

# 水利工程中土工合成材料的应用现状及性能改进研究

曹 宁 陈文龙

山东泉建工程检测有限公司 山东 济南 250000

**摘 要：**土工合成材料在水利工程中具有广泛应用，涵盖防渗、加固、排水及防护等关键领域。本文系统分析材料应用现状，指出在轻质高强、施工便捷等方面的技术优势，同时探讨材料性能局限与环境适应性等现存挑战。从材料配方优化、结构创新、表面处理及施工工艺四方面提出性能改进路径，并阐述性能提升对工程安全、经济效益及生态保护的积极影响。最后展望智能化、定制化等未来发展趋势，为水利工程材料创新提供参考。

**关键词：**土工合成材料；水利工程；性能改进；结构创新；可持续发展

引言：水利工程作为基础设施建设关键部分，对防洪、灌溉、供水等意义重大。土工合成材料凭借独特功能特性，在水利工程中应用日益广泛。然而，现有材料在性能、环境适应性等方面存在局限，制约进一步发展。因此，研究土工合成材料性能改进的关键技术方向，对提升水利工程安全性、经济性与可持续性，拓展应用场景具有重要现实意义。

## 1 土工合成材料在水利工程中的应用现状

### 1.1 主要应用领域

在水利工程中，土工合成材料凭借其独特功能特性，已渗透至多个关键领域。防渗工程方面，大坝、渠道及蓄水池等水利设施的防渗体系构建中，土工合成材料通过阻断水流路径，有效减少渗漏损失。例如，在堤坝工程中，土工膜作为核心防渗层，可显著降低坝体浸润线，提升结构稳定性<sup>[1]</sup>。加固工程中，边坡稳定、地基加固及挡土墙结构增强等场景均依赖土工格栅的高强度加筋作用。通过增强土体抗剪能力，土工格栅可有效抑制土体位移，防止滑坡或坍塌。排水工程领域，地下排水系统与反滤层设计中，土工织物凭借透水性与反滤功能，在保持土壤结构稳定的同时，实现高效排水，避免因积水导致的工程失效。防护工程中，河道治理、防洪堤建设及岸坡侵蚀防护等场景，土工合成材料通过表面覆盖或结构加固，减少水流冲刷对岸坡的破坏，延长工程使用寿命。

### 1.2 材料类型与功能特性

不同类型土工合成材料的功能特性直接决定了应用场景。土工膜以高防渗性为核心优势，通过高分子聚合物分子链的致密排列，形成极低渗透性的水力屏障，适用于对防渗要求严苛的工程。土工织物则通过纤维交织形成的孔隙结构，实现透水性与反滤功能的平衡。其孔隙尺寸经过精准控制，既能允许水分通过，又能有效拦

截土壤颗粒，防止土体流失。土工格栅以高强度加筋作用著称，其网格结构通过与土体嵌锁，显著提升土体抗剪强度，尤其适用于软土地基加固或边坡稳定工程。复合材料则通过多层结构集成多种功能，例如将土工膜与土工织物复合，可同时实现防渗与排水功能，满足复杂工程需求。这些材料类型的多样化发展为工程选型提供了更多可能性，也为不同工况下的精准应用奠定了材料基础。

### 1.3 现有技术优势

土工合成材料的技术优势体现在材料性能与施工效率的双重提升。轻质高强特性使其能适应复杂地质条件，减少对地基承载力的要求。例如，在软土地基上铺设土工格栅，可有效分散荷载并增强整体稳定性，避免传统加固方式对地基的过度扰动。施工便捷性方面，土工合成材料可采用卷材形式运输，现场铺设效率高，且无需大型机械设备，显著缩短工期并降低人力成本。这一特性在交通不便或作业空间受限的工程环境中尤为突出，能够有效克服传统材料施工受场地条件制约的局限。耐腐蚀与抗老化性能则通过高分子材料改性实现，例如添加抗氧化剂或紫外线吸收剂，可延长材料在恶劣环境下的使用寿命，减少后期维护投入。材料性能的持续优化进一步拓展了应用范围，为各类岩土工程提供可靠且经济高效的解决方案。这些优势的集成体现使土工合成材料成为现代水利工程建设中不可或缺的重要材料，展现出显著的技术经济价值。

### 1.4 现存问题与挑战

尽管技术优势显著，土工合成材料仍面临多重挑战。材料性能局限方面，抗拉强度不足与抗疲劳性差制约了在动态荷载场景下的应用，例如水库水位频繁变动导致的坝体应力循环可能引发材料疲劳破坏。环境适应性不足表现为极端气候条件下的性能衰减，高温会加速材料

氧化,低温则可能导致脆化,紫外线长期照射会引发分子链断裂,降低材料强度。长期耐久性方面,化学侵蚀与生物降解可能破坏材料结构,影响工程稳定性,典型如海水中的氯离子或工业废水中的酸性物质造成的腐蚀,以及微生物活动引发的材料分解。施工质量控制环节,接缝处理不当或铺设工艺偏差可能导致防渗体系失效,例如土工膜焊接不严密会形成渗漏通道,需通过严格的质量检测标准加以规范。

## 2 土工合成材料性能改进的关键技术方向

### 2.1 材料配方优化

材料配方优化是提升土工合成材料综合性能的核心路径。高分子聚合物改性通过分子结构设计实现性能突破,例如采用共混技术将不同极性或分子量的聚合物混合,可形成兼具高强度与柔韧性的复合材料;接枝改性则通过化学键将功能性基团引入聚合物主链,显著增强材料抗撕裂能力与抗疲劳性<sup>[2]</sup>。纳米材料添加为性能提升开辟新方向,纳米二氧化硅或碳纳米管等粒子因高比表面积特性,可均匀分散于聚合物基体中,形成物理交联点,从而提升材料抗紫外线老化能力与抗化学腐蚀性。生物基材料开发聚焦环境友好性,以植物纤维或淀粉基聚合物替代部分石油基原料,不仅降低碳足迹,且植物纤维的天然多孔结构可增强材料透气性与生物相容性,为生态修复工程提供更适配的解决方案。

### 2.2 结构创新设计

结构创新设计通过拓扑优化实现功能集成与性能跃升。多功能复合结构将防渗、排水与加筋功能整合于单一材料体系,例如通过层压工艺将土工膜与土工织物复合,既保持防渗层完整性,又利用织物层实现排水与反滤功能,减少工程中多层材料叠加的复杂性。三维立体结构突破传统二维平面限制,采用编织或3D打印技术构建高强度网状体系,其立体交织结构可分散应力集中,提升材料抗穿刺能力与抗变形能力,尤其适用于软土地基加固或高荷载场景。智能响应材料嵌入微型传感器或形状记忆聚合物,实现自感知与自修复功能,例如温度敏感型材料在局部损伤时通过热响应触发修复机制,恢复结构完整性,延长材料使用寿命。这些结构创新不仅提升了材料的工程适用性,也为复杂工况下的水利工程建设提供了新的解决方案。随着材料科学与制造技术的不断进步,结构设计正朝着功能一体化、形态定制化方向持续发展,进一步拓展了土工合成材料的应用潜力与价值空间。

### 2.3 表面处理与涂层技术

表面处理与涂层技术通过界面改性赋予材料差异化

功能。功能性涂层针对特定应用场景定制,疏水涂层通过降低表面能实现抗渗防污,防污涂层利用纳米结构抑制微生物附着,抗菌涂层则通过释放金属离子或有机化合物抑制细菌繁殖,提升材料在潮湿环境下的耐久性。抗老化层聚焦环境适应性提升,紫外线吸收剂与抗氧化剂复合涂层可屏蔽紫外光辐射并中和自由基,减缓材料光氧化降解速度;耐候性涂层通过引入无机填料增强涂层致密性,阻隔氧气与水分渗透,延长材料在极端气候条件下的服役周期。这些涂层技术的综合应用不仅提升了材料的使用寿命,还拓展了在复杂环境下的适应能力,为工程结构的长期稳定运行提供了可靠保障。随着材料科学的不断发展,新型智能涂层技术如自修复涂层、环境响应型涂层也逐渐应用于土工材料领域,进一步丰富了表面处理的技术内涵与应用前景。

### 2.4 施工工艺改进

施工工艺改进聚焦效率提升与质量可控性。模块化施工将材料预制成标准化组件,例如将土工格栅与连接件集成为模块化加筋单元,模块尺寸标准化为2m×5m,现场仅需拼接安装,大幅缩短施工周期并减少人为误差。自动化铺设技术引入机器人或无人机辅助作业,机器人通过视觉识别系统精准定位铺设路径,铺设精度可达±2cm,无人机则适用于复杂地形或高空作业场景,两者均通过程序控制实现铺设速度与张紧力的精准调控,张紧力控制误差小于5%,提升工程整体质量稳定性。这些工艺创新不仅显著提高了施工效率,还通过标准化和智能化的手段有效控制了施工过程中的质量波动。随着智能制造技术的不断发展,施工工艺正朝着数字化、智能化的方向持续演进,为土工合成材料的大规模应用提供了强有力的技术支撑。

## 3 性能改进对水利工程的影响与前景

### 3.1 工程安全性提升

性能改进显著增强了水利工程抵御自然灾害的能力。通过材料抗拉强度与韧性的提升,结构在地震荷载作用下的变形控制能力得到优化,例如高强度土工格栅加固的边坡可有效分散地震波能量,减少滑坡或坍塌风险<sup>[3]</sup>。针对洪水冲击场景,改进后的材料表面粗糙度与抗冲刷性增强,例如疏水涂层处理的土工膜可降低水流拖曳力,防止防渗层剥离失效。在滑坡防治中,三维立体结构材料通过立体交织网络分散土体应力,配合智能响应材料的自修复功能,可实时修复微裂缝,避免裂缝扩展引发整体失稳。长期稳定性方面,抗化学腐蚀与抗生物降解性能的提升,减少了材料在复杂环境下的性能衰减,例如纳米材料改性的土工织物在酸性地下水环境中仍能保持

透水性与反滤功能,保障排水系统持续有效运行。这些性能提升不仅增强了水利工程的防灾减灾能力,也为高烈度区、强侵蚀区等复杂地质条件下的工程建设提供了可靠的技术支撑。

### 3.2 经济性与可持续性优化

性能改进从全生命周期视角降低了工程综合成本。材料耐久性提升减少了频繁更换需求,例如抗紫外线涂层使土工膜使用寿命延长,降低后期维护频率与材料更换成本。施工效率提高进一步压缩了工期与人力投入,模块化施工与自动化铺设技术将现场安装时间缩短,例如机器人辅助铺设可实现24小时连续作业,减少人工成本与时间成本。资源消耗与碳排放控制方面,生物基材料的开发利用可再生资源替代部分石油基原料,例如植物纤维增强复合材料在生产过程中的碳排放较传统材料降低,且废弃后可自然降解,减少环境负荷。循环利用技术的突破使材料退役后可通过再生工艺重新投入使用,例如热熔法回收的土工膜可重新加工为新膜或改性为其他工程材料,形成资源闭环。这些改进不仅提升了工程的经济效益,也推动了水利行业向资源节约与环境友好的可持续发展模式转型。

### 3.3 应用场景拓展

性能改进推动水利工程向极端环境与生态友好方向延伸。极端环境工程中,高寒地区材料需具备抗冻融循环能力,通过添加相变材料或优化分子结构,改进后的土工合成材料可在零下40摄氏度低温下保持柔韧性,防止脆裂失效;热带地区则需强化抗紫外线与耐湿热性能,例如纳米二氧化钛涂层可屏蔽紫外线并反射红外线,材料表面温度降低5至8摄氏度,延缓老化速度;海洋工程中,抗海水腐蚀与抗生物附着性能的提升,使材料适用于潮间带或深海环境,例如抗菌涂层处理的土工管袋可抑制海洋生物附着,减少维护频率。生态水利建设中,材料表面微结构设计可支持植被生长,例如粗糙化处理的土工织物为植物根系提供锚固点,促进边坡生态修复;生物相容性改进的材料可为水生生物提供栖息地,例如多孔结构土工块体模拟自然礁石,营造生物多样性环境。这些创新应用极大拓展了水利工程的边界,为特殊环境治

理和生态保护提供了新的技术路径。

### 3.4 未来发展趋势

智能化发展将材料性能与数字技术深度融合,通过嵌入传感器实现实时监测,例如光纤传感器可感知材料应变与温度变化,结合大数据分析预测潜在风险,提前触发预警机制;物联网平台则可整合多源数据,优化工程运维策略,例如根据水位变化自动调整排水系统开度。定制化方向聚焦区域适应性,针对不同地质条件如软土、岩基与气候特征如干旱、多雨开发专用材料,例如高膨胀性土工材料适用于湿陷性黄土地基加固,疏水透气材料适用于干旱地区蒸发控制<sup>[4]</sup>。循环利用体系构建方面,可降解材料研发取得突破,例如淀粉基聚合物在自然环境中可完全分解,减少微塑料污染;易回收材料通过标准化接口设计实现快速拆解,例如磁性连接件使土工格栅模块可无损分离,提升回收效率。这些趋势将推动水利工程向更安全、更经济、更生态的方向演进,为新时代水利高质量发展注入持续创新动力。

### 结束语

土工合成材料性能改进对提升水利工程质量具有重要意义。通过材料配方优化和结构创新,材料耐久性和功能性得到显著提升。施工工艺改进和智能化技术应用,进一步提高了工程效率和安全水平。未来应继续加强基础研究,推动材料向多功能、智能化方向发展。同时应注重生态环保要求,开发可降解、易回收的新型材料。这些举措将促进土工合成材料在水利工程中的创新应用,为基础设施建设提供更可靠的技术保障。

### 参考文献

- [1]徐晓波.水利工程中土工合成材料的应用研究[J].工程技术研究,2024,6(12):32-34.
- [2]李惠龙.水利工程中土工合成材料的应用[J].江苏建材,2024(4):27-28.
- [3]李延忠,吕晓.土工合成材料在水利工程防渗中的应用[J].合成材料老化与应用,2021,50(04):131-133.
- [4]张振铎.土工合成材料在水利工程中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2021,(06):166-167.