

复杂地质条件下快速掘进设备的选择与应用

张子学

山西朔州平鲁区龙矿大恒煤业有限公司 山西 朔州 036800

摘要：复杂地质条件下，巷道掘进面临岩层破碎、高应力、涌水等难题，快速掘进设备的合理选择与应用是保障施工安全高效的关键。通过分析悬臂式掘进机、盾构机、连续采煤机等设备类型，结合其高效性、自动化与智能化、多功能性特点，明确地质条件适配性、技术经济性、安全性等选择原则。提出施工前勘察优化、施工中动态监测、设备维护与人员培训等应用策略，为复杂地质掘进工程提供科学依据与实践指导。

关键词：复杂地质条件；快速掘进设备；选择；应用

引言

随着地下工程建设规模不断扩大，复杂地质条件下的巷道掘进需求日益增加。岩层赋存状态多变、水文地质条件复杂等问题，对掘进设备的适应性、可靠性提出更高要求。合理选择并科学应用快速掘进设备，不仅关系到工程进度与成本控制，更是保障施工人员安全的重要前提。本文围绕复杂地质条件下快速掘进设备，深入探讨其类型特点、选择原则与应用策略，旨在为提升复杂地质掘进技术水平提供理论与实践参考。

1 复杂地质条件概述

复杂地质条件涵盖多种具有特殊工程地质特性与力学行为的地质环境，其形成受内、外动力地质作用共同塑造，呈现出地质结构复杂、岩土工程性质变异大等显著特征。在构造运动强烈区域，地层经历长期挤压、褶皱与断裂，形成复杂的地质构造格局，如断层破碎带、节理裂隙密集区，这些区域岩体完整性差、强度低，常伴随地下水富集现象。断层不仅改变地层连续性，还可能导致上下盘地层岩性突变，影响工程基础的稳定性与承载能力，破碎带内松散的岩块与充填物，在动荷载或地下水作用下易发生滑移变形。岩溶发育地区是复杂地质条件的典型代表，可溶性碳酸盐岩经长期溶蚀作用，形成溶洞、溶沟、暗河等复杂的地下空间形态。这些岩溶形态分布无规律，大小差异悬殊，小至毫米级溶孔，大到数十米高的溶洞，对地面工程建设危害极大。在工程开挖过程中，未探明的溶洞可能引发突水、坍塌事故，影响施工安全与进度；暗河改道还可能导致区域水文地质条件突变，威胁周边建筑物地基稳定。深厚软土地区同样面临严峻的地质挑战，软土具有高含水量、高压缩性、低强度、低渗透性等不良工程特性。软土层在自重与外荷载作用下，会产生持续的沉降与蠕变变形，沉降周期长且难以预测。软土的流变性使

得基坑开挖时极易出现边坡失稳、基底隆起等问题，对地基处理与基础设计提出极高要求。膨胀土地区则因土中蒙脱石等亲水性矿物含量高，遇水膨胀、失水收缩，反复胀缩循环导致土体结构破坏，引发建筑物开裂、道路翻浆等工程病害，其变形破坏具有反复性与滞后性特点，进一步增加了工程防治难度。这些复杂地质条件相互交织，给各类工程建设带来诸多技术难题与安全风险。

2 快速掘进设备类型及特点

2.1 类型

2.1.1 悬臂式掘进机

悬臂式掘进机以可回转悬臂工作机构为核心，通过截割头旋转破岩、装载机构收集物料，经刮板输送机和带式输送机完成运输。其截割头可上下、左右摆动，能灵活适应不同形状和尺寸的巷道断面，对地质条件适应性强，可在煤巷、半煤岩巷及软岩巷道作业。液压驱动系统赋予其精准的截割控制能力，通过调节截割头转速和推进速度，可有效控制截割效率与能耗，广泛应用于中小型矿山及隧道工程掘进作业。

2.1.2 盾构机

盾构机是集开挖、支护、出渣、衬砌于一体的大型隧道掘进装备，采用圆形刀盘旋转切削土体，同时通过盾壳对开挖面进行支护，防止土体坍塌。其内部设有螺旋输送机或泥浆循环系统，将切削下来的渣土排出。盾构机在隧道掘进过程中同步进行管片拼装，形成永久性衬砌结构，实现掘进与支护的连续作业。该设备适用于城市地铁、大型输水隧道等长距离、大直径隧道工程，能在复杂地质条件如软土地层、砂卵石地层中稳定掘进^[1]。

2.1.3 连续采煤机

连续采煤机以滚筒式截割机构为主要破岩部件，通过多个截齿旋转破碎煤体，破碎后的煤块经装载机构和输送机运出。该设备通常与梭车、转载破碎机等配套使

用,形成连续开采系统。连续采煤机具有机动性强、截割效率高的特点,可在短壁开采、房柱式开采等采煤工艺中高效作业,尤其适用于开采较薄煤层和边角煤,能有效提高煤炭资源回收率,降低开采成本。

2.2 特点

2.2.1 高效性

快速掘进设备凭借强大的动力系统和先进的破岩技术,显著提升掘进效率。悬臂式掘进机的高速截割头和连续输送系统,实现了破岩、装载、运输的连续作业;盾构机通过大功率刀盘和自动化排渣系统,在长距离隧道掘进中保持稳定的推进速度;连续采煤机与配套设备协同作业,可实现煤炭的高效开采。这些设备相比传统掘进方式,大幅缩短了掘进周期,减少了作业时间,为工程进度提供有力保障^[2]。

2.2.2 自动化与智能化

现代快速掘进设备广泛应用传感器、计算机控制和自动驾驶等技术,实现设备运行状态实时监测与智能调控。悬臂式掘进机可通过传感器感知截割阻力,自动调整截割参数;盾构机利用导向系统精确控制掘进方向,确保隧道轴线精度;连续采煤机借助自动化控制系统,优化截割路径和开采顺序。自动化与智能化技术的应用,不仅提高了设备作业的精准性和稳定性,还降低了人工操作强度和安全风险。

2.2.3 多功能性

快速掘进设备集成多种功能,满足不同工程需求。悬臂式掘进机具备破碎、装载、运输功能,还可搭载锚杆钻机等设备,实现掘进与支护同步作业;盾构机在完成隧道掘进的同时,能进行管片拼装、注浆加固等工序;连续采煤机除开采煤炭外,还可进行巷道修整和顶板管理。这些多功能特性使设备在复杂工程环境中灵活应对不同工况,提高了设备的通用性和工程适应性。

3 复杂地质条件下快速掘进设备的选择原则

3.1 地质条件适配性原则

复杂地质条件涵盖高应力破碎带、富水软弱地层、岩性突变区域等多种类型,每种地质环境对掘进设备的破岩能力、支护及时性和适应性提出独特要求。在硬岩地层中,掘进设备需配备高功率截割系统与耐磨截齿,以满足高强度破岩需求,例如全断面岩石掘进机(TBM)凭借盘形滚刀的高效破岩机制,可在抗压强度超过200MPa的岩石中实现稳定掘进;而在软弱围岩或富水地层,设备需具备超前支护、快速封闭成环能力,盾构机的管片拼装系统与同步注浆装置能有效控制地层变形,避免塌方风险。针对地质条件多变区域,模块化

设计的掘进设备更具优势,可通过快速更换截割头、支护装置等部件,实现不同工况下的高效切换,降低设备频繁更换带来的时间与经济成本。掘进设备的地质适配性还体现在对地质变化的动态响应能力上,集成地质雷达、超前钻探等探测技术的设备,能够实时感知前方地质状况,提前调整掘进参数,确保施工过程的连续性与稳定性。

3.2 技术经济性原则

技术经济性原则要求在满足施工需求的前提下,实现设备全生命周期成本与施工效率的最佳平衡。设备的初始购置成本并非唯一考量因素,需综合评估设备的能耗水平、维护周期、易损件寿命等长期运营成本。例如,虽然悬臂式掘进机初期投入较低,但在长距离硬岩掘进中,其截割效率低、截齿损耗大的劣势会导致单位进尺成本显著增加;相比之下,TBM虽然一次性投资高,但其连续高效的掘进能力与较低的单位能耗,在千米级隧道工程中展现出更好的经济性。施工效率是影响技术经济性的关键指标,高效掘进设备能够大幅缩短工期,减少人工、场地租赁等附加成本。设备的可靠性与可维修性也至关重要,具备远程诊断功能与标准化零部件的设备,可显著降低停机维修时间与维护成本。技术经济性还体现在设备对施工工艺的适配性上,合理匹配掘进、出渣、支护等环节的设备,构建高效协同的施工系统,能够避免因设备能力不匹配造成的效率瓶颈,进一步提升整体经济效益^[3]。

3.3 安全性原则

复杂地质条件下的掘进施工面临坍塌、涌水、岩爆等多重安全风险,设备的安全性能直接关系到作业人员生命安全与工程成败。掘进设备需具备完善的主动安全防护系统,如防碰撞预警装置、设备运行状态实时监测系统,能够及时发现并规避机械故障与操作风险。在高风险地质区域,设备应具备应急逃生通道、密闭式驾驶舱等被动安全设计,为作业人员提供可靠的生命保障空间。针对不同地质灾害类型,设备需配备相应的防护功能,例如在易发生涌水的地层,掘进设备应集成大功率排水系统与快速止水装置;在岩爆高发地段,设备需加装高强度护盾与冲击能量吸收结构。设备的自动化与智能化水平对施工安全具有重要意义,远程操控、无人化作业等技术的应用,能够减少人员在危险区域的暴露时间,降低事故发生概率。安全性能还体现在设备的可靠性与稳定性上,经过严格工况测试与质量认证的设备,能够有效降低因设备故障引发的安全隐患,为复杂地质条件下的掘进施工筑牢安全防线。

4 复杂地质条件下快速掘进设备的应用策略

4.1 施工前地质勘察与设备优化配置

(1) 借助三维地震勘探、地质雷达及超前钻探等多源探测技术,构建高精度地质模型,详细揭示地层岩性、断层破碎带、地下水赋存状态等关键地质信息。针对不同岩性强度与节理发育特征,运用岩石力学参数测试获取抗压强度、弹性模量等数据,为设备选型提供量化依据。如在富含硬岩地层中,需优先选择具备高扭矩切割头与高强度截齿的掘进设备,确保破岩效率。(2) 综合分析隧道断面尺寸、掘进长度及工期要求,结合设备技术参数进行系统性比选。考量设备的开挖直径适应性、推进力输出范围、出渣系统处理能力等核心指标,通过模拟施工工况验证设备组合方案的可行性。对于大断面隧道,可配置双护盾掘进机配合辅助支护设备,实现高效掘进与安全支护的协同作业。(3) 建立设备性能与地质条件的匹配评估体系,针对复杂地质过渡区域制定渐进式设备改造预案。深入分析不同地质参数对设备运行的影响,精准定位性能短板。通过加装超前注浆加固装置、优化刀具更换系统等方式,增强设备在多变地质条件下的适应性。预留模块化接口便于后期设备功能拓展,确保设备全生命周期内保持良好的掘进效能。

4.2 施工过程中的动态监测与参数调整

(1) 构建多参量实时监测系统,集成TBM掘进参数(刀盘扭矩、推进速度、支护压力)、地质信息(岩性变化、掌子面稳定性)及环境参数(粉尘浓度、有害气体含量)等数据采集模块。利用光纤传感、激光扫描等技术,实现对隧道围岩变形、设备关键部件运行状态的毫米级精度监测,形成多维数据融合的动态数据库。(2) 基于人工智能算法建立施工参数智能决策模型,通过机器学习分析历史施工数据,挖掘地质条件与设备参数的关联规律。当监测数据触发预设阈值时,系统自动生成参数调整方案,如在破碎带区域降低掘进速度、增大支护压力,同步优化刀盘转速与扭矩输出组合,实现设备运行参数的自适应调节。(3) 建立现场技术人员与远程专家协同的会诊机制,运用虚拟现实技术构建施工场景数字孪生体。针对异常工况,通过三维可视化模型快速诊断问题根源,结合地质雷达实时探测结果,动态

调整掘进策略。例如在突水风险区域,立即启动超前预注浆程序,并切换设备排水系统至应急模式,保障施工安全与进度。

4.3 设备维护与人员培训

(1) 制定基于状态监测的预测性维护方案,利用振动分析、油液检测等技术对设备核心部件(主轴承、液压系统、驱动电机)进行健康评估。通过建立劣化趋势模型,预测部件剩余寿命并提前储备备品备件,将计划性维护与故障维修相结合,最大限度减少非生产停机时间。(2) 开发设备全生命周期管理系统,记录设备运行工况、维护历史及故障数据,形成可追溯的维护档案。运用大数据分析挖掘设备故障模式,优化维护周期与作业流程。例如针对刀具磨损规律,制定分段式更换策略,在保证破岩效率的同时降低耗材成本。(3) 开展模拟仿真与实操相结合的人员培训体系,利用虚拟现实技术构建复杂地质施工场景,使操作人员熟悉设备在不同工况下的响应特性。通过建立标准化操作手册与故障应急处置流程,定期组织实操演练与案例复盘,提升人员对设备异常情况的快速处置能力,保障设备持续稳定运行^[4]。

结语

综上所述,复杂地质条件下快速掘进设备的选择与应用需综合考量多方面因素。通过明晰设备类型与特点,遵循科学选择原则,落实施工各阶段应用策略,能够有效提升掘进效率与安全性。然而,随着地质条件复杂性的不断演变,掘进设备技术仍需持续创新。未来研究可进一步聚焦设备智能化升级与适应性优化,推动复杂地质掘进技术迈向更高水平。

参考文献

- [1] 申建伟.复杂地质条件下巷道断面优化及快速掘进工艺研究[J].煤矿现代化,2021,30(3):32-34,37.
- [2] 刘晓强.复杂地质条件下半煤岩巷炮掘快速掘进施工技术研究与应用[J].煤炭新视界,2023(1):103-105.
- [3] 孙磊磊.复杂地质条件巷道快速掘进技术研究[J].矿业装备,2024(2):65-67.
- [4] 宋毓.复杂地质条件巷道快速掘进技术研究[J].当代化工研究,2023(7):122-124.