

隧道工程开挖防护施工技术研究

陈轩

湖南路桥建设集团有限责任公司

摘要：隧道工程是现代交通运输基础设施建设中重要的组成部分，而开挖过程中的防护施工技术是确保隧道工程安全顺利进行的关键。本论文基于现有的研究和实践经验，对隧道工程开挖防护施工技术进行了综合研究和分析，包括岩体力学特性的评估、开挖方法的选择、支护体系的设计和监测技术等方面。通过对各项技术的研究，可以为隧道工程的开挖防护提供有力的理论和技术支持。

关键词：隧道工程；防护施工技术；岩体力学；支护体系；监测技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.09.045

隧道作为现代交通运输基础设施建设的重要组成部分，在城市化和交通发展的背景下扮演着越来越重要的角色。然而，隧道工程的开挖过程涉及复杂的地质条件和工程技术，其施工过程中存在着各种风险和挑战。因此，为确保隧道工程的安全和可靠性，开挖防护施工技术的研究和应用显得尤为重要。本论文旨在通过对隧道工程开挖防护施工技术的综合研究和分析，提供有效的理论和技术支持，以确保隧道工程在施工过程中能够安全、高效地进行。通过深入了解岩体力学特性、选择合适的开挖方法、设计科学的支护体系以及应用先进的监测技术，土木工程施工企业可以减少工程风险，提高施工质量，从而为隧道工程的可持续发展做出贡献。

一、研究意义

隧道工程的开挖防护施工技术涉及多个学科领域，包括地质工程、岩土工程、结构工程和监测技术等。随着交通运输需求的不断增长和隧道工程规模的扩大，开挖防护施工技术的研究对于确保隧道工程的安全、经济和环境可持续性具有重要意义。

首先，通过对岩体力学特性的评估，土木工程施工单位可以深入了解隧道周围地质条件和岩体性质，为选择合适的开挖方法和支护体系提供依据。其次，科学合理地选择开挖方法对于确保施工过程的顺利进行至关重要。通过研究不同类型隧道的开挖方法，土木工程施工单位可以优化施工工艺，提高施工效率，减少工程风险。此外，支护体系的设计和施工对于隧道工程的稳定性和安全性具有重要影响。通过研究支护体系的设计原则和新型支护技术，土木工程施工单位可以提高工程的抗震性能和承载能力。最后，隧道监测技术的应用可以实时监测工程变形和环境影响，及时采取措施，以确保施工质量和工程安全。

二、目前我国隧道工程开挖防护施工的问题

随着我国交通建设的不断发展，隧道工程的建设规模和数量不断增加。然而，在隧道工程的开挖防护施工

过程中，仍然存在一些问题需要解决。以下是目前我国隧道工程开挖防护施工面临的一些主要问题：

（一）地质条件复杂性

我国地域广大，地质条件多样化。许多隧道工程所处的地质环境存在复杂的构造和地质构件，如断裂带、褶皱带、岩溶地质等。这些地质条件对隧道开挖和支护带来了巨大挑战，如地层不均匀、地应力较大、岩体变形和破坏等。需要通过科学的地质勘察和力学分析，合理评估地质条件，制定相应的施工方案和支护措施。

（二）高地应力和岩体稳定性

部分隧道工程所处地区存在较高的地应力，如高地应力区、深埋区等。高地应力会对岩体稳定性造成影响，增加岩体破坏和崩塌的风险。此外，隧道开挖过程中，地应力的改变还可能引发地应力释放导致岩体松动和变形。因此，需要针对高地应力区域采取合理的开挖方法和支护措施，以确保施工安全。

（三）施工难度和复杂环境

一些隧道工程位于山区、高海拔地区或复杂地下水环境中。这些地区施工条件恶劣，如恶劣天气、陡峭地形、高水压等，给开挖和支护工作带来了极大的困难。施工过程中需要考虑地下水排水、防水处理和防止地面沉降等问题。此外，高寒地区还需要应对冰冻土层的影响。因此，在这些特殊环境下，施工方案和技术需要进行充分的论证和优化。

（四）开挖方法选择与施工速度

一些隧道工程在选择开挖方法时，可能过于追求施工速度，而忽视了岩体的稳定性和支护需求。例如，在软弱地层或岩溶地质条件下，如果选择了不适当的开挖方法，如机械挖掘或爆破，可能会导致地表下沉、岩体塌方等问题。因此，应根据具体地质条件和工程要求，合理选择开挖方法，并结合支护措施进行支护体系设计^[2]。

（五）支护体系设计不足

支护体系是隧道工程中确保施工安全和保证隧道结构稳定性的重要措施。然而，目前一些隧道工程中支护体系的设计不足。一些支护体系设计缺乏充分的科学依据和工程经验，无法满足复杂地质条件下的支护要求。这可能导致支护结构的不稳定性和强度不足。同时，一些隧道工程在支护体系设计上过于依赖传统的支护方法，忽视了个体化设计的重要性。相同的支护方案被应用于不同地质条件和隧道类型，未能充分考虑地质变异和工程要求的差异。此外，随着科学技术的进步，出现了许多新型的支护技术和材料。然而，在一些隧道工程中，新技术的应用还比较有限，未能充分发挥其在提高工程质量和施工效率方面的潜力。

（六）监测技术应用不足

隧道工程的监测技术对于及时掌握工程变形和风险具有重要意义。然而，目前在一些隧道工程中，监测技术的应用还存在许多问题。一些隧道工程的监测只限于表面位移监测，未对地下水位、应力变化等重要参数进行实时监测。这导致对工程整体状况的了解不够全面和准确。此外，目前的监测手段主要包括测量仪器和遥感技术，但在一些特殊条件下，如高地应力区域、复杂地质环境下，现有的监测手段可能无法满足要求，需要进一步研究和改进。同时，监测数据的及时处理和分析对于实时掌握工程状况和预警非常重要。然而，一些隧道工程中的监测数据处理和分析工作存在滞后的情况，无法及时提供准确的工程状态和风险评估。

三、岩体力学特性的评估

岩体力学特性的评估对于隧道工程的设计和施工至关重要。它涉及岩体的强度、变形性能、断裂特性等方面，对于确定合适的支护措施和开挖方法具有重要的指导作用。岩体力学特性的评估是隧道工程设计和施工中不可或缺的一部分。通过岩石强度评估、变形特性评估和断裂特性评估，可以确定岩体的力学特性，为支护设计、开挖方法选择和施工过程中的安全措施提供科学依据。合理的岩体力学特性评估有助于确保隧道工程的稳定性、安全性和可持续发展。以下是岩体力学特性评估的一些详细内容：

（一）岩石强度评估

岩石的强度是指其抵抗外力作用下破坏的能力。强度评估通常包括抗压强度；抗拉强度；抗剪强度；抗折强度。例如抗压强度就是评估岩石在垂直应力作用下的抗压能力，施工人员可以通过岩石样本的试验（如单轴压缩试验、三轴压缩试验）来确定抗压强度。而抗拉强度与抗剪强度则分别是评估岩石在拉伸状态下的抗拉能力与评估岩石在剪切状态下的抗剪能力。常用的试验方法有拉伸试验和剪切试验与直剪试验、剪切强度试验等。这些试验可以获取岩石的强度参数，如抗压强度、抗拉强度、抗剪强度和抗折强度等，从而为设计和施工提供可靠的依据^[3]。

（二）岩石变形特性评估

岩石在受力作用下会发生变形，评估岩石的变形特性对于确定岩体的稳定性和变形行为至关重要。岩石的变形能力包括岩石的弹性变形和塑性变形。岩石的塑性变形能力对于确定岩体的稳定性和开挖围岩的适应性非常重要。可以通过剪切试验和蠕变试验来评估岩石的变形特性，获得岩石的应变硬化模量、塑性指数和蠕变参数等。弹性模量描述了岩石在应力作用下的弹性变形能力，泊松比则表示岩石在受力作用下体积变形和形变产生的关系。可以通过弹性模量试验和剪切试验来评估岩石的弹性模量和泊松比。

（三）断裂特性与评估

岩石在受到应力作用下可能发生断裂，评估岩石的断裂特性有助于了解岩体的破坏机理和断裂模式。断裂韧性评估岩石在受到断裂作用下的能量吸收能力。工程

人员可以通过断裂韧性试验来确定岩石的断裂韧性。断裂模式则是评估岩石的破坏和断裂模式。建筑工程人员可以通过拉伸试验、剪切试验等可以观察和分析岩石的断裂模式，如剪切滑裂、剪切破碎等^[4]。

（四）岩体参数的获取

评估岩体力学特性需要获取岩体参数，这些参数包括弹性模量、抗压强度、抗剪强度、岩石的内摩擦角、凝聚力等。获取岩体参数的方法包括现场观测、实验室试验和现有文献的资料查询。常用的获取岩体参数的方法包括钻孔取样、岩芯试验、直接剪切试验等。

四、开挖方法的选择

在隧道工程中，选择适当的开挖方法对于确保施工效率和工程质量至关重要。开挖方法的选择应考虑到以下几个关键因素：

（一）地质条件

地质条件是选择开挖方法的主要依据之一。地质条件包括岩性、岩体的稳定性、地下水位和地下水压力等。不同的地质条件需要采用不同的开挖方法。例如，对于较强的岩性，可以采用机械爆破或盾构等方法进行开挖；而在地下水丰富的地区，可能需要采取合理的抽水措施，如冻结法或压力隔水法。

（二）工程要求

根据隧道工程的具体要求，如隧道的尺寸、设计荷载和使用功能，选择合适的开挖方法。例如，对于大跨度的隧道，可以考虑采用盾构法；而对于小尺寸的隧道，可以选择传统的钻爆法或机械挖掘法。同时也要考虑施工条件。施工条件包括施工时间、现场空间、环境限制等。根据具体的施工条件，选择适宜的开挖方法。例如，在繁忙的城市区域，可能需要选择低噪音、低振动的非挖掘方法，如盾构法或隧道掘进机（TBM）^[5]。

（三）施工风险

评估施工过程中可能面临的风险和困难，选择能够最大程度减少施工风险的开挖方法。例如，在高地应力区域，可能需要采用钻孔爆破与锚杆支护相结合的方法，以减小岩体破裂风险。开挖方法的选择还应考虑经济性因素，包括施工成本、施工周期和维护费用等。综合评估不同开挖方法的成本效益，选择经济合理的方法。

五、支护体系的设计

支护体系的设计在隧道工程中起着至关重要的作用，支护体系能够保证隧道的稳定性、安全性和持久性。支护体系设计需要综合考虑以下几个方面：

（一）地质条件

地质条件是支护体系设计的基础。需要对地质构造、岩性、岩体结构、断裂和节理等进行详细的地质勘察和地质力学分析。了解地质条件有助于确定合适的支护方式和支护结构类型。

（二）开挖方式和施工方法

支护体系的设计应与选择的开挖方式和施工方法相匹配。不同的开挖方式和施工方法对支护要求和支护体系设计有不同的影响。例如，在盾构法开挖中，通常采用环片衬砌结构作为主要的支护形式；而在钻爆法开

挖中，常采用锚杆网、喷射混凝土和钢拱等作为支护措施。

（三）支护目标

支护体系设计应根据工程要求和支护目标进行。支护目标可能包括保持开挖面的稳定、减小变形和收敛、控制地下水、防止岩层破裂等。根据具体目标，确定合适的支护方式和措施。

（四）支护结构类型

根据地质条件和支护目标，选择合适的支护结构类型。常见的支护结构类型包括：衬砌结构、锚杆网和锚索、喷射混凝土、钢拱和钢支撑等。衬砌结构包括钢筋混凝土衬砌、预制混凝土衬砌等。衬砌结构能够提供稳定的支撑和防水功能，适用于软弱地层或需要防水的地区。锚杆网和锚索则是通过在岩体中设置锚杆和锚索来增加岩体的抗拉强度和稳定性。锚杆网和锚索常用于岩层较软或存在断裂和节理的情况下。喷射混凝土是通过喷射混凝土形成衬砌或补强岩体，增加岩体的强度和稳定性。喷射混凝土常用于较坚硬的岩层中。钢拱和钢支撑是使用钢材构建拱形或框架结构，提供强大的支撑和抗压能力。钢拱和钢支撑适用于需要大跨度支护和较高荷载要求的情况，如地下车站或深埋隧道^[6]。

六、隧道工程开挖防护施工技术的优化和展望

隧道工程开挖防护施工技术的优化和展望是为了提高施工效率、降低工程风险、保障工程质量，并适应不断变化的工程需求和环境要求。以下是对该领域的优化和展望的详细阐述：

（一）先进施工技术的应用

随着科技的不断进步，先进的施工技术被引入到隧道工程开挖防护中，以提高施工效率和质量。例如，全断面掘进机（TBM）的应用能够实现连续掘进和衬砌施工，减少人工作业，降低噪音和振动，加快施工速度。另外，激光扫描、遥感技术和虚拟现实等先进技术也被用于隧道施工过程中的监测、控制和可视化管理，提高工程的精度和安全性^[7]。

（二）数值模拟和仿真技术的应用

数值模拟和仿真技术在隧道工程开挖防护施工中发挥着重要作用。通过建立地质模型和力学模型，采用数值方法进行模拟和分析，可以预测地应力分布、岩体变形和开挖过程中的变化，为支护体系设计和施工方案优化提供科学依据。此外，基于仿真技术的虚拟实境（VR）和增强实境（AR）技术可用于培训施工人员、指导施工过程和提升安全性。

（三）新材料和新技术的应用

隧道工程开挖防护施工中，新材料和新技术的应用有助于提升工程质量和持久性。例如，高性能混凝土和纤维增强材料在衬砌结构中的应用能够增加结构的强度和耐久性。此外，新型的地下水控制技术、岩体处理技术和灌浆材料等也在不断发展，为隧道工程提供更可靠的防护施工解决方案。此外，隧道工程开挖防护施工应注重环境保护和可持续发展。在施工过程中，应采取措减少噪音、振动和粉尘等对周围环境和居民的影响。

同时，应优化施工方案和材料选择，减少资源消耗和能源消耗，降低施工对环境的影响。

（四）自动化和机器人技术的发展

自动化和机器人在隧道工程开挖防护中的应用有助于减少人工劳动、提高施工效率和安全性。例如，自动化导向系统和传感器技术可以实现隧道掘进机的操作，减少人工干预和误差。机器人技术可以用于在开挖过程中进行实时监测和检测，提供准确的数据支持和决策依据。此外，无人机技术可用于隧道施工现场的巡检和勘察，提供高分辨率的图像和数据，便于工程管理和问题识别^[8]。

（五）综合管理和协同作业

隧道工程开挖防护施工需要进行综合管理和协同作业。通过信息化管理系统，实现施工进度、材料供应、机械设备调度和质量控制的全面监控和协调。同时，加强施工团队的协作和沟通，建立良好的合作关系，提高工程管理效率和施工质量。未来，随着人工智能和大数据技术的发展，隧道工程开挖防护施工将朝着智能化的方向发展。通过实时数据采集和分析，可以预测施工风险和岩体变化，提前采取相应的防护措施。智能化施工设备和机器人技术的应用将进一步提高施工效率和安全性。

结束语

综上所述，通过深入了解地质条件、评估岩体力学特性，选择合适的开挖方法，并设计科学合理的支护体系，可以有效地保证隧道工程的稳定性和安全性。同时，结合先进的施工技术、数值模拟和仿真技术、新材料和新技术的应用，以及自动化和机器人技术的发展，可以提高施工效率、降低工程风险，并实现环境友好型施工。此外，注重综合管理和协同作业，以及推动隧道工程智能化，也将为隧道工程的开挖防护施工带来新的机遇和挑战。

参考文献

- [1] 余文魁. 公路桥梁隧道工程开挖防护施工技术研究[J]. 运输经理世界, 2022(15): 95-97.
- [2] 郑志华. 公路桥梁隧道工程开挖防护施工技术研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2021(12): 1279.
- [3] 贾元霞. 高速铁路浅埋偏压隧道安全进洞方案研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(1): 22-28.
- [4] 张安睿. 高边仰坡下方隧洞群开挖施工的安全性分析[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(1): 68-76.
- [5] 周新星. 隧道断层破碎带突水突泥安全防护技术案例分析[J]. 市政技术, 2022, 40(12): 19-25.
- [6] 张华. 特殊条件下的隧道出洞施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(2): 228-230.
- [7] 田国伟, 穆垚岐. 山区隧道洞口严重偏压且岩层陡倾顺层处治方法[J]. 施工技术, 2021, 50(8): 89-91.
- [8] 孙文豪, 刘钊, 刘成洲, 等. 基于气泡帷幕的大连湾海底隧道水下炸礁消压分析研究[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(12): 1-6.