

山区高速公路隧道施工关键技术研究

张洲铭¹ 刘人瑜²

1.云南省综合交通发展中心 云南 昆明 650000

2.云南省交通规划设计研究院股份有限公司 云南 昆明 650200

【摘要】：山区高速公路隧道工程受到地形地质情况复杂，生态脆弱以及施工难度大的考验。本文主要研究隧道施工技术，主要研究开挖、围岩支护、防水排水三大技术的应用原理和要点，对技术方案优化、安全质量控制、成本控制等管理措施进行了分析。研究表明，采用钻爆法和机械化开挖相结合可以提高地质适应性，以新奥法为基础的复合支护体系可以提高围岩稳定性，防排结合的防水措施是保证运营安全的重要措施。经过实践证明，必须按照地质动态优化方案的要求来加强管理、控制，才能实现安全、质量、效益的同步提高，推动隧道建设高质量发展。

【关键词】：山区隧道；施工关键技术；围岩支护；防水防排水

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.058

山区高速公路是联系内陆地区、贯通区域路网的骨干公路，隧道工程是山区高速公路建设中技术难度大、工程风险高的分项工程之一。山区地形地貌复杂，地层岩性多变，断层、岩溶、地下水等不良地质条件时有发生，给隧道施工安全造成很大影响。与此同时，山区生态环境脆弱，施工对植被、水文系统造成的扰动也不能忽略。对于以上问题，系统研究施工关键技术并加以规范应用，对于保证工程安全顺利进行、提高工程建设质量有十分重要的现实意义。本文根据山区高速公路隧道工程的施工特点，从开挖、支护、防水等关键技术环节入手，对施工原理、施工要点和管理措施进行分析，为类似工程提供借鉴。

1 山区高速公路隧道施工特点与难点分析

1.1 地形地质条件复杂

山区地势起伏大，地表高差大，地质构造活动强烈，断层、褶皱、节理裂隙发育，岩石类型复杂，从坚硬的花岗岩、石灰岩到软弱的页岩、泥岩、破碎带均有分布。由于岩性突然改变，隧道选线困难，施工过程中围岩自稳能力差别很大，局部软弱带或者断层破碎区很容易发生坍塌、突水涌泥等地质灾害。复杂的地质情况不但要依靠施工团队有很强的地质预判能力，在方案设计阶段还要考虑到地质变化的处置预案，保证施工安全底线不能打破。

1.2 生态环境约束显著

山区生态系统抵抗力差、植被覆盖率高，对水源涵养起着重要作用，也给野生动物提供较好的栖息环境。隧道施工产生的爆破振动、噪声、废水、弃渣等，如果处理不当，会对周围植被、土壤结构、地下水体造成不可逆的破坏。山坡开挖容易造成水土流失，弃

渣乱堆会堵塞山洪沟道，诱发次生地质灾害^[1]。施工组织中必须把生态保护措施作为重要约束条件，严格遵守水土保持方案，规范施工废水、固废处理，使工程施工对生态环境造成的干扰控制在可接受范围内。

1.3 施工条件限制突出

山区交通基础设施薄弱，施工材料、机械设备的进场运输受道路条件的影响较大，大型设备进场困难，备料时间长，物资供应保障难度大。施工场地普遍狭小，洞口段作业空间受限，多工序平行作业的组织协调难度大。由于山区气候原因，暴雨、大雾、冰冻等恶劣天气时有发生，给施工的连续性以及作业的安全造成持续的影响。以上条件限制要求施工组织方案具有较强的弹性、应变能力，在保证工期目标的基础上，科学安排工序、做好应急预案。

2 隧道开挖技术

2.1 钻爆法开挖技术

钻爆法是目前山区隧道硬岩段最常用的一种开挖方法，具有适应性强、灵活的优点，可以适应各种断面形式以及复杂的地质情况。钻爆法施工的关键之处在于合理安排炮眼布置方式以及装药构造，依照围岩等级改变单循环进尺、炮眼深度以及起爆次序，从而达到对爆破振速的有效掌控，把爆破对围岩的扰动范围缩减到最小。开挖断面的设计一般用全断面法、台阶法或者分部开挖法，根据围岩自稳能力选择合适的开挖方法。围岩条件好时可以采用全断面一次成形，减少围岩暴露时间；围岩条件差时应采用台阶法分步开挖，减小单次爆破规模，控制变形的发展。爆破作业结束之后，要及时清除渣土并做地质素描和围岩判断工作，为支护参数的动态调整给予支撑^[2]。

2.2 机械化开挖技术

对软弱围岩、断层破碎带和富水地段，机械化开挖方式有明显的优势。掘进机（TBM）和盾构机依靠护盾结构的保护作用，在开挖推进的同时可以进行管片拼装或者初期支护施作，大大缩短了围岩暴露时间，有效地抑制了坍塌和涌水的风险。机械化开挖对围岩扰动小、掌子面稳定，适合于长隧道连续作业，在降低施工安全风险的同时提高施工效率。但是 TBM 和盾构设备对地质条件的适应性存在一定的限制，遇到软硬交替地层、大断层或者强岩溶的时候，需要在地质勘察阶段充分考虑设备选型的可行性，并做好相应的辅助处理措施，例如超前预注浆加固、超前锚杆支护等，保证机械化施工的连续稳定推进。

3 围岩支护技术

3.1 初期支护体系构建

围岩初期支护是保持开挖后隧道稳定的第一道安全防线，初期支护的施作时机、质量直接影响施工的安全性和后期结构受力状况。以“新奥法”理论为依据，初期支护应在开挖后尽快施工，充分发挥围岩自承能力，利用支护结构约束围岩变形，防止围岩变形超限。初期支护一般由喷射混凝土、系统锚杆和钢拱架三部分组成，三者共同起作用，形成支护体系。喷射混凝土在岩面喷覆之后迅速硬化，形成封闭保护层，阻止围岩表面风化剥落，填充细小裂隙，防止裂隙扩大；系统锚杆深入到围岩内部，依靠锚固作用把松散破碎岩体和深部稳定岩层连在一起，改善围岩应力状态；钢拱架提供刚性骨架支撑，承受来自围岩的径向压力，控制断面变形。喷射混凝土厚度、配合比、回弹率等施工过程中所控制的参数必须严格按照要求执行，锚杆安装密度、注浆饱满度等均需按设计标准执行，保证初期支护整体性能优良。

3.2 超前支护与二次衬砌施工

软弱破碎围岩段或者富水地层中，只依靠开挖后立即进行的支护很难对掌子面稳定起到控制作用，必须在开挖前先做超前支护。常用的超前支护方法有超前小导管注浆、管棚支护和超前锚杆等。超前小导管注浆将浆液注入掌子面前方松散体中，使其胶结固化，提高地层承载能力；管棚支护用密排钢管组成棚架结构，给掌子面开挖提供超前顶护，适合于洞口段浅埋偏压或者土石分界段等特殊部位。超前支护措施的选择要根据地质预报资料和现场实际情况来综合考虑，形成有针对性的施工方案^[3]。二次衬砌是隧道的永久性承载结构，只有初期支护变形基本稳定，量测数据达

到规范要求时才能进行二次衬砌施工。二次衬砌一般用整体式模板台车浇筑混凝土，浇筑要连续均匀，分段浇筑长度和振捣工艺要严格控制，保证混凝土密实无缺陷，使初期支护和二次衬砌共同形成可靠的复合衬砌体系，满足隧道长期运营的受力和耐久性要求。

4 防水与排水技术

4.1 防水体系构建

山区隧道多处地下水丰富的地区，防水工程属于保障隧道结构长久安全运行的关键工作。隧道防水设计按照“以堵为主、防排结合、综合治理”的原则，把结构自防水和外包防水层结合起来，形成多道设防的防水体系。初期支护和二次衬砌之间设防水板，是主要的隔水层。防水板铺设前要对喷射混凝土面层进行平整处理，清除突出尖锐部位，防止划伤防水层；铺设时要保证平整、密贴，搭接宽度、焊缝质量要经过焊接检测合格，严禁出现空鼓、破损等缺陷^[4]。施工缝、变形缝等薄弱部位属于渗水隐患的高发区，在这些部位设置中埋式橡胶止水带或者背贴式止水带，从结构上有效阻止渗水通道。二次衬砌混凝土本身也要通过优化配合比、控制水灰比、加入防水外加剂等方式提高混凝土自身的抗渗等级，形成与外包防水层互相补充的双重防护。

4.2 排水系统设置

完善的隧道排水系统是防水体系的重要组成，它的功能就是有序地汇集和排出围岩渗水、裂隙水和施工用水。系统一般是由纵向排水盲管、横向排水管、中心排水沟和侧沟组成。纵向盲管沿隧道轴向布置在防水板和二次衬砌之间，收集其背后渗水；横向排水管每隔一定距离设置一个，把水引到中心排水沟；中心沟贯穿全线，最后把水排到洞外。盲管一般采用透水性好、抗淤堵的无纺布包裹打孔波纹管，安装时保证管路畅通、坡度合理。对于高水压地段，排水系统要和注浆堵水措施相结合使用，防止单纯排水造成衬砌承受过大水压，保证整个防排水体系长期稳定有效运行。

5 施工技术综合管理

5.1 技术方案动态优化

山区隧道地质情况复杂多变，技术方案要具有动态调整的功能。施工前要制订系统的超前地质预报计划，综合运用地质雷达、超前钻探等手段，对前方地质实施连续预判，从而给开挖方法和支护参数的调整赋予支撑。现场监控量测是新奥法施工的关键，对拱顶沉降、洞周收敛等指标进行实时监测，掌握围岩及

支护结构受力变形情况，一旦出现超限，立即停止施工并采取补强支护、加密钢架、封底等应急措施。整个动态调整机制要依靠信息化监测数据来支撑，创建起勘察、设计、施工三者之间的闭环反馈，让施工技术的应用一直跟工程实际保持一致，从而保证施工的安全和高效^[5]。

5.2 施工安全与质量管控

安全管控属于隧道施工全过程的主要工作。对坍塌、突水、有害气体等重大风险要建立起分层的管控机制和隐患排查治理两道防线。根据不同的施工阶段，应编制专项安全技术交底，使作业人员了解操作规程及应急要求，定期开展培训、演练，提高全体人员的安全意识和自救能力。质量控制要贯穿材料检验、工序验收、竣工检测全过程，对喷射混凝土强度、锚杆抗拔力、防水板焊缝、衬砌密实度等重要指标进行记录并建立台账，便于追溯。依靠严格的方案审批、工序交接和专项检查来建立上下贯通的质量管控体系，杜绝质量隐患，实现安全和质量的系统化管理。

5.3 施工成本管控

成本控制必须以保证工程质量、安全为前提，用优化方案、精细管理来达到降本增效的目的。从方案

上应根据实际情况合理选择开挖方式及断面，减小超挖，减少材料浪费；通过优化工序衔接来提高施工效率，缩短工期以降低间接成本。在材料管理上要建立材料计划制度，控制采购和用量的匹配，减少积压和浪费，对钢筋、钢架等主材进行精确下料，提高利用率。成本控制要同变更管理结合起来，严格控制变更的频次和大小，及时办理相关手续、修改预算，防止出现费用失控的情况。最终目的就是达到质量、安全、成本三者之间的动态平衡和整体优化。

6 结语

山区高速公路隧道施工属于保证工程建设安全、质量的重要部分。本文对开挖、围岩支护、防水排水等关键技术进行了系统的阐述，同时结合技术优化、安全控制、成本控制等各方面进行论述。经过实践证明，在复杂的地质条件下采用地质先行、动态设计、信息化控制的方法是行之有效的。随着隧道工程向深、复杂的方向发展，今后要努力提高超前地质预报的精度，加强复杂地质条件下机械装备的适应性，加深信息化监测手段在施工管理中的集成应用。加强技术同管理的配合，不断改进工程质量，可以给完善山区路网、推进交通基础设施建设赋予有力支撑。

参考文献：

- [1] 谭锋. 软弱围岩地质山区高速公路隧道施工技术研究[J]. 江西建材, 2023, (06): 334-335+338.
- [2] 杜中梅. 新奥法在山区高速公路隧道施工中的应用研究[J]. 交通世界, 2022, (13): 43-45+61.
- [3] 张帆, 黄海波. 山区高速公路隧道机械化施工技术分析[J]. 四川水泥, 2022, (02): 218-220.
- [4] 杨勇. 山区高速公路隧道工程施工中的安全管理[J]. 交通世界, 2021, (29): 159-160.
- [5] 李宁. 山区高速公路隧道施工安全管理[J]. 四川建材, 2020, 46(04): 187-188.