

复杂地层下土压平衡盾构施工技术研究

文 / 夏莹 中国水利水电第七工程局有限公司

摘要: 这篇论文旨在探讨复杂地层条件下土压平衡盾构 (Earth Pressure Balance Shield, EPBS) 施工技术的应用和挑战。复杂地层通常包括混合土壤、软硬不均的岩石以及其他可能影响盾构机稳定性和效率的因素。通过分析土压平衡盾构施工的技术特点、面临的问题以及解决方案,本研究旨在为未来的施工项目提供参考和指导。

关键词: 复杂地层; 土压平衡盾构; 施工建设; 土壤情况

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.02.025

引言

随着城市化进程的加快和基础设施建设的需求增加,盾构技术在解决地下空间问题方面发挥了关键作用。复杂地层施工的挑战主要来自地质条件的多样性和不可预见性,因此,研究如何优化土压平衡盾构技术以适应这些条件具有重要意义。

一、复杂地层的定义和分类

(一) 地质构造的复杂性

复杂地层的概念在地下工程和隧道施工中具有重要意义。地质构造的复杂性指的是地下地质条件的不均匀性和多样性,这种复杂性是由不同的地质单元、地质作用、应力状态和水文条件共同决定的。在复杂地层中,地质构造的变化频繁且不可预测,可能包括松散土壤与硬质岩石的交替出现、地下水的渗透、软硬交界面、断层带、褶皱带等。这些地质现象的存在给土压平衡盾构施工带来了巨大的技术挑战^[1]。

复杂地层的形成原因多种多样,通常与地质历史、构造运动、沉积环境和地下水活动有关。例如,构造运动可能导致地层的弯曲和断裂,形成断层带和褶皱带;地下水的长期渗透可能导致岩石的风化和溶蚀,形成富水层和溶洞。这些复杂地质条件使得地层的力学性质在空间上具有显著的异质性,增加了盾构施工过程中的不确定性。

(二) 复杂地层的类型

软土层通常由黏性土、淤泥、粉砂等组成,具有低强度、高压缩性和高含水率的特点。在软土层中,盾构施工容易引发土体沉降、盾构机沉陷和盾构机掘进困难等问题。

硬岩层由坚硬的岩石构成,如花岗岩、玄武岩和石灰岩等。硬岩层的高强度和硬度使得盾构机在掘进时面临高扭矩和高磨损的问题。此外,硬岩层中的节理、裂隙和断层也会增加盾构施工的复杂性^[2]。

软硬交替层是指软土层与硬岩层交替出现的地层。在这种地层中,盾构机需要频繁调整掘进参数以适应不同的地质条件。软硬交替层中的地层界面可能导致盾构机推进力的不稳定,甚至可能引发盾构机卡机或偏移的问题。

富水地层通常包含大量的地下水,如砂砾层、含水砂层和溶洞地层等。在富水地层中,地下水的渗透可能引发土体流失、盾构机进水和地下水渗漏等问题,增加施工的难度和风险。

(三) 地质调查和分析

为了有效应对复杂地层带来的挑战,施工前的地质

调查和分析是必不可少的。地质调查的目的是了解地层的组成、结构、力学性质和水文条件,为盾构设计和施工方案的制定提供可靠的数据支持。地质调查通常包括地质勘探、现场测试和实验室分析等多个环节^[3]。

地质勘探是地质调查的第一步,通常包括钻探取样、地震勘探和地质雷达等方法。通过钻探取样,可以获取地层的岩心样本,并进行实验室测试以确定地层的力学性质和水文条件。地震勘探和地质雷达则可以提供地下地层的三维结构信息,有助于识别地层的异常和断裂带。

现场测试通常包括标准贯入试验、静力触探试验和压水试验等。这些测试方法可以直接测量地层的强度、变形特性和渗透性,为盾构机的设计和施工参数提供参考依据。

实验室分析包括土工试验、岩石试验和水文试验等。通过实验室分析,可以精确确定地层的物理性质、力学参数和水文特性。这些数据对于复杂地层下土压平衡盾构施工的设计和优化具有重要意义。

二、土压平衡盾构施工技术的基本原理

(一) 技术原理概述

土压平衡盾构 (EPBS) 施工技术是一种常用的隧道掘进技术,特别适用于软弱和易坍塌的地层。EPBS的基本原理是通过控制盾构机前方的土仓压力,使其与地层压力平衡,从而保持隧道掘进的稳定性,防止隧道面前的土体坍塌或地下水涌入。盾构机在掘进过程中,切削头将前方的土体切削下来,这些切削下来的土体进入土仓,在土仓中被搅拌和混合,形成均匀的土膏。这种土膏既可以支撑掘进面,又可以通过控制螺旋输送机的排土量来调节土仓压力。

在EPBS技术中,土仓的压力是一个关键参数,它直接影响隧道掘进的稳定性。过高的土仓压力可能导致盾构机推进困难和设备损坏,而过低的土仓压力则可能导致掘进面失稳和地层坍塌。因此,土仓压力的控制必须根据地层的力学性质和水文条件进行精确调节。

(二) 盾构机的主要结构

盾壳是盾构机的外部结构,起到保护内部设备和承受地层压力的作用。盾壳通常由高强度钢材制成,具有较高的抗压强度和耐久性。

切削头是盾构机的前端部件,用于切削前方的地层。切削头上安装有多个切削刀具,可以根据地层的不同性质调整刀具的类型和布置。切削头的设计对于盾构机的掘进效率和设备磨损具有重要影响。

土仓是盾构机内部用于存储和混合土体的空间。在土仓中，切削下来的土体与水、泡沫等调节剂混合，形成适合支撑掘进面的土膏。土仓的压力由螺旋输送机控制，确保土膏的流动性和支撑性^[4]。

螺旋输送机位于土仓的后端，用于排出土膏。通过调节螺旋输送机的转速和排土量，可以控制土仓的压力，从而实现土压平衡。

支撑系统包括盾构机后部的管片安装系统和推进系统。管片安装系统用于在掘进过程中安装隧道的内衬管片，形成隧道结构。推进系统通过液压千斤顶将盾构机向前推进，使掘进过程连续进行^[5]。

(三) 操作控制系统

现代土压平衡盾构机配备了先进的操作控制系统，可以实时监测和调节盾构机的各项参数。操作控制系统通常包括以下几个子系统：

监测系统包括传感器、数据采集器和监控软件，用于实时监测盾构机的掘进参数，如推进力、扭矩、土仓压力、螺旋输送机转速等。监测系统的数

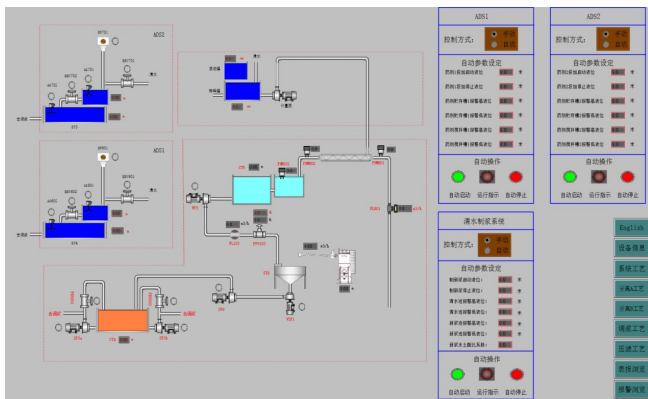


图1 盾构操作控制系统

据实时调整盾构机的操作参数。例如，控制系统可以根据地层的硬度和水文条件自动调节土仓压力和螺旋输送机转速，确保掘进过程的稳定性和安全性。

一些现代盾构机还配备了远程操作系统，允许操作人员在安全距离内远程控制盾构机的掘进过程。远程操作系统不仅提高了操作的安全性，还可以减少操作人员的工作强度。

三、复杂地层下土压平衡盾构施工的挑战

(一) 土体的非均质性

复杂地层的一个显著特点是土体的非均质性，即土体的物理和力学性质在空间上的变化。这种变化可能是由于地质成因的不同导致的，如沉积环境变化、构造运动引起的地层变形等。土体的非均质性会对土压平衡盾构机的掘进产生显著影响。不同土层的强度和硬度不同，盾构机在掘进过程中可能会遇到推进力和扭矩的突变。这些突变不仅增加了盾构机的操作难度，还可能引发设备的磨损和损坏，甚至导致盾构机卡机或偏移。

(二) 地下水的影响

复杂地层中常常存在地下水，这些地下水会通过岩

石的裂隙、砂土层的孔隙等路径渗透到隧道中。地下水的存在会影响土体的力学性质，如降低土体的抗剪强度、增加土体的流动性等，从而对盾构施工造成影响。特别是在富水砂层或溶洞地层中，地下水的渗流可能导致隧道掘进面前土体的流失，形成空洞和流沙现象。这不仅增加了盾构机的掘进难度，还可能引发隧道掘进面的失稳和塌方。

地下水的涌入还可能导致土仓压力的不稳定，使得土压平衡难以维持。如果土仓压力过低，地下水可能会渗入土仓，影响土膏的性能；如果土仓压力过高，则可能导致地表隆起和隧道周边建筑物的破坏。因此，地下水的控制是复杂地层下土压平衡盾构施工的一个关键问题。

(三) 环境因素的影响

在复杂地层中，环境因素对盾构施工的影响也不容忽视。例如，某些地层可能含有有害气体，如甲烷、硫化氢等，这些气体不仅对施工人员的健康构成威胁，还可能引发爆炸和火灾等安全事故。某些地层中的化学物质，如硫酸盐和氯离子等，可能对盾构机的金属部件造成腐蚀，缩短设备的使用寿命。

复杂地层中的高应力状态也可能引发隧道掘进面前的地层破坏和失稳。在高应力条件下，盾构机推进可能引起地层的松动和裂隙的扩展，从而增加施工难度。此外，地震、地面沉降等环境因素也可能对盾构施工造成不利影响，需要在施工过程中进行监测和预防。

四、解决方案和技术优化

(一) 先进的土压控制技术

为了应对复杂地层的非均质性和地下水的影响，现代土压平衡盾构机引入了先进的土压控制技术。这些技术包括自动化土仓压力调节系统、智能土压控制算法和实时监测系统。自动化土仓压力调节系统可以根据地层变化和监测数据实时调整土仓压力，确保盾构机在掘进过程中的稳定性。智能土压控制算法则利用人工智能技术，通过历史数据和实时监测数据的分析，预测地层变化趋势，并自动调整盾构机的操作参数。

这些先进的土压控制技术不仅提高了盾构机的适应性，还减少了操作人员的工作负担和人为错误的风险。此外，通过优化土压控制，可以减少盾构机在复杂地层中的磨损和故障，延长设备的使用寿命，降低维护成本。

(二) 双层盾构设计

在极端复杂地层中，如软硬交替层和高水压条件下，双层盾构设计可以提供额外的支持和保护。双层盾构机由内外两层盾壳组成，内层盾壳用于承受隧道掘进时的地层压力，而外层盾壳则用于防止地下水的渗入和保护内层盾壳不受化学腐蚀。双层盾构设计具有更高的结构强度和适应性，可以有效应对复杂地层中的各种挑战。

双层盾构设计还可以配合使用多种辅助措施，如注浆加固、冻结法等，以提高地层的稳定性和盾构机的掘进效率。通过在盾构机前方和周边注入加固浆液，可以改善地层的力学性质，减少地层的变形和塌陷风险。

(三) 地质预测与预报技术

在复杂地层下，地质预测与预报技术是盾构施工的关键环节。通过安装在盾构机上的传感器和地质预报系

统,可以实时监测掘进过程中的地层变化。这些传感器可以测量地层的应力、变形、震动和水文条件等参数,提供实时的地质信息。

地质预报系统利用这些数据进行分析和建模,预测前方地层的变化趋势和可能出现的问题。通过提前识别地层的异常和危险区域,操作人员可以采取预防措施,如调整盾构机的掘进参数、加固地层和排水等,以减少施工风险和掘进效率。

五、土压平衡盾构施工技术的应用实例

(一) 城市地下工程中的应用

土压平衡盾构技术在城市地下工程中得到了广泛应用,如地铁隧道、地下综合管廊和城市排水隧道等。在城市地下工程中,盾构施工需要考虑周边建筑物的保护和地面沉降的控制。土压平衡盾构技术能够在掘进过程中保持地层的稳定,减少对周边环境的影响,确保施工的安全性和质量。

例如,在某些城市地铁工程中,土压平衡盾构机成功穿越了地下水丰富的软土层和密集的城市建筑群,实现了高效和低影响的隧道掘进。这些工程的成功经验为其他城市地下工程提供了重要参考。

(二) 长距离隧道工程

在长距离隧道工程中,土压平衡盾构机的耐久性和效率显得尤为重要。长距离隧道通常穿越多种地质条件,需要盾构机具有良好的适应性和连续掘进能力。通过合理的设计和维护,土压平衡盾构机可以在长距离隧道中实现高效的掘进,减少停工和维护时间。

在某些水利工程和输电隧道工程中,土压平衡盾构机成功穿越了多个复杂地层,实现了长距离和高速度的掘进。这些工程的成功展示了土压平衡盾构技术在长距离隧道施工中的优势和潜力。

(三) 高水压条件下的应用

在高水压条件下,土压平衡盾构技术能够有效防止地下水的渗入,确保施工环境的稳定。高水压地层中的地下水具有较高的渗透力,可能导致隧道掘进面的失稳和土体流失。土压平衡盾构机通过精确控制土仓压力,能够在高水压条件下维持土压平衡,防止地下水的涌入和地层的塌陷。

在一些海底隧道和过江隧道工程中,土压平衡盾构机成功应对了高水压和富水砂层的挑战,实现了安全和高效率的隧道掘进。这些工程的成功经验为其他高水压条件下的隧道施工提供了重要借鉴。

(四) 土压保持盾构工艺参数设计分析

1. 工程概况

某城市地铁项目施工时,其盾构开挖穿越施工发现:该地域土层以粉质黏土为主。穿越施工的地质结构共有8层,粉质土有3层、粉土有2层、粉质黏土有2层、黏土有1层。其中,粉质黏土具有较强的压缩性,地质表现欠佳。从区域盾构的起点开始,共取90环的数据,开展施工分析。该项目使用的盾构设备,具体参数见表1。

2. 顶推参数

在掘进施工期间,盾构设备顶推参数设计时,需在掘进长度的增大时,适当调高参数大小。盾构机在初始点的顶推力参数最小,此时参数设计在4000至6500kN以

表1 盾构设备参数

盾构设备	具体参数	盾构设备	具体参数
刀盘直径/mm	6420	前盾直径/mm	6390
中盾直径/mm	6380	盾尾直径/mm	6370
刀盘开口率/%	26	滚刀开口率/%	29
圆筒内径/m	0.8	螺距/m	0.63

内。盾构设备处于较深位置的掘进施工中,其顶推参数最大,处于8000至1.2万kN以内。

3. 刀盘参数

(1) 在盾构设备反馈运行数据时,刀盘运转速度参数,应达到0.1位,(单位mm/min)。在掘进施工期间,盾构设备内添加的刀盘,在掘进长度增大时,刀盘运转速度的变化量不大。盾构设备在初始点位置时,刀盘运转速度参数为最小值,此时参数在1.1~1.4r/min之间。在掘进期间,刀盘转速为1.5r/min。

(2) 掘进期间,掘进长度增加时,刀盘扭矩参数逐渐增大。在初始点时,刀盘扭矩参数取最小值,处于300至6001500kN·m之间。掘进中刀盘扭矩参数较高,主要分布在900至1500kN·m以内。

六、未来发展趋势

未来,土压平衡盾构技术将朝着智能化和自动化的方向发展。智能盾构机将配备更加先进的传感器和人工智能系统,能够自主识别地层变化并进行适应性调整。这将进一步提高施工效率和安全性,减少人为错误和操作失误。

智能盾构技术的发展还将推动数据驱动的施工管理和决策支持系统的应用。通过实时数据的分析和建模,施工管理人员可以对盾构机的状态和地层情况进行全面监控和预测,从而优化施工方案和资源配置。

总结

综上所述,在复杂地层下,土压平衡盾构施工技术面临诸多挑战,但通过不断的技术创新和优化,已经能够较好地应对这些挑战。未来,随着智能化和自动化技术的发展,土压平衡盾构施工技术将在更多复杂地质条件下发挥更大的作用。通过对复杂地层的深入研究和施工技术的持续改进,可以进一步提高施工的安全性、效率和环境友好性。

参考文献

- [1] 蒋亚龙, 黄玉龙, 余金, 等. 基于压力传递特性的富水砂层土压平衡盾构渣土改良试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(08): 227-233.
- [2] 张海彬, 张博, 卢杨艺, 等. 超大直径泥水平衡盾构气垫仓吸口改造技术研究[J]. 市政技术, 2024, 42(08): 183-190.
- [3] 杨有平. 大埋深复杂地层土压平衡盾构机盾尾脱困技术研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(16): 89-91+127.
- [4] 陈勇. 浅覆土粉砂性承压水层中大直径泥水盾构穿越河堤沉降特征及施工数据分析[J]. 建筑科技, 2024, 8(07): 26-30+35.
- [5] 张迎旭, 许斌斌. 大直径泥水平衡盾构水下穿越破碎带地层关键施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(15): 42-46.