引用格式：孙金声，蔡文晖，王金堂，等，2026. 页岩气低摩阻钻井液研究进展及发展趋势[J]. 地质力学学报，32（1）：3−14. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025151

Citation: SUN J S，CAI W H，WANG J T，et al.，2026. Research progress and development trends of low-friction drilling fluid for shale gas[J]. Journal of Geomechanics，32（1）：3−14. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025151

页岩气低摩阻钻井液研究进展及发展趋势

孙金声[1,2]，蔡文晖[1]，王金堂[1]，吕开河[1]，赵　珂[1]，张俊豪[1]

SUN Jinsheng[1,2]，CAI Wenhui[1]，WANG Jintang[1]，LYU Kaihe[1]，ZHAO Ke[1]，ZHANG Junhao[1]

1. 中国石油大学（华东）石油工程学院，山东 青岛 266580；
2. 中国石油集团工程技术研究院有限公司，北京 102206

1. *School of Petroleum Engineering*, *China University of Petroleum* (*East China*), *Qingdao* 266580, *Shandong*, *China*;
2. *CNPC Engineering Technology R & D Company Limited*, *Beijing* 102206, *China*

Research progress and development trends of low-friction drilling fluid for shale gas

Abstract: ［**Objective**］Shale gas is an important unconventional natural gas resource in China, boasting significant potential reserves. Deep shale gas reservoirs generally have specific geological characteristics, such as low porosity and permeability, strong abrasiveness, and high temperature and pressure. Technical problems often arise during drilling, such as wellbore instability, friction in the long horizontal section, and large torque. Low-friction drilling fluid technology is key to safe and efficient drilling in deep shale gas reservoirs. ［**Methods**］Based on an investigation of the current state of shale gas exploration and development in the world, this paper analyzes the evaluation index of drilling fluid lubricity and its drag reduction mechanisms, including, among others, lubrication film formation, rolling friction, and wettability regulation. ［**Results**］This paper systematically reviews the lubrication performance and research progress of various low-friction drilling fluid systems, such as water-based and oil-based drilling fluid systems. ［**Conclusions**］It is proposed that, in the future, it will be necessary to continue to strengthen the research and development of new, high-performance drilling fluid lubricants; to promote the intelligent and green transformation of drilling fluid systems; and to facilitate the multi-objective coordination between lubrication and wellbore stability technologies to meet the challenges posed by complex formations. ［**Significance**］This research provides strong technical support for the safe and efficient development of global shale gas, for enhancing the productivity of deep oil and gas reserves.

Keywords: shale gas; drilling fluid; low friction; lubricant; lubrication mechanism

摘　要：页岩气是中国重要的非常规天然气资源，资源潜力巨大。深部页岩气储层普遍具有低孔低渗、研磨性强、高温高压等特殊地质特性。钻井过程中经常面临着井壁失稳、长水平段摩阻、扭矩大等技术难题，低摩阻钻井液技术已成为深部页岩气储层安全高效钻进的关键。文章基于全球页岩气勘探开发现状的跟踪调研，剖析了钻井液润滑性的评价指标及其减阻机理，包括润滑膜形成、滚动摩擦、润湿性调控等多重作用机制，系统梳理了水基、油基等各类低摩阻钻井液体系的润滑性能与研究进展，提出了未

基金项目：国家自然科学基金基础科学中心项目（52288101）；国家自然科学基金面上项目（52274025）；山东省泰山学者计划（tsqn202408090）

This research was financially supported by the Basic Science Center Project of the National Natural Science Foundation of China (Grant No.52288101), the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52274025), and the Taishan Scholar Plan of the Shandong Province (Grant No. tsqn202408090).

第一作者：孙金声（1965—），男，博士，中国工程院院士，教授，从事油气田钻井与完井工程方面的技术研究工作。Email：sunjinsheng@upc.edu.cn

通信作者：王金堂（1988—），男，博士，教授，从事非常规油气资源钻井液理论技术研究与工程实践。Email：wangjintang@upc.edu.cn

收稿日期：2025−10−11；**修回日期：**2026−01−18；**录用日期：**2026−01−19；**网络出版日期：**2026−01−19；**责任编辑：**吴芳

Received：2025−10−11；Revised：2026−01−18；Accepted：2026−01−19；Available Online：2026−01−19；Handling Editor：WU Fang

来应继续加强研发新型高性能钻井液润滑剂。未来钻井液体系将进一步向智能化、绿色化转型，实现润滑与井壁稳定等技术的多目标协同，为应对复杂地层挑战、全球页岩气安全高效开发和深层油气增储上产提供有力的技术支撑。

关键词：页岩气；钻井液；低摩阻；润滑剂；润滑机理

中图分类号：TE254; P618.13 **文献标识码**：A **文章编号**：1006−6616(2026)01−0003−12

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025151

0 引言

页岩气作为赋存于富有机质页岩层系中的非常规天然气资源，主要以吸附态与游离态存在，凭借其全球广泛的资源分布和相对清洁的燃烧特性，已成为推动能源结构转型的关键力量。自20世纪末以来，美国的“页岩气革命”通过成熟的非常规油气勘探开发体系、水平钻井与大规模体积压裂技术以及完备的产业链协同，实现页岩气产量成倍增长，对全球天然气市场格局、定价机制及能源治理模式产生了深远影响。截至2023年底，中国累计探明页岩气地质储量处于万亿方级规模，技术可采储量达数千亿方，主要集中于四川盆地及其周缘的涪陵、长宁、威远等大型页岩气田(王玉芳等, 2017; 包书景等, 2025)，初步形成了以四川盆地为核心的规模化开发格局。产业规模上，中国已成为继美国之后的全球第二大页岩气生产国，2024年页岩气产量达到254×10^8 m^3(贾爱林等, 2025)；其中，中国最大页岩气生产基地——中国石油川南页岩气田累计产气量突破1000×10^8 m^3。勘探技术方面，依托日益成熟的体系，中国不仅成功开发了多个埋深3500 m以浅、探明储量超千亿立方米的页岩气田，更在深层(3500～4500 m)乃至超深层(>4500 m)领域获得了工业气流并正着力攻关相关勘探开发技术(谢军等, 2017; 郭旭升等, 2022a, 2022b; 聂海宽等, 2024)。页岩气地质储量与技术可采储量持续增长，为保障中国能源安全和“双碳”目标的实现提供了重要支撑。

然而，页岩气储层普遍具有低孔隙度、低渗透率、强非均质性及埋深变化大等地质特征，随着页岩气开发的逐步深入，井筒稳定性、摩阻控制与作业安全等工程难题日益突出，直接影响了钻井效率与后续压裂开发效果(李春麟等, 2020)。在全球和中国天然气需求持续增长的背景下(贾爱林等, 2025; 刘成林等, 2025)，开发能够显著降低钻井摩阻、改善井眼清洁与增强井壁稳定性的钻井液关键技术，已成为实现页岩气高效开发的核心难题之一。在当前以水平井和体积压裂为核心的页岩气开发模式下，钻井液不仅承担润滑减阻、冷却钻具、携带岩屑和稳定井壁等功能，还通过与地层岩石、井下工况及温压环境的复杂耦合，直接影响井筒质量、压裂网络形成效率和规模，关乎钻采效率与成败。低摩阻钻井液已成为提升深层、超深层页岩气开发效率、降低工程风险、推动规模化应用的关键技术途径，具有重要意义和广阔前景。

文章基于国内外页岩气低摩阻钻井液的研究进展，重点分析了其作用机理、材料体系与应用实践，评估了各类低摩阻钻井液的性能特点及适用条件，展望了未来页岩气低摩阻钻井液发展趋势，为我国页岩气资源的规模化高效安全开发提供理论基础与技术支撑。

1 页岩气钻井面临的挑战

页岩气钻井是一项融合地质工程、材料科学与工艺技术等多领域的复杂工程，页岩气钻井目前面临的挑战主要体现在三大方面。

一是页岩气储层的特殊物性的挑战。页岩储层以细粒沉积物为主，颗粒细小且沉积致密，长期的压实作用和胶结作用进一步降低了孔隙度和渗透率，具体表现为孔隙度低于10%(常见范围为3%～8%)、渗透率处于10^{-9} μm^{2}级别(Zou et al., 2017; 高东伟等, 2024)，这种低孔、低渗地层特征决定了须采用长水平段水平井进行开发才能实现页岩气经济性开采。然而，这种开采方式导致钻柱在水平段和造斜段与井壁接触面积和时间大幅增加，且由于页岩储层自身研磨性强(宋东东等, 2025; 袁青松等, 2025)，在井下易产生极高的摩阻和扭矩，导致钻压难以有效传递至钻头，出现显著的“托压”现象，不仅延长了钻井周期，更大幅提升了卡钻等井下复杂风险。钻井液是保障复杂结构井安全钻进的核心要素，在页岩气长水平段水平井钻井中，钻

井液必须具备良好的润滑性能。

二是页岩气井长水平段钻井工艺的挑战。随着页岩气开发技术的不断进步，水平段长度呈现持续增长趋势。美国 Permian 地区的水平段长度从 2010 年的平均不到 1220 m 增长到 2022 年的超过 3000 m（Ameen, 2023）。中国涪陵页岩气田的焦页 44-Z5HF 井水平段长度达到 5442 m。长水平段钻井面临的首要挑战是摩阻扭矩控制问题。水平段向储层内部延伸越长，摩阻扭矩问题越突出，严重影响钻压传递效率。研究表明，钻柱所受平均摩阻扭矩在增斜段处激增达到极大值，而进入水平段后，摩阻扭矩急剧减小，最后趋于稳定，但水平段的平均摩阻扭矩远大于直井段（刘伟吉等，2023），这对钻井液材料与施工工艺提出了更高的要求。

三是深层、超深层页岩气钻井带来的特殊挑战。随着深层、超深层页岩气的勘探开发，井下高温高压环境进一步加剧了低摩阻钻井液技术面临的挑战，如川南地区志留系埋深为 3500～4000 m，储层温度最高可达 170 ℃、压力系数最高为 2.2，钻井液相对密度为 2.0～3.5（王健，2025），对钻井液性能要求远超常规页岩气井。在此类极端条件下，润滑剂易发生高温降解失效，进一步加剧了钻井难度。因此，采用低摩阻钻井液，并确保钻井液在高温高压环境下保持润滑稳定性，是有效控制长水平井段中的摩阻与扭矩、解决“托压”难题的关键。

2　页岩气钻井液的润滑机理

页岩气水平井钻井过程中，钻柱与井壁、套管之间的摩阻、扭矩过大会严重影响机械钻速，也是引发卡钻等井下复杂情况的关键因素（祝效华，2025）。高效润滑剂通过多种物理化学机制协同作用，显著降低摩擦系数，是实现安全、高效钻井的核心。其作用机制主要涵盖以下几个方面（图 1）。

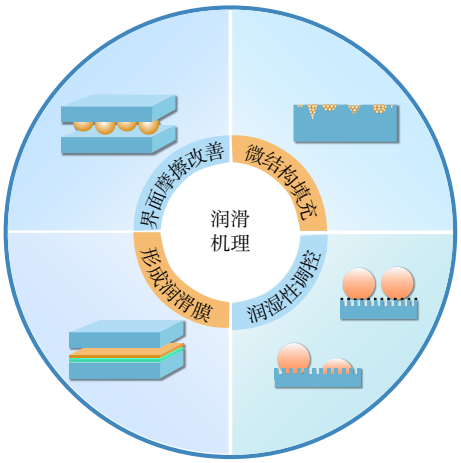


图 1　低摩阻钻井液的作用机制汇总图

Fig. 1　Summary diagram of action mechanisms of low-friction drilling fluid

2.1　润滑膜形成与边界润滑机理

形成润滑膜是钻井液润滑剂最常见、最有效的作用机制之一（Hsu, 2005）。在高温高压的井下环境中，钻具与岩石接触面之间的润滑状态多属于边界润滑，因此边界润滑在实际钻具与钻具、钻具与井壁间的摩擦中十分常见（季敏，2022）。边界润滑这一概念是由 Hardy and Doubleday（1922）提出，即润滑剂分子的疏水端在摩擦表面形成有序排列的单分子层润滑膜，使得两摩擦表面被润滑膜隔开，从而达到降磨减阻作用。润滑膜主要包括物理吸附膜、化学吸附膜、化学反应膜、沉积膜（阮少军等，2017；李公让和王承俊，2020），其形成机制与强度存在差异（表 1）。

表 1　不同类型润滑膜形成机制与强度对比

Table 1　Comparison of formation mechanisms and strengths of different types of lubricating films

润滑膜类型	形成机制	润滑膜强度	局限性
物理吸附膜	润滑剂分子利用范德瓦耳斯力吸附于摩擦面	较弱	高温下易解吸附失效
化学吸附膜	大极性基团与接触面发生反应	中等	高载荷下易被磨损剥落
化学反应膜	润滑基团与金属在极压条件下发生摩擦化学反应	强	通常需高温触发
沉积膜	纳米固体颗粒沉积在金属表面	取决于固体种类	易受滤饼厚度及固相干扰

物理吸附膜是依靠润滑剂分子与钻具或黏土表面通过范德瓦耳斯力吸附形成的定向排列单分子或多分子层，这类膜常见于低速、低载荷的边界润滑工况；例如，以油酸或油酸酰胺作为摩擦改进剂时，可在金属表面通过物理吸附形成减摩膜（Zhang, 2015）。

化学吸附膜是借助极性分子与金属表面发生化学键合作用而生成的膜，通常出现在中速、中等载荷的边界润滑中（Zhang and Meng, 2015）。如有机

硅烷偶联剂能够在金属表面形成结构有序、取向性强且稳定性高的化学吸附单分子膜(陈泽民, 2012)。

化学反应膜是指通过向钻井液中添加含硫、氯、磷、硼等元素的化合物,使其与金属表面发生化学反应所生成的更稳定的保护膜,适用于高速、高载荷等极端边界润滑条件(Hsu and Gates, 2004)。

沉积膜则是由润滑剂中某些化学成分在摩擦副表面沉积形成的分子膜,可有效降低摩阻,液相润滑剂中的大部分固体添加剂均通过此类沉积成膜机制发挥作用(杨广彬, 2012)。

然而,在深层页岩气钻井实际工况下,上述润滑膜的稳定性均面临严峻挑战。物理吸附膜由于主要依赖弱范德瓦耳斯力,在深层高温环境下,润滑分子热运动加剧,极易发生脱附,导致润滑失效。化学吸附膜虽稳定性略高,但在深层页岩大压差、高载荷挤压下,膜层易被机械剪切破坏且修复速度慢。沉积膜受深层高温影响,部分固体沉积成分可能发生团聚、分解,导致膜层致密性下降,同时在高压冲刷与摩擦剪切作用下,沉积膜易出现局部脱落,难以维持连续完整的润滑界面,丧失减摩效果。相比之下,化学反应膜在高温极压环境下通过原位反应生成的无机盐或络合物膜具有最高的结构强度,是深层页岩气钻井液设计的重点方向。

2.2 滚动摩擦与剪切减阻机理

与形成润滑膜的机理不同,该机制利用的是固体润滑剂的物理形态。

滚动摩擦减阻的原理类似于球轴承,润滑剂颗粒像滚珠一样存在于两摩擦面之间,将滑动摩擦转为滚动摩擦,从而显著降低扭矩和摩阻。最常见的材料如玻璃小球和塑料小球等(王凯等, 2023)。当前美国水平井钻井中广泛应用的二乙烯苯与苯乙烯共聚物塑料小球润滑剂,其对钻井液的润滑效果很好,能够降低摩阻 20% 左右,降低扭矩 35% 左右,耐温能力可达 205 ℃ 以上,并且与水基和油基钻井液均呈现良好配伍性(李德江, 1998)。

剪切减阻机理的核心在于利用具有层状晶体结构的固体材料在摩擦界面间的低剪切强度滑移来替代直接滑动摩擦剪切,其中石墨是此机制的典型代表。石墨的层与层之间通过范德瓦耳斯力连接,层间结构的剪切力较弱,当摩擦副表面发生相对运动时,施加的剪切力会使这些石墨片层之间发生相对滑移,从而将界面处的高阻力摩擦转化为石墨内部层与层之间的低剪切应力滑移,从而实现减阻提速(于呈呈, 2019)。

滚动摩擦减阻与剪切减阻机制在常温下效果显著,但在页岩气长水平段施工中存在明显局限:一方面,深层高温可能导致塑料小球等有机高分子材料软化变形,使其失去“滚珠”功能甚至增加黏附风险;另一方面,由于页岩气钻井多采用高密度钻井液,大量的固相沉淀和滤饼增厚会掩埋纳米级滚动颗粒,削弱其减阻效果。

2.3 润湿性调控机理

润湿性调控是钻井液润滑剂实现高效减阻的重要途径之一(Li et al., 2021)。该机制通过改变钻具或井壁表面的润湿性能,降低钻屑和泥浆的黏附从而减少摩阻。具体而言,通过在表面构建特殊的化学涂层或微观结构,使其从亲油变为亲水或双疏(既疏水又疏油),可显著改善界面润滑状态。

根据实际应用,目前主要采用三类润湿调控策略:一是构建超亲水/水下疏油表面,利用牢固的水膜隔离油性物质防止黏附;二是形成疏水疏油表面,借助低表面能物质(如氟碳化合物)和微细粗糙结构产生滞留空气层,减小接触面积;三是设计超滑表面,通过注入润滑液实现油滴的极易滑动。研究表明,这些方法能够将表面的油接触角提高至 120°以上,甚至使油滴滑动角低于 15°,从而大幅降低摩擦系数,有效防止钻屑沉积和泥包发生(陈楚君, 2022)。

润湿性调控机理在实际钻井液润滑中表现出了良好的适用性和稳定性,尤其适用于水平井和大位移井等高摩阻工况,通过优化表面润湿性,显著提升钻井效率和安全性能。然而,深层页岩气井下高矿化度(如高浓度 Ca^{2+}、Mg^{2+})环境会显著改变表面的电荷状态,干扰润湿调控剂的定向吸附,导致超亲水或双疏表面的性能退化。

2.4 微结构填充与修复机理

在钻井过程中,井壁岩石表面和金属钻具表面在微观尺度上均是粗糙不平的。表面的微凸起和缺陷是造成磨损和摩阻升高的重要原因(张成等, 2025)。微结构填充与修复机理是指润滑剂中的活性组分或纳米颗粒能够优先吸附或填充在这些微缺陷处,从而在微观上修复并平整化接触表面。这种“修复”作用降低了表面的粗糙度,在提升表面光滑度的同时,增大了有效接触面积,避免了应力集中,不仅能够减少因摩擦副表面不平整导致的高摩阻,也使得后续形成的润滑膜更加完整和均匀,从而显著

提升整体润滑效率，减少钻具的磨损（Krishnamurthy et al., 2021）。

在实际深层工况下，若填充颗粒的粒径与裂缝/孔隙不匹配，或在高剪切流场下填充物附着力不足，修复层极易发生二次剥落。此外，深层围岩应力剧烈变化导致的裂缝动态扩展，也对修复材料的实时自修复能力提出了严峻挑战。

2.5　复合润滑机理

在现阶段页岩气钻井工程实践中，单一机理润滑已难以满足现场工程需要，研究人员开发出了多种机理复合润滑的钻井液润滑剂，来实现协同增效。如耿月等（2021）研发的钻井液润滑剂可以通过极性吸附基团形成吸附膜，其中表面活性剂物质能够通过提高其乳化性能，增强润滑剂分子的分散性，同时其特定分子能够在极压条件下产生化学反应形成极压膜；添加了石墨烯的润滑剂体系在原有润滑作用的基础上，既利用了石墨烯片层间的滑移，也利用了其卷曲形成的球状结构的滚动效应，其巨大的比表面积还使其能高效地吸附并修复金属表面。

这种多机理的协同与叠加效应，使得现代钻井液润滑剂能够在复杂的井下条件下，构建一个多层次、多模式的综合润滑防护体系，从而应对页岩气钻井中高密度、高温、高摩阻的严峻挑战，最终实现高效润滑与钻井提速。

3　低摩阻钻井液的类型与研究进展

低摩阻钻井液是针对大位移井、水平井等易产生高摩阻、扭矩的复杂井而开发的高性能钻井液。按照钻井液组成中分散介质（连续相）不同的物理化学性质分类，低摩阻钻井液体系主要包含低摩阻水基钻井液、低摩阻油基钻井液和低摩阻合成基钻井液 3 类（表 2）。

3.1　低摩阻水基钻井液研究进展

水基钻井液是以水为连续相，通过添加各种处理剂来调节其性能的钻井流体。水基钻井液相较于其他类型的钻井液具有环保性高、经济性好、低毒或无毒性、性能易调整和地层适配性强的优势，随着中国《环境保护法》的出台和地方环保要求的不断提高，以及降本增效需求的不断增大，水基钻井液展现出广阔的应用前景。针对页岩气水平井钻井过程中井筒摩阻高、机械钻速低的工程难题，研究人员致力于开发兼具优异的润滑性、抑制性及高温稳定性的高性能页岩气低摩阻水基钻井液体系（孙金声等，2024）。该类钻井液体系在保持水基体系环境友好、成本可控等优势的基础上，通过添加高效润滑剂、纳米封堵材料及强效抑制剂等关键处理剂，可显著降低钻柱与井壁间的极压润滑系数，有效抑制页岩水化分散，增强井壁稳定性，降低高温高压滤失量，从而实现安全、高效和经济的长水平段钻井作业。

高效润滑剂的研制与复配是研制低摩阻钻井液的主要途径。欧阳伟等（2020）为解决长宁—威远地区页岩气勘探中因使用油基钻井液表现的环保性能差、钻屑处理费用高等问题，采用具有“膜效应”的合成脂润滑剂等添加剂对长宁—威远地区页岩气高密度水基钻井液进行了优化，优化后的页岩气水基钻井液比优化前有更低的极压润滑系数和滤饼摩擦系数，润滑性能远超威远现场用白油基钻井液体系。耿月等（2021）以工业废弃植物油中的长链脂肪酸和有机多元醇为原料，合成了脂肪酸酯类聚合物，并引入有机硼极压抗磨剂和非离子表面活性剂，研制出一种新型环保润滑剂 HBR-12：将 1.0% 的该润滑剂加入水基钻井液中时，钻井液体系的极压润滑系数降低率超过 80%，滤饼黏附系数降低 65% 以上，表现出优异的润滑效果。宋海等（2021）以改性植物油、有机多元醇、复合表面活性剂以及有机硼极压抗磨剂为原料，制备了一种抗高温环保润滑剂 GWHB-11，加入水基钻井液体系后在威远地区某页岩气井区进行了现场施工试验，钻井效率明显提高，且没有出现由于高摩阻、扭矩引起的井下复杂情况。许林等（2023）在室内采用发散法合成了一组以乙二胺为核的超支化分子，再以合成的高代数 G5.5 超支化高分子 PMA-EDA 为润滑添加剂，配制了水基润滑钻井液体系。当基浆中 PMA-EDA 加量提高到 4%，钻井液润滑系数从 0.179 下降到 0.054，降幅 69.8%，具有稳定、良好的润滑效果。由于部分纳米颗粒具有较强亲水性，在水基钻井液体系中易团聚，需要通过表面活性剂使纳米颗粒表面形成疏水层，改善纳米颗粒在钻井液中的稳定性，避免团聚，从而发挥应有的润滑效果（图 2）。针对海陆过渡相页岩储层井壁失稳风险高的难题，王维等（2024）构建了一套海陆过渡相页岩气储层的高性能水基钻井液体系，体系优选了抑制剂、封堵剂与润滑剂，钻井液极压润滑系数整体小于 0.15，该钻井液

体系在临汾区块 JY-P03-1H 井应用效果良好。经 API 及高温高压滤失测试表明(陈士奎等, 2025), 荆州嘉华科技有限公司研制的 Nano DRILL 超滑水基钻井液体系的滤失控制性能可满足浅层页岩气开发要求, 其页岩抑制性也显著优于所聚合物 KCl 水基钻井液、无固相水基钻井液两种水基钻井液体系。该超滑水基钻井液已成功应用于完钻井深 5976 m 的焦页 90-5HF 井, 效果稳定。韩涛(2025)研制了一种以新型润滑剂 RS-3 为核心处理剂的高性能水基钻井液体系。该体系在 120～150 ℃ 条件下老化 16 小时后, 极压润滑系数仍能达到 0.085, 且能保持稳定的流变性能。此外, 该体系在 150℃ 下的岩屑滚动回收率达到 91.8%, 展现出良好的页岩抑制性。陈毅荣与蒋志雄(2025)对长链脂肪酸实施改性处理, 引入有机多元醇、高温稳定剂及极性官能团, 开发出一种高效润滑剂 RNH-100。该润滑剂结合抑制剂、流型调节剂、降滤失剂和封堵剂等关键处理剂, 形成了一种适用于页岩气水平井的超低摩阻水基钻井液体系。测试结果显示, 该钻井液体系的极压润滑系数、泥饼黏附系数及摩擦系数分别仅为 0.056、0.039 和 0.066, 各项数值均显著低于聚磺钻井液和有机盐钻井液体系。近年来, 生物基润滑剂材料的研发备受关注。为改善酯基润滑剂性能, Yang et al.(2023)在水基低摩阻钻井液润滑剂中引入邻苯二酚结构, 通过多羟基与金属表面化学键合, 形成高强度润滑膜, 有效增强了其润滑性和耐磨性, 该研究为开发适用于多种复杂环境的邻苯二酚基润滑剂提供了分子设计参考(图 3)。

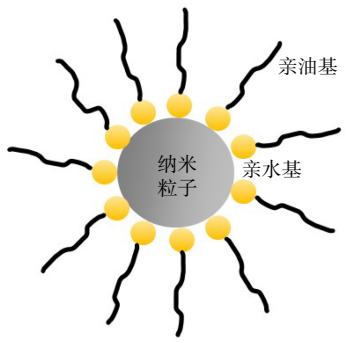


图 2 表面活性剂对纳米颗粒表面性质的影响

Fig. 2 Effects of surfactants on the surface properties of nanoparticles

性能优异的基液也可以增强钻井液体系的润滑性能。周姗姗等(2022)通过在水基钻井液连续相中引入一种具有润滑、抑制、降滤失三重功效的基

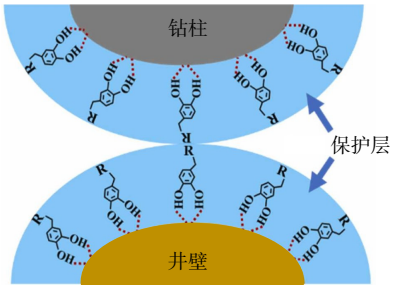


图 3 邻苯二酚在钻井液中的润滑机制

Fig. 3 Lubrication mechanism of catechol in drilling fluid

液, 配合固体润滑剂等处理剂, 构建出了一套超低摩阻水基钻井液体系, 成功将极压润滑系数降至 0.051, 抗温可达 140 ℃, 涪陵地区焦石坝区块现场应用过程中控制极压润滑系数始终小于 0.07, 润滑减阻效果显著。

通过强化钻井液体系的抑制性、稳定性等综合性能也可间接实现润滑和提速的目标。贝克休斯公司开发的 PERFORMAX 钻井液体系主要由稳定剂、成膜剂、页岩抑制剂和聚合物包被剂等组成。该体系中的硅铝酸盐能够在页岩表面形成包被层, 有效抑制泥页岩的水化作用, 从而持续增强其抑制性能。该体系特别适用于页岩气井中的水平井和大位移井, 通过高效封堵页岩的微小孔隙, 有助于显著提高钻井速度(许博等, 2016)。Newpark 公司研发的无固相聚合物水基钻井液体系 Evolution, 表现出与油基钻井液相近的润滑性能, 其抗温能力可达 204 ℃, 并具备优异的抗 CO_2、H_2S、盐钙污染等性能, 适用于页岩气储层。该体系能够显著提高机械钻速, 且经维护后可重复使用, 大幅降低钻井综合成本(彭双磊等, 2020)。田勇(2025)研制出了一套适合深层页岩气井的高效水基钻井液体系, 极压润滑系数为 0.098。此外, 其还具有较强的流变滤失性能、抑制性能和封堵性能, 能够有效降低深层页岩气井钻井复杂事故发生的频率, 提高钻井效率和钻井质量。

基于其优异的环保性和经济性, 页岩气水基钻井液近些年取得了长足发展, 在润滑与耐温等性能得到了显著提升, 多套水基低摩阻钻井液体系已成功在页岩气井应用, 效果良好, 部分高性能水基钻井液的综合性能已与油基钻井液相近, 应用前景广阔, 但在高水敏性地层等复杂地层应用时易引发井壁失稳等井下复杂难题, 有待进一步研发多功能一体化高性能水基钻井液体系。

3.2　低摩阻油基钻井液研究进展

油基钻井液则是以油为连续相的钻井液，润滑系数普遍较低。与北美页岩油开发过程类似，中国早期的页岩油勘探开发也多采用油基钻井液体系。为了降低钻井液成本的同时，兼顾环保性，部分油田在直井段采用水基钻井液钻进，在造斜段和水平段仍选用油基钻井液。

针对页岩气地层高摩阻、扭矩难题，研究人员研制了新型油基钻井液体系或对原有油基钻井液体系进行了优化。韩秀贞等（2015）研制了一种低黏度、高切力油基钻井液体系（LVHS OBM）。研究表明，该体系的极压润滑系数随密度增大呈逐渐上升趋势，但在密度不超过 2.0 g/cm^3 时，其润滑系数始终低于 0.085，显示出良好的润滑性能。该体系在焦页 54-1HF 井水平段中成功应用，效果良好。Gao et al.（2021）采用功能特性评价法对页岩气井油基钻井液配方进行了优化，使润滑性能提高了 44%，配方为：360 mL 白油+ 3% 有机黏土+ 4% 主乳化剂+ 2% 副乳化剂+ 40 ml $CaCl_2$ 盐水+ 2% 油基褐煤+ 5% YX1200 + 1.5% 固体润滑剂。

在油基钻井液体系中添加润滑剂可进一步提升润滑减阻性能。袁建强（2023）采用外循环高压反应技术，以油酸为主剂，加入含有硫、磷的化合物，再与润滑液基液混配，制成高性能油基钻井液润滑剂，加入油基钻井液中，钻井液体系极压润滑系数降低 42.19%，在涪陵、川渝等地区应用 20 余井次，钻进摩阻降低 15%，起钻摩阻降低 30%，润滑效果良好。张鸿鹄（2024）研制出一种用于钻井液的氮杂石墨烯封堵润滑剂，并将其应用于油基钻井液体系中。该润滑剂可吸附于井壁表面，并嵌入地层微细裂缝中，形成超低渗透封隔层，从而显著提高钻井液的润滑性能，构建出适用于复杂地层的石墨烯封堵润滑型油基钻井液体系。实验表明，该体系极压润滑系数明显降低，润滑性能提升显著。在 150 ℃下老化 24 小时后，当氮杂石墨烯加量为 1% 时，润滑系数可降至 0.083。周忠亚（2024）优化了复兴地区页岩气井现场使用的高密度柴油机钻井液，为进一步提高油基钻井液的乳化稳定、降摩减阻以及封堵防漏性能，研发了主要由改性植物油，双吸附基表面活性剂以及纳米微粒等多种成分构成的高效油基润滑剂 SLIP-O-NG，明显提高了高密度白油基钻井液体系的极压润滑性能、泥饼黏附性能和抗磨性能。佘运虎（2025）通过在油基钻井液体系添加自主研发的润滑剂 LUBE OB，有效改善高摩阻条件下的摩擦行为。该润滑剂可在油基钻井液中的磨粒和金属表面形成类油膜结构，增强摩擦接触区的油膜厚度，从而弱化固相颗粒所带来的磨粒磨损，同时发挥减摩与抗磨作用。该体系能够显著降低高载荷环境下油基钻井液的润滑系数，减少钻具和套管的磨损，且不影响钻井液的整体性能。

油基钻井液最突出的优势在于其极强的页岩抑制性和优异的润滑性能，在高温高压环境下，油基钻井液依旧能展现出良好的热稳定性和流变性能，使油基钻井液在页岩气等复杂地层取得了广泛应用，但又受到环保和成本两方面的影响，逐步被水基钻井液所取代，现阶段，油基钻井液正朝着绿色环保、高性能、智能化方向推进。

3.3　低摩阻合成基钻井液研究进展

合成基钻井液采用人工合成的有机化合物作为连续相。合成基钻井液在一定程度上，可以兼具水基钻井液和油基钻井液的优点，能够实现性能优良与环境保护双重功能，具有广阔的市场应用空间，是低摩阻钻井液体系的热点研究方向。

合成基钻井液在润滑方面表现优异，多种合成基钻井液现场应用证实：润滑性能优异，提速效果良好。Sauki et al.（2015）配制了一种适合页岩气钻井的合成基钻井液 SBM，不仅有较好的流变性能和环保性，还能实现一般页岩气井的提速钻井。长城钻探（王刚，2022）研制出一套抗高温高密度气制油合成基钻井液体系，其密度可达 2.6 g/cm^3，耐温达 220 ℃。现场应用表明，该体系能够显著提升机械钻速，减少井下复杂情况的发生，缩短钻井周期，较好地满足了页岩气钻井作业的要求。但该体系在超高密度和超高温井条件下的适用性仍需进一步研究。邱春阳等（2022）针对胜利油田渤南页岩区块的储层特性，研制了一套合成基钻井液体系，在渤南区块的现场应用中平均机械钻速达到 7.31 m/h，与前期同类型井相比，机械钻速提高了 47.68%，施工过程中作业顺利，减少了井下复杂情况的发生。BIODRILL S 合成基钻井液体系在润滑性方面表现优异，老化后极压润滑系数低至 0.082，远低于常规水基钻井液，与高性能油基钻井液相当（彭三兵等，2024）。该体系在垦利 9-1 北 -3 定向探井的大斜度井段中实现了直接起钻，显著提升了起下钻效率，降低了卡钻风险，保障了井下作业安全。

合成基钻井液在页岩气井中的适应性介于油

基和水基之间，具有良好的综合性能。合成基钻井液既具有油基钻井液的优良性能，又具有水基钻井液的环保优势，特别适合在对环保要求较高的页岩气田使用。但合成基钻井液成本更高，配置也更复杂。未来合成基低摩阻钻井液研发需要不断向低成本材料发展，以期合成基钻井液更为广泛的应用（陈祥伟，2024）。

4 页岩气低摩阻钻井液的未来发展趋势

4.1 高性能钻井液润滑剂的研发

低摩阻钻井液的润滑功能主要依托于高性能润滑剂实现，未来，高性能润滑剂研发重点集中于极限苛刻条件下的润滑剂、纳米润滑剂的多功能化以及生物基润滑剂的开发。针对极端高温、高压环境，润滑剂材料分子易发生构型演化、交联及降解等失效问题，未来应积极研发具备更加优异的热稳定性和化学稳定性的耐220℃以上的润滑剂。纳米材料因其独特的表面效应和小尺寸效应，可探索实现润滑、封堵、抑制等多功能集成，在页岩气低摩阻钻井液领域展现出多功能化的巨大潜力。同时，生物基润滑剂利用可再生资源，通过化学改性在保持润滑性能的同时显著提升环境相容性，还能降低钻井废弃物处理成本，在当今环保法规日益严格的背景下，生物基润滑剂的开发与应用成为重要趋势。

4.2 低摩阻钻井液的智能优化技术

现阶段低摩阻钻井液体系设计在很大程度上仍依赖于工程经验与试错方法，难以满足高性能材料快速迭代的开发需求。在这一背景下，钻井液体系的智能化与数字化演进已成为重要发展趋势。通过系统构建涵盖逾百口页岩气井的钻井液材料结构与性能数据库，并运用大数据与机器学习算法进行深度分析，可建立材料配方与性能指标间的映射模型与优化算法，实现钻井液性能的智能推荐与配方优化，显著提升研发效率。同时，依托传感器网络与物联网平台对钻井液关键参数进行实时采集与监控，结合智能预警模型，可为低摩阻钻井液性能维护与工程决策提供关键数据支撑，提升低摩阻钻井液性能与经济效益，并推动钻井液技术向智能化、精准化方向转型。

4.3 绿色环保技术的推进

在全球可持续发展战略和日益严格的环保法规驱动下，页岩气低摩阻钻井液的绿色化发展将成为必然趋势。相关法规对钻井废弃物排放标准、化学品生物毒性及全生命周期环境影响提出了更为严格的要求，要求油气钻完井行业加速研发环境友好型低摩阻钻井液体系。其未来研究将集中于高性能生物基润滑剂技术、钻井废液资源化与无害化处理技术的突破，以及基于天然高分子材料的全生物降解钻井液体系构建，实现页岩气开发与环境保护的协同发展。

4.4 综合钻井液技术的协同发展

单一性能优化的钻井液技术已逐渐不能满足钻完井工程需求，低摩阻钻井液体系研制应转向多技术协同的集成化发展。例如将润滑技术与井壁稳定技术等进行深度结合，开发改性氧化石墨烯等兼具纳米封堵和润滑功能的智能材料，实现封堵、润滑双重效果，从根本上解决二者可能存在的矛盾。最终构建起高度集成化的多功能钻井液体系，通过“一剂多效”的分子设计和智能响应材料，形成能够自适应井下环境、同时满足润滑、稳定、保护等多重需求的一体化解决方案，大幅提升钻井效率

表 2 三类低摩阻钻井液优缺点及发展趋势

Table 2 Advantages, disadvantages and development trends of three types of low-friction drilling fluids

钻井液类型	核心优势	存在不足	未来研究方向
低摩阻水基钻井液体系	环保友好，处置压力小；经济性较好，配制维护方便；完井适配性较强；常规浅层页岩气适用	极端环境稳定性不足，润滑性与抑制性有限，难以满足深层复杂地层钻井需求	开发耐220℃以上纳米复合体系，提升抗温性能；研发生物基润滑剂与高效抑制剂复配体系以增强综合性能；开发随钻智能润滑性能感知模块，实时反馈钻具与井壁界面摩擦状态；构建随钻性能实时监测与调控模型，提升钻井效率；开发新型添加剂拓展复杂地层应用范围
低摩阻油基钻井液体系	润滑性突出，摩阻控制好；抑制能力较强，利于井壁稳定；深层复杂页岩气适用；提速提效潜力较大	环保风险较高且成本相对偏高，完井干扰较大，限制了在环保严格区域的应用	开发低毒/无毒白油、合成油替代柴油以降低环境风险；通过数字孪生技术构建油基钻井液–钻屑处理联动智能平台，实现资源回收与性能维护的协同优化；推进基础油循环回收技术规模化应用降低综合成本
低摩阻合成基钻井液体系	综合性能较均衡；环保性相对较好；可循环利用，适配性较强；中深层开发较适用	初始成本较高且配方调控复杂，低温适应性差，制约了在宽温域低成本项目中的应用	开发可再生植物油脂衍生物基础油，提升环保性能；简化配方降低添加剂用量，减少综合成本；开发低温流动改进剂提升寒冷地区适应性；开发合成基钻井液多参数智能调控终端，基于实时工况数据自动调整添加剂配比，简化现场维护流程

和经济性。

5　结论

（1）页岩气钻井液润滑机理的研究已突破单一的成膜润滑理论，拓展至润湿性调控、纳米封填等多机制协同作用新阶段。在工程应用方面，油基钻井液凭借优异的润滑与井壁稳定性能，仍是页岩气水平井钻探的首选体系；合成基钻井液作为平衡性能与环保的过渡方案已投入应用；而高性能水基钻井液被视为替代油基体系、实现页岩气清洁高效开发的关键技术方向，已成为行业研发的重点。

（2）尽管研究已取得进展，但针对深部高温、高压及复杂地质储层等极端工况下的润滑剂作用机制研究仍显不足。现有技术体系均存在明显的局限性：油基钻井液面临配制成本高、环境风险大及废液处理困难等严峻挑战，易造成较大的经济损失；合成基钻井液的技术成熟度尚待加强；高性能水基钻井液虽然环保优势明显，但其润滑性能与页岩抑制能力仍未达到理想水平，限制了其在长水平段钻井中的推广应用。

（3）未来页岩气低摩阻钻井液技术将朝着高性能、智能化、绿色化方向演进。一方面，应积极推进纳米材料、生物基润滑剂等新型功能材料的研发，重点攻关水基钻井液的抗高温极压润滑剂与高效抑制剂，并突破油基/合成基钻井液的环保处理瓶颈。另一方面，必须深化钻井液多机制协同润滑理论，构建兼具高效润滑、稳定井壁、无毒环保等功能的一体化钻井液体系，推动技术从单一润滑向多功能协同跨越，从而为全球页岩气安全高效开发及深层油气增储上产提供强有力的技术支撑。

作者贡献声明：孙金声负责论文选题及内容把控；蔡文晖参与论文资料整理与撰写；王金堂参与论文进展部分设计；吕开河参与论文展望部分设计；赵珂参与论文机理部分总结；张俊豪参与论文结论部分梳理。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Authors' Contributions Statement: SUN Jinsheng is responsible for the topic selection and content control of the paper; CAI Wenhui participated in the collation and writing of paper materials ; WANG Jintang participated in the design of the progress part of the paper ; LYU Kaihe participated in the design of the paper prospect part; ZHAO Ke participated in the summary of the mechanism of the paper; ZHANG Junhao participated in the conclusion part of the paper. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

AMEEN N, 2023. High Permian well productivity, crude oil prices drive U. S. natural gas production growth[M]. Washington, DC: U. S. Energy Information Administration. 2023.

BAO S J, GE M G, ZHAO P R, et al., 2025. Status-quo, potential, and recommendations on shale gas exploration and exploitation in ChinaStatus, potential and suggestions for shale gas exploration and development in China[J]. Oil & Gas GeologyPetroleum and natural gas geology, 46(02): 348-364. (in Chinese with English abstract)

CHEN C J, 2022. Preparation of modified nano-polysilicon coating and its drag- reduction performance[D]. JiangsuNanjing: Southeast University. (in Chinese with English abstract)

CHEN S K, XIE C D, JIANG Z H, et al., 2025. Key drilling technologies for large-displacement horizontal wells in shallow shale gas reservoirs of WulongKey technologies of extended reach horizontal well drilling for shallow shale gas in Wulong[J]. Drilling Engineering, 52(05): 106-112. (in Chinese with English abstract)

CHEN X W, GUO J X, WANG L, et al., 2024. Research progress in synthetic-based drilling fluids[J]. Applied Chemicals, 53(6): 1383-1387. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y R, JIANG Z X, 2025. Research and application of ultra-low friction water-based drilling fluid system suitable for shale gas horizontal wells[J]. Chemical and biological engineering, 42(4): 46-50. (in Chinese with English abstract)

CHEN Z M, LU P, YU Z T, et al., 2012. Chemical adsorption film forming process on iron and steel surfaceChemical adsorption film forming process on steel surface[J]. Plating and & Finishing, 31(04): 71-74. (in Chinese with English abstract)

GAO D W, DAI L, LIU X, et al., 2024. Difficulties and countermeasures of drilling and completion of Permian shale gas in western Hubei[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(4): 81-93. (in Chinese with English abstract)

GAO D W, XIE J J, HUANG S M, et al., 2021. Research and application of evaluation methods for functional characteristics of oil - based drilling fluid in shale gas wells[J]. Geofluids, 2021(1): 8814032.

GENG Y, LIU H S, HE Z T, et al., 2021. Preparation of new environmental-friendly lubricant and its application in shale gas water based drilling fluidPreparation of new environmentally friendly lubricants and their application in shale gas water-based drilling fluids[J]. Drilling & and Production TechnologyProcess, 44(03): 92-95. (in Chinese with English abstract)

GUO X HS, ZHAO Y Q, SHEN B J, et al., 2022. Marine shale gas exploration theory in southern China: review and prospectsExploration theory of marine shale gas in southern China: review and prospect[J]. Acta Geologica SinicaGeology, 96(01): 172-182. (in Chinese with English abstract)

GUO X S, TENGGER B, WEI X F, et al., 2022. Occurrence mechanism and exploration potential of deep marine shale gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei SinicaPetroleum Journal, 43(04): 453-468. (in Chinese with English abstract)

HAN T, 2025. Research on a new high-performance water-based drilling fluid for horizontal well drilling in shale reservoirResearch on new high performance water-based drilling fluid for horizontal well drilling in shale reservoirs[J]. Chemical Engineer, 39(08): 66-70. (in Chinese with English abstract)

HAN X Z, WANG X G, LI S, et al., 2015. A low-viscosity and high-cut oil-based drilling fluid system[J]. Drilling fluid and completion fluid, 32(3): 16-19+104. (in Chinese with English abstract)

HARDY W B, DOUBLEDAY I, 1922. Boundary lubrication: the paraffin series[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering SciencesContaining Papers of a Mathematical and Physical Character, 100(707): 550-574.

HSU S M, 2004. Molecular basis of lubrication[J]. Tribology International, 37(7): 553-559.

HSU S M, GATES R S, 2005. Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism[J]. Tribology International, 38(3): 305-312.

JI M, 2022. Tribological and mechanism research of series lubrication additives in water-based mudTribological properties and mechanism of a series of lubricating additives in water-based slurry [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing). (in Chinese with English abstract)

JIA A L, WANG G T, LI Y L, 2025. Natural gas development in China: present situation and prospectChina 's natural gas development situation and prospect[J]. Natural Gas Industry, 45(05): 31-42. (in Chinese with English abstract)

KRISHNAMURTHY A, RAZAK K A, HALEMANI B S, et al., 2021. Performance enhancement in tribological properties of lubricants by dispersing TiO_2 nanoparticles[J]. Materials Today: Proceedings, 47: 6180-6184.

LI C L, LI X S, WANG Z X, et al., 2020. Deformation characteristics of Early Paleozoic marine shale and their influence on the shale gas preservation in the eastern Sichuan-Wulingshan tectonic beltStructural deformation characteristics of Lower Paleozoic marine shale in East Sichuan-Wuling tectonic belt and its influence on shale gas preservation[J]. Journal of Geomechanics, 26(06): 819-829. (in Chinese with English abstract)

LI D J, 1998. , Status and advances of drilling fluid lubricantsPresent situation and development direction of drilling fluid lubricants[J]. Petroleum Drilling TechniquesOil Drilling Technology, 26(2): 35-38. (in Chinese with English abstract)

LI G R, WANG C J, 2020. Research progress and development trend of polar adsorption drilling fluid lubricants[J]. Drilling fluid and completion fluid, 37(5): 541-549. (in Chinese with English abstract)

LI Y Z, LI S W, BAI P P LI Y, LI S, BAI P, et al., 2021. Surface wettability effect on aqueous lubrication: van der Waals and hydration force competition induced adhesive friction[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 599: 667-675.

C L, WANG X P, CHE C B, et al., 2025. Development prospects of unconventional oil and gas and renewable energy in China[J]. World Petroleum Industry, 2025, 32(3): 12-21. (in Chinese with English abstract)

LIU W J, FENG J H, WANG Y, et al., 2023. Analysis on dynamic friction torque of drill string in deep shale gas horizontal wells[J]. China Petroleum MachineryPetroleum Machinery, 2023, 51(08): 18-25. (in Chinese with English abstract)

NIE H K, DANG W, ZHANG K, et al., 2024. Two decades of shale gas research & development in China: review and prospects20 years of shale gas research and development in China: review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 44(03): 20-52. (in Chinese with English abstract)

OUYANG W, LIU W, WU Z L, 2020. Study on optimization of shale gas high-density water-based drilling fluid in Changning and Weiyuan areaIndoor optimization of high-density water-based drilling fluid for shale gas in Weiyuan area of Changning[J]. Drilling & Production Technology-Drilling and production process, 43(04): 85-88+11. (in Chinese with English abstract)

PENG S B, LI B, HAN D D, et al., 2024. First application of the synthetic-based drilling fluid BIODRILL S in block Kenli of Bohai oilfield-BIODRILL S synthetic base drilling fluid was first applied in Kenli block[J]. Drilling Fluid & and Completion Fluid, 41(01): 60-67. (in Chinese with English abstract)

PENG S L, HU G, ZHANG G H, et al., 2020. Shale oil reservoir drilling fluid technology status and development direction[J]. China Petroleum and Chemical Standard and QualityChina Petroleum and Chemical Industry Standards and Quality, 40(17): 193-197. (in Chinese)

QIU C Y, LI B, WANG W, et al., 2022. Application of synthetic-based drilling fluid with high temperature resistance and high plugging performance in Bo'nan shale oil block, Shengli oilfieldApplication of high temperature resistant and strong plugging synthetic base drilling fluid in Shengli Bonan shale oil block[J]. Natural Gas Exploration and Development, 45(04): 121-127. (in Chinese with English abstract)

RUAN S J, FEI Y W, WU N, et al., 2017. Analysis of lubrication mechanism about lubricantLubricant lubrication mechanism analysis[J]. Chemical Industry TimesChemical Times, 31(08): 38-42. (in Chinese with English abstract)

SAUKI A, SHAH M S Z, BAKAR W Z W, 2015. Application of Ester based drilling fluid for shale gas drilling[J]. c]//. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 83(1): 012012.

SHE Y H, 2025. Oil-based drilling fluid technology for ultra-deep extended reach wells in East China SeaOil-based drilling fluid technology for ultra-deep extended reach wells in the East China Sea[J]. Drilling Fluid & Completion FluidDrilling fluid and completion fluid, 42(03): 296-301. (in Chinese with English abstract)

SONG D D, YIN H, CHEN Y, et al., 2025. Techniques for handling drilling complexities in deep shale gas reservoirs of Sichuan Basin: a case study of the Weidong 204 wellblockDisposal technology for complex conditions of deep shale gas drilling in Sichuan Basin - A case study of Weidong shale gas well 204[J]. Natural Gas Exploration and DevelopmentGas exploration and development, 48(03): 105-112. (in Chinese with English abstract)

SONG H, LONG W, DENG X W, 2021. Development and application of high temperature resistant and environmentally friendly lubricants for shale gas water-based drilling fluids[J]. Fault block oil and gas fields, 28(6): 761-764. (in Chinese with English abstract)

SUN J S, WANG L, LONG Y F, 2024. Challenges, developments, and sug-

gestions for drilling fluid technology in ChinaTechnical problems, new progress and development suggestions of drilling fluid in China[J]. Drilling Fluid & Completion FluidDrilling fluid and completion fluid, 41(1): 1-30. (in Chinese with English abstract)

TIAN Y, 2025. Research on efficient drilling fluid technology suitable for deep shale gas reservoirs [J]. Chemical Engineer, 39(04): 65-68, + 46. (in Chinese with English abstract)

WANG G, 2022. Research and test of ultra-high density gas-to-oil synthetic-based drilling fluid system [J]. New Technology & New Products of ChinaNew Technology and New Products in China (6): 81-83. (in Chinese)

WANG J, 2025. New progress of in deep shale gas drilling technology in China[J]. Advances in Fine PetrochemicalsFine Petrochemical Progress, 26(04): 22-28. (in Chinese with English abstract)

WANG K, ZHANG J Q, LI X M, et al., 2023. Research progress and prospect of lubricant in water-based drilling fluidResearch progress and prospect of water-based drilling fluid lubricants[J]. Oilfield Chemistry, 40(01): 149-158. (in Chinese with English abstract)

WANG W, WANG J T, XIN J, et al., 2024. Mechanism of fluid shale interaction and construction of drilling fluid system in marine land transitional shale reservoirsMechanism of liquid-rock interaction in marine-continental transitional shale reservoirs and construction of drilling fluid system[J]. Drilling Fluid & and Completion Fluid, 41(04): 427-436. (in Chinese with English abstract)

WANG Y F, ZHAI G Y, WANG J Z, et al., 2017. Factors influencing gas production effectiveness of Longmaxi Formation shale in Sichuan Basin and adjacent areasInfluencing factors of shale gas production in Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. Journal of Geomechanics, 23(04): 540-547. (in Chinese with English abstract)

XIE J, ZHAO S X, SHI X W, et al., 2017. Main geological factors controlling high production of horizontal shale gas wells in the Sichuan BasinGeological main controlling factors of high production of shale gas horizontal wells in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 37(07): 1-12. (in Chinese with English abstract)

XU B, YAN L L, WANG J H, 2016. Technical progress of high performance water-based drilling fluids for shale gas in China and abroadNew progress in shale gas water-based drilling fluid technology at home and abroad[J]. Applied Chemical IndustryApplied Chemicals, 45(10): 1974-1981. (in Chinese with English abstract)

XU L, WANG L, XU M B, et al., 2023. Hyperbranched polymer lubricant additive for water-based drilling fluidA hyperbranched polymer lubricating additive for water-based drilling fluid[J]. Natural Gas Industry, 43(07): 79-89. (in Chinese with English abstract)

YANG G B, 2012. Preparation and tribological behavior of Cu nanoparticlesPreparation and tribological behavior of Cu nanoparticles [D]. Henan-Zhengzhou: Henan University. (in Chinese with English abstract)

YANG X K, JIANG G C, LIU F, et al., 2023. Lubricity and mechanism of catechol-based biomimetic lubricant in water-based drilling fluid[J]. Tribology International, 188: 108862.

YU C C, 2019. Preparation of polymer/montmorillonite nanocomposite anti-wear agents and the study of lubrication effectSynthesis of polymer / montmorillonite nanocomposite anti-wear agent and its lubrication effect [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing). (in Chinese with English abstract)

YUAN J Q, 2023. New progress and development proposals of Sinopec's drilling technologies for ultra-long horizontal shale gas wellsNew progress and development suggestions of horizontal well drilling technology for ultra-long horizontal section of shale gas in Sinopec[J]. Petroleum Drilling TechniquesOil drilling technology, 51(04): 81-87. (in Chinese with English abstract)

YUAN Q S, ZHANG Y F, DING Y, et al., 2025. Drilling practice and understanding of shale gas horizontal wells in marine-continental transition facies coal-bearing shale gas in Southern North China BasinHorizontal well drilling practice and understanding of marine-continental transitional facies coal measures shale gas in southern North China Basin[J]. China Energy and Environmental ProtectionEnergy and environmental protection, 47(04): 101-108. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C, YUAN W Y, WANG W H, et al. , 2025. Preparation of multilayer textures on ductile cast iron and their tribological performancePreparation of multi-layer texture on ductile iron surface and its tribological properties [J/OL]. TribologyJournal of Tribology, 1-21[2026-01-19]. https://link.cnki.net/urlid/62.1095.O4.20250718.1424.008. (in Chinese with English abstract)

ZHANG H H, 2024. The development and application of nitrogen-containing graphene for oil-based drilling fluidsDevelopment and application of azagraphene for oil-based drilling fluid[J]. Drilling Fluid & and Completion Fluid, 41(03): 279-287. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y B, 2015. Novel nano bearings constructed by physical adsorption[J]. Scientific Reports, 5(1): 14539.

ZHOU S S, ZHONG C B, LIU J, et al., 2022. Application of ultra-low friction water-based drilling fluid in shale gas horizontal wellsApplication of ultra-low friction water-based drilling fluid in shale gas horizontal wells[J]. Drilling Fluid & and Completion Fluid, 39(03): 313-318. (in Chinese with English abstract)

ZHOU Z Y, 2024. Use oil based drilling fluid to stabilize borehole wall and prevent and control mud losses in Fuxing areaOil-based drilling fluid wellbore stability and leak prevention and plugging technology for shale gas wells in Fuxing area[J]. Drilling Fluid & Completion FluidDrilling fluid and completion fluid, 41(03): 305-317. (in Chinese with English abstract)

ZHU XY H, 2025. Researches on and prospect of ROP improvement in deep and ultra-deep oil and gas drillingResearch and Prospect of Deep and Ultra-deep Oil and Gas Drilling Speed-up[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)(Natural Science Edition), 47(03): 1-9. (in Chinese with English abstract)

ZOU C N, ZHAO Q, DONG D Z, et al., 2017. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2(5-6): 273-288.

附中文参考文献

包书景，葛明娜，赵培荣，等，2025. 中国页岩气勘探开发现状、潜力与发展建议[J]. 石油与天然气地质，46(02)：348-364.

陈楚君，2022. 改性纳米聚硅涂层的制备及其减阻性能研究[D]. 江苏南京：东南大学.

陈士奎，解赤栋，姜政华，等，2025. 武隆浅层页岩气大位移水平井钻井关键技术[J]. 钻探工程，52(05)：106-112.

陈祥伟，郭继香，王立，等，2024. 合成基钻井液的研究进展[J]. 应用

化工, 53(6): 1383-1387.

陈毅荣, 蒋志雄, 2025. 适合页岩气水平井的超低摩阻水基钻井液体系研究与应用[J]. 化学与生物工程, 42(4): 46-50.

陈泽民, 路品, 于忠涛, 等, 2012. 钢铁表面化学吸附成膜工艺[J]. 电镀与涂饰, 31(04): 71-74.

高东伟, 代林, 刘湘, 等. 2024. 鄂西地区二叠系页岩气钻完井难点及对策[J]. 世界石油工业, 2024, 31(4): 81-93.

耿月, 刘洪山, 何振涛, 等, 2021. 新型环保润滑剂的制备及其在页岩气水基钻井液中的应用[J]. 钻采工艺, 44(03): 92-95.

郭旭升, 腾格尔, 魏祥峰, 等, 2022a. 四川盆地深层海相页岩气赋存机理与勘探潜力[J]. 石油学报, 43(04): 453-468.

郭旭升, 赵永强, 申宝剑, 等, 2022b. 中国南方海相页岩气勘探理论: 回顾与展望[J]. 地质学报, 96(01): 172-182.

韩涛, 2025. 页岩储层水平井钻井用新型高性能水基钻井液研究[J]. 化学工程师, 39(08): 66-70.

韩秀贞, 王显光, 李胜, 等, 2015. 一种低黏高切油基钻井液体系[J]. 钻井液与完井液, 32(3): 16-19+104.

季敏, 2022. 水基泥浆中系列润滑添加剂的摩擦学特性及机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京).

贾爱林, 王国亭, 李易隆, 2025. 中国天然气开发形势与远景展望[J]. 天然气工业, 45(05): 31-42.

李春麟, 李小诗, 王宗秀, 等, 2020. 川东-武陵构造带下古生界海相页岩构造变形特征及对页岩气保存的影响[J]. 地质力学学报, 26(06): 819-829.

李德江, 1998. 钻井液润滑剂的现状及发展方向[J]. 石油钻探技术, 26(2): 35-38.

李公让, 王承俊, 2020. 极性吸附钻井液润滑剂的研究进展与发展趋势[J]. 钻井液与完井液, 37(5): 541-549.

刘成林, 王馨佩, 车长波, 等, 2025. 中国非常规油气与可再生能源发展前景[J]. 世界石油工业, 2025, 32(03): 12-21.

刘伟吉, 冯嘉豪, 汪洋, 等, 2023. 深层页岩气水平井钻柱动态摩阻扭矩分析[J]. 石油机械, 2023, 51(08): 18-25.

聂海宽, 党伟, 张珂, 等, 2024. 中国页岩气研究与发展20年: 回顾与展望[J]. 天然气工业, 44(03): 20-52.

欧阳伟, 刘伟, 吴正良, 2020. 长宁威远地区页岩气高密度水基钻井液室内优化研究[J]. 钻采工艺, 43(04): 85-88+11.

彭三兵, 李斌, 韩东东, 等, 2024. BIODRILL S合成基钻井液在垦利区块首次应用[J]. 钻井液与完井液, 41(01): 60-67.

彭双磊, 胡贵, 张国辉, 等, 2020. 页岩油储层钻井液技术现状及发展方向[J]. 中国石油和化工标准与质量, 40(17): 193-197.

邱春阳, 李波, 王伟, 等, 2022. 抗高温强封堵合成基钻井液在胜利渤南页岩油区块的应用[J]. 天然气勘探与开发, 45(04): 121-127.

阮少军, 费逸伟, 吴楠, 等, 2017. 润滑剂润滑机理分析[J]. 化工时刊, 31(08): 38-42.

佘运虎, 2025. 东海超深大位移井油基钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 42(03): 296-301.

宋东东, 尹珩, 陈杨, 等, 2025. 四川盆地深层页岩气钻井复杂情况处置技术: 以威东页岩气204井区为例[J]. 天然气勘探与开发, 48(03): 105-112.

宋海, 龙武, 邓雄伟, 2021. 页岩气水基钻井液用抗高温环保润滑剂的研制及应用[J]. 断块油气田, 28(6): 761-764.

孙金声, 王韧, 龙一夫, 2024. 我国钻井液技术难题、新进展及发展建议[J]. 钻井液与完井液, 41(1): 1-30.

田勇, 2025. 适合深层页岩气储层的高效钻井液技术研究[J]. 化学工程师, 39(04): 65-68, +46.

王刚, 2022. 超高密度气制油合成基钻井液体系研究及试验[J]. 中国新技术新产品(6): 81-83.

王健, 2025. 我国深层页岩气钻井技术新进展[J]. 精细石油化工进展, 26(04): 22-28.

王凯, 张建卿, 李晓明, 等, 2023. 水基钻井液润滑剂研究进展与展望[J]. 油田化学, 40(01): 149-158.

王维, 王金堂, 辛江, 等, 2024. 海陆过渡相页岩储层液岩作用机理及钻井液体系构建[J]. 钻井液与完井液, 41(04): 427-436.

王玉芳, 翟刚毅, 王劲铸, 等, 2017. 四川盆地及周缘龙马溪组页岩产气效果影响因素[J]. 地质力学学报, 23(04): 540-547.

谢军, 赵圣贤, 石学文, 等, 2017. 四川盆地页岩气水平井高产的地质主控因素[J]. 天然气工业, 37(07): 1-12.

许博, 闫丽丽, 王建华, 2016. 国内外页岩气水基钻井液技术新进展[J]. 应用化工, 45(10): 1974-1981.

许林, 王浪, 许明标, 等, 2023. 一种水基钻井液超支化高分子润滑添加剂[J]. 天然气工业, 43(07): 79-89.

杨广彬, 2012. Cu纳米微粒的制备及其摩擦学行为研究[D]. 郑州河南: 河南大学.

于呈呈, 2019. 聚合物/蒙脱土纳米复合抗磨剂合成及其润滑效应研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京).

袁建强, 2023. 中国石化页岩气超长水平段水平井钻井技术新进展与发展建议[J]. 石油钻探技术, 51(04): 81-87.

袁青松, 张翼飞, 丁毅, 等, 2025. 南华北盆地海陆过渡相煤系页岩气水平井钻井实践与认识[J]. 能源与环保, 47(04): 101-108.

张成, 袁维运, 王文华, 等, 2025. 球墨铸铁表面多层织构制备及其摩擦学性能研究[J/OL]. 摩擦学学报, 1-21[2026-01-19]. https://link.cnki.net/urlid/62.1095.O4.20250718.1424.008.

张鸿鹄, 2024. 油基钻井液用氮杂石墨烯的研制与应用[J]. 钻井液与完井液, 41(03): 279-287.

周姗姗, 钟成兵, 刘杰, 等, 2022. 超低摩阻水基钻井液在页岩气水平井的应用[J]. 钻井液与完井液, 39(03): 313-318.

周忠亚, 2024. 复兴地区页岩气井油基钻井液井壁稳定和防漏堵漏技术[J]. 钻井液与完井液, 41(03): 305-317.

祝效华, 2025. 深层超深层油气钻井提速研究与展望[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 47(03): 1-9.