



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202111087 中图分类号 X705 文献标识码 A

夏新星, 陈文峰, 王龙涛. 复合调理剂对废弃建筑泥浆脱水性能的影响[J]. 环境工程学报, 2022, 16(4): 1313-1322. [XIA Xinxing, CHEN Wenfeng, WANG Longtao. Effect of composite conditioner on dewatering performance of high alkaline construction slurry[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(4): 1313-1322.]

复合调理剂对废弃建筑泥浆脱水性能的影响

夏新星^{1,2,3,4}, 陈文峰^{1,2,3,4}, 王龙涛^{1,2,3,4}

1. 中交第二航务工程局有限公司, 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 武汉 430040; 3. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 武汉 430040; 4. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 武汉 430040

摘要 建筑泥浆具有高含水率、高碱性、脱水困难等特性, 导致其环保处置困难。采用有机絮凝剂与酸性无机调理剂组成的复合调理剂对废弃建筑泥浆开展了絮凝调理实验, 以探究不同药剂组合和用量对废弃建筑泥浆脱水性能的影响。结果表明, 建筑泥浆中膨润土、高岭石等 50 μm 以下细粒粘土颗粒占比达 67% 以上, 颗粒之间相互排斥, 难以自然沉淀脱水。使用 PAM 和 PFC 组成的复合调理剂对建筑泥浆调理效果最好, PAM 和 PFC 的最适宜投加量分别为 100 mg·kg⁻¹ 和 20 g·kg⁻¹。该用量下, 泥浆沉降比降低 17%, 污泥比阻降低 46%, 尾水和泥饼满足污染排放标准。该复合调理剂的电中和作用、吸附架桥和网捕作用使得泥浆中细粒粘土颗粒聚集成大颗粒聚团, 排出泥浆颗粒间的水分。PFC 能够中和泥浆碱性, 调节尾水 pH 至 9 以下。该复合调理剂能达到提升泥浆脱水性能和保证尾水环保达标排放的效果, 提升建筑泥浆环保处置水平。

关键词 建筑泥浆; 絮凝剂; 脱水固化; 污泥比阻; 复合调理剂

建筑泥浆是地基钻孔、盾构掘进和地下连续墙开挖等建筑施工必须的辅助施工材料。随着城市建设的推进, 建筑施工产生的废弃泥浆产量逐年攀升, 目前年产量已达 3×10⁸ m³ 以上^[1]。建筑泥浆主要由粘土、膨润土为主要原料掺水配制而成, 为了满足泥浆粘性、流动性、比重等技术要求, 常掺入羧甲基纤维素 (CMC)、碳酸钠、氢氧化钠等化学调理剂, 以增加泥浆的粘性和流动性^[2-3]。在施工过程中, 地层沉积物混入泥浆中, 进一步导致建筑泥浆组成复杂。总体来看, 建筑泥浆具有高含水率、高碱性、重金属污染等特征^[4]。废弃建筑泥浆已成为建筑施工产量最大、处置困难、环境污染最严重的建筑垃圾之一。

为了推行绿色施工, 部分地区对建筑泥浆的环保处置提出了更高的要求。南京、温州、绍兴、宁波等地均颁布了建筑泥浆环保处置管理法规, 规定了建筑泥浆必须进行固化处置, 不得随意排放^[5]。建筑泥浆处置有絮凝脱水沉淀法、机械脱水固化法、石灰干化固结法、热压干燥法等^[6-8]。由于效率高、成本低和施工占地面积小的优势, 絮凝脱水和机械脱水在实际工程中的应用最为常见。通过筛选泥浆调理剂种类和用量来提升泥浆脱水效率是目前的研究热点。杨春英等^[9]研究了 3 种聚丙烯酰胺 (PAM) 对废弃建筑泥浆的絮凝调理特性, 结果表明, 阴离子型聚丙烯酰胺 (APAM) 作用时间最短, 效果最优。梁止水等^[10]比较研究了聚合氯化铝 (PAC)、聚合硫酸铁 (PFS)、

收稿日期: 2021-11-15; 录用日期: 2021-12-30

基金项目: 中国交通建设集团科技研发项目 (00-中心-JSKF-20191125-034)

第一作者: 夏新星 (1993—), 男, 硕士, 助理工程师, xiaxinxing1@ccccltd.cn; 通信作者: 陈文峰 (1979—), 男, 本科, 工程师, chenwenfeng2@ccccltd.cn

聚丙烯酰胺 (PAM) 等絮凝剂对废弃泥浆泥水分离效果的提升, 结果表明, APAM 作为絮凝剂的泥水分离效果最佳。高宇等^[11]以毛细脱水时间 (CST) 为评价指标, 对比研究了阳离子型聚丙烯酰胺 (CPAM)、非离子聚丙烯酰胺 (NPAM) 和阴离子聚丙烯酰胺 (APAM) 对废弃泥浆脱水性能的影响, 泥浆脱水效果排序为: APAM>NPAM>CPAM>PAC。王东星等^[12]则采用无机絮凝剂和有机絮凝剂相结合的方式对钻孔泥浆进行絮凝沉淀脱水处置, 结果表明, 复合絮凝剂调理后泥浆沉降性能更优。以上研究均表明, 调理剂对于泥浆脱水效果的提升有较大影响, 复合絮凝剂在泥浆脱水性能提升方面有较大潜力。但是, 以上研究多侧重于建筑泥浆脱水性能的探究, 对于泥浆处理后尾水和泥饼的污染物含量方面则关注度较小。针对添加碳酸钠或氢氧化钠等添加剂的泥浆, 常呈现高碱性、污染复杂的特性, 在泥浆处置时不仅要考虑脱水固化效果, 还应注意尾水和泥饼的达标排放。用传统的单一有机絮凝剂调理泥浆无法解决尾水碱性超标的问题, 难以保证泥浆处置尾水达标排放。目前, 关于高碱性泥浆的环保处置研究较少, 缺乏可借鉴的工程案例。传统的添加盐酸、硫酸等无机酸中和泥浆碱性虽然简单有效, 但是无机酸的采购存储存在一定安全风险, 且易造成氯离子或硫酸盐污染^[13]。聚合氯化铝 (PAC)、聚合氯化铁 (PFC) 和三氯化铁 (FeCl_3) 是常用无机絮凝剂, 且自身会发生水解而呈酸性, 具有中和泥浆碱性的能力, 环境危害小。磷石膏是磷酸生产中产生的固体废渣, 主要成分是二水硫酸钙, 含有少量磷酸, 呈弱酸性, 有部分研究者利用磷石膏固化淤泥泥浆^[14]。采用有机絮凝剂 PAM 与酸性无机调理剂组合使用处理高碱性泥浆具有一定的环保优势。

本研究以龙潭长江大桥建设过程中产生的大体量高碱性废弃建筑泥浆为研究对象, 在对泥浆理化性质分析的基础上, 采用有机絮凝剂 PAM 结合酸性无机调理剂开展建筑泥浆脱水性能优化研究, 通过室内实验筛选出既能提高泥浆脱水效率, 又能降低尾水碱性, 保证尾水达标排放的复合调理剂, 并揭示调理剂的作用机制, 以期为高碱性建筑泥浆的环保处置提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用建筑泥浆为龙潭长江大桥桥塔基础钻孔施工泥浆。大桥桥塔基础采用大直径群桩基础, 单个桩基直径 2.8 m, 长 105 m, 共 52 根。桩基穿过粉质黏土、粉细砂、含卵砾石中粗砂、强风化粉砂质泥岩, 最后以中风化粉砂质泥岩作为基础持力层, 嵌入中风化粉砂质泥岩平均深度为 52 m。施工泥浆采用膨润土配制, 掺入碳酸钠、CMC 等化学调理剂, 具有典型的高碱性特征。采集泥浆池内废弃泥浆作为室内实验研究对象, 开展基本理化性质测定, 并开展絮凝调理实验。

有机调理剂为阴离子聚丙烯酰胺 (APAM), 相对分子质量为 800×10^4 , 使用前配制成质量分数为 2% 的溶液保证完全溶解, APAM 溶液电荷密度为 $1.8 \times 10^6 \mu\text{eq}$ 。无机调理剂 PAC 为黄色粉末, 碱化度为 1.5, 主要有效成分为 Al_2O_3 , 质量分数大于 28%。PFC 药剂为黄褐色粉末, 碱化度为 1.2, 纯度大于 90%。 FeCl_3 为分析纯试剂。磷石膏为工业生产废弃物, 100 目以下的灰色粉末。PAC、PFC 和 FeCl_3 使用前均配制成质量分数为 10% 的溶液, 磷石膏直接添加粉末搅拌使用。

1.2 实验方法

在室内开展建筑泥浆絮凝调理沉降实验和污泥比阻测定实验, 以评判不同絮凝剂的作用效果。首先开展单一 PAM 药剂调理实验, 确定 PAM 的最适投加量; 随后开展复合调理剂调理实验, 筛选最优药剂组合。药剂调理泥浆实验具体操作为: 1) 取 200 mL 泥浆置于烧杯内, 首先加入 PAM 溶液, $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 搅拌 5 min。PAM 溶液投加量设定为 20、50、100、200、300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在复合调理剂调理泥浆的实验中, 在 PAM 药剂最适投加量的基础上再分别投加 PAC、PFC、 FeCl_3 或磷石膏无机调理剂, $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 搅拌 5 min, 充分絮凝反应。无机调理剂的投加量设定为 5、10、20、

30 g·kg⁻¹。2) 取 100 mL 反应后的泥浆, 置于量筒内, 静置沉降, 间隔不同时间记录固液分离面位置, 得到泥浆沉降曲线。3) 另取 100 mL 反应后的泥浆, 置于污泥比阻测定仪测定污泥比阻。4) 将比阻测定后得到的尾水进行 pH 值、污染物含量的测定, 泥饼测定含水率后自然风干, 进行 pH 值测定, 并进行环境扫描电镜和 X 射线衍射分析。

1.3 分析方法

泥浆及泥饼的含水率采用质量法进行测定, 泥饼 pH 值的测定按照土水比为 1:2.5 的比例提取后用 pH 计测定上清液 pH 值。样品粒度组成采用激光粒度仪进行测定。泥饼样品的表征采用环境扫描电子显微镜 SEM 获得, 结合 EDS 能谱分析样品基本元素含量。泥饼矿物组成采用 X 射线衍射仪进行测定。水中重金属的含量采用 ICP-OES 进行测定。泥浆液限和塑限的测定是将泥浆风干后取土样采用数显式土壤液塑限联合测定仪进行测定。

药剂调理后泥浆的污泥采用污泥比阻测定仪进行测定, 具体操作为: 取 100 mL 泥浆, 放置于铺有滤纸的布氏漏斗上, 随后打开真空泵, 调节真空压力维持在 0.04 MPa, 开始起秒表, 每隔时间 t 记录下计量管内的滤液体积 V , 一直过滤至泥饼出现裂纹; 最后, 关闭真空阀, 取下泥饼测定总质量并测定含水率。作出关系曲线, 求出斜率 b , 按照公式 (1) 计算泥浆的污泥比阻。

$$\alpha = \frac{2pF^2}{\mu} \times \frac{b}{C} \quad (1)$$

式中: α 为污泥比阻, cm·g⁻¹; p 为过滤压力, Pa; F 为过滤面积, cm²; μ 为滤液黏度, g·(cm·s)⁻¹; C 为单位体积滤液与滤渣体积比值。

2 结果与讨论

2.1 建筑泥浆的理化性质

建筑泥浆理化性质分析结果表明(表1), 废弃泥浆含水率高达 85%, pH 为 12.1, 呈现强碱性; 泥浆密度 1.15 g·cm⁻³, 略大于水。泥浆静置 30 min 后的沉降比 SV₃₀ 为 94%, 泥浆沉降性能差。泥浆液限和塑限的测定结果表明, 液限 > 50%, 属于高液限黏土。这说明泥浆细颗粒占比大^[15]。泥浆颗粒的化学组成结果表明(表2), 泥浆颗粒主要含有以 Si、Al、Ca、Fe、O 元素。这说明泥浆组成主要为硅铝酸盐的粘土矿物, 含有部分铁氧化物。泥浆粒径分布测定结果表明(图1), 泥浆粒径分布为单峰态, 峰形不对称, 呈正偏态。这说明泥浆粒径分选差。泥浆颗粒中粘土 (<5 μm) 占比为 15.1%, 粉砂 (5~50 μm) 占比为 52.3%, 细沙 (50~250 μm) 占比 29.7%, 中粗砂 (0.25~2.00 mm) 占比为 2.9%。这说明泥浆以细颗粒的粘土和粉细砂为主, 组成颗粒细小。以上结果均表明, 废弃泥浆具有组成颗粒粒径小、含水量高、碱性强、自然脱水难度大的特征, 需要选择合适的调理剂对泥浆进行絮凝调理。

表 1 建筑泥浆基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of construction slurry

含水率/%	pH	有机质含量/%	密度/(g·cm ⁻³)	SV ₃₀ /%	液限/%	塑限/%	塑性指数/%
85	12.1	0.5	1.15	94	54.1	23.5	30.6

表 2 建筑泥浆主要成分的质量分数

Table 2 Mass fraction of main components in construction slurry

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃	%
44.28	19.70	17.06	10.03	3.22	2.31	1.24	0.83	0.61	

2.2 PAM 调理对建筑泥浆脱水效果的影响

使用单一有机絮凝剂 PAM 对建筑泥浆进行调理,测定泥浆的沉降曲线和污泥比阻,结果见图 2 和图 3。原始泥浆沉降速率缓慢,150 min 时沉降比为 89%,且仍呈现继续沉降的趋势。这反映出建筑泥浆沉淀性能差、自然脱水困难的特性。使用 PAM 能一定程度提高泥浆的沉降速率,最适宜的投加量为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,150 min 时沉降比为 86.5%。投加 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PAM 时,150 min 时泥浆的沉降比仅为 92%。这说明过多的投加 PAM 对泥浆沉淀起到抑制作用。污泥比阻的测定结果也表明,投加 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PAM 时泥浆的污泥比阻最小,达到了 $5.54 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{g}^{-1}$ 。继续投加对污泥比阻的降低无效果,甚至污泥比阻呈现上升趋势。这是由于 PAM 为无机高分子絮凝剂,溶于水呈胶状,起到吸附架桥和电中和作用,投加量合适时能够絮凝泥浆中颗粒形成大颗粒沉淀。但是,PAM 投加过多时,会发生有机高分子絮凝剂对泥浆颗粒的包裹作用,导致粘土颗粒受保护而稳定分散,不利于絮凝沉淀;另外,多余的有机高分子絮凝剂会溶解在水中增加水的粘度,这些均不利于泥浆脱水^[16]。高宇等^[11]在实验过程中也发现,APAM 投加过量时泥浆液开始发黏,絮凝剂架桥作用无法实现。因此,PAM 最适宜的投加量为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时泥浆的污泥比阻降低了 12%,150 min 时泥浆沉降比仅降低了 2.5%。单一 PAM 调理泥浆对泥浆脱水效果的提升作用有限,需要配合无机调理剂使用。

2.3 复合调理剂调理对泥浆脱水效果的影响

开展 PAM+PAC、PAM+PFC、PAM+ FeCl_3 和 PAM+磷石膏复合调理剂调理建筑泥浆室内实验,并对泥浆沉降效果进行测定,结果见图 4。不添加药剂调理泥浆时,泥浆沉降速率缓慢。添加絮凝剂 PAM 和无机絮凝剂的复合调理剂后,泥浆沉降速率显著提高,最高沉降比可达 75%。各实验组泥浆沉降速率均呈现先快后慢

的趋势,PAM+PAC 和 PAM+PFC 实验组在 150 min 时基本达到稳定。絮凝剂对泥浆中胶体粒子主要有压缩双电层作用、吸附电中和作用、吸附架桥作用和网捕作用,能够快速聚集小颗粒泥浆颗粒成大颗粒聚团,提高沉降速率。但是,PAM+ FeCl_3 和 PAM+磷石膏实验组在 150 min 时仍旧呈现缓慢沉降趋势。这说明未完全沉淀,相对比而言,PAC 和 PFC 对于泥浆沉降效率的提升更优。随

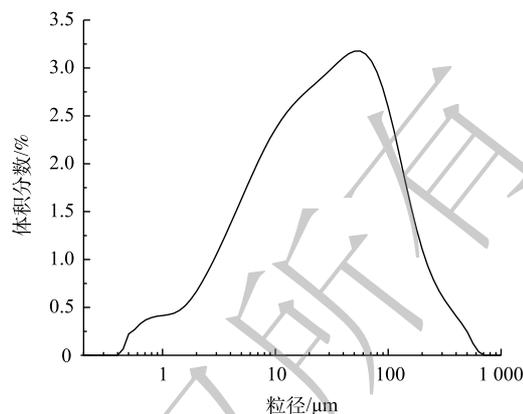


图 1 建筑泥浆的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of construction slurry

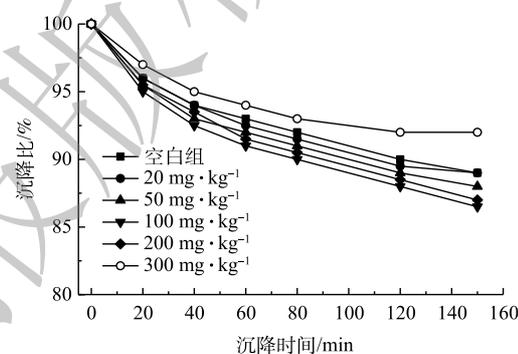


图 2 PAM 使用后泥浆的沉降曲线

Fig. 2 Settlement curve of slurry after PAM conditioning

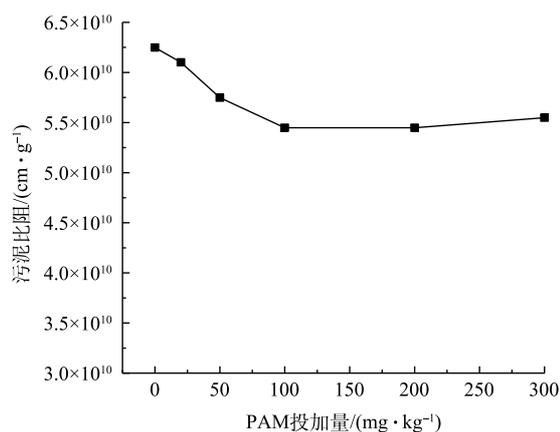


图 3 PAM 使用后泥浆的污泥比阻

Fig. 3 Sludge specific resistance of slurry after PAM conditioning

着酸性无机絮凝剂 PAC、PFC 和 FeCl_3 投加量的增加, 泥浆沉降速率越快。这说明 PAC、PFC、和 FeCl_3 对絮凝剂 PAM 的沉降效果均有很好的协同促进作用。但是, PAM+磷石膏实验组中, 随着磷石膏用量的增加, 泥浆沉降速率相差不大, 且反而略有降低。这说明磷石膏的掺入对于泥浆沉降起到抑制作用。磷石膏为难溶性的无机粉末, 掺入泥浆中导致泥浆含固量增加, 低含水率泥浆中固体颗粒接触紧密, 沉降速率较慢。

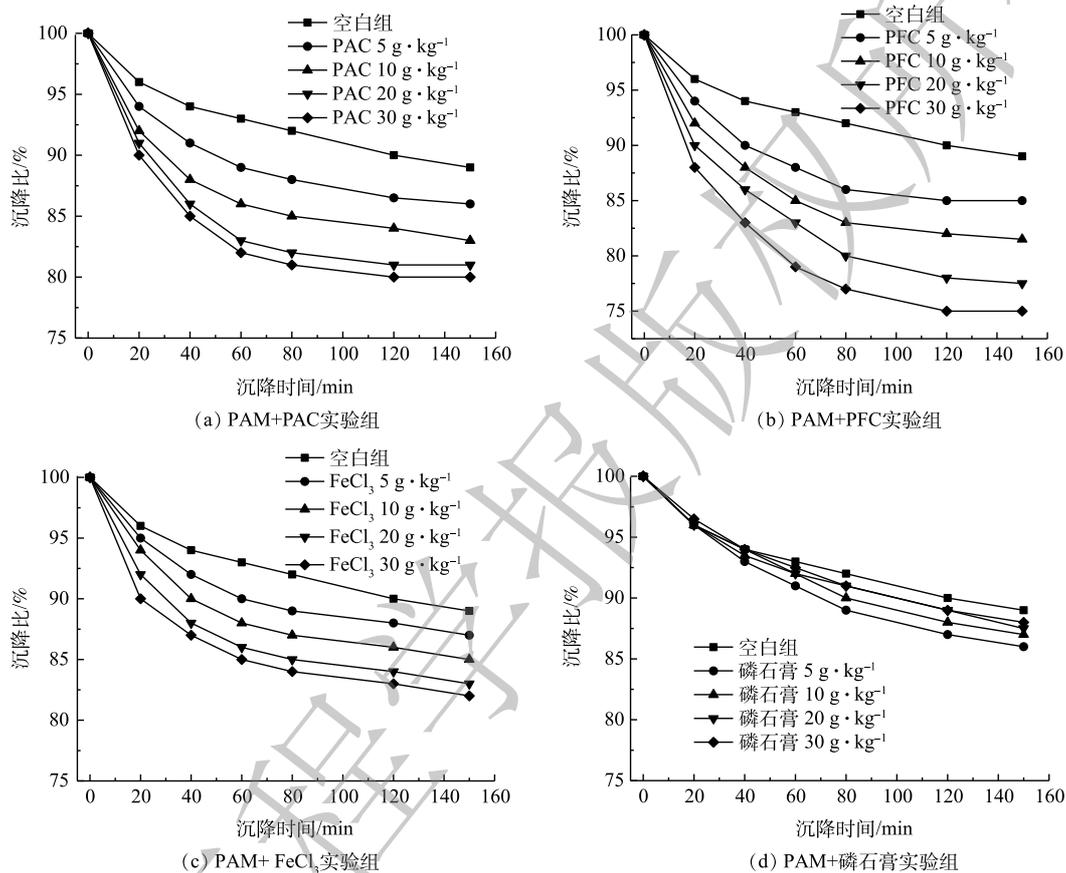


图4 复合调理剂使用下泥浆的沉降曲线

Fig. 4 Settlement curve of slurry under the use of composite conditioner

对比不同药剂实验组 150 min 时的沉降比, 可以发现, PAM+PFC 复合调理剂在 PFC 投加量为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时沉降比最小, 达到了 75%, 泥浆沉降效果最好。其次为 PAC 和 FeCl_3 , 使用磷石膏的实验组沉降效果最差。因此, 根据泥浆沉降实验的结果选择 PAM+PFC 复合调理剂作为建筑泥浆调理剂最优。所有实验组的结果也表明, 添加絮凝剂后泥浆沉降时间均较长, 沉降后泥浆仍旧呈流动态, 含水率大于 80%, 采用絮凝沉降脱水工艺处置建筑泥浆效果有限。

污泥比阻大小能够直观反映泥浆机械脱水的难易。从图 5 可以看出, 原始泥浆的污泥比阻高达 $6.25 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{g}^{-1}$, 属于难过滤泥浆, 直接采用机械脱水工艺进行处置效率较低。掺入絮凝剂后, 各实验组泥浆的污泥比阻均显著降低, 且随着酸性无机调理剂投加量的增加而下降。这说明 PAC、PFC、 FeCl_3 和磷石膏对于泥浆脱水效果的提升有一定促进作用。其中, PAM+PFC 复合调理剂实验组污泥比阻最低。PFC 投加 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量后, 污泥比阻降低至 $3.38 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{g}^{-1}$, 相对于原始泥浆的污泥比阻降低了 46%; 其次为 PAM+ FeCl_3 复合调理剂, FeCl_3 投加 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量后, 污泥比阻降低至 $3.99 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{g}^{-1}$, 相对于原始泥浆降低了 36%。使用 PAM+磷石膏调理剂的实验组污泥比

阻降低效果最差,这主要是由于磷石膏对泥浆脱水效果的提升主要在于磷石膏颗粒能够为泥浆脱水提供矿物骨架,营造孔隙通道,相对于PAC和PFC具有的电中和、吸附架桥作用效果的特性,效果有限。根据污泥比阻测定结果,选用PAM+PFC复合调理剂对废弃泥浆进行调理最优,且PFC用量越多,效果越好。经过调理后泥浆的污泥比阻降低,可采用机械脱水方式进行高效处置。

2.4 复合调理剂调理泥浆的环境风险分析

废弃泥浆的高碱性问题是其最主要的环境风险。对不同调理剂调理后尾水和泥饼的pH值进行了测定,结果见图6。FeCl₃、PFC和PAC碱中和能力较强,在投加量为30 g·kg⁻¹的用量下,尾水pH分别降低至6.47、7.48和8.38。磷石膏中和能力差,投加30 g·kg⁻¹用量时尾水pH仅下降0.76。泥浆的碱性组分主要为碳酸钠外加剂,FeCl₃溶于水后,Fe³⁺首先与CO₃²⁻发生反应(2)。

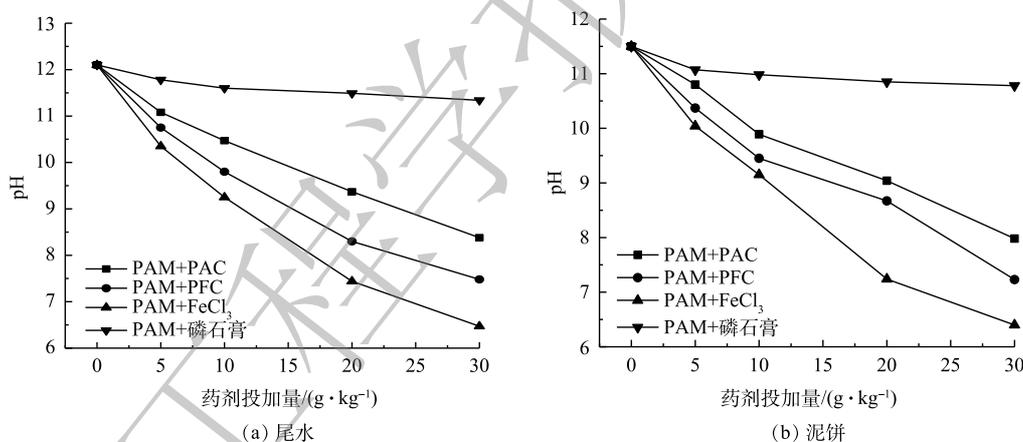
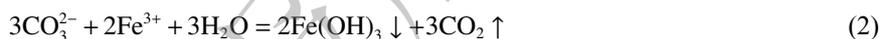
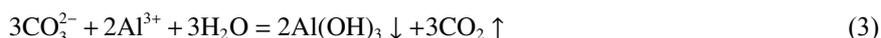


图6 复合调理剂使用下泥饼和尾水的pH

Fig. 6 pH value of mud cake and tail water under the use of composite conditioner

反应过程中产生的CO₂溶于水呈酸性,从而降低了泥浆的pH;多余的Fe³⁺还会水解,生成大量H⁺。PFC和PAC水解程度弱于无机盐混凝剂FeCl₃,溶于水后首先发生部分水解,在泥浆中产生部分游离的Al³⁺和Fe³⁺;随后,游离的Fe³⁺和Al³⁺分别与泥浆中CO₃²⁻发生反应(2)和反应(3)。



该反应产生的CO₂降低了泥浆的pH,同时消耗掉溶液中Al³⁺和Fe³⁺,进一步促进了PAC和PFC水解。由于Al³⁺水解程度比Fe³⁺小,PAC中和碱性能力弱于PFC。磷石膏主要成分是二水硫酸钙,还含有少量的磷酸、有机物等杂质,提供酸的能力弱。泥饼pH变化规律与尾水pH变化趋势一致,但是,泥饼pH总体低于尾水,其原因是Fe³⁺和Al³⁺更多沉积于泥饼中,能够对泥饼中碱性组分发挥长期的中和作用。根据《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)^[17]和《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T 18920-2020)^[18]中的限值要求,尾水排放或回用的pH应满足6~9的限值要

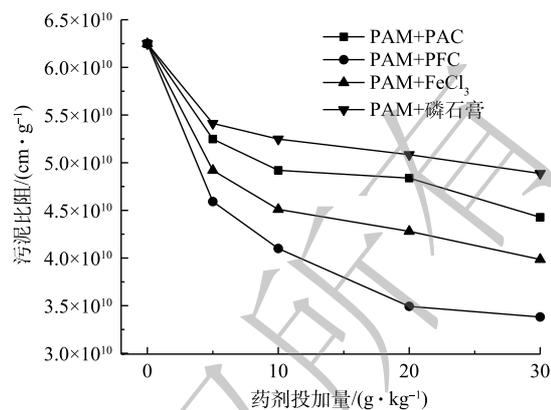


图5 复合调理剂使用下泥浆的污泥比阻

Fig. 5 Sludge specific resistance of slurry under the use of composite conditioner

求,因此,PAC、PFC及 FeCl_3 的最低投加量为30、20和 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,磷石膏不满足使用要求。

PAC、PFC及 FeCl_3 含有铁、铝、氯化物等组分,磷石膏杂质含量较多,使用过多的药剂对泥浆进行调理也可能存在环境污染风险。对无机调理剂投加量为 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的各组调理剂使用后尾水中污染物含量的测定,结合《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)^[17]和《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920-2020)^[18]对各指标进行比较,结果见表3。使用PAM+PAC、PAM+PFC和PAM+磷石膏复合调理剂后,尾水中污染物含量均达到限值要求。由于PAC为铝系絮凝剂,使用后会尾水中Al含量略有升高,但是在安全范围之内。使用PFC虽然会导致尾水中Fe含量升高,投加量在 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以内不会超过标准限值($0.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。而使用PAM+ FeCl_3 复合调理剂后,尾水中Fe和Cl⁻含量较高,分别达到了0.34和 $465.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其主要原因是 FeCl_3 投加量过大,部分游离的铁离子和氯离子进入尾水。因此,从环保角度考虑,PAM+ FeCl_3 复合调理剂不适用。

表3 尾水中污染物质量分数
Table 3 Pollutant mass content in tail water

调理剂种类	Fe	Al	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
PAM+PAC	0.017	0.160	0.008	0.003	N.D.	N.D.	N.D.	0.005	39.94	29.14
PAM+PFC	0.074	0.002	0.015	0.004	N.D.	N.D.	N.D.	0.007	38.72	27.84
PAM+ FeCl_3	0.340	N.D.	0.004	0.002	N.D.	N.D.	N.D.	0.001	465.80	26.54
PAM+磷石膏	0.018	0.006	0.026	0.006	N.D.	0.002	N.D.	0.008	31.50	68.12

注: N.D.表示未检出。

2.5 复合调理剂调理泥浆作用机制分析

为进一步分析各药剂对建筑泥浆脱水性能提升的作用机理和对泥饼理化性质的影响,对各组药剂作用下的泥饼进行了SEM和XRD分析。空白组泥饼的SEM微观图像(图7(a))显示,泥饼组成主要为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下细小颗粒物,颗粒之间较为分散。这表明泥浆颗粒之间存在一定的排斥力。废弃泥浆是一种稳定的粘土-水胶体分散体系,粘土颗粒间存在静电斥力、溶剂化膜斥力,所以建筑泥浆难以自然沉淀脱水^[19]。使用PAM+PAC、PAM+PFC和PAM+ FeCl_3 复合调理剂调理后,泥饼的SEM图像(图7(b)~图7(d))中颗粒物粒径明显增加,颗粒之间接触更为紧密,且PAM+ FeCl_3 实验组泥饼颗粒堆积最为致密。有机絮凝剂PAM为高分子聚合物,分子结构呈链状,低浓度的聚丙烯酰胺溶液会形成网状结构,通过吸附架桥作用和网捕作用的方式聚集泥浆颗粒形成聚团,以提高固液分离程度^[20]。PAC和PFC分别为铝系和铁系无机高分子絮凝剂,溶于水后产生多核羟基络合物,与土颗粒发生氢键吸附和静电吸引,具有吸附架桥和电中和作用特性^[21]。 FeCl_3 为无机絮凝剂,溶于水后水解迅速,生成含铁羟基络合物,降低泥浆胶体的 ζ 电位,通过电中和作用聚集土颗粒^[22-23]。有机絮凝剂PAM与无机调理剂配合使用,结合了有机絮凝剂的吸附架桥、网捕作用和无机调理剂的电中和、压缩双电层作用,协同强化土颗粒聚沉,导致泥饼颗粒组成粒径增加,有利于排出细颗粒之间的毛细水和吸附水,从而提升脱水效率^[24]。使用PAM+磷石膏复合调理剂的泥饼SEM图像(图7(e))中存在部分 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下细小颗粒物,同时也存在大的长条状矿物晶体,说明泥浆中细颗粒组分未絮凝团聚完全,且磷石膏中的矿物掺入到泥浆中。大粒径的无机矿物组分掺入到泥浆中,能够为泥浆脱水提供矿物骨架,营造孔隙通道,利于水分排出。

EDS能谱能够半定量的表征泥饼中各元素的占比。从测定结果(表4)可以看出,使用PAM+PAC复合调理剂后,泥饼中铝元素占比提高了5.95%。这是由于PAC中铝元素沉积在泥饼中。使用PAM+PFC和PAM+ FeCl_3 后,泥饼中铁元素占比分别提高了5.21%和6.99%。这表明PFC

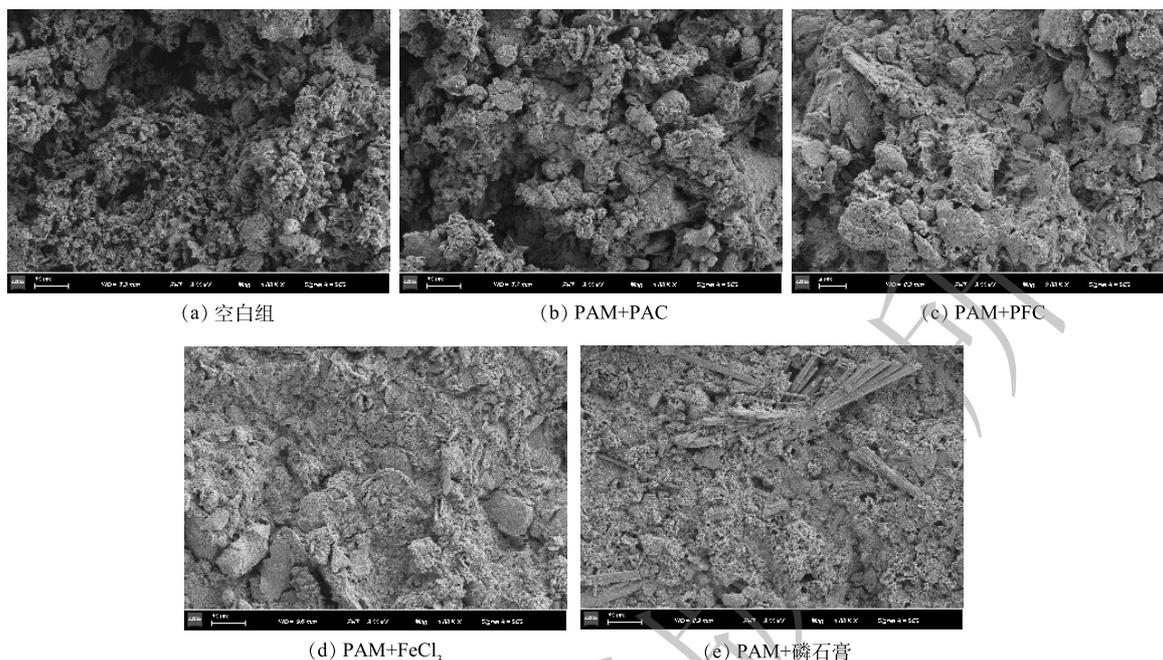


图7 不同调理剂使用下泥饼的SEM图像
Fig. 7 SEM image of mud cake with different conditioner

表4 泥饼EDS能谱分析结果
Table 4 EDS spectrum analysis results of mud cake

调理剂种类	元素质量分数/%										
	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe
原始泥浆	56.61	0.38	2.29	6.35	17.85	0	0	0	0.22	5.26	11.04
PAM+PAC	52.09	0.14	2.67	12.30	14.88	0	0.06	0.74	0.29	4.81	12.02
PAM+PFC	48.16	0.23	2.39	8.62	17.00	0.32	0.45	0.52	2.92	3.14	16.25
PAM+FeCl ₃	49.94	0.23	1.30	9.27	16.50	0.19	0.11	1.51	1.29	1.62	18.03
PAM+磷石膏	53.02	0.08	2.20	6.49	15.05	0.15	2.72	0.06	0.97	12.66	6.61

和FeCl₃中的铁元素沉积在泥饼中。同时，PAM+FeCl₃实验组中泥饼的氯元素质量分数提升了1.51%。这说明三氯化铁中的存在部分氯离子沉积在泥饼中，其原因是氯离子被粘土矿物吸附。使用PAM+磷石膏复合调理剂后，泥饼中钙元素占比升高了7.40%，硫元素占比提升了2.72%。这表明磷石膏中的硫酸钙沉积在泥饼中。调理剂使用后，大部分沉积于泥饼中，对泥饼的物质组成产生了较大影响。

如XRD谱图(图8)所示，原始泥浆中主要矿物组成为石英、碳酸钙、伊利石、高岭石和蒙脱石。这是由于建筑泥浆主要是由膨润土掺

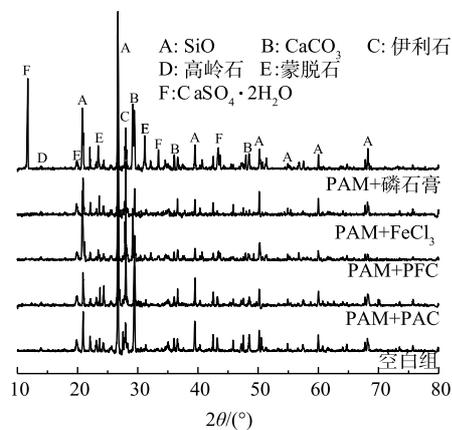


图8 泥饼的XRD谱图
Fig. 8 XRD spectrum of mud cake

水配制,施工过程中的机械搅拌作用导致泥浆混入了地层中的粘土、砂砾等沉积物。膨润土的主要矿物组成为蒙脱石,施工地层沉积物主要为粉质黏土、粉细砂、粗砂和强风化粉砂质泥岩,主要含有石英、碳酸钙、伊利石、高岭石等矿物相。使用PAM+PAC、PAM+PFC和PAM+FeCl₃药剂调理泥浆后,泥饼的XRD谱图没有明显差异。其原因是加入土壤中的铝系、铁系絮凝剂在泥饼中形成无定型的氢氧化物沉淀,没有明显的特征峰。铁铝(氢)氧化物在土壤中能够吸附固定氮、磷和重金属污染物,对土壤结构的稳定有重要作用,生态风险小^[25-26]。使用PAM+磷石膏复合调理剂调理泥浆后,XRD谱图存在明显的CaSO₄·2H₂O的特征峰,这是磷石膏的主要矿物组成。磷石膏能够作为肥料调节土壤肥力,但是应用过多会导致土壤重金属污染,需控制用量^[27]。

结合以上各组调理剂使用后建筑泥浆的沉降性能、污泥比阻、尾水酸碱性、尾水污染物含量和泥饼表征分析的结果,可以认为,使用PAM+PFC复合调理剂对建筑泥浆进行调理效果最好,PAM最适宜投加量为100 mg·kg⁻¹,PFC最适宜投加量为20 g·kg⁻¹。该复合调理剂的作用机理为:建筑泥浆含有膨润土、高岭石等大量粘土颗粒,泥浆颗粒之间相互排斥,难以自然沉淀脱水;PAM和PFC的电中和作用、吸附架桥和网捕作用,使得泥浆中细粒粘土颗粒聚集成大颗粒聚团,排出泥浆颗粒中的水分,泥浆污泥比阻降低46%。PFC中铁离子的水解作用产生的H⁺能够中和泥浆中的碱性物质,调节尾水pH至9以下。反应后PAM和PFC药剂沉积在泥饼中,尾水中污染物含量得到控制,能够达标排放。该复合调理剂既能提升泥浆的脱水性能,又能保证尾水达标排放,脱水产生的泥饼和尾水不会造成环境污染。

3 结论

1) 使用PAM+PFC复合调理剂对建筑泥浆调理效果最好,PAM和PFC的最适宜投加量分别为100 mg·kg⁻¹和20 g·kg⁻¹,最优配比下建筑泥浆沉降比降低17%,污泥比阻降低46%。

2) 复合调理剂使用时,PAM和PFC的电中和作用、吸附架桥和网捕作用,使得泥浆中细粒粘土颗粒聚集成大颗粒聚团,排出泥浆颗粒中的水分。PFC能够有效中和泥浆碱性,保证尾水达标排放。

参 考 文 献

- [1] 平洋,油新华,马庆松,等.工程废弃泥浆快速无害化处理研究[J].施工技术,2020,49(7):114-116.
- [2] 李武,李鹤年.珠江黄埔大桥南锚碇地下连续墙成槽施工泥浆使用技术[J].桥梁建设,2007(3):64-67.
- [3] 赵洪洲,张明俭.饱和粉细砂地层中泥水平衡盾构施工泥浆配制室内试验研究[J].铁道建筑,2020,60(8):77-81.
- [4] 江涌.钻孔灌注桩污染场地中施工与污染泥浆修复研究[J].建筑科技,2020,4(6):82-85.
- [5] 黄俊好,张春雷.城市建筑泥浆的管理现状、污染问题及对策建议[J].四川环境,2019,38(1):165-169.
- [6] 张浩,李雷.废弃泥浆合理处置技术分析[J].陕西地质,2020,38(1):86-90.
- [7] ZHANG S, ZHOU M, LANG M, et al. Research and Design on Building Mud of Using Hot-pressing Drying Dehydration[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 31: 767-777.
- [8] 常鹤,李春杰,丁光莹,等.钱江隧道盾构废弃泥浆的混凝分离[J].环境工程学报,2012,6(10):3752-3756.
- [9] 杨春英,徐薇,白晨光.施工废弃泥浆絮凝脱水试验及机理分析[J].环境科技,2013,26(5):15-17.
- [10] 梁止水,杨才千,高海鹰,等.建筑工程废弃泥浆快速泥水分离试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(2):427-433.
- [11] 高宇,周普玉,杨霞,等.絮凝剂对工程废弃泥浆脱水性能的影响[J].环境工程学报,2017,11(10):5597-5602.
- [12] 王东星,伍林峰,唐弈锴,等.建筑废弃泥浆泥水分离过程与效果评价[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(6):1049-1057.
- [13] 刘建明,吴叔兵.碱性废水处理及回收利用研究进展[J].中国资源综合利用,2008,26(9):36-39.
- [14] 丁建文,张帅,洪振舜,等.水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J].岩土力学,2010,31(9):2817-2822.
- [15] 庄雅婷,黄炎和,林金石,等.崩岗红土层土壤液塑限特性及影响因素研究[J].水土保持研究,2014,21(3):208-211.
- [16] 陈绍斌,向丽.复合离子聚合物对絮凝效果的影响分析[J].钻采工艺,

- 2002(5): 113-115.
- [17] 国家环境保护局. 污水综合排放标准: GB 8978-1996[S]. 北京: 1996.
- [18] 国家标准化委员会国家市场监督管理总局. 城市污水再生利用 城市杂用水水质: GB/T 18920-2020[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [19] 郑幅, 王彩林, 孙玉. 胶体化泥浆化学固液分离[J]. 天津工业大学学报, 2017, 36(3): 33-38.
- [20] 李悦, 李俊才, 汪效祖, 等. 废弃钻孔泥浆快速泥水分离试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(25): 10366-10371.
- [21] 徐国栋, 吴大志, 王俊. 工程废弃泥浆的絮凝试验研究[J]. 科技通报, 2021, 37(5): 97-103.
- [22] 徐国栋, 阮复昌. 铁系和铝系无机絮凝剂的性能分析[J]. 重庆环境科学, 2001(3): 52-55.
- [23] 刘梦洁, 李硕, 桑华俭, 等. FeCl₃和AlCl₃协同絮凝去除焦化废水中氟和有机物[J]. 环境工程学报, 2020, 14(8): 2048-2056.
- [24] 刘娟, 武耀锋, 张晓慷. 水分散型阳离子聚丙烯酰胺絮凝剂的絮凝性能及其机理[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 119-124.
- [25] 谭文峰, 周素珍, 刘凡, 等. 土壤中铁铝氧化物与黏土矿物交互作用的研究进展[J]. 土壤, 2007(5): 726-730.
- [26] 刘彩凤, 王伟现, 马红亮. 外加氮源影响下铁铝氧化物在土壤氮素转化中的作用[J]. 环境科学研究, 2020, 33(8): 1946-1953.
- [27] 龙谨, 杨凤龙, 吴钦雪, 等. 磷石膏对土壤的性能影响研究综述[J]. 广州化工, 2021, 49(19): 35-37.
- (责任编辑: 金曙光)

Effect of composite conditioner on dewatering performance of high alkaline construction slurry

XIA Xinxing^{1,2,3,4}, CHEN Wenfeng^{1,2,3,4,*}, WANG Longtao^{1,2,3,4}

1. CCCC Second Harbor Engineering Company Co., Ltd, Wuhan 430040, China; 2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040, China; 3. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd, Wuhan 430040, China; 4. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China

*Corresponding author, E-mail: chenwenfeng2@ccccltd.cn

Abstract The characteristics of high moisture content, high alkalinity and difficult dehydration of construction slurry make it difficult to implement environmental treatment of construction slurry. In this study, the compound conditioner composed of organic flocculant and acidic inorganic conditioner was used to carry out flocculation conditioning experiment on high alkaline construction slurry, and the effects of different reagent combinations and dosage on the dehydration performance of construction mud were explored. The results showed that the proportion of fine clay particles less than 50 μm such as bentonite and kaolinite in construction slurry is more than 67%. Slurry particles were mutually exclusive, so it was difficult to precipitate and dehydrate naturally. The composite reagent composed of PAM and PFC had the best dewatering effect on construction slurry. The optimum dosage of PAM and PFC were 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Under this dosage, the sedimentation ratio of slurry was reduced by 17%, the sludge specific resistance of slurry is reduced by 46%, and the tail water and mud cake meet the pollution discharge standard. The electric neutralization, adsorption bridging and net trapping of the composite reagent made the fine clay particles in the slurry aggregate into large particle clusters, so as to discharge the water in the gap between slurry particles. PFC can neutralize the alkalinity of slurry and adjust the pH of tail water below 9. The compound conditioner can achieve the dual effects of improving the dewatering performance of slurry and ensuring the discharge of tailwater up to the environmental protection standard, so as to improve the environmental protection disposal level of construction slurry.

Keywords construction slurry; flocculant; dewater and solidify; sludge specific resistance; composite conditioner