

水库除险加固工程中的渗流控制技术研究与应用

孙贵斌

阿鲁科尔沁旗水利局 内蒙古 赤峰 025550

摘要：水库渗流问题成因复杂，危害极大，包括地质、设计施工、运行管理等多方面因素，会引发渗透变形、降低坝体稳定性等。渗流控制技术包括坝基、坝体、结合部及绕坝渗流控制技术等。应用时需做好前期勘察与渗流分析、施工工艺与质量控制、效果监测与评估。此外，新型渗流控制技术前景广阔，如新型防渗材料、智能化监测与预警技术、生态友好型渗流控制技术等，能提升渗流控制效果，推动水利工程与生态环境协同发展。

关键词：水库；除险加固；渗流控制；防渗技术；安全

引言：水库作为重要的水利工程设施，其安全运行关乎国计民生。然而，渗流问题一直是威胁水库安全的顽疾，成因复杂，涉及地质条件、工程设计与施工以及运行管理等多方面，且危害极大，可引发坝体变形、滑坡坍塌，造成水量损失，还可能破坏周边地质与生态环境。为应对这一挑战，渗流控制技术不断发展，涵盖坝基、坝体防渗及结合部与绕坝渗流控制等多种技术方法。同时，随着科技进步，新型防渗材料、智能化监测预警以及生态友好型渗流控制技术等不断涌现。本文将深入剖析水库渗流问题，探讨渗流控制技术要点及新型技术的研究与应用前景。

1 水库渗流问题的成因与危害

1.1 渗流问题的成因

水库渗流问题的形成原因较为复杂，主要包括地质条件、工程设计与施工、运行管理等多个方面。（1）从地质条件来看，水库坝基和坝肩的岩土层渗透性是影响渗流的关键因素。若坝基存在强透水层、断层破碎带、裂隙发育等情况，会为渗流提供通道，导致坝基渗漏。坝肩山体若岩性破碎、透水性强，也容易产生绕坝渗流。（2）工程设计与施工方面，若设计阶段对地质勘察不够详细，防渗结构设计不合理，如防渗体厚度不足、防渗材料选择不当等，会为渗流留下隐患。施工过程中，若防渗体施工质量控制不严，出现蜂窝、孔洞、裂缝等缺陷，或者坝体填土压实度不够、级配不良，都会增加坝体的透水性，引发渗流问题。（3）运行管理过程中，水库水位的频繁变动会使坝体和坝基受到反复的渗透压力作用，加速土体的渗透变形；同时，若对水库的监测不够及时，未能发现早期的渗流迹象并采取措施，会导致渗流问题逐渐恶化^[1]。

1.2 渗流问题的危害

渗流问题对水库的安全运行危害极大。（1）渗流会

带走坝体和坝基中的细小颗粒，导致土体结构破坏，引发管涌、流土等渗透变形现象。管涌会使土体中的孔隙逐渐扩大，形成渗流通道，进一步加剧渗漏；流土则会使坝体或坝基表层土体整体浮动，破坏坝体的稳定性。

（2）长期的渗流会降低坝体和坝基岩土体的强度和抗剪性能，使坝体的稳定性下降，可能导致坝体滑坡、坍塌等严重事故。此外，渗流还会造成水库水量的损失，影响水库的兴利效益，同时可能对周边的地质环境和生态环境产生不利影响，如引发周边地区的地面沉降、地下水污染等问题。

2 渗流控制的主要技术方法

2.1 坝基防渗技术

坝基防渗是控制水库渗流的关键环节，常用的技术方法包括帷幕灌浆、防渗墙、高压喷射注浆等。（1）帷幕灌浆是通过在坝基钻孔，向孔内灌注水泥浆、水泥黏土浆等浆液，形成一道连续的防渗帷幕，以阻断坝基的渗流通道。该技术适用于各种岩基和砂砾石地基，具有防渗效果好、适应范围广等特点。灌浆材料的选择应根据地质条件和防渗要求确定，灌浆压力和灌浆孔布置需通过计算和试验确定，以确保帷幕的连续性和防渗性能。（2）防渗墙是在坝基中建造一道连续的地下墙体，起到防渗作用。常用的防渗墙类型有钢筋混凝土防渗墙、素混凝土防渗墙、黏土混凝土防渗墙、塑性混凝土防渗墙等。防渗墙适用于深厚覆盖层地基，具有防渗效果可靠、施工速度较快等优点。施工方法主要有钻挖成槽法、冲击成槽法等，成槽过程中需做好泥浆护壁，防止槽壁坍塌。（3）高压喷射注浆是利用高压喷射设备将水泥浆液或其他化学浆液高速喷射到地基土中，使浆液与土体混合搅拌形成固结体，从而达到防渗和加固地基的目的。该技术适用于处理砂土、粉土、黏性土等地基，具有施工灵活、对地层适应性强等特点，可形成不

同形状的防渗体，如柱状、板状、壁状等^[2]。

2.2 坝体防渗技术

坝体防渗技术主要针对坝体本身的渗漏问题，常用的方法有黏土防渗、沥青混凝土防渗、土工合成材料防渗等。（1）黏土防渗是利用黏土的低渗透性，在坝体表面铺设一定厚度的黏土防渗层，以阻止坝体渗漏。黏土防渗层施工时需进行分层压实，确保压实度达到设计要求，同时做好防渗层与坝体的结合处理，防止出现接触渗漏。该技术成本较低，适用于中低坝的防渗处理。（2）沥青混凝土防渗具有防渗性能好、适应变形能力强、施工速度快等优点，适用于各种坝型的防渗。沥青混凝土防渗体通常由沥青、矿粉、骨料等材料混合而成，铺设在坝体表面，形成连续的防渗层。施工过程中需控制好沥青混凝土的配合比、摊铺温度和压实度，确保防渗体的质量。（3）土工合成材料防渗是采用土工膜、复合土工膜等材料进行坝体防渗。土工合成材料具有重量轻、柔韧性好、防渗性能优异、耐腐蚀性强等特点，适用于各种复杂地形和地质条件。施工时需做好材料的拼接和锚固处理，确保防渗体的完整性和密封性，同时注意避免材料被尖锐物体刺破。

2.3 坝体与坝基结合部及绕坝渗流控制技术

坝体与坝基结合部是渗流容易发生的部位，常用的控制技术有截渗槽、接触灌浆等。（1）截渗槽是在坝体与坝基结合处开挖沟槽，然后回填防渗材料（如黏土、混凝土等），形成截渗屏障，阻止渗流从结合部通过。接触灌浆则是通过在结合部钻孔灌浆，填充缝隙，提高结合部的防渗性能和整体性。（2）绕坝渗流控制主要是针对坝肩山体的渗漏，常用的方法有帷幕灌浆、防渗铺盖、排水减压等。对坝肩的强透水岩层或裂隙发育带进行帷幕灌浆，可形成防渗帷幕，阻断绕坝渗流通道；在坝肩上游设置防渗铺盖，延长渗径，降低渗透坡降；在坝肩下游设置排水孔或排水廊道，降低渗透压力，防止渗透变形。

3 渗流控制技术的应用要点

3.1 前期勘察与渗流分析

在应用渗流控制技术之前，必须进行详细的前期勘察和渗流分析，这是确保渗流控制效果的前提。（1）前期勘察应全面了解水库坝基、坝体、坝肩的地质条件、水文地质条件，查明渗漏通道的位置、规模和渗透性等参数。勘察手段包括地质钻探、物探（如地震勘探、电法勘探等）、水文地质试验（如抽水试验、压水试验等）等。通过勘察，为渗流控制技术的选择和设计提供准确的地质资料。（2）渗流分析是根据勘察结果，采

用理论计算、数值模拟等方法，对水库的渗流场进行分析，预测渗流量、渗透压力、渗透坡降等参数的分布情况，评估渗流对坝体和坝基稳定性的影响。常用的渗流分析方法有有限元法、边界元法等，通过建立渗流计算模型，模拟不同工况下的渗流情况，为渗流控制设计提供科学依据。

3.2 施工工艺与质量控制

渗流控制技术的施工工艺直接影响防渗效果，必须严格控制施工质量。（1）在施工前，应编制详细的施工组织设计，明确施工工序、技术要求和质量控制标准。施工过程中，要加强对原材料的质量检验，确保所用材料符合设计要求，如水泥的强度等级、黏土的塑性指数、土工合成材料的物理力学性能等。（2）对于灌浆工程，要控制好灌浆孔的布置、钻孔深度、孔径、灌浆压力、浆液浓度等参数，做好灌浆过程中的记录和监测，及时调整灌浆参数。对于防渗墙、防渗层等施工，要控制好施工设备的操作、施工速度和施工质量，如防渗墙的成槽精度、混凝土的浇筑质量，防渗层的摊铺厚度和压实度等。（3）施工过程中应建立完善的质量检查制度，对每一道工序进行质量检验，合格后方可进行下一道工序。同时，要做好施工记录和资料整理，为工程验收提供依据^[3]。

3.3 效果监测与评估

渗流控制技术应用后，需要进行长期的效果监测与评估，以检验防渗效果是否达到设计要求，及时发现新的渗流问题并采取措施。（1）效果监测的内容主要包括渗流量、渗透压力、坝体和坝基的变形、地下水位等参数的监测。监测设备可采用渗压计、流量计、测斜仪、水位计等，监测数据应及时采集、整理和分析。（2）通过对监测数据的分析，评估渗流控制技术的应用效果。若监测结果表明渗流量明显减少、渗透压力降低、坝体和坝基变形稳定，说明防渗效果良好；若发现渗流量增大、渗透压力异常、出现新的渗漏点等情况，应及时查明原因，采取补充防渗措施。（3）效果评估是一个动态的过程，应贯穿于水库运行的整个生命周期，根据评估结果不断优化渗流控制方案，确保水库的长期安全运行。

4 新型渗流控制技术的研究与应用前景

4.1 新型防渗材料的研发与应用

在材料科学迅猛发展的时代背景下，新型防渗材料如雨后春笋般不断涌现，为渗流控制技术的革新与突破带来了全新契机。（1）高性能混凝土领域，自修复混凝土堪称一大创新亮点。它借助特殊的材料配方与结构设计，能在材料内部构建起自我修复机制。一旦混凝土

结构出现微小裂缝，其中的修复成分便会被激活，自动填充裂缝并实现愈合，极大地提升了防渗体的长期耐久性，有效降低了因裂缝扩展导致的渗漏风险。（2）新型土工合成材料方面，纳米改性土工膜表现卓越。纳米技术的引入，使其具备更优的耐老化性能、卓越的力学性能以及出色的防渗性能，即便处于极端恶劣的环境条件，如强紫外线辐射、高低温交替等，依然能保持稳定的防渗效果。（3）环保理念的深入人心促使环保型防渗材料的研发成为必然趋势。采用可降解材料、无污染材料等，从源头上减少了对生态环境的负面影响。这些新型防渗材料的广泛应用，必将显著提升渗流控制的效果与可靠性，进一步拓展渗流控制技术的应用边界。

4.2 智能化监测与预警技术

智能化监测与预警技术已然成为未来渗流控制技术发展的关键方向，在保障水库安全运行方面发挥着不可替代的作用。（1）在实际应用中，通过在水库坝体、坝基以及周边环境精心布设数量众多、类型多样的传感器，构建起全方位的监测网络。借助物联网技术，实现监测数据的实时、稳定传输；运用大数据技术，对海量监测数据进行高效存储与深度挖掘；利用人工智能技术，赋予系统智能分析的能力。（2）智能化监测系统具备强大的自动化功能，可自动完成监测数据的采集、处理与分析。一旦监测数据超出预设阈值，系统会立即自动发出预警信息，为管理人员争取宝贵的应对时间。同时，通过建立精准的渗流数值模型，结合大数据和人工智能算法，能够对渗流发展趋势进行科学预测，为水库的安全管理与决策提供坚实、可靠的依据。（3）该技术的应用，显著提高了渗流监测的效率与准确性，真正做到对渗流问题的早发现、早处理，极大提升了水库的安全保障能力^[4]。

4.3 生态友好型渗流控制技术

当下，在高度重视水库安全保障的同时，生态友好型渗流控制技术正日益成为行业关注的焦点。此技术秉持着在切实满足渗流控制功能需求的基础上，最大程度

降低对周边生态环境不良影响的原则，全力推动水利工程与生态环境的和谐共生、协同发展。以植被防渗技术为例，它巧妙借助植物根系的强大固土能力以及独特的生长特性，在土壤中交织形成一层天然且高效的防渗屏障。这一技术不仅能有效阻止水分渗漏，还兼具美化环境、保持水土、调节局部气候等多重生态效益。在防渗工程施工环节，积极采用环保型施工工艺和先进设备。通过优化施工流程、选用低噪声设备、采取有效的防尘降尘措施等，显著减少施工过程中的噪音、粉尘以及废弃物排放，切实保护周边的动植物栖息地和生态系统完整性。生态友好型渗流控制技术的研究与广泛应用，高度契合可持续发展的时代理念，无疑将成为未来水库除险加固工程中渗流控制技术的重要发展方向。

结束语

综上所述，水库渗流问题成因复杂、危害严重，传统渗流控制技术涵盖坝基、坝体及结合部等多方面，且在应用中需重视前期勘察、施工工艺与效果监测等要点。而新型渗流控制技术展现出巨大潜力，新型防渗材料提升了防渗效果与可靠性，智能化监测与预警技术提高了监测效率和准确性，生态友好型技术推动着水利工程与生态环境的协调发展。未来，应持续加大对新型渗流控制技术的研发与应用力度，不断优化现有技术，结合工程实际需求，构建更加科学、高效、环保的渗流控制体系，为水库的安全稳定运行和可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]陈声震.水库大坝安全监测技术及其应用[J].水上安全,2024,(20):10-12.
- [2]张永年.杜寨水库大坝渗流监测形态分析[J].山西水利科技,2022,(03):26-28+31.
- [3]索然.小型水库除险加固工程质量因素分析[J].水与水技术,2022,(00):156-158.
- [4]刘方勇.水库除险加固工程新建泄洪隧洞施工研究[J].技术与市场,2024,31(04):86-88.