抽水蓄能上水库土工膜防渗体系运行病害成因及修复技术

彭德宽　赵秋娟
中国水利水电建设工程咨询西北有限公司　陕西　西安　710100

摘　要：土工膜防渗体系在水利与环保工程中应用广泛，运行阶段各类病害直接制约防渗功能的长期有效性。围绕本体破损、拼接失效、滑移变形及脱空渗漏四类典型病害，从材料衰减、施工缺陷、环境作用、岩土变形及循环荷载五个维度梳理成因机制，进而归纳局部修补、焊缝修复、复位加固、脱空充填及老化更换等关键技术手段，本文就修复过程质量控制与运行监测防控策略进行系统论述，以期为防渗体系全生命周期管理提供技术参考。

关键词：土工膜防渗体系；运行病害；成因机制；修复技术；质量控制

引言：随着高坝大库及固废填埋场等工程对防渗标准要求的持续提升，土工膜作为核心隔水屏障得到大规模推广应用。实际服役条件下，膜体遭受水力、温度、荷载及基础变形等多因素耦合作用，各类损伤病害逐渐显现，防渗能力呈现不同程度的衰减趋势。如何准确辨识病害类型、厘清致损机理并选用适宜的修复处置方案，成为运维阶段亟待解决的技术难题。围绕这一需求，系统梳理防渗体系常见病害的表现特征与诱发因素，总结针对性修复技术及质量控制手段，具有明确的工程实用价值。

1 土工膜防渗体系典型运行病害类型

1.1 土工膜本体破损类病害

土工膜本体破损表现为膜面出现刺穿、撕裂、磨损或压痕等损伤形态。这类病害的直接诱因来自膜下尖锐骨料颗粒在覆压作用下的穿刺行为，以及膜上保护层缺失时施工机械直接碾压膜面造成的硬伤。破损部位高度集中于边坡与库底过渡带、锚固沟边缘及膜下基础处理欠密实区域。破损尺度差异较大，小至毫米级针孔，大致数十厘米的撕裂口，这些缺陷均会破坏膜体隔水性能的完整性。膜面磨损多由保护层砂砾石在坡面径流带动下反复摩擦所致，长期作用使膜面有效厚度逐渐减薄，承载能力随之下降。化学介质侵蚀造成的膜面溶胀或萃取现象虽不形成明显孔洞，但材料微观结构变化后力学性能劣化明显，在外力作用下更易发生脆性断裂。

1.2 土工膜拼接部位失效类病害

拼接部位是防渗体系中抵御渗透压力的薄弱环节。热熔焊接或挤出焊接形成的焊缝区存在虚焊、漏焊或过焊等隐性工艺缺陷，这些缺陷在内外部水压差驱动下逐步扩展为贯通的渗漏通道。剥离强度不足的焊缝在温度应力反复作用下产生分层剥离现象，冬季低温环境中焊缝边缘尤为容易出现脆性开裂。搭接宽度不够或焊接参数控制不当致使焊缝质量分布不均，拼接区域在长期受力状态下逐渐丧失整体协同工作能力[1]。焊缝处冷却收缩形成的残余应力与运行期外荷载叠加后，容易在焊趾部位引发微裂纹并缓慢扩展。十字焊缝和T形焊缝等几何不连续部位应力集中程度更高，此处往往是拼接失效的优先发生位置。

1.3 土工膜滑移与变形类病害

铺设于库坡面上的土工膜在自重及上覆荷载作用下沿坡面发生蠕变滑移，膜面随之出现褶皱、悬垂或波浪状起伏变形。滑移量累积过大时将锚固沟内膜体拉出或造成锚固螺栓连接失效，坡顶张拉应力集中区域出现颈缩变薄乃至断裂。膜下排气不畅引发的鼓包变形在温度升高的条件下加剧，膜面隆起部位不仅破坏防渗层平整度，更在反复胀缩过程中加速材料疲劳损伤的累积进程。坡面中下部的横向褶皱在膜面受拉时无法有效展开，折叠处的局部弯折应变往往超出材料容许范围。风荷载吸附作用使大面积裸露膜面产生上下脉动位移，这一动态变形加剧了膜体与下卧层界面的脱离趋势。

1.4 防渗层整体脱空与渗漏病害

膜下气体或水体聚集形成局部高压区，导致土工膜与下卧支持层脱离接触而产生大面积脱空。脱空区域膜体处于悬空受力状态，在外力作用下极易发生大变形撕裂。库水位骤降时脱空区内形成负压吸力，进一步牵引膜体发生位移变形。渗漏病害表现为防渗体系整体防渗功能下降，渗流量监测数据持续异常增高，渗出液浑浊度加大，表明膜下细颗粒材料随渗流发生迁移流失。脱空范围持续扩展时，相邻脱空区域相互贯通，形成更大

面积的膜体悬空区，结构安全性急剧恶化。渗漏路径一旦在膜下支持层中贯通形成管道流，细颗粒流失速率加快，基础持力条件不断劣化。

2 土工膜防渗体系病害成因分析

2.1 材料自身性能衰减成因

土工膜在服役过程中经历抗氧化剂消耗和分子链断裂等不可逆老化过程，抗拉强度和断裂伸长率随时间推移呈下降趋势。紫外线辐照导致膜面表层交联密度增加、材料脆性上升，低温冲击强度明显降低。不同批次膜材之间的性能差异使得防渗体系整体抗力分布不均，性能衰减速率较快的薄弱区域率先进入快速劣化阶段[2]。环境应力开裂在高密度聚乙烯膜中尤为突出，在持续拉应力与化学介质协同作用下，膜面出现细微裂纹并逐渐扩展。炭黑分散不均匀的膜材局部抗紫外线能力不足，这些区域的老化速率远高于膜面平均值，形成早期性能退化点。

2.2 施工工艺缺陷遗留成因

膜下基础平整度不达标和压实度不足为后期膜体受力不均埋下隐患。焊接施工中温度控制不严、压力调节不当及速度匹配失衡直接造成焊缝内在质量缺陷。保护层覆盖不及时或覆盖厚度不够使得暴露膜面遭受紫外线损伤和人为损坏。锚固沟回填夯实不到位削弱了锚固端的抗拔承载力，运行中膜体在拉力作用下容易从锚固端滑脱。铺设阶段膜面张拉过度或张拉不足均会留下后患，前者使膜体长期处于高应力状态，后者则在大变形时无法有效承载。膜面搭接处杂物清理不彻底导致焊缝内夹杂异物，形成局部应力集中点。

2.3 水文气象环境作用成因

库区水位周期性涨落引起膜后水位变化，膜面承受的水压力幅值随之波动。极端高温条件下膜体热膨胀产生压缩屈曲，极端低温条件下材料收缩受约束产生拉伸应力。降雨入渗增大膜后孔隙水压力，削弱膜体与下卧层之间的接触稳定性。冻融循环作用使膜下基础土体结构破坏，不均匀沉降加剧膜体应力集中程度。强风浪冲击坡面膜体时产生动水压力脉动，这一脉动荷载在膜面局部区域形成反复拉压交替的受力状态。高海拔地区强烈紫外线辐照与昼夜大温差的耦合作用使膜面老化进程显著加快。

2.4 库区岩土体变形影响成因

库岸边坡蠕变和坝体不均匀沉降产生较大的差异变形，通过膜下支持层传递至土工膜面。地基软弱夹层在长期荷载作用下发生压缩变形，导致支持层表面出现凹陷或突起。地震动力作用下的瞬时大变形使膜体产生不可恢复的塑性延伸。坝体填筑区长期压缩固结引起的持续沉降使膜面产生额外的拉伸应变，这种应变累积效应在膜体约束较强的锚固端尤为明显。膨胀土基础遇水膨胀失水收缩的循环过程使膜下支持层反复变形，膜体随之承受交变弯折作用。

2.5 长期循环运行荷载作用成因

库水位频繁升降引起膜面水荷载的循环加卸载，膜体在交变应力作用下产生疲劳累积损伤。温度日变化和周变化引发的膜体反复胀缩应变导致焊缝区域承受交变剪切力。波浪拍打和漂浮物撞击对膜面施加脉冲式冲击荷载，尤其在膜体已有微损伤的部位加速裂纹扩展。水库每年数次的蓄放水过程使防渗体系经受数十次显著荷载循环，疲劳损伤逐渐累积直至某一薄弱环节率先发生失效[3]。运行年限超过20年的工程中材料蠕变变形已相当可观，这部分不可逆变形消耗了膜体大部分预留应变容量。

3 土工膜防渗体系病害修复关键技术

3.1 破损点位局部修补技术

针对破损尺度较小的膜面缺陷采用补丁贴覆法修复，选用与母材材质相同的膜片裁剪为圆形或椭圆形补丁，边缘打磨后涂覆专用粘接剂或进行热熔焊接。修复区域边缘处理成斜坡过渡形式以减少应力集中，采用手持式焊接机具实施多层焊接确保修补处与原膜体形成整体受力结构。修复完成后对修补区域进行真空负压检测验证密封效果。水下破损点修复需借助潜水作业平台和专用水下焊接设备，修复工艺参数须根据水深和水温条件做针对性调整。

3.2 拼接焊缝失效修复技术

焊缝剥离或虚焊区域采用挤出焊接法重新熔融结合，沿失效焊缝两侧各扩展一定宽度进行打磨清理后重新施焊。对于大范围焊缝开裂情况采用覆盖增强焊接工艺，在原焊缝上方加铺增强带并实施双侧焊接。搭接宽度不足的部位增设附加增强补丁或采用粘接与焊接组合加固措施。修复过程中严格控制预热温度与行进速度以保证新焊缝与原膜体间的融合质量。焊缝修复完成后需进行现场剥离测试，检验结果合格后方可进行保护层回填。

3.3 膜体滑移复位与固定加固技术

滑移变形的膜体通过卷扬机牵引系统施加可控拉力使其回位至设计位置，牵引过程中实时监测膜面应变状态防止过度拉伸。复位后对锚固端进行加固改造，加密锚固螺栓或增设压条装置提高锚固承载能力。坡面上增设防滑槽或防滑凸台等限位构造以约束膜体后续滑移趋

势。已产生不可恢复塑性变形的膜段采取局部切除后重新铺设拼接的处理方式[4]。复位施工宜选择环境温度适宜的时段进行，避免膜体热胀冷缩状态对复位精度造成干扰。锚固沟内回填材料更换为高摩阻系数的碎石混合料，提升锚固端抗拔出力。

3.4 防渗层脱空充填与整体补强技术

脱空区域采用低压慢速注浆工艺充填水泥基或聚合物基充填材料，注浆压力控制在膜体抬升阈值以内以避免充填过程中膜体过度隆起。充填材料固化后与下卧层形成紧密贴合，恢复膜体支撑条件。脱空范围较大时在膜面增设配重层或锚固系统以增强膜体抵抗负压吸附的能力。结合电法或电磁法探测技术对充填效果进行全区域验证。注浆孔布置遵循由外围向中心逐序加密的原则，注浆过程中安排专人观测膜面变形情况，压力异常时立即停止注浆并进行排查。充填材料凝结时间根据施工环境温度调整配比，确保注浆作业在材料可泵送窗口期内完成。

3.5 大面积老化膜体更换改造技术

老化程度严重且破损密度超限的膜面采取分段更换方案，以锚固分区或伸缩缝为界划分施工单元进行逐段替换。旧膜拆除后重新检验和整平基础层，新膜铺设时优化接缝位置布局避免新旧膜拼接处应力集中。新旧膜搭接处采用专用连接件或加宽焊接工艺保证界面过渡区域的防渗连续性。更换区域边缘进行密封处理并与未更换膜体形成可靠连接。施工期间需在更换区域上游设置临时围堰或挡水设施，保证更换作业面处于干燥环境。新膜铺设前对基础层进行全面检测，含水率、平整度和压实度各项指标均达标后方可开始铺膜作业。

4 病害修复质量控制与长效防控技术

4.1 修复施工全过程质量控制要点

修复材料进场后核验材质证明文件并进行性能复检，确保补片和焊条与母材性能匹配。焊接工艺参数依据现场环境温度湿度条件进行动态调整，每道焊缝完成后进行剥离强度和剪切强度检测。修复区域表面清洁度和平整度满足作业要求后方可进入下一工序。隐蔽工程在覆盖前完成影像记录和检测数据存档，形成完整可追溯的质量凭证。修复作业面每日收工前进行当日施工质量自检，发现问题当日整改完毕，避免质量问题隔夜后扩大化。施工机械与膜面接触部位铺设临时保护垫层，防止设备移动过程中对修复完成的膜面造成二次损伤。

4.2 防渗体系运行监测技术手段

渗流量监测采用堰流或量水堰法实时获取渗漏速率变化数据，渗压计布设在膜后不同高程断面以掌握膜后水头分布规律。膜面变形监测运用分布式光纤应变传感技术获取全场应变分布图像，温度监测阵列记录膜面温度场时空演变特征。监测数据采集频率根据库水位变化速率和季节因素动态调整，异常数据触发预警后加密监测周期。水下膜面检查借助遥控潜水器搭载高清摄像系统完成，该方式可覆盖人工无法到达的深水区域。膜面完整性探测采用偶极子电位法或时域反射法，探测结果与历史数据比对后可识别新增破损位置。

4.3 基于病害成因的预防性防控措施

运行期控制库水位骤降速率以减少膜后负压效应，极端气候来临前对暴露膜面采取临时遮蔽防护措施。定期清理膜面杂物和尖锐物体降低机械损伤概率，每年枯水期安排专业潜水员进行水下膜面巡视检查。材料老化指标纳入年度检测计划，依据老化程度制定分级处置预案。防渗体系周边截排水设施保持通畅运行状态以减少雨水入渗对膜后水环境的干扰[5]。运行管理单位建立病害档案数据库，将每次巡视检测发现的异常信息录入系统，为后续维护决策提供数据支撑。库区水位调度方案编制时充分考虑防渗体系承载能力约束，避免极端调度工况下膜体承受超设计荷载。

结束语：土工膜防渗体系的运行安全依赖病害精准识别、成因科学判断与修复措施合理选择之间的有效衔接。破损、拼接滑移及脱空等病害各有主导因素，修复方案的制定需综合考虑损伤程度、环境条件及施工可操作性。修复质量控制与监测防控构成长效服役的双重保障，施工过程检验与运行期动态监测相互补充，能够显著降低体系失效风险。预防性防控理念的落实需要将日常巡视、老化跟踪与调度管理有机结合，持续提升防渗系统运行可靠性。

参考文献

[1]陆艺.水库除险加固工程中大坝防渗技术的应用分析[J].读报参考,2026,(4):140-141.

[2]王远东.中小型水库除险加固工程病害成因及防渗加固技术探析[J].中国建筑,2026,9(21):186-188.

[3]马驰,陈绮颖,岳建伟,等.中小型水库大坝渗漏病害成因分析及防渗加固施工技术[J].中国土木工程,2025,8(15):52-54.

[4]曾旭明.水利施工中堤坝的防渗处理技术研究[J].睿士,2022,(13):106-108.

[5]杨阳.中小型土石坝渗漏病害成因及防渗处置技术探究[J].城镇建设与科学,2026,9(7):97-99.