

射流泵系统在非开挖 HDD 中的应用研究

朱俊毅^{1,2}, 孙平贺^{1,2,3}, 曹 函^{1,2,3}, Gerhard Lang⁴, 张绍和^{1,2}, 王靖源^{1,2}

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 3. 美国亚利桑那州立大学, 美国坦佩 85282; 4. 德国海瑞克集团, 德国施瓦瑙 277963)

摘要:非开挖 HDD 技术被广泛应用于给排水、电力、通信、油气等领域的新管道敷设和既有管线修复中。当在浅部地层以及上覆地层应力较小的区域进行 HDD 施工时,易出现“溢浆”现象。本文结合国内外“溢浆”防控技术研究现状,对德国某公司的孔内新型射流泵系统在非开挖工程中的应用进行了论述。该系统利用在近钻头位置安装的高压射流泵系统收集前端钻头扩孔后形成的钻屑,从而减少钻孔环状空间的钻屑含量。系统主要由钻屑收集装置、射流泵体和连接装置 3 部分组成,可实现 98% 左右孔内钻屑的清理。根据工程需要,可采用清孔、软土扩(清)孔、组合以及管道回拉等 4 种模式进行工程作业。工程实践表明,采用该系统后单日最长掘进长度达到 122 m。同时提出了存在的问题:由于小直径复杂地层钻进中易出现钻屑团积,从而对筛格产生堵塞。在管道回拉模式中,如何改变钻屑返排的回路等问题仍是该系统在应用中亟待解决的关键问题。

关键词:水平定向钻进;非开挖;溢浆;射流技术;孔壁稳定

中图分类号:P634.3 **文章标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)10-0011-05

Field Study on Jet Pump System in Horizontal Directional Drilling/ZHU Jun-yi^{1,2}, SUN Ping-he^{1,2,3}, CAO Han^{1,2,3}, Gerhard Lang⁴, ZHANG Shao-he^{1,2}, WANG Jing-yuan^{1,2} (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 3. Arizona State University, Tempe 85282, USA; 4. Herrenknecht AG, Schwanau 277963, Germany)

Abstract: As one method of Trenchless, HDD technology is widely used in new pipeline laying and existing pipeline repair in the fields of water supply and drainage, electric power, communications, oil and gas. The phenomenon of “overflow” is easy to occur when the HDD construction is carried out in the shallow stratum and the area where the stress of the overburden is small. This paper which combines the research status of “overflow” prevention and control technology domestic and foreign areas discusses the application of a new in-hole jet pump system design by a German company in trenchless engineering. The system sets a high-pressure jet pump system installed near the drill bit to collect cuttings formed during reaming process, thereby reducing the number of cuttings in the borehole space. The system is mainly composed of drill cuttings collection device, jet pump and connecting device, which can clean up about 98% of cuttings in the borehole. According to the needs of the project, four modes, such as borehole clearing, soft ground reaming & cleaning, combination and pipe pullback, can be used for pipeline laying. Field practice indicates that the longest drilling length can reach 122m per day associated with the system. At the same time, the existing problem is present in this paper. The screen will be blocked due to the formation of cuttings aggregation in complex formations with small diameter drilling. For the pipe pullback mode, how to change the return loop of cuttings is still the key problem to be solved in the jobsite.

Key words: horizontal directional drilling; trenchless; drilling fluid overflow; jet technology; borehole stability

0 引言

水平定向钻进技术(Horizontal Directional Drilling, HDD)是非开挖中一种被广泛应用于给排水

水、电力、通信、油气等领域的新管道敷设和既有管线修复中的技术。图 1 显示了我国历年 HDD 新增钻机的数量变化情况,说明该技术在我国得到日益

收稿日期:2018-07-31

基金项目:国家自然科学基金项目“微观和宏观下离子稳定剂对煤层气钻孔的化学与力学护壁机理研究”(编号:41602372);国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室开放基金项目“煤层气储层保护离子固结钻井液技术研究”(编号:DET201612);“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室(西南石油大学)资助项目“湘中页岩气孔内原位探测及钻井液关键技术研究”(编号:PLN201609);国家留学基金访问学者项目“智能钻进与非开挖水平定向钻进关键系统集成”(编号:201706375018)

作者简介:朱俊毅,男,汉族,1996 年生,硕士研究生在读,地质工程专业, zhuzhaohui1996@126.com。

通信作者:孙平贺,男,汉族,1982 年生,副教授,硕士生导师,地质工程专业,博士,主要从事深部岩土钻掘及非开挖工程学的教学与科研工作,湖南省长沙市岳麓区麓山南路 932 号中南大学校本部地学楼 100 室, pinghesun@csu.edu.cn。

广泛的应用。在浅部地层以及上覆地层应力较小的区域进行 HDD 施工中,由于孔内钻井液压力的作

用,往往会导致钻井液在上覆地层中发生渗透溢流,形成地表变形和“溢浆”现象,如图 2 所示。

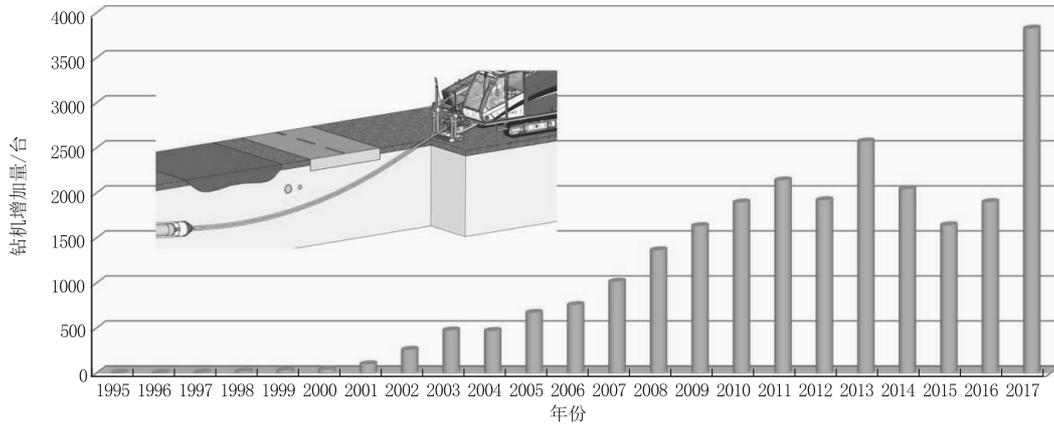


图 1 中国历年 HDD 钻机新增量概况



图 2 非开挖 HDD“溢浆”现象

工程实践表明:孔内钻井液的压力过高是产生“溢浆”现象的主要原因。而钻井液压力的变化主要是由钻屑阻塞钻孔和孔壁变形导致,尤其是在扩孔阶段,扩孔钻头行进过快、钻屑体积过大、孔壁坍塌、由于钻屑侵入钻井液导致钻井液粘度升高等因素都会导致钻井液压力升高。另外,钻井液中含有大量化学物质,大面积的地表“溢浆”还可能会给周围环境带来危害。因此,有效控制施工中的钻井液压力和孔内钻屑含量是减少“溢浆”发生的主要技术手段。

目前,国内外学者主要是从钻井液的配方优化和钻屑固控设备两个方向进行研究。钻井液的配方优化主要是从钻井液的性能优化角度如提高悬浮

力、剪切稀释性能、维持孔壁稳定等对配方体系展开了研究。乌效鸣等研究发现生物聚合物(XC)、聚丙烯酰胺(PAM)等处理剂可以增强基浆的剪切稀释效果,使钻井液具有较好的粘度及较高悬浮钻屑能力,减少孔壁失稳,有效防止地层发生冒浆^[1-3]。Mehran 和 Jayanth 等研究发现往钻井液中加入 TiO₂/PAM 纳米复合材料作为添加剂,并结合了聚合物和表面活性剂在钻进液中的综合作用,有效增加了剪切稀释行为,极大减少了地层侵入和滤饼厚度^[4]。孙平贺等研究发现的 ENI 溶液可以生产复杂材料来填充土壤颗粒之间的空间,以防止流体侵入钻孔,保持钻孔周围的土壤稳定性^[6]。Samuel 等研究发现往钻井液中加入纤维基质可以增强钻孔的稳定性,减少钻井液的逸出^[7]。地表主要依赖钻井液固控设备减少无用固相的含量。T. Geehan 和 Bodil 等研究发现在地表利用直线运动泥浆振动筛和液压驱动离心机对于钻井液中的钻屑进行固化处理,可以有效地减少钻井液无用固相的含量,降低了钻井液对于环境的污染^[8-9]。德国某公司将射流泵系统应用于 HDD 中^[10],极大增强了孔内钻具处理钻屑的能力,减少钻孔环空钻屑堵塞,从而降低“溢浆”现象的发生,本文将结合该系统设计思路、系统组成、工作模式、工程应用及存在的问题等方面展开论述。

1 射流泵系统设计思路

HDD 射流泵系统改变传统依赖钻井液循环排出钻屑的技术方法,利用在近钻头位置安装的高压射流泵收集前端钻头扩孔后形成的钻屑,从而减少

钻孔环状空间的钻屑含量,实现孔内钻屑处理的技术目标,如图 3 所示。孔内高压射流泵系统收集的钻屑将通过后端钻杆传输至地表进行集中处理,减少对环境的破坏。根据上述设计思路,适用于孔内的高压射流泵需具备结构简单和性能稳定的特点,同时能够传递一定的扭矩与推拉力。除此之外,射流泵必须能够产生足够的水压力,从而实现对钻屑的有效吸附收集。

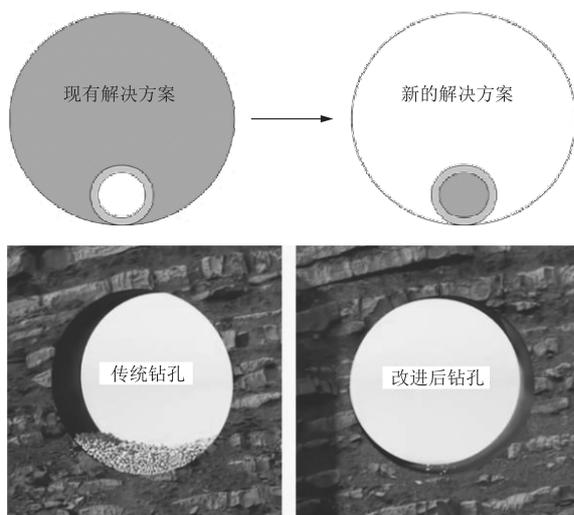


图 3 设计思路效果对比

2 系统组成

射流泵系统主要包括钻屑收集装置、射流泵体和连接装置 3 部分。钻屑收集装置依靠钻杆同钻头相连,前端(近钻头位置)呈圆柱体,有利于维护钻孔的有效直径;后端呈圆台状,如图 4 所示。该装置包括筛格、侧齿、旁齿、护齿等部分,实现对孔壁钻屑的有效收集,其中筛格可过滤最大的钻屑颗粒直径为 38 mm;侧齿和旁齿利用收集器的顺时针旋转,对孔内钻屑产生刮铲作用,使钻屑集中于筛格过滤位置;护齿主要对钻屑收集起到保护作用,维护有效的工作直径,提高收集效率。

射流主泵安装在钻屑收集装置的内部,其中心位置同钻杆中心相一致。在工作过程中,射流泵利用循环流动的钻井液和自身喷射结构可产生一定的吸附力,其吸附原理如图 5 所示。当钻屑经过收集装置中的筛格后,射流泵利用高压射流作用,将钻屑同钻井液一同泵入收集装置后端钻杆中,利用钻井液循环将其返排至地表,实现有效清除孔内钻屑的目标。实验结果对比分析可知,该射流泵系统可实现

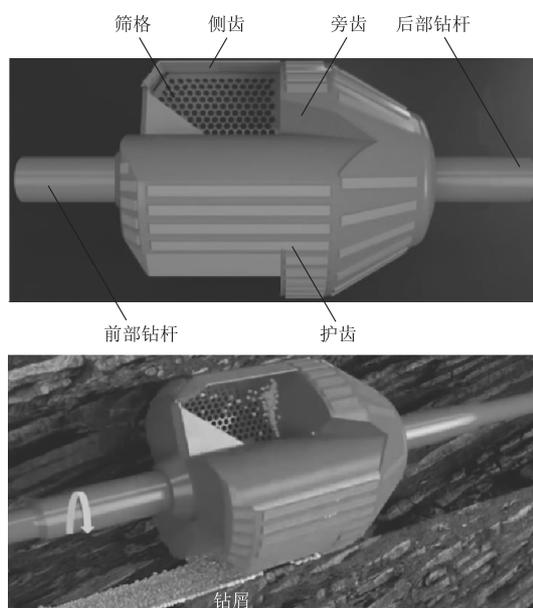


图 4 钻屑收集装置组成和工作原理

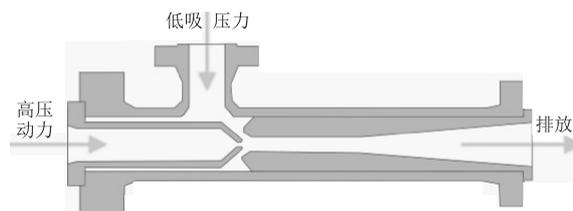


图 5 喷射泵吸附钻屑原理

98%左右钻屑的清理。为了保证钻井液在射流泵中有效循环,入口端钻井液的性能监测是十分必要的,尤其是无用固相含量的测定,可以减少射流泵内淤积堵塞的发生。

同地质勘探取心钻进方式不同的是,在 HDD 的扩孔钻进中,地表钻机施加的是扭矩+回拖力。因此,钻头前进方向同钻杆内钻井液循环流动方向是相反的,这使孔内射流泵系统能够在钻头后端形成有效的钻屑清除作用。而在环状空间中,钻井液呈现双向流动的方式,如图 6 所示。钻井液同环空中残留的钻屑一同返排至钻孔轨迹两端的接收工作坑中,再利用地表抽吸装置实现净化处理。

3 工作模式

HDD 孔内射流泵系统除了上述基本工作模式外,根据实际工程需要,还可以采用清孔、软土扩(清)孔、组合以及管道回拉等 4 种模式进行工程作业。

(1)清孔模式。由于 HDD 钻遇地层多为第四系

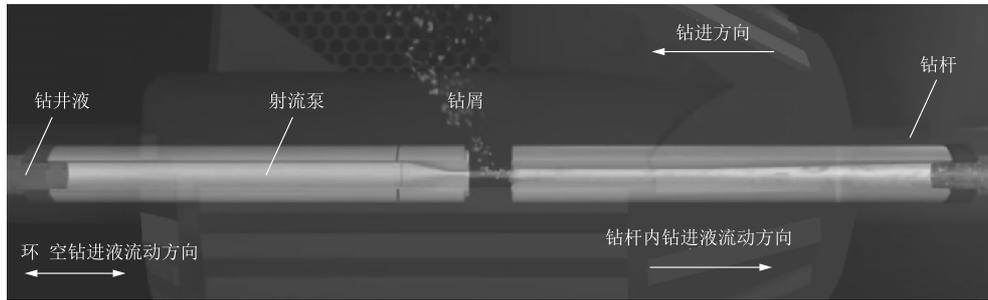


图6 孔内射流泵工作过程

土层,在多级扩孔后,仍会存在缩径、钻屑床厚度大等问题,因此采用孔内射流泵系统可以有效清除钻屑床,维持钻孔的有效直径,减少后续管道敷设中的回拖阻力。相对于传统的桶式扩孔钻头清孔模式,

HDD孔内射流泵可将钻屑有效排出孔外,解决了桶式扩孔钻头单纯挤压保径的问题,其工作原理如图7(a)所示。

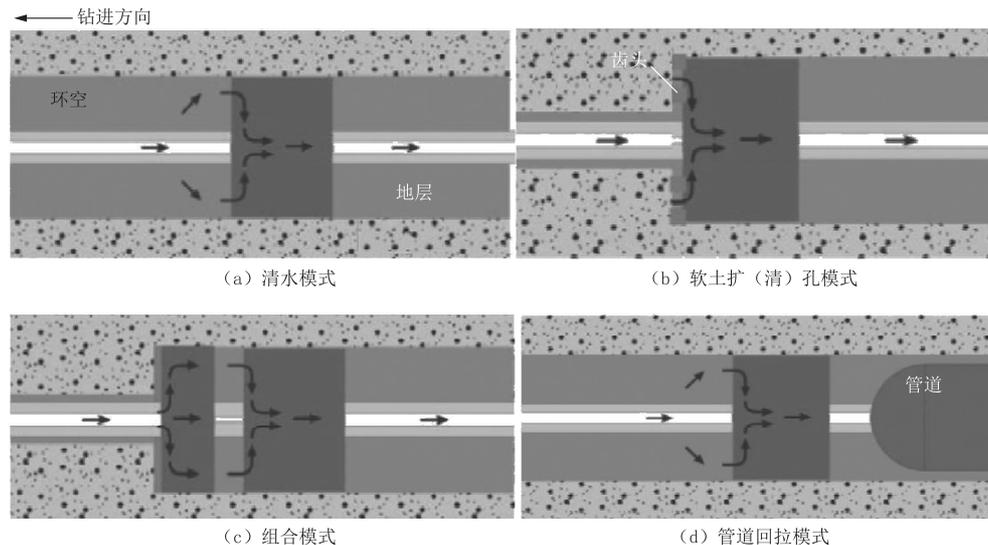


图7 典型工作模式

(2)软土扩(清)孔模式。该工作模式适用于多级扩孔中,在钻屑收集装置的前端唇面安装硬质合金齿头来实现切削扩孔钻进,再利用射流泵和环空钻井液将钻屑排至地表。该模式集成了扩孔和清孔两个过程,可极大提高HDD施工效率和质量,其工作原理如图7(b)所示。

(3)组合模式。该工作模式适用于钻屑含量大的扩、清孔作业,利用二级射流泵系统,进一步清除孔内的钻屑,其工作原理如图7(c)所示。

(4)管道回拉模式。在管道回拉过程中,钻孔内的环状空间急剧减小,对钻屑含量控制提出了更高要求。在敷设管道的前端连接射流泵系统,不仅可以保证有效钻孔直径,同时可有效清除钻屑床,减少管道回拉阻力,提高管道敷设质量,其工作原理如图7(d)所示。

4 工程应用

2016年该公司首次将孔内射流泵系统应用于德国某排水管道非开挖施工中。该管道埋深为4.5 m,管道长度为120 m,采用该公司产生的AVN 700小型掘进成孔设备。该设备采用封闭式全断面掘进工艺,设有液压泥水环路,配备与具体地质条件相匹配的刀盘挖掘钻遇地层。对于软质土壤或混合地质状况,可使用标准或混合地质刀盘式钻头;对于稳定围岩的隧道掘进,则使用配有滚刀的硬岩刀盘式钻头,如图8所示。

为了防止地层中的粘土和粉土堵塞刀盘,将高、中压射流泵系统同3号AVN 700掘进机头相结合,高压射流系统将开挖仓内的粘砂土或粘土剥离,从而避免粘结;中压射流系统使用标准泥水管道口。



图 8 成孔设备

通过改变喷嘴大小,可以调整悬浮压力,优化渣土流动。同时还应用了一种摄像系统,安装在开挖仓内,供地表操作员观察机器内部的磨损情况和实际状况。工程应用表明,采用了射流泵系统后,极大减少了钻孔内钻屑含量,有效提高了顶进施工效率,单日最长掘进深度达到 122 m,如表 1 所示。

表 1 施工效果

施工程序	掘进机	每分钟掘进长度/mm		每日最佳掘进长度/m
		平均值	最大值	
先导孔	1 号	600	1200	99
	2 号	800	1200	107
	3 号	800	1200	126
下套管	1 号	1050	1200	107
	2 号	960	1200	134
	3 号	950	1200	266

5 结论

本文对德国某公司的孔内新型射流泵系统在非开挖工程中的应用进行了论述,主要结论如下。

(1)孔内钻井液的压力过高是产生溢浆现象的主要原因。钻井液压力的变化主要是由钻屑的局部阻塞和孔壁的变形导致,尤其是在扩孔阶段,扩孔钻头行进过快、钻屑体积过大、孔壁坍塌、由于钻屑侵入导致钻井液粘度升高等因素都可以导致钻井液压力升高。减少孔内钻屑含量是实际施工中应关注的

重点。

(2)利用在近钻头位置安装的高压射流泵系统收集前端钻头扩孔后形成的钻屑,从而减少钻孔环状空间的钻屑含量。该系统主要包括钻屑收集装置、射流泵体和连接装置 3 部分,实验表明,该系统可实现 98%左右孔内钻屑的清理。

(3)孔内射流泵系统根据实际工程需要,可采用清孔、软土扩(清)孔、组合以及管道回拉等 4 种模式进行工程作业。工程实践表明,采用该系统后单日最长掘进深度达到 122 m。

(4)由于小直径复杂地层钻进中易出现钻屑堆积,从而对筛格产生堵塞。同时,在管道回拉模式中,如何改变钻屑返排的回路等问题仍是该系统在应用中亟待解决的关键问题。

参考文献:

- [1] 刘远亮,乌效鸣,吕泽彬.大型穿越钻进工程防冒浆钻井液技术[J].煤田地质与勘探,2009,37(2):79-80.
- [2] 朱金勇,董洪栋,陈礼仪.淤泥质粘土层非开挖定向钻进高分子植物胶冲洗液研究[J].科学技术与工程,2016,30(16):187-190.
- [3] 郎明春,叶文建,张杰,等.适用于中粗砂岩地层水平定向钻进的泥浆方案设计[J].地质科技情报,2016,35(2):20-22.
- [4] Sadeghalvaad M, Sabbaghi S. The effect of the TiO₂/polyacrylamide nanocomposite on water-based drilling fluid properties[J]. Powder Technology, 2015, 272: 113-119.
- [5] Srivatsa J T, Ziaya M B. An experimental investigation on use of nanoparticles as fluid loss additives in a surfactant-polymer based drilling fluids[C]// International Petroleum Technology Conference, 2011: 15-17.
- [6] Sun P, Tian M, Cao H, et al. Study on the mechanism of ENI action on preventing drilling fluid overflowing in HDD[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77: 94-102.
- [7] Ariaratnam S T, Lueke J S, Anderson E. Reducing risks in unfavorable ground conditions during horizontal directional drilling[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2004, 9(3): 164-169.
- [8] Geehan T, Forbes D M, Moore D J. Control of Chemical Usage in Drilling Fluid Formulations to Minimize Discharge to the Environment[C]// SPE Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production Conference. Society of Petroleum Engineers, 1991, SPE23374: 475-481.
- [9] Aase B, Omland T H, Jensen E K, et al. Criticality Testing of Drilling-Fluid Solids-Control Equipment[J]. SPE Drilling & Completion, 2013, 28(2): 148-157.
- [10] Society of Petroleum Engineers. New jet pump technology for long-distance pipe jacking and HDD crossings in highly permeable soil [C]// North American Society for Trenchless Technology, 2018, TM2-T4-02: 1-19.