

高分子复合材料在土地边坡防护工程中的抗侵蚀性能及施工指南

于海玲

林甸县不动产登记中心 黑龙江 大庆 166300

摘要: 高分子复合材料在土地边坡防护工程中展现出卓越的抗侵蚀性能。其通过物理结构加固(如纤塑格栅的摩擦-锁固-阻抗机制)、化学稳定性提升(如高分子改性沥青的耐盐碱特性)及生态协同作用(如SSP基材促进植被根系加筋),有效抵御水流冲刷、土壤盐渍化及地质变形。施工时需根据边坡类型选材,规范基层处理、材料铺设及生态修复流程,并强化质量控制与长期监测,以实现工程安全与生态效益的双重目标。

关键词: 高分子复合材料;土地边坡防护工程;抗侵蚀性能;施工指南

引言:土地边坡失稳与侵蚀问题频发,传统防护材料因耐久性不足、生态适配性差等局限难以满足复杂工程需求。高分子复合材料凭借其高强度、耐腐蚀、抗冲刷及生态友好特性,逐渐成为边坡防护领域的核心解决方案。其通过物理结构加固、化学稳定性提升及生物协同作用,显著增强边坡抗侵蚀能力,同时兼顾生态修复功能。本文系统梳理高分子复合材料的类型与性能机制,结合工程实践提出全流程施工指南,旨在为边坡防护工程提供科学、高效的技术参考。

1 高分子复合材料类型及特性分析

1.1 材料分类

(1)土工格栅类:以纤塑格栅、高分子稳定剂改性土工网为典型代表。纤塑格栅采用高分子材料层包裹玻璃纤维、碳纤维等有捻纱形成复合条带,经纵横向排列焊接制成网状结构,结点极限剥离力显著提升,整体抗拉强度大且变形小;高分子稳定剂改性土工网则通过添加剂优化,增强与土壤的协同受力性能,适用于路基加固等场景。二者均具备耐酸碱腐蚀特性,性价比优于传统钢塑格栅。(2)生态护坡材料:包含SSP稳定土植生护坡基材、碳汇卷生态修复材料。SSP基材融合高分子粘剂与植生组分,可快速形成稳定基质层;碳汇卷材料多采用生物基高分子与天然纤维复合,兼具固土与碳封存功能,契合绿色修复需求。这类材料普遍采用可降解组分,减少环境残留风险。(3)防水防腐材料:主要有高分子改性沥青防腐涂料、复合土工膜。复合土工膜由聚乙烯、聚氯乙烯等高分子膜与土工织物复合而成,兼具防渗透与抗穿刺性能,在油气管线防护、油田污水处理池等场景广泛应用,可有效阻隔腐蚀性介质;高分子改性沥青涂料通过纳米增强技术提升附着性,强化防腐效果。

1.2 核心性能指标

(1)抗拉强度与柔韧性:纤塑格栅抗拉强度达200MPa以上,焊接结点结构均一,可适应地基沉降等复杂变形;复合土工膜拉伸强度随基材不同可达15-30MPa,柔韧性使其能紧密贴合不规则基面,避免开裂。(2)耐腐蚀性:高分子改性沥青在盐碱地中耐盐性能提升50%以上,可抵御土壤中氯离子侵蚀;纤塑格栅因原材料耐酸碱盐特性,长期使用中抗拉强度无明显衰减,适用于化工污染场地修复^[1]。(3)抗冲刷性:高分子稳定剂改性土抗冲刷率可达98.9%(模拟降雨强度2.8L/min),能有效抵御暴雨径流冲击;复合土工膜在油田防渗工程中,可承受水力冲击而不剥离,渗漏量近乎为零。(4)生态适配性:SSP技术支持30天形成茂盛植被,90天构建稳定植物群落,基材降解产物无环境污染;碳汇卷材料通过生物相容性设计,可促进微生物繁殖,加速土壤改良进程。

2 高分子复合材料在土地边坡防护工程中的抗侵蚀性能机制研究

2.1 物理防护机制

(1)结构加固:土工格栅通过网状结构构建“土体-筋材”复合体系,实现荷载分散与位移约束的双重效应。其表面粗糙度与土颗粒形成强烈摩擦作用,界面摩擦系数可达0.4-0.6,当土体出现位移趋势时,摩擦力直接阻碍滑动。网格结构对土颗粒的锁固作用类似榫卯连接,可限制颗粒侧向移动,尤其在土石混合边坡中能固定大粒径石块。同时,格栅肋条的被动阻抗作用会产生反作用力抵抗土体变形,使边坡抗滑稳定系数提升15%-30%,显著减少软土地基的不均匀沉降。这种“摩擦-锁固-阻抗”的协同机制,将局部应力均匀传递至更大范围土体,从物理结构上阻断侵蚀引发的边坡失稳^[2]。(2)抗

冲刷增强：高分子稳定剂通过渗透、缠绕作用与土颗粒形成三维网状膜结构，成为抵御水流侵蚀的核心屏障。以醋酸乙烯酯类稳定剂为例，其分子链通过氢键与阳离子置换反应，在土颗粒表面及孔隙内形成疏水性弹性膜，72小时养护后即可使改性土抗冲刷性能趋于稳定。降雨模拟试验显示，未改良土体冲刷率高达70.2%，而20%浓度稳定剂处理的试样冲刷率仅5.5%，30%浓度时更是低至1.1%，表面无明显冲沟发育。纳米高分子固化剂（NPCA）在砂质边坡中表现更优，3%质量比时可形成23mm厚加固层，通过范德华力绑定颗粒，大幅降低土体崩解系数。

2.2 化学防护机制

（1）耐腐蚀性：高分子改性沥青通过分子结构优化增强化学稳定性，构建离子渗透阻隔层。其改性组分中的长链聚合物与纳米颗粒形成致密网络，可阻断盐碱地中氯离子、硫酸根离子的迁移路径，在pH值3-11的极端环境中仍能保持结构完整。在滨海盐碱边坡工程中，经改性处理的防护层可使土体盐渍化速率降低60%以上，避免盐分结晶导致的土体松散与结构破坏。这种化学惰性不仅延长材料服役寿命，更能保护基层土体免受腐蚀性介质侵蚀。（2）土壤改良：高分子稳定剂通过化学调节与微观结构优化改善土体理化性质。一方面，其分子链携带的功能性基团可中和土壤酸碱度，将膨胀土pH值调节至6.5-7.5的植被适宜范围，同时抑制土传病害菌滋生；另一方面，通过填充孔隙与颗粒包裹，使膨胀土自由膨胀率从45%降至12%以下，显著提升水稳定性。纳米高分子材料还能促进土壤团粒结构形成，使砂质土团聚体含量增加30%，增强保肥保水能力，为边坡生态修复奠定基础。

2.3 生态协同机制

（1）植被根系加筋：SSP稳定土植生基材构建“基材-根系-土体”一体化加固体系，实现生物与工程防护的融合。基材中的高分子粘结剂快速固定表层土，为种子萌发提供稳定基质，30天形成的植被根系可深入土体15-20cm，与基材纤维交织形成三维网络。这种复合体使土体抗剪强度提升40%-60%，在南京-淮安高速公路膨胀土边坡试验中，根系加筋边坡的抗滑稳定性较纯工程防护提高25%。根系的“锚固效应”与基材的“粘结效应”协同作用，有效抵御降雨与径流引发的浅层滑坡^[3]。（2）水分调节：高分子材料的亲水性分子链构建土壤水分缓冲系统，平衡边坡水文环境。其链状结构通过氢键吸附水分，在干旱时缓慢释放，使土体含水率维持在18%-22%的适宜范围，减缓干裂现象；在暴雨时则通过网状膜的疏水性限制水分快速下渗，降低孔隙水压力。碳汇卷生态修复材料尤为典型，其生物基高分子组分的保水率可

达自身重量的300%，配合植被蒸腾作用调节边坡水分循环，90天即可形成稳定植物群落，进一步通过植被截流强化抗侵蚀效果。

3 高分子复合材料在土地边坡防护工程中的施工指南与工艺优化

3.1 施工前准备

3.1.1 材料选择

（1）适配性选型策略：土质边坡坡度 $\leq 1:1.5$ 时，优先选用纤塑格栅配合高分子稳定剂组合方案，利用格栅的结构加固与稳定剂的抗冲刷协同效应；高陡岩质边坡（坡度 $> 1:0.75$ ）如拉萨拉鲁湿地北山采石场案例，需采用SSP稳定土植生基材结合团粒喷播技术，兼顾结构稳定与生态修复。寒区边坡优先选择耐低温脆化的聚乙烯基复合材料，滨海盐碱区则选用经盐雾3000h测试的PVC包塑材料，确保拉伸强度变化率 $\leq 25\%$ 。（2）性能指标验证体系：纤塑格栅需检测纵向抗拉强度 $\geq 200\text{MPa}$ 、结点剥离力 $\geq 300\text{N}$ ，采用万能试验机进行单轴拉伸试验；高分子稳定剂通过黏絮性测试，观察2%浓度溶液与土样混合后的团聚效果，确保静置12h无分层。进场材料需附带第三方检测报告，重点核查耐光性、耐腐蚀性等长期性能指标，避免因材料老化导致后期防护失效。

3.1.2 现场勘察

（1）多维条件评估：采用地质雷达探测土层结构，明确软弱夹层分布及厚度，结合水位计监测地下水位变化规律，预判边坡渗流风险；收集近5年降雨数据，按50年一遇标准设计防护强度，如年降雨量 $> 1200\text{mm}$ 区域需加密排水设施。温差剧烈地区需评估材料热胀冷缩系数，预留伸缩缝避免开裂。（2）排水系统设计：坡顶设置截水沟，沟宽 $\geq 40\text{cm}$ 、纵坡 $\geq 2\%$ ，沟底铺设复合土工膜防渗层；坡面每隔10-15m设置横向排水沟，与坡底主排水沟连通，沟内填充粒径20-40mm碎石作为滤层。高含水量边坡增设盲沟，采用透水土工布包裹碎石，间距根据地下水位高度调整，确保排水效率。

3.2 施工流程与关键技术

3.2.1 基础处理

（1）坡面整形优化：采用液压镐清除松散岩块，凸凹处采用C20混凝土找平，确保坡面平整度误差 $\leq 5\text{cm}$ 。土质边坡需用夯实机压实，北方地区夯实度 $\geq 80\%$ ，南方潮湿区域先铺设透水土工布隔离湿气。对危岩体采用锚杆固定，锚杆间距2-3m，深入基岩深度 $\geq 1.5\text{m}$ 。（2）地基加固工艺：软土地基采用“格栅嵌入+换填”组合方案，将纤塑格栅沿基础底板水平嵌入，延伸长度 $\geq 3\text{m}$ ，层间距 $\leq 1\text{m}$ ，上部换填30cm厚碎石层。高压缩性地基可掺入

3%纳米高分子固化剂(NPCA),通过深层搅拌形成复合地基,使地基承载力特征值提升至180kPa以上^[4]。

3.2.2 材料铺设

(1) 纤维格栅施工:从坡脚向坡顶连续铺设,沿等高线方向展开,相邻两幅重叠边距 $\geq 30\text{cm}$ (长度方向)、搭接宽度 $\geq 20\text{cm}$ (宽度方向)。采用 $\phi 12\text{mm}$ 钢筋锚杆锚固,锚杆长度 $\geq 50\text{cm}$,间距 $\leq 1.5\text{m}$,坡顶及坡脚加密至 1m 。铺设后48h内完成填料填筑,避免阳光暴晒导致材料老化。(2) 土工格室安装:采用联建扣连接格室单元,展开后调整角度使格室轴线与坡面等高线平行,格室高度 $20\text{--}30\text{cm}$,坡率严格控制 $\leq 1:0.75$ 。填充料优先选用级配碎石与种植土混合材料,含水率控制在 $18\%\text{--}22\%$,每层填充厚度 $\leq 30\text{cm}$,采用轻型压路机压实,避免格室变形。(3) 高分子稳定剂喷洒:采用高压喷雾机均匀喷洒,单位面积用量 $3\text{L}/\text{m}^2$,分两次进行(间隔 2h),确保药剂渗透深度 $\geq 5\text{cm}$ 。砂质边坡可掺入 2% 膨润土增强黏结效果,喷洒后覆盖土工布养护 48h ,采用模拟降雨强度 $2.8\text{L}/\text{min}$ 进行冲刷测试,达标后方可进行下道工序。

3.2.3 生态修复

(1) 喷播施工技术:SSP基材按“高分子粘结剂 $2\%+$ 泥炭土 $30\%+$ 种子混合物 $5\%+$ 水”配比搅拌,采用液压喷播机从坡底向坡顶分层作业,喷播厚度 $8\text{--}10\text{cm}$,每平方米种子用量 $15\text{--}20\text{g}$ 。高海拔地区如拉萨案例,可掺入青稞秸秆制备“优粒土壤”,减少客土用量 50% 。(2) 覆盖与防护措施:喷播后覆盖互锁式人造纤维,纤维搭接宽度 $\geq 15\text{cm}$,边缘用U型钉固定。虫害高发区域掺入 0.5% 天然除虫菊酯,干旱地区覆盖可降解地膜,配合自动喷淋系统维持基材含水率,降低养护成本 60% 以上。

3.3 质量控制与监测

3.3.1 施工监测

(1) 材料铺设检测:采用全站仪检查格栅平整度,允许偏差 $\pm 2\text{cm}$,无褶皱、破损现象;接缝处采用拉力测试

器抽检,剥离强度 $\geq 200\text{N}/5\text{cm}$ 。土工格室填充后检测格室高度衰减率,不得超过 10% 。(2) 系统功能监测:雨季每 24h 巡查排水系统,采用水位传感器监测沟内水位,发现堵塞立即采用高压水枪冲洗。设置边坡位移观测点,每 3天 监测一次,位移速率超过 $2\text{mm}/\text{d}$ 时暂停施工并加固。

3.3.2 后期养护

(1) 设施维护方案:每月清理排水沟杂物,每季度检查材料完整性,改性沥青涂层裂缝采用专用修补剂灌注,裂缝宽度 $> 5\text{mm}$ 时需重新涂刷。土工格栅破损处采用同规格材料搭接修补,搭接宽度 $\geq 20\text{cm}$ 。(2) 植被精细化养护:选用百喜草、沙棘等乡土物种,出苗期($1\text{--}30\text{天}$)每 3天 喷淋一次,成苗期($30\text{--}90\text{天}$)每周一次。根据植被生长阶段调整施肥频率,苗期施氮肥($10\text{g}/\text{m}^2$),花期施磷钾肥($15\text{g}/\text{m}^2$),确保 90天 内植被覆盖率 $\geq 90\%$ 。

结束语

高分子复合材料凭借其优异的抗侵蚀性能与生态适应性,已成为土地边坡防护工程的关键技术选择。其通过多尺度防护机制(物理加固、化学抗腐、生态协同)有效应对复杂环境挑战,显著提升边坡稳定性与生态功能。未来需进一步优化材料性能、完善施工规范,并加强全生命周期监测与智能养护技术研究,以推动高分子复合材料在绿色基础设施领域的规模化应用,实现工程安全、生态保护与可持续发展的有机统一。

参考文献

- [1]王宇航,张聪,王业强.高分子材料应用探究[J].建筑技术科学,2023,(12):82-83.
- [2]闫清峰,张纪刚.纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展[J].科学技术与工程,2021(36):153-154.
- [3]吴显庆.高分子材料与工程中的高分子复合材料的性能与应用研究[J].建筑技术科学,2023,(10):107-108.
- [4]刘东.高延性纤维增强水泥基复合材料的发展及应用[J].运输经理世界,2022,(27):146-148.