

路桥工程中爆破飞石危害预防与控制策略研究

文 / 路元军 深圳市城投爆破工程有限公司

摘要：在路桥工程中，爆破施工是不可避免的工序之一，但爆破飞石的危害却是一个不能忽视的安全问题。飞石不仅直接威胁施工人员的生命安全，还可能对周围环境和设施造成严重损害。研究表明，飞石的产生机理与多种因素密切相关，包括地质条件、爆破参数和环境因素等。因此，针对爆破飞石的危害预防与控制策略的研究，尤为重要。本研究通过深入剖析飞石产生的机理，探讨了飞石防控面临的难题，并提出了一系列具体的控制策略，重点关注爆破方案的优化、防护设施的选型及配置、药包布置的合理性、起爆时差的设置等方面，力求从源头减少飞石对施工安全的威胁。同时，通过建立科学的现场监测体系和完善应急防护措施，保障了施工过程中各项风险的有效管控。最终，这些策略不仅能够提升路桥工程的安全性，还能够为后续类似工程提供可参考的解决方案。

关键词：爆破飞石；路桥工程；防护策略；安全管理；爆破施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.045

引言

爆破施工，是路桥工程中不可缺少的工艺之一。随着项目规模的不断扩大和复杂度的增加，爆破作业的安全性问题也愈加凸显。飞石的威胁，作为爆破施工中的重要隐患，常常因为一些看似微不足道的因素被忽视，然而这些“微小”的疏漏，却可能引发不可预见的灾难性后果。飞石的产生，并非单一因素所致，地质条件、爆破技术、施工组织等多重因素相互交织，形成了一道道隐形的推动力。而面对这些复杂的挑战，如何设计出一套行之有效的预防与控制策略，便成了每个施工团队必须攻克的难题。只有从源头做起，全面细化爆破施工过程，才能真正杜绝飞石的危害。因此，本文将通过对爆破飞石产生机理的分析，揭示其背后的本质因素，进而提出一系列切实可行的防控策略，为保障路桥工程施工的安全性和顺利进行提供有力支持。

一、路桥爆破飞石研究概况

（一）工程爆破施工环境特点

路桥工程爆破施工环境复杂多变。施工现场地理位置、地质结构、周围环境条件，均会给飞石控制带来挑战。山区或隧道施工，地形起伏、岩层不均、土壤松散，影响爆破效果与安全。施工时，周围居民和交通的安全保障不容忽视。在此复杂环境开展爆破作业并控制飞石飞溅范围，是路桥爆破技术核心难题，关乎工程推进与公共安全。

（二）飞石产生机理分析说明

飞石源于爆破能量不均匀释放。爆破药包在岩石内爆炸，岩石受力破裂。碎石飞出与爆破力量、岩层裂隙、岩性、周围环境等因素相关。爆破时岩石强度与脆性决定飞石轨迹。工程实际中，地质条件差异大，飞石大小、形态、飞出距离不确定，为危害预测和防控带来挑战，需精准分析与防控。

二、飞石危害防控面临的难题

（一）复杂地质增加防控难度

路桥建设项目施工区多处于复杂地质环境，软弱层、断裂带、不规则岩体影响爆破稳定性与安全。岩体不均、局部地质特殊，使飞石规模、方向、速度难测。地质复杂增加飞石控制与施工管理难度。评估复杂地质下爆破安全性、实现有效防护和安全控制，是路桥工程关键问题，需综合多方面制定方案。

（二）防护材料性能适配性差

市场上飞石防护材料多样但性能不一。很多材料强度和耐用性难应对高能量爆破冲击。如某些网格防护网难承受大飞石撞击，不同气候下还会老化退化，降低防护效果。防飞石屏障等针对性设施，设计和材料选择难与实际工况匹配。防护材料适配不足影响防控效果、增加施工隐患，选材料需考虑多因素。

（三）工序衔接管控存在疏漏

爆破作业各环节衔接有疏漏，影响防控策略执行。施工中，爆破准备与后续防护衔接有时间差、责任不清，致防护设施布置不及时完善。施工与监管人员信息沟通不畅，使飞石防护难全程覆盖，增加事故风险。工序衔接不紧密使防控体系有漏洞，影响安全保障，需加强协调、明确责任、确保信息传递与措施执行。

三、路桥工程中爆破飞石危害预防与控制策略

（一）爆破方案细化设计要点

爆破方案细化设计是控制飞石危害基础。爆破工作安全性与有效性依赖精确设计。为减少飞石危害，要精细化调整方案。实际操作需依地质、环境、作业空间定制。不同岩石类型用不同炸药和药包配置实现精准爆破。细化设计涵盖爆破参数优化，如炸药量、药包布置、起爆顺序，影响飞石传播。还需结合地质结构分析受力均匀性，避免飞石异常飞行。表格可呈现不同地质下爆破参数调整策略，如软、硬岩层药包和炸药配置不同。以下为常见地质条件下爆破方案参数参考表：

表 1 常见地质条件下的爆破方案参数

地质条件	药包数量	药包间距 (m)	炸药量 (kg/m ³)	起爆延时 (ms)	预计飞石飞行距离 (m)
软岩层	6	1.2	1.5	300	50
中等硬度岩层	8	1.0	2.0	250	45
硬岩层	10	0.8	2.5	200	35

借助表格中不同条件下所记录的爆破数据，能够更为直观且清晰地了解到，在每一种特定的地质环境当中，应当怎样对爆破参数作出调整，以此来实现降低飞石危害的目标^[1]。精细化的爆破设计，绝非仅仅是对施工技术提出的要求，更重要的是对工程安全责任的切实落实。必须确保每一次爆破作业都能够处于可控的范围之内，最大程度地减少潜在的安全风险。爆破参数的精准调整，是有效降低飞石危害的核心要点，关乎着整个工程的安全与顺利推进。

(二) 防护设施选型配置方法

防护设施的选型与配置情况，直接决定了飞石危害的实际控制效果。在路桥工程领域，鉴于爆破过程具有不可预测性以及飞石运动存在随机性的特点，防护设施的设计必须具备灵活性与高效性这两大关键特性。防护设施不仅需要功能层面满足安全需求，还应当在成本投入、易维护性以及安装便捷性等多个方面进行合理的权衡与平衡。因此，选择适宜的防护设施，并根据施工现场的具体实际情况进行合理的配置，是避免飞石伤害的关键步骤，是保障施工现场人员和设备安全的重要环节。

对于施工现场的防护设施而言，要根据飞石的飞行距离、飞行角度以及规模大小来选择合适的防护网类型^[2]。目前，在实际工程中常用的防护网主要包括金属网、塑料网以及复合材料网等。在进行选择时，必须充分考虑其抗冲击能力、耐久性以及抗腐蚀性能等关键因素。例如，在地质条件较为复杂的山区地带，金属网由于其具备高强度的特性，通常会成为首选的防护网类型；而在城市或者环境较为温和的地区，塑料网则因其具有便捷性和成本优势，成为较为理想的选择。

防护设施的布置同样至关重要。防护网不仅要全面覆盖爆破作业的周围区域，还需要根据飞石的传播路径以及可能飞行的距离进行科学、合理的布局。特别是在爆破作业涉及多个方向的情况下，应当进行全方位的立体防护，确保飞石在任何情况下都能够被有效地阻挡。防护网的高度和密度也需要根据现场的具体要求进行精确调整，避免因配置不当而造成防护漏洞，从而确保防护设施能够发挥最大的防护效能。以下是防护设施配置的示意图：

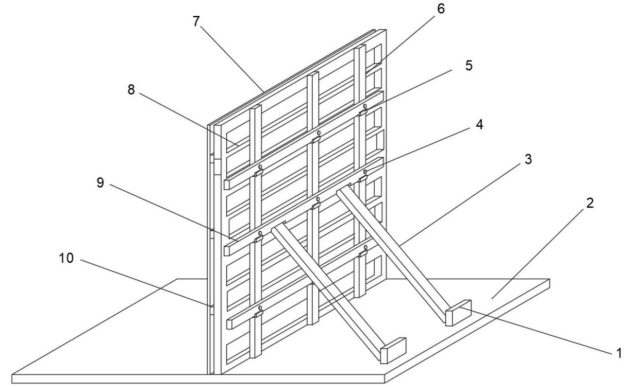


图 1 爆破防护排架

(三) 药包布置优化调整策略

药包布置的优化调整在爆破作业领域占据着举足轻重的地位，其关键意义在于，它是影响飞石飞行轨迹以及飞出范围的核心要素。药包布置的优化调整绝非仅仅是一项单纯的技术性操作，实则是对风险管理进行深度探究与实践的过程。回顾传统模式下的药包布置方式，往往过度依赖经验，严重缺乏系统性的分析以及针对性的调整举措。然而，伴随技术的持续发展与革新，药包布置的优化已然逐步成为控制飞石危害的关键策略，凸显出其不可替代的重要性。药包的布置工作必须全面且充分地考量岩体的结构特征以及爆破的具体目的。在实际的操作环节中，药包布置绝不能仅仅片面地追求数量的增加，而是应当紧密结合岩层的厚度、裂隙的分布状况以及预期的爆破效果等多方面因素，灵活且精准地调整药包的布置方式^[3]。针对厚层岩石而言，可以采用分层布置的创新性方式，也就是将药包按照不同的爆破效果进行层次化安排，以此达到最优的爆破效果，实现能量的精准释放与利用。而对于裂隙较多的岩层，药包布置则应着重侧重于集中爆破的策略，确保爆破效果的均匀性与稳定性，有效避免因某一部分爆破效果过强，进而导致飞石出现不可预测性的情况发生，保障爆破作业的安全性与可控性。起爆时差的科学设置对于药包布置的优化起着至关重要的作用。合理的时差能够对爆破产生的能量进行有效控制，防止瞬间的强大爆破力造成过大的冲击，从而产生大量难以控制的飞石。在进行药包布置时，爆破作业团队需要进行细致入微的分析工作，依据现场的实际状况，精心设置合适的时差，确保每个药包的爆炸时刻能够实现相互协调与配合，避免集中爆破所产生的潜在危险，降低飞石危害的风险系数。药包

布置优化的最终目标在于,通过运用科学合理的方法与手段,切实减少爆破作业过程中飞石的飞出量,将飞石所带来的危害程度降低到最低限度。

(四) 起爆时差合理设置方式

爆破作业中的起爆时差无疑是一项至关重要的控制手段,它直接决定了飞石的飞出轨迹以及其对周围环境所构成的潜在威胁程度。合理的时差设置,不仅仅是对爆破效果进行优化的重要途径,更是对人员生命安全予以深切负责的具体体现。为了切实实现对飞石的有效控制,起爆时差的设置必须精确到毫秒级别,并且要与施工现场的每一个细节做到完美匹配。合理的起爆时差应当建立在详尽的地质勘查数据以及精准的爆破模拟分析的基础之上。岩体的断层、裂隙、岩性特征,以及爆破孔的具体位置和深度等诸多因素,都会对爆破过程中的应力释放以及飞石的飞行路径产生显著的影响。通过运用先进的技术手段,精准模拟这些因素之间的相互作用关系,能够确保每一次爆破所产生的冲击波和飞石动能得到合理的分配与控制,有效避免多个爆破段的冲击波相互叠加,从而造成无法预料的严重后果^[4]。

在设置时差的过程中,应当充分考虑施工区的安全防护距离这一关键因素。当飞石具有较高的破坏力时,适当延长起爆时差,保证不同爆破段之间拥有足够的时间隔离,可以有效地减少飞石集中的区域,降低飞石对周围环境和人员造成伤害的可能性。尤其在复杂地质条件下,起爆时差的优化工作需要高度依赖高科技手段,例如数字化爆破系统。借助该系统能够实现实时数据反馈,并根据反馈信息及时调整起爆时间,从而确保在最精细的尺度上实现对飞石的有效控制,提高爆破作业的安全性和可靠性。在实际操作过程中,爆破设计人员应当通过科学计算与现场试爆相结合的方式,不断对起爆时差的合理性进行调整和验证。起爆时差的优化不仅仅是爆破人员经验的简单积累,更是对每一场施工过程的深刻理解以及对风险控制的高度责任感的具体体现,要求相关人员以严谨的态度和专业的素养来对待每一个环节。

(五) 现场监测点位布设规范

现场监测点位布设,于飞石防控系统而言极为关键。精准合理的布设,可精确捕捉飞石飞行关键数据,如速度、轨迹等。还能及时察觉爆破作业异常,提前采取应对之策,防止飞石危害扩散。布设监测点位时,需综合考量施工区域地形地貌、岩层状况与周边环境。爆破区域不同地段飞石飞行轨迹各异,监测点位应依此精确布设。例如,在爆破段上下游多设监测点,可监控飞石运动路径,利于根据实际调整防护措施^[5]。技术上,监测系统要配备多种设备,像激光雷达、光纤传感器、高速摄像头等。这些设备协同工作,确保实时获取飞石飞行速度、角度、距离等数据。高精度设备能精准捕捉每颗飞石动态,并将数据传输至后台分析。高风险区域要加密监测点位,

实现飞石监控无死角。监测系统反馈并非简单数据记录,而是全动态、实时预警机制。通过持续监测飞石轨迹与爆破效果,能及时发现异常并快速启动应急响应。这种实时性与前瞻性结合,为施工人员决策提供有力支持,有效避免灾难。

(六) 应急防护措施执行细则

应急防护措施是应对爆破飞石的最后防线,保障施工人员与周边居民安全。制定完整高效执行细则十分重要,细则应涵盖防护设施布置、人员撤离流程、事故应急响应程序及后续恢复工作。应急防护首要保障爆破作业区及周边安全。设置防护设施要根据爆破区情况与飞石潜在威胁合理配置。防护屏障和防飞石网结构要坚固,能承受飞石冲击。除常规物理屏障,要考虑恶劣天气等影响,定期检查加固。防护措施布置要考虑所有潜在飞石路径,确保爆破区到周边全面防护^[6]。应急防护细则要明确人员职责分工与应急响应流程。施工人员入场前要接受详尽安全培训,清楚应急防护设施位置、用法及紧急撤离方法。撤离通道要畅通,保证飞石飞出时人员能迅速撤至安全区。飞石防控中,突发事故应对与现场救援很重要。应急救援队伍要有快速反应和专业救援技能,能在飞石事故黄金时间内搜救人员、救治伤员。医疗救援设施要充足且定期演练,确保各环节高效衔接。

结语

路桥工程爆破施工,飞石危害是不可回避的安全隐患。虽长期受关注,但有效防控措施仍薄弱。本研究分析表明,飞石产生非单一技术问题,是多因素交织结果。单一方案无法根本消除飞石威胁。需从宏观视角,精细优化每个爆破环节,注重环境因素、材料选择、技术手段与施工管理融合。如此,才能真正降低爆破飞石风险,实现安全施工目标。未来,随技术进步与管理完善,路桥工程爆破飞石危害有望有效控制,施工安全将获更稳固保障。

参考文献

- [1] 汪龙,郭磊.复杂环境下高架桥快速爆破拆除技术研究[J].重庆建筑,2023,22(7):49-51.
- [2] 陈千,阳生权,曹柯.浅谈爆破有害效应及其防治措施[J].工程与建设,2023,37(1):325-327.
- [3] 娄燕斌.复杂环境下大型块石混凝土拱桥爆破拆除[J].城市道桥与防洪,2024(3):163-166.
- [4] 郭守坤.基于事故树-层次分析法的岩巷爆破飞石事故分析[J].山西焦煤科技,2023,47(1):20-23.
- [5] 高毓山,陶志刚,王喜刚,等.“小微精”爆破技术在南芬露天铁矿中的应用[J].露天采矿技术,2023,38(4):38-41.
- [6] 余业清.某石灰岩矿露天台阶爆破设计及安全分析[J].中国矿业,2024,33(9):186-194.

作者简介:路元军,1984年02月01日,男,汉族,安徽省淮南市,本科,研究方向:爆破。