小型水库除险加固中灌浆质量控制与验收体系研究

何云发
湖南省龙山县水利局　湖南湘西　416800

摘　要：本文结合龙山县“十四五”期间小型水库除险加固工程实践，针对灌浆技术应用中面临的质量控制挑战，系统研究了适用于小型水库除险加固的灌浆质量控制与验收体系。论文重点分析了不同类型灌浆技术的质量控制要点，构建了涵盖施工过程动态监测、单元工程验收标准优化、质量缺陷处理及验收资料规范化管理的全链条质量控制体系，以期为提升小型水库除险加固灌浆工程质量提供技术支撑。

关键词：小型水库；除险加固；灌浆技术；质量控制；验收体系；技术标准

引言

近年来，水利行业发布了一系列新版技术标准，包括《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》（SL/T 62-2020）、《水利水电建设工程验收规程》（SL/T 223-2025）以及《水利水电工程单元工程施工质量验收标准第3部分：地基处理与基础工程》（SL/T 631.3-2025），为小型水库除险加固灌浆工程提供了全新的技术规范框架。这些新标准在灌浆工程质量管理、验收程序和技术要求等方面均有重大更新，对灌浆工程质量管控提出了更高要求。

一、灌浆类型及其质量控制要点

小型水库除险加固中常用的灌浆技术主要包括帷幕灌浆、高压旋喷灌浆、充填灌浆和接触灌浆等。不同类型的灌浆技术有其特定的适用条件和质量控制要求。

1.帷幕灌浆质量控制

帷幕灌浆主要用于解决坝基和坝肩岩体渗漏问题，通过在地基中形成一道连续的防渗幕体，降低渗透压力，防止渗透破坏。根据SL/T 62-2020规范，帷幕灌浆质量控制应重点关注以下方面：

·钻孔质量控制：孔位、孔深和孔斜必须严格控制。特别是孔斜控制直接关系到防渗帷幕的连续性和有效性，孔斜偏差应≤1.5%。在龙山县摸鱼河水库除险加固中，采用单排灌浆，孔距2.0m，通过高精度测斜仪进行全过程监控，确保了帷幕的连续性。

·灌浆参数控制：包括灌浆压力、注入率、变浆标准等。灌浆压力通过经验公式P=Po+mD进行估算，并根据实际情况调整。在最大设计压力下，注入率降低至不大于1L/min后，屏浆30min，且屏浆期间平均注入率不大于1L/min，作为结束灌浆的标准。

·浆液性能控制：帷幕灌浆一般采用强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥，细度为通过80μm方孔筛筛余量不大于5%；浆液水灰比按5、3、2、1、0.7、0.5六个比例逐级变换。

2.高压旋喷灌浆质量控制

高压旋喷灌浆主要用于处理坝体填筑质量差、渗透系数大的问题，通过高压喷射流切割地层，同时灌入水泥浆液，形成连续防渗墙。其质量控制要点包括：

·钻孔精度控制：孔位偏差不大于10cm，孔深不小于设计孔深，孔斜率控制在允许范围内。

·喷射参数控制：包括喷射压力、提升速度、旋转速度等。在龙山县团结水库坝体高压旋喷灌浆施工中，对喷射压力、提升速度、旋转速度等施工参数进行实时监控，确保固结体均匀连续。

·固结体质量要求：旋喷体渗透系数应达到10^{-6}～10^{-7}cm/s，形成有效防渗屏障。可通过围井试验检查高喷固结体的渗透系数和强度指标。

3.充填灌浆质量控制

充填灌浆主要用于处理坝体内部空洞、裂缝和松散区域，通过注入浆液充填缺陷部位，提高坝体密实度和整体性。质量控制要点包括：

·灌浆范围控制：确保脱空区域、裂缝等缺陷部位完全充填。如龙山县施尔湖水库对大坝进行充填灌浆，共设置3排充填灌浆孔，灌浆孔孔距2m，灌浆孔排距2m，确保了充填范围的全面性。

·浆液流动性控制：浆液应具有良好的流动性，确保能够充分充填裂缝和空洞，同时又要控制好凝结时间，

防止浆液过度流失。

·结束标准控制：根据设计要求和规范规定，确定合适的灌浆结束标准，通常以灌浆压力回升和吸浆量减少到规定值为判断依据。

4.接触灌浆质量控制

接触灌浆主要用于处理坝体与基岩接触面的渗漏问题，通过在接触带形成防渗屏障，防止沿接触面的绕坝渗漏。其质量控制要点包括：

·布孔位置控制：孔位应精准布置在接触带区域，确保浆液能够充分充填接触面。

·灌浆压力控制：压力控制适当，既要保证浆液充分渗透，又要防止压力过大导致坝体或基岩破坏。

·浆液膨胀率控制：浆液应具有适当的膨胀性能，确保充填饱满，膨胀率符合设计要求。

表1　小型水库除险加固各类灌浆质量控制关键指标

灌浆类型	主要质量控制指标	技术要求	检查方法
帷幕灌浆	孔斜、灌浆压力、透水率	孔斜≤1.5%、透水率达标	测斜仪、压力表、压水试验
高压旋喷灌浆	喷射压力、提升速度、渗透系数	渗透系数10^{-6}~10^{-7}cm/s	压力表、速度计、围井试验
充填灌浆	灌浆范围、浆液流动性、结束标准	脱空区域充填密实、结束标准符合规范	敲击法、钻孔取芯
接触灌浆	布孔位置、灌浆压力、浆液膨胀率	接触带充填饱满、膨胀率符合要求	外观检查、压水试验

二、施工过程动态监测与智能控制

灌浆施工是一个隐蔽性强的工程过程，传统方法难以实时监控和评估施工质量。随着技术进步，动态监测与智能控制技术在灌浆工程中的应用日益广泛，为提升灌浆工程质量提供了有效手段。

1.灌浆过程动态监测技术

SL/T 62–2020强调灌浆施工应采用自动化监测技术，减少人为因素干扰。在小型水库除险加固灌浆工程中，动态监测主要包括以下方面：

·钻孔过程监测：采用钻孔参数自动记录仪，实时监测钻孔速度、扭矩和孔斜等参数，通过这些数据分析地层变化，初步判断地质条件，为灌浆参数调整提供依据。

·灌浆过程监测：利用数字化灌浆记录仪，实时采集和记录灌浆压力、流量、密度等参数。监测系统应能捕捉灌浆过程中的异常情况，如压力骤变、漏浆等，并及时报警。

·灌浆效果实时评估：通过灌浆数据与地质参数的深度挖掘与综合分析，实现灌浆质量的过程预测与动态反馈。例如，通过分析灌浆压力–流量关系曲线，评估地层可灌性和灌浆效果，为调整灌浆参数提供依据。

2.智能灌浆装备与技术应用

智能灌浆技术是灌浆工程的发展方向，在小型水库除险加固中具有广阔应用前景。SL/T 62–2020鼓励灌浆工程施工采用低碳节能环保技术，积极采用自动化和人工智能技术，减少人力，减少对灌浆过程的人为干预。

智能灌浆系统通常包括以下组成部分：

·智能灌浆成套装备：提高了监测过程中感知认知水平，实现了灌浆过程信息的精准采集及配、送、调、灌全程自动，少人值守。

·灌浆过程质量动态评价技术：通过灌浆数据与地质参数的深度挖掘与综合分析，实现灌浆质量过程预测、动态反馈与智能控制，提升重要隐蔽部位单元工程质量优良率。

·灌浆施工智能决策与精细化管理：通过地质、设计与施工数据的深度融合、集群优化与反演，建立裂隙岩体灌浆施工全过程智能预警反馈系统，实现了灌浆施工智能决策与精细化管理。

三、单元工程验收标准优化与实施

灌浆单元工程是质量验收的基本单位，其验收标准的科学性和可操作性直接关系到工程质量评价的准确性。SL/T 631.3–2025《水利水电工程单元工程施工质量验收标准第3部分：地基处理与基础工程》为灌浆单元工程验收提供了专门的技术依据，与SL/T 223–2025《水利水电建设工程验收规程》共同构成了灌浆工程验收的标准体系。

1.灌浆单元工程划分

根据SL/T 631.3–2025标准，灌浆工程可按坝段、灌浆序列或施工阶段划分为若干单元工程。针对小型水库除险加固特点，建议按以下原则划分：

·帷幕灌浆单元工程：可按坝段或灌浆序列划分，每个单元工程包含10–20个灌浆孔；

·高压旋喷灌浆单元工程：按施工段划分，每个单元工程长度不宜超过50m；

·充填灌浆单元工程：按处理区域划分，每个单元工程包含一个完整的处理区域。

2.验收关键指标的量化

为提高验收评价的客观性和准确性，SL/T 631.3–2025鼓励采用量化评价方法。基于SL/T 631.3–2025和SL/T 62–2020的要求，小型水库除险加固中各类灌浆的验收关键指标应有所侧重：

·帷幕灌浆验收标准：除按SL/T 62–2020规范要求进行压水试验检查外，增加对灌浆过程的综合评价。检查孔数量可为灌浆孔总数的10%左右，检查孔压水试验透水率合格标准为：坝体与基岩接触段及其下一段的透水率的合格率为100%；其余各段的合格率不小于90%。

·高压旋喷灌浆验收标准：除进行钻孔取芯和压水试验外，增加对固结体连续性和均匀性的评价。可通过围井试验检查高喷固结体的渗透系数和强度指标，要求旋喷体渗透系数应达到10^{-6} ~ 10^{-7}cm/s。

·充填灌浆验收标准：重点检查灌浆后坝体的密实度和均匀性，可通过注水试验、探地雷达检测等方法进行综合评价。

四、质量缺陷处理程序的标准化

灌浆工程施工过程中，难免会出现各种质量缺陷，如灌浆中断、串浆、漏浆等。建立健全的质量缺陷处理程序是确保灌浆工程质量的重要环节。SL/T 62–2020和SL/T 631.3–2025对灌浆工程质量缺陷的处理提供了明确要求。

1.质量缺陷的识别与分类

根据SL/T 631.3–2025规定，灌浆工程质量缺陷按其严重程度可分为一般缺陷和重大缺陷两类。

·一般缺陷：包括灌浆压力未达到设计值、单孔灌浆量偏少等局部性问题；

·重大缺陷：包括帷幕灌浆后透水率不达标、接触灌浆后接触带仍有明显渗漏等影响工程安全的问题。

质量缺陷的识别主要通过以下途径：

·过程监测数据异常：灌浆记录显示压力、流量等参数异常波动，可能预示着灌浆过程出现问题。

·质量检查结果不合格：压水试验透水率超标、取芯检查发现浆液填充不完整等，表明灌浆效果未达到设计要求。

·运行期异常现象：水库蓄水后坝体或坝基出现渗漏量增大、渗水浑浊等现象，可能是灌浆防渗体系存在缺陷的表现。

2.质量缺陷处理措施的标准化

针对不同类型的质量缺陷，SL/T 62–2020和SL/T 631.3–2025提出了相应的标准化处理措施：

·灌浆中断处理：灌浆过程中因故中断时，应尽可能缩短中断时间，恢复灌浆后起始压力应适当降低，逐渐提升至设计压力；若中断时间超过规定限值（如30分钟），应冲洗钻孔重新灌浆。

·串浆、漏浆处理：对于串浆情况，可采用并联灌浆或阻塞串浆孔的方法处理；对于严重漏浆地层，可采用低压浓浆、间歇灌浆或添加速凝剂等方法控制。

3.质量缺陷处理的验证与评估

质量缺陷处理完成后，必须进行验证评估，确认处理效果。验证方法应与初始检查方法一致，如通过检查孔压水试验验证帷幕灌浆补强效果，通过取芯或无损检测验证回填灌浆密实度等。

SL/T 631.3–2025明确规定，地基处理与基础工程施工质量不符合本标准要求的单元工程，不应通过验收。这意味着只有质量缺陷处理合格后，才能进行后续验收程序。这一规定强化了质量缺陷处理的严肃性和强制性，避免了不合格工程被误接受的风险。

五、验收资料规范化管理

验收资料是灌浆工程质量管控的重要载体，也是工程移交和后期运行维护的基础。SL/T 223–2025和SL/T 631.3–2025对验收资料的规范化管理提出了明确要求。

1.验收资料的标准化内容

根据SL/T 223–2025要求，灌浆工程验收资料应包括以下主要内容：

·前期工作资料：包括灌浆工程设计文件、图纸会审记录、技术交底记录等。这些资料反映了灌浆工程的技术要求和质量标准，是验收工作的依据。

·施工过程资料：包括钻孔记录、灌浆记录、变形观测记录、材料检验报告等。灌浆记录应采用标准化格式，包含孔号、段长、压力、流量、浆液配比等关键信息。

·质量检查资料：包括钻孔取芯记录、压水试验报告、声波测试报告等检测资料。这些资料应真实反映灌浆效果，是评价灌浆质量的主要依据。

2.验收资料的数字化管理

随着信息技术发展，验收资料数字化已成为趋势。SL/T 62–2020明确要求灌浆工程施工与管理应采用数字化及云技术，这在验收资料管理方面主要体现在：

·数字化采集与存储：利用灌浆自动记录仪采集施

工数据，直接生成数字化记录，避免人工转录错误。这些数据通过云平台存储，便于长期保存和共享。

·数字化分析与展示：基于大数据技术，对灌浆数据进行分析处理，生成各种图表和报告，直观展示灌浆质量状况。

六、结论与建议

本文系统研究了小型水库除险加固中灌浆工程的质量控制与验收体系，主要结论灌浆类型的合理选择与针对性质量控制是保证灌浆工程效果的基础。以全过程、数据驱动的质量管理体系是确保灌浆工程质量的关键。为标准化、差异化的验收体系是评价灌浆工程质量的有效手段。随着水利技术标准的不断完善和智能化技术的快速发展，小型水库除险加固灌浆工程的质量管控与验收将更加科学、规范和高效，为保障水库安全运行、发挥综合效益提供可靠的技术支撑。

参考文献

[1]SL/T 62-2020.水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S].2020.

[2]SL/T 223-2025.水利水电建设工程验收规程[S].2025.

[3]SL/T 631.3-2025.水利水电工程单元工程施工质量验收标准第3部分：地基处理与基础工程[S].2025.