

抽水蓄能电站隧洞二衬用高强纤维混凝土抗渗性能与工程适配性研究

于涛¹ 薛立萍¹ 常登锐² 王强斌² 牛步贵²

1.华电永昌抽水蓄能有限公司 甘肃 金昌 737299

2.中国水利水电第十四工程局有限公司 云南 昆明 650041

【摘要】：抽水蓄能电站是当前技术最为成熟和应用最为广泛的一种大型储能形式，具有调峰填谷、调频、事故备用等作用。随着国家能源结构的进一步优化，新能源（如风电、光伏）比例的不不断提高，电网的调峰容量要求越来越高，因此，抽水蓄能电站的装机容量越来越大。导流洞是抽水蓄能发电系统中的重要输水洞，其建设的好坏和长期运营的安全性对整个项目的经济效益有重要影响。我国抽蓄能电站位于山地，其所处的地理位置较为复杂，且常需跨越多种岩石类型，面临着高水头压力、反复充排水交替加载、地下水冲刷等多种因素的综合影响，对其防渗、隔震、耐久性能均有较高的需求。

【关键词】：抽水蓄能电站；隧洞二衬；高强纤维；混凝土抗渗性能；工程适配性

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.071

二衬混凝土结构的好坏直接关系到抽蓄能水电站导流洞的长远安全性，也是影响其长远发展的重要问题。常规砼在高渗透、冻融和化学侵蚀等复杂条件下易出现抗裂能力不足和耐久性降低的问题。由于在隧道二层衬砌中引入多种纤维，可显著提高其增韧、阻裂及防渗性能，已被广泛应用于隧道二层衬砌结构中。但是，针对抽蓄能电站特殊条件下高强度纤维混凝土的研究尚不够深入，其主要依据传统的施工经验进行，缺少考虑高压、重复荷载和复杂地下水环境的综合考虑。同时，目前对混凝土防水性能的评估仅限于室内某一项指标，很难真正反映其在长时间内的使用性能。

1 高强纤维混凝土应用于抽水蓄能电站隧洞二衬的必要性

由于抽水蓄能电站特殊的运行工况，对衬砌结构的要求非常严格。电站机组在发电和抽水两种工况下频繁切换，引水洞需承受周期性快速充放水压力波动，衬砌处于反复荷载卸荷状态。同时，隧道穿越的地质条件较为复杂，高应力、高外水压力和地下水侵蚀性离子长期作用等因素共同构成了隧道衬砌混凝土复杂的劣化环境。常规混凝土材料很难同时兼顾高强和高抗渗性能，一旦衬砌发生微裂纹或渗透，不仅会影响电站的正常运营，还会引发外部水内渗、内渗等安全隐患，危及工程长期稳定性。采用纤维增强和矿物掺合料相结合的方法，可有效抑制混凝土收缩开裂，改善孔结构，提高抗渗能力。抽水蓄能电站隧洞二衬采用高强纤维混凝土是从材料层面响应工程特殊要求的重要途径，也是保障电站全寿命周期安全稳定运行的

重要技术选择^[1]。

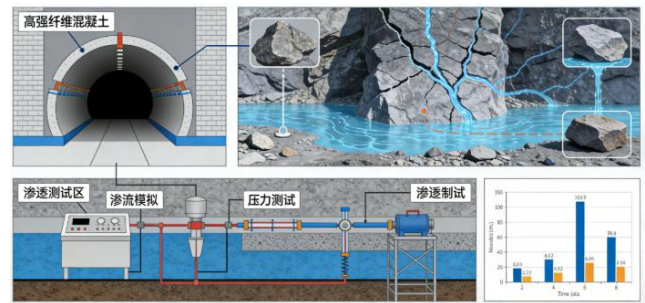


图1 抽水蓄能电站隧洞二衬用高强纤维混凝土抗渗性能与工程适配性研究图

2 高强纤维混凝土抗渗性能与工程适配性存在的问题

2.1 配合比设计的针对性不足

对于抽水蓄能水电站导流洞二层衬砌的配比，至今还没有一套适合具体施工条件的工艺方案。由于水泥、矿物掺合料、细骨料、多纤维以及添加剂等组成的混合系统，其组成成分间存在着复杂的交互作用。基于水泥水化作用和填料作用，采用不同配比的钢纤维-丙纶混合比，实现混凝土抗裂作用和工作性能损耗可控。但现有沥青混合料设计多采用常规水工混凝土的经验参数，未考虑其特殊水力梯度变化、循环荷载效应和岩体约束等因素。导流洞二层衬砌在运行过程中将同时经受内外水两种不同的荷载，其内部和外部水压的交互影响对其内部孔隙结构的影响越来越大。根据隧道埋深、水头高度和岩体类型等因素，选择不同的类型、几何参数和掺入量，而现有的相关机理还没有被构建出来。目前，已有的试验数据与试验数据相

脱离，通过试验优选出的混凝土在仿真环境下性能优异，但一旦投入使用，其泵送性能、振捣密实度和纤维均匀度等指标常常出现偏差，使得其工程适用性很难实现^[2]。

2.2 抗渗性能评价体系不健全

当前，基于常规的渗透特性测试和抗氯盐渗透性测试，很难准确地揭示隧洞二衬在复杂服役条件下的实际防渗特性。导流洞所处的渗流不是定常流，其内部存在着水位升降和机组启停引起的水力压力脉动，该渗流特性对其破坏演变有着显著的影响。已有研究缺乏考虑渗流一时效耦合下渗流特性演化规律的研究，且多以常压荷载形式进行，不能反映原位循环水力梯度改变引起的孔隙结构疲劳损伤。目前尚缺乏对纤维-基质界面过渡带力学特性的准确定量表征方法。超声波和电阻率等无损探测手段用于评价岩石的防渗能力还处在摸索之中，尚未形成与宏观渗透性参数的量化联系。更重要的是，现有的评估方法主要关注混凝土本身的力学特性，忽略混凝土在建造过程中产生的初裂缝对混凝土防渗性能的作用。混凝土浇筑过程中出现的局部离析、纤维分布方向的差异以及施工缝内的界面弱化等问题，很难再现室内试验条件下的混凝土抗渗性能，从而造成评估成果与实际防渗性能的偏离。

2.3 施工工艺与质量控制脱节

针对抽蓄能水电站导流隧洞二衬工程中，采用高强度纤维砼进行二次衬砌时，存在着技术设计和质量管理规范不统一的实际难题。在生产中，纤维砼必须做到均匀分布，而在工地上采用常规混凝土的浇筑次序和时机，常出现纤维结团等问题。由于管道内壁的摩擦力，钢纤维在输送时极易产生取向，使其在受力方向上的空间分布与设计要求不符，从而降低了材料的抗裂性和渗透性。由于PP纤维的低致密度，其在搅拌时容易发生悬浮团聚，且在振动时会随着浆液的运动而发生再分配，其动力学特性在工程技术的设计中尚不能很好地预测。二层砼一般为滑动或针状梁法，其振捣操作范围有限，且插拔振动棒不易覆盖全部区域，导致其密度调控出现盲点。施工缝设置和施工是防渗加固的薄弱环节，由于光纤在穿过施工缝时被截断，导致其与墙体之间的粘接强度降低，传统的维修方法很难保证其防水能力^[3]。

3 提升高强纤维混凝土抗渗性能与工程适配性的有效策略

3.1 优化多组分材料配合比设计

由水泥基材料、细骨料、粗骨料、多种纤维和添加剂构成的多组分复杂系统，其组分间的协同作用将决定其固化后的密实度和抗渗性。沥青混合料的优选应从原料筛选、掺量确定和组合匹配三个层次逐级进行。在胶凝材料选用方面，除了参考水泥，还需要引入活性矿物质（如矿渣粉、硅灰），通过其微细骨料的充填作用和二次水化作用，形成水化硅酸钙凝胶，填补水泥土中的空隙，改善其孔结构。水泥混合材的用量需要通过砂浆流变性实验和砂浆强度测试来确定，同时要考虑工作性能和工作性能之间的关系^[4]。

复合结构中，纤维结构的构筑是复合结构的关键，采用复合结构可有效调控多个层次的裂纹。由于具有较高的弹模和拉伸强度，在承载过程中起到了很大的作用，可以有效地阻止裂纹的发展；聚丙烯纤维在混凝土中呈致密状，其作用是使其在塑性时减少其开裂，而在固化时延迟其贯通。纤维含量的选取要综合考量纤维的长径比、几何形状及其与集料的包覆作用，并采用试拌方法观测纤维在混合料中的分布均匀性，防止纤维聚集引起的局部损伤。根据分级结构的要求，采用合理的级配设计方法，减小集料之间的空隙率、对孔隙的需求，以及减小混凝土体积收缩和渗透通路产生的概率。

3.2 构建复合环境下的抗渗性能评价体系

抽蓄能工程导流洞处于复杂工况下，高渗透、冻融交替及侵蚀离子侵蚀常伴随着复杂的工作环境。传统的单因子渗透测试方法很难全面反映复杂条件下混凝土的力学特性演变，仍需构建综合考虑多因子耦合效应的渗透特性评估系统。评价系统的建立要从实验设备设计、实验制度确定和指标选择三个方面进行。在实验设备上，研制可实现水压、温度和化学腐蚀双重作用的多功能组合环境实验箱，并在箱内设有可调水压增压系统、程控温控系统和腐蚀液自动补充系统。

将已成形和养护至预定龄龄的光纤砼放入室内，根据设计方案施加渗透压力、冻融和硫酸盐腐蚀等多场耦合效应，对导流洞运营过程中真实的环境载荷开展数值模拟。根据场地的气象和水文地质特点，制定相应的实验方案，设置不同的温度区间、升降温速率和循环次数，以及不同的水力荷载梯度和持续时间，以及腐蚀液的浓度和置换时间。以渗透系数为核心，以渗透系数为核心，以渗透系数为核心，构建包含稳

态渗透流量、氯离子扩散系数、电通量、吸水率、孔隙结构等多个参数的综合评估方法。在渗流实验中,对渗流通过试样的流动进行了实时监控,并对渗流速率与加载时间的关系进行了研究。氯离子迅速传输测试是指在不稳定状态下,测试其在不稳定状态下的氯离子传输特性。电流通量法是指在一定的时间段内,通过被试物体表面的电荷总量来评定其密实度。吸水实验反映了表面吸附水的性能,并与其内部结构的连通性有很大关系。采用压汞和 SEM 等测试手段,研究水泥水化产物形态及相变过程中的微观组织变化,揭示水泥基复合材料的宏观渗流特性^[5]。

3.3 完善施工全过程质量控制技术

高强度纤维砼的防渗能力除与其自身配合比有关外,还与其在搅拌、运输、浇筑、振捣和养护等各个阶段的质量管理有很大关系。要提高建筑工程质量控制水平,必须从工艺参数控制、过程监控手段和检测手段三个层面进行系统性的提升。在纤维分布均匀度方面,混合过程是一个重要的控制点。将粗骨料和细骨料与混合水混合,使其湿润,然后添加水泥和矿物混合料,然后将纤维和残余的混合水和混合料混合均匀。与一般的砼相比,拌和的时间要略长,注意拌和机上的拌和物情况,保证纤维充分张开并在砂浆中分散。在输送过程中,要对输送的时间和数量进行严格的控制,以防止由于输送过程中的混凝土坍落率和纤维的沉淀。

参考文献:

- [1] 郭晓磊.抽水蓄能电站引水隧洞斜井导井施工技术研究[J].电气技术与经济,2026,(01):385-387+391.
- [2] 吴小斌等.抽水蓄能电站竖井式泄洪洞消能模型试验研究[J].红水河,2025,44(06):124-129.
- [3] 刘松彪,刘铁峰,李红星.新疆达坂城抽水蓄能电站高压隧洞衬砌型式分析与评价[J].水电与新能源,2025,39(11):78-81.
- [4] 李龙飞.抽水蓄能电站建筑物施工技术应用及质量控制措施[J].中国房地产业,2025,(33):178-181.
- [5] 刘军.大型抽水蓄能电站长引水隧洞施工中的风险控制方法标准化研究[J].标准生活,2025,(07):138-140.

在浇注之前,对模板进行补水,并对模板接头进行检验,以避免因渗漏而引起的外观质量问题。采用分层法施工,各层的厚度要在振捣器的有效作用距离内,在下部砼凝固之前,先将上部砼浇注完毕,防止出现冷缝。在振捣部分,采取插入式振捣棒配合平板振捣器,使振捣位置均匀,振捣的时机以砼表面泛浆,不再下沉,无气泡逸出为止。在振捣时要小心,不能让振捣杆与模板及预埋件直接接触,以免出现位移和损坏现象。在纤维砼中,过量振捣会造成纤维下沉,振捣不够,很难达到理想的压实效果,需要实地试验来获得最优振捣参数。

4 结语

综上所述,抽水蓄能电站隧洞二衬用高强纤维混凝土抗渗性能与工程适配性研究的内容涉及材料学、结构和水力等多学科交叉,提高隧洞二衬防渗能力和工程适应性是保证水电站长期安全运营的关键。因此,从微观尺度上揭示纤维种类、含量和基质组分对混凝土渗透特性的作用机理。建立考虑水力渗透-冻融-化学侵蚀耦合效应的综合评估系统,促进室内试验结果的实用化。在施工技术层次上,研究适合于高强度纤维砼的施工工艺和品质调控方法,在设计、施工和运营阶段,将材料性能高效地转移到设计、施工和运营阶段,为我国大型水电开发项目的顺利实施奠定坚实的理论基础。