

大跨度市政隧道预应力张拉技术应用难点与对策分析

索前野

广东华隧建设集团股份有限公司 广东 广州 51000

【摘要】：大跨度市政隧道工程中，预应力张拉技术因其主动支护优势而应用广泛，但其在复杂城市环境下的有效应用面临显著挑战。本文系统分析了该技术在实际工程中的三大核心难点：复杂地质条件下预应力建立与长期保持困难、大跨度结构导致的预应力分布不均问题，以及城市敏感环境下施工控制精度要求极高。针对这些难点，研究提出了关键技术对策，旨在通过技术创新与精细化管理，提升技术应用的可靠性与安全性，为类似工程提供实践参考。

【关键词】：大跨度隧道；市政隧道；预应力；张拉技术

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.049

引言

随着城市地下空间开发向纵深发展，大跨度市政隧道建设需求日益增长。预应力张拉技术通过主动施加预应力，能有效提升围岩自承能力，控制变形，尤其适用于对沉降控制要求严格的城市场景。然而，隧道跨度的增大、地质条件的多变以及周边环境的复杂性，使得该技术的应用面临诸多前所未有的挑战。深入剖析这些应用难点并探寻有效对策，对保障工程安全、推动技术进步具有紧迫的现实意义。

1 预应力张拉技术的优势

预应力张拉技术在市政隧道工程中展现出显著优势，其核心在于变被动承载为主动加固。该技术在隧道开挖后迅速对围岩施加主动的径向压应力，有效抑制了围岩的松弛变形，从根源上改善了其受力状态，显著提升了隧道整体稳定性。这种主动支护机制能够充分发挥围岩的自承能力，与初期支护结构协同形成深-浅结合的复合承载体系，尤其适用于控制大跨度隧道在软弱地层中常见的拱顶沉降与侧墙收敛问题，有力保障了城市密集区施工的环境安全。相比传统支护，该技术可优化衬砌设计、节约建材、缩短工期，其形成的支护体系还具备良好的柔性与延性，能适应一定的地层变形，使结构受力更为合理，大大增强了隧道长期运营的安全性和耐久性，是一种高效、经济且对城市环境友好的先进支护技术。

2 预应力张拉技术基本原理

预应力张拉技术在市政隧道工程中的基本原理是通过主动建立压应力场来补偿开挖导致的围岩应力损失，其工艺核心是将高强度锚杆（索）植入围岩深处的稳定地层，通过专用设备对其施加精确控制的设计拉力。这个强大的张拉力通过垫板反向作用于隧道周边岩体，在围岩中人为形成一个被挤压密实的环向压缩带，相当于为开挖洞室穿上了“紧身束衣”。这个主动施加的压应力场能够有效抵消隧道周边由于应力重分布而产生的拉应力和剪应力集中，抑制原有裂隙的扩展和新裂缝的生成。通过该技术，松散破碎的岩体被“绑扎”成一个受力整体，其内聚力和内摩擦角等力学参数得到显著提升，使围岩从荷载

的一部分转变为承载结构的一部分，从而在大跨度市政隧道周围形成一个稳定可靠的预应力承载拱，确保洞室的长期稳定与安全。

3 大跨度市政隧道预应力张拉技术应用难点分析

3.1 地质条件复杂性与预应力保持困难

大跨度市政隧道常穿越城市下方复杂多变的地质单元，软弱破碎岩体或富水砂层给预应力张拉技术带来严峻挑战。在此类不良地质中钻孔成孔难度极大，容易出现塌孔、缩径等问题，导致锚杆安装无法到位或注浆体不完整，严重影响预应力的有效建立。更为突出的难点在于预应力的长期保持，在流变性显著的软岩或土体中，岩土的蠕变特性会导致锚杆预应力产生显著损失，使得初始施加的预应力随时间衰减，主动支护效果大打折扣。同时，地下水的存在会软化岩体并对注浆浆液产生冲刷稀释作用，不仅降低了浆体与孔壁的粘结强度，也可能在长期渗透下导致锚固段失效。这些因素共同作用，使得在复杂地层中难以形成设计所要求的深层均匀受压带，支护体系的可靠性和耐久性面临巨大考验。

3.2 大跨度结构效应与预应力分布不均

大跨度隧道开挖后形成的洞室结构高大，其应力重分布的范围和深度远超普通隧道，导致围岩变形机制更为复杂。这为预应力张拉技术的应用带来了独特难点，即如何实现预应力在广阔围岩范围内的合理与均匀分布。若预应力参数设计不当，如锚杆长度不足或预应力值过低，则形成的压缩区可能无法有效连接成整体承载环，仅在锚杆端部形成局部应力集中，无法有效控制隧道拱顶的大范围沉降和两侧边墙的整体内移。相反，若预应力过高，则可能对局部岩体造成过度挤压甚至破坏。此外，大跨度隧道断面形状往往非规则，在拱顶、拱腰、边墙等不同部位，围岩的变形特性和支护需求差异显著，采用统一的预应力布设方案难以满足各区域的差异化要求，极易导致支护结构受力不均，部分区域应力过剩而另一区域支护不足，影响整体稳定性。

3.3 城市环境制约与施工控制精度要求极高

大跨度市政隧道通常位于建筑物密集、地下管线错综复杂的城市核心区，苛刻的环境制约构成了另一大应用难点。预应力张拉施工中的钻孔、张拉作业不可避免地会对周边土体产生扰动，引发附加应力和变形，对紧邻的既有构筑物和地下管线安全构成威胁。因此施工过程中的振动与变形控制标准极为严格，如何在不影响城市正常运转的前提下安全高效地完成预应力施加是一大挑战。同时，城市施工场地通常十分狭小，限制了大型钻机和张拉设备的活动空间与作业效率。施工质量控制环节也面临巨大压力，例如钻孔的垂直度、孔深精度直接影响预应力方向和大小的准确性；多根锚杆张拉的同步性若控制不佳，会使支护体系受力不均。这些因素都对施工机具的性能、施工工艺的精细度和现场监控量测的即时性提出了远高于山岭隧道的要求。

4 应对难点的关键技术对策

4.1 研发应用自适应锚固系统与动态补偿技术

针对复杂地质中预应力建立难、损失大的核心问题，对策在于从材料和系统层面进行创新。研发和应用具有高适应性、强耐久性的锚固系统是首要任务。这包括采用高强度、高韧性的全螺纹精轧钢棒以及带有可重复张拉功能的锚具。在钻孔工艺上，对于极其破碎的岩层，可采用跟管钻进技术，确保成孔质量。更为关键的是发展动态预应力补偿技术。通过在锚杆或锚索上安装液压测力计或光纤传感系统，实现对预应力值的实时、远程、长期监测。当监测数据表明预应力损失超过预设阈值时，系统可自动或由人工指令启动补偿张拉装置，对锚杆进行二次或多次张拉，将预应力恢复至设计值。这种动态补偿机制能够有效抵消因岩体蠕变、荷载变化引起的预应力衰减，确保支护体系在整个施工期乃至运营期始终保持有效的主动支护状态。此外，研发针对富水地层的特种注浆材料，如超细水泥基浆液或化学浆液，其具备良好的渗透性和速凝性，能在有水环境下有效固结破碎岩体，形成可靠的锚固体。

4.2 基于三维数值模拟的预应力精细化设计方法

应对大跨度结构预应力分布不均的挑战，必须摒弃传统经验类比的设计方法，转而采用基于三维数值模拟的精细化设计。在设计阶段，利用专业岩土工程软件建立包含详细地质信息、隧道开挖步骤和支护参数的三维数值模型。通过计算机模拟隧道分步开挖的动态过程，精确分析围岩应力场、位移场的时空演化规律。在此基础上，对预应力张拉技术的各项参数进行大量模拟比选和优化分析，这些参数包括锚杆的长度、倾角、间距、预应力大小、张拉时机和顺序等。模拟可以直观展示不同设计方案下形成的压缩区范围、形状及其与围岩塑性区的相互作用关系。设计师能够据此判断预应力分布是否均匀有效，能否形成完整的承载环，并针对拱顶、拱肩、边墙等关键部位

进行差异化设计。这种基于仿真驱动的设计方法，能够在大规模施工前预见并解决潜在的应力集中或支护不足问题，实现预应力分布从概念到量化的精准控制，为大跨度隧道提供最优的个性化支护方案。

4.3 建立全过程智能监控与信息化施工体系

为满足城市环境下的高精度控制要求，必须建立一套贯穿勘探、施工、运营全过程的智能监控与信息化施工体系。该体系以物联网技术为核心，在隧道内外布设密集的传感器网络，包括全站仪、静力水准仪、光纤应变传感器、锚杆测力计、振动传感器等，对围岩变形、支护结构应力、周边建筑物沉降及施工振动等进行全方位、高频率的自动采集。数据通过无线网络实时传输至中央数据处理平台，平台内置专业分析模型和预警阈值，能够自动生成变形时空曲线、应力云图等可视化图表。一旦某项监测数据接近或超过控制标准，系统立即向管理人员发出分级预警。现场工程师可根据实时数据反馈，动态调整施工参数，如优化开挖进尺、调整支护时机、修正预应力张拉力值等，实现施工过程的精准调控。这套体系将传统的被动式、经验性管理转变为数据驱动、实时反馈的主动式、智能化管理，如同为施工装上了眼睛和大脑，最大限度地降低了对周边环境的影响风险，确保了工程自身和环境的双重安全。

4.4 推广使用智能化与模块化施工装备

施工精度和效率的提升最终依赖于先进装备的支撑，应对狭小场地和高质量要求，需大力推广使用智能化和模块化的大型施工装备。智能化锚杆钻机应具备高精度导航定位和自动调平功能，能够根据设计参数自动计算并控制钻孔的方位角、倾角和深度，保证钻孔精度远超人工作业水平。数控张拉设备可实现多台千斤顶的集群同步作业和力与位移的双重控制，确保一组锚杆中的每根都能被同步、精确地张拉到设计预应力值，有效避免因张拉不同步导致的应力不均。模块化设计使得这些大型设备能够在狭小的隧道空间内灵活拆解、运输和组装，极大提高了施工适应性。此外，研发集钻孔、安装、注浆功能于一体的大型多功能台车，可以显著减少工序转换时间，提高功效，并减少对围岩的反复扰动。通过装备升级，将施工质量从依赖工人手艺转变为由设备性能保障，是实现高精度、高效率、高安全施工的硬实力基础。

4.5 制定基于风险控制的精细化施工管理流程

再好的技术和对策也需要严格的管理流程来落实，必须制定一套基于风险控制的精细化施工管理流程。该流程始于详尽的前期环境调查和风险评估，明确所有敏感保护对象及其控制标准。在此基础上，编制专项施工方案，并对关键工序如钻孔、注浆、张拉等制定标准作业程序，明确每一步骤的技术参数、质量要求和验收标准。实行严格的技术交底和培训制度，确保每位操作和管理人员都清楚理解技术要点和风险点。在施工过

程中，推行班组自检、互检和专职质检员专检的三检制度，对每一根锚杆的成孔质量、安装精度、张拉数据都进行记录并形成可追溯的档案。建立应急预案，对可能出现的险情如涌水、预应力异常损失、周边建筑物报警等，预先制定处置措施。通过这种系统化、标准化、文件化的管理，将技术对策融入日常工作的每一个环节，形成闭环管理，从而确保整个预应力张拉施工过程始终处于受控状态，最终实现安全、优质、高效的工程目标。

4.6 创新注浆工艺与高性能材料研发应用

针对复杂地质条件下注浆效果难以保障的问题，需要从材料和工艺两方面进行创新突破。研发新型高性能注浆材料是基础，重点开发具有自密实、微膨胀、早强等特点的水泥基复合材料，这类材料能够有效填充岩体裂隙，提高锚固体系的整体性。同时，研究纳米改性注浆材料，通过添加纳米级活性材料显著提升浆液的渗透性和与围岩的粘结强度。在工艺创新方

面，推行分段高压注浆技术，根据不同地质区段的特点采用差异化的注浆压力和注浆量，确保浆液在围岩中的均匀扩散。对于富水地层，开发可控性注浆系统，通过实时监测注浆压力和流量，动态调整注浆参数，防止浆液过度流失或对周边环境造成不利影响。这些创新工艺与材料的结合应用，能够显著提升注浆质量，为预应力锚固系统提供可靠的基础保障。

5 结语

预应力张拉技术在大跨度市政隧道中的应用是一项涉及地质、结构、施工及环境的系统工程，面对复杂地质适应性、大跨度结构效应及苛刻环境制约等难点，唯有采取针对性的技术集成与精细化管理策略，方能确保其效能充分发挥。未来，随着智能监测、数字孪生等技术的发展，该技术的精准控制与智能化应用水平将进一步提升，为复杂城市地下工程建设提供更坚实的技术支撑。

参考文献：

- [1] 何山.预应力智能张拉施工技术在桥梁工程中的应用[J].运输经理世界,2024,(35):117-119.
- [2] 李川云.预应力智能张拉施工技术在桥梁工程中的应用要点分析[J].交通科技与管理,2024,5(16):58-60.
- [3] 尹学良.公路桥梁项目预应力智能张拉施工技术的优势与应用[J].四川水泥,2024,(08):186-188.
- [4] 应海峰.公路桥梁预应力智能张拉施工技术的应用分析[J].工程建设与设计,2023,(06):168-170.
- [5] 万晓羿.桥梁工程预应力施工技术应用实例分析[J].四川水泥,2023,(03):194-196.
- [6] 唐灿.预应力智能张拉施工技术在桥梁工程中的应用[J].工程技术研究,2023,8(02):225-227.