

浅析芳纶材料在橡胶坝中的应用

梁姝颖

天津市水务规划勘测设计有限公司，天津 300204

DOI:10.61369/WCEST.2025010001

摘要： 本文深入探讨芳纶材料在橡胶坝中的应用。通过阐述橡胶坝的应用与发展，分析芳纶材料的性能特点，对比锦纶浸胶帆布与芳纶浸胶帆布在橡胶坝中的应用案例，揭示芳纶材料在提升橡胶坝性能、降低施工难度等方面的显著优势，同时对其应用效益、前景与挑战进行分析，为橡胶坝工程材料的选择与技术发展提供参考。

关键词： 芳纶材料；橡胶坝；性能优势；应用案例

Analysis on the Application of Aramid Fiber Materials in Rubber Dams

Liang Shuying

Tianjin Water Resources Planning, Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300204

Abstract： This paper delves into the application of aramid fiber materials in rubber dams. By elucidating the application and development of rubber dams, analyzing the performance characteristics of aramid materials, and comparing the application cases of nylon dipped canvas and aramid dipped canvas in rubber dams, it reveals the significant advantages of aramid materials in improving the performance of rubber dams and reducing construction difficulty. Simultaneously, the paper analyzes the application benefits, prospects, and challenges, providing a reference for the selection of rubber dam engineering materials and technological development.

Keywords： aramid materials; rubber dams; performance advantages; application cases

引言

橡胶坝作为传统水工建筑，因造价低、施工快、水位调节灵活，在水利灌溉、城市景观等领域广泛应用。随着水利工程发展，对其性能要求提高，传统坝袋材料强度不足、耐久性差等问题凸显。芳纶材料是高性能纤维，具备高强度、耐腐蚀、耐高温等优势。将其应用于橡胶坝，能提升力学性能、耐久性和耐高温性，还可减重、降低施工难度与成本，对推动橡胶坝技术发展及水利工程提质增效意义重大。

一、芳纶材料概述

（一）芳纶材料的定义与分类

芳纶是芳香族聚酰胺纤维的简称，它是由酰胺键连接芳香环形成的高分子化合物。芳纶主要分为两大类：一类是全对位芳纶，如聚对苯二甲酰对苯二胺（PPTA），其分子链呈伸直链状，具有超高的强度和模量；另一类是间位芳纶，如聚间苯二甲酰间苯二胺（PMIA），其分子链呈锯齿状，具有良好的耐高温性能和绝缘性能。目前，芳纶在耐热、耐化学性能好的同时，强度和刚性都很高。它可以在高温下使用，具有的阻燃性能，被广泛应用于防弹衣、建筑等领域。芳纶纤维还可以制成复合材料，用于制造高强度、轻量化的零部件^[1]。在橡胶坝应用中，主要使用的是全对位芳纶。

（二）芳纶材料的性能特点

芳纶作为高性能纤维材料，在强度、模量、耐化学腐蚀性、

耐高温性和耐疲劳性上优势显著。其强度和模量远超锦纶、涤纶等传统纤维，以全对位芳纶为例，拉伸强度达3.6–4.1GPa，拉伸模量达120–160GPa，是普通钢材5–6倍，能大幅提升橡胶坝坝袋力学性能，承受更大水压和拉力，增强安全性与稳定性。芳纶分子结构中的芳香环和酰胺键，赋予其优异的耐化学腐蚀性，在酸碱盐等化学介质中化学稳定性良好，不易降解腐蚀，对长期处于复杂水环境的橡胶坝很关键，可延长使用寿命、降低维护成本^[2]。另外，芳纶分解温度超500°C，高温下性能稳定，耐疲劳性好，能承受反复载荷，有效延长橡胶坝使用寿命，减少维修更换次数。

二、橡胶坝全面解析

（一）橡胶坝概况

橡胶坝是一种以高分子合成橡胶为主体材料，锚固在基础底

板上形成封闭状的袋式挡水建筑物，主要由坝袋、锚固系统、充排水系统和控制系统等部分构成。坝袋作为主体部分，一般由多层帆布和橡胶贴合而成，承担着挡水的关键作用。锚固系统则将坝袋稳固地固定在基础底板上，以此保障坝袋在充水挡水时的稳定性。充排水系统负责把控坝袋的充水与排水工作，进而实现橡胶坝的升降以及水位的调节。控制系统用于监测和调控橡胶坝的运行状态，确保其安全可靠地运行。橡胶坝的工作原理并不复杂，在需要挡水时，向坝袋内充水或充气，使坝袋膨胀升高；而在需要泄水时，将坝袋内的水或气排出，坝袋便会收缩下降，从而顺利实现泄水操作。

（二）应用范围

在水利工程领域，橡胶坝因独特结构与功能发挥着重要作用。在农田灌溉方面，它能依据农作物需水状况灵活调节水位，实现精准灌溉，极大提高水资源利用效率，如在部分灌区，通过拦河抬高水位，确保灌溉水流入农田。在城市景观建设中，橡胶坝可形成人工湖面，改善城市生态环境与景观效果，众多城市借此营造优美水景，为市民提供休闲好去处，提升生活品质^[9]。在防洪排涝上，洪水来临时，橡胶坝能迅速降低坝高宣泄洪水，减轻下游压力，平时又能充水挡水、调节水位，广泛应用于城市河道治理，助力抵御洪涝、维护生态平衡。

（三）与水闸、水坝的优劣势对比

在水利工程中，橡胶坝与水闸、水坝相比，优缺点分明。从优势而言，橡胶坝结构简单，施工材料用量少，工艺简便，造价一般比同规模的水闸和水坝节省30%~50%，能有效降低成本^[4]。施工周期短，仅需几个月便可建成，可迅速投入使用，满足工程紧急需求，而水闸和水坝施工常需数年。它还具备高度灵活性，能依据水流和水位变化，灵活调节坝高与水位，这是水闸和水坝难以企及的。不过，橡胶坝也存在不足。耐久性欠佳，坝袋材料受自然环境和水流影响大，使用寿命通常在15~20年，远低于水闸和水坝的50年以上。维护管理成本高，需定期修补坝袋、紧固锚固系统等。并且，橡胶坝对基础条件要求苛刻，需坚实基础底板，在强地震、大洪水等极端状况下，安全性相对较低。

三、橡胶坝坝袋材料现状

（一）以锦纶浸胶帆布为主体的坝袋材料构成

目前，橡胶坝坝袋材料主要以锦纶浸胶帆布为骨架，与耐老化橡胶贴合而成。锦纶浸胶帆布由锦纶纤维织成的帆布经过浸胶处理制成，具有良好的强度和柔韧性。坝袋一般由外层橡胶、中间帆布层和内层橡胶组成。外层橡胶主要起到耐磨损、耐老化和防腐的作用；中间帆布层提供主要的强度和支撑；内层橡胶则起到防水和密封的作用^[5]。

（二）锦纶浸胶帆布的性能特点与优势

锦纶浸胶帆布是橡胶坝坝袋常用材料，性能出色。它抗拉强度较高，能承受一定水压力和拉力，保障坝袋挡水时结构稳定；耐屈挠性良好，可适应坝袋充排水时的反复变形，不易因频繁伸

缩而损坏；还具备较好的耐磨耐腐蚀性能，在一定程度上延长坝袋使用寿命，减少提前更换。在规范规定的坝高（一般小于5m）内，锦纶浸胶帆布坝袋优势显著，技术成熟、应用广泛，材料性能满足一般橡胶坝使用要求，成本相对较低，加工工艺也较简单，在保证质量的同时降低成本、提高生产效率。

（三）锦纶浸胶帆布在高坝应用的局限性

当坝高大于5m时，锦纶浸胶帆布坝袋的局限性逐渐显现。其一，随着坝高的增加，水压力增大，对坝袋强度要求更高，需要增加帆布层数来满足强度要求，但这会导致坝袋重量大幅增加。其二，坝袋重量过大带来了加工不便、运输困难、安装难度加大等一系列问题^[6]。例如，在运输过程中，需要大型的运输设备，增加了运输成本和难度；在安装过程中，由于坝袋重量大，需要使用大型的吊装设备，且安装精度难以保证，增加了施工安全风险。

四、芳纶浸胶帆布特性及应用潜力

（一）芳纶材料性能优势

与锦纶相比，芳纶在多项关键性能上更胜一筹。芳纶强度与模量远超锦纶，拉伸强度和模量达锦纶数倍，相同层数和厚度下，芳纶浸胶帆布能承受更大拉力，大幅提升橡胶坝强度与稳定性。在耐高温及耐化学腐蚀方面，芳纶也明显优于锦纶，在复杂环境中性能更稳定，不易老化损坏，可有效延长橡胶坝使用寿命。此外，芳纶密度小，相同强度要求下，芳纶浸胶帆布更轻，能解决高坝橡胶坝坝袋加工、运输和安装时的重量难题。

（二）芳纶材料在其他领域的应用借鉴

芳纶材料以其卓越特性在军事和航天等领域广泛应用。在军事领域，凭借高强度和耐冲击性能，芳纶被用于制造防弹衣、头盔等防护装备，为人员安全提供有效保障。在航天领域，基于高强度、轻量化和耐高温性能，芳纶用于制造飞行器结构部件，既减轻飞行器重量，又提升飞行性能。这些成功应用为芳纶在橡胶坝中的应用提供了宝贵借鉴^[8]。在橡胶坝应用中，必须重视材料的质量控制和加工工艺的优化。比如在制造芳纶浸胶帆布时，采用先进浸胶工艺十分关键，只有这样才能确保芳纶纤维与橡胶良好结合，从而提升材料整体性能，更好地发挥芳纶材料在橡胶坝中的优势。

（三）芳纶浸胶帆布应用于橡胶坝的可行性

从性能适配维度深入剖析，芳纶浸胶帆布所具备的高强度、高模量特质，使其在承受巨大拉力与压力时依然能够保持结构的稳定性，这对于需要抵御水压力冲击的橡胶坝坝袋而言，是至关重要的性能支撑^[9]。其卓越的耐高温性能，确保在高温环境下不会出现性能劣化，保障了橡胶坝在特殊工况下的正常运行；优异的耐化学腐蚀性能，使其在复杂的水环境中能够长期稳定工作，有效延长了坝袋的使用寿命。而重量轻这一突出优势，不仅降低了坝袋的整体重量，减少了运输与安装的难度，还在一定程度上降低了工程成本。

五、乐善橡胶坝案例深度剖析

(一) 工程概况

乐善橡胶坝位于潮白新河天津市宁河段, 1989年建成, 原坝高5m, 蓄水量约3000万 m³, 承担蓄淡防咸、调剂水源功能。随着宁河区用水需求增长, 现有蓄水量无法满足要求, 遂开展改造加高项目。改造后, 坝体设计主槽底宽90m, 边坡坡比1:3.8, 总长143.2m, 坝高提至6.5m, 为单向斜坡式单跨设计。改造效果显著, 里自沽闸至乐善橡胶坝段河道主槽蓄水量增至5633万 m³, 有效缓解七里海湿地生态问题, 保障农业供水, 改善生态环境。但改造后坝高超规范的5m, 带来难题。胶布经纬向设计拉力值过大, 为达坝袋强度要求需增加帆布层数, 且坝高致使坝袋展开面积大增, 坝袋重量过大, 造成加工、运输、安装困难。

(二) 锦纶浸胶帆布方案分析

乐善橡胶坝坝袋若采用锦纶浸胶帆布方案, 胶布为三布四胶结构, 三层550kN拉力的锦纶帆布经热压后, 坝袋胶布经纬向拉力达1400kN/m。胶层设计上, 外覆盖胶2.5mm抗磨损, 夹层胶0.5mm起粘连缓冲作用, 内覆盖胶2.0mm负责防水密封, 坝袋总厚16mm, 总面积3744m², 重105吨。此方案虽拉力达标, 但重量过大, 加工需大型设备与专业人员, 成本高; 运输依赖大型货车与特殊装备, 难度及成本大增; 安装靠大型吊装设备, 精度难控, 易引发安全事故, 严重阻碍工程推进^[10]。

(三) 芳纶浸胶帆布方案分析

本工程乐善橡胶坝在坝袋材料设计上, 若采用芳纶浸胶帆布方案, 坝袋胶布设计为二布三胶结构, 两层帆布均为拉力高达900kN的芳纶帆布。在热压工艺实施过程中, 芳纶帆布会产生15%的拉力损失, 经精确计算, 最终坝袋胶布的经纬向拉力达到1530kN/m。在胶层厚度规划方面, 外覆盖胶设定为2.5mm, 主要用于抵御外界的磨损与侵蚀, 保护内部结构; 夹层胶厚0.5mm, 起到良好的粘连与缓冲作用; 内覆盖胶为2.0mm, 着重负责防水与密封功能。整体坝袋设计总厚度为10mm, 经测算, 坝袋总面积为3744m², 重量为67吨。与锦纶浸胶帆布方案相比, 芳纶浸胶帆布方案优势明显。芳纶坝袋厚度薄、自重轻, 比

锦纶坝袋减重约40%, 极大改善运输与吊装难题, 安装更便捷。同时, 芳纶坝袋强度更高, 虽帆布层数减少, 抗拉强度却提升10%, 不仅减少橡胶用量、降低加工成本, 还因结合面减少, 提高了整体安全性, 有力保障橡胶坝稳定运行。

(四) 方案对比与决策依据

在乐善橡胶坝的建设中, 材料选择对工程的多个关键环节影响重大。锦纶浸胶帆布坝袋因重量大, 在加工时需大型且专业的设备, 运输要特制车辆与工具, 安装需大型吊装器械且精度难控, 施工难度极大; 而芳纶浸胶帆布坝袋重量轻, 极大降低了加工、运输和安装的难度。安全可靠方面, 芳纶浸胶帆布坝袋强度高, 层数少, 减少了结合面, 降低了因结合不牢导致的安全风险, 安全性显著提升; 相比之下, 锦纶浸胶帆布坝袋重量大, 在施工过程中易出现诸如吊装不稳等安全隐患。成本效益上, 芳纶浸胶帆布虽单价高, 但因其重量轻、强度高, 能减少橡胶材料用量, 简化加工流程, 从长期运营维护及工程全寿命周期角度考量, 具有更好的成本效益。鉴于本工程坝高较大, 采用芳纶帆布可大幅降低坝袋重量, 减少帆布层数, 同时提高坝袋抗拉强度, 有效降低工程运输与施工难度, 增强工程运行的安全性, 所以工程推荐采用芳纶浸胶帆布方案。

六、结束语

通过对芳纶材料、橡胶坝的研究及乐善橡胶坝案例分析, 芳纶浸胶帆布在橡胶坝高坝建设中的优势显著。其高强度、高模量、耐高温、耐化学腐蚀和重量轻等特性, 是橡胶坝坝袋骨架材料的理想之选, 大幅提升了橡胶坝性能与稳定性。乐善橡胶坝改造项目运行至今已5年, 运行效果良好, 项目证实, 相较于锦纶浸胶帆布, 芳纶浸胶帆布有效解决了坝袋重量大、强度不足、施工难等问题, 提高了工程安全性与成本效益。展望未来, 芳纶材料生产技术进步有望降本, 其应用前景广阔。后续研究可优化芳纶性能, 如提升耐疲劳性、研发降本工艺, 拓展其在各类橡胶坝工程中的应用, 助力水利事业发展。

参考文献

- [1] 李国. 芳纶纤维复合材料表面改性及其高质量轮廓铣削加工研究 [D]. 山东大学, 2023. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2023.007506.
- [2] 周宇函. 氩/氮双等离子体改性对位芳纶/环氧树脂复合材料力学性能研究 [D]. 河北科技大学, 2023. DOI: 10.27107/d.cnki.ghbku.2023.000875.
- [3] 熊恬. 芳纶复合材料对体育产业创新发展的影响 [J]. 塑料助剂, 2023, (06): 58-61.
- [4] 刘宇升, 路玉琢, 张田, 等. 芳纶滤料的粉尘过滤性能 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2023, 36(05): 16-22+30. DOI: 10.13338/j.issn.1006-8341.2023.05.003.
- [5] 乔远见, 黄正胜, 夏晨斌, 等. 碳纤维/芳纶纸基复合材料的制备及其电磁参数调控技术研究 [J]. 中国造纸, 2023, 42(10): 33-37+104.
- [6] 石文天, 王林, 刘玉德, 等. 微铣削芳纶纤维增强复合材料切削力信号特征试验研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(17): 325-334.
- [7] 于意, 徐长刚, 邱长玉, 等. 芳纶柔性防刺材料的研究进展 [J]. 山东纺织科技, 2023, 64(04): 52-56.
- [8] 蔡玄龙, 倪妮, 张兆峰. 碳纤维与芳纶纤维增强环氧树脂复合材料的动态力学性能 [J]. 理化检验-物理分册, 2023, 59(07): 1-4+8.
- [9] 伍悦明, 吴铠, 王洋, 等. 芳纶平纹肌织/非织造混杂结构复合材料低速冲击性能的有限元分析 [J]. 产业用纺织品, 2023, 41(06): 30-41.
- [10] 庞晓华. 芳纶及其复合材料在体育运动中的应用 [J]. 塑料助剂, 2023, (03): 58-61.