盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望

林　刚

中国水利水电第七工程局有限公司　四川　成都　610000

摘　要：盾构法作为现代地铁隧道建设的关键技术，在城市轨道交通发展中发挥着不可替代的作用。本文介绍了盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望。盾构法具有安全、快速、环境影响小、适用范围广等特点。技术现状涵盖盾构机类型、掘进控制、衬砌拼装及不同地质应用。展望部分提出，未来盾构法将呈现智能化、绿色化、大型化、多领域融合发展趋势，如智能盾构机可自主掘进，节能减排和环保材料将广泛应用，大型盾构机适应大直径隧道需求，与机器人、3D 打印技术融合将提升施工效率与质量。

关键词：盾构法；修建地铁隧道；技术现状；展望

引言

在城市轨道交通建设蓬勃发展的当下，地铁隧道修建技术不断革新。盾构法凭借其独特优势，成为地铁隧道施工的主流方法之一。它不仅在施工安全、速度、环境影响及适用范围等方面表现卓越，而且在技术发展上持续进步。本文将深入剖析盾构法修建地铁隧道的技术现状，详细阐述盾构机类型、掘进控制、衬砌拼装等关键技术，同时对其未来智能化、绿色化、大型化以及多领域融合等发展趋势展开展望，为地铁隧道建设提供参考。

1 盾构法的主要特点

（1）施工安全方面，盾构法优势显著。盾构机在地下开展掘进作业，施工人员主要在相对安全的地下环境中操作，极大降低了地面施工可能引发的各类安全风险。并且，盾构机的盾体能够对周围土体起到支撑作用，形成稳定的支护结构，有效防止土体坍塌事故的发生，为施工过程提供了可靠的安全保障，确保施工人员和周边环境的安全。（2）施工速度上，盾构法表现出色。盾构机具备连续掘进的能力，其自动化程度较高，在掘进过程中减少了大量人工操作环节，不仅节省了时间，还降低了因人工操作产生的误差。这使得施工效率大幅提高，与传统的明挖法或矿山法相比，盾构法能够明显缩短整个工程的施工周期，加快工程进度。（3）对周围环境的影响，盾构法相对较小。由于施工主要在地下进行，对地面交通的正常运行以及周边建筑物的干扰较小，基本不会影响地面的正常秩序和建筑物的安全稳定。同时，施工过程中产生的噪声、振动等污染程度较低，符合城市对环境保护的要求，有利于减少施工对城市居民生活和生态环境的不利影响[1]。（4）适用范围上，盾构法十分广泛。该工法能够适应各种不同的地质条件，无论是软土、砂层还是岩石等复杂地质，都可以应用。在实际施工中，通过选择合适的不同类型的盾构机，并根据具体地质情况调整施工参数，就能够满足不同地质条件下隧道掘进的需求，为各类隧道工程的建设提供了有效的施工方法。

2 盾构法修建地铁隧道的技术现状

2.1 盾构机类型与技术特点

一是土压平衡盾构机，适用于软土、砂层等地质。其工作原理为调节刀盘转速、推进速度以及螺旋输送机转速，让开挖面土压力和盾构机前方水土压力达成平衡，再借助螺旋输送机排出开挖土料。这种盾构机优势明显，施工安全性高，对地面沉降的控制效果较好，所以在城市地铁建设中被广泛采用，能有效保障施工过程及周边环境的安全稳定，减少因地面沉降带来的各种问题。二是泥水平衡盾构机，主要应用于含水量高、透水性强的地层，像砂砾层、卵石层等。它通过向泥水舱注入泥水，形成泥水压力来平衡开挖面水土压力，防止地下水涌入。之后泥水经泥水分离系统处理，渣土被排出，泥水可循环使用。该盾构机能使开挖面保持稳定，对周围环境影响小，不过设备构造复杂，购置和运营成本相对较高。三是复合式盾构机，它融合了土压平衡和泥水平衡盾构机的特点，能依据不同地质条件切换工作模式。在软土地层作业时采用土压平衡模式，在砂层、卵石层等透水性强的地层则采用泥水平衡模式，这种盾构机适应性强，可应对多种复杂地质，施工效率高。

2.2 掘进控制技术

第一，开挖面稳定控制，它是盾构施工得以顺利开展的关键所在。要实现开挖面稳定，需合理调整盾构机的推进参数，涵盖推进速度、刀盘转速以及土舱压力等，以此确保开挖面的水土压力维持平衡状态。此外，还可通过添加泡沫、聚合物等改良剂对土体进行改良处理，提升土体的流动性与止水性，进而增强开挖面的稳定性，避免出现坍塌等不良状况。第二，方向控制，盾构机在掘进期间必须精确掌控方向，从而保证隧道轴线的精准无误。借助激光导向系统、陀螺仪等先进的测量设备，能够实时对盾构机的姿态和位置进行监测，并将所获取的数据及时反馈给控制系统。控制系统依据这些测量结果，对盾构机的推进油缸压力做出相应调整，最终达成方向的精确控制，确保隧道按照预定路线掘进[2]。第三，推进速度控制。推进速度过快，极有可能引发开挖面不稳定、地面沉降过大等问题；推进速度过慢，则会拖慢施工进度，增加施工成本。因此，需综合考量地质条件、盾构机性能等多方面因素，合理确定推进速度，并且在施工过程中依据实际情况进行动态调整，以保障施工的顺利进行和工程质量的可靠。

2.3 衬砌拼装技术

（1）管片设计，管片作为盾构隧道的主要衬砌结构，其设计质量对隧道使用寿命与安全性起着决定性作用。设计时需综合考量地质条件、隧道埋深、所承受荷载等多种因素，以此合理确定管片的形状、尺寸、强度以及配筋等关键参数。同时，为提升管片的防水性能与耐久性，会选用高性能混凝土和防水材料，确保管片在复杂环境下能长期稳定发挥作用，保障隧道结构安全。（2）管片拼装工艺上，采用错缝拼装方式，这种方式能有效提高隧道的整体稳定性和防水性能。在拼装过程中，借助拼装机将管片精准就位，再通过螺栓连接进行固定。整个过程要严格把控管片的拼装精度，保证管片之间的环向和纵向间隙严格符合设计要求，防止出现错台、漏水等质量问题，从而保证隧道衬砌结构的完整性和稳定性。（3）管片防水技术是盾构隧道施工的关键环节。主要采用密封垫、嵌缝材料等防水措施来阻止地下水渗入隧道内部。密封垫通常选用三元乙丙橡胶等弹性材料，这类材料具备优良的防水性能和耐久性。嵌缝材料则采用聚硫密封胶等，对管片接缝进行细致的密封处理，形成有效的防水屏障，确保隧道内部干燥，保障隧道运营安全。

2.4 不同地质条件下的技术应用

在软土地层中，盾构法施工优势突出，但软土强度低、压缩性高，易引发地面沉降。为此，要严格把控盾构机推进参数，强化开挖面稳定控制，并加强地面沉降监测。同时，运用土体改良技术，提升土体强度与稳定性，保障施工安全与地面建筑安全。砂层、卵石层透水性强，盾构施工时易出现涌水、涌砂状况。泥水平衡盾构机是此类地质条件的首选设备。施工时，需合理调整泥水参数，使泥水压力与开挖面水土压力平衡，防止地下水涌入。此外，要加强泥水处理系统管理，保证泥水质量，实现泥水循环使用，降低施工成本，减少对环境的影响。岩石地层中，盾构机须具备强大破岩能力[3]。通常采用硬岩盾构机，配备盘形滚刀等破岩工具，依靠旋转刀盘切削破碎岩石。施工过程中，要合理控制刀盘转速与推进速度，避免刀具过快磨损，延长刀具使用寿命，降低施工成本。同时，加强出渣管理，确保岩石碎块顺利排出，保证施工连续性，提高施工效率，确保工程按计划推进。

3 盾构法修建地铁隧道技术的展望

3.1 智能化发展趋势

在智能盾构机研发方面，未来盾构机会拥有更高的智能化程度。它将配备多种传感器和智能控制系统，能自动感知所处位置的地质条件，依据地质变化自动调整施工参数，如推进速度、刀盘转速等，还能对设备故障进行自主诊断。借助这些功能，盾构机可实现自主掘进，减少人工干预，同时通过远程监控，工作人员能在控制中心实时掌握盾构机运行状态，及时处理突发情况，大幅提升施工效率与安全性。在施工过程智能监控领域，利用物联网、大数据、人工智能等技术搭建施工过程智能监控系统。该系统能够实时采集盾构机运行参数、施工区域地质条件以及地面沉降等关键数据。通过对这些海量数据的分析和处理，能快速精准地发现施工过程中存在的问题，并及时采取相应解决措施。此外，智能监控系统还可实现施工过程的可视化管理和远程指挥，让管理人员直观了解施工进展，远程下达操作指令，保障施工有序进行。

3.2 绿色化发展趋势

在节能减排技术应用上，盾构机的设计与制造环节是关键。会选用节能型电机，其能有效降低电能消耗，同时运用变频调速技术，根据盾构机实际运行需求灵活调整电机转速，避免能源的无效损耗，从而降低设备整体能耗。施工工艺的优化也不可或缺，通过对施工流程的精心规划与改进，减少不必要的能源使用环节，降低施工过程中的能源消耗。并且，会重视泥水处理，采用泥水分离技术，将泥水中的渣土分离出来，使泥水能够循环使用，大大减少水资源的浪费，提高水资源利

用率[4]。在环保材料使用方面，管片制造和隧道装修过程会优先挑选环保型材料。高性能环保混凝土是常用选择，其生产过程对环境影响小，且在使用过程中能减少有害物质的释放。水性涂料也备受青睐，相较于传统涂料，它能显著降低挥发性有机化合物的排放，减轻对空气的污染。此外，会加强对施工废弃物的管理，对其进行细致分类，将可回收利用的废弃物进行回收处理，实现资源的循环利用，减少垃圾填埋量，降低对土地资源的占用和环境破坏。

3.3 大型化发展趋势

随着城市地铁建设规模持续拓展，对隧道直径与长度的要求愈发严苛，在此情形下，盾构机朝着大型化发展已成为必然走向。由于大直径、长距离隧道施工需求不断攀升，现有盾构机在应对这些复杂工程时逐渐显得力不从心，而大型盾构机凭借其强大性能能够有效满足此类施工要求。它具备更高的施工效率，强大的掘进能力可加快隧道开挖速度，进而缩短整体工期、降低时间成本；从经济性层面分析，在单位长度隧道施工中，大型盾构机的能耗、人力等成本分摊相对较低，能提升工程经济效益。不过，大型盾构机的发展也面临诸多挑战，在设备制造方面，需要攻克大型部件加工精度、结构强度等难题，以此确保盾构机在复杂地质条件下稳定运行；在施工工艺上，要解决大型盾构机在掘进、出土、管片拼装等环节的协同作业问题，保障施工流畅性；对施工人员的操作技能和应急处理能力也提出了更高要求，需加强专业培训，如此才能保障大型盾构机施工的安全与质量，推动城市地铁建设迈向更高水平。

3.4 多领域融合发展趋势

在未来发展进程中，盾构法技术将突破自身传统技术边界，呈现出多领域深度融合的显著趋势，积极与机器人技术、3D 打印技术等其他领域技术紧密结合。机器人技术的融入会为盾构法施工带来全新变革，在隧道内部作业环节，机器人能够承担管片拼装、螺栓紧固等任务。传统人工开展这些作业时，劳动强度大，且施工精度与质量易受人为因素干扰，而机器人凭借精准操作和稳定性能，可严格按照设计要求作业，大幅提升施工效率，保证施工质量的一致性与稳定性，有效减少因人为失误引发的质量问题。3D 打印技术的应用则为隧道构件制造开辟了新路径，借助该技术制造管片等隧道构件，能依据实际工程需求实现个性化定制[5]。由于不同地质条件和隧道设计对管片的形状、尺寸、性能等存在多样化要求，3D 打印技术可灵活满足这些需求，还能实现快速建造，缩短构件生产周期，加快整体施工进度，提高工程建设的时效性，推动盾构法修建地铁隧道技术朝着更高水平、更高效的方向迈进。

结束语

综上所述，盾构法修建地铁隧道技术优势显著、应用广泛，当前在盾构机类型、掘进控制、衬砌拼装及不同地质应用等方面成果斐然。展望未来，智能化、绿色化、大型化以及多领域融合将成为其重要发展方向。这些趋势不仅将提升施工效率与质量，保障施工安全，还将减少对环境的影响，推动资源高效利用。随着技术不断进步，盾构法必将在城市地铁建设中发挥更大作用，助力城市交通事业迈向新高度。

参考文献

[1] 李广铭, 朱明明. 盾构法地铁隧道掘进施工技术应用分析 [J]. 门窗,2025(13):100-102.

[2] 刘锋. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术,2022(3):137-140.

[3] 周双禧, 李志华, 陈非龙, 李雪, 雷珊. 城市轨道交通盾构法隧道施工新技术及应用 [J]. 施工技术,2020,49(19):87-92.

[4] 陈仙东. 地铁隧道盾构法施工安全风险管理研究 [J]. 价值工程,2022,41(4):14-16.

[5] 李韶营. 地铁隧道盾构法施工安全风险巡视管理分析 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术,2022(5):25-27.