

蓄水池池体裂缝成因分析及环氧树脂灌浆修复技术

白光耀

宁夏水利水电工程局有限公司 宁夏 银川 750001

摘 要：蓄水池池体裂缝严重威胁结构安全与储水功能。结构性裂缝中荷载、沉降、温度因素，非结构性裂缝里收缩、施工、化学侵蚀因素，以及材料、设计、施工、环境等多方面诱因共同作用致使裂缝产生。环氧树脂灌浆修复技术凭借其优异材料特性，结合科学灌浆工艺、严格质量把控与安全环保措施，能有效填补裂缝、增强结构强度，为蓄水池裂缝修复提供高效解决方案，对保障工程安全运行意义重大。

关键词：蓄水池；池体裂缝成因；环氧树脂灌浆；修复技术

引言

蓄水池作为水利工程关键设施，其结构完整性直接影响水资源存储与调配。池体裂缝的出现不仅会导致水体渗漏，更可能引发结构破坏等严重后果。本文针对蓄水池池体裂缝，系统梳理常见类型，深入剖析材料、设计、施工及环境等影响因素，并对环氧树脂灌浆修复技术的材料、工艺、质量控制与安全环保等方面展开研究，旨在为蓄水池裂缝防治与修复提供理论依据和技术支撑。

1 蓄水池池体裂缝常见类型

1.1 结构性裂缝

1.1.1 荷载裂缝

荷载裂缝是因外部荷载超过池体结构承载能力极限而产生的裂缝形态。当蓄水池蓄水后，水体压力、土压力及上部附属设施重量等荷载组合作用于池壁与底板，混凝土结构内部产生拉应力与剪应力。若结构设计计算存在偏差或材料强度不足，混凝土抗拉强度低于实际拉应力时，裂缝将沿应力集中区域扩展，多呈贯穿性或深层开裂特征，严重削弱结构整体性与承载能力，危及蓄水池安全运行。

1.1.2 地基不均匀沉降裂缝

地基不均匀沉降裂缝源于基础土体受力不均引发的变形差异。当蓄水池基础下土层压缩模量存在显著差异，或局部遇软弱夹层、暗浜等不良地质条件时，地基各部位沉降量不一致，导致池体结构产生附加应力。这种应力集中于池壁与底板交界处、转角部位等薄弱区域，促使混凝土出现不规则裂缝，初期表现为细微裂纹，随着沉降持续发展，裂缝逐渐加宽加深，破坏结构防水性能与稳定性。

1.1.3 温度裂缝

温度裂缝由混凝土结构因温度变化产生的热胀冷缩

变形受约束所致。蓄水池施工期水泥水化放热形成内部高温，与环境低温形成较大温差，产生温度梯度；运行期季节性温度波动及昼夜温差同样引发混凝土体积变化。当温度变形受到基础、相邻结构或自身约束时，混凝土内部产生温度应力，超过材料抗拉强度即产生裂缝，多呈垂直或水平分布，贯穿性裂缝易导致水体渗漏，影响蓄水功能。

1.2 非结构性裂缝

1.2.1 收缩裂缝

收缩裂缝主要因混凝土水分散失引发体积收缩变形。新浇筑混凝土在硬化过程中，水泥水化反应消耗水分，伴随自收缩与干燥收缩。当混凝土表面失水速度快于内部水分迁移速度，表面产生拉应力，同时因硬化初期强度较低，不足以抵抗收缩应力，进而形成不规则龟裂状裂缝。这类裂缝多分布于混凝土表层，虽一般不影响结构承载力，但降低耐久性，为有害介质侵入提供通道。

1.2.2 施工裂缝

施工裂缝是因混凝土浇筑、振捣、养护等施工环节不当产生的缺陷。混凝土浇筑过程中，分层厚度过大、振捣不密实导致蜂窝麻面与空洞，成为裂缝萌生的薄弱点；施工缝留设位置不合理或处理不规范，新旧混凝土结合面粘结强度不足。早期养护不到位，混凝土表面水分快速蒸发，强度增长缓慢，易因塑性变形产生裂缝，影响结构抗渗性能与耐久性。

1.2.3 化学侵蚀裂缝

化学侵蚀裂缝由混凝土与环境介质发生化学反应导致材料劣化引发。蓄水池内水体若含硫酸盐、镁盐、酸类等侵蚀性物质，通过混凝土孔隙渗透至内部，与水泥水化产物发生化学反应。例如硫酸盐与氢氧化钙反应生成钙矾石，产生体积膨胀；酸类物质腐蚀水泥石，破坏混凝土微观结构。这些化学作用使混凝土强度下降，内

部产生膨胀应力，最终形成裂缝，加速结构破坏进程。

2 蓄水池池体裂缝成因分析

2.1 材料因素

混凝土作为蓄水池池体的主要构筑材料，其自身性能对结构完整性有着决定性影响。水泥品种与质量直接关联水化热释放及收缩特性，低热水泥的选用可有效降低内部温升，减少因温差应力引发的裂缝风险；强度等级不达标或安定性不良的水泥，会导致硬化后结构强度不足与体积变化异常，形成贯穿性裂缝。骨料的级配与杂质含量同样关键，不合理的颗粒级配会增加孔隙率，降低混凝土密实度与抗渗性，粗骨料中泥块、有机质等杂质超标，不仅削弱骨料与水泥石界面黏结力，还可能在水分迁移过程中形成薄弱通道。外加剂掺量不当会干扰混凝土凝结硬化进程，高效减水剂超量使用易导致混凝土早期失水干缩，膨胀剂掺量不足则无法有效补偿收缩，共同作用下加速裂缝萌生与扩展。钢筋的锈蚀问题不容忽视，氯离子侵入破坏钝化膜后，钢筋表面发生电化学反应，产生的锈蚀产物膨胀体积可达原体积数倍，对周边混凝土形成拉应力，致使保护层开裂剥落，严重威胁结构耐久性^[1]。

2.2 设计因素

结构计算模型的准确性直接影响蓄水池抗裂性能。在池体受力分析中，若未充分考虑水压、土压力、温度应力等复杂荷载组合，尤其是对动水压力作用下的局部应力集中缺乏精细化计算，会导致设计承载力与实际受力状态脱节，薄弱部位率先出现裂缝。池壁厚度与配筋设计不合理是常见问题，过薄的池壁难以承受侧向压力，易产生弯曲裂缝；配筋率不足或布置不当，无法有效约束混凝土收缩变形，当拉应力超过混凝土极限抗拉强度时，裂缝随即产生。伸缩缝、后浇带等构造措施设置不科学也会诱发裂缝，伸缩缝间距过大超出混凝土温度变形允许范围，后浇带浇筑时间过早或过晚，均会破坏结构连续性，在温度梯度与收缩应力作用下形成裂缝。地基不均匀沉降的预防设计缺失，当池体坐落于不同地质条件的地基上，或地基处理未达到预期效果时，基础沉降差会对池体结构产生附加应力，导致池壁开裂。

2.3 施工因素

混凝土浇筑过程中的振捣工艺对结构密实度至关重要。振捣不足会使混凝土内部存在蜂窝、孔洞等缺陷，降低整体强度与抗渗性，成为裂缝发展的初始诱因；过度振捣则会导致骨料下沉、水泥浆上浮，产生分层离析现象，形成塑性沉降裂缝。浇筑速度过快会使混凝土来不及充分振捣，同时增加侧压力，易造成模板变形漏

浆，影响混凝土成型质量。养护措施不当是裂缝产生的关键因素，早期养护缺失致使混凝土表面水分快速蒸发，产生塑性收缩裂缝；后期养护周期不足，混凝土强度增长未达预期，在外部荷载作用下易出现裂缝。施工缝处理不规范同样危害结构安全，新旧混凝土结合面未凿毛清理、未铺设同配比砂浆，会形成薄弱界面，在应力传递过程中引发裂缝。模板拆除过早，混凝土强度未达到设计要求，无法承受自身重力与施工荷载，会导致结构变形开裂^[2]。

2.4 环境因素

温度变化是引发蓄水池裂缝的重要环境因素。昼夜温差与季节温差使混凝土产生热胀冷缩变形，当环境温度骤降时，混凝土表面温度迅速降低，内部热量散发缓慢，形成较大的温度梯度，表面受拉应力作用产生裂缝。极端高温环境下，混凝土内部水分加速蒸发，加剧干缩变形，与温度变形叠加，进一步增大裂缝风险。湿度变化对混凝土收缩影响显著，干燥环境中水分快速散失，混凝土收缩加剧，尤其是在大风天气条件下，水分蒸发速度加快，塑性收缩裂缝极易产生。地下水的侵蚀作用不容忽视，当水体中含有硫酸盐、镁盐等侵蚀性介质时，会与混凝土中的水化产物发生化学反应，生成膨胀性物质，导致混凝土膨胀开裂。冻融循环对蓄水池结构危害极大，在负温环境下，混凝土孔隙中的水分结冰膨胀，产生冻胀应力，当温度回升时，冰融化体积缩小，反复的冻融作用使混凝土内部微裂缝不断扩展，最终导致结构破坏。

3 环氧树脂灌浆修复技术分析

3.1 材料特性技术

(1) 环氧树脂材料具备优异的粘结性能，其分子结构中含有大量活性基团，能够与混凝土、金属等多种基材表面的羟基、羧基等官能团发生化学反应，形成化学键连接，在干燥环境下粘结强度可达25-35MPa，有效填补裂缝并增强结构整体性。该材料固化后具有较高的抗压强度和抗折强度，通常抗压强度可达60-80MPa，抗折强度10-15MPa，能够承受较大的外部荷载，满足结构修复后的承载需求。(2) 环氧树脂的固化过程可通过调整固化剂种类和配比进行精确控制，常温条件下，普通固化剂体系固化时间约为24-48小时，而采用快速固化剂可将固化时间缩短至3-6小时，便于根据工程进度灵活安排施工。其低粘度特性使其具有良好的渗透能力，在压力灌浆条件下，粘度可低至50-300mPa·s，能够渗入宽度0.05mm以上的细微裂缝，实现全方位的修复填充。(3) 环氧树脂材料具有优良的化学稳定性和耐老化性能，在

酸、碱、盐等腐蚀介质环境中表现出良好的耐受性，可有效抵御环境侵蚀对修复部位的影响。经过紫外线加速老化试验验证，其性能在500h后仍能保持85%以上的初始强度，适用于长期暴露在自然环境中的结构修复工程。

3.2 灌浆工艺技术

(1) 灌浆前需对裂缝进行预处理，通过高压空气吹扫清除裂缝内的灰尘、碎屑等杂质，再采用丙酮等有机溶剂清洗裂缝表面，确保基材表面洁净，提高环氧树脂与基材的粘结效果。对于宽度大于0.5mm的裂缝，可采用凿槽法进行扩缝处理，槽深一般为20-30mm，槽宽15-20mm，以增强灌浆材料的锚固作用。(2) 灌浆设备的选择直接影响灌浆效果，常用的有电动高压灌浆机和手动灌浆器。电动高压灌浆机适用于大面积、深裂缝的灌浆作业，其输出压力可达15-30MPa，能够将环氧树脂材料快速、高效地注入裂缝深处；手动灌浆器则适用于小型工程或局部裂缝修复，操作灵活方便，压力控制在3-8MPa。灌浆过程中需遵循由下而上、由一端向另一端的顺序，确保灌浆充分，避免出现空洞。(3) 灌浆完成后需进行后处理，待环氧树脂完全固化后，清除表面多余的灌浆材料，采用砂纸打磨平整，对于外观要求较高的部位，可进行表面涂装处理，恢复结构的美观性。对灌浆质量进行检查，通过敲击法或超声波检测法判断灌浆密实度，对存在缺陷的部位及时进行补灌处理，保证修复效果^[3]。

3.3 质量控制技术

(1) 原材料质量是保证灌浆修复效果的基础，环氧树脂和固化剂在进场时需严格进行质量检验，包括粘度、凝胶时间、拉伸强度等指标测试，确保材料性能符合设计要求。材料应储存在干燥、阴凉、通风的环境中，避免阳光直射和高温影响，储存温度控制在5-35℃，防止材料性能发生变化。(2) 灌浆施工过程中，需对关键工艺参数进行严格控制，如灌浆压力、灌浆速度、固化时间等。灌浆压力需根据裂缝宽度和深度进行调整，一般控制在8-25MPa之间，压力过大可能导致裂缝周围基材破坏，压力过小则无法保证灌浆密实度；灌浆速度应保持均匀，避免出现忽快忽慢的情况，防止空气混入形成空洞。(3) 质量检验贯穿于整个灌浆修复过程，除了原材料检验和施工过程控制外，还需对修复后的结构进

行性能检测。通过钻芯取样、拉拔试验等方法检测灌浆材料与基材的粘结强度，采用无损检测技术评估裂缝修复后的密实度和完整性，确保修复后的结构满足设计使用要求，质量符合相关标准规范。

3.4 安全环保技术

(1) 环氧树脂及固化剂大多具有一定的毒性和刺激性气味，施工人员在操作过程中需做好个人防护，佩戴防毒面具、防护手套和防护服，避免皮肤接触和吸入有害气体。施工现场应保持良好的通风条件，设置机械通风设备，及时排出有害气体，降低作业环境中有害气体浓度，保障施工人员身体健康。(2) 施工过程中产生的废弃物，如未使用完的环氧树脂材料、废弃的包装容器等，需进行专门的收集和处理。未固化的环氧树脂材料应采用专用容器密封储存，委托有资质的单位进行无害化处理，严禁随意倾倒；废弃包装容器应进行清洗后分类回收，防止有害物质污染土壤和水源。(3) 在环氧树脂灌浆修复作业中，需采取防火措施，由于环氧树脂材料及其溶剂多为易燃物质，施工现场应严禁烟火，设置明显的防火标识，配备足够的灭火器材。对电气设备进行定期检查和维修，防止因电气故障引发火灾事故，确保施工安全和环境安全^[4]。

结语

综上所述，全面掌握蓄水池池体裂缝类型与成因，对预防裂缝产生、保障工程安全至关重要。环氧树脂灌浆修复技术以其独特优势，在裂缝修复中展现出良好效果。然而，随着工程环境日益复杂，未来需进一步深化对裂缝成因的研究，优化环氧树脂灌浆技术，加强新材料、新工艺的研发与应用，持续提升蓄水池裂缝修复水平，确保水利工程长期稳定运行。

参考文献

- [1] 娄岩.浅析大体积调蓄水池池底防渗施工技术[J].陕西水利,2022(6):134-136.
- [2] 袁奕.不同类型蓄水池的性能与应用分析[J].模型世界,2024(6):177-179.
- [3] 刘强,梁慧,曾乾礼,等.高渗透环氧树脂灌浆材料低温特性研究[J].水力发电,2023,49(5):108-112.
- [4] 冷珍华,张吉顺.混凝土裂缝环氧树脂灌浆处理技术[J].中国新技术新产品,2022(21):62-64.