

帷幕灌浆浆液性能对防渗效果的影响研究

朱东伟

中国水利水电第七工程局有限公司 四川成都 611130

摘要：帷幕灌浆施工技术作为一种有效的防渗加固手段，在水利工程大坝基础加固处理中应用广泛。其基本原理是向大坝基础地层中灌注浆液，形成一道连续的防渗帷幕，从而隔断水流的渗透路径，增强大坝基础的防渗性能。因此，文章结合工程实例对帷幕灌浆施工技术的应用进行深入研究，对保障水利工程安全稳定运行具有积极意义。基于室内试验与工程实证数据对比，明确浆液性能优化阈值：流动性需匹配地层渗透性，凝结时间应适配施工工况，结石率需达到95%以上，抗压强度不低于3兆帕，抗渗性能需满足工程防渗标准。研究成果为帷幕灌浆工程的浆液配比设计与施工质量管控提供理论支撑与实践依据。

关键词：帷幕灌浆；浆液性能指标；防渗机制；抗渗性能；结石体特性

引言

在水利枢纽、矿山井巷及隧道工程建设中，地下水渗流易引发管涌、结构失稳等灾害，帷幕灌浆技术因能构建高效防渗屏障被广泛应用。该技术的核心在于浆液通过灌浆孔注入地层后，经物理扩散与化学胶结形成防渗体，帷幕灌浆施工所形成的防渗帷幕具有较好的耐久性，能在长期运行过程中保持稳定的防渗性能。

现有研究多聚焦帷幕灌浆施工工艺优化与灌浆参数设计，对浆液性能与防渗效果的耦合关系研究尚不系统。工程实践中，因浆液流动性与地层渗透性不匹配导致的防渗盲区、凝结时间失控引发的浆液流失等问题频发，制约工程质量。为此，本文结合室内试验与工程案例，解析浆液关键性能指标对防渗效果的影响规律，建立性能参数与防渗效能的关联模型，为浆液性能优化提供学术依据。

一、浆液性能对防渗效果的影响机制

（一）流动性的影响机制

流动性通过调控浆液扩散范围与填充密实度影响防渗效果。当浆液黏度过高时，其在常规灌浆压力下难以渗透至宽度较小的微小裂隙（通常指宽度小于0.2毫米的裂隙），易形成防渗盲区。某水利工程实证显示，采用高黏度水泥浆液时，帷幕未填充裂隙占比达15%，渗漏量

达到0.5升/（分钟·米），远超0.1升/（分钟·米）的设计限值。若浆液黏度过低，在渗透性较强的地层中，易发生浆液沿裂隙快速流失，导致有效扩散范围内浆液量不足，结石体密实度下降。室内试验表明，低黏度浆液在强渗透砂层中，流失率达30%，结石率仅75%，抗渗性能显著衰减，无法满足工程防渗要求。

（二）凝结时间的影响机制

凝结时间失控将导致防渗帷幕连续性破坏或结构劣化。初凝时间过短（通常指小于30分钟）时，浆液易在灌浆管内提前凝结，引发管路堵塞，导致全孔段灌浆中断，形成分段式防渗体。某隧道工程采用短初凝时间的速凝浆液，灌浆过程中管路堵塞8次，帷幕检测发现3处分段间隙，渗漏量达0.8升/（分钟·米）。初凝时间过长（通常指大于180分钟）时，在地下水流动速度较快的地层中（通常指流速大于0.5米/天），未凝结的浆液易受水流冲刷稀释，导致水泥颗粒流失，结石体强度与密实度下降。室内模拟试验证实，长初凝时间的浆液在快速地下水流速环境下，水泥颗粒流失率20%，结石抗压强度从4兆帕降至2.2兆帕，抗渗性能大幅下降。

合理凝结时间需按地下水流速分级设计：对于地下水流动缓慢的地层（流速小于0.2米/天），初凝时间控制在60–120分钟，兼顾施工效率与结石质量；对于地下水流动较快的地层（流速大于0.5米/天），则通过速凝剂调控初凝时间至30–60分钟，避免浆液流失。

（三）结石率的影响机制

结石率与防渗帷幕孔隙率呈负相关，直接决定渗流通道发育程度。室内试验数据显示，当结石率从98%降

作者简介：朱东伟（1989年6月9日），性别：男，民族：汉族，河南开封人，本科，工程师，中国水利水电第七工程局有限公司。

至85%时, 结石体孔隙率从2%升至15%, 抗渗性能显著下降, 渗漏量增幅达200倍。影响结石率的关键因素主要包括浆液配比与地层环境: 在浆液配比方面, 若水泥与水的比例过低, 浆液中水分过多, 凝结过程中多余水分蒸发易形成孔隙, 导致结石率降至80%以下; 在地层环境方面, 若地层中可溶性盐含量较高, 盐分会与水泥水化产物反应生成膨胀性物质(如钙矾石), 导致结石体开裂, 结石率下降。某水库工程因地层硫酸盐含量较高(达8%), 采用普通水泥浆液(水灰比1.2)灌浆后, 结石率从96%降至78%, 渗漏问题反复出现。

确保结石率达到95%以上的技术路径需从两方面入手: 一方面采用合理水灰比(通常为0.8-1.2)的浆液, 并掺加粉煤灰(改善和易性)与膨润土(填充孔隙); 另一方面针对含盐地层选用抗硫酸盐水泥, 抑制化学侵蚀对结石体的破坏。

(四) 抗压强度的影响机制

抗压强度保障防渗帷幕在荷载作用下的结构完整性, 强度不足易引发开裂渗漏。工程实践表明, 当结石抗压强度小于2兆帕时, 在3兆帕的地层压力下, 帷幕开裂率达25%; 当强度提升至3兆帕以上时, 开裂率降至5%以下。某水电站初期采用抗压强度2.5兆帕的浆液进行灌浆, 运行5年后, 因大坝沉降产生2.8兆帕的压力, 防渗帷幕出现12条裂缝, 渗漏量从0.08至0.6; 后期采用抗压强度4兆帕的浆液进行补强灌浆后, 裂缝全部闭合, 渗漏量恢复至设计标准。

提升抗压强度的关键措施包括两方面: 首先确保浆液中水泥用量充足(通常不低于350千克/立方米), 为水化反应提供充足原料以生成足量胶凝物质; 其次在灌浆后进行7天保湿养护, 维持较高的相对湿度(不低于80%), 保障水化反应充分进行, 从而提升结石体强度。

(五) 抗渗性的影响机制

抗渗性是衡量防渗效果的直接指标, 抗渗系数越小, 防渗性能越强。通常要求防渗帷幕的抗渗系数小于 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 若抗渗系数大于 $5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 地下水易通过结石体渗透, 导致渗漏量超标。

室内试验对比了不同配比浆液的抗渗性能(如下表所示), 结果显示: 普通水泥浆液(水灰比1.0)的抗渗系数为 $8 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 添加20%膨润土后, 抗渗系数降至 $3 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 因膨润土的膨胀性可填充结石体孔隙; 而添加10%粉煤灰后, 抗渗系数升至 $1.2 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 因粉煤灰颗粒较粗, 易形成连通孔隙。

浆液类型	水灰比	掺合料(占水泥质量%)	抗渗系数 (cm/s)	渗漏量 (L/(min·m))
普通水泥浆液	1.0	无	8×10^{-7}	0.06
水泥-膨润土浆液	1.0	膨润土20%	3×10^{-7}	0.02
水泥-粉煤灰浆液	1.0	粉煤灰10%	1.2×10^{-6}	0.15

二、工程案例验证与分析

为进一步验证前文提出的浆液性能优化路径在实际工程中的适用性, 选取某水利枢纽副坝帷幕灌浆工程作为案例进行分析。该工程位于我国西南地区, 副坝坝高35米, 坝基主要为砂卵石层与强风化页岩, 地层渗透性较强, 地下水流速约0.6米/天, 工程设计要求防渗帷幕渗漏量不超过0.1升/(分钟·米), 结石率不低于95%, 抗压强度不低于3兆帕。

(一) 工程初期面临的问题

工程初期采用普通水泥浆液(水灰比1.2)进行灌浆, 未根据地层特性调整浆液性能, 施工后检测发现存在三大问题: 一是浆液黏度过低, 流动性过强, 在强渗透砂卵石层中流失率达35%, 导致部分区域灌浆不饱满, 帷幕检测发现18%的裂隙未填充, 形成防渗盲区; 二是浆液初凝时间过长(约190分钟), 在0.6米/天的地下水流速下, 水泥颗粒流失率达22%, 结石率仅82%, 抗压强度降至2.1兆帕; 三是抗渗性能不足, 渗漏量达0.65升/(分钟·米), 远超设计标准, 需进行返工处理。

(二) 基于性能优化路径的方案调整

针对初期问题, 结合前文提出的浆液性能优化技术路径, 对灌浆方案进行全面调整:

在流动性调控方面, 考虑到地层渗透性较强, 将浆液黏度提升至适宜范围, 通过掺加少量增稠剂(羟丙基甲基纤维素, 掺量0.2%)实现, 同时采用分段灌浆工艺, 将灌浆孔按5米分段, 从下至上逐段灌注, 每段灌注完成后等待一定时间再进行上段施工, 减少浆液流失; 在凝结时间适配方面, 因地下水流速较快(0.6米/天, 属于急流地层), 添加速凝剂(氯化钙, 掺量2.5%), 将初凝时间控制在45-55分钟, 避免浆液被水流冲刷稀释; 在密实度与抗渗性提升方面, 调整水灰比至1.0, 掺加12%的粉煤灰与18%的膨润土, 选用抗硫酸盐水泥(P.O42.5), 确保水泥用量达380千克/立方米, 灌浆后采用土工布覆盖洒水养护, 维持相对湿度不低于85%, 养护周期延长至10天。

（三）调整后的防渗效果检测

方案调整后，对帷幕灌浆质量进行全面检测，结果显示：浆液流失率降至8%以下，帷幕填充饱满度达99%，无防渗盲区；结石率实测值为96.5%，抗压强度达3.8兆帕，满足设计要求；通过压水试验检测，渗流量平均值为0.04升/（分钟·米），优于设计标准。工程运行2年后复查，帷幕未出现开裂、渗漏等问题，结构稳定性良好，充分验证了本文提出的浆液性能优化路径在强渗透、急流地层中的有效性与可靠性。

三、浆液性能优化技术路径

（一）流动性动态调控技术

流动性动态调控需以地层渗透性为依据，首先通过钻孔取样与压水试验对地层进行勘察，划分弱渗透、中渗透、强渗透三个等级，为后续黏度匹配提供基础。在黏度匹配环节，弱渗透地层需选用低黏度浆液，可通过掺加少量减水剂（掺量0.5%–1.0%）实现，并辅以适宜的灌浆压力（1.5–2.0兆帕），保障浆液渗透至微小裂隙；中渗透地层则调整水灰比至1.0–1.2，使浆液黏度处于中等范围（对应200–300毫帕·秒），同时采用适中的灌浆压力（1.0–1.5兆帕），平衡扩散范围与流失风险；强渗透地层需将浆液黏度提升至较高范围（对应300–400毫帕·秒），可掺加少量增稠剂（掺量0.1%–0.3%），并结合分段灌浆工艺，减少浆液流失。

（二）凝结时间适配技术

凝结时间适配需围绕地下水流速展开，首先通过现场试验确定地下水流速，据此划分缓流、中流、急流三种地层类型，为外加剂调控与工艺优化提供方向。在外加剂调控方面，缓流地层地下水冲刷作用较弱，无需添加速凝剂；中流地层需掺加少量速凝剂（如氯化钙掺量1%–2%或水玻璃掺量3%–5%），将初凝时间控制在45–90分钟；急流地层冲刷作用强烈，需提升速凝剂掺量，可选用氯化钙或复合速凝剂，将初凝时间缩短至30–60分钟。在工艺优化上，中流地层采用“快灌快封”工艺，加快浆液灌注速度以缩短浆液在孔内的停留时间，灌注完成后立即用水泥砂浆封闭孔口，防止地下水倒灌；急流地层则结合高压喷射灌浆技术，进一步提升浆液凝结效率，减少水流对浆液的影响，确保防渗帷幕连续完整。

（三）密实度与抗渗性协同提升技术

密实度与抗渗性协同提升需从配比、材料、管控三方面综合施策，在浆液配比优化上，采用0.8–1.2的水灰比，并掺加10%–15%的粉煤灰与15%–20%的膨润土，

其中粉煤灰可改善浆液和易性，减少水分蒸发形成的孔隙，膨润土可通过膨胀填充微小孔隙，兼顾密实度与抗渗性提升。在材料选型上，针对含盐地层，选用抗硫酸盐水泥，避免水泥水化产物与盐类物质发生反应导致结石体开裂，保障结石体稳定性；对于防渗要求较高的工程，优先采用水泥–膨润土浆液，利用其优异的抗渗性能满足工程需求。在质量管控环节，灌浆完成后24小时内进行压水试验，以渗流量不超过设计标准为合格依据，对不合格的灌浆段及时进行补强处理，确保防渗帷幕整体性能达标。

结语

帷幕灌浆浆液的流动性、凝结时间、结石率、抗压强度及抗渗性通过不同机制影响防渗效果，各指标需根据地层条件与工程要求协同优化。本文通过室内试验分析明确了各性能指标的影响机制与优化阈值，并结合某水利枢纽副坝工程案例，验证了浆液性能优化技术路径的可行性，最终形成的性能参数阈值与优化方案，可直接指导工程实践，为提升帷幕灌浆工程质量提供切实可行的方案。

未来研究可聚焦新型环保浆液的性能调控，探索其在复杂地质条件下的适用性；同时结合数值模拟技术，建立浆液性能–防渗效果动态预测模型，实现浆液性能的精准设计与防渗效果的提前预判，为复杂地质条件下的帷幕灌浆工程提供更精准的学术支撑，推动帷幕灌浆技术向更高效率、更优性能的方向发展。

参考文献

- [1] 郭先强, 黄斌, 王亚磊, 贾皓然, 刘礼喜. 速凝浆液灌浆技术研究与应用[J]. 人民黄河, 2025, 47 (S1): 145–146+148.
- [2] 艾东, 司春霞, 吕士展, 阎钊, 王新志. 膨胀土–超细水泥–粉煤灰灌浆材料性能试验研究[J]. 人民长江, 2023, 54 (04): 198–204.
- [3] 鹿永久, 任月娟. 浅谈低热硅酸盐水泥浆液性能试验研究[A]2022中国水利学术大会论文集(第六分册)[C]. 中国水利学会, 中国水利学会, 2022: 8.
- [4] 黄立维, 王克祥, 黄纪村, 邢占清. (超)细水泥在压滤作用下的浆液性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19 (02): 155–160+171.
- [5] 刘常新. 水库坝基帷幕灌浆用水泥粉煤灰混合浆液性能分析[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49 (01): 16–19.