

山区公路隧道洞口爆破安全防护技术与应用研究

谢辉

浙江交工路桥建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2026040029

摘 要 : 山区公路隧道口处的地形复杂、岩石破碎, 地质条件差是公路施工过程中的危险区域。公路洞口爆破不同于一般的山体爆破, 空旷面较大、受到的限制较少, 易出现飞石伤人及边坡坍塌等情况, 给现场的工作人员和机械设备造成安全威胁以及山坡的损坏。基于山区的实际情况, 对山区公路隧道洞口的爆破进行安全分析和防护措施研究。详细介绍了在洞口爆破中有关防护方面的技术内容。针对当前在公路隧道洞口爆破过程中存在的一些问题进行了分析。提出了针对山区具体情况的优化爆破技术和全面的防护工作, 加强了现场的安全管理和控制。通过采取科学有效的方法对施工的全过程做好有效的监控和防护, 使安全、高效地完成洞口的爆破工作成为可能。提供了相应的防护策略和措施, 可以应用于其他公路山区公路隧道的洞口爆破工程中, 并提供一些安全方面工作的参考。

关 键 词 : 山区公路隧道; 洞口爆破; 安全防护; 施工技术; 现场管控

Research on Safety Protection Technology and Application of Tunnel Entrance Blasting in Mountainous Areas

Xie Hui

Zhejiang Jiaogong Road and Bridge Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract : The terrain at the entrance of mountain road tunnels is complex, with fragmented rocks and poor geological conditions, making it a dangerous area during the construction process of the road. Tunnel entrance blasting is different from general mountain blasting. The open area is larger and there are fewer restrictions, which may lead to flying rocks injuring people and slope collapses, posing safety threats to the on-site workers and equipment, as well as damaging the hillside. Based on the actual situation of the mountainous area, this paper conducts a safety analysis and research on the blasting at the entrance of mountain road tunnels. It elaborates on the technical content related to protection in tunnel entrance blasting. It analyzes some existing problems in the tunnel entrance blasting process of highways. It proposes optimized blasting techniques and comprehensive protection measures tailored to the specific conditions of the mountainous area, strengthening on-site safety management and control. By adopting scientific and effective methods to effectively monitor and protect the entire construction process, it makes it possible to complete the tunnel entrance blasting safely and efficiently. Corresponding protection strategies and measures are provided, which can be applied to other highway mountain road tunnel entrance blasting projects and offer some references for safety-related work.

Keywords : mountain road tunnel; tunnel entrance blasting; safety protection; construction technology; on-site management

引言

在山区公路建设中, 隧道结构是实现山体穿透、改善线路布局以及提高运输效率的重要构筑物。洞口段是连接外界和内部空间的重要过渡结构, 并且存在边坡较大、覆土层薄以及风化严重、围岩松散等多种地质特征, 因此其施工难度及安全风险远远高于洞身结构。爆破技术作为实现洞口段土石方开挖与岩石破碎的有效措施, 具有高效能的特点, 并适用于坚硬的岩体山体条件, 在山区复杂工程条件下传统的爆破技术非常容易出现各种各样的安全事故问题。实际工程施工过程中一味追求效率而忽视相应的防护处理方式, 并将防护技术流于形式化, 技术使用模糊不清等现象比较普遍。经常性出现飞石、边坡滑移、围岩破碎等问题, 为了对上述存在的不足进行改进, 有必要对实现山区公路隧洞口爆破防护的安全性关键技术问题进行研究, 对实际施工过程中遇到的问题进行梳理, 并完善和优化相关的防护技术方案, 为提升隧洞口施工的安全性, 使隧洞口工程建设得以顺利进行, 进而减少安全风险具有积极的意义。

一、山区公路隧道洞口爆破安全防护技术概况

（一）洞口爆破工况特点

公路隧道工程在山区的建设不同于一般的平地建筑，洞口施工场地条件更是具有特殊性，在洞口施工地段一般具有以下特征。首先地形复杂，在山体上修筑洞口，其边坡陡峭，落差大，爆破地震波沿着边坡传播，使得震动增强；其次围岩松散，在洞口部位由于雨水冲刷和风化等影响，岩层破碎，节理发达，完整性极差，极易因爆破振动引起松动和塌落；另外，洞口处是露天和隧道内施工的连接区域，大型机械设备多，人员集中，交叉作业现象普遍，因此洞口施工环境更加开放，爆破飞石与爆破冲击波扩散距离远，几乎没有屏障保护，增加了安全防护的距离与难度^[1]。

（二）核心安全防护技术分类及应用原理

基于山区隧道洞口爆破风险特点，现有主要安全防护技术措施包括：从源头处控制爆破风险的技术；在爆破过程中采取的防护技术；对剩余风险进行被动防护技术3个方面。通过从根源上对爆破作业方式进行优化设计以减少爆破产生的振动、飞石及冲击波的方式，达到预防和降低爆破影响的安全技术属于爆破源处控制技术。这是目前较为经济有效的控制技术方式。爆破过程中的安全防护技术是围绕整个爆破作业所采用的防范技术。其内容包括洞口边坡的预加固及支护围岩技术以及爆破施工现场周围围挡等隔离措施^[2]。通过对施工本身加强处理，并且切断危险因素传递途径的方式，从而实现危险性较大的施工工艺的有效控制。针对可能残留下来的危险性而所设置的安全防护措施即为被动式防护技术。其主要手段就是架设用于防护的排架、铺设防护网以及安装缓冲层等方式将爆破飞石予以拦截，并且减弱残留下来的部分冲击波等措施来防止意外安全风险的产生。这3种安全防护技术措施能够相互配合并且循序渐进，对爆破前后的全过程进行安全保护，适应了洞口复杂环境下的施工条件。

（三）安全防护主要目标

安全防护的目的不是杜绝扰动，而是将其控制在一定范围之内。其一是将因爆破产生的扰动影响控制在一定范围以内，使其不破坏洞口边坡岩体、周边植物以及临时设施等，并保证边坡稳定可靠；二是杜绝飞石事故的发生，控制其抛出距离并保障现场施工人员、机械设备、临时住房等不受损伤；三是保护已形成的洞口结构不受爆破振动及冲击波的破坏而产生支护开裂和洞口轮廓改变为隧道进洞做好准备；四是规范好施工现场的施工作业，在实施标准化的安全防护控制措施的同时防止由于违章作业造成不必要的安全事故从而达到安全与效率同步的目的。

二、山区公路隧道洞口爆破安全防护主要存在的问题

（一）爆破工艺选用不当，存在源头性风险

绝大多数工程现场，忽视了洞口爆破的特殊性，采用一般洞内爆破技术，未针对山区公路洞口围岩松散破碎，洞口边坡陡峭的实际状况来调整设计相关参数，在根源上留下了重大安全隐患^[3]。其一，布孔不合理、多为间距和排距较大，或过小现象；

装药量大，多为集中装药，导致爆破震动冲击作用集中，加大了围岩的扰动和振动范围，极易造成洞口表面岩石脱落，边坡出现松动。其次，起爆方法不正确，多采用瞬时起爆，而未采用分段延时起爆法，使得爆破能量瞬间释放，未能分散能量缓和释放，容易形成大量飞石和强大的冲击波。此外，还有部分施工单位不考虑洞口浅埋、风化层及硬岩等不同的地质条件采用相同的爆破方法，其针对性差，安全度很低，特别是在复杂的地质条件下施工安全隐患更大。

（二）片面的防护体系，形式化的防护措施

目前洞口防护存在被动防护多，主动防护少；表层防护多，深部防护少。防护体系不完善，缺乏系统的全方位防护，大多数施工现场仅敷衍铺设一层普通防护网及简易围挡措施，只能简单地起到挡石功能而无法减弱洞口爆破产生的振动和冲击波对面部边坡岩体的进一步扰动破坏。另外普遍存在爆破前对洞口松散岩体不进行清理和加固、不针对边坡薄弱部位进行补强支护等主动防护措施，且在爆破后不及时处理被爆落或有松动现象的岩石，使得隐患逐渐增加。此外，搭设的洞口防护设施不够规范，搭设间距过大、固定方式不牢固，防护网上拼接不到位留有间隙、防护层数不达标，难以抵挡较强的爆破冲击作用易产生防护破损及坍塌问题，形成形式化防护^[4]。

（三）边坡稳定性控制不足，次生风险预防不够

山区隧道口边坡失稳是爆破产生的次生危害最大。在实际现场施工作业中往往忽视了爆破对洞口边坡持续性的影响。洞口边坡岩体风化严重破碎，由于爆破的振动作用会进一步的对岩体中的结构面造成影响从而引发裂隙扩张松动层增厚等，短期来看并不会带来明显的病害产生，但是随着后期的雨水渗透以及其自身重量的作用可能会引发滑移和垮塌现象。在目前现场作业施工中没有采取针对性措施对洞口边坡动态加以管控，在每次进行爆破前后没有专门检查洞口边坡裂隙和松动层等情况，对于岩质边坡也并没有相关的实时监控手段来进行预警预报，无法及时发现洞口边坡存在的隐形隐患问题，此外就是爆破施工同排水及支护施工不能有效的衔接，在爆破施工完成后不进行边坡封闭，未能完善相关排水措施，一旦遭遇雨季，雨水渗入岩体裂缝之中会引发二次灾害的出现，给洞口稳定性造成影响，诱发相关的地质灾害的发生^[5]。

（四）现场安全措施不规范，人员素质不高

现场管理缺失是导致洞口爆破事故高发的一个重大人为原因。一是交底不全面，有些作业人员缺乏山区洞口爆破的专项防护措施知识培训，凭施工经验作业，装药不规范、加量装药及随意变动炮孔设计等情况频繁发生。二是管理混乱，对爆破警戒区划分不标准，非作业员、闲杂机械撤离不及时和交叉作业等问题时有发生。三是防护能力欠缺，大部分作业人员对新的防护材料和改善后的爆破技术应用掌握不足，并继续使用陈旧落伍的施工模式，难以满足多变复杂的工况条件下的防护要求。另外，项目安全管理规定落实不到位，如爆破前安全检查工作、爆破时全过程监控工作、以及爆破后验收等工作流于形式，无法规避人的因

素带来的相关安全事故。

三、山区公路隧道洞口爆破安全防护优化对策及应用技术

（一）改进爆破工艺，从源头减少安全隐患

采用不同的、精细的爆破技术来应对山区洞口的特殊条件，从源头上控制风险。改变传统的炮孔设计方式，并根据不同类型的洞口围岩风化情况以及不同硬度岩体调整炮孔的间距和排距及深度，在洞口浅埋、破碎地层段实施浅孔小药量多孔爆破方法，避免深孔大药量，严格遵循掏槽孔周边孔、辅助孔的区别对待，周边眼采用光面爆破技术控制轮廓线减少损害。通过间隔装药、分段分层等方法改变传统装药结构，避免集中装药，使能量平均分布并减弱振动，降低飞石概率。采用毫秒延时起爆技术，适当控制起爆时间间隔，分阶段分批缓释能量，避免能量累计作用的增强效果，削弱震动和冲击波的影响程度和扩散范围适应于开放施工条件下的山区洞口环境。

（二）构建主动+被动全方位防护体系

采取主动预控与被动拦截相融合的防护技术，构建全方位、无死角防护系统，杜绝片面化防护现象。主动防护技术在爆破前对洞口边坡进行了前期处理，彻底清除边坡面松散浮石和土层，在岩体裂隙多且较弱的地方采用锚杆喷混凝土加固，堵塞岩石中的裂隙，增强岩石边坡整体性；对于洞口段埋浅部分事先施作临时支护结构，减少其受到爆破扰动产生的损坏。被动防护技术采用标准化防护设施搭设，作业面洞口处设置两排防护架，铺满高强度纤维防护网，将各个缝隙密封起来，并在爆破的临空面放置缓冲垫，减轻冲击波力。在坡面上铺设柔性网进行拦截落石防止剥蚀边坡坡面的岩体，定期检查所使用防护设备的完整性及时替换受损设备保证其在整个施工期间发挥作用。

（三）加强边坡动态监管，防控次生地质灾害

重视边坡稳定，建立爆破全过程动态管理机制，杜绝次生灾害。爆破施工前，针对洞口边坡进行细致检查，在松动及节理裂隙发育部位做出标记，并进行必要的防护与加固处理，做好洞口边坡排水，疏导洞口边坡排水系统中的堵塞点，防止雨水停留渗透岩体。爆破作业时严格控制一次起爆规模，采取“少药量，多炮次”的原则，将单次起爆对边坡的影响降低到最小范围。在完

成一次起爆作业后立即开展针对边坡安全性的检查，在可能存在岩体裂隙扩张、岩体松动、滑落等风险的重点区域及时排除因本次起爆新发生的松动岩体，并对已经损坏的支护体系进行修复并封死。在每次爆破作业期间定时巡视已爆坡体，保证在发生隐性失稳情况后第一时间被发现和处置，做到边坡失稳风险可控在控。

（四）规范现场管理，确保施工安全

完善现场安全管理制度，细化施工管理内容，避免因人为造成不必要的危险。一是加强对作业人员的技术交底与培训，根据山区洞口爆破的施工特点，组织相关人员进行专题培训，明确相应的爆破工艺、安全要求和防护标准、操作禁忌以及事故应急处理方法等，以提升作业人员的综合能力。二是规范相关作业行为，严格限定爆破作业区范围，并设立警戒标志等，在实施爆破前清空作业区域内的设备以及作业人员，严禁同时进行其他施工活动，必须按照爆破前的安全隐患排查—爆破过程中的监督监护—爆破后检查验收的标准流程依次进行，不通过验收禁止继续进行其他方面的施工活动。三是强化应急处理保障措施，就可能出现的飞石伤害人员、边坡坍塌以及机械损毁等现象编制具体的应急预案，并且准备一定的物资储备，在此基础上要定期对作业人员开展应急演练工作，提升突发事件应对处理能力，保证整个洞口部位爆破施工期间能够安全有序地运行。

四、结语

公路隧道洞口爆破作业防护是一项系统、细致的工程，主要结合洞口复杂地质地形条件，避免流于形式的防护，在控制风险源头、加强过程防护的基础上实施全过程、动态式安全管控。在山区公路隧道洞口目前爆破防护工艺粗糙、措施缺乏系统性以及边坡管理不到位及现场管控不够规范等不足，是导致相关隐患的重要因素，采用精细化优化爆破技术、设计主动+被动相结合的防御系统及加强对边坡的危险防控和规范化作业现场管控可以有效解决当前山体隧道洞口爆破施工中存在的各类难题并降低爆破施工所带来的威胁。今后在进行山区公路隧道施工时应当针对具体实际情况对相应措施进行不断优化，并将有关技术落到实处，提高施工安全、质量和效率，并为实现安全建设山区道路工程提供保障。

参考文献

- [1]李晓洪, 杨枫, 向龙, 丁尧, 陈行. 山区高速公路桑坪隧道洞口段危岩处治方案探讨 [J]. 中国住宅设施, 2024, (06): 133-135.
- [2]黄俊彰, 周群. 山区矿山公路隧道洞口选线研究 [J]. 西部交通科技, 2023, (07): 133-135+173.
- [3]吕大武, 王昭艳, 张琳. 山区公路隧道洞口施工技术 [J]. 云南水力发电, 2021, 37 (04): 157-160.
- [4]王荣斌, 王国生. 山区高速公路基于隧道洞外环境的自适应照明控制系统研究与实践 [J]. 中国交通信息化, 2020, (S1): 163-165.
- [5]翟寒科. 山区高速公路隧道洞口边坡稳定性及其防护分析 [J]. 居业, 2019, (10): 104-105.