

水利枢纽混凝土面板堆石坝挤压边墙施工技术

赵一飞 姜亚秋

长江河湖建设有限公司 湖北 武汉 430021

【摘要】：混凝土面板堆石坝作为水利枢纽的核心建筑物，在防洪、发电、供水等方面发挥着不可替代的作用。其坝坡结构的稳定性与完整性，直接影响坝体的长期安全运行。传统坝坡处理方式受限于人工操作精度和效率，在面对高坝、复杂地形等工况时，常出现坝坡平整度不足、填筑料混杂等问题，给后期面板施工埋下隐患。挤压边墙技术通过机械浇筑低强度混凝土形成连续边墙，为坝体填筑提供精准边界，研究该技术对提升坝体质量、保障水利枢纽安全运行意义重大。

【关键词】：水利枢纽；混凝土面板堆石坝；挤压边墙；施工工艺

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.071

随着水利工程建设向高难度、复杂化方向发展，混凝土面板堆石坝的施工技术要求不断提高。挤压边墙技术自引入国内以来，经历了从模仿到自主创新的过程，在参数优化、设备研发等方面取得了一定进展，但在特殊地质条件适应性、质量控制精细化等方面仍有提升空间。本文围绕挤压边墙的施工原理、关键工序、质量控制展开研究，旨在构建一套完善的技术应用框架以供参考。

1 混凝土面板堆石坝挤压边墙技术概述

1.1 技术原理与工程作用

挤压边墙是通过专用挤压成型设备，在坝体填筑现场浇筑低强度混凝土（通常为C5-C10），经机械挤压形成连续、规则的梯形或矩形结构体^[1]。这类边墙沿坝坡设计线连续布置，作为坝体填筑过程中的临时性“模板”，直接约束填筑料边界。

核心功能包括：控制坝坡设计线，通过边墙实体边界限定填筑范围，减少传统工艺中人工放线的累计误差，使坝坡坡度偏差控制在1%以内。分隔坝体填筑料，在不同分区（如主堆石区与过渡料区）之间形成物理屏障，避免材料混杂影响坝体结构稳定性。减少后期面板浇筑前的坝坡修整工作量，边墙表面平整度可控制在5mm/m以内，大幅降低面板施工时的凿除量。保护坝坡填筑料免受雨水冲刷，成型后的边墙能阻挡雨水直接冲刷坡表，减少细颗粒流失。

传统坝坡处理方式中，人工修整依赖人工找平，单日作业效率通常低于50m，且受人员技能影响精度波动大；预制块砌筑需场外预制、运输及现场安装，不仅增加材料转运成本，接缝处理不当还易形成渗漏通道。而挤压边墙通过机械化连续施工，单日作业长度可达200-300m，施工成本较预制块砌筑降低30%-40%，同时避免了传统工艺的质量波动问题。

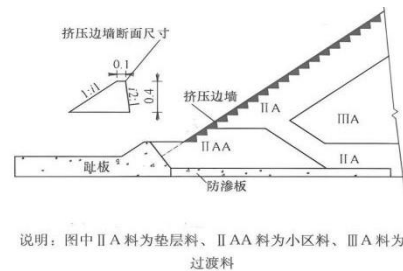


图1 挤压边墙与坝体结构布置

1.2 适用条件与材料特性

适用于各类混凝土面板堆石坝，在坝高30-150m的中高坝中表现尤为突出。此类坝体填筑强度大、坝坡控制精度要求高，挤压边墙的机械化连续施工特性可匹配其分层填筑节奏。对于地形复杂的岸坡段（坡度1:1.3-1:1.6），边墙能适应局部地形起伏，通过实时调整挤压参数保证坡线顺直；在峡谷地区坝体，其快速成型特点可减少施工占压时间，缓解场地狭窄带来的工序冲突^[2]。强度等级多选用C5-C10，28天抗压强度3-8MPa，既保证成型后能承受填筑料侧压力，又可在坝体沉降时产生塑性变形避免开裂。工作性方面，坍落度需控制在50-100mm，拌合料应具备良好的可塑性，经挤压后能保持梯形断面形状，表面无蜂窝麻面。耐久性要求包括抗裂性与抗渗性，干缩率需≤0.06%以减少温度裂缝，渗透系数应≤1×10⁻⁷cm/s，防止雨水渗入坝体。配合比设计需精准调控组分。典型配合比见表1。

表1 边墙混凝土配合比设计表（kg/m³）

强度等级	C5	C8	C10
水泥	120	150	140
砂	780	750	760
石(5-20mm)	1150	1180	1160
水	180	190	175
减水剂	1.2	1.5	1.4

坍落度(mm)	50-70	70-90	80-100
28天抗压强度(MPa)	3-5	5-7	7-8

注：续表 1。掺合料可采用粉煤灰（替代 20%-30%水泥），改善工作性同时降低水化热。

2 挤压边墙施工工艺与流程

2.1 施工准备

（1）坝基与岸坡处理：基岩面采用高压水枪冲洗结合人工凿除，清除表层松动岩块及泥垢，确保起伏差不超过 10cm，如某工程坝基存在的 3 处溶蚀坑，经填补 C15 混凝土处理后达到验收标准。反滤层铺设按设计级配分层摊铺，采用灌砂法检测压实度，要求不低于 96%，同时检查相邻层颗粒级配过渡是否连续，避免出现粒径突变形成渗透通道。岸坡开挖平整度通过 2m 靠尺检查，允许偏差±5cm，对局部超挖区域采用同级配砂石料回填压实，确保边墙底部支撑均匀。

（2）测量放样：以坝体填筑分区为基础，采用全站仪按二级导线精度定位边墙轴线，每 50m 设置一个控制桩，GPS 实时动态监测确保点位偏差不超过 3mm。高程控制线需叠加碾压沉降预留量，如某中坝工程根据填筑料性质及碾压参数，确定每层预留沉降值为 5-8cm，通过加密水准点测量将高程误差控制在±2cm 内。分区边界处的边墙轴线需与填筑料分区线精准重合，避免后续填筑时材料混杂^[3]。

（3）材料准备：混凝土配合比试验采用正交试验法，如 C8 混凝土通过调整粉煤灰掺量（15%-20%），将 7 天强度控制在 3MPa 以上，28 天干缩率降至 0.04% 以下。砂石料级配调整为中砂（细度模数 2.3-3.0）与 5-20mm 连续级配碎石，确保 0.075mm 以下颗粒含量不超过 5%，减少混凝土收缩裂缝。外加剂适配性验证中，缓凝剂选用木质素磺酸钙，掺量 1.2% 时可将初凝时间延长至 6h，满足高温季节施工需求；减水剂采用聚羧酸系，在相同水灰比下可提高坍落度 10-20mm。

（4）设备调试：挤压机空载运行测试持续 2 小时，检查液压系统压力稳定在 16-18MPa，行走轮跑偏量不超过 5cm/100m。挤压仓尺寸校准采用激光测距仪，梯形断面顶宽、底宽及高度偏差需控制在±2mm 内，确保边墙成型尺寸符合设计。行走系统与定位系统联动调试时，设定挤压机沿轴线行走速度 3-5m/min，GPS 定位数据与仓体姿态传感器实时比对，偏差超 5mm 时自动报警，保障边墙线性顺直。

2.2 核心施工工序

（1）混凝土布料：自卸车卸料时采用倒退法布料，料斗出口距挤压仓上口保持 30-50cm 高度，避免骨料

分离。地形较陡区域改用溜槽布料，溜槽倾角控制在 30°-40°，底部设置缓冲挡板减少混凝土冲击。挤压仓内料位高度需稳定在仓体高度的 2/3 处，某工程通过在仓壁安装红外料位计，实时监测料位变化，当料位低于 1/2 时暂停挤压机行走，待补料后再继续作业，有效避免因欠料导致的边墙断面尺寸不足，或过料引发的仓体过载变形。

（2）挤压成型：挤压机沿放样线匀速行走，行走速度根据混凝土初凝时间调整为 3-5m/min，液压系统压力维持在 18-20MPa，通过仓体挤压使混凝土密实度达到 95% 以上。某高坝工程采用全站仪实时监测边墙顶高程，每 10m 记录一次数据，发现高程偏差超 3cm 时立即微调挤压机升降系统；轴线偏差通过 GPS 定位系统动态修正，全程控制在±3cm 内，确保边墙线性与设计线吻合。成型后边墙表面采用人工抹面，消除挤压痕迹，使平整度满足 2m 靠尺检查≤5mm 的要求。

（3）接缝处理：平接施工时先将前仓边墙端部浮浆凿除 3-5cm，露出新鲜混凝土面，用高压水枪冲洗干净后洒水湿润，待表面无明显水时涂刷水泥净浆界面剂（水灰比 0.5）。企口连接则在前仓施工时预留 5cm×5cm 的梯形企口，后仓布料前嵌入 2cm 厚泡沫条防止漏浆，挤压成型后企口咬合深度不小于 3cm。某工程通过接缝处钻芯取样检测，显示结合面抗压强度达到母体混凝土的 85% 以上，无明显裂缝。

（4）养护与保护：边墙成型后 2 小时内覆盖土工布保湿，夏季高温时段每 2 小时洒水一次，确保表面湿润不少于 7 天；冬季施工采用电热毯覆盖保温，使养护温度不低于 5℃^[4]。后续填筑时在边墙内侧 50cm 处设置 C20 混凝土防护墩，墩体尺寸为 50cm×50cm×80cm，间距 5m，防止碾压机械碰撞边墙，某工程通过该措施使边墙破损率控制在 0.5% 以下。



图 2 垫层料、过渡料填筑摊铺顺序

2.3 与坝体填筑的协同作业

（1）填筑分区匹配：按坝体填筑层厚 50-80cm 同步划分边墙施工段，形成连续流水作业。某高坝工程将坝体沿轴线分为 6 个作业区，每层填筑厚度 70cm，边墙施工超前填筑作业 20-30m，单日完成 3 个分区的边墙浇筑与填筑循环。相邻分区的边墙接头设置 2m 重叠段，避免因填筑进度差异产生施工缝。过渡料区与主堆石区的边墙同步施工，确保两种填筑料边界清晰，减少后期界面处理工作量。

（2）碾压控

制：内侧 30cm 范围采用 2.5t 小型振动碾，激振力控制在 100-150kN，碾压 4-5 遍，碾压方向平行于边墙轴线，避免垂直碾压产生的侧向推力导致边墙变形。外侧主堆石区采用 20t 自行式振动碾，激振力 300-350kN，碾压 8-10 遍，碾压轨迹重叠 1/3 轮宽。某工程通过现场碾压试验，确定边墙附近 2m 范围内的碾压参数：小型碾行驶速度 1.2km/h，大吨位碾行驶速度 1.5km/h，压实度均达到 98% 以上。（3）层间结合：上一层边墙施工前，采用液压凿毛机对下层边墙顶部进行拉毛处理，凿毛深度 3-5mm，每平方米凿点不少于 50 个，形成均匀粗糙面。拉毛后清除表面浮渣，洒水湿润至饱和面干状态^[5]。某工程在拉毛后涂刷水泥净浆界面剂（水灰比 0.5），经检测层间抗剪强度较未处理界面提升 20%-25%，有效避免边墙分层滑动。

3 施工质量控制与技术难点

3.1 质量控制要点

（1）几何尺寸：顶高程采用水准仪测量，每 20m 测一个点，偏差需在 $\pm 3\text{cm}$ 内；轴线偏差通过全站仪复核，允许值 $\pm 5\text{cm}$ ，超过时需及时调整挤压机行走轨迹。坡比检测沿边墙每 100m 选取 3 个断面，用坡度尺测量，与设计值偏差不得超过 1%。断面平整度用 2m 靠尺检查，每 5m 测一处，凹陷或凸起值需 $\leq 5\text{mm}$ ，超标处需人工修补平整。（2）混凝土性能：抗压强度按每 500m³ 成型 3 组试块，标准养护 28 天后测试，C5-C10 混凝土需分别达到 5MPa、10MPa 以上；弹性模量测试采用动弹仪，结果需符合设计区间。渗透系数通过现场抽水试验测定，要求 $\leq 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。早期塑性裂缝需在浇筑后 4 小时内巡查，发现细微裂缝及时涂刷养护剂；干缩裂缝宽度超过 0.2mm 时，采用环氧树脂灌浆封闭处理。（3）与坝体结合质量：边墙内侧 30cm 范围填筑料，每 200m² 用灌水法检测密实度，相对密度需 ≥ 0.85 ；核子密度仪可快速抽检，数据偏差需 $\leq 1\%$ 。边墙与堆石料接触面，每 50m 用超声波检测一次，声波速突变处标记为疑似脱空区，再用 $\phi 20\text{mm}$ 探杆插入检查，脱空深度超过 5cm 时需返工处理。

参考文献：

- [1] 贾玉.混凝土挤压边墙施工技术在金昌市韩家峡水库工程面板堆石坝中的应用[J].大众标准化,2023,(07):37-39.
- [2] 孙祖金.混凝土面板堆石坝垫层区域移动边墙施工技术研究[J].云南水力发电,2023,39(04):200-203.
- [3] 张静.复合土工膜堆石坝挤压边墙混凝土配合比设计及施工新技术[J].陕西水利,2021,(10):218-220+230.
- [4] 唐德胜.阿尔塔什面板堆石坝混凝土面板施工技术介绍[J].水利建设与管理,2021,41(04):6-9.
- [5] 赵海峰.纳子峡面板堆石坝挤压边墙混凝土配合比设计[J].地下水,2021,43(02):206-208.
- [6] 陈恩平.混凝土面板堆石坝关键工序的施工管理[J].云南水力发电,2020,36(01):146-148.

3.2 关键技术难点及对策

（1）陡坡段施工（坝坡 $> 1:1.5$ ）：采用履带式挤压机，履带齿高增至 8cm，增强与填筑料的摩擦力，避免滑移。机身两侧增设侧向牵引装置，通过钢丝绳与坝顶锚桩连接，牵引角度保持 $30^\circ-45^\circ$ ，平衡边墙浇筑时的侧向力。行走速度严格控制在 $\leq 0.5\text{m/min}$ ，每行走 10m 停机检查一次边墙垂直度，偏差超过 1° 时立即调整牵引力度，防止边墙倾倒。（2）雨季施工：混凝土水灰比从常规 0.6 降至 0.55-0.58，坍落度控制在 50-70mm，减少泌水导致的表面起砂。边墙成型后 10 分钟内覆盖宽 2m 的防雨布，布边埋入填筑料 10cm 压实，形成封闭防护。雨后检查表面冲刷深度，若出现 $\leq 2\text{cm}$ 的麻面，采用 1:2 水泥砂浆（掺 5% 硅灰）人工抹面修复；冲刷深度超 2cm 时，需凿除松散层后重新浇筑^[6]。（3）低温施工：骨料采用热风炉预热，粗骨料温度控制在 $5-10^\circ\text{C}$ ，细骨料不低于 5°C 。拌合水加热至 $60-80^\circ\text{C}$ ，与骨料混合后确保入机温度 $\geq 15^\circ\text{C}$ 。混凝土中掺加 3% 氯化钙早强剂，缩短凝结时间，保证出机温度 $\geq 10^\circ\text{C}$ 。成型后覆盖 2 层阻燃保温被（导热系数 $\leq 0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ），内置温度传感器监测养护温度，低于 5°C 时增加电热毯加热。（4）岸坡接头处理：边墙在岸坡处设 5m 长渐变段，顶宽从 30cm 渐变至 50cm，底宽相应调整，避免应力集中。与基岩或趾板连接时预留 2cm 宽伸缩缝，内嵌 2cm 厚闭孔泡沫板，板两侧涂刷聚氨酯密封胶，确保接缝处不渗水。渐变段混凝土浇筑时，振捣棒深入边角 3-5cm，保证与岸坡贴合紧密。

4 结语

综上所述，挤压边墙技术保障了坝体结构的稳定性与安全性，为水利工程高质量建设提供了重要技术支撑，其推广应用对推动水利施工领域的技术革新具有深远意义。随着智能化施工设备的研发与绿色建材的应用，该技术将在适应复杂地质环境、降低施工成本、减少环境影响等方面实现突破，为水利枢纽工程的可持续发展注入新动能。