

定向穿越扩孔钻进软硬夹层钻头振动特性研究^{*}

祝效华¹, 刘云海^{1,2}, 刘婷^{1,2}

(1. 西南石油大学机电工程学院 成都, 610500) (2. 宝鸡石油机械成都装备制造分公司 成都, 610051)

摘要 针对管道铺设定向穿越扩孔施工钻遇软硬夹层时扩孔钻头过量磨损、掉齿和掉牙轮乃至发生灾难性埋井事故等工程问题,通过有限元方法建立全尺寸扩孔器动态破岩的非线性动力学三维仿真模型,研究了扩孔器在软硬夹层钻进时的振动特性,给出了扶正器的结构参数、回拖力和转速组合的临界参数。结果表明,扩孔器在软硬夹层钻进时其横向振动加速度峰值、加速度有效值分别为纵向振动的 5.3 倍、5.2 倍,说明扩孔器横向振动过于剧烈是导致其过早失效的根本原因;安装扶正器对扩孔器在软硬夹层钻进时有非常明显的减振效果,其横向振动强度比无扶正器时减小了 77.6%,钻速提高了 57.5%。

关键词 定向穿越; 软硬夹层; 扩孔器; 扶正器; 剧烈振动; 失效

中图分类号 TH113.1; TE973

引言

能源是关系国家经济发展的重要战略资源之一,保证能源安全至关重要。中国油气资源分布不均,2013 年对外石油依存度已经达到了 58.1%,而且进口石油 90% 都依赖于海上运输,面对日益复杂的南海、东海问题,铺设管道进行西气东输,从国外往国内运输能源(比如中缅管道)来分担风险非常有必要。目前,中国的主干管道里程约为 8~10 万 km,预计在“十二五”末要建成 15 万 km,2020 年达到 20 万 km,而美国已经建成 30 万 km,未来一段时间国内油气管道铺设工程量巨大。钻遇江河时常采用水平定向穿越铺设管道。定向穿越施工过程中经常遇到大范围的软硬夹层地带,在软硬夹层中,扩孔钻头失效严重,例如在仪征-长岭原油管道洪湖长江定向钻穿越工程中,穿越段软硬夹层大范围存在,扩孔器在扩孔过程中磨损严重并发生断裂现象^[1]。水平定向钻穿越尼罗河工程中,在穿越软硬夹层地段时,容易发生卡钻、钻头失效等严重问题^[2]。水平定向钻穿越王宝河工程中,由于地质为破碎性中砂岩含有石英砂和长石,软硬变化大,当进行直径 400 mm 扩孔时,扩进非常困难,主要表现为扭矩大,钻具磨损严重,扩进速度非常慢,扩孔器外

围,包括牙轮的侧壁、后背磨损严重,磨掉 6 个牙轮^[3]。失效不仅造成钻头用量增加,而且延误工期,严重时会因为工期延迟而导致井壁失稳,从而造成灾难性埋井事故。软硬夹层钻头失效问题已经成为制约定向穿越施工质量和效益的难题之一,而目前对软硬夹层中钻头失效的机理认识尚不清晰,相关研究文献也很少,因此研究软硬夹层钻进时钻头的振动特性,并找到合理的应对方法对减缓定向穿越施工钻遇软硬夹层时扩孔器的快速失效和提高作业安全性是非常必要的。

下部钻具在复杂地层的剧烈振动对钻具的工作安全具有较大影响。国内外学者对如何在复杂地层减小下部钻具振动开展了大量研究, Wassell 等^[4]研究发现,不同地层下减振器的减振效果可能存在差异,阻尼适当的减振器能提高钻井效率; Jafari 等^[5]发现,横振、纵振是造成下部钻具失效的主要原因,合理的控制钻压与转速可以有效的减小下部钻具的振动。Christoforou 等^[6]发现,纵振、横振、扭振相互影响导致下部钻具失效,通过调整施工参数可以减缓振动对下部钻具的不利影响。Dykstra 等^[7]对钻头和钻柱的动力学特性进行实验研究,指出钻头横向振动产生的不利影响远大于轴向振动,由于钻压,转速,岩石性质不同,下部钻具的横向加速度一般会在 20 g 以上,最高可以达到 200 g。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51674214);四川省科技计划国际合作计划资助项目(2016HH0008);国家自然科学基金资助项目(51222406);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-1061);四川省高等学校科技创新团队“油气井管柱力学与井下工具”资助项目(12TD007)

收稿日期:2014-11-18;修回日期:2015-01-16

Baryshnikov 等^[8]通过研究发现,造成下部钻具失效的原因跟钻具的制造因素与钻井工艺有很大关系,并尝试了钻杆与接头疲劳寿命的计算。周祖辉^[9]根据软硬地层的可钻性不同,钻速及相应的地层对钻头的反作用力也不同的原理,分析了从软地层钻入硬地层前后,钻头上产生弯矩的原因及计算方法。陈勇^[10]针对水平定向钻穿越东江工程钻遇软硬夹层地带时,指出通过不断调整方位角,以防止在软硬界面处造成导向走偏,导致扩孔失败。马驰云^[11]针对水平定向钻穿越沪昆铁路工程钻遇软-硬-软地层时,导致软土层塌方、抱钻、卡钻等事故的情况,重新设计施工方案,改善泥浆性能等措施,最终完成了施工任务。杨全亮等^[12]指出在盾构施工钻遇软硬不均匀地层时,必须对各项掘进参数和施工措施进行及时有效地调整,防止盾构机偏移严重造成刀口折断。冒乃兵等^[13]指出在软硬互层的地层中进行水平定向钻施工,扩孔过程中易出现扩孔台阶,导致扩孔施工中卡钻、回拖过程中拖力增大、钻杆疲劳等现象,必须制定相应的施工预案应对软硬交错地层处可能出现的扩孔台阶。

针对定向穿越施工钻遇软硬夹层时钻具失效严重,扩进速度非常慢等问题,基于弹塑性力学和岩石力学,采用 Drucker-Prager 准则作为岩石的本构关系,研究了扶正器对扩孔器在软硬夹层钻进时振动特性的影响,给出了扶正器的最优结构参数,并根据国际跨国公司贝克休斯对井下钻具振动的分级标准推荐了夹层中最适宜的施工参数。

1 系统的非线性动力学模型

1.1 扩孔器-岩石接触数学模型

扩孔器破碎岩石过程的非线性主要表现为:a. 短时间内因下部钻具的大位移与大转动所引起的几何非线性;b. 岩石单元因发生大应变直至破坏失效所表现的材料非线性;c. 由扩孔器转动与岩石单元变形、失效和移除产生的接触动态变化所引起的接触非线性。采用有限单元法设接触系统在时刻 t 占据空间域为 Ω ,作用在接触系统内的体积力、边界力及柯西内应力分别为 b, q, σ ,则接触问题^[14]可归结为

$$\int_{\Omega} \sigma \delta_e d\Omega - \int_{\Omega} b \delta_u d\Omega - \int_{\Gamma_f} q \delta_u dS - \int_{\Gamma_c} q_c \delta_u dS + \int_{\Gamma_c} \rho a \delta_u d\Omega = 0 \quad (1)$$

其中: Γ_f 为给定边界力的边界; Γ_c 为接触边界; δ_u

为虚位移; δ_e 为虚应变; ρ 为密度; a 为加速度。

将域 Ω 用有限单元离散化并引入虚位移场,可得到

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{p}(t) + \mathbf{c}(u, a) - \mathbf{f}(u, \beta) \quad (2)$$

其中: \mathbf{M} 为质量矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}$ 为加速度矢量; t 为时间变量; \mathbf{p} 为外力矢量; \mathbf{c} 为接触力与摩擦力矢量; \mathbf{f} 为内应力矢量; u 为物体位移; a 为与接触表面特性相关的变量; β 为与材料本构关系相关的变量。

1.2 Drucker-Prager 岩土强度准则

Drucker-Prager 岩土强度准则将偏应力视为材料破坏原因,同时反映了体积应力对材料强度的影响,因此在岩土切削过程的研究中应用较多。根据 Drucker-Prager 强度准则,认为中间主应力对岩石的破坏有影响,用正八面体面上的正应力 σ_{oct} 和剪应力 τ_{oct} 表示^[15] 为

$$\tau_{oct} = \tau_0 + m\sigma_{oct} \quad (3)$$

其中

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3); m = -\sqrt{6}\alpha, \tau_0 = \frac{\sqrt{6}}{3}k; \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$$

分别为岩土单元在切削载荷、围压与上覆岩层压力共同作用下的最大主应力、中间主应力和最小主应力; k, α 为与岩土材料粘聚力 c 和内摩擦角 ζ 相关的参数。

当取 $\theta_\sigma = \frac{\pi}{6}$ 时,为压缩硬化,可得

$$\alpha = \frac{2\sin\zeta}{\sqrt{3}(3 - \sin\zeta)}, k = \frac{6c\cos\zeta}{\sqrt{3}(3 - \sin\zeta)}$$

当取 $\theta_\sigma = -\frac{\pi}{6}$ 时,为拉伸硬化,可得

$$\alpha = \frac{2\sin\zeta}{\sqrt{3}(3 + \sin\zeta)}, k = \frac{6c\cos\zeta}{\sqrt{3}(3 + \sin\zeta)}$$

当 $\tan\theta_\sigma = -\frac{\sin\zeta}{\sqrt{3}}$ 时,为剪切硬化,可得

$$\alpha = \frac{\sin\zeta}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2\zeta}}, k = \frac{\sqrt{3}c\cos\zeta}{\sqrt{3 + \sin^2\zeta}}$$

其中: θ_σ 为应力洛德角(stress Lode angle)。

2 岩石物理参数与数值仿真模型

2.1 扩孔器的工作原理

扩孔器破岩钻进模型,基孔直径为 216 mm,以其为基础,回扩至 601 mm 孔眼,导向杆直径为

127 mm。扩孔器的工作原理如图 1 所示:扩孔器回拖扩孔时,由回拖机构将回拖力和旋转扭矩作用于扩孔器,使其产生前进运动和回转运动。扩孔器的前进运动需要克服土体对它的正压阻力和摩擦阻力,而扩孔器的回转则需要克服土体对刀具的抗力扭矩和土体对扩孔器表面的摩擦阻力扭矩。

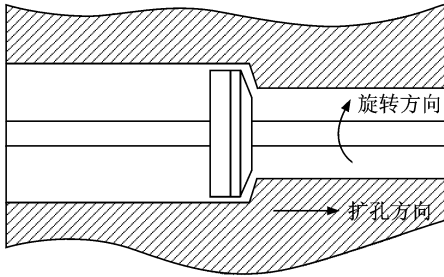


图 1 扩孔器的工作原理

Fig. 1 The working principle of reamer

2.2 基本假设

由于研究重点和难点是扩孔器在软硬夹层中钻进时的振动特性,为提高计算效率,略去次要因素,采用的基本假设:初始条件下扩孔器轴线与井眼轴线重合;单元失效后即从岩石中删除,忽略其失效后对后续钻进的影响;由于扩孔器的硬度比岩石的硬度高得多,因此在建模时,将扩孔器看作刚体,岩石体看成是弹塑性体且符合 Drucker-Prager 强度准则,这与实际的岩石切削破碎过程是较为符合的;考虑到扩孔器切削齿与岩石之间存在的摩擦,设定各个接触面的摩擦因数^[16]为 0.455;合理的材料参数是模拟扩孔破岩过程的首要条件,岩石主要物性参数如表 1。

表 1 岩石物理参数

Tab. 1 Petrophysical parameters

岩石	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/ (MPa)	泊松 比	摩擦 角/(°)	膨胀 角/(°)
软岩	2.15	2 400	0.24	24.47	30
硬岩	2.46	11 500	0.31	36	36

2.3 网格划分与边界条件

通过 ABAQUS 有限元软件建立直径 601 mm 的扩孔器实体和三维岩石实体的动态破岩非线性动力学有限元模型,采用六面体 8 节点减缩积分单元 (C3D8R)对岩石材料进行离散,划分网格为 193 658 个单元。扩孔器与岩石之间采用面面接触,扩孔器的主体与牙轮之间采用 Hinge 属性连接,扩孔器的回拖力为 30 t,转速为 30 r/min。并且约束岩石模型与井壁的所有自由度,不约束扩孔器的自由度,有

限元模型如图 2 所示。

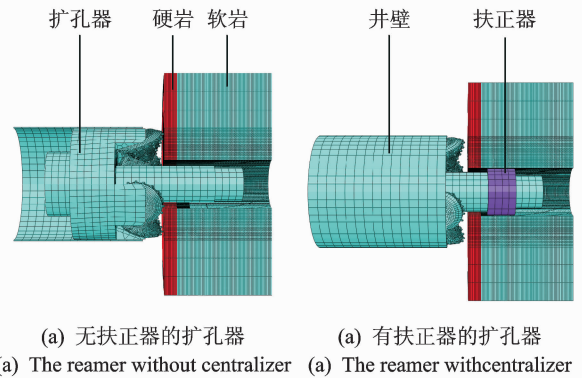


图 2 扩孔器与岩石的有限元模型

Fig. 2 Reamer finite element model with rocks

3 结果与讨论

对扩孔器在软硬夹层破岩过程进行数值仿真分析。根据模拟结果,提取了软硬夹层岩石失效时的井底应力云图,如图 3 所示。从图中可以看出,扩孔器的正下方的岩石单元在扩孔器作用下完全失效,形成井眼。由于目前尚没有定向穿越施工中钻具测量数据来源,所以没法实验验证。但是,本模型仿真方法通过气体钻井动力学模型得到了美国的 ESSO 公司的现场所测数据验证,说明本模型仿真方法的可靠性^[17]。

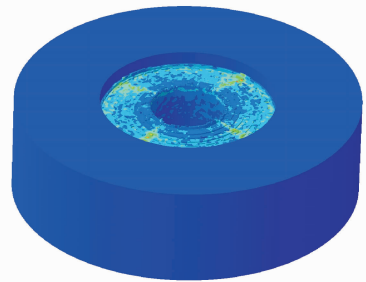


图 3 软硬夹层岩石失效应力图

Fig. 3 Failure diagram of the soft and hard sandwiching

3.1 扩孔器振动特性

图 4,5 分别为扩孔器在软硬夹层钻进时扩孔器的横向运动轨迹曲线和扩孔器进尺曲线。从图 4 中看出,无扶正器的扩孔器在软硬夹层中钻进时的横向偏移程度相当严重,分析其原因是,当扩孔器外围切削齿切削硬地层并进入到软地层中时,其靠近心部的切削齿还在硬地层中,而软地层中切削速度快,这就导致只有靠近心部的很少一部分钻齿在承受全部的回拖载荷。此时从静力学角度看钻齿处于严重

过载状态,从动力学角度看这部分钻齿承受着巨大的动载荷,这不仅使扩孔器牙轮钻头上的受力不均匀同时造成了转动也不均匀,最终导致扩孔器横向摆动非常剧烈。扩孔器无扶正器时,其横向摆动非常剧烈,导致其在钻进方向进尺缓慢,但当安装上扶正器后其横向偏移程度不仅大大减小,而且其在软硬夹层中的钻速比无扶正器时快(图5)。

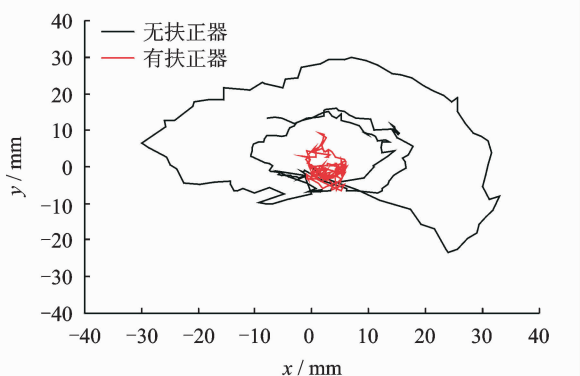


图4 扩孔器质心的横向运动轨迹曲线

Fig. 4 Reamer lateral movement trajectory curve

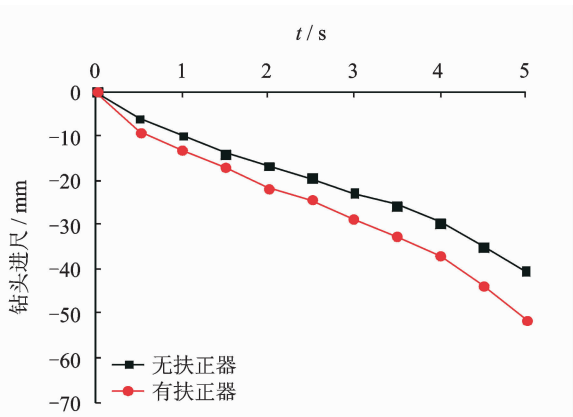


图5 扩孔器进尺曲线

Fig. 5 The reamer penetration curve

图6,7分别为扩孔器振动强度的响应曲线。结合表2的分析结果可知,无扶正器时,扩孔器的横向振动加速度峰值、加速度有效值(root mean square, 简称RMS)分别为纵向振动的5.3倍、5.2倍,说明扩孔器横向振动过于剧烈是导致其过早失效的根本原因。分析其原因是:主动施工载荷即回拖力主要施加在轴向及钻进方向,回拖载荷高达几十t,扭转阻力与回拖力成正比,而横向载荷相比而言则小的多(钻头自重约为1~2t,是钻头处横向静载荷的主要构成部分)。钻进时钻头破碎软硬夹层激起纵、横、扭三向振动,较大幅值的回拖载荷对轴向的抑制作用及对扭转的连带抑制作用,使钻进耦合振动中横向振动表现的更为突出。

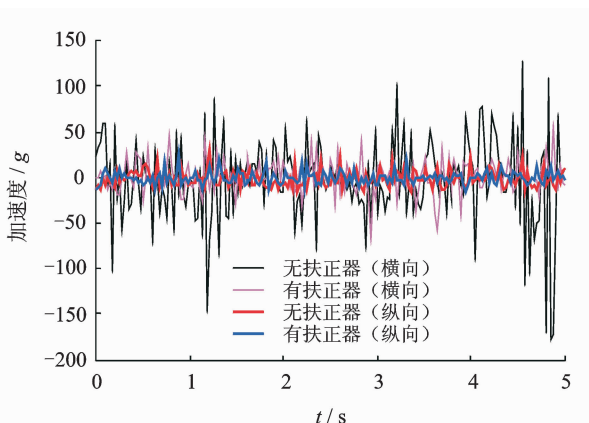


图6 扩孔器的振动加速度曲线

Fig. 6 Reamer acceleration response curve

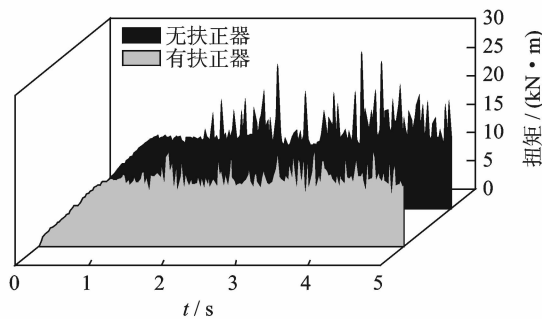


图7 扩孔器的扭矩响应曲线

Fig. 7 Reamer torque response curve

表2 振动强度对比

Tab. 2 The contrast of vibration intensity

振动类型	峰值		有效值	
	无扶正器	有扶正器	无扶正器	有扶正器
纵振力/g	32	29	8.6	7.3
横振力/g	170	46	45	18
扭振力/(kN·m)	27.1	17.8	3.9	3.2

同时,扶正器对扩孔器在软硬夹层钻进时有非常明显的减振效果,特别是在横向振动方面。在软硬夹层中,有扶正器的扩孔器其纵向振动加速度峰值和加速度有效值分别是无扶正器扩孔钻进时的90.7%,85%;其横向振动加速度峰值和加速度有效值分别缩小为无扶正器扩孔钻进时的27%,40%;其扭矩峰值和扭矩有效值分别是无扶正器扩孔钻进时的65%,82%。因此后文将着重研究扶正器对扩孔器在软硬夹层钻进时横振特性的影响。受采样频率的影响,加速度的最大值不可避免的会存在一定的偶然性,在下文的研究中以其有效值(RMS)作为对比依据。

3.2 扶正器参数对扩孔器横向振动的影响

从以上研究可知,扶正器对扩孔器在软硬夹层

钻进时有非常明显的减振效果,但是不同参数的扶正器其减振效果完全不同,本节研究扶正器参数对扩孔器在软硬夹层钻进时横振特性的影响。

3.2.1 扶正器直径

首先研究扶正器不同直径对扩孔器在软硬夹层钻进时横振特性的影响,表 3 为不同直径的扶正器。

表 3 不同直径的扶正器

Tab. 3 Different length centralizer of the reamer

扶正器	长度	直径
A	100	165
B	100	175
C	100	185
D	100	195
E	100	205

结合图 8 和图 9 的分析结果可知, A, B, C, D, E 五类情况下扩孔器的横向加速度有效值比无扶正

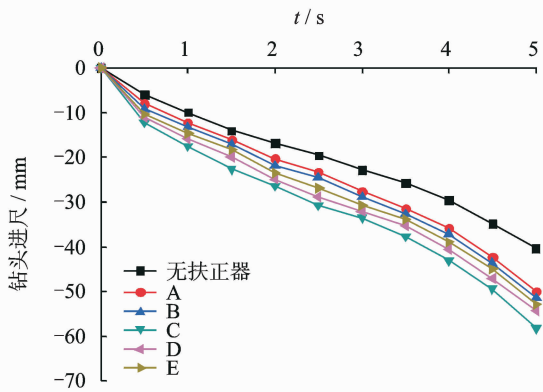


图 8 不同直径扶正器的扩孔器的破岩速度曲线
Fig. 8 Different diameters centralizer of the reamer penetration response curve

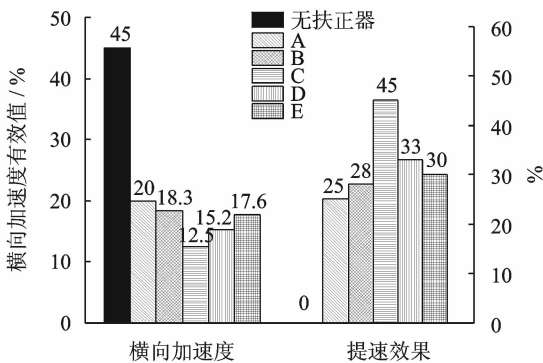


图 9 不同直径扶正器的扩孔器的横向振动强度与提速效果图
Fig. 9 Different diameters centralizer of the reamer lateral vibration intensity and acceleration response curve

器时分别减小了 55.5%, 59.3%, 72.2%, 66.2%, 60.8%, 显然 C 扶正器最优。此外, 扩孔器在软硬夹层钻进时间越短其损坏或其他事故的几率越低, C 扶正器时扩孔钻速最快, 提高了 45%, 故选择 C 扶正器更有利于提高扩孔器在软硬夹层钻进的安全性。分析其原因, 扩孔器在软硬夹层的横向振动很剧烈, 过小直径的扶正器无法起到扶正的作用, 过大直径的扶正器会使扶正器与井壁频繁碰撞, 从而会加剧整个下部钻具的振动, 振动的加剧又会降低钻速, 形成恶性循环, 最终导致扩孔器快速失效。

3.2.2 扶正器长度

确定选 C 类扶正器, 改变其长度研究长度参数对扩孔器软硬夹层钻进时横振特性的影响, 不同长度扶正器的参数如表 4 所示。

表 4 不同长度的扶正器

Tab. 4 Different length centralizer of the reamer

扶正器	长度	直径
C ₁	50	185
C ₂	100	185
C ₃	150	185
C ₄	200	185
C ₅	300	185

结合图 10 和图 11 的分析结果可知, C₁, C₂, C₃, C₄, C₅ 五类情况下扩孔器的横向加速度有效值比无扶正器时分别减小了 52%, 72.2%, 77.6%, 75.1%, 68.8%。C₃ 扶正器减振效果最好最高, 且使用 C₃ 类扶正器时扩孔器的钻速最高, 提高了 57.5%。分析其原因, 扶正器过短无法起到扶正作用, 过长则会增大与井壁的碰撞几率, 从而加剧下部钻具的振动, 降低能量利用率, 降低扩孔钻速。

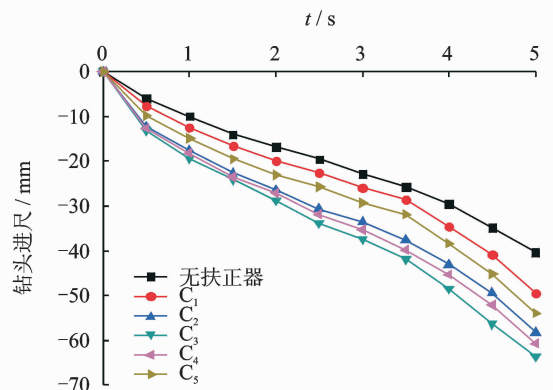


图 10 不同长度扶正器的扩孔器的破岩速度曲线
Fig. 10 Different length centralizer of the reamer penetration response curve

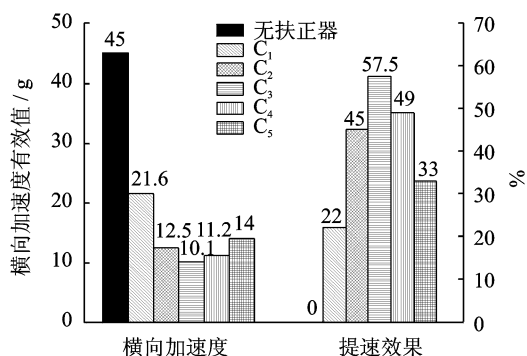


图11 不同长度扶正器的扩孔器的横向振动强度与提速效果图

Fig. 11 Different length centralizer of the reamer lateral vibration intensity and acceleration response curve

4 工程施工参数的优选

以 C_3 扶正器为基础,以振动控制为评价指标,计算并优选最佳施工参数(回拖力、转速)。

贝克休斯经过多年现场探索形成了被行业广泛认可的施工指南,并建立了下部钻具横向振动的分级标准^[18]:当其横向加速度有效值在 8 g 以内时,表示其横向振动水平在安全区,处于良好的运行环境;当其横向加速度有效值超过 8 g 时,表示其横向振动水平在危险区,下部钻具必须立即采取措施消除振动后方可继续钻进。

从图12可以看出,在软硬夹层中,扩孔器的横向加速度有效值会随着转速和回拖力的增大而增大,穿越工程中常用的回拖力和转速参数都可能进入“横振危险区”,这说明对扩孔器钻进软硬夹层时振动特性评估是非常有必要的。根据分级标准,图10给出了最优参数组合:如采用 30 t 回拖力时,转

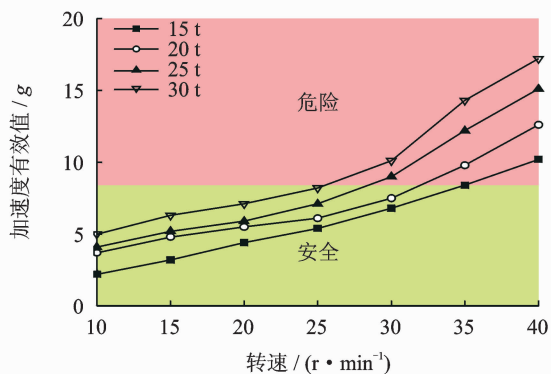


图12 不同施工参数扩孔器横向加速度有效值

Fig. 12 Reamer lateral acceleration RMS with the different construction parameters

速不能超过 25 r/min ;回拖力采用 15 t 时,转速可放宽至 35 r/min ,按照图12可使扩孔器振动水平控制在安全范围内。

5 结论

1) 软硬夹层中,扩孔器横向振动加速度最高达到 170 g ,横振非常剧烈,其横振加速度峰值、加速度有效值分别为纵振的 5.3 倍和 5.2 倍,横振过于剧烈是导致其过早失效的根本原因。

2) 软硬夹层中,安装扶正器可大幅降低扩孔器横振,通过数值计算给出了最佳扶正器结构参数,安装合适的扶正器,扩孔器横振强度可下降到原来的 $1/4$,且扩孔钻速可提高 50% 以上。

3) 给出了回拖力和转速参数组合的临界参数,根据该计算结果可避进入“横振危险区”,从而大幅减低安全事故发生几率。

参 考 文 献

- [1] 陈雪华,张德桥,康新生,等. 长江中游岩石层首次定向钻穿越施工技术[J]. 石油工程建设, 2006, 32(3): 43-47.
Chen Xuehua, Zhang Deqiao, Kang Xinsheng, et al. The first horizontal directional drilling engineering projects of the middle lithosphere of the Yangtze[J]. Petroleum Engineering Construction, 2006, 32(3): 43-47. (in Chinese)
- [2] 贾伟波,吕明记,赵国泉. 水平定向钻技术在尼罗河穿越工程中应用[J]. 石油工程建设, 2000, 26(1): 30-31.
Jia Weibo, Lü Mingji, Zhao Guoquan. The horizontal directional drilling crossing technology in the Nile[J]. Petroleum Engineering Construction, 2000, 26(1): 30-31. (in Chinese)
- [3] 范士东. 王宝河定向钻扩孔过程中的施工难点及处理措施[J]. 中国高新技术企业, 2011(15): 67-69.
Fan Shidong. The construction difficulties and measures in the horizontal directional drilling crossing process of the Wangbao river[J]. China High Technology Enterprises, 2011(15): 67-69. (in Chinese)
- [4] Wassell M E, Cobern M E, Saheta V, et al. Active vibration damper improves performance and reduces drilling costs[J]. World Oil, 2008, 229(9): 108-111.
- [5] Jafari A A, Kazemi R, Mahyari M F. The effects of drilling mud and weight bit on stability and vibration of a drill string[J]. Journal of Vibration and Acoustics,

- 2012, 134(1): 011-014.
- [6] Christoforou A P, Yigit A S. Fully coupled vibrations of actively controlled drillstrings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 267(5): 1029-1045.
- [7] Dykstra M W, Chen D C K, Warren T M, et al. Drillstring component mass imbalance: a major source of downhole vibrations[J]. *SPE Drilling & Completion*, 1996, 11(4): 234-241.
- [8] Baryshnikov A, Calderoni A, Ligrone A, et al. A new approach to the analysis of drillstring fatigue behaviour [J]. *SPE Drilling & Completion*, 1997, 12(2): 77-84.
- [9] 周祖辉. 钻软硬交错地层时钻头弯矩及转角的计算方法[J]. *石油大学学报:自然科学版*, 1990, 14(2): 16-21.
Zhou Zuhui. The calculation method of bending moment and corner in the uneven soft-hard formation [J]. *Journal of Petroleum University: Natural Science Edition*, 1990, 14(2): 16-21. (in Chinese)
- [10] 陈勇. 长距离非开挖穿越技术在岩石层、砂层的施工实践[J]. *中国煤炭地质*, 2008, 20(8): 74-76.
Chen Yong. The long trenchless crossing technology in the construction practice of rock and sand layer[J]. *Coal Geology of China*, 2008, 20(8): 74-76. (in Chinese)
- [11] 马驰云. 定向钻穿越施工中的软-硬-软地层施工[J]. *非开挖技术*, 2009, 23(4): 20-21.
Ma Chiyun. The directional drilling crossing in the construction of the soft-hard-soft layer[J]. *Trenchless Technology*, 2009, 23(4): 20-21. (in Chinese)
- [12] 杨全亮, 梁青槐. 软硬不均地层盾构法施工技术措施[J]. *山西建筑*, 2007, 33(29): 306-307.
Yang Quanliang, Liang Qingkui. The shield method of the construction measures in the uneven soft-hard formation [J]. *Shanxi Architecture*, 2007, 33(29): 306-307. (in Chinese)
- [13] 冒乃兵, 李丰耘. 水平定向钻施工中软硬交错地层的处理[J]. *非开挖技术*, 2012, 26(4): 8-10.
Mao Naibin, Li Fengyun. The horizontal directional drilling construction in the soft-hard formation [J]. *Trenchless Technology*, 2012, 26(4): 8-10. (in Chinese)
- [14] 王清峰, 朱才朝, 宋朝省, 等. 牙轮钻头单牙轮的破岩仿真研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(10): 108-112.
Wang Qingfeng, Zhu Caichao, Song Chaosheng, et al. Single cone rock bit rock breaking simulation [J]. *Vibration and Shock*, 2010, 29(10): 108-112. (in Chinese)
- [15] 邓楚键, 何国杰, 郑颖人. 基于M-C准则的D-P系列准则在岩土工程中的应用研究[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(6): 735-739.
Deng Chujian, He Guojie, Zheng Yingren. Criteria based on the MC of the DP series standards in geotechnical engineering study of Geotechnical Engineering [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6): 735-739. (in Chinese)
- [16] Tekeste M Z, Tollner E W, Raper R L, et al. Non-linear finite element analysis of cone penetration in layered sandy loam soil-considering precompression stress state[J]. *Journal of Terramech*, 2009, 46(5): 229-239.
- [17] 祝效华, 贾彦杰, 童华. 气体钻井钻柱振动特性及控制措施[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 293-297.
Zhu Xiaohua, Jia Yanjie, Tong Hua. Vibrating characteristics of drill string in gas drilling and its control measure[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 293-297. (in Chinese)
- [18] 胡以宝, 狄勤丰, 邹海洋, 等. 钻柱动力学研究及监控技术新进展[J]. *石油钻探技术*, 2006, 34(6): 7-10.
Hu Yibao, Di Qinfeng, Zou Haiyang, et al. Drill-string dynamics and control technologies and new progress[J]. *Petroleum Engineering*, 2006, 34(6): 7-10. (in Chinese)



第一作者简介:祝效华,男,1978年7月生,博士、教授。主要研究方向为管柱力学与井下工具。曾发表《3D mechanical modeling of soil orthogonal cutting under a single reamer cutter based on Drucker-Prager criterion》(《Tunnelling and Underground Space Technology》2014, Vol. 41)等论文。

E-mail: zxhth113@163.com