

隧道工程施工安全防治及监管措施

饶 松

云南交投公建工程养护有限公司 云南 昆明 650000

摘要：隧道工程作为现代交通、水利及能源基础设施建设的关键环节，其施工环境复杂、风险因素众多，安全事故一旦发生，往往造成重大人员伤亡和财产损失。本文旨在系统性地探讨隧道工程施工过程中的主要安全风险，并在此基础上，从技术防治、管理优化和智能监管三个维度，构建一套多层次、全方位的安全防治与监管体系。文章首先剖析了隧道工程面临的地质、施工及环境三大类核心风险；其次，详细阐述了针对各类风险的主动预防与被动治理措施；再次，深入分析了以风险分级管控和隐患排查治理为核心的双重预防机制，并探讨了智慧工地技术在安全监管中的创新应用；最后，对隧道工程安全监管的未来发展趋势进行了展望。研究表明，唯有将先进的技术手段、科学的管理理念与严格的法规制度深度融合，才能有效提升隧道工程的本质安全水平，保障工程建设的顺利推进。

关键词：隧道工程；施工安全；风险防治；双重预防机制；智慧监管

引言

随着我国城市化进程的加速和区域经济一体化的深入发展，以高速铁路、高速公路、城市轨道交通为代表的交通网络建设方兴未艾，而隧道作为穿越山岭、江河湖海及城市建成区的核心构筑物，其建设规模与技术难度均达到了前所未有的高度。然而，隧道工程深埋地下，作业空间封闭、地质条件多变、工序交叉繁杂，使其成为典型的高风险工程领域。从频发的塌方、涌水、瓦斯爆炸等事故中不难看出，隧道施工安全形势依然严峻。传统的“事后处理、被动应对”安全管理模式已难以适应现代大型、复杂隧道工程的安全需求。因此，如何系统性地识别、评估、预防和控制隧道施工过程中的各类风险，并构建科学、高效、智能的监管体系，已成为工程界亟待解决的重大课题。本文将立足于隧道工程实践，深入探讨其安全防治与监管的有效路径。

1 隧道工程施工安全风险分析

1.1 地质风险

地质风险是隧道工程最根本、最不可控的风险来源，直接决定了施工方法的选择和安全措施的制定。不良地质体，如断层破碎带、软弱围岩以及高地应力区，构成了隧道掘进过程中最大的不确定性。这些地质构造稳定性极差，在开挖扰动下极易发生大变形、塌方甚至冒顶事故。尤其是在软弱围岩地段，若支护不及时或强度不足，围岩应力会迅速释放，导致初期支护结构失稳，进而引发连锁性的结构破坏。地下水同样是隧道施工的“天敌”，富水地层或与地表水系连通的断层带，极易引发突泥、涌水事故。大量地下水的突然涌入不仅会淹没作业面、冲毁设备，更可能诱发围岩整体失稳。

在岩溶发育地区，地下暗河或高压溶洞的存在更是潜藏巨大威胁，一旦被意外揭露，其瞬间释放的巨大能量足以摧毁整个掌子面。此外，在煤系地层、油气田附近或封闭已久的古老地层中，常赋存有瓦斯、硫化氢等有毒有害或易燃易爆气体。瓦斯积聚到一定浓度后，遇明火即会发生剧烈爆炸；而硫化氢则具有剧毒，低浓度即可致人昏迷甚至死亡，对作业人员的生命安全构成直接且致命的威胁。

1.2 施工过程风险

施工过程风险源于人为操作、设备运行及工艺流程中的不安全因素，是连接地质风险与最终事故结果的关键环节。钻爆法作为山岭隧道最常用的开挖方法，其爆破作业本身就蕴含着巨大风险。炸药的运输、储存、装填和起爆任何一个环节的疏忽都可能导致早爆、迟爆或哑炮事故，对人员和设备构成直接威胁，而爆破产生的冲击波和飞石也可能对洞内设施和人员造成二次伤害。与此同时，隧道内密集使用的大型机械设备，如挖掘机、装载机、自卸车乃至TBM，在狭窄、光线不足的环境下运行，极易因操作失误、机械故障或车辆碰撞而引发安全事故。特别是TBM这类高度集成的复杂装备，其刀盘卡死、主轴承损坏等故障的处理过程本身就伴随着极高的安全风险^[1]。支护结构作为维持隧道稳定的生命线，其失效往往是灾难性事故的前兆。无论是初期支护还是二次衬砌，一旦出现设计参数不合理、施工质量不达标，或是监控量测数据未能及时反馈并指导施工，都可能导致支护结构在围岩压力下失稳破坏，最终引发塌方。此外，在台架、栈桥等高处作业平台上，防护措施的缺失极易导致人员坠落，而洞顶掉块、设备部件脱落

等物体打击风险也时刻存在。

1.3 作业环境与管理风险

此类风险与施工现场的整体环境和管理水平密切相关，往往是所有具体风险得以放大的温床。随着隧道掘进深度的不断增加，洞内空气流通愈发不畅，爆破产生的炮烟、内燃设备排放的尾气以及弥漫的粉尘会迅速积聚，导致空气质量急剧恶化，严重威胁作业人员的呼吸健康，甚至可能引发窒息或中毒事件。同时，隧道内存放的油料、氧气乙炔瓶、电气设备等易燃易爆物品，在封闭、疏散困难的空间内构成了巨大的消防安全隐患，一旦发生火灾，火势蔓延快、扑救难度极大，极易造成群死群伤的惨剧。更为根本的是安全管理缺陷，这是所有风险的放大器。安全责任体系不健全、安全教育培训流于形式、安全技术交底不到位、现场安全检查走过场、应急预案缺失或演练不足，以及分包管理混乱等问题，共同导致了人的不安全行为成为事故发生的直接导火索。一个缺乏有效安全文化的工地，即使拥有再先进的技术和设备，也难以从根本上杜绝安全事故的发生。

2 隧道工程施工安全防治措施

2.1 地质风险的超前预报与主动防控

应对地质风险，关键在于“先知先觉”。综合超前地质预报体系是实现这一目标的核心手段，它通过“长距离宏观控制、中距离精细探查、短距离精确验证”的多层次探测，力求最大限度地揭示掌子面前方的地质真相。长距离预报可采用TSP、地质雷达等方法进行宏观判断，中距离则依赖TRT等技术进行精细刻画，而最终的决策依据则来自超前水平钻探所获取的岩芯样本和地质素描信息。这种多方法、多手段的相互印证，能够显著提高预报的准确率，为施工决策提供可靠依据。在此基础上，必须实施针对性的预加固与预处理措施。对于富水地层，应果断采用超前帷幕注浆或径向注浆技术，对围岩进行封堵和加固，将地下水“堵”在开挖面前方，变被动排水为主动防水^[2]。面对软弱破碎围岩，则需构建管棚或小导管超前支护体系，形成一个稳固的棚架式预支护结构，有效控制围岩的松弛和变形。而在瓦斯地层施工时，必须严格执行“先探后掘、监测监控、以风定产、先抽后采”的瓦斯治理方针，通过强有力的通风系统稀释瓦斯浓度，并配备全天候的瓦斯自动监测报警断电系统，确保任何异常都能被即时捕捉和处置。

2.2 施工过程风险的精细化管控

施工过程的风险管控需要贯穿于每一个细节之中。爆破作业必须严格遵守安全规程，实行许可制度，并大力推广微差爆破、光面爆破等控制爆破技术，以最大限

度地减少对围岩的扰动。爆破后的通风排烟和安全检查是进入下一循环前不可或缺的步骤。对于机械设备，不仅要选用性能可靠、安全装置齐全的产品，更要在洞内运输车辆上加装防撞预警系统，在关键路口设置声光报警装置，并为TBM等大型设备建立完善的维护保养和应急处理预案。支护结构的质量是隧道安全的基石，必须严控喷射混凝土的强度与厚度、锚杆的长度与注浆饱满度、钢拱架的间距与连接质量等关键指标。更重要的是，要强化以收敛变形和拱顶沉降为核心的监控量测体系，实现数据的自动化采集、实时传输和智能分析，一旦数据出现异常趋势，立即启动预警，并依据“动态设计、信息化施工”的原则，及时调整支护参数或施工工法，将风险扼杀在萌芽状态。对于高处作业和物体打击风险，则需通过设置牢固的防护栏杆、安全网，强制佩戴安全帽和防坠器，以及定期清理洞顶危石等措施，构筑起一道道坚实的人身安全屏障。

2.3 作业环境与管理风险的系统性治理

改善作业环境与夯实管理体系是提升本质安全水平的根本途径。必须根据隧道的具体情况，科学设计并构建高效的通风系统，确保掌子面始终有充足的新鲜风量，有效稀释和排出有害物质，并定期检测空气质量，使之符合职业健康标准。消防安全管理同样不容懈怠，洞内应严禁烟火，易燃易爆物品须分类限量存放于专用库房，并配备足量有效的消防器材，同时制定详尽的消防应急预案并定期演练，以提升全员的应急处置能力。然而，这一切的基础在于一个健全的安全管理体系^[3]。必须明确建设、设计、施工、监理等各方的安全责任，严格落实企业安全生产主体责任和项目负责人第一责任人制度。安全教育不能停留在口号上，而应开展有针对性的培训，确保每一位新进场工人和特种作业人员都能真正掌握岗位安全操作规程和应急技能。同样，安全技术交底必须在每道工序开工前由技术人员向作业班组进行详细、可操作的讲解，并履行签字确认手续，确保安全要求直达一线。

3 隧道工程施工安全监管体系构建

3.1 构建双重预防工作机制

“双重预防机制”——即安全风险分级管控和事故隐患排查治理，是当前安全生产领域最核心的监管理念，旨在将安全关口从事后处置前移至事前预防。首先，必须组织专家和工程技术人员，对隧道施工全过程进行系统性的危险源辨识和风险评估。根据风险可能导致的后果严重程度和发生可能性，将其科学划分为重大、较大、一般和低风险四个等级，并据此绘制直观的“红、

橙、黄、蓝”四色安全风险分布图。针对不同等级的风险，必须明确相应的管控措施、责任人和管控周期，尤其是重大风险，必须由企业主要负责人亲自督办，确保万无一失。在此基础上，必须建立常态化的隐患排查治理机制，将日常检查、专项检查、季节性检查和综合检查有机结合，利用信息化手段建立隐患台账，实现隐患从发现、登记、整改、验收到销号的全流程闭环管理。对于排查出的重大事故隐患，必须坚决做到整改责任、措施、资金、时限和预案“五落实”，确保隐患得到彻底根除。

3.2 智慧工地赋能安全监管

物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的应用，正在为隧道安全监管带来革命性的变革，推动监管模式从“人防”向“技防”、“智防”跃升。通过为施工人员配备智能安全帽或定位手环，可以实时掌握洞内人员的位置、数量和行动轨迹，在突发险情时能迅速锁定被困人员位置，为黄金救援争取宝贵时间。同时，AI视频分析技术能够自动识别未戴安全帽、违规穿越危险区域等不安全行为，并实时发出预警，极大地提升了监管的覆盖面和效率。在环境与结构健康监测方面，部署各类智能传感器可对洞内有害气体、粉尘浓度及围岩应力、支护结构内力等关键参数进行24小时不间断监测，数据实时上传至云端平台，一旦超过预警阈值，系统不仅能自动报警，还可联动通风、喷淋等设备进行应急处置，实现风险的自动响应^[4]。此外，利用AI算法对关键工点的视频画面进行智能巡检，可以自动识别设备异常、材料堆放不规范等隐患，变被动检查为主动发现。最终，通过将BIM与GIS技术深度融合，构建三维可视化数字孪生平台，管理者可以在虚拟空间中直观地掌控地质模型、施工进度、风险分布和监测数据，实现对工程全局的“一图统管”和风险的精准预判。

3.3 强化政府与社会协同监管

除了企业内部的自我约束和技术赋能，外部的协同监管同样至关重要。相关政府主管部门应加强事中事后

监管，运用“双随机、一公开”等现代化监管方式，对隧道工程进行抽查检查，并对存在重大安全隐患或发生事故的企业依法依规严肃处理，纳入安全生产“黑名单”实施联合惩戒，以儆效尤。同时，应积极鼓励引入具备专业资质的第三方安全咨询、检测和评估机构，为项目提供独立、客观的安全技术服务，有效弥补企业自身技术力量的不足。最后，畅通举报渠道，鼓励一线工人和社会公众对安全生产违法违规行为进行监督举报，形成政府监管、企业自律、社会监督三位一体的强大合力，共同营造“人人讲安全、个个会应急”的良好氛围。

4 结语

隧道工程施工安全是一项复杂的系统工程，其核心在于对风险的敬畏和对规律的遵循。本文通过系统分析隧道工程的地质、施工及管理三大类风险，提出了涵盖超前预报、过程管控、环境治理等在内的综合防治措施，并着重构建了以“双重预防机制”为基础、以“智慧工地”为支撑的现代化安全监管体系。未来，隧道工程安全监管将呈现更加智能化、前瞻化的趋势。预测预警将更加精准，通过融合地质大数据、施工大数据和人工智能算法，实现对风险的超前、精准预测；应急响应将更加高效，基于数字孪生平台的应急指挥系统将实现救援资源的最优调度和救援路径的智能规划；而安全文化也将更加深入人心，通过持续的安全教育和激励机制，将“我要安全、我会安全、我能安全”的理念内化为全体建设者的自觉行动。

参考文献

- [1] 谭万林.隧道工程施工安全风险分析与管理策略[J].交通世界,2024,(29):9-11.
- [2] 王昌金.道路桥梁隧道工程施工技术及安全管控分析[J].运输经理世界,2023,(36):116-118.
- [3] 俞洋.隧道工程施工现场安全风险分析与安全管理措施[J].大众标准化,2023,(05):90-92.
- [4] 韩金刚.道路桥梁隧道工程施工技术与安全管控[J].大众标准化,2022,(24):148-150.