

土工合成材料在水利工程 防渗领域中的应用研究

王 贺, 周世全

(濮阳黄河河务局第一黄河河务局, 河南 濮阳 457000)

摘要 随着水利工程建设的不断发展, 水库渗漏问题日益突出, 严重威胁着水利工程的安全运行。土工合成材料以质轻、强度高、防渗性能优异等特点, 在水利防渗工程中得到了广泛应用。本文以实际工程为例, 系统阐述了土工织物、土工膜、土工复合材料等在大坝、渠道防渗以及病险库加固中的应用, 通过分析其防渗机理、铺设工艺、接缝质量控制等关键技术, 总结了土工合成材料在水利防渗领域的实践经验, 旨在为同类工程提供参考。

关键词 土工合成材料; 水利工程; 渗漏; 防渗

中图分类号: TV5; TU5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.040

0 引言

土工合成材料是由高分子聚合物制成的具有特殊功能的新型材料, 具有良好的耐腐蚀性、耐久性、高强度、低渗透性等特点, 能够有效抵抗土壤及水体中的各种侵蚀因素, 延长工程使用寿命。在水利工程中, 常用的土工合成材料有土工膜、土工织物、土工格栅等。其中, 土工膜材料种类丰富, 如聚乙烯膜、聚氯乙烯膜、三元乙丙橡胶膜等, 可根据不同的工程需求选用。近年来, 土工合成材料凭借其卓越的工程性能, 在水利防渗领域发挥着不可替代的作用。然而, 如何充分发挥土工合成材料的防渗效益, 优化设计方案, 规范施工工艺, 仍需深入探索。合理应用土工合成材料进行防渗, 需要综合考虑工程地质条件、水文特征、环境因素、成本效益等多方面因素。设计时应根据渗流场分析, 合理选择土工合成材料的类型、厚度、铺设方式等参数。施工时应严格控制铺设质量, 注重搭接、焊接等细节处理, 确保防渗系统的完整性和连续性。

1 土工合成材料在水利工程防渗中的优势

1.1 土工合成材料的优异性能

土工合成材料由高分子聚合物制成, 具有质量轻、强度高、延展性好、化学稳定性强等优点。与传统的黏土、混凝土等天然材料相比, 土工合成材料能够更有效地克服防渗工程中的各种不利因素, 如不均匀沉降、裂缝发展、化学腐蚀等。正是凭借其优异的综合性能, 土工合成材料在水利防渗领域得到了越来越广泛的应用。

1.2 土工膜的超低渗透性

在各类土工合成材料中, 土工膜以其超低的渗透性而备受青睐。优质土工膜的垂直渗透系数可低至 $10 \sim$

13 cm/s , 相当于 600 m 厚黏土层的防渗效果, 远优于传统的黏土防渗墙。且土工膜施工工艺简单, 铺设速度快, 能显著缩短工期, 降低成本。因此, 土工膜已成为大坝、渠道等防渗工程的首选材料。

1.3 土工织物的反滤排水功能

除土工膜外, 土工织物也是水利防渗中不可或缺的材料。无纺土工布具有孔隙率高、透水性好的特点, 能有效代替砂砾等天然反滤材料, 不仅降低了成本, 还提高了施工效率。土工布铺设于土工膜上层, 既能起到保护膜材的作用, 又能及时排出渗流, 降低浸润线。针对不同工程需求, 还可选用土工席垫、土工格栅等产品, 进一步提升防渗体系的综合性能。

2 土工合成材料在水利工程防渗中的应用

2.1 土工合成材料在堆石坝防渗中的应用

堆石坝由于填筑材料渗透性较大, 渗漏问题一直是工程界关注的焦点。采用土工合成材料进行堆石坝防渗, 可有效克服传统黏土防渗存在的不均匀沉降、抗剪强度低等缺陷。常用的做法是在上游坝坡铺设土工膜, 并与坝基防渗墙、坝肩混凝土趾板等形成连续的防渗体系^[1]。例如: 某水电站面板堆石坝, 坝高 160 m , 坝体填筑碎石渗透系数高达 $10 \sim 1 \text{ cm/s}$ 。设计采用了 HDPE 土工膜作为主要防渗材料, 膜厚 2.0 mm , 最大铺设长度达 200 m 。为保护膜材免受破损, 土工膜下设 400 g/m^2 长丝无纺土工布作为保护层, 上铺 1800 g/m^2 短纤针刺无纺土工布作为压重层。经过严格的现场焊接质量控制, 土工膜接缝剥离强度、剪切强度均达到母材的 90% 以上, 渗透系数低至 $10 \sim 12 \text{ cm/s}$ 。

在坝体填筑过程中, 土工膜变形协调性良好, 未

出现褶皱、空鼓等缺陷。蓄水后监测显示，坝体渗流量和浸润线均控制在设计允许范围内，坝体变形小于预期值，整体运行状态良好。该工程充分展示了以土工膜为核心的防渗体系在高土石坝中的优越性能，为同类工程提供了宝贵经验。

可见，土工合成材料凭借其高强度、低渗透性、变形适应性等优点，是当前堆石坝防渗的优选材料。但同时也需注意，土工膜施工质量对其防渗效果至关重要，设计和施工中应着重考虑减小应力集中、提高接缝质量、严格质量控制等关键问题，以确保土工膜发挥最佳防渗效益。

2.2 土工织物在渠道防渗中的应用

随着大规模水利工程的持续建设，人工渠道的防渗问题日益突出。传统的黏土或混凝土衬砌存在渗漏风险高、工期长、造价高等缺点。采用土工织物复合衬里技术，可显著改善渠道的防渗性能。例如：某灌区 450 km 输水干渠为例。该渠道设计流量 120 m³/s，采用梯形断面，边坡 1:2.5。考虑到渠道沿线地质条件复杂，设计采用土工布/土工膜复合衬里进行全线防渗。具体做法为：渠道开挖后，先铺设一层 600 g/m² 长丝无纺土工布，作为土工膜的保护层；然后铺设厚度为 2.0 mm 的 HDPE 土工膜，搭接区粘结或焊接；最后在膜上铺设 800 g/m² 无纺土工布，起到保护和压重作用。

施工中严格控制了搭接长度和接缝质量。无纺土工布采用热粘法搭接，搭接宽度不小于 15 cm；土工膜采用热楔式焊接，焊缝强度达到母材的 90% 以上。渠道运行多年后，监测资料表明衬里渗透系数低至 10 ~ 13 cm/s，运行状况良好，没有发生任何渗漏事故。

该工程表明，无纺土工布具有优异的耐久性、反滤性和排水性，能有效防止土颗粒对土工膜的刺穿，提高复合衬里的耐久性。与传统的砂砾反滤料相比，无纺土工布施工速度更快，可显著缩短工期。同时，土工织物复合衬里的造价也大大低于传统混凝土衬砌。

2.3 土工织物在病险库加固中的应用

我国现有大量的老旧水库，受当时设计标准和施工条件限制，普遍存在渗漏、变形等病险问题。采用土工织物对病险水库进行除险加固，可以最大限度利用原有工程设施，减少占地和移民，缩短工期，降低工程造价^[2]。例如：某大型平原水库始建于 20 世纪 50 年代，总库容 1.2 亿 m³，土石坝最大坝高 21m。由于长期运行和管理不善，坝体渗流严重，库岸普遍滑坡，已成为国家三类病险水库。除险加固设计在上游坝坡铺设土工布/土工膜复合防渗系统，下游坝坡采用土工格栅加筋削坡的方案。

在复合防渗系统中，首先铺设 2 mm 厚的 HDPE 土工膜，其上铺设 1 200 g/m² 的长丝无纺土工布保护层。坝肩部位的土工膜通过锚固沟与岸坡连接，坝趾则采用混凝土压重压盖。在下游削坡部位，每隔 2 m 铺设一层聚酯土工格栅，以提高土体的抗剪强度。同时在坝体内设置竖向土工织物排水体，用于疏导渗流，降低浸润线。经过一年多的加固施工，原水库已焕然一新，各项安全指标均达到规范要求。坝体渗流量从原来的 1.5 L/s 降至 0.2 L/s 以下，库水位恢复到正常蓄水高程。与传统的黏土防渗和浆砌石削坡相比，采用土工织物不仅减少了土石方开挖量，还缩短了工期，使工程总造价降低了近 20%。

可见，凭借其优异的反滤排水和加筋稳定性能，土工织物已成为一种行之有效的病险水库加固材料。对于渗流和稳定问题突出的老旧水库，采用土工织物进行除险加固，不失为一种经济快捷的补救措施。但同时也应看到，病险水库情况复杂，设计中需因地制宜，并严格施工质量控制，以确保加固工程达到预期效果。

2.4 土工合成材料在水利工程防渗中的施工要点

土工合成材料施工质量直接关系到防渗工程的成败。为确保土工合成材料发挥最佳防渗效果，施工中应严格控制每一个环节，特别是铺设和焊接等关键工序。

铺设前，应根据设计要求对土工合成材料进行抽样检测，确保各项指标满足设计要求。铺设场地应提前清理平整，并用细砂或无纺土工布作为垫层。铺设时应控制铺设方向与水流方向一致，避免出现褶皱和空鼓。搭接宽度对于土工膜一般为 10 ~ 15 cm，土工布则根据场地条件确定，但不应小于 30 cm。大风天气应采取压重等措施防止材料位移。

焊接是决定土工膜防渗性能的关键工序。焊接设备必须采用专用的热楔式焊接机或热风焊枪，并根据气温、湿度等条件优化焊接温度、压力和速度等参数。焊接接头应进行 100% 的无损检测，发现问题应及时返工处理。在土工膜铺设完成后，应尽快用土工布或细砂进行压重保护，防止其遭到损伤。

在运输和存储过程中，土工合成材料应避免阳光直射和尖锐物刺破。宜使用芯架装卷盘进行运输，卷盘直径应大于 0.5 m。现场存放时，垫层应平整坚实，覆盖遮阳防雨措施。各卷材应按批次堆放，并设立明显标识，便于施工管理。

3 土工合成材料在水利工程防渗领域的应用前景

3.1 新型土工合成材料的研发

随着高分子材料科学的飞速发展，一些性能更加优越的新型土工合成材料不断涌现。这其中就包括纳

米复合土工膜、自愈合土工膜、超高分子量聚乙烯土工格栅等。纳米复合土工膜通过在聚合物基体中掺入纳米粒子，可显著提高材料的力学性能和耐久性。自愈合土工膜则利用特殊的化学键合原理，能够在破损处自动修复，大大延长了使用寿命。超高分子量聚乙烯土工格栅强度高达普通聚酯格栅的10倍以上，能够为边坡、路基等提供更加可靠的加筋稳定作用^[3]。这些创新型土工合成材料的问世，为解决水利防渗工程的技术难题提供了全新思路。例如：采用纳米复合土工膜不仅能提高防渗效果，还能降低因基底变形引起的膜材破坏风险。将自愈合土工膜用于水库大坝防渗，则可减少因老化破损导致的渗漏隐患。在河道、海堤等防护工程中，超高强度土工格栅能够提供更加有力的稳定作用。随着这些新技术的逐步成熟和推广应用，传统的防渗结构形式和施工工艺也将随之改进优化，促进行业整体技术水平的提升。

3.2 土工合成材料的标准化应用

目前，土工合成材料虽然已在诸多水利工程中得到应用，但在设计和施工中仍存在一定的随意性和盲目性。究其原因，主要是由于缺乏系统的技术标准和规范所致。为规避应用风险，工程实践中往往倾向于过度设计，造成了材料的浪费和工程造价的提高。而有些工程则因缺乏指导而质量控制不严，埋下渗漏隐患。针对上述问题，亟需加快推进土工合成材料的标准化应用。近年来，我国陆续出台了《防渗土工膜技术规范》《土工合成材料应用技术规程》等一系列行业标准，对材料性能指标、设计选型、施工要求等方面做出了明确规定。这为规范土工合成材料的应用提供了重要依据。但从实际情况看，现有标准在一些细节问题上仍不够细致全面，在特殊工况和复杂环境下的指导性有待加强。未来，应在现有标准基础上，结合工程实践经验，进一步细化和充实标准内容^[4]。同时，要加大标准的宣贯力度，通过培训、示范等方式促进标准的贯彻执行，推动行业形成规范有序的技术应用秩序。

3.3 土工合成材料与新兴技术的融合应用

当前，信息技术、智能制造等新兴技术正深刻影响着工程建设领域。将其与土工合成材料的应用相结合，有望进一步提升防渗工程的建设水平。例如：利用物联网技术对土工膜渗流量进行实时监测，通过大数据分析对渗流趋势进行预判，可为水库安全运行提供科学决策依据^[5]；采用智能焊接设备对土工膜接缝质量进行在线检测，通过数字化管控手段优化施工工艺

参数，可显著提高防渗系统的施工效率和质量可靠性。

事实上，已出现了一些将新技术应用于土工合成材料的成功案例。我国某抽水蓄能电站上下水库衬砌中，则采用了喷涂式自粘土工膜施工工艺，实现了衬砌防渗与保护的一体化，提高了施工速度和整体防渗性能^[6]。随着BIM、人工智能、5G等技术在水利工程中的深入应用，与土工合成材料的融合空间将更为广阔。通过融合应用，不仅能优化材料设计，简化施工工序，提升防渗品质，还能实现工程全寿命周期的精细化管理，为工程运行安全提供有力保障。

随着水利工程建设强度的不断加大，对工程材料的性能要求也在不断提高。土工合成材料作为一种新型工程材料，已在防渗领域展现出广阔的应用前景。未来，在新材料研发、应用标准完善、跨界技术融合等方面，土工合成材料的发展空间还很大。相信经过产学研各界的共同努力，土工合成材料必将在水利防渗乃至整个水利工程建设领域发挥出更大的作用，为保障水资源高效利用和国家水安全做出更大贡献。

4 结束语

土工合成材料以其优异的防渗性能和综合效益，已成为水利防渗工程的首选材料。从实际案例可以看出，土工膜、土工织物等材料在大坝、渠道、病险库等防渗领域均得到了成功应用，取得了显著的工程效益。但同时也应看到，土工合成材料的应用尚处于发展阶段，在材料改性、设计优化、施工工艺等方面仍有进一步提升的空间。未来，随着土工合成材料研究的不断深入，其在水利防渗领域的应用前景将更加广阔。工程实践与理论创新携手并进，必将推动水利防渗技术的长足发展。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 赵月月. 路基养护工作中土木合成材料的应用研究[J]. 水上安全, 2025(03):131-133.
- [4] 张强. 水利工程堤坝防渗与加固技术分析[J]. 地下水, 2024, 46(06):295-297.
- [5] 曹建伟. 水利工程施工中堤坝防渗加固技术[J]. 中华建设, 2024(09):127-129.
- [6] 李惠龙. 水利工程中土工合成材料的应用[J]. 江苏建材, 2024(04):27-28.