



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2024.09.01.01

文章编号: 1674-5086(2025)03-0001-09

中图分类号: TE21

文献标志码: A

深层超深层油气钻井提速研究与展望

祝效华^{1,2*}

1. 石油天然气装备教育部重点实验室, 四川 成都 610500

2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室·西南石油大学, 四川 成都 610500

摘要: 提高钻速、井下复杂防控、提高油气钻遇率是深层超深层油气钻井面临的3大问题。围绕这3大问题,“十二五”以来,中国在旋转导向、精细控压、高效PDC钻头及提速钻具、承压堵漏等技术方面取得重要进展,钻成了一批8 000 m左右的超深井。聚焦钻井提速,总结近年来在钻柱动力学、高效破岩和辅助提速钻具方面的研究进展,主要包括:回顾了国内外钻柱动力学理论发展历程,探讨了钻柱振动与屈曲以及动态摩阻扭矩评价方法;聚焦深部硬岩塑-脆性临界高效破岩理论,总结了基于塑-脆性临界破碎的钻头选型与优化设计方法;系统介绍了基于冲击加速裂纹扩展和振荡减阻等视角研制的系列提速钻具和基于CAE数值计算的相关分析评价方法;以及总结分析了基于能量高效传递与高效利用的综合提速方法;并提出了加大井下动力钻具攻关和开展新型破岩方式的研究建议。研究工作对提高深难钻地层和超深层复杂结构井的钻井速度有一定参考价值。

关键词: 深层超深层;提高钻速;钻柱动力学;塑-脆性临界高效破碎;提速钻具

Researches on and Prospect of ROP Improvement in Deep and Ultra-deep Oil and Gas Drilling

ZHU Xiaohua^{1,2*}

1. MOE Key Laboratory of Oil and Gas Equipment, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract: Increasing ROP, controlling complex downhole conditions, and improving drilling-encounter ratio are the three major challenges in deep and ultra-deep oil and gas drilling. Since the “12th Five-Year Plan” period, China has made significant progress in drilling technologies such as rotary steering, precise pressure control, efficient PDC bits, and drilling tools, and a number of ultra-deep wells of about 8 000 meters have been drilled. This paper focuses on the ROP improvement and summarizes the recent research progress in drillstring dynamics, efficient rock breaking and drilling tools, mainly including the review of the development of drillstring dynamics theory, the evaluation methods of drillstring vibration, buckling, and dynamic friction torque. Focusing on the theory of ductile-brittle critical failure of rock, the selection and optimal design method of drill bit based on ductile-brittle critical failure are deeply analyzed. This paper also systematically introduces a series of drilling tools based on impact accelerated crack growth and vibration drag reduction, and the relevant analysis and evaluation method based on CAE numerical calculation. The comprehensive ROP improving method based on efficient energy transfer and utilization is summarized and analyzed. Finally, suggestions are provided for increasing research efforts on downhole power drilling tools and new rock breaking methods. The research work has a certain reference value for improving the drilling speed of deep hard formation and ultra-deep complex structure wells.

Keywords: deep and ultra-deep formation; ROP improvement; drillstring dynamics; ductile-brittle transition; drilling tools for improving ROP

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20250520.0835.012.html>

祝效华. 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), 2025, 47(3): 1-9.

ZHU Xiaohua. Researches on and Prospect of ROP Improvement in Deep and Ultra-deep Oil and Gas Drilling[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2025, 47(3): 1-9.

* 收稿日期: 2024-09-01 网络出版时间: 2025-05-20

通信作者: 祝效华, E-mail: zxhth113@163.com

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金(52225401)

引言

石油与天然气的安全供给是国家重大战略需求, 关乎国民经济可持续发展。国家能源发展规划要求应继续加大国内油气资源开发力度, 加快能源领域核心技术和装备攻关。中国 39% 的剩余油和 57% 的剩余天然气都储存于深层超深层(4 500~9 000 m)^[1], 深层超深层是中国油气供给的战略接替, 如何实现深层超深层油气资源的经济开采是中国面临的重大挑战。深层超深层油气往往覆盖多套压力系统、井漏问题突出、高含腐蚀介质、岩石硬且研磨性强, 高温高压给钻井工具和仪器带来严峻挑战。在前期研究的积累上, 经过“十三五”的集中攻关, 在旋转导向、精细控压、高效 PDC 钻头及提速钻具、承压堵漏、井身结构优化、气体钻井等钻井技术方面取得重要进展: 国产旋转导向工具累计入井约 2 000 口, 造斜能力达到 $15.3^{\circ}/(30\text{ m})$ 、耐温 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$, 实现了高精度和相对低成本; 精细控压实现了井底压力 $\pm 0.2\text{ MPa}$ 的精确闭环控制, 适用于井壁失稳、地层流体侵入影响流变性、充气钻井等特殊工艺等工况, 可有效避免卡钻等井下复杂^[2]; 复合钻头和强韧高耐磨非平面齿较好地解决了夹层和强研磨性地层的钻速问题。上述研究较好地解决了机械钻速慢、井下复杂防控难、油气钻遇率不够高这 3 大深层油气钻井难题, 基本实现了中国深层油气从打成向打快和打好转变。

深井超深井和复杂结构井钻井提速的主要难点是: 沿程动力损耗大且其波动量也大; 深部岩石硬、破碎难; 井下钻具动力不足。这三者有个共同点就是都围绕能量的传递和高效利用, 本文重点阐述这 3 个方面的研究进展。

1 动力传递与钻柱振动研究

动力传递研究的核心是摩阻扭矩问题, 且主要需要研究动态摩阻扭矩。深井中的实钻微弯曲, 复杂结构井中的造斜段都会引起钻具与井壁的高强度接触, 直井段部分钻柱与井壁又会发生较高强度准随机碰撞, 造成地面动力向下传递的波动变化, 导致钻压较大幅度波动, 且一般都会导致实际钻压均值小于设计钻压。因此, 研究深井超深井和复杂结构井中的钻柱动力传递规律, 获得真实钻压, 是研

究钻井提速方案的重要前提。

在 2000 年以前, 国内外主要研究静态摩阻扭矩, 主要模型有 Johancsik 的软杆模型^[3]、Ho^[4] 和李子丰等的钢杆模型^[5]、白家祉教授和苏义脑院士的连续梁模型^[6-8], 以及高德利院士建立的软杆-钢杆综合模型^[9-11]。国外工业界使用较多的是工程师模型, 即基于最简单的模型编制软件然后使用大量实践数据修正。这些成果为 20 世纪 80—90 年代和 21 世纪初的水平井及大位移井的钻成提供了有力支撑。

动力学模型的难点是考虑因素多、理论建模难、实验研究难、计算量特别大。1996 年 Dykstra 博士^[12] 的直井钻柱纵横扭耦合动力学模型, 是动态摩阻扭矩研究的理论起点。与 Dykstra 同期, 刘清友教授等分别研究了全井钻柱的纵向振动和扭转振动^[13-14]。到 2003 年, 国外发布了钻柱动力学优化软件 DrillString Dynamic Optimization(PDVSA 和 Halliburton-Landmark Graphics Corporation)。随后, 又相继更新或升级了钻井优化系统, 但并未见相关理论模型论文发表。国外的钻柱动力学优化软件, 基本上都是为国际油服公司的重点井提供服务, 直到最近几年才开始给中国提供计算服务。

2005 年, 祝效华等基于哈密顿原理和有限单元法, 考虑三维弯曲、纵横扭耦合振动、动态屈曲、井壁碰撞、实时破岩, 建立了复杂结构井钻柱动力学模型, 并开发了钻柱动力学计算软件^[15-17], 这套模型可以计算每个节点的钻柱纵横扭三向振动。通过全井钻柱动力学模型(包括考虑时间准随机、空间离散、动能损失及速度转向等特征建立的旋转钻柱与井壁的碰摩边界条件模型^[18])不仅可以计算全井振动, 还可以计算每个时刻的钻柱与井壁动态接触力, 包括屈曲导致的附加接触力, 进而可计算全井摩阻^[19]。为了验证模型, 研制了缩尺寸物模装置^[20], 通过传感器和高速摄像机实验研究了动态摩阻和钻压传递、涡动和屈曲情况, 基于该实验结果完成了对模型和计算软件的校验。

中国从 2005 年开始水平井逐渐增多、2010 年开始大斜度井逐渐增多、2014 年开始页岩气长水平井逐渐增多, 动态摩阻计算逐渐得到重视, 学者们陆续通过动力学手段计算了大斜度井和页岩气长水平段水平井的动态摩阻扭矩以及极限钻长问题^[21-22]。在冀东滩海的某大斜度井计算中, 基于动

力学计算的极限钻长与实际施工时的极限钻长误差为3.5%, 这较好证明了动力学方法的有效性。该方法自2010年还用于中国的管道定向穿越施工中, 解决了穿越施工中由于钻具较重、钻压较大、钻柱失效和摩阻问题导致的无法成功钻穿问题, 该方法成功协助创造了一些定向穿越施工最长纪录, 如2015年实施的3 500 m 如东—海门—崇明岛定向穿越。中海油2013年基于多体动力学建立了钻柱动力学模型^[23], 这个研究的突出特点是建立了一个快速的接触收敛算法。近几年, 中国石油和中国石化也在建立自己的全井钻柱动力学分析系统^[24-26]。

钻柱动力学计算, 不仅可以计算钻柱振动、避免或减少失效, 考虑钻头实时破岩的钻柱动力学方法还可以评价钻速、优选钻头、优化钻井参数和井下钻具组合(Bottom Hole Assembly, BHA), 全井钻柱动力学评价已逐渐成为深层复杂结构井钻井综合提速的一个必要手段。特别是, 自2023年中国两口万米超深井开钻以来, 超大尺寸井眼的钻柱振动与失效预防, 以及钻井参数优化研究显得更为重要。

2 高效破岩研究

通过钻柱动力学分析可以减少钻柱系统摩扭, 把地面能量最大化传递到钻头, 所谓高效破岩即是如何利用最小的能量破碎更多的岩石。

机械旋转钻井工业化一百多年来, 高效破岩的发展主要有两条主线: 第一是提高设备能力, 通过大钻压、高转速、大排量进行强化参数提速; 第二是从最初的牙轮钻头压剪破碎, 逐渐发展到PDC钻头的剪压破碎, 再到使用辅助冲击后的拉剪破碎^[27], 岩石的抗拉强度、抗剪强度、抗压强度三者差异较大且通常成倍甚至多倍递增, 拉破碎消耗的破岩能量最小, 所以破岩效率最高。空气钻井气柱对井底的压持效应极低, 所以其破岩是增强版的拉为主破碎模式。但空气钻井还存在“出水”和“井底信号测量”两个难题, 目前主要用于不出水或者出少量水的硬地层直井中。2000年左右, PDC钻头随PDC切削齿技术的快速发展而得到迅速大规模应用, 其市场占有率从约10%快速攀升到目前的90%以上。这两条主线交叉融合就促成了当下的主流提速技术, 即大钻压、高转速、大排量、抗冲击强耐磨PDC钻头和井下大扭矩动力钻具的组合。

进入深层后, 一方面岩石越来越硬; 另一方面, 井眼越来越小, 可传递到井底的破岩能量越来越小, 小尺寸钻具的抗疲劳能力也越来越低; 再加上常遇窄密度窗口和多套压力系统, 这往往导致很难采用大钻压、高转速和大排量, 迫切需要研究新的破岩理论与方法。

尽管岩石力学和断裂力学发展多年, 但在钻井领域尤其是在钻头设计时, 长期以来均采用塑性破岩理论, 即假定钻齿压入或者切过岩石时, 切槽按照钻齿的形状形成。也是基于塑性切削假定, 发展起来了钻头的几何学和运动学设计方法, 这套钻头设计方法从20世纪80年代开始发展, 基本沿用至今。用于评价破岩效率的评价指标机械比功(破碎单位体积岩石所消耗的功)也从20世纪60年代^[28]沿用至今。

然而, 不管是中浅层还是深层乃至超深层、低围压还是高围压, 上返岩屑均是大小不一的, 岩屑的长度和厚度尺寸与钻齿的宽度和许用切深相比, 尺寸有大有小。这都说明即使深层高围压, 地层仍然产生了裂纹, 发生了脆性破碎。由于脆性破碎的效率显著高于塑性破碎, 加上深层钻井工作量逐渐加大, 国内外在大约十年前开始重视研究脆性破岩。关于切削过程的塑-脆性转变问题早在研究脆性材料(陶瓷、玻璃和水晶)切削加工精度时就已经提出来, Toh等^[29]的研究发现在切削脆性材料时如果切削深度很小(小于1 μm), 塑性切屑就会出现, 能够得到非常高的表面精度, 并且不会产生微裂纹。随后, Bifano等^[30-31]提出了一种加工脆性材料的新方法——塑性切削, 通过理论计算和室内实验研究了切削深度和塑性切削的关系。此后, Richard等^[32]通过室内实验证实了钻齿切削破岩时随着切削深度的增加存在塑性破碎向脆性破碎的转变, Zhou等^[33]通过数值计算也证实了临界转变的存在, 两位学者在研究时均未考虑围压、也未研究塑性破碎向脆性破碎转变的临界切削深度计算模型。同期, 祝效华团队^[34-35]也开展了脆性破岩的研究工作, 通过大量单齿切削实验(无围压工况, 以及基于研制的高温高围压单齿切削真三轴测试系统开展的有围压工况), 不仅证实了存在临界转变, 还获得了不同切削齿在不同围压下针对典型硬地层的临界切削深度数据, 并基于断裂力学和能量耗散原理建立了岩石塑-脆性破碎临界转变切削深度计

算模型,模型见式(1),塑-脆性切削实物图如图 1 所示。

$$E_s = \begin{cases} \eta\sigma_c, & d < d_c \\ K_b d^{-4/3} + K_p, & d \geq d_c \end{cases} \quad (1)$$

式中:

E_s —破岩比功, MPa;

K_b —与钻齿形状、材料参数有关的参数, $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{4/3}$;

K_p —岩石塑性变形的耗能, MPa;

η —几何因子, 无因次, 与钻齿前倾角有关;

σ_c —岩石单轴抗压强度, MPa;

d —切削深度, mm;

d_c —塑-脆性转变的临界切削深度, mm。



a 塑性破岩模式



b 脆性破岩模式

图 1 塑性切削和脆性切削实物图

Fig. 1 Ductile and brittle failure mode of rock in cutting process

在实验验证的基础上, Zhu 等^[36-38]通过建立有限元模型和离散元模型,开展大量计算,进一步研究了塑-脆性临界转变机理,发现影响岩石塑-脆性破碎转变的关键因素为破碎区的“自锁”,如何“解锁”则是提高钻头破岩效率的关键,目前关于齿形、切削参数、破岩方式等的研究都是如何“解锁”破碎区。

塑-脆性临界破碎的理论研究可以指导钻齿出露高度的设计,但要有效形成钻头设计技术和钻头选型评价技术,还需要对能量消耗进行深入研究,经典的破碎指标即破岩比功评价的是破碎单位体积岩石需要消耗多少功, Zhu 等^[39-40]结合非接触式测量、声发射及高速摄像等技术手段开展了大量破岩实验,实测了不同切削齿侵入不同岩石时所消耗功的具体分配,即塑性功消耗、脆性功消耗及弹性功消耗,塑性功主要用于形成密实核、脆性功主要用于裂纹产生和扩展,弹性功则转变为岩屑动能。显然脆性功占比越高破岩效率越高,突破传统“破岩比功”过于笼统的局限,将岩石破碎过程中的破岩比功分为塑性能、脆性能和弹性能 3 类(图 2),提出了“塑-脆性耗能比”这一新的破岩效率评价指标[式(2)]^[41-42],新指标重点关注脆性耗能,基于新评价指标建立的新评价方法可更精确指导钻头设计。基于该方法设计的新钻

头和开展的钻头选型评价已在潜山花岗岩等多个难钻地层使用,提速效果显著(16%~50%)^[43]。

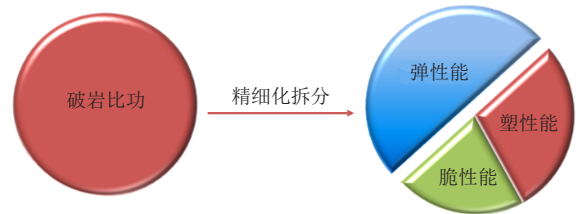


图 2 破岩比功精细化拆分示意图

Fig. 2 The fine decomposition of mechanical specific energy

$$E_s = E_e + E_p + E_f \quad (2)$$

式中:

E_e —弹性能, MPa;

E_p —塑性能, MPa;

E_f —脆性能, MPa。

3 辅助提速钻具研究

深部小井眼由于尺寸的限制下传的机械能量往往不足,于是需要研制井下辅助提速钻具,通过消耗井下水力能量转换为机械能量,以补充钻头处的机械破岩总能量。

螺杆钻具和涡轮钻具是最主要的辅助提速钻具。经过几十年的发展,由于压降、转速和输出扭

矩更能与 PDC 钻头匹配, 螺杆钻具是目前的最主流辅助提速钻具, 螺杆钻具可以为 PDC 钻头供强劲动力而被称为“井下心脏”。20 世纪 80 年代初, 中国引进国外全套螺杆钻具生产线, 产品性能很快接近国外最高水平, 到 2000 年中国螺杆钻具出口北美和俄罗斯总额已占国内生产总额的 15% 左右。螺杆钻具最早用于定向造斜, 2000 年左右在渤海湾和长庆开始规模用于水平段复合钻提速和直井段复合钻提速, 之后大面积推开。近十年, 由于制造成本、销售价格和研发强度的原因, 国产螺杆在输出功率、耐高温性能和金属螺杆方面与国外的差距在快速加大。

除螺杆钻具以外, 在 2000—2005 年, 国内外开始研究其他辅助提速钻具。2002 和 2005 年国外陆续推出了扭转冲击器和水力振荡器, 2000 年贵州高峰推出了水力减振加压器并在多个工区使用, 减振提速效果约 30%。2006 年和 2008 年水力振荡器和扭转冲击器在中国试用取得明显效果后, 中国开始再创新并结合中国深部复杂难钻地层的具体实际开展了多种新型提速钻具的原创设计。国内的研究院所、高校、企业参与研究提速钻具的团队众多, 这个方向也成为了近十几年钻井领域的研究热点, 据不完全统计, 十余年来在提速钻具方面中国授权的发明专利超 500 件, 有些提速钻具已产业化、有些尚未定型、有些尚在做机理探索, 不同团队研究各有侧重和特点。

笔者较全面地参与了这个过程, 并把影响提速的因素从设计提速钻具的角度归为如下 4 类: 1) 破岩方式, 破岩时塑性破碎、脆性破碎共存, 拉破碎、压破碎、剪切破碎共存, 占比不同其破岩效率也不同; 2) 振动因素, 振动分为跳钻、横振、黏滑振动和涡动, 振动会消耗能量, 振动还会导致钻头对岩石的非有效压持, 从而降低破岩效率; 3) 摩擦因素, 粗糙井壁会增大动力损失, 大颗粒状岩屑也会增大摩擦; 4) 低效环节, 比如堵漏和更换下部钻具组合而进行的起下钻等。

针对前述 4 类影响因素, 下面逐类阐述各提速工具的提速机理、研究现状, 以供业界参考。

冲击工具可以改变破岩方式, 提高拉破碎和剪切破碎在整体破碎中的占比, 从而提高机械钻速。在深部硬和强研磨性地层中目前使用较为成功的是扭转冲击器, 扭转冲击器通过加速环向裂纹扩展、

大幅提高了拉破碎占比^[44], 现场应用表明其可提速 35%~135%, 是目前除空气钻井以外最有效的提速方式, 要发挥扭转冲击器的最佳效果需要定制设计与目标地层和扭冲破岩方式匹配的专用钻头, 钻头厂家尚未掌握此项专用设计技术。轴向-扭转复合冲击器的设计初衷是拓展扭转冲击器的地层使用范围, 现有结构尚未实现两类冲击效果的叠加效应, 仍然需要进一步的结构创新。液动锤即轴向冲击器在矿用浅层清水钻进效果较好, 在深层应用还需要解决冲蚀问题。

减振可有效滤掉振峰、减小钻压波动幅值、减少非有效压持时间、提高井底能量利用率, 从而提高钻速。钻柱动力学和钻头破岩的协同计算发现, 在深层直井中振动导致的非有效压持时间有时高达 30% 以上^[15-16]。减振器可分为恒阻尼和变阻尼两类, 也可分为被动减振和主动减振两类。机械减振器和水力加压器属于恒阻尼类, 这两类已规模使用。APS 公司和 Zhu 等^[45] 还基于磁流变原理尝试设计变阻尼的智能减振器, 该减振器在井下实时测量振动、闭环调控阻尼, 由于研发难度、造价和效果的综合影响该减振器尚未进入应用阶段。机械减振、水力加压减振和智能减振都属于被动减振, 即振动发生后再通过阻尼效应去抑制。主动减振包括两种作用原理, 一种是基于高速陀螺惯性压制振动, 另一种是笔者提出的通过特定幅值与频率的主动冲击去破坏纵横扭振动的耦合从而降低整体振动强度, 这两个产品都还在中试阶段。减振类钻具的提速效果弱于冲击类钻具。

减少井下摩擦、提高能量传递效率可以提高机械钻速, 在水平井、大位移井这个问题尤其必要。减少井下摩擦有如下几种方式: 1) 实现从准静摩擦向动摩擦的改变。滑动钻进时, 钻杆与井壁之间可视为是静摩擦, 复合钻进时, 钻杆躺在下井壁旋转可归为准静摩擦状态, 静摩擦系数比动摩擦系数大很多, 在长水平段或斜井段, 通过使用水力振荡器, 可以改变钻柱与井壁之间的摩擦状态, 将静摩擦或准静摩擦改变为动摩擦, 从而可以实现提速, 振荡器消耗钻井液流体能量使钻杆振离井底, 振荡器的有效作用长度取决于其输出的振动和钻杆重量。2) 直接改变接触摩擦系数。采用低摩阻复合材料制作的减阻接头, 其与井壁的摩擦系数通常仅有钻柱与井壁摩擦系数的 1/3, 一般在摩擦较为严重的井段一个立柱接一个减

阻接头,减阻接头在大斜度井的使用表明可以把整体摩阻降低 10% 以上。3) 改变摩擦介质。实践及室内实验表明,与圆度或椭圆度较高的小颗粒岩屑相比,大颗粒片状岩屑会增大钻杆与井壁之间的摩擦,大颗粒岩屑更容易沉降成床^[46],基于这个认识,笔者原创设计了二次破碎钻具,它可以破碎大颗粒片状岩屑从而提高岩屑运移能力和减少摩阻,此钻具已成为中国页岩气水平井的标配。4) 改善摩擦边界,通过对井壁进行修整微扩,可以降低井壁粗糙度,从而减少钻杆与裸眼井壁之间的摩擦,该类产品最近几年也已开始规模应用。

减少起下钻趟次,通过节约起下钻时间也可间接提速。可变径稳定器可实现井下变径,不起钻即可调配下部钻具组合的造斜或稳斜能力。随钻堵漏旁通阀可以随钻下入,在必要时实现旁通进行不起钻堵漏。近年来随着机械和射频井下调控技术的成熟应用,其他不起钻井下控制工具正逐渐增多。

2010 年以后,中国对辅助提速钻具的研究急剧增长。在这个过程中,建立了实验能力,研制了立式钻具模拟试验装置、钻具性能循环测试装置、斜井段与水平段岩屑运移实验装置等。初步建立了钻井工具设计方法,发表了大量提速钻具结构力学、弹塑性变形、橡胶非线性、接触、振动、冲击、热、流固耦合、多相冲蚀等相关的学术论文;也建立了“提速钻具与钻柱系统”、“提速钻具与地层”交互影响的分析方法。这十多年的研究基本解决了从无到有的问题,并开始了一些原创设计,较好解决了中国深井硬地层的钻井提速难题。但应该看到相当多的提速钻具由于表面处理、加工与装配精度等原因,还存在性能衰减快、服役寿命不长、不耐温不耐冲蚀等问题,还不能很好地满足钻井提速需要,还需要继续加大攻关力度。

4 下一步发展方向

基于中国钻井继续向深、资源品质愈发恶劣、成本约束越发苛刻的实际情况,站在效果和经济性的角度,笔者认为下一步钻井提速的发展方向如下: 1) 开发耐磨耐冲蚀的金属材料和表面工艺,开发耐温耐腐蚀的非金属材料,提高精密件加工精度,从而提高井下提速钻具的使用寿命和使用性能; 2) 开发高耐磨强韧性 PDC 齿,并研究提高齿与基体的

连接强度; 3) 开发耐高温硬胶,开发特型连接螺纹,深化考虑动态压差、温度场和橡胶非线性大变形及老化等因素作用下的马达线型研究,以研制高转速大扭矩螺杆钻具,为提速提供更强井下动力; 4) 加强井下辅助提速钻具的智能控制研究; 5) 开发基于动力学快速评价的钻柱安全在线预警系统; 6) 加快难钻地层钻井提速智能优化研究与应用; 7) 除上述基于旋转钻井的提速研究外,还建议探索新型破岩方式,比如把电能、超声波、激光等能量方式引入井下。目前国际上已在浅表硬金属矿中实现电脉冲高速破岩,其钻速是机械钻井钻速的 2~4 倍。国内提出电脉冲-机械复合破岩并已开展了多年研究^[47-50],在实验室内已实现了电脉冲-机械复合破岩钻进,该方式先通过高压电脉冲放电劣化岩石再通过机械旋转刮切去除岩石。与机械钻井相比,对岩石硬度几乎无感、钻速和钻井成本随井深几乎不变是电脉冲-机械复合钻进的突出特点,这种新的破岩方式工业化后将可能极大助力深层超深层油气的经济开采。

5 结 论

在尽量确保或减少井下不发生事故或者复杂情况的前提下以最快的钻井速度钻达目的层,是钻井工程追求的目标。中国深井超深井的恶劣工况、复杂井身结构、越来越高的成本约束加速了钻井提速的研究。近二十年,钻柱力学的研究与使用从静力学逐渐过渡到动力学,用于评价极端工况下的钻具安全以及优选提速方案;岩石破碎也从塑性破碎逐渐走到脆性破碎、研究了破碎裂纹的产生与扩展并用于指导钻头设计和优选;针对不同工艺环节的需求也研制了系列提速钻具。最后形成了基于全井钻柱动力学、岩石脆性破碎、提速钻具与钻井参数和地层最优适配三者合一的综合提速技术。这项综合提速技术已在国内几个难钻深部地层使用并取得良好效果。21 世纪初至今的 20 年属于理论与实践探索交互引领,未来 20 年的研究重心将会逐渐聚焦在新材料、新制备工艺、人工智能和新型破岩方式上。

参考文献

- [1] 李宗杰,刘军,张永升,等.塔里木盆地中石化探区油气勘探进展、难点及技术需求[J].石油物探,2023,62(4): 579-591. doi: 10.12431/issn.1000-1441.2023.62.04.001

- LI Zongjie, LIU Jun, ZHANG Yongsheng, et al. Progress, difficulties, and technical requirements of oil and gas exploration of the SINOPEC exploration area in the Tarim Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(4): 579–591. doi: 10.12431/issn.1000-1441.2023.62.04.001
- [2] 伍贤柱, 万夫磊, 陈作, 等. 四川盆地深层碳酸盐岩钻完井技术实践与展望[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 97–105. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.011
- 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. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.011
- [3] JOHANCSIK C A, FRIESEN D B, DAWSON R. Torque and drag in directional wells – Prediction and measurement[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1984, 36(6): 987–992. doi: 10.2118/11380-PA
- [4] HO H S. An improved modeling program for computing the torque and drag in directional and deep wells[C]. SPE 18047-MS, 1988. doi: 10.2118/18047-MS
- [5] 李子丰, 李敬媛, 孔凡君. 钻柱拉力–扭矩模型述评[J]. *石油机械*, 1993, 21(8): 43–46. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.1993.08.010
- LI Zifeng, LI Jingyuan, KONG Fanjun. Comment on tension-torque model of drillstrings[J]. *China Petroleum Machinery*, 1993, 21(8): 43–46. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.1993.08.010
- [6] 白家祉, 苏义脑. 井斜控制理论与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- BAI Jiazhi, SU Yinao. Theory and practice of well deviation control[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [7] 苏义脑, 唐雪平, 陈祖锡. 初弯曲纵横弯曲梁的等效载荷法及其应用[J]. *力学与实践*, 2004, 26(1): 42–44. doi: 10.3969/j.issn.1000-0879.2004.01.011
- SU Yinao, TANG Xueping, CHEN Zuxi. Equivalent loading method for solving beam-column with initial bending and its application in drilling engineering[J]. *Mechanics in Engineering*, 2004, 26(1): 42–44. doi: 10.3969/j.issn.1000-0879.2004.01.011
- [8] 白家祉, 苏义脑. 定向钻井过程中的三维井身随钻修正设计与计算[J]. *石油钻采工艺*, 1991, 13(6): 1–4. doi: 10.13639/j.odpt.1991.06.001
- BAI Jiazhi, SU Yinao. Design and calculation of three-dimensional wellbore follow-through corrections during directional drilling[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1991, 13(6): 1–4. doi: 10.13639/j.odpt.1991.06.001
- [9] 高德利. 钻柱力学若干基本问题的研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 1995, 19(1): 24–35.
- GAO Deli. Some basic problems of elastic drillstring mechanics[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 1995, 19(1): 24–35.
- [10] 宋执武, 高德利, 马健. 大位移井摩阻/扭矩预测计算新模型[J]. *石油钻采工艺*, 2006, 28(6): 1–3. doi: 10.3969/j.issn.1000-7393.2006.06.001
- SONG Zhiwu, GAO Deli, MA Jian. New model for forecasting drag and torque in extended reach well[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2006, 28(6): 1–3. doi: 10.3969/j.issn.1000-7393.2006.06.001
- [11] 秦永和, 付胜利, 高德利. 大位移井摩阻扭矩力学分析新模型[J]. *天然气工业*, 2006, 26(11): 77–79. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.11.023
- QIN Yonghe, FU Shengli, GAO Deli. A new model for analyzing torque and drag in extended reach wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(11): 77–79. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.11.023
- [12] DYKSTRA M W. Nonlinear drill string dynamics[D]. Tulsa: The University of Tulsa, 1996.
- [13] 刘清友, 马德坤, 汤小文. 钻柱纵向振动模型的建立及求解方法[J]. *西南石油学院学报*, 1998, 20(4): 55–58. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.1998.04.015
- LIU Qingyou, MA Dekun, TANG Xiaowen. The method of solution and establishment for axial vibration model of drilling string[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1998, 20(4): 55–58. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.1998.04.015
- [14] 刘清友, 马德坤, 钟青. 钻柱扭转振动模型的建立及求解[J]. *石油学报*, 2000, 21(2): 78–82. doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2000.02.015
- LIU Qingyou, MA Dekun, ZHONG Qing. A drilling string torsional vibration model and its solution[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(2): 78–82. doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2000.02.015
- [15] 祝效华. 旋转钻井钻柱系统动力学特性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2005.
- ZHU Xiaohua. Research on the dynamic characteristics of the drill string system in rotary drilling[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.
- [16] 祝效华, 刘清友, 童华. 牙轮钻头动力学特性仿真研究[J]. *石油学报*, 2004, 25(4): 96–100. doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2004.04.022
- ZHU Xiaohua, LIU Qingyou, TONG Hua. Emulation research on dynamics of roller cone bit[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(4): 96–100. doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2004.04.022
- [17] 祝效华, 刘清友, 童华. 三维井眼全井钻柱系统动力学模型研究[J]. *石油学报*, 2008, 29(2): 288–291, 295. doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2008.02.025
- ZHU Xiaohua, LIU Qingyou, TONG Hua. Research on dynamics model of full hole drilling-string system

- with three-dimensional trajectory[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(2): 288–291, 295. doi: 10.3321/j.issn:0253-2697.2008.02.025
- [18] 祝效华, 童华, 刘清友, 等. 旋转钻柱与井壁的碰撞摩擦边界问题研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(15): 1833–1837. doi: 10.3321/j.issn:1004-132x.2007.15.018
- ZHU Xiaohua, TONG Hua, LIU Qingyou, et al. Research on the dynamic boundary condition between revolving drill string and borehole wall[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(15): 1833–1837. doi: 10.3321/j.issn:1004-132x.2007.15.018
- [19] ZHU Xiaohua, LI Bo, LIU Qingyou, et al. New analysis theory and method for drag and torque based on full-hole system dynamics in highly deviated well[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1–13. doi: 10.1155/2015/535830
- [20] 祝效华, 敬俊. 井斜与水垂比可调的旋转钻进大型比例实验台架: CN201710663811.3[P]. 2017–12–08.
- ZHU Xiaohua, JING Jun. Large-scale proportional experimental platform for rotary drilling with adjustable well deviation and vertical-to-horizontal ratio: CN201710663811.3[P]. 2017–12–08.
- [21] 祝效华, 李柯, 安家伟. 水平井钻柱动态摩阻扭矩计算与分析[J]. *天然气工业*, 2018, 38(8): 75–82. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.08.011
- ZHU Xiaohua, LI Ke, AN Jiawei. Calculation and analysis of dynamic drag and torque of horizontal well strings[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(8): 75–82. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.08.011
- [22] 祝效华, 李波, 李柯, 等. 大斜度井钻柱动态摩阻扭矩快速求解方法[J]. *石油学报*, 2019, 40(5): 611–620. doi: 10.7623/syxb201905011
- ZHU Xiaohua, LI Bo, LI Ke, et al. Quick solution method for dynamic friction torque of drilling string in a highly-deviated well[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(5): 611–620. doi: 10.7623/syxb201905011
- [23] 程载斌, 姜伟, 任革学, 等. 全井钻柱系统多体动力学模型[J]. *石油学报*, 2013, 34(4): 753–758. doi: 10.7623/syxb201304017
- CHENG Zaibin, JIANG Wei, REN Gexue, et al. A multibody dynamical model of full-hole drillstring system[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(4): 753–758. doi: 10.7623/syxb201304017
- [24] 崔猛, 李佳军, 纪国栋, 等. 基于机械比能理论的复合钻井参数优选方法[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(1): 66–70. doi: 10.3969/j.issn.1001-0890.2014.01.013
- CUI Meng, LI Jiajun, JI Guodong, et al. Optimize method of drilling parameter of compound drilling based on mechanical specific energy theory[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(1): 66–70. doi: 10.3969/j.issn.1001-0890.2014.01.013
- [25] 路宗羽, 徐生江, 蒋振新, 等. 准噶尔南缘深井机械比能分析与钻井参数优化[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(4): 51–61. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2021.04.29.11
- LU Zongyu, XU Shengjiang, JIANG Zhenxin, et al. Mechanical specific energy analysis and optimization of drilling parameters for Nanyuan Deep Formations in Junggar Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2021, 43(4): 51–61. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2021.04.29.11
- [26] 王彦祺, 贺庆, 龙志平. 渝东南地区页岩气钻完井技术主要进展及发展方向[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(3): 356–364. doi: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.010
- WANG Yanqi, HE Qing, LONG Zhiping. Main progress and development direction of shale gas drilling and completion technologies in southeastern Chongqing[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(3): 356–364. doi: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.010
- [27] 祝效华, 刘伟吉. 单齿高频扭转冲击切削的破岩及提速机理[J]. *石油学报*, 2017, 38(5): 578–586. doi: 10.7623/syxb201705011
- ZHU Xiaohua, LIU Weiji. The rock breaking and ROP rising mechanism for single-tooth high-frequency torsional impact cutting[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(5): 578–586. doi: 10.7623/syxb201705011
- [28] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1965, 2(1): 57–73. doi: 10.1016/0148-9062(65)90022-7
- [29] TOH S B, MCPHERSON R. Fine scale abrasive wear of ceramics by a plastic cutting process[C]. Rhodes: Science of Hard Materials. Proc. 2nd Int. Conf. on Science of Hard Materials, 1986.
- [30] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-regime grinding: A new technology for machining brittle materials[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1991, 113(2): 184–189. doi: 10.1115/1.2899676
- [31] BIFANO T G, FAWCETT S C. Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding[J]. *Precision Engineering*, 1991, 13(4): 256–262. doi: 10.1016/0141-6359(91)90003-2
- [32] RICHARD T, DAGRAIN F, POYOL E, et al. Rock strength determination from scratch tests[J]. *Engineering Geology*, 2012, 147, 91–100. doi: 10.1016/j.enggeo.2012.07.011
- [33] ZHOU Y, LIN J S. On the critical failure mode transition depth for rock cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 62: 131–137. doi:

- rg/10.1016/j.ijrmms.2013.05.004
- [34] LIU Weiji, ZHU Xiaohua, JING Jun. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 163: 311–319. doi: 10.1016/j.petrol.2017.12.067
- [35] LIU Weiji, DENG Hongxing, ZHU Xiaohua, et al. Experimental study of the rock cutting mechanism with PDC cutter under confining pressure condition[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56: 7377–7396. doi: 10.1007/s00603-023-03444-7
- [36] ZHU Xiaohua, LIU Weiji, LÜ Yanxin. The investigation of rock cutting simulation based on discrete element method[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(6): 977–995. doi: 10.12989/gae.2017.13.6.977
- [37] HE Ling, HUANG Jiqing, LUO Yunxu, et al. The ductile–brittle transition of rock cutting: Insight from the discrete element method[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44(12): 1–18. doi: 10.1007/s40430-022-03849-5
- [38] LIU Weiji, LUO Yunxu, ZHU Xiaohua, et al. The ductile-brittle failure mode transition of hard brittle rock cutting—new insights from numerical simulation[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-energy and Geo-resources, 2022, 8: 129. doi: 10.1007/s40948-022-00438-7
- [39] ZHU Xiaohua, LIU Weiji. The rock fragmentation mechanism and plastic energy dissipation analysis of rock indentation[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 16(2): 195–204. doi: 10.12989/gae.2018.16.2.195
- [40] LIU Weiji, ZHU Xiaohua. A new approach of rock cutting efficiency evaluation by using plastic energy dissipation ratio[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(2): 879–888. doi: 10.1007/s12205-018-0100-0
- [41] ZHU Xiaohua, LIU Weiji, HE Xianqun. The investigation of rock indentation simulation based on discrete element method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(4): 1201–1212. doi: 10.1007/s12205-016-0033-4
- [42] 祝效华, 刘伟吉, 童华. 一种基于塑性耗能比的钻进参数优选方法: CN201810532376.5[P]. 2018–05–29.
- ZHU Xiaohua, LIU Weiji, TONG Hua. A method for optimizing drilling parameters based on plastic energy dissipation ratio: CN201810532376.5[P]. 2018–05–29.
- [43] 祝效华, 刘伟吉. 钻井岩石破碎学[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 230–250.
- ZHU Xiaohua, LIU Weiji. Rock fragmentation in drilling[M]. Beijing: Science Press, 2022: 230–250.
- [44] ZHU Xiaohua, LUO Yunxu, LIU Weiji. The rock breaking and ROP increase mechanisms for single-tooth torsional impact cutting using DEM[J]. Petroleum Science, 2019, 16: 1134–1147.
- [45] ZHU Xiaohua, LAI Chunlin. Design and performance analysis of a magnetorheological fluid damper for drill-string[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 40(1): 67–83. doi: 10.3233/JAE-2012-1430
- [46] ZHU Xiaohua, SUN Chao, TONG Hua. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(4): 628–638. doi: 10.1016/S1001-6058(11)60405-9
- [47] 祝效华, 罗云旭, 刘伟吉, 等. 等离子体电脉冲钻井破岩机理的电击穿实验与数值模拟方法[J]. 石油学报, 2020, 41(9): 1146–1162. doi: 10.7623/syxb202009011
- ZHU Xiaohua, LUO Yunxu, LIU Weiji, et al. Electrical breakdown experiment and numerical simulation method of rock-breaking mechanism of plasma electric pulse drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(9): 1146–1162. doi: 10.7623/syxb202009011
- [48] ZHU Xiaohua, LUO Yunxu, LIU Weiji. On the mechanism of high-voltage pulsed fragmentation from electrical breakdown process[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54: 4593–4616. doi: 10.1007/s00603-021-02537-5
- [49] LIU Weiji, HU Hai, ZHU Xiaohua. The rock breaking mechanism of a combined high-voltage electric impulse-PDC bit drilling technology[J]. Geothermics, 2023, 111: 102723. doi: 10.1016/j.geothermics.2023.102723
- [50] 祝效华, 罗云旭. 一种连续管高压电脉冲–机械复合钻井用电极钻头: CN201810711635.0[P]. 2019–04–05.
- ZHU Xiaohua, LUO Yunxu. A continuous tube high-pressure electric pulse electrode bit for mechanical composite drilling: CN201810711635.0[P]. 2019–04–05.

作者简介



祝效华, 1978年生, 男, 汉族, 山东菏泽人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事管柱力学和钻井提速等方面的研究工作。E-mail: zxh-th113@163.com

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>