

复杂地质条件地下工程施工技术创新研究

潘登

西藏畅航建筑材料有限公司，西藏自治区拉萨市，850000；

摘要：复杂地质条件对地下工程施工提出了更高的技术要求，传统工法在软硬不均、断层破碎、涌水突泥等环境下频繁失效，直接影响工程进度与结构安全。为此，本文围绕地下工程典型地质复杂情形，系统梳理其所带来的施工难点，剖析传统方法的适应性边界，并聚焦于当前工程实践中的关键技术创新，包括智能监测系统、超前地质预报与新型支护材料等路径。通过对比分析与案例提炼，指出未来施工体系的发展趋势应聚焦于多技术协同与风险响应机制的动态调控，以适应复杂地质条件对地下工程质量、安全与效率的多重挑战。

关键词：复杂地质；地下工程；施工技术；技术创新；风险控制

DOI：10.69979/3060-8767.25.06.063

引言

地下工程作为城市基础设施发展的关键组成部分，广泛应用于地铁、隧道、地下管廊与基础开挖等领域，其安全与效率直接影响城市运行与区域发展。在工程实践中，地质条件的不确定性与多变性是施工过程中不可规避的关键因素，尤其在岩性突变、断层活动强烈、地下水丰富等复杂情境下，常规工艺的适用性与施工组织面临严峻考验。

近年来，随着城市空间向纵深扩展，地下工程对地质适应能力的要求持续提升，促使施工技术从单一工艺向综合体系逐步转型。在此背景下，研究复杂地质条件下地下工程施工技术的创新路径，已成为提升工程可靠性与降低风险成本的核心抓手。本文将从地质特征出发，探讨施工难点与技术对策，旨在为相关工程提供可行的技术支撑与理论指导。

1 复杂地质条件下的施工挑战

1.1 地质不确定性引发的风险类型

地下工程的施工过程高度依赖地质条件的稳定性与可预判性。然而，在实际工程中，由于地质资料的局限性与地下环境的多变性，复杂地质条件成为施工过程中的最大不确定性来源。常见的复杂地质情况包括断层破碎带、高压富水层、软硬互层交界带、强风化岩体及膨胀性黏土区域等。这些地质结构往往空间分布不均、物理性质变化剧烈，导致施工过程中极易出现突发性地质灾害^[1]。

涌水突泥是隧道与地铁工程中最常见的地质风险之一，尤其在穿越富水砂层或裂隙发育带时，水土压力不平衡容易引发掌子面失稳甚至塌方，造成设备损毁、人员伤亡和工程中断。类似的，还有地表沉降与建筑物

沉陷风险，特别是在软弱地基或老城区地基下穿施工中，扰动容易传导至地表，引发相邻建筑的安全隐患。此外，在断层或强震带中掘进时，岩体结构破碎、节理发育，使支护结构难以稳定发挥作用，施工安全与质量控制极为困难。

这些风险不仅来自地质本体，还涉及施工扰动与水文变化所带来的二次作用。例如，在地下水水位扰动后产生的渗流场重构，可能改变土体的强度与变形特性，导致原有稳定结构失效。地质的不连续性还可能造成信息失真，地质预报不准确，从而使施工过程缺乏及时应对准备，形成不可控事故。因此，复杂地质条件不仅带来施工难度的上升，更强化了对“动态感知、快速响应”的技术要求，传统经验主义在此背景下难以胜任风险防控需求。

1.2 工程类型与地质耦合的施工难点

地下工程的具体形态多样，不同工程类型在面对复杂地质时的响应特征与施工痛点也各不相同。在城市地铁工程中，常涉及穿越老城区、下穿河流、高层建筑群及管线密集区，施工扰动必须精细控制，且周边环境容错率极低。当地质条件复杂时，如遇流砂层、淤泥质土或断层夹泥等，盾构掘进将面临刀盘结泥、推进阻力突升与同步注浆失效等难题，一旦掌子面压力失衡，极易诱发地面突起或坍塌事故^[2]。

在山岭隧道工程中，掘进路径常贯穿岩体风化区、断层破碎带或岩溶发育区。钻爆法或TBM掘进在此环境下需面对岩体强度突变、掉块坍塌与围岩突变引发的反支撑失效等问题。部分隧道需穿越高地应力区域，施工过程中易诱发岩爆、片帮等灾害，对衬砌结构稳定性提出更高要求。此外，复杂地层中的地下水活动强烈，对衬砌防水与排水系统构成持续挑战，影响长期运营安全。

在地下综合管廊与大型基础开挖工程中,施工周期长、作业面大,对地质结构扰动大,地质应力重分布带来的稳定性问题较为明显。当面对高地下水位、软土层堆积或存在深层淤泥的地段时,基坑支护系统难以形成稳定受力结构,常出现基底隆起、侧壁位移、支护桩倾斜等问题,甚至影响周边交通和建筑功能运行。

2 传统施工技术的适应性与局限

2.1 盾构与钻爆法在复杂地质中的适用边界

盾构法与钻爆法作为当前地下工程中最常用的两种施工方式,已在众多城市轨道交通与隧道工程中形成成熟体系。然而在面对复杂地质环境时,其适用性受限的问题逐步显现,特别是在土岩过渡带、高水压断层及岩溶密布区,其作业效率与安全保障面临挑战^[3]。

盾构法以施工自动化程度高、施工速度快、扰动范围小为主要优势,适用于城市地铁、过江通道等环境约束严格的工程场景。然而,盾构机在面对地质强度变化剧烈的区段时,其刀盘性能与推进系统常难以匹配地质突变造成的阻力差异。在岩性突变剧烈地段,盾构机推进不稳,刀盘受力不均极易造成刀具磨损严重或偏转失控。此外,盾构掘进需依靠土压或泥水平衡来维持掌子面稳定,在穿越断层破碎带或高渗透砂层时,维持压力的能力减弱,突泥、涌水、地面沉降等事故风险显著提升。

钻爆法作为应对硬岩地层的传统手段,操作灵活、设备要求低,适用于山岭隧道等不规则地形。然而,在岩体结构复杂、节理发育或软硬不均地带,爆破过程易引发围岩超挖与扰动范围扩大,影响支护质量与开挖轮廓控制。特别是在断层与岩溶段落,爆破作业引起的振动可加剧围岩破碎程度,造成掉块、片帮等不稳定现象,对施工人员安全构成威胁。在靠近地表或建筑物密集区域,爆破对环境的冲击也难以满足控制标准,施工时间与爆破参数受限,进一步降低了作业效率。

盾构与钻爆法虽具技术成熟度,但其适应边界受限于岩性稳定性、地下水活动、地应力状态与周边环境敏感程度。当上述因素构成联合作用时,传统工艺需依赖大量工程加固、设备改造与人工监控来维持作业条件,成本压力与风险负担随之增加,技术可持续性受到质疑。

2.2 常规方法的效率瓶颈与安全短板

在复杂地质环境下,传统施工方法除了适应性受限外,还存在效率难以保障与安全管控难度大等突出问题。以盾构法为例,其在均质地层中可实现日均掘进数十米以上,但在含砂砾地层、高含水率黏土或夹泥断层中,推进阻力与刀盘负荷剧增,常需降低推进速率、频繁维

护刀具,严重影响工期^[4]。更关键的是,盾构隧道一旦遭遇突发性掌子面失稳,现场难以快速组织应急处置,极易酿成大范围塌方事故。

钻爆法虽具操作灵活优势,但在复杂地质中控制爆破效果的难度显著增加。软硬交替岩层中,爆破能量难以均匀分布,致使部分区域超挖严重、另一些区域则无法形成有效破碎,增加了后续的机械开挖与清渣工作量。爆破振动在不稳定岩体中传播时,还可能诱发新的岩体裂隙,使围岩等级进一步下降。特别是在穿越含水层时,钻爆可能破坏原有渗流系统,形成突水点甚至影响地下水环境,带来持续性的渗漏治理负担。

在支护结构施工方面,传统初期支护多采用钢拱架与喷混凝土结合的方式。但在破碎围岩与突变地应力区,这类结构形式难以适应持续变形,常出现初期支护开裂、掉块脱落等现象,给二次衬砌形成带来不利条件。部分项目虽引入加长锚杆、格构钢筋网等加固手段,但其施工工艺复杂、质量受控难度大,且施工节奏受限于作业空间与支护强度释放时间,整体效率受限。

传统方法的监测与预警系统大多依赖人工巡视与静态数据读取,难以实时掌握围岩稳定性变化与支护结构受力状态。在复杂地质中,地质条件变化常常具有突发性与非连续性,传统监测方式难以及时响应,造成风险隐患延迟暴露。以上问题共同反映出有施工体系在复杂地质下暴露出的技术瓶颈,急需从材料、设备、信息系统到组织方式进行系统性革新,以满足现代地下工程对效率与安全双重标准的要求。

3 关键施工技术的创新发展路径

3.1 智能监测与风险预警系统的集成应用

复杂地质条件下的地下工程施工,对实时信息掌控与快速决策响应提出更高要求。传统依赖人工巡视、定点观测的监测手段,已难以适应突变性地质环境中多源风险的早期识别与动态管控^[5]。为此,集成式智能监测与预警系统成为当前施工技术创新的关键突破点,其核心在于将传感器网络、数据采集与分析平台、风险判识模型与现场响应机制有机融合,实现施工区域的“可视化”“可量化”与“可预测”。

目前,典型系统由三部分构成:一是多点布置的物联网传感器,覆盖围岩变形、支护受力、渗压变化、振动扰动等关键指标,部分项目还引入三维激光扫描与光纤监测,实现大面域动态感知;二是数据集成与分析平台,通过边缘计算与云端模型协同处理海量监测数据,快速识别异常趋势并结合历史模型进行风险等级预判;三是联动控制机制,可将预警信号实时推送至项目管理终端与现场作业系统,触发施工调整、设备停机或人员

撤离等响应动作，提升风险处置的自动化与时效性。

以地铁盾构工程为例，在穿越断层带前布设了分布式光纤应变传感器系统，结合掌子面前方地质雷达扫描，实现了掌子面压力波动与围岩变形联动的预测建模。当监测系统判定掌子面出现非线性突变趋势时，系统自动降低推进速率，并触发同步注浆增压程序，最终成功避免了一次突泥事故的发生。

该类技术的推广，不仅提升了施工现场的信息透明度，还倒逼施工组织方式从经验判断向数据驱动转变，使得“事前识别—事中干预—事后追踪”成为地下工程风险管理的闭环系统。同时，随着5G通信与边缘计算的融合发展，智能监测系统可实现更高频率、更大规模的数据采集与传输，为复杂地质条件下的安全管理提供更坚实的技术支撑。

然而，这一体系的有效运行仍需管理机制配套。一方面，监测数据的组织管理与责任界定需在项目初期明确，避免出现“无人响应”或“多头处理”的执行空档；另一方面，监测系统的维护与校准也需纳入常态机制，确保长期运行中的数据准确性与稳定性。只有将智能化手段嵌入施工全过程，方能真正实现从被动响应到主动感知的技术跃升。

3.2 地质适应性施工装备与材料体系的革新

面对地质结构高度不均、物理性质差异显著的地下施工场景，传统施工设备的标准化、刚性设计已难以应对复杂工况的柔性需求。近年来，施工装备在功能集成、参数自适应与操作智能化方向不断演进，显著提升了对复杂地质的适应能力。其中最具代表性的是盾构机的定制化发展与掘进装备的模块化设计。

在复杂地层区，定制型盾构机广泛采用双模结构与复合式刀盘设计，能够在不同地质段落间切换推进方式。例如，在土岩交界处，可通过刀盘转速、开口率与同步注浆参数的动态调整，实现推进力与支护力的平衡过渡，避免掌子面不稳定。同时，部分高端装备配置了地质实时识别模块，可依据前方岩性变化自动修正推进参数，实现“前探感知—智能调节”的闭环控制。在高地应力或软弱围岩中，盾构机还可配合注浆盾壳、膨胀式支撑装置提升临时支护效果，降低掌子面失稳风险。

在支护材料方面，适应性混凝土材料、可变刚度喷护材料与多功能锚杆体系成为突破重点。新型早强快凝混凝土可在高湿高压环境下快速成型，提升初期支护能力；部分材料还具备自愈裂纹性能，能在微裂纹产生后通过化学反应恢复密实性，延长结构服役寿命。此外，可调应力锚杆与多功能支护网结构在强烈围岩变形条件下具有良好的吸能缓冲能力，可显著提升结构系统的

动态响应能力。

施工技术工艺方面，围岩结构信息与施工参数的实时联动成为趋势。例如在隧道开挖中，依据监测反馈动态调整开挖进尺与支护间距，实现“短进尺、强支护、快封闭”的高风险段作业模式。某铁路隧道在高地应力脆性岩段采用了双层可变刚度支护体系，在岩爆预警条件下自动切换为柔性吸能状态，有效避免结构破坏。

施工技术创新的落脚点已由单点技术突破，向系统集成与全链条适应性升级转变。从设备到材料、从工艺到管理，形成多层次、多类型的柔性调节体系，是应对复杂地质挑战、实现工程本质安全的重要路径。未来，伴随人工智能与信息建模技术的进一步融合，地质-结构-设备三维适配建模有望为施工提供更精准的动态调整机制，推动地下工程施工迈入柔性响应、智能协同的新阶段。

4 结语

复杂地质条件是当前地下工程施工面临的核心挑战之一，涉及地质结构多变、风险类型叠加与施工环境不确定等多重压力。本文系统梳理了此类环境下的主要施工难点，评估了传统工艺在不同地质场景中的适应性边界，并聚焦于智能监测、地质识别与装备材料三方面的技术创新路径。研究表明，未来地下工程技术的发展不应仅局限于单项设备或工艺的升级，而应构建基于多源信息感知、快速响应能力与结构柔性调节机制的系统性技术体系。唯有如此，才能在动态复杂的地质条件下保障施工效率与结构安全，推动地下工程迈向本质安全与智能化管理的新阶段。

参考文献

- [1] 闫江峰. 复杂地质条件下隧道工程施工技术挑战与解决方案[J]. 工程建设与设计, 2025, (14): 120-122.
- [2] 官国栋, 徐众. 复杂地质条件下地下工程施工难点及超前支护技术研究[J]. 石化技术, 2025, 32(07): 421-422+350.
- [3] 索博学. 复杂地质条件下铁路隧道工程施工技术探讨[J]. 产业科技创新, 2023, 5(01): 52-54.
- [4] 孔德尘, 谢洪栋, 徐化营. 复杂地质地下工程施工中的BIM技术应用研究[C]//中国图学学会土木工程图学分会, 《土木建筑工程信息技术》编辑部. 《第九届BIM技术国际交流会——BIM助力新城建》论文集. 瑞森新建筑有限公司; 山东瑞森高性能建筑研究有限公司; , 2022: 268-277.
- [5] 郭家梁. 复杂地质条件下航道护岸工程施工技术研究[J]. 珠江水运, 2025, (11): 42-44.