIANG Xueguang. Application of high-density plugging oil based drilling fluid in Well Gaotan-1 of Xinjiang Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(4): 467-474.
- [112] 周健, 贾红军, 刘永旺, 等. 库车山前超深超高压盐水层安全钻井技术探索[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(1): 54-59.
ZHOU Jian, JIA Hongjun, LIU Yongwang, et al. Research on safe drilling technology for ultra deep ultrahigh pressure saltwater zones in piedmont area, Kuche[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(1): 54-59.
- [113] 李宁, 杨海军, 文亮, 等. 库车山前超深井抗高温高密度油基钻井液技术[J]. 世界石油工业, 2020, 27(5): 68-73.
LI Ning, YANG Haijun, WEN Liang, et al. High temperature and high density oil-based drilling fluid for ultra-deep wells in Kuqa Piedmont[J]. World Petroleum Industry, 2020, 27(5): 68-73.
- [114] 祝学飞, 孙俊, 舒义勇, 等. ZQ2 井盐膏层高密度欠饱和盐水聚磺钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(6): 716-720.
ZHU Xuefei, SUN Jun, SHU Yiyong, et al. A high density undersaturated saltwater drilling fluid for salt and gypsum drilling in Well ZQ2[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(6): 716-720.
- [115] 毛惠. 超高温超高密度水基钻井液技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
MAO Hui. Research on the technology of ultra-high temperature and ultra-high density water based drilling fluid[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [116] 杨文权, 张宇, 程智, 等. 超高温钻井液在杨税务潜山深井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(3): 298-302.
YANG Wenquan, ZHANG Yu, CHENG Zhi, et al. Application of an ultra-high temperature drilling fluid in deep well drilling in Yangshuiwu buried hill[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(3): 298-302.
- [117] 王涛, 刘锋报, 罗威, 等. 塔里木油田防漏堵漏技术进展与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 28-33.
WANG Tao, LIU Fengbao, LUO Wei, et al. The technical advance and development suggestions for leakage prevention and plugging technologies in the Tarim Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 28-33.
- [118] 李大奇, 曾义金, 刘四海, 等. 裂缝性地层承压堵漏模型建立及应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 79-85.
LI Daqi, ZENG Yijin, LIU Sihai, et al. Wellbore strengthening model in fractured formation[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 79-85.
- [119] 刘金华, 刘四海, 龙大清, 等. 明 1 井交联成膜与化学固结承压堵漏技术[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(2): 54-60.
LIU Jinhua, LIU Sihai, LONG Daqing, et al. Strengthening plugging operations by combining cross-linked film and chemical consolidation in Well Ming-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(2): 54-60.
- [120] 方俊伟, 贾晓斌, 刘文堂, 等. ZYSD 高失水固结堵漏技术在顺北 5-9 井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(1): 74-78.
FANG Junwei, JIA Xiaobin, LIU Wentang, et al. Control mud losses in Well Shunbei-5-9 with ZYSD high fluid loss solidifying slurry[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(1): 74-78.
- [121] 刘伟, 王瑛, 郭庆丰, 等. 精细控压钻井技术创新与实践[J]. 石油科技论坛, 2016, 35(4): 32-37.
LIU Wei, WANG Ying, GUO Qingfeng, et al. Innovation and application of accurate managed pressure drilling technology[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2016, 35(4): 32-37.
- [122] 曾知昊. 精细控压钻井技术的应用研究[J]. 石化技术, 2018, 25(11): 48.
ZENG Zhihao. Research on the application of fine control pressure drilling technology[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(11): 48.
- [123] 周英操, 刘伟. PCDS 精细控压钻井技术新进展[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 68-74.
ZHOU Yingcao, LIU Wei. New progress on PCDS precise pressure management drilling technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 68-74.
- [124] 齐玉, 古闵全, 曹权. 四川盆地火山岩优快钻井技术[J]. 钻采工艺, 2021, 44(1): 48-51.
QI Yu, GU Minquan, CAO Quan. Fast drilling technology for volcanic rocks in Sichuan Basin[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(1): 48-51.

(修改回稿日期 2024-01-10 编辑 王 斌)



本文互动