

堆石坝垫层料生产质量控制技术研究与应用

——以雄安调蓄库工程砂石加工系统工艺优化为例

王 玲

中国水电十五局 陕西 咸阳 712000

【摘 要】：堆石坝垫层料级配的连续性与稳定性直接关系到大坝渗流安全与填筑质量。针对传统垫层料加工中细颗粒含量波动大、针片状颗粒超标及依赖二次掺配等问题，依托雄安调蓄库工程，开展砂石加工系统工艺优化与设备参数协同控制研究。通过原岩特性分析，构建了“颧式破碎机粗碎—反击式破碎机中碎—立轴冲击破碎整形—复合选粉机控粉”的三段一闭路加工工艺。重点对 GC125 颧破排料口、PFG1520 反击破反击板间隙、VSI-S500 立轴破转子转速及 HR-FH-1500 选粉机风量等关键参数进行系统试验与优化。工程应用表明：优化后垫层料级配合格率由 78% 提升至 96% 以上，针片状颗粒含量降至 8% 以下，石粉含量稳定控制在 3%~5% 范围内，彻底取消了二次掺配工序，单方加工成本降低约 6.8 元，实现了垫层料“一次成型”的精细化加工目标。

【关键词】：堆石坝；垫层料；质量控制；砂石加工系统；工艺优化；出料口尺寸；级配

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.009

1 引言

1.1 研究背景与意义

堆石坝因其适应性强、造价低、施工速度快等优势，在水利水电工程中广泛应用。垫层料作为面板与过渡料之间的关键反滤与支承层，需具备良好的级配连续性、透水性、抗剪强度及较高的密实度。根据《碾压式土石坝设计规范》（DL/T 5395-2018），垫层料通常要求最大粒径 80~100 mm，级配连续，含泥量 $\leq 5\%$ ，针片状颗粒含量 $\leq 15\%$ 。

然而，实际生产中受原岩岩性（强度、裂隙发育程度）、加工设备性能（破碎腔型、转速）及工艺参数（出料口尺寸、筛网孔径）影响，垫层料易出现粗颗粒偏多、细颗粒不足或针片状颗粒超标等问题，导致级配不合格。传统处理方式是采用二次掺配（补加人工砂或碎石），不仅增加运输与拌和成本，还易因混合不均影响压实质量与排水性能。因此，通过优化砂石加工系统工艺，精准控制设备参数，实现垫层料“一次成优”，对保障大坝安全、降低工程成本具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

国内外学者围绕垫层料质量控制开展了大量研究。在工艺优化方面，[学者 A]通过改进圆锥破破碎腔型，显著改善了骨料粒形；[学者 B]采用“多级破碎+闭路循环”工艺，提高了级配稳定性。在参数控制方面，[学者 C]建立了颧破出料口尺寸与产品粒度的回归模型；[学者 D]通过正交试验优化了反击破转速与进料粒度的匹配关系。

但现有研究多聚焦于单一设备参数调整，缺乏针对垫层料全流程加工系统（粗碎—中碎—细碎—筛分—控粉）的协同优化研究，尤其对“出料口尺寸—级配响应”的量化关系分析不足。本文以此为切入点，结合雄安调蓄库工程实践，系统研究关键设备参数对垫层料级配、粒形及细粉含量的影响规律。

1.3 研究内容与技术路线

本文以该工程砂石加工系统为研究对象，主要开展以下工作：

- （1）分析原岩物理力学特性（抗压强度、软化系数、裂隙发育等），明确垫层料加工难点；
- （2）通过现场试验与室内检测，研究 GC125 颧破、PFG1520 反击破、VSI-S500 立轴破及筛分环节参数对产品粒度与级配的影响规律；
- （3）基于试验结果，优化工艺参数组合，建立质量控制标准；
- （4）开展工程应用验证，分析质量提升效果与经济效益。

基于工程难点，本研究突破传统两段破碎工艺局限，优选“GC125 颧破+PFG1520 反击破+VSI-S500 立轴破”主机组合，并引入 HR-FH-1500 复合选粉机进行细颗粒动态调控，建立以设备参数优化为核心的过程质量控制体系。

2 工程概况与垫层料技术要求

2.1 工程概况

雄安调蓄库上库主坝为堆石坝，坝顶高程 214.00 m，坝顶宽 10.0 m，坝轴线长 675.00 m，最大坝高 113.6 m。坝体填筑材料自上游至下游依次为：石渣盖重（1B）、粉煤灰铺盖（1A）、混凝土防渗面板（1F）、垫层料（2A）、过渡料（3A）、上游堆石料（3B）、下游堆石料（3C）及浆砌石护坡。

上、下游坝坡均为 1:1.5，垫层与过渡料水平宽度均为 3.0 m，坝基坐落于弱风化岩体上。下游坝坡每 20 m 高差设一条 2 m 宽马道，坡面采用 60 cm 厚浆砌石防护。主要工程量：过渡料 35.10 万 m^3 ，垫层料 15.47 万 m^3 ，特殊垫层料 0.74 万 m^3 。

砂石加工系统布置于坝址下游 2 km 处，设计处理能力 400

t/h, 主要设备包括: GC125 颚式破碎机、PFG1520 反击式破碎机、VSI-S500 立轴冲击破碎机、HR-FH-1500 复合选粉机、3YKJ2570 振动筛及配套皮带输送系统。

2.2 垫层料技术要求

2.2.1 垫层区功能定位与布置

垫层区(2A区)位于混凝土面板下部,是面板与过渡料之间的关键支承与反滤层,主要功能包括:

(1) 支承与密实要求:垫层料应具有较高抗压强度与干密度,为面板提供均匀、可靠的支承,减小面板受力变形与开裂风险。

(2) 排水与渗流稳定要求:为避免库水位骤降时在面板后产生反向渗压及冬季冻胀破坏,垫层应具备良好的排水性能,保证渗流稳定。

(3) 布置要求:综合考虑渗透稳定性、机械化施工条件及工程造价,垫层区水平宽度取3m,并采用上下等宽布置。

2.2.2 垫层料质量与技术指标

垫层料(2A区)采用料场微新混合白云岩人工破碎加工,主要技术指标如下:

(1) 级配要求

最大粒径: $d_{max} = 80 \text{ mm}$; 细颗粒含量: 粒径 $< 5 \text{ mm}$ 颗粒含量为 25%~35%; 石粉含量: 粒径 $< 0.075 \text{ mm}$ 颗粒含量 $< 5\%$; 级配连续性: 不均匀系数 $C_u \geq 5$, 曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$ 。

(2) 密度与渗透要求

检测项目	控制标准	备注
干密度	$\geq 2.34 \text{ g/cm}^3$	碾压密实控制指标
渗透系数	$10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm/s}$	满足排水与渗流稳定要求

(3) 其他质量要求

针片状颗粒含量: $\leq 15\%$; 含泥量: $< 5\%$; 压实度: ≥ 0.98 (相对密度)。

上述指标构成了砂石加工系统工艺优化与过程质量控制的直接目标,也是工艺试验与效果评价的根本依据。

3 原岩特性与加工难点分析

3.1 原岩物理力学特性

对料场微新混合白云岩取样试验结果如下:

饱和抗压强度: 117.7 MPa (满足 $\geq 60 \text{ MPa}$ 要求); 软化系数: 0.88 (满足 ≥ 0.85 要求); 天然密度: 2.65 g/cm^3 ; 裂隙发育情况: 岩体整体较完整,但局部发育微裂隙(间距 $5 \sim 10 \text{ cm}$),破碎过程中易产生额外细颗粒; 矿物成分: 以方解石为主(约 90%),含少量石英(约 5%),无活性危害成分。

3.2 加工难点分析

结合原岩特性与垫层料技术要求,垫层料加工主要存在以下难点:

(1) 级配控制难:原岩微裂隙发育导致天然细颗粒含量波动大,常规破碎—筛分工艺难以稳定控制 $5 \sim 80 \text{ mm}$ 连续级配。

(2) 粒形控制难:白云岩脆性较大,粗碎后易产生针片状颗粒,需通过中碎与细碎环节改善粒形。

(3) 细粉含量难控:传统工艺缺乏细颗粒动态调节手段,石粉含量易超标或不足,导致级配不合格,常需二次掺配,显著提高加工成本。

为此,需通过优化破碎整形工艺并引入风选控粉设备,实现级配与细粉含量的协同控制。

4 砂石加工系统工艺优化试验研究

4.1 试验方案设计

采用单因素试验与正交试验相结合的方法,以 GC125 颚破排料口尺寸、PFG1520 反击破反击板间隙、VSI-S500 立轴破转子转速及 HR-FH-1500 选粉机风量为变量,以成品料的级配参数(C_u 、 C_c)、针片状颗粒含量及石粉含量为评价指标。

试验变量取值如下:

颚破排料口: 100、120、140 mm;

反击破间隙: 30、40、50 mm;

立轴破转速: 1200、1350、1500 r/min;

选粉机风量: 8000、10000、12000 m^3/h 。

每组试验取成品料 5 t,按《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685-2022)进行筛分与检测。

4.2 关键设备参数对产品质量的影响规律

(1) GC125 颚式破碎机排料口尺寸的影响

试验表明:排料口由 100 mm 增至 140 mm 时,粗碎产品中 $> 80 \text{ mm}$ 颗粒含量由 12% 升至 25%, $< 5 \text{ mm}$ 细颗粒含量由 13% 升至 23%;针片状颗粒含量在排料口为 120 mm 时最低(12%)。综合权衡超径风险与后续破碎负荷,确定颚破排料口优选 120 mm。

(2) PFG1520 反击式破碎机间隙的影响

反击破主要承担中碎与整形功能。当间隙由 30 mm 增至 50 mm 时, $> 40 \text{ mm}$ 颗粒含量显著上升,针片状颗粒含量由 10% 升至 16%。兼顾破碎比与粒形改善效果,确定反击破间隙为 40 mm。

(3) VSI-S500 立轴冲击破碎机转子转速的影响

立轴破是细碎与粒形优化的关键设备。转速由 1200 r/min

提高至 1350 r/min 时, <5 mm 颗粒含量由 18%增至 26%, 针片状颗粒含量由 12%降至 7%; 转速继续提高至 1500 r/min 时, 细颗粒增量趋缓且能耗显著上升。因此, 立轴破转子转速优选 1350 r/min, 实现“石打石”整形与细颗粒补充的平衡。

(4) HR-FH-1500 复合选粉机风量的影响

选粉机是实现“免二次掺配”的核心设备。风量由 8000m³/h 增至 10000 m³/h 时, 成品中<0.075 mm 石粉含量由 7.2%降至 4.3%; 风量继续增大, 细粉流失过多, 存在逊径风险。最终确定选粉机风量为 10000 m³/h, 实现石粉含量的动态精准控制。

4.3 工艺参数优化方案

基于上述试验, 确定系统最优参数组合如下:

粗碎 (GC125 颚破): 排料口 120 mm;

中碎 (PFG1520 反击破): 反击板间隙 40 mm;

细碎 (VSI-S500 立轴破): 转子转速 1350 r/min;

控粉 (HR-FH-1500 选粉机): 风量 10000 m³/h;

筛分 (3YKJ2570 振动筛): 筛网孔径 80、40、5 mm。

系统采用闭路循环工艺, 筛上超径物料返回相应破碎环节, 形成“粗碎—中碎—细碎—筛分—控粉”的完整质量控制闭环。

5 质量控制标准与过程管理

5.1 质量控制指标体系

结合优化参数, 制定垫层料生产质量控制标准如下:

检测项目	控制标准	检测方法
级配 (0~80 mm)	连续级配, $C_u \geq 5$, $C_c = 1 \sim 3$;	筛分试验 (GB/T 14685)
	超径 (>80 mm) $\leq 5\%$, 逊径 (<5 mm) $\leq 10\%$	
针片状颗粒含量	$\leq 15\%$	游标卡尺法 (GB/T 14685)
含泥量	$< 5\%$	水洗法 (GB/T 14685)
压碎值	$\leq 20\%$	压力试验机 (GB/T 14685)
干密度	$\geq 2.34 \text{ g/cm}^3$	灌水法/灌砂法
渗透系数	10~3~ 10~2 cm/s	现场渗透试验

5.2 过程控制措施

(1) 设备运行监控: 安装在线监测传感器 (如颚破出料口位移传感器、反击破液压压力传感器), 实时采集关键参数, 异常时自动报警。

(2) 取样检测频率: 每 2 h 取成品料样 1 组, 检测级配与针片状颗粒含量; 每日取 1 组进行全项检测 (含泥量、压碎值、干密度等)。

(3) 原岩管理: 严格控制料场开采面, 避免夹泥层、强风化岩进入加工系统。

(4) 系统联动调整: 筛分发现超径颗粒增多时, 优先调小颚破出料口; 细颗粒不足时, 适当提高立轴破转速或调小出料口。

(5) 关键参数实时监控: 对 VSI-S500 转子转速、HR-FH-1500 选粉机风量等参数实施在线监测, 波动超过 $\pm 5\%$ 时自动报警并提示调整, 确保级配稳定。

6 工程应用效果分析

6.1 质量提升效果

优化工艺连续运行 3 个月后的统计结果表明:

级配合格率由 78%提升至 96.5%, 不均匀系数 $C_u = 6.8$, 曲率系数 $C_c = 2.1$, 级配曲线平滑连续;

针片状颗粒含量平均 7.8%, 低于规范限值 ($\leq 15\%$);

石粉含量稳定在 3.8%~4.5%之间, 含泥量<3.5%;

干密度 $\geq 2.34 \text{ g/cm}^3$, 渗透系数满足 10~3~ 10~2 cm/s 设计要求, 完全满足 DL/T 5395-2018 规范要求。

6.2 经济效益分析

(1) 取消二次掺配: 优化前约 30%成品需二次掺配, 成本约 8 元/m³; 优化后实现一次成型, 节约成本约 4.2 元/m³。

(2) 降低弃料率: 级配合格率提升显著减少不合格料废弃, 节约成本约 1.5 元/m³。

(3) 能耗优化: VSI-S500 与选粉机高效运行, 单位能耗降低约 8%。

综合测算, 单方垫层料加工成本降低 6.8 元。按垫层料总量 15.47 万 m³ 计, 累计节约成本约 105 万元。

6.3 社会效益

通过工艺优化, 减少了二次掺配带来的粉尘与噪声污染, 符合绿色施工要求; 同时, 垫层料质量稳定保障了大坝填筑进度, 填筑效率提升约 15%, 为工程按期蓄水奠定了坚实基础。

7 结论与展望

7.1 结论

(1) 针对白云岩原岩特性与垫层料技术要求, 采用

“GC125+PFG1520+VSI-S500+HR-FH-1500”设备组合，通过工艺优化实现了垫层料级配、粒形与细粉含量的协同控制，级配合格率提升至96%以上。

(2) VSI-S500 立轴破在补充细颗粒与改善粒形方面效果显著，HR-FH-1500 复合选粉机实现了石粉含量的动态精准调控，是取消二次掺配的关键技术。

(3) 建立的基于设备参数优化的质量控制体系，显著降

低了加工成本（单方降低6.8元），提升了大坝填筑效率，为同类工程提供了可借鉴的技术范式。

7.2 展望

未来可进一步研究智能化控制技术，如基于机器视觉的颗粒级配在线检测、AI算法自动调整设备参数，实现垫层料加工全流程无人化、精准化控制；同时，可拓展研究不同岩性（如砂岩、玄武岩）的工艺适配性，完善垫层料质量控制技术体系。

参考文献：

- [1] 国家能源局.DL/T 5395-2018 碾压式土石坝设计规范[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [2] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.GB/T 14685-2022 建设用卵石、碎石[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [3] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.GB/T 14684-2022 建设用砂[S].北京:中国标准出版社,2022.