公路山岭隧道爆破开挖施工及安全风险管控技术

訾 雷

（四川省交通建设集团有限责任公司，四川 成都 610041）

摘 要 山岭隧道爆破开挖是公路隧道施工的关键环节，其施工质量与安全管控直接关系到隧道建设进度与作业人员安全。山岭隧道地质条件复杂、围岩变化频繁，爆破开挖面临振动控制、围岩稳定、有毒气体等多重风险。本文从山岭隧道爆破开挖的特点与基本流程出发，梳理钻爆设计优化、光面预裂爆破、振动监测、出渣支护协同等关键施工技术，分析爆破作业安全、围岩坍塌、有毒气体、应急处置四类安全风险，对应提出分级管控、监测预警、通风排烟、应急演练等管控措施，以期为公路山岭隧道爆破开挖施工与安全管理提供参考。

关键词 山岭隧道；爆破开挖；光面爆破；安全风险；振动监测

中图分类号：U455.6 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.020

0 引言

公路山岭隧道穿越山区，地质条件复杂多变，爆破开挖是目前应用最广泛的隧道掘进方式。爆破施工涉及炸药管理、钻孔装药、起爆排险、出渣支护等多个环节，任何一个环节管控不到位都可能引发安全事故。同时，爆破振动可能影响围岩稳定与周边构筑物安全，有毒有害气体威胁作业人员健康，坍塌、突水等地质风险时刻存在。因此，系统研究公路山岭隧道爆破开挖施工技术与安全风险管控措施，对保障隧道施工安全、提升工程建设质效具有重要的现实意义。

1 公路山岭隧道爆破开挖施工概述

1.1 公路山岭隧道爆破开挖的特点与难点

公路山岭隧道爆破开挖区别于露天爆破，具有显著的工程特点。作业空间受限，隧道断面尺寸固定，钻孔、装药、起爆等作业均在狭小空间内完成，大型设备施展困难，施工组织难度大。地质条件复杂多变，山岭隧道穿越不同地层，围岩等级从Ⅰ级到Ⅴ级均可能出现，断层破碎带、岩溶、地下水等不良地质频发，爆破参数需要根据围岩变化动态调整。爆破环境封闭，爆破产生的振动、冲击波、有毒气体在隧道内不易扩散，对作业人员安全与围岩稳定影响显著。周边环境敏感，部分隧道邻近村庄、既有构筑物或自然保护区，爆破振动控制要求严格。这些特点使得山岭隧道爆破开挖施工兼具技术复杂性与安全风险性，对施工组织与安全管控提出了较高要求[1]。

1.2 爆破开挖施工的基本流程

山岭隧道爆破开挖施工遵循“测量放线—钻孔—装药连线—起爆—通风排险—出渣—初期支护”的基本循环流程。施工前根据设计断面与围岩等级进行钻爆设计，确定炮眼布置、装药量、起爆顺序等参数，测量人员准确放出开挖轮廓线与炮眼位置。钻孔作业采用凿岩台车或风钻，严格控制炮眼角度、深度与间距，尤其周边眼的外插角直接影响光面爆破效果。装药前清理炮眼，按设计装药量与装药结构装填炸药，连接起爆网络并检查确认。起爆后通风排烟，待有毒气体浓度降至安全范围后，由专人进入工作面排查盲炮与危石，确认安全后开展出渣作业。出渣完成后及时进行初期支护，封闭围岩，完成一个开挖循环。各环节紧密衔接，循环时间的长短直接影响隧道掘进速度。

2 公路山岭隧道爆破开挖施工关键技术

2.1 钻爆设计与参数优化

钻爆设计是爆破开挖的技术依据，应根据隧道断面尺寸、围岩等级、岩性特征进行专项设计，并在施工中根据爆破效果动态优化。不同围岩等级的主要爆破参数存在明显差异，具体如表1所示。围岩等级越高，岩石越坚硬完整，周边眼间距可适当放大、循环进尺可适当加长；围岩等级越低，岩体越破碎，需缩小周边眼间距、减少单孔装药量、缩短循环进尺，采用短进尺、弱爆破的方式减少对围岩的扰动。钻爆设计优

作者简介：訾雷（1992-），男，专科，研究方向：隧道施工安全技术管理。

表 1　不同围岩等级隧道爆破主要参数参考表

围岩等级	周边眼间距（cm）	周边眼最小抵抗线（cm）	周边眼装药量（kg/ 眼）	掏槽方式	循环进尺（m）
Ⅱ级～Ⅲ级	45 ～ 55	55 ～ 65	0.15 ～ 0.25	直眼掏槽	2.5 ～ 3.5
Ⅳ级	35 ～ 45	45 ～ 55	0.10 ～ 0.20	斜眼掏槽	1.5 ～ 2.5
Ⅴ级	25 ～ 35	35 ～ 45	0.05 ～ 0.15	斜眼掏槽	0.8 ～ 1.5

化应建立在每循环爆破效果分析的基础上，通过对爆破后断面轮廓、超欠挖量、岩面平整度、炮眼痕迹保存率的统计分析，持续调整周边眼间距、装药量与外插角，逐步实现钻爆参数的最优化。

2.2　光面爆破与预裂爆破技术

光面爆破是山岭隧道开挖中控制轮廓质量的关键技术，通过合理布置周边眼、控制装药量与起爆顺序，使爆破后隧道轮廓平整、围岩损伤小。光面爆破的周边眼沿设计轮廓线布置，采用小直径药卷间隔装药或空气柱装药结构，减少孔壁受到的爆炸冲击，主爆区起爆后再起爆周边眼，利用周边眼的共同作用沿轮廓线形成平整的断裂面。质量良好的光面爆破，炮眼痕迹保存率在硬岩中不低于 80%、中硬岩不低于 60%，超欠挖量控制在规范允许范围内，围岩面上无明显的爆破裂缝。

预裂爆破则适用于围岩稳定性较差或对爆破振动控制要求严格的地段，在主爆区爆破之前先起爆周边眼，沿轮廓线预先形成一条贯通裂缝，将主爆区与保留岩体隔开，有效阻挡主爆区爆破振动向保留围岩传递，减少对围岩的扰动。预裂爆破的线装药密度需根据岩性试验确定，通常较光面爆破周边眼略大。实际施工中，Ⅱ级～Ⅲ级围岩优先采用光面爆破，Ⅳ级～Ⅴ级围岩或邻近重要构筑物地段可采用预裂爆破，两种技术配合使用，在保障开挖轮廓质量的同时最大限度地保护围岩稳定。

2.3　爆破振动监测与控制

爆破振动是影响围岩稳定与周边构筑物安全的重要因素，山岭隧道施工中必须对爆破振动进行实时监测与有效控制。振动监测采用爆破测振仪，在隧道内围岩敏感部位、洞口周边构筑物、邻近建筑物等处布置测点，每次爆破后记录振动速度、主频与持续时间，分析爆破振动的传播规律与衰减特征。根据监测结果反算爆破振动衰减公式，确定不同距离处的安全允许装药量，指导后续爆破的最大单段装药量控制 [2]。

振动控制的技术措施包括：采用微差爆破技术，将总装药量分成多个段别依次起爆，减少单段最大装药量，降低振动峰值；合理选择段间隔时间，避免各段振动波叠加放大；在靠近构筑物或软弱围岩地段，进一步减少单段装药量、增加段别，必要时采用预裂爆破隔振。通过监测数据反馈优化爆破参数，将爆破振动速度控制在安全允许标准以内，实现“爆破—监测—优化”的动态管控循环，既保障掘进效率，又确保围岩与周边环境安全。

2.4　出渣与支护协同施工

爆破后的出渣与初期支护是开挖循环的重要环节，其与钻孔爆破的协同程度直接影响施工效率与安全。出渣方式根据隧道断面与设备条件选择，常用装载机配合自卸汽车出渣或有轨运输出渣，出渣过程中应注意保护已支护段与测量控制点，避免车辆碰撞。出渣应及时彻底，工作面虚渣清理干净后才能进行下一循环的测量放线与钻孔作业，避免虚渣影响炮眼定位与钻孔精度。

初期支护应紧跟开挖面，遵循“短进尺、强支护、早封闭”的原则，爆破出渣后及时施作锚杆、喷射混凝土、钢拱架等初期支护，尽快封闭围岩，防止围岩暴露时间过长发生松动坍塌。在Ⅴ级围岩或断层破碎带地段，初期支护应紧跟掌子面，必要时采用超前小导管或管棚预支护，将支护作业与开挖作业紧密衔接。出渣与支护的协同组织还包括合理安排作业空间与时间，避免多工序交叉干扰，通过平行作业缩短循环时间，在保障安全的前提下提升掘进效率。

3　公路山岭隧道爆破开挖施工安全风险管控技术

3.1　爆破作业安全管理

爆破作业是山岭隧道施工中风险最高的环节之一，必须实施严格的全过程安全管理。炸药、雷管等爆破器材的运输、存储、领用、退回应严格执行民用爆炸物品管理规定，建立台账，做到账物相符、双人双锁管理。爆破作业人员必须持证上岗，爆破员、安全员、保管员经培训考核合格后持证作业，严禁无证人员接触爆破器材。装药前对工作面进行安全检查，确认无危石、无盲炮残留、通风良好后方可开始装药，装药过程中严禁明火与带电作业，采用木质或竹质炮棍装药，禁止使用金属器具 [3]。

起爆前所有人员撤离至安全距离以外，设置警戒哨与警示标志，确认警戒范围内无人后由爆破员下达

起爆指令。起爆后通风排烟不少于15 min，待有毒气体检测合格后，由爆破员与安全员先行进入工作面检查，确认无盲炮、无危石后方可解除警戒。发现盲炮时严格按规程处理，严禁掏挖或拉扯雷管，由专业人员采取诱爆或水冲法处理。

3.2 围岩稳定与坍塌风险防控

山岭隧道穿越断层破碎带、软弱围岩、岩溶发育地段时，坍塌是主要的安全风险之一，需从地质预报、支护参数、监控量测三方面系统防控。施工前与施工中开展超前地质预报，采用地质雷达、红外探水、超前钻探等手段，提前探明掌子面前方的围岩情况、地下水与不良地质，为支护参数调整提供依据。在断层破碎带与Ⅴ级围岩地段，及时调整支护参数，加密钢拱架间距、增加锚杆长度与数量、加厚喷射混凝土，必要时采用超前管棚或小导管预支护，增强支护体系的承载能力。

监控量测是判断围岩稳定状态的重要手段，在隧道内布设拱顶下沉、周边收敛、地表沉降等观测点，按规定频率进行量测，及时分析位移变化趋势与速率。当位移速率持续偏大或出现突变时，立即停止掌子面作业，撤离人员，分析原因并采取加强支护、回填反压等措施，待位移稳定后再恢复施工。建立“地质预报—动态支护—监控量测—风险预警”的联动机制，将坍塌风险防控贯穿施工全过程，做到早发现、早预警、早处置。

3.3 有毒有害气体与通风管控

山岭隧道爆破后产生大量一氧化碳、氮氧化物等有毒有害气体，部分隧道还可能遇到瓦斯、硫化氢等有害气体，通风排烟与气体监测是保障作业人员安全的重要措施。隧道施工采用压入式或混合式通风，配备足够功率的通风机，风管口距掌子面距离不超过15 m，确保工作面有充足的新鲜风量。爆破后强制通风排烟，通风时间不少于15 min，经气体检测确认一氧化碳浓度低于30 mg/m^3、氮氧化物低于5 mg/m^{3}后，人员方可进入工作面[4]。

在可能存在瓦斯的隧道地段，配备瓦斯自动监测报警仪，实行“一炮三检”制度（装药前、爆破前、爆破后检测瓦斯浓度），瓦斯浓度超标时立即停止作业、撤离人员、加强通风。作业面配备便携式气体检测仪，施工人员随身携带，随时监测作业环境气体浓度。通风设备定期维护，确保连续可靠运行，避免因通风故障导致有毒气体积聚。通过机械通风、气体监测、制度管理三重保障，将有毒有害气体风险控制在安全范围内。

3.4 应急处置与预警机制

完善的应急处置与预警机制是应对隧道突发安全事件的最后一道防线。施工前编制隧道坍塌、突水突泥、爆破事故、瓦斯爆炸等专项应急预案，明确应急组织机构、响应流程、处置措施与人员职责，配备应急救援物资与设备，包括逃生管道、应急照明、急救器材、抽水设备等。隧道内每隔一定距离设置应急避灾所与逃生通道，掌子面附近铺设逃生管道，确保突发情况下人员能够快速撤离。

定期组织应急演练，每季度至少开展一次坍塌或突水应急演练，检验预案的可操作性与人员的应急响应能力，根据演练发现的问题修订完善预案。建立安全风险预警机制，结合监控量测数据、地质预报结果、瓦斯监测数据等，设置风险预警阈值，达到预警条件时自动发出警报，启动相应响应程序[5]。现场设置专职安全员，开展日常安全巡查与风险排查，发现隐患立即整改，将风险消除在萌芽状态。

4 结束语

围绕公路山岭隧道爆破开挖施工与安全风险管控这一主题，本文结合复杂地质条件下山岭隧道的高风险施工特性，梳理不同围岩等级下钻爆作业的差异化施工逻辑与全工序作业链路，并针对现场高概率触发的爆破飞石伤人、围岩失稳坍塌、有毒有害气体积聚、突发险情响应滞后四类核心安全风险，逐一匹配对应形成全流程工序闭环核查体系、超前地质预报与围岩监控量测双联动机制、多节点通风与气体实时预警方案、分级响应的应急处置与常态化演练机制。未来可进一步探索基于BIM、物联网的隧道爆破智能设计与安全监测技术，研究数字化超前地质预报与风险智能预警方法，推动山岭隧道爆破开挖施工向更智能、更安全、更高效的方向发展。

参考文献：

[1] 周旸.公路桥梁隧道工程开挖防护施工技术分析[J].中华建设,2026(01):180-182.
[2] 刘威.公路隧道开挖支护技术及施工风险管理[J].交通科技与管理,2025,06(23):59-61.
[3] 赵成军.公路隧道微爆破工程安全风险识别与评估[J].交通世界,2025(34):18-20.
[4] 杨惠国.高速公路隧道的施工技术与质量控制策略[J].汽车画刊,2025(10):233-235.
[5] 高毓山,徐明嘉,刘新宇.露天铁矿破碎带区域爆破技术研究与安全管理[J].现代矿业,2025,41(11):218-221,226.