

复杂地质环境下全断面隧道掘进机快速施工技术

黄枫

深圳高速公路集团数字科技有限公司

摘要:随着我国交通基础设施建设的不断发展,山岭隧道工程日益增多,地质条件也愈加复杂。传统的钻爆法施工效率低、安全风险高,已不能满足现代化隧道工程的建设需求。全断面隧道掘进机(TBM)凭借其高效、安全、环保等优势,在复杂地质条件下的隧道工程中得到广泛应用。本文从设计计算和施工工艺两个角度,重点研究了复杂地质环境下全断面TBM快速施工的关键技术。通过优化TBM掘进参数、提高掌子面稳定性、改进初期支护和二次衬砌设计等措施,突破了复杂地质条件对TBM施工的制约,拓展了TBM的适用范围,为同类工程提供了有益参考。

关键词:复杂地质;全断面隧道掘进机;快速施工;设计优化;施工工艺

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.19.026

引言

山岭隧道工程往往穿越地质条件复杂多变的区域,给隧道施工带来诸多困难和风险。传统的钻爆法施工方式,受地质条件制约严重,施工效率低下,安全事故频发,已难以适应现代化隧道工程的要求。全断面隧道掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)是隧道施工机械化的代表,具有掘进效率高、施工安全可控、对环境扰动小等优点。近年来,随着TBM设备性能的提升和施工工艺的进步,TBM在复杂地质条件下的应用日益广泛。本文以某复杂地质山岭隧道工程为背景,重点研究了恶劣地质环境下全断面TBM快速施工的关键技术,优化了设计计算方法,创新了施工工艺,突破了复杂地质对TBM施工的制约,为类似工程提供借鉴和参考^[1]。

一、复杂地质环境下TBM掘进参数优化

(一)岩体物理力学参数的选取

岩体物理力学参数是TBM掘进参数设计与优化的基础。由于复杂地质环境的非均质性和各向异性,岩体物理力学参数呈现较大的离散性和不确定性,给参数选取带来困难。因此,需要综合运用工程地质勘察、室内岩样试验、现场原位测试等手段,获取全面可靠的岩体物理力学参数。工程地质勘察是参数选取的首要依据,通过收集区域地质资料,分析隧道沿线岩土体类型、地下水状况、地质构造等,初步判断岩体的各向异性程度和强度特征。在此基础上,选取有代表性的岩样进行室内物理力学试验,测定岩石的密度、抗压强度、弹性模量、泊松比、内聚力和内摩擦角等力学参数。对于节理裂隙发育或特殊地质情况,还需开展现场原位测试,如钻孔径迹成像、声波测试等,直接获取岩体的力学参数和完整

性信息。在掌握岩体物理力学参数的代表值和离散范围后,可结合工程经验和类比分析,综合确定适用于TBM掘进参数设计的岩体物理力学参数,为后续设计计算提供可靠依据。

(二)环向主动支护压力计算

环向主动支护压力是TBM掘进过程中,刀盘及支护体系对开挖面施加的支撑压力,是维护开挖面稳定、控制地表沉降的关键参数。在复杂地质条件下,环向支护压力的计算需要综合考虑岩体力学特性、地下水状况、埋深条件等因素。常用的计算方法包括经验公式法、护盾平衡法、限制地表沉降法等。经验公式法根据已建工程的统计资料,建立了环向支护压力与岩体力学参数、埋深等因素的经验关系式,计算简便但适用条件有限。护盾平衡法基于土压平衡原理,通过分析TBM掘进面处土体应力平衡状态,确定支护压力大小,但对于非均质岩体的计算精度欠佳。限制地表沉降法从控制地表变形的角度出发,通过数值模拟等方法分析不同支护压力下的地表沉降值,并结合沉降控制标准反演适宜的支护压力,计算工作量较大。在实际工程中,可结合以上方法并开展参数敏感性分析,确定合理的环向支护压力范围,并在掘进过程中根据监测结果动态优化,以实现开挖面的稳定受控^[2]。

(三)掘进速度与推力的确定

掘进速度和推进是TBM掘进效率的直接体现,但受到地质条件、机械性能等多重因素的制约。在复杂地质环境中,岩体强度和完整性变化大,岩层分布不均,给掘进参数的选择带来挑战。掘进速度主要取决于TBM切削力、刀具布置、岩体强度等。当岩体强度较低时,可适当提高掘进速度,但速度过高可能引起刀具磨损加剧、推进阻力增大等问题。当岩体强度较高时,需降低掘进速度,避免TBM动力不足而引起卡机。推进的大小则受限于TBM推进系统的能力和岩体变形特性。推力过小,难以克服岩体阻力,导致掘进停滞;推力过大,可能引起岩体过度破坏,诱发坍塌、突水突泥等灾害。

(四)掘进效率提升措施

为充分发挥TBM性能,提高复杂地质环境下的掘进效率,还需采取多方面的措施进行优化。一方面要加强地质超前预报,采用超前地质钻探、TSP探测等手段,及时掌握前方地质情况,优化掘进参数,提高应对突发情况的能力。另一方面要强化TBM的检修与维护,定期开展刀具检查更换、润滑系统养护、关键部件检修等,降低设备故障率,为连续高效掘进创造条件。同时,可引入自动化和智能化技术,如自适应推进控制、远程数

据监测等,减少人为因素干扰,提高掘进过程的精细化管理水平。优化施工组织管理也是提升效率的重要手段,合理安排掘进、出渣、管片拼装、后配套等各工序的衔接,最大限度压缩辅助时间,实现施工工序的协同优化,最终达到缩短工期、提高效益的目标。

二、复杂地质环境下掌子面稳定性控制

(一) 掌子面变形破坏机理分析

掌子面是TBM掘进过程中的迎头面,其稳定性直接关系到掘进安全和效率。在复杂地质环境下,掌子面易发生变形破坏,主要机理包括应力卸荷引起的变形、岩体结构面滑移导致的松动、地下水渗流造成的强度软化等。当TBM切削掌子面岩体时,开挖面附近应力集中,超过岩体强度时就会发生变形破坏。由于岩体的非均质性和各向异性,变形破坏通常沿节理、裂隙、软弱夹层等结构面展开。遇到富水地层时,地下水沿结构面渗流,还会引起岩体强度退化,加剧变形破坏。此外,开挖扰动引起的震动也会诱发岩体松动滑移。这些因素的综合作用,导致掌子面产生变形、坍塌、突水突泥等失稳现象,严重时会造成TBM埋机、人员伤亡等重大事故。因此,分析掌子面变形破坏机理,揭示岩体结构特征、地下水状态等因素的影响规律,识别薄弱环节,是控制掌子面稳定性的前提。可借助现场调绘和室内试验,分析岩体结构面的分布特征及其力学性质;通过数值模拟等方法,研究开挖卸荷过程中应力应变演化规律,预测变形破坏模式;综合考虑地下水位、渗流场特性,评估水文地质条件的不利影响。在此基础上,提出有针对性的掌子面稳定性控制措施,并在施工监测过程中动态优化完善,以保障TBM安全高效掘进^[3]。

(二) 掌子面变形监测量测

掌子面变形监测是掌子面稳定性控制的重要手段。通过实时获取掌子面的变形量,可以及时发现异常情况,预警失稳风险,为采取应对措施提供依据。常用的监测量测方法包括激光扫描、泥浆压力监测、位移传感器等。激光扫描技术通过在TBM舱内安装激光扫描仪,获取掌子面三维地貌数据,计算变形量并分析变形模式,监测精度高但成本较大。泥浆压力监测是通过分析掌子面处护盾泥浆压力的变化,间接反映掌子面的受力状态和稳定性,实现方式简单但灵敏度较低。位移传感器法是在掌子面附近布设位移计或收敛计等传感器,直接测量岩体的位移变化,可连续监测但测点布置受限。在实际工程中,宜结合工程地质条件、施工工艺特点等,综合选用多种监测手段,实现掌子面变形的全方位动态监测。监测量测布置上,应重点关注掌子面易发生变形的薄弱部位,如断层破碎带、岩层间软弱夹层、富水区域等,适当加密测点布置,提高监测的针对性和可靠性。监测数据管理上,应及时传输、分析和反馈监测数据,建立完善的数据管理系统和预警机制,根据监测结果优化掌子面支护参数,指导现场施工决策,最大限

度保障掌子面稳定和施工安全。

(三) 超前地质预报与探测

超前地质预报与探测是掌子面稳定性控制的先决条件。在TBM掘进过程中,及时准确地掌握前方地质情况,识别不良地质体和突发地质灾害,是合理制定掌子面支护方案、规避施工风险的关键。常用的超前地质预报方法包括地质雷达法、TSP(Tunnel Seismic Prediction)法和超前钻探法等。地质雷达法是利用高频电磁波在地下传播的反射特性,透视掌子面前方岩土体的物性变化和结构异常,分辨率高但探测深度有限。TSP法是通过在掌子面和周围布置检波器,分析掌子面前方岩体对弹性波的反射和折射特性,推断地质构造和岩性变化,探测距离大但分辨率相对较低。超前钻探法是利用TBM自带的钻机在掌子面前方钻进探孔,获取岩芯和钻孔资料,分析揭示前方地质情况,直观可靠但施工干扰较大。针对复杂地质环境,应综合利用多种超前预报手段,相互补充验证,全面准确地揭示掌子面前方的地质构造、岩性变化、水文条件等,为优化掌子面支护参数、调整施工工艺提供可靠的地质依据。

(四) 超前帷幕注浆加固技术

通过在掌子面前方岩体内注入水泥浆液,充填岩体孔隙和裂隙,增大岩体整体性和强度,同时止水堵源,有效抑制掌子面变形破坏。帷幕注浆加固技术已在国内外诸多复杂地质隧道工程中得到成功应用,施工工艺日趋成熟。具体实施时,首先要根据掌子面前方地质预报结果,判断围岩类型、完整性、渗透性等参数,优选注浆材料配比和注浆参数。一般采用普通水泥浆或微细水泥浆,掺加速凝剂、减水剂等外加剂,对松散破碎围岩可加入水玻璃等固化促进剂。注浆压力、注浆量等参数应与岩体强度、渗透性等匹配,过大可能引起岩体胀裂,过小则达不到加固效果。其次是合理布置注浆钻孔,孔径、孔深、孔距等参数应根据加固范围和岩体特性确定,常采用自外而内、分段注浆的方式,以实现均匀加固。再次是要严格控制注浆工艺,采用自动化注浆设备,实现注浆压力、注浆量、注浆时间等参数的精确控制和实时监测,并做好注浆记录,对照设计要求检验注浆质量。同时,要加强注浆期间的安全管理,做好超前探水探气和通风排水,严防突水突泥和有毒有害气体事故。

三、复杂地质环境下隧道支护结构优化

(一) 初期支护结构受力分析

在TBM掘进过程中,初期支护通常采用管片拼装的方式,但在特别不良地质段还需设置超前小导管、超前大管棚等辅助措施。初期支护结构的受力状态直接决定其支撑效果和稳定性,因此需要开展详细的受力分析。首先是荷载分析,即确定作用在初期支护上的岩土压力大小和分布。除了常规的垂直土压力外,在复杂地质条件下还要考虑偏压荷载、水压荷载、震动荷载等特殊工

况。可采用解析法、数值法等方法，结合现场监测数据综合确定。其次是初期支护自身的受力特性分析，包括衬砌的应力分布、变形模式等。考虑到初期支护材料的非线性特性和不同构件的相互作用，可采用精细化数值模拟方法，分析在不同荷载组合下初期支护的受力演化规律。在此基础之上，结合初期支护的设计强度和变形要求，评估其安全性和适用性，并对薄弱环节进行针对性优化。同时，通过分析初期支护与二次衬砌的相互作用，合理确定两者的荷载分担比例，优化各自的设计参数。

（二）初期支护类型选择及组合优化

复杂地质条件下TBM初期支护的类型选择和组合优化是一项系统工程，需要综合考虑工程地质条件、施工工艺、工期经济等多方面因素。常用的初期支护类型有预制钢筋混凝土管片、钢管片、格栅钢架等，其中预制钢筋混凝土管片应用最为广泛。管片拼装式初期支护具有成型快、封闭性好、抗变形能力强等优点，但在特殊不良地质条件下，仅靠常规管片支撑可能难以满足要求，需要与其他支护措施联合使用。例如在高地应力、大变形地段，可在管片背后设置耐压砂浆或可压缩垫块，缓冲吸收围岩变形。在岩爆地段可在管片内侧增设柔性防护层，抵御岩爆冲击力。在富水、导水断层等地段，可在管片外侧设置止水橡胶条，提高管片的防水性能。在围岩自稳能力极差的破碎泥化地段，还需设置超前小导管、超前大管棚作为辅助支护措施，与管片形成联合支护体系。超前小导管可提高掌子面前方岩体的整体性和抗渗性，而超前大管棚则用于支撑开挖面，防止坍塌。两者的数量、规格、间距等参数需要根据围岩性质和开挖断面大小等因素合理选择。此外，初期支护还要预留变形缝，以适应围岩变形。

（三）二次衬砌结构设计参数确定

二次衬砌作为隧道永久支护结构，其设计对于隧道的长期安全运营至关重要。特别是在复杂地质条件下，衬砌所处受力环境恶劣，变形破坏风险大，对衬砌结构提出了更高要求。设计时需要合理选择衬砌类型，优化确定衬砌的几何参数、配筋参数等。就衬砌类型而言，现浇钢筋混凝土衬砌由于具有较强的整体性和抗变形能力，在复杂地质隧道中得到广泛使用。但在高地应力、大变形地段，钢筋混凝土衬砌容易产生开裂，需要合理设置施工缝和永久缝来缓释应力，必要时还可在衬砌内设置钢支撑，提高其抗变形能力。衬砌的厚度、钢筋配置率等几何参数和配筋参数的选择，需要在衬砌受力分析的基础上，综合考虑隧道功能、使用年限、荷载特点等因素，并满足规范要求。一般情况下，衬砌厚度越大，配筋率越高，抗荷能力和耐久性就越好，但同时工程造价也会增加。因此，要在保证安全和耐久的前提下，合理优化设计参数，以提高投资效益。在确定衬砌

设计参数时，还要开展设计方案的对比论证，并应用数值模拟等手段分析其在不同工况下的受力性能，选择最优方案。同时，考虑到衬砌施工质量对其受力性能的重要影响，还应在设计时提出合理的施工工艺要求，如混凝土浇筑分层厚度、振捣时间等，确保施工质量满足设计要求。

（四）衬砌结构防水排水设计

隧道衬砌结构的防水排水设计在复杂地质环境下尤为重要。一方面，复杂地质隧道往往穿越富水、导水地层，衬砌渗漏风险大；另一方面，衬砌渗漏问题又会恶化围岩稳定性，引发工程质量和安全事故。因此，必须采取有效的防水排水措施，确保衬砌结构的耐久性和安全性。首先是衬砌防水设计，一般采用“预防为主、防治结合”的原则。在高风险渗漏段，应在衬砌外侧铺设防水板、涂刷防水涂料等，提高衬砌自身的防水性能。同时，在衬砌施工缝、变形缝等易漏水部位设置止水带，并在衬砌拱部及边墙开设纵横向排水盲沟，疏导渗漏水。其次是衬砌排水设计，分为基面排水和积水排放两个方面。基面排水主要是在衬砌与初期支护之间铺设透水性材料，引导渗水汇集并排出。积水排放则是通过在仰拱及边墙上开设集水井、泄水孔等，并与横向排水管连通，将积水排出隧道。排水系统的管径、间距等参数需根据渗水量估算和排水能力校核合理确定。对于特别不良地段，还应设置备用排水系统，并预留注浆孔，以便在运营期渗漏时及时处理。同时，排水系统应具有防堵塞能力，并便于检修养护。在排水出口还需设置消力池，避免冲刷破坏。

四、结语

复杂山岭地质给隧道工程施工带来诸多不利影响和安全隐患。全断面TBM作为隧道施工机械化的代表，在复杂地质条件下的应用还面临诸多技术难题。本文通过理论分析、数值模拟和工程实践相结合的方法，重点攻克了复杂地质环境下TBM掘进参数优化、掌子面稳定性控制和隧道支护结构设计等关键技术，形成了一套行之有效的复杂地质全断面TBM快速施工技术体系，拓展了TBM的使用范围，提高了隧道工程建设效率和质量，具有良好的推广应用前景。

参考文献

- [1]熊文杰,刘华,王宝成,等.我国大直径全断面隧道掘进机主驱动密封件研究进展[J/OL].润滑与密封,1-15[2024-04-25].
- [2]余娜.我国全断面隧道掘进机装备实现自主化[N].中国工业报,2024-03-22(005).
- [3]杜立杰,郝洪达,李青蔚,等.基于LSTM神经网络的小转弯隧道TBM掘进轴线偏差预测方法[J/OL].煤炭学报,1-11[2024-04-25].