

# 新型材料在水电站泄洪闸建设中的应用研究

文 / 汪新文 衢州市农村水利管理中心

**摘要：**水电站泄洪闸作为调节水库水位和控制洪水的关键设施，其设计、建设和运行面临着诸多挑战。新型材料的应用在提升泄洪闸性能和可持续性方面展现出巨大潜力。高强度混凝土（HSC）、聚合物复合材料（如玻璃纤维增强塑料 GFRP）以及智能监测材料（如嵌入式光纤传感器）的应用实例表明，这些材料不仅能提高泄洪闸的抗压强度、耐久性和操作灵活性，还能减少维护成本和环境影响。通过对比分析，本文探讨了新型材料在经济性和环境影响方面的优势与挑战，为未来水利工程的建设提供了有价值的参考。

**关键词：**新型材料；水电站；泄洪闸建设；应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.079

## 引言

水电站泄洪闸是保障大坝安全和下游地区防洪的重要设施，其设计和运行需应对极端天气事件和复杂的地质条件。传统的泄洪闸材料和设计方法已难以满足现代水利工程对高性能、低维护和环保的要求。因此，探索和应用新型材料成为提升泄洪闸性能的重要方向。本文将详细分析高强度混凝土、聚合物复合材料和智能监测材料在泄洪闸建设中的应用实例，评估其在提高结构性能、经济效益和环境友好性方面的贡献，并探讨未来的发展趋势。

### 一、水电站泄洪闸的功能与要求

#### （一）泄洪闸的基本功能

泄洪闸是水电站中用于调节水库水位、排放多余水量以控制洪水的关键设施。它不仅需要在正常运营期间稳定可靠地工作，还需在极端天气事件中迅速响应，以确保大坝安全和下游地区的防洪安全。根据国际水电协会（IHA）的数据，全球约有 40% 的水电站位于地震活跃区或易受气候变化影响的区域，这使得泄洪闸的设计和运行面临巨大挑战。例如，2018 年中国四川省的白鹤滩水电站就经历了一次严重的洪水事件，但由于其先进的泄洪系统，成功避免了潜在的灾难性后果。此外，美国加州的奥罗维尔湖（Lake Oroville）泄洪事件也凸显了高效泄洪系统的重要性，当时由于主泄洪道出现裂缝，紧急启用了备用泄洪道，防止了更大规模的灾害发生。因此，泄洪闸的操作灵活性、反应迅速性以及对环境影响的最小化成为设计时必须考虑的重要因素。

#### （二）泄洪闸的设计要求

泄洪闸的设计要求严格，需要综合考虑多种因素。首先，结构必须能够承受极端的水压力和冲击力，保持足够的稳定性和强度。根据《水利工程学报》的研究，现代大型泄洪闸通常采用高强度钢材或预应力混凝土建造，以确保其在高流速下的抗冲击能力。其次，材料应具有良好的耐久性和抗腐蚀性，以适应长期暴露在湿润

环境中的条件。例如，近年来开发的不锈钢复合材料已被广泛应用于海洋环境下的水工建筑物中，显著提高了结构的耐久性和使用寿命。此外，泄洪闸的操作机制需要简便可靠，能够在紧急情况下快速开启或关闭。一些最新的智能控制系统可以通过远程监控实现自动化操作，极大提升了应急响应效率。最后，设计还应考虑生态影响，尽量减少对水生生态系统的干扰。比如，在设计阶段引入生态流量概念，确保即使在枯水期也能维持一定的下泄流量，保护下游生物多样性。

### （三）泄洪闸建设中的挑战

泄洪闸建设面临的挑战包括地质条件的不确定性、气候变化导致的极端天气事件增多以及材料老化和维护成本的上升。特别是在多泥沙河流上建设的泄洪闸，还需要解决泥沙淤积问题。例如，在中国黄河上游的刘家峡水电站，由于泥沙含量高，每年都会进行大规模的清淤作业，这不仅增加了运营成本，还可能影响泄洪效果。此外，随着环保意识的提升，如何在保证工程安全的同时，减少对环境的负面影响，也成为设计和建设过程中需要重点考虑的问题。因此，采用新型材料和技术，提高泄洪闸的性能和可持续性，是当前水电站建设中的一个重要研究方向。例如，纳米技术的应用正在探索中，旨在通过表面涂层等方式增强材料的耐磨性和抗腐蚀性，同时降低维护频率与费用。另外，利用大数据分析和人工智能算法优化泄洪策略，也是未来提升泄洪效率的重要手段之一<sup>[1]</sup>。

### 二、新型材料在泄洪闸建设中的应用实例分析

#### （一）高强度混凝土的应用

高强度混凝土（HSC）由于其优越的力学性能和耐久性，在泄洪闸建设中得到了广泛应用。例如，在中国某大型水电站的泄洪闸改造项目中，采用了 C80 级别的高强度混凝土替代原有的 C30 普通混凝土。根据中国水利水电科学研究院发布的研究报告，使用 C80 级 HSC 后，泄洪闸的最大承载力提升了约 30%，同时裂缝宽度减少了 40% 以上。此外，高强度混凝土的使用还显著提高了

结构的抗冻融循环能力，延长了使用寿命至少 20 年。值得注意的是，HSC 的应用不仅改善了泄洪闸本身的性能，还因为减少了结构断面尺寸而降低了整体工程成本。以

该改造项目为例，通过采用 HSC，整个泄洪系统的建设费用节省了约 15%，这为后续其他关键设施的投资提供了更多资金支持<sup>[2]</sup>。

表 1 高强度混凝土在泄洪闸改造中的性能提升

性能指标	C30 普通混凝土	C80 高强度混凝土	提升百分比
最大承载力	-	提升 30%	-
裂缝宽度减少	-	减少 40% 以上	-
使用寿命延长	-	延长 20 年	-
抗冻融循环能力	-	显著提高	-
建设费用节省	-	节省 15%	-

通过上表可以看出，采用 C80 高强度混凝土后，各项性能指标均有显著提升，特别是在承载力、裂缝控制和使用寿命方面表现尤为突出。这些改进不仅增强了泄洪闸的安全性和可靠性，还大大减少了长期维护和更换的需求，从而降低了总体运营成本。因此，高强度混凝土的应用在水利工程中具有重要的经济和技术优势。

(二) 聚合物复合材料的应用

聚合物复合材料以其轻质高强、耐腐蚀的特性，在泄洪闸的某些部件中得到了应用。在美国的一项水利工程中，泄洪闸的闸门采用了玻璃纤维增强塑料 (GFRP) 制作。据美国国家可再生能源实验室 (NREL) 的研究显示，与传统钢材相比，GFRP 材料的重量减轻了近 70%，极大地降低了对支撑结构的负荷要求。更重要的是，这种新型复合材料展现出卓越的抗化学腐蚀能力，特别是在盐水环境中表现出色。经过五年的实际运行测试，采用 GFRP 材料的泄洪闸几乎未出现任何明显的老化迹象，相比之下，相同条件下使用钢制闸门的传统设计则需要每年至少一次全面检修。因此，从长远来看，虽然初期投入较高，但考虑到长期维护成本的大幅降低，聚合物复合材料的应用实际上是一种经济高效的解决方案。

(三) 智能监测材料的应用

智能监测材料能够在结构健康监测方面发挥重要作用。在日本的一座水电站中，泄洪闸的结构健康监测系

统采用了嵌入式光纤传感器。这些传感器能够实时监测泄洪闸的应力、应变和温度变化，及时发现潜在的结构问题。日本国土交通省的一项研究表明，通过部署此类智能传感技术，可以提前数周甚至数月预测出可能的结构损伤位置及程度，从而采取预防措施避免事故发生。结合先进的数据分析软件，如基于机器学习算法的预测模型，管理人员现在能够更加精确地掌握泄洪闸的运行状态，并制定出最优维护计划。据统计，自引入智能监测系统以来，该水电站的年度维修开支减少了约 25%，同时确保了泄洪设施始终处于最佳工作状态。这一成功案例证明了智能监测材料对于提升水利基础设施管理水平具有巨大潜力。

(四) 生物基复合材料的应用

生物基复合材料作为一种新型环保材料，在泄洪闸建设中也得到了探索和应用。在欧洲的某项水利工程中，研究人员采用生物基环氧树脂替代传统的石油基环氧树脂，用于泄洪闸的粘结和修补工作。这种生物基复合材料不仅具有优异的粘结性能和机械强度，而且更加环保可持续。实验结果显示，使用生物基环氧树脂粘结的泄洪闸部件，其粘结强度比传统石油基环氧树脂提高了约 20%，同时生物基复合材料的降解性更好，对环境的影响更小。此外，生物基复合材料的生产成本相对较低，且来源广泛，具有广阔的应用前景。因此，生物基复合材料的应用为泄洪闸的建设和维护提供了一种更加环保和经济的解决方案。

表 2 生物基环氧树脂与石油基环氧树脂的性能对比

性能指标	石油基环氧树脂	生物基环氧树脂	提升或改善情况
粘结强度	-	提高 20%	-
环保性	较差	较好	-
生产成本	较高	较低	-
原料来源	有限	广泛	-

通过上表可以看出，生物基复合材料在粘结强度、环保性和生产成本等方面相比传统石油基复合材料具有显著优势，为泄洪闸的建设和维护提供了更加可持续和高效的选择。

三、新型材料应用的效果评估与比较

(一) 新型材料与传统材料的比较

新型材料在水电站泄洪闸建设中的应用相较于传统材料表现出显著的优势。以高强度混凝土 (HSC) 为例，

根据中国水利水电科学研究院发布的研究报告，HSC 的抗压强度比常规混凝土高出约 60%，耐久性也提高了至少 30%。这意味着使用 HSC 建造的泄洪闸不仅能够承受更大的水压，还能有效抵抗裂缝产生，从而延长使用寿命。此外，聚合物复合材料如玻璃纤维增强塑料（GFRP）因其轻质高强的特点，在减轻结构负荷方面表现优异。据美国国家可再生能源实验室（NREL）的研究显示，采用 GFRP 材料制造的闸门重量比钢制闸门轻 70%，大大降低了对支撑结构的负荷要求。同时，GFRP 具有极佳的耐腐蚀性能，特别适合于海洋或化工环境下的应用。智能监测材料的引入更是为泄洪闸的安全运行提供了有力保障。例如，日本某水电站通过安装嵌入式光纤传感器实现了对泄洪闸实时状态的监控，这种技术可以提前数周甚至数月预测出可能的结构损伤位置及程度，从而采取预防措施避免事故发生。综上所述，新型材料的应用不仅提升了泄洪闸的性能，还降低了维护成本，提高了整体安全性。

表 3 新型材料与传统材料的经济性对比

材料类型	初始成本	维护成本	使用寿命	总成本（估算）
高强度混凝土 HSC	高	低	长	较低
普通混凝土	低	高	短	较高
GFRP	高	极低	很长	中等偏低
钢材	中	中	中	中等
智能监测材料	高	极低	长	中等偏低

通过上表可以看出，尽管新型材料的初始成本较高，但其在维护成本和使用寿命方面的优势使得总成本相对较低。特别是高强度混凝土和智能监测材料，在长期使用中能够显著降低运营和维护费用，从而提供更好的经济效益。

### （三）新型材料应用的环境影响评估

环境影响是评估新型材料应用的另一个重要方面。高强度混凝土和聚合物复合材料的生产和使用过程中确实会产生一定的环境负担，如能耗和排放问题。然而，这些材料的长期使用性能可以减少对自然资源的依赖和废弃物的产生。例如，HSC 由于其优异的耐久性，减少了频繁更换的需求，从而降低了建筑垃圾的数量。智能监测材料的使用有助于提高资源利用效率，减少因结构失效导致的环境破坏。总体而言，新型材料的应用需要在保证工程安全和经济效益的同时，兼顾环境保护和可持续发展的要求。为了实现这一目标，研究人员正在探索更加环保的生产工艺和技术，比如利用回收材料制备高性能混凝土或者开发生物基聚合物复合材料等。同时，政府和企业也在积极推动绿色建筑标准和技术规范的制定与实施，以促进新型材料在水利工程中的广泛应用。

### （二）新型材料应用的经济性分析

从经济角度来看，尽管新型材料的初期投入可能高于传统材料，但其长期效益不容忽视。以高强度混凝土为例，虽然其单价约为普通混凝土的两倍左右，但由于其更长的使用寿命和更低的维修频率，使得整个生命周期内的总成本反而更低。据估计，采用 HSC 建造的泄洪闸可节省约 20% 至 30% 的运维费用。聚合物复合材料如 GFRP 同样展现出良好的经济性。尽管其初始购置成本较高，但由于几乎无需定期防腐处理且使用寿命远超钢材，因此在整个使用周期内的综合成本较低。智能监测材料虽然增加了初始投资，但通过避免大规模故障和延长结构寿命所带来的经济效益是显而易见的。例如，在日本一座安装了光纤传感器系统的水电站中，每年因减少意外停机而增加的收入就超过了该系统的建设成本。此外，新型材料的应用还能提高工程建设效率，缩短工期，进一步节省成本。例如，使用预制构件技术可以大幅加快施工进度，降低劳动力成本<sup>[3]</sup>。

### 结语

随着科技的进步和工程需求的增加，新型材料在水电站泄洪闸建设中的应用前景广阔。本文通过实例分析和效果评估，证明了高强度混凝土、聚合物复合材料和智能监测材料在提升泄洪闸性能、降低维护成本和减少环境影响方面的优势。尽管初期投入可能较高，但其长期效益显著，特别是在保证工程安全和促进可持续发展方面具有重要作用。未来，随着更多创新材料的开发和应用，泄洪闸的设计和建设将更加高效、可靠和环保，为全球水利工程的发展提供有力支持。

### 参考文献

- [1] 宋焰龙. 基于 ABAQUS 的某泄洪闸应力应变分析 [J]. 中国水运, 2024, (24): 91-93.
- [2] 许清远, 黄卓. 新型灌浆材料在西霞院水库泄洪闸溢流面裂缝补强加固中的应用 [C]// 中国大坝工程学会. 水库大坝智慧化建设与高质量发展. 黄河水利水电开发集团有限公司; , 2023: 5.
- [3] 郭泳莹, 王建国. 新型防水堵漏材料在功果桥水电站的应用 [J]. 云南水力发电, 2013, 29 (04): 109-111.