

喷锚加固技术在道路边坡工程施工中的应用

程 城

(四川雅西高速公路有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘 要 在道路工程施工中, 喷锚加固技术因具有协同受力、施工灵活等特点, 已成为道路边坡加固支护最常用的工艺, 锚杆、钢筋网以及喷射混凝土等构件互相配合提高边坡的整体稳定性。本文从锚杆悬吊、组合梁拱效应、混凝土面层约束以及注浆填充黏结四个角度分析支护原理, 明确该技术适合应用的场景, 并结合道路边坡的施工梳理施工准备、修整边坡等全流程施工工艺及质量控制要点, 以期同类道路边坡支护工程施工提供参考。

关键词 喷锚加固技术; 道路边坡工程; 喷射混凝土

中图分类号: U416.1+4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.018

0 引言

随着我国交通基础设施建设不断向山区、丘陵地带延伸, 道路工程建设中高陡路堑边坡、破碎岩土边坡的数量大幅增加, 边坡属于道路工程的附属结构, 其稳定性直接影响道路施工安全及后续通行保障。传统的边坡支护方法存在施工量大、对场地适配性差等不足, 喷锚加固技术属于复合型柔性支护工艺, 能适配不同类型边坡的加固要求, 目前已经广泛应用于道路边坡新建施工、病害加固以及应急抢险工程中。

1 喷锚加固技术工作原理

1.1 工作原理

喷锚加固技术的工作原理, 从力学角度可以分成四个主要方面: 第一, 锚杆的悬吊作用, 边坡内部有明显的软弱结构面或者潜在滑动面, 装上长度、密度都足够的锚杆能把锚固段稳稳固定在滑动面下面的稳定岩土层里, 自由段则会穿过潜在滑动体^[1]。滑动体往下滑的力会通过锚杆的拉拔抗力传到稳定地层里, 将不稳定的部分“悬吊”在稳定的基岩上; 第二, 组合梁(拱)效应, 针对层状岩体或者破碎岩体按系统布置好的锚杆能把原本各自分开的岩层、岩块串成整个整体, 锚杆施加的预应力使岩层之间产生挤压力形成有一定厚度的组合梁或者承载拱结构, 这种组合结构的抗弯刚度及抗剪能力比单个岩层要大很多; 第三, 喷射混凝土的面层约束作用, 喷射混凝土覆盖在边坡表面和里面的钢筋网一起组成柔性防护面层, 这个面层可以直接把坡面封住, 避免雨水冲刷、风化剥落还有浅层掉块的问题, 同时面层会给坡面岩土体加上

一定的侧向约束力, 限制坡体出现横向变形问题; 第四, 注浆的填充及黏结作用, 锚杆装好之后进行压力注浆来固定锚杆, 此过程中注浆浆液会在压力作用下顺着岩土体的裂隙、孔隙扩散开, 将空隙填满并将破碎岩块重新胶结在一起, 注浆完成后锚杆和周围的岩土体之间会形成牢固的黏结体增强锚杆的抗拔承载力。

1.2 适用场景

喷锚加固技术虽然优点很多, 但不能适配所有类型的道路边坡, 结合长期以来的工程实际应用, 喷锚加固技术的适用场景主要可以分成以下几类:

1. 岩质边坡, 针对岩浆岩、沉积岩以及变质岩这类硬质岩边坡, 喷锚加固能收获不错的效果。当岩体存在不利结构面组合但岩块本身强度还能满足要求时, 依靠锚杆的串联作用以及注浆的填充作用能优化岩体结构。

2. 具备一定自稳能力的土质边坡。喷锚加固同样适用于黏性土、粉土以及碎石土等类型的边坡, 这类土体能在一定高度范围内保持直立或陡坡状态, 在施工过程中形成临时自稳坡面, 为钻孔、注浆等作业创造有利条件。对于纯砂土、松散填土等自稳能力很差的土体, 单独使用喷锚技术很容易出现塌孔、流砂等问题, 需要配合管棚、超前小导管或降水措施使用。

3. 加固既有边坡及应急抢险, 对于已经出现局部滑塌、落石等失稳预兆的边坡, 喷锚加固可以快速施工在短时间内提供支护力, 因为施工设备轻便不需要进行大规模土石方工程, 尤其适合山区公路上边坡的抢险作业。

作者简介: 程城(1993-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

4. 施工场地受限、不宜动用大型设备的路段，比如紧邻已有建筑物、高压线塔或是重要管线的边坡，无法进行大规模开挖和重型机械施工，喷锚加固依靠所用机型小、作业灵活的特点成为首选。

2 道路边坡工程中喷锚加固施工工艺流程

2.1 施工准备

施工前，项目技术负责人应组织有关人员认真熟悉设计图纸、地质勘察报告及周边环境资料，明确边坡支护的范围、锚杆类型等关键技术参数^[2]。在此基础上编制专项施工方案，专项方案需经监理单位审批，对于危险性较大的分部分项工程还应组织专家论证。完成方案审批后，对所有参建人员进行技术交底及安全技术交底，使操作工人明确锚杆钻孔角度、注浆压力等操作要点及潜在风险。材料准备应严格遵循“先检验后使用”的原则，锚杆杆体通常采用 HRB400 级及以上热轧带肋钢筋，其直径、长度根据设计确定，进场后应核验质量证明文件并按批次进行力学性能检验。注浆材料一般采用 42.5 级普通硅酸盐水泥，砂采用中细砂且含泥量不得大于 3%。速凝剂、早强剂等外加剂应与水泥进行相容性试验。钢筋网片可采用预制焊接网或现场绑扎，网格间距偏差应控制在 ±10 mm 以内，

所有材料应存放于防雨、防潮的场地，机具准备应根据工艺要求合理配置，并在施工前应试运转所有设备。

2.2 修整边坡

修整边坡应在边坡开挖到预定位置后立即进行，避免坡面长时间暴露导致风化加剧或局部坍塌，采用测量仪器按设计坡率放出坡顶线、坡脚线及每级边坡的平台位置，并用石灰线或明显标志标出^[3]。对于分级开挖的边坡，每开挖一级即修整一级，严禁一次开挖到基底再进行大面积修整以免造成边坡失稳。施工方法以机械配合人工为主，岩质边坡使用挖掘机或液压破碎锤将突出的大块岩石初步剥离，然后由人工用风镐或撬棍清除坡面上松动、破碎的岩块，剔除倒坡或反坡部分。对于土质边坡，挖掘机按照设计坡率进行粗修，预留 3 cm ~ 5 cm 厚度由人工进行精细修整以保证坡面平顺。在修整过程中，应及时清理坡面上的树根、草皮、垃圾等杂物。

2.3 钻孔施工

钻孔施工应严格按照设计图纸进行，并注意控制孔位、孔径、孔深及倾斜角度等核心参数（如表 1 所示）。采用全站仪或经纬仪，根据设计图纸中锚杆的平面布置图在修整好的坡面上准确标定每个锚孔的位置，锚孔通

表 1 钻孔施工核心参数控制一览表

质量控制项目	质量要求及检查方法
孔位	按设计图纸放样，允许偏差 ±50 mm；采用全站仪或尺寸检查
孔径	一般比锚杆直径大 20 mm ~ 30 mm，常用 Φ70 mm ~ Φ130 mm；用卡尺或孔径检测仪检查
孔深	不应小于设计长度，且超深不小于 500 mm；用测绳或专用量具检查
钻孔倾角	符合设计角度（一般为下倾 10° ~ 25°），允许偏差 ±2°；用量角器或钻孔测斜仪检查
孔内清洁度	成孔后应用高压风或水清孔，孔内无岩粉、泥屑及积水；观察及检查清孔返出物

常按正方形或梅花形布置，间距一般为 1.5 m ~ 2.5 m。孔位放样后应用红色油漆或铁钉作永久标记，孔位偏差应控制在 ±50 mm 以内，超过偏差者应重新标定。钻孔设备的选择应根据岩土条件确定，硬质岩层应采用大功率风动潜孔锤钻机；软岩或土质边坡可采用旋转式钻孔机或螺旋钻机；破碎地层宜采用跟管钻进工艺以防止塌孔。

钻进过程中应注意以下事项：第一，保持钻机平台稳定，防止钻进中机身晃动导致孔位偏移；第二，对于易塌孔的松散地层，可采用泥浆护壁或套管跟进方式，严禁长期空钻；第三，当遇到大粒径块石、孤石或旧基础等障碍物导致无法按设计方向钻进时，应征得设计单位同意后适当调整孔位或角度，不得擅自

废除锚孔；第四，记录钻进过程中岩土性质变化及卡钻、掉钻等异常情况，作为判断锚固段持力层是否满足要求的依据。

2.4 安装锚杆及注浆

锚杆杆体的制作应在加工场集中进行，按照设计长度下料，杆体长度应比孔深短 300 mm ~ 500 mm，以便于安装并留出注浆管空间。对于全长黏结型锚杆，沿杆体轴线方向每隔 1.5 ~ 2.0 m 应设置一个对中支架，对中支架可采用 Φ6 ~ Φ8 钢筋弯制焊接于主筋上，其外径略小于钻孔直径，形成均匀的保护层厚度。对于预应力锚杆，还需在自由段做防腐隔离处理，杆体端部宜留出 100 mm ~ 150 mm 以焊接锚头及钢筋网^[4]。安装锚杆前应再次检查钻孔是否通畅、有无坍孔，土

质边坡及易塌孔地层安装应清孔后立即进行,人工或借助小型机械将锚杆缓慢推送入孔,禁止重锤敲击强行打入以免破坏孔壁或导致杆体弯曲。当杆体推送受阻时应退出后重新清孔或扩孔,不得强行砸入。

注浆材料及配合比:一般采用水泥砂浆或纯水泥浆,水泥强度等级不低于42.5级,水灰比控制在0.4~0.5之间或灰砂比1:0.5~1:1,可掺入适量减水剂或微膨胀剂以提高注浆密实度。注浆工艺要求采用压力注浆,注浆管应随锚杆一起送入孔底或单独插入距孔底200 mm~300 mm处。注浆时先开泵再慢慢拔出注浆管,始终保持注浆管出口位于浆液面以下,采用“孔底注浆、带压返浆”的方式,当孔口出现连续均匀的浆液流出且流量大于进浆量时暂停注浆,待3 min~5 min后进行二次补浆直至孔口完全饱满。

2.5 铺设钢筋网

钢筋网通常采用HPB300或HRB400级钢筋,直径一般为 $\Phi 6 \sim \Phi 10$,网格尺寸多为150 mm $\times$ 150 mm、200 mm $\times$ 200 mm或250 mm $\times$ 250 mm,网格尺寸过大面层刚度不足;过密影响喷射混凝土穿透性能并增加成本。铺设前应检查坡面是否平整,清除凸起的岩石或土块,网片应沿坡面自上而下或自下而上依次展开。钢筋网应与坡面保持一定的保护层距离,通常要求钢筋网与坡面的净距不小于5 cm,以便喷射混凝土能够完全包裹钢筋并形成有效的黏结。具体做法是:在锚杆端部焊横向短钢筋,或设置混凝土垫块,将网片托离坡面。对于边坡转角处、坡顶边缘、坡脚及变形缝等部位应进行加强处理,坡顶处钢筋网应向外翻边延伸不少于1.0 m,并锚入坡顶地层中防止坡面顶部脱开。

2.6 喷射混凝土施工

喷射混凝土的原材料及配合比应符合设计要求。一般使用强度等级为C20~C30的混凝土,水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥;细骨料采用中粗砂,细度模数2.5~3.2;粗骨料最大粒径不应大于15 mm,卵石或碎石均可。水灰比控制在0.4~0.45之间,坍落度宜控制在80 mm~120 mm。速凝剂的掺量应经试验确定,一般为水泥质量的3%~6%,要求初凝时间不大于5 min,终凝时间不大于10 min^[5]。喷射作业应分段、分片、自下而上的顺序进行,分段长度一般不超过6 m,分片宽度2 m~3 m。自下而上的顺序可以使先喷的混凝土形成“台阶”,承托后喷的混凝土减少因自重导致的脱落和下垂。一次喷射厚度不宜过大,通常为50 mm~80 mm,设计厚度超过80 mm的喷层应分两层或三层喷

射,每层间隔时间为前一层混凝土终凝后。喷射过程中应随时观察混凝土的回弹情况、密实度及表面状态,如发现混凝土干斑或流淌应及时调整水量。在钢筋网部位,应特别注意使混凝土能够充分包裹钢筋背面,避免出现“空壳”或“阴影”现象,必要时可调整喷射角度或适当加密喷射遍数,边坡内的排水管、伸缩缝等部位应采取遮挡措施,防止混凝土堵塞。

2.7 养护防护

喷射混凝土终凝后应立即开始养护,由于混凝土喷层厚度较薄水分蒸发迅速,若不及时养护极易产生塑性收缩裂缝和干缩裂缝,影响外观的同时会降低面层的封闭性能。养护方法可采用以下方式之一或组合:

(1)覆盖土工布或草帘,并洒水保持湿润;(2)喷涂养护剂,在混凝土表面形成连续保水薄膜;(3)铺设塑料薄膜,配合定期洒水。养护用水应清洁,pH值不小于6。养护频率以保证混凝土表面始终处于湿润状态为度,一般白天每隔2小时~4小时洒水一次,夜间至少一次。养护持续时间不应少于7天,对于重要工程或寒冷地区、大风干燥气候条件下,应延长至14天。养护期间,应在坡脚设置围挡或警示带,严禁人员踩踏坡面,不得在坡面上堆放材料或设备,避免产生冲击荷载。

3 结束语

喷锚加固技术区别于单一支护工艺,依托多重协同作用从根本上改善道路边坡岩土体的力学性能,解决边坡风化、浅层剥落等稳定性问题,是适配现代复杂道路边坡工程的优质支护技术。现阶段,喷锚加固技术已成为道路边坡支护工程的主流工艺,随着交通工程建设标准的不断提升,未来还需持续优化施工工艺,进一步提升喷锚支护技术的长期稳定性,为道路工程安全建设提供保障。

参考文献:

- [1] 李颖.喷锚技术在高边坡加固施工中的应用[J].江苏建材,2025(02):112-114.
- [2] 王亚军.山地公路边坡防护锚喷支护技术[J].工程建设与设计,2024(06):136-138.
- [3] 王建.喷锚加固技术在公路边坡工程中的应用研究[J].工程技术研究,2024,09(02):73-75.
- [4] 刘绘强.锚喷技术在边坡支护中的应用[J].石材,2023(08):128-130.
- [5] 高海鹏.锚喷支护技术在高速公路边坡防护工程中的应用[J].居舍,2021(20):31-32.