

# 高速公路隧道施工围岩支护优化与防坍塌技术研究

曹伟

杭州交通工程监理咨询有限公司，浙江杭州，310000；

**摘要：**高速公路隧道施工中，围岩稳定性直接决定施工安全与工程进度，围岩支护是控制围岩变形、防范坍塌事故的核心手段。文章先阐述围岩支护优化与防坍塌技术研究的核心意义，再围绕围岩支护优化的核心维度与防坍塌关键技术两大方向展开，最后明确二者协同应用的实践要点，为高速公路隧道施工规避坍塌风险、保障施工安全提供方向，推动隧道施工高效推进。

**关键词：**高速公路隧道；围岩支护；支护优化；防坍塌技术；施工安全

DOI：10.64216/3080-1508.26.01.029

## 引言

高速公路隧道工程的建设选址，往往需要穿越山地、丘陵等地形区域，这些区域的地质条件普遍复杂多样，涵盖断层、破碎带、地下水富集区等多种特殊地质构造。在隧道施工过程中，隧道开挖作业会对原本处于稳定状态的围岩产生直接扰动，打破围岩原有的应力平衡状态，引发围岩内部应力的重新分布。当前，随着高速公路建设向地形更复杂、地质条件更恶劣的区域延伸，隧道施工面临的地质环境日益复杂，对围岩支护的适配性、稳定性，以及防坍塌技术的精准性、及时性，均提出了更为严苛、更高层次的要求。在此行业发展背景与工程建设现实需求之下，系统开展高速公路隧道施工围岩支护优化与防坍塌技术的相关研究，不断完善支护方案与防坍塌体系，已成为保障隧道施工安全、提升隧道工程建设质量与效率的关键环节，对推动高速公路隧道工程建设技术的进步也具有重要意义。

## 1 高速公路隧道施工围岩支护优化的核心维度

### 1.1 支护参数优化：匹配围岩等级

围岩支护参数的优化，核心原则是实现与围岩等级的精准匹配，因为不同等级的围岩，在坚硬程度、岩体完整性、整体稳定性等关键特性上存在显著差异，对支护强度、支护范围的需求也截然不同。唯有让支护参数与围岩等级高度适配，才能既避免支护参数过高导致的人力、物力资源浪费，又防止支护参数过低无法满足围岩稳定需求，进而引发安全隐患。在开展支护参数优化前，需先对隧道沿线的围岩进行全面、细致的等级划分，通过地质勘察明确不同段落围岩的坚硬程度（如岩石单轴抗压强度）、完整性（如岩体完整性指数）、稳定性（如是否存在节理、裂隙发育），为参数调整提供精准

依据。针对围岩等级较高，即稳定性强、岩体完整性好、不易发生变形的围岩段落，可适当降低支护结构的整体强度，在参数调整上具体表现为：增大锚杆布设间距，减少锚杆的总用量；减薄喷射混凝土的施工厚度，降低混凝土材料消耗；无需额外增设钢拱架等强化支护构件，通过简化支护参数，在确保能够有效约束围岩变形、保障施工安全的前提下，提升现场施工效率，缩短施工周期，实现支护效果与施工效率的平衡。针对围岩等级较低，即稳定性差、岩体完整性弱、受开挖扰动后易快速变形的围岩段落，则需大幅提升支护结构的强度与支撑能力，在参数调整上具体表现为：缩小超前锚杆布设间距（或布设双排锚杆）并注浆饱满，同时增加锚杆的植入长度，增强锚杆对破碎岩体的锚固作用，提升围岩自身的整体性；隧道开挖后，立即进行喷射混凝土初喷作业，能迅速封闭岩面、有效控制围岩松动变形，保证施工安全、保证喷射混凝土支护效果。加厚喷射混凝土的施工厚度，让混凝土层能够承受更大的围岩压力，避免混凝土层开裂失效；隧道开挖轮廓线内侧增大钢拱架规格型号，缩小钢拱架间距，提高对围岩的支撑受力，做好钢拱架与喷射混凝土密贴；通过“喷射混凝土+锚杆+钢筋网+钢拱架”的支护参数组合，强化支护结构对围岩的约束能力，有效阻止围岩变形的进一步加剧，防止因支护不足引发围岩坍塌。

### 1.2 支护时机优化：把控开挖后窗口期

支护时机的选择，是影响围岩支护效果的关键因素之一，过早或过晚开展支护作业，均会对支护效果与施工安全产生不利影响。因此，支护时机优化的核心在于精准把控隧道开挖作业完成后的支护窗口期，在“不干扰施工”与“不引发围岩失稳”之间找到最佳平衡点，

既避免过早支护与开挖设备、开挖作业产生相互干扰，影响施工进度与作业安全，也防止过晚支护导致围岩应力失衡加剧，进而出现变形、开裂甚至坍塌。隧道开挖作业完成后，围岩原有的应力平衡被打破，进入应力重新分布与变形发展的阶段，这一阶段也是支护作业的关键窗口期。为精准判断窗口期，需在隧道开挖面及周边围岩上布设专业的监测设备，实时采集两项核心数据：一是围岩变形速率，即单位时间内围岩发生位移的距离；二是围岩位移量，即开挖后围岩累计发生位移的总距离。通过对这两项数据的实时监测与动态分析，判断围岩应力调整的趋势——是处于快速变形、应力剧烈变化阶段，还是变形速率逐渐放缓、应力逐步趋于稳定阶段。当监测数据显示，围岩变形速率呈现出逐渐放缓的趋势，且累计位移量达到预先设定的安全阈值（该阈值需结合围岩等级、隧道断面尺寸等因素确定）时，便是开展支护作业的最佳时机。此时，围岩虽已发生一定程度的变形，但尚未出现大幅开裂或失稳迹象，支护结构能够及时与围岩形成协同受力体系，有效阻断变形的进一步发展，最大化发挥支护结构的支撑作用，实现“以最小的支护成本，达到最佳的稳定效果”。若监测数据显示，围岩稳定性极差，开挖作业完成后短时间内便出现变形速率骤增、位移量快速上升的情况，说明围岩应力失衡速度快，极易快速失稳。此时，常规的支护窗口期已不存在，需立即采用“开挖即支护”的即时支护模式，在开挖作业完成一段、清理作业结束后，第一时间组织开展支护施工，最大限度缩短开挖作业与支护作业之间的间隔时间，通过快速支护为围岩提供即时支撑，防止围岩在应力调整过程中发生失稳坍塌。

### 1.3 支护结构优化：兼顾强度与适配性

围岩支护结构的优化，需同时兼顾两大核心目标：一是保障支护结构自身具备足够的强度，能够承受围岩传递的压力，避免因结构强度不足导致开裂、变形甚至失效；二是提升支护结构与具体地质条件的适配性，能够根据不同围岩的受力特点、变形趋势调整结构形式，确保支护结构能够均匀承受围岩压力，同时适应围岩的微量变形，避免因结构刚性过强、无法适应变形而损坏。常见的围岩支护结构优化，主要围绕“单一支护形式协同”与“多种支护形式组合”两类方式展开，通过结构形式的调整，提升支护效果。其一，是锚杆与喷射混凝土的协同优化。锚杆与喷射混凝土是隧道围岩支护中最基础、最常用的两种支护形式，二者协同作用可大幅提

升支护效果。在优化过程中，需根据围岩的受力特点调整二者的配合方式：例如，在围岩节理、裂隙发育较为密集的段落，围岩易因节理切割出现岩体破碎，此时需优化锚杆的布置方式，将常规的行列式布置改为梅花形布置，让锚杆能够更均匀地分布在围岩中，对破碎岩体形成更全面的锚固约束，减少岩体沿节理面的滑动；同时，调整喷射混凝土的施工顺序，先喷射一层薄混凝土封闭围岩表面，防止围岩风化，再植入锚杆，最后喷射第二层混凝土包裹锚杆，让二者形成一个完整的支护整体，提升对破碎围岩的支撑能力。其二，是钢拱架与其他支护形式的组合优化。钢拱架具备强度高、刚度大的特点，适用于围岩压力集中、稳定性差的段落，通过与锚杆、喷射混凝土的组合，可形成强度更高的复合支护结构。例如，在隧道洞口段、断层破碎带等围岩压力集中的区域，仅靠锚杆与喷射混凝土难以承受集中的围岩压力，此时需将钢拱架与二者结合，构建“喷射混凝土+锚杆+钢筋网+钢拱架”的复合支护结构：先按预设间距布设钢拱架，确保钢拱架与隧道开挖轮廓线初喷混凝土面密贴；锁脚锚杆应在钢架安装就位后立即施作，安装位置应在钢架连接钢板以上100~300mm，采用型钢钢架时设于钢架两侧；锚杆施工注意锚杆垫板密贴围岩，安装垫板、螺母，垫板应紧贴岩面，垫板与岩面不平整接触时，应用砂浆填实、螺母应拧紧，锚杆注浆饱满，最后喷射混凝土将钢拱架与锚杆完全包裹。这种复合结构既能通过钢拱架承受集中的围岩压力，又能通过锚杆与喷射混凝土将压力均匀传递至周边围岩，同时混凝土层可保护钢拱架不受腐蚀，延长支护结构的使用寿命，避免局部支护结构因受力过大而损坏，保障围岩长期稳定。

## 2 高速公路隧道施工防坍塌技术的关键方向

### 2.1 前期风险预判：精准识别隐患

前期风险预判是高速公路隧道施工防坍塌工作的基础环节，其核心目标是通过科学的技术手段，提前识别出可能引发围岩坍塌的隐患，为后续制定针对性管控措施提供依据，避免隐患隐藏至施工阶段，引发不可控的安全事故。前期风险预判需结合“施工前勘察”与“施工中超前地质预报监测”，通过双重手段实现隐患的精准识别，确保无遗漏、无误判。在隧道施工正式启动前，需开展全面、系统的前期地质勘察工作，勘察范围需覆盖隧道全长度及隧道开挖轮廓线外侧一定范围（确保覆盖可能影响隧道稳定的地质区域），勘察内容需聚焦与

围岩坍塌密切相关的三大核心要素，为风险预判提供基础数据支撑：一是勘察围岩岩性，明确岩石的类型（如岩浆岩、沉积岩、变质岩）、坚硬程度、风化程度，不同岩性的围岩，其抗变形能力与稳定性差异显著，直接影响坍塌风险等级；二是勘察地质构造，重点排查隧道沿线是否存在断层、破碎带、节理裂隙发育区等，明确各区域的风险等级，为后续施工方案制定与监测方案设计提供依据。在隧道施工过程中，前期勘察无法完全覆盖所有隐藏的地质缺陷（如小范围断层、局部地下水富集区），因此需通过实时监测技术，进一步补充完善风险预判，实现隐患的动态识别：一方面，采用地质雷达、红外探测等无损探测技术，对隧道开挖面后方尚未开挖的围岩进行实时探测，地质雷达可通过电磁波反射信号，判断后方围岩是否存在破碎带、空洞等缺陷，红外探测可通过温度差异，识别后方是否存在隐藏的地下水富集区，通过此类技术提前发现前期勘察未察觉的地质缺陷，避免开挖后引发坍塌；另一方面，在隧道开挖面周边及隧道拱顶、拱腰等关键部位，布设固定的位移监测点，采用全站仪、测斜仪等设备，实时采集围岩的变形数据（包括变形速率与累计位移量），并对数据进行实时分析。当监测数据出现异常变化，如变形速率骤增、累计位移量超出安全阈值时，可通过数据变化趋势预判围岩是否即将发生坍塌，及时发出风险预警，为后续采取管控措施争取时间，避免事故发生。

## 2.2 施工过程管控：阻断风险发展

施工过程管控要抓开挖和支护两个关键环节，按规范操作，阻止坍塌风险扩大。开挖时，要按围岩等级选合适的开挖方法。围岩好的段落，可一次挖完整个断面，加快施工；围岩差的段落，要分成小断面，用台阶法、预留核心土、双侧壁导坑法、CD法等分步开挖。每挖完一部分，就及时支护，减少对围岩的干扰，避免应力集中。支护时，要严格按优化后的方案施工，把控关键指标。锚杆要打够深度，喷射混凝土要够厚，钢拱架间距要符合要求。支护完成后，要检查质量，找出问题并及时修好，防止支护失效引发坍塌。

## 2.3 应急处置技术：降低事故影响

发现坍塌隐患或已发生小型坍塌，要快速采取措施，减少损失，防止风险扩大。监测到围岩变形快、有坍塌迹象时，要立即停止开挖，组织人员和设备撤离。然后用喷射混凝土快速封闭危险区域的围岩，防止风化、掉

块。若已发生小型坍塌，先确认无二次坍塌风险，再清理坍塌物。清理完成后，用“钢拱架+锚杆+喷射混凝土”加固坍塌区域。等支护稳定后，再慢慢恢复施工。

## 3 高速公路隧道施工围岩支护与防坍塌技术协同应用要点

### 3.1 以风险预判结果为依据，指导支护优化

前期勘察与施工监测明确风险区域及等级后，需针对性调整支护方案：高风险区域，既要强化支护强度、提前开展支护作业，也要加密监测点布设数量、缩短监测间隔时间，实时掌握风险变化；低风险区域，可适当简化支护参数以提升效率，但必须保留基础监测措施，防止地质条件突变引发突发风险。

### 3.2 靠过程管控保障支护质量，再以监测验证效果

需将支护施工规范纳入防坍塌管控体系，严格把控锚杆深度、混凝土厚度等参数，规范施工流程，确保支护质量达标；支护完成后，通过围岩位移、支护结构应力等监测，验证支护效果，若发现应力超标或围岩持续变形，及时调整支护方案，形成管控与优化的闭环。

### 3.3 把支护优化融入应急处置

处理坍塌隐患或小型坍塌时，除采取临时加固措施外，需深入分析问题成因：若因支护时机过晚，后续同类区域需提前支护；若因支护强度不足，后续则需提升支护参数，通过应急处置持续优化支护方案。

## 4 结语

高速公路隧道施工中，围岩支护优化是防范坍塌的核心手段，防坍塌技术是保障施工安全的关键支撑。通过从支护参数、时机、结构维度优化支护方案，结合风险预判、过程管控、应急处置构建防坍塌体系，再推动二者协同应用，可有效控制围岩变形、规避坍塌风险。唯有将支护优化与防坍塌技术深度融合，才能为高速公路隧道施工安全提供坚实保障，推动隧道工程高效、高质量建设。

## 参考文献

- [1]应文生.高速公路隧道防排水施工技术研究[J].四川建材, 2022 (1) : 122-123.
- [2]淡碧.高速公路隧道防排水技术与施工[J].中国设备工程, 2021 (7) : 242-243.
- [3]张佳.高速公路隧道防排水施工技术的应用探究[J].智慧城市, 2021 (5) : 91-92.