

基于 PAM 筛选优化的花岗岩废水压滤脱水性能研究

张洪波¹, 朱嘉成^{2,4}, 武海轮¹, 程凯歌^{3,4}, 丁建彤⁴

- (1. 四川省建筑科学研究院有限公司, 四川 成都 610081;
2. 河北建筑工程学院 市政与环境工程系, 河北 张家口 075000;
3. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074;
4. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 611730)

摘要:金沙江上游某水电站砂石系统排放的花岗岩洗砂废水具有悬浮物浓度高、颗粒硬度大、污泥脱水困难等特征,制约了湿法制砂工艺的环保与经济运行。为实现高效固液分离,本研究系统筛选并优化了阴离子聚丙烯酰胺(APAM)絮凝剂,重点考察其絮凝沉降性能及板框压滤脱水效果。试验以絮体粒径、上清液浊度、泥饼含水率及抽滤时间为评价指标,综合运用扫描电镜、Zeta 电位、傅里红外光谱及热重分析等手段进行机理表征。结果表明:优选出的改性 APAM 在投加量为 2.5 g/m^3 时,絮体平均粒径达 $68.35\text{ }\mu\text{m}$,上清液浊度降至 25 NTU;相较于现用 APAM,抽滤时间由 165 s 缩短至 144 s,泥饼含水率降至 21.71%。机理分析显示,改性 APAM 通过增强的吸附架桥能力形成紧密的絮体结构,并改善了污泥中水分的赋存形态,促进了结合水向自由水的转化。

关键词:水电站砂厂;花岗岩废水;阴离子聚丙烯酰胺;絮凝沉降;板框压滤;污泥脱水

中图分类号: TV41;X52;TD872 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1144(2026)04-0071-10

Performance of Granite Wastewater Filter Press Dewatering Based on PAM Screening and Optimization

ZHANG Hongbo¹, ZHU Jiacheng^{2,4}, WU Hailun¹, CHENG Kaige^{3,4}, DING Jiantong⁴

(1. Sichuan Academy of Building Research, Chengdu, Sichuan 610081, China;

2. Hebei University of Architecture Department of Municipal and Environmental Engineering, Zhangjiakou, Hebei 075000, China;

3. School of Civil and Water Resources Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

4. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611730, China)

Abstract: The granite sand-washing wastewater discharged from the aggregate processing system of a hydropower station on the upper reaches of the Jinsha River is characterized by high suspended solids concentration, high particle hardness, and difficulty in sludge dewatering, which constrain the environmental performance and economic viability of the wet sand-making process. To achieve efficient solid-liquid separation, this study systematically screened and optimized an anionic polyacrylamide (APAM) flocculant, with emphasis on its flocculation-sedimentation performance and plate-and-frame filter press dewatering efficiency. The evaluation indices included floc particle size, supernatant turbidity, filter cake moisture content, and filtration time. Mechanistic characterization was conducted through scanning electron microscopy, Zeta potential measurement, Fourier-transform infrared spectroscopy, and thermogravimetric analysis. The results indicated that the selected modified APAM, at a dosage of 2.5 g/m^3 , yielded flocs with an average particle size of $68.35\text{ }\mu\text{m}$ and reduced the supernatant turbidity to 25 NTU. Compared with the currently used APAM, the filtration time was shortened from 165 s to 144 s, and the filter cake moisture content was decreased to 21.71%.

收稿日期:2026-03-04

修稿日期:2026-04-05

基金项目:中国电建集团项目(DJ-ZDZX-2019-01-10);中国水利水电第七工程局有限公司科技项目(2024-925-72-36)

作者简介:张洪波(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事水工建筑工程材料方面的研究工作。E-mail:zhanghongbo.gogo@163.com

通讯作者:丁建彤(1970—),男,博士,正高级工程师,主要从事水工建筑工程材料等方面的研究工作。E-mail:jtding@nhri.cn

Mechanistic analysis revealed that the modified APAM formed compact floc structures through enhanced adsorption-bridging effects, improved the water occurrence morphology in the sludge, and promoted the transformation of bound water and interstitial water into free water that is readily removable by mechanical means.

Keywords: hydropower station sand plant; granite wastewater; anionic polyacrylamide; flocculation sedimentation; plate and frame filter press; sludge dewatering

水电站工程建设对混凝土骨料的需求量巨大,其中砂石占比达 70%~80%。在施工过程中,超过 80% 的生产废水源于砂石料加工系统的冲洗工序^[1]。某砂厂位于金沙江上游,河段水质执行 II 类水指标^[2],Pielou 均匀度指数 0.20~0.75, Margalef 丰富度指数 1.44~3.37^[3],这对生产过程的环保控制提出了极高要求。当前砂石生产工艺主要分为干法和湿法两类。干法生产工艺能耗相对较低,但存在石粉与含泥量控制精度不高、粉尘污染风险较大等问题。湿法生产工艺则采用水流冲洗,可有效去除泥粉等杂质,显著提高砂石成品的洁净度,因而在环保敏感区域被列为首选工艺。然而,湿法生产工艺面临的核心挑战在于其产生的大量污泥的处理与处置。污泥脱水是水处理系统中的关键环节,其费用约占污水处理厂总运营成本的一半^[4]。

目前,污泥脱水经常采用絮凝、真空抽滤、土工管袋、机械脱水等几种典型施工技术^[5]。湿法生产普遍采用“化学强化+机械脱水”工艺^[6],通过在废水中加入各类水处理剂,在污泥滤饼中形成骨架结构,以增加污泥孔隙率并提高其渗透性^[7]。污泥脱水效率受水处理剂亲疏水性、表面电荷、分子量等因素制约,污泥脱水效率受水处理剂的亲疏水性、表面电荷、分子量等因素制约。通过絮凝作用使水分形态发生转化并形成密实絮团,是提高板框压滤机进料效率和最终脱水效果的有效途径^[8]。常见的砂石水处理剂分为混凝剂与絮凝剂,两者在作用机制上存在差异。混凝剂为分子量较低、阳离子度较高的聚合物,可分为无机类(铝/铁盐)和有机类(如聚二甲基二烯丙基氯化铵)^[9],其应用多针对高有机质废水(COD>200 mg/L)、极细颗粒体系($d_{50}<5\mu\text{m}$)、废水温度常年过低($<10^\circ\text{C}$)等特殊情。絮凝剂则以无机类的聚合氯化铝(PAC)和有机高分子类的 PAM 为主。PAM 是一种线性高分子材料^[10],根据所带离子性质的不同,PAM 又可分为阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)、阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM)、非离子型聚丙烯酰胺(NPAM)和两性型离子聚丙烯酰胺(Am-PAM)^[11],通过电中和、吸附

架桥等作用实现快速絮凝^[12]。国内 PAM 主要生产企业有诺尔生物、宝莫股份、爱森(中国)、富森科技等^[13],其中 APAM 占总产能的一半以上。

然而,在工程实践中,洗砂废水因其高浊度、高无机物含量、污泥低压缩性等特点,其脱水效率通常低于有机物含量较高的市政污泥,且现有通用型絮凝剂在处理此类特定废水时,普遍存在适应性不足、形成的絮体结构松散、在压滤过程中粘板等问题。因此,从工程应用的实际需求出发,针对性地筛选乃至开发适用于此类废水特性的高效絮凝剂,已成为解决现场脱水难题的迫切需求。本研究旨在通过系统性的性能评估与深入的机理分析,为金沙江上游某电站砂厂的水处理系统,筛选出一种在絮凝速率、脱水效能及成本效益方面均表现优异的絮凝剂产品,并为其高效、稳定的污泥脱水工艺的构建与优化,提供完整的关键技术参数和可行的工程应用方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

药剂:聚合氯化铝(PAC)、非离子型聚丙烯酰胺(NPAM,分子量 1 400~1 600 万)、阳离子型聚丙烯酰胺(CPAM,分子量 1 200~1 400 万),以及多种阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)。为保障比对公平性,所有参与核心比选的 APAM 分子量均控制在 1 400~1 600 万范围内。其中,PAC、NPAM、CPAM 及一款 APAM 标样购自上海麦克林生化科技有限公司;其余市售 APAM 对比样(1#~4#)由山东宝莫、诺尔生物、爱森等单位提供。本研究采用的改性 APAM,其改良技术路线是以常规 APAM 为聚合物基底,通过曼尼希反应引入胺类活性基团,并辅以调和缓冲试剂调控反应过程,最终形成一种具有增强“吸附-架桥”能力的功能化絮凝材料^[14]。

仪器:磁力搅拌机、电子天平(精确到 0.0001 g)、激光粒度仪(65L-3000)、便携式浊度仪(ZD-1001)、试验型压滤机、X 射线荧光分析仪(Rigaku ZSX Primus III+,日本)、扫描电镜(ZEISS GeminiSEM 300,德国)、Zeta 电位仪(Malvern Zetasizer

Nano ZS90, 英国)、比表面积分析仪 (Micromeritics ASAP 2460, 美国)、热重分析仪 (Mettler TGA2, 瑞士)、傅里叶红外光谱仪 (Thermo Scientific Nicolet iS20, 美国) 等。

1.2 试验方法

1.2.1 絮凝沉降试验

在进行机械脱水试验前,污泥的预先絮凝调理是极为关键的一步^[15]。为评估各有机高分子絮凝剂对该砂厂砂石废水处理的适用性,选取絮凝剂型号和投加量为考察因素,进行絮凝沉降试验。具体步骤如下,量取均匀摇匀后的砂石废水 250 mL 于具塞量筒中,随后加入定量配制好的絮凝剂溶液。封紧量筒口,手动上下翻转 5 次以使药液充分混匀与作用,随后迅速将量筒静置于试验台上。实时记录 0、10、20、30、40、50、60、120 s 内量筒中废水体系的沉降高度以及上清液浊度,分别探索各絮凝剂的最佳絮凝条件。为保证试验数据的可靠性与重现性,本研究中的所有关键试验均设置了平行试验,所有试验均进行 3 次平行测定,若 3 次平行数据中某一点的沉降高度与其余两次均值的偏差超过 10%,则该点被视为显著异常值。对于出现显著异常值的试验,再补做 2 次验证试验,并取所有有效数据的算术平均值作为该点的最终沉降数据。

1.2.2 机械脱水试验

絮凝剂的脱水效能通过两级试验进行评价。首先通过布氏漏斗抽滤试验对调理后的污泥进行脱水性能测试,以泥饼含水率的变化作为衡量絮凝剂脱水效率的关键依据;其次通过试验型压滤机对调理后的污泥进行压滤试验,以进料时间与压滤时长作为衡量絮凝剂脱水效率的关键依据,压滤设备运行系统见图 1。

板框压滤机压滤效果好,泥饼的含固率高、含水率低,有效药剂费用低^[16]。影响板框压滤机工作效果的主要因素有闭合压力、挤压压力、保压时间、入料时间、入料性质(主要是物料的密度、粒度分布、浓度、黏度、沉降速度等特性)^[17]。其中滤布孔径

的合理选择是污泥板框压滤脱水中的一个重要环节^[6,18],既要能有效拦截污泥颗粒,又要保证滤液透过的通畅性,直接关系到压滤的成败。

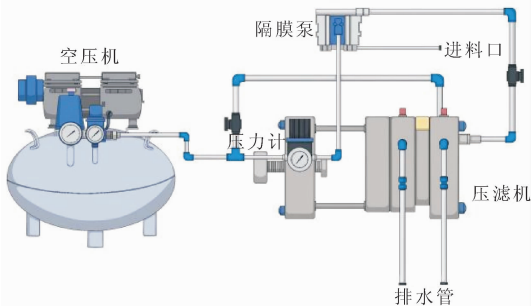


图 1 压滤试验系统图

1.2.3 强化机械脱水的机理分析

为从微观层面揭示不同絮凝剂导致污泥脱水性能差异的内在机制,本研究综合采用多种表征方法。采用扫描电镜 (SEM) 观测絮体及泥饼的微观形貌与孔隙结构;采用 Zeta 电位仪测定絮凝过程中上清液 Zeta 电位的变化,以表征颗粒表面电荷及絮凝剂吸附行为;采用比表面积及孔径分析仪 (BET) 测定泥饼的比表面积,分析絮体骨架结构的复杂程度;采用热重分析仪 (TGA) 评价泥饼中水分的赋存形态与脱除特性;采用傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析絮凝剂与污泥颗粒表面的官能团相互作用。通过上述手段,系统解析改性 APAM 强化污泥脱水性能的内在机理。

2 结果与分析

2.1 絮凝沉降结果

2.1.1 废水、污泥成分构成

为明确砂厂废水的基本构成,首先对制砂废水进行基本水质指标的检测,其次利用 XRF 对废水悬浮颗粒物的元素组成进行分析,结果见表 1。同时,采用激光粒度仪对悬浮颗粒物的粒径进行检测,测量前为消除团聚影响对样品进行超声分散,结果见图 2。

表 1 废水悬浮物的 XRF 结果

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	BaO
含量/%	63.05	15.15	7.05	4.97	3.68	3.04	1.43	0.81	0.46	0.12	0.07	0.05

XRF 结果显示,颗粒物的化学组分以 SiO₂ 和 Al₂O₃ 为主,二者合计占比接近 80%,并伴有显著含量的碱金属及碱土金属氧化物,这一组成特征与该

矿区花岗岩的主要矿物成分石英与长石高度吻合。激光粒度分析结果表明,该花岗岩洗砂废水的污泥颗粒总体上属于细颗粒范畴,粒径集中分布于

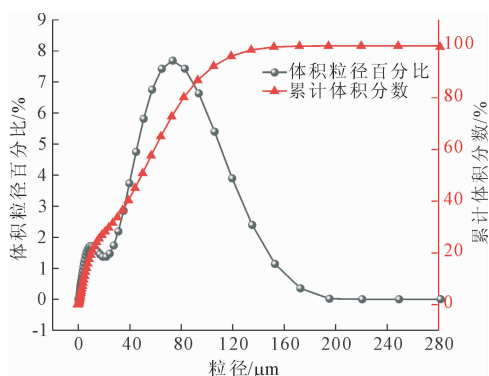
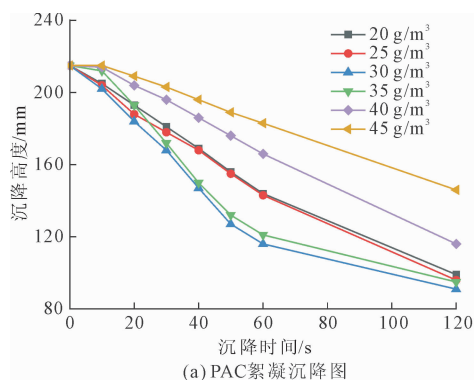
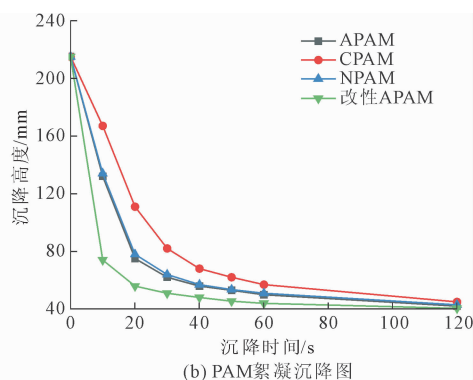


图2 污泥粒径图

10~120 μm 的区间。分析测得其 D10、D50 和 D90 分别为 17.3、46.3 和 97.6 μm 。相较于石灰岩砂厂



(a) PAC絮凝沉降图



(b) PAM絮凝沉降图

图3 絮凝选型结果

试验结果表明,PAC 投加量对絮体形成与沉降性能具有一定影响。当投加量为 30 g/m^3 时,泥浆界面沉降速度相对最快,表明在此条件下 PAC 的电中和与吸附架桥作用达到了较好的协同,絮凝效果相对最优。

当 PAC 投加量超过 30 g/m^3 后,絮凝效果反而呈现下降趋势。一般认为,达到最佳浊度去除效率后继续投加絮凝剂会导致“胶体保护”现象^[19]。这一现象可归因于 PAC 的“电中和过量化”作用。PAC 作为无机高分子混凝剂,主要通过正电荷中和颗粒表面的负电荷,压缩双电层,使颗粒脱稳并发生团聚。当投加量为 30 g/m^3 时,颗粒表面电位趋近于等电点,絮凝效果最佳;但投加量进一步增加时,过量 PAC 吸附于已脱稳颗粒表面,导致颗粒表面电荷反转而重新带正电,颗粒间由静电吸引转为静电排斥,体系重新趋于分散稳定状态,表现为沉降速率下降、上清液浊度升高。这一“过量再稳定”现象是铝盐类混凝剂在高投加量下的典型行为。

不同 PAM 在相同投加量下表现出不同的沉降特性,与 PAC 相比,优选的高效 PAM 不仅在沉降速

度废水颗粒物中值粒径较高,这是由于花岗岩莫氏硬度高达 7,在洗砂破碎过程中,高硬度的石英颗粒更倾向于发生脆性断裂,沿着解理面破碎成棱角分明、粒径相对较大的颗粒,难以被进一步磨蚀成细粉。

2.1.2 不同种类絮凝剂性能的比较

为评估絮凝剂与该矿区砂厂废水的适配性,首先进行了 PAC 的絮凝沉降试验,控制 PAC 配制浓度为 5%,投加量梯度设置为 20、25、30、35、40 g/m^3 。在完成 PAC 絮凝性能评价后,本研究进一步采用 APAM、CPAM、NPAM 及自研改性 APAM 开展絮凝沉降试验,将絮凝剂配制浓度控制为 0.1%,投加量设定为 3 g/m^3 ,试验结果见图 3。

率上表现出显著优势,其更重要的价值在于避免了无机絮凝剂引入的 Cl⁻ 固有风险。这确保了机制砂产品的长期品质,同时其低投加量特性也带来了更好的经济性与环境友好性。改性 APAM 的沉降曲线最为陡峭,在相同时间内达到的沉降高度最大,表明其沉降速率最快,絮体形成效果最好。CPAM 的沉降性能次之,而现用 APAM 与 NPAM 的沉降曲线较为接近,沉降效率相对相近,这些沉降特性与絮体形态的宏观观察结果一致。

2.1.3 不同投加量对絮凝性能的影响

在初步筛选确定 APAM 为适配絮凝剂后,本研究从多种 APAM 产品中遴选出适配性最高的一种,并对其投加量进行梯度优化,以确定该废水体系下絮凝剂的投加量范围,从而为实现污泥系统的高效压滤提供药剂优选依据,各体系上清液浊度值见表 2,不同 APAM 絮凝沉降对比见图 4。

由图 4 可知,不同 APAM 絮凝剂均表现出不同的沉降行为,通过进一步分析不同投加量下的上清液浊度数据发现,随着投加量的增加,现用 APAM、4#APAM 和改性 APAM 三种优选絮凝剂均呈现先改

善后恶化的趋势,说明存在最佳投加范围。具体来看,现用 APAM 在投加量为 3.5 g/m^3 时浊度最低 34 NTU ,表现出良好的絮凝效果;而 4#APAM 在 3.0 g/m^3 时浊度最低为 31 NTU ,改性 APAM 在 2.5

g/m^3 时达到最低浊度为 25 NTU ,其在低投加量下仍能维持较好的絮凝稳定性,可作为该电站砂厂废水处理的首选絮凝剂。

表 2 不同 APAM 投加量对废水体系上清液浊度的变化

投加量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
现用 APAM/NTU	724	269	188	148	88	54	34	116	150	157
4#APAM/NTU	475	128	87	67	41	31	62	78	107	128
改性 APAM/NTU	398	119	49	43	25	28	30	80	91	113

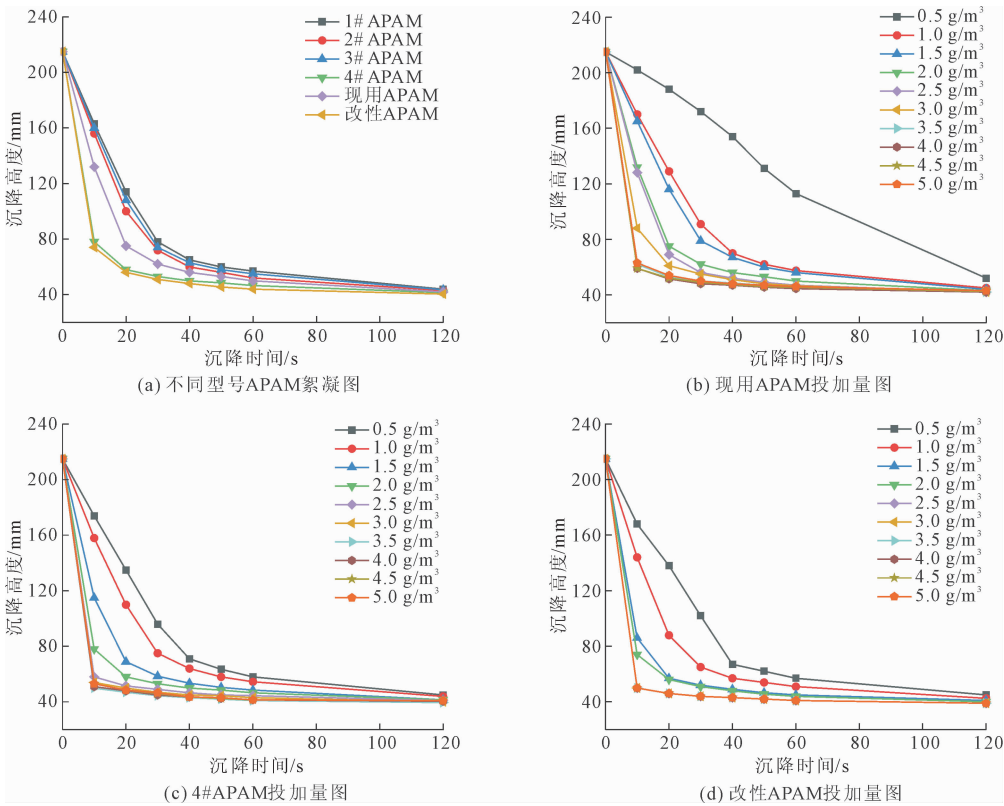


图 4 絮凝选型结果

2.2 机械脱水试验

2.2.1 真空抽滤结果

在环境工程等学科的概念中,土质量为水分和干土质量的总和,此含水率为湿基含水率^[20]。污泥大部分体积由水组成,包括自由水、间隙水、表面吸附水和结合水四种赋存形态。自由水存在于污泥颗粒间隙内,表面吸附水和间隙水主要存在于污泥絮体网络结构中。污泥的绝大部分体积由水构成自由

水主要通过机械方式去除,而其余水分则难以依靠机械外力脱除,一般通过强物理作用、化学药剂作用等手段破坏污泥的基础结构,才能转化为自由水释放出来^[17]。在絮凝沉降试验完成后,取各试验组量筒底部 50 mL 絮凝后污泥,测定其起始平均含水率约为 54.6% 。随后将该污泥体系转移至布氏漏斗内的滤纸上,控制抽滤时间为 20 s ,抽滤后污泥含水率见表 3。

表 3 不同絮凝剂抽滤处理后污泥含水率

名称	原状污泥	1#APAM	2#APAM	3#APAM	4#APAM	现用 APAM	改性 APAM
含水率/%	54.6	24.17	23.67	23.46	22.32	22.98	22.18

由表 3 可知,改性 APAM 表现出最优效果,含水

率降至 22.18% ,低于现用 APAM 的 22.98% 。抽滤

试验能够快速、粗略地区分不同絮凝剂的即时脱水效果,并筛选出表现较优的改性 APAM,但无法对脱水过程进行深入解析。为了更全面地评价絮凝剂的综合脱水性能,后续研究需采用与实际工程条件更为接近的动态压滤试验。

2.2.2 板框压滤结果

由于该砂厂原污泥颗粒中值粒径为 46.3 μm,故在试验型压滤机上依次尝试名义孔径为 20~40、40~80、50~150 μm 的丙纶滤布。控制抽滤时间为 170 s,压滤时间为 60 s,对压滤开始后 10 s 时的滤液进行取样测量。同时,通过类比 3 种 APAM 处理后污泥的进料时间、含水率及絮凝沉降速度作为综合评价絮凝剂优劣的指标,不同孔径丙纶滤布对污泥体系含水率的影响见表 4,不同 APAM 处理后对污泥体系含水率的影响见表 5,不同 APAM 处理后的污泥粒径分布见图 5,改性 APAM 不同投加量对污泥体系含水率的影响见表 6。

表 4 不同孔径丙纶滤布对污泥体系含水率的影响				
孔径/μm	20~40	40~80	50~150	150~300
含水率/%	24.83	24.79	22.91	21.48
浊度/NTU	34	48	52	743
TSS/(mg·L ⁻¹)	68	96	104	1486

表 5 不同 APAM 处理后对污泥体系含水率的影响			
参数	现用 APAM	4#APAM	改性 APAM
污泥粒径/μm	57.36	66.70	68.35
含水率/%	22.91	22.08	21.71
抽滤时间/s	165	158	144
压滤时间/s	60	60	60

滤布孔径需与处理后污泥的粒径相匹配以实现最佳的脱水效果。名义孔径为 20~40 μm 的滤布虽能有效截留颗粒、防止“跑泥”,但其较小的孔径导致过滤阻力偏大,极易堵塞,且试验中观察到滤布表面出现局部凸起,长期运行存在滤布破损风险。名义孔径为 40~80 μm 的滤布,这个范围的上限接近絮体颗粒中值粒径,随着过滤进行,颗粒会在滤布表面形成“滤饼层”,从而提高过滤精度,但洗砂场废水浊度值高、污泥量大,选用此滤布仍需频繁清洗或更换滤布,并不经济实用。名义孔径为 50~150 μm 的滤布在防止颗粒穿滤和维持过滤通畅性之间取得了最佳平衡,滤饼含水率仅为 22.9%。而使用孔径为 150~300 μm 的滤布,尽管最终获得的滤饼含水率为 21.48%,但其在过滤初期滤液浊度值、TSS 均过高,实际工程中应用并不可行。综合滤液浊度与

滤饼含水率,名义孔径 50~150 μm 的丙纶单丝滤布被确定为该污泥脱水体系的最适宜选择。

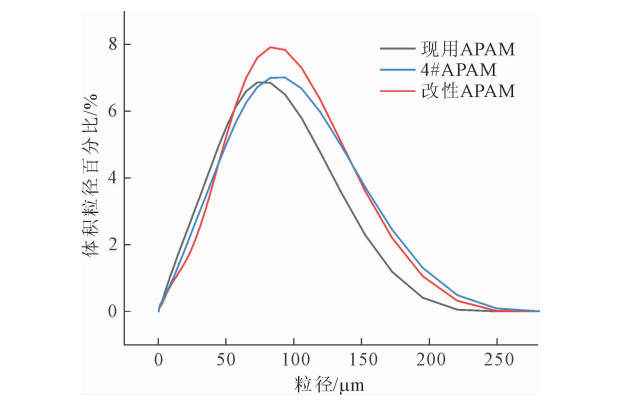


图 5 不同 APAM 处理后的污泥粒径分布图

由表 5、图 5 可知,改性 APAM 处理后的污泥含水率最低为 21.71%,展现出其强化污泥固结、减少结合水含量的优异能力。在脱水效率上,尽管压滤时间相同,但在关键的抽滤阶段,改性 APAM 所需时间显著缩短至 144 s,远低于现用 APAM 的 165 s 和 4# APAM 的 158 s。抽滤时间的缩短直接反映了污泥絮体释放游离水的速率更快,脱水阻力更小。通过对絮凝后污泥颗粒进行粒度测试,改性 APAM 处理后的污泥平均粒径最大为 68.35 μm,明显优于现用 APAM 的 57.36 μm。脱水性能的核心指标在于泥饼含水率与脱水效率上。

表 6 改性 APAM 不同投加量对污泥体系含水率的影响				
投加量/(g·m ⁻³)	2.0	2.5	3.0	3.5
含水率/%	24.41	21.71	22.67	22.79

由表 6 可知,为进一步优化改性 APAM 的投加量,在板框压滤试验中设置 2.0、2.5、3.0、3.5 g/m³ 四个梯度。当改性 APAM 投加量为 2.5 g/m³ 时,压滤后泥饼含水率达到最低值 21.71%。当投加量进一步增加至 3.0 和 3.5 g/m³ 时,含水率反而升高至 22.67% 与 22.79%。这一现象表明,控制改性 APAM 的投加量对压滤系统效能的提升具有关键作用。

3 强化机械脱水的机理分析

3.1 SEM 分析

污泥的微观形态结构直接决定了脱水通道的畅通与否,为直观对比不同絮凝剂所形成的絮体及泥饼结构的差异,采用 SEM 对不同 APAM 处理后的污泥进行观测^[21],结果见图 6,作用机理见图 7。



图 6 现用、4#、改性 APAM 处理后污泥 SEM 图

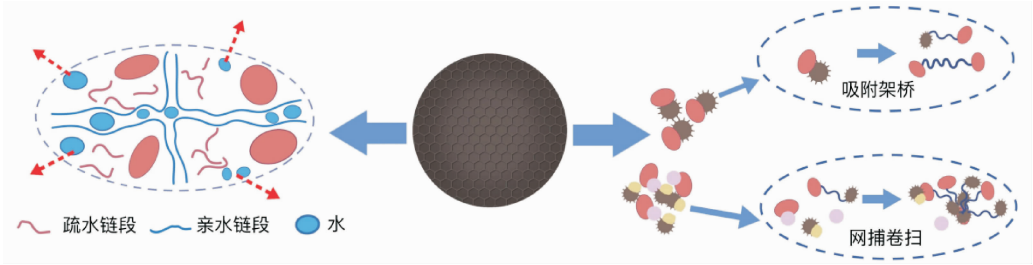


图 7 改性 APAM 强化污泥脱水机理

3.2 Zeta 电位分析

为比较三种絮凝剂的“架桥-网捕”效能,测定在不同时段内废水体系絮凝过程的上清液 Zeta 电位值,结果见表 7,废水原电位值见图 8。

表 7 现用、4#、改性 APAM 处理前后上清液 Zeta 电位值				
时间/s	0	10	60	120
现用 APAM	-21.3	-25.1	-26.7	-27.1
4#APAM	-21.3	-26.5	-27.2	-27.7
改性 APAM	-21.3	-27.6	-28.3	-28.4

由表 7 可知,投加 APAM 后体系 Zeta 电位均向负值增大的方向移动。这一趋势与常规无机混凝剂通过电中和降低 Zeta 电位的规律相反,其根本原因在于本体系的核心机理并非“电中和”,而是“吸附-架桥”。带有负电荷的 APAM 分子无法压缩双电

图 6 表明,从现用 APAM、4#APAM 到改性 APAM,所形成的絮体结构存在显著差异,这与它们宏观脱水性能的优劣直接相关。

现用 APAM 所形成的絮体结构较为密实,在低倍率下可见絮体尺寸不均,分布松散。在高倍率下其絮体粒径细小,内部孔隙率较低。这种结构在压滤过程中易被压缩变形,导致滤液通道堵塞,不利于自由水的释放。

4#APAM 的处理效果优于现用 APAM,在高倍率下絮体由更粗糙的颗粒状单元聚集而成,形成了更为发达且稳定的多孔结构。这种刚性较强的网络能够在外压作用下为水的渗出提供更多持久畅通的微通道,从而解释了其相对较好的脱水效率。

改性 APAM 展现出最优异的微观结构特征,其低倍图像显示絮体形成了庞大、开放的三维网络结构,污泥粒径普遍较大。在高倍率下该絮体由大量微米级的颗粒单元通过“桥接”作用构成,形成了高度发达的多级孔结构。这种具有大粒径、高孔隙率的空间网络,在脱水过程中能有效维持孔隙结构的稳定,创造出最优的渗水路径,是实现高效脱水的理想絮体形态。

层以消除静电斥力,其高分子链所携带的负电荷被引入絮体后,理论上将导致 Zeta 电位负值增加^[22]。因此,Zeta 电位负值的增大非但不与絮凝效果矛盾,反而是 APAM 成功吸附于颗粒表面的直接证据。

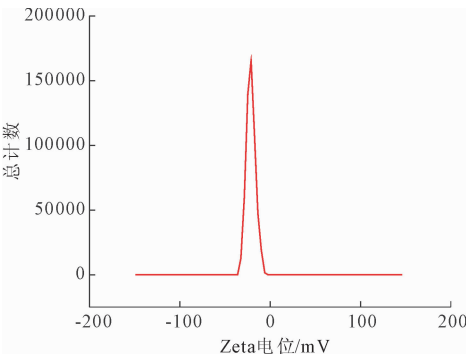


图 8 水电站砂厂原废水 Zeta 电位值

其中,改性 APAM 投加后体系 Zeta 电位负值增大最为显著,120 s 时降至 -28.4 mV ,且变化速率最快;4# APAM 次之;现用 APAM 的变化幅度相对最小。结果表明,改性 APAM 的分子链在颗粒表面的吸附构象更优、吸附量更大,从而将更多的负电荷锚定并暴露于絮体表面。该结果与图 11 中改性 APAM 处理后污泥样品在 O-H 区域吸收峰的显著增强相互印证,共同证实了改性 APAM 具有更强的表面吸附与“架桥-网捕”能力,为其形成庞大絮体

结构提供了作用力基础。尽管颗粒间静电斥力因电位增大而增强,但 APAM 高分子链产生的架桥作用力已完全主导了絮凝过程,宏观上表现为更快的沉降速度和更低的泥饼含水率。

3.3 比表面积孔径分析

污泥的比表面积和孔径分布是决定其持水能力的关键物理参数。为从物理吸附角度阐释脱水性能的差异,本研究通过氮气吸附/脱附试验分析了泥饼的孔隙特性,见图 9,并据此计算出 BET 比表面积。

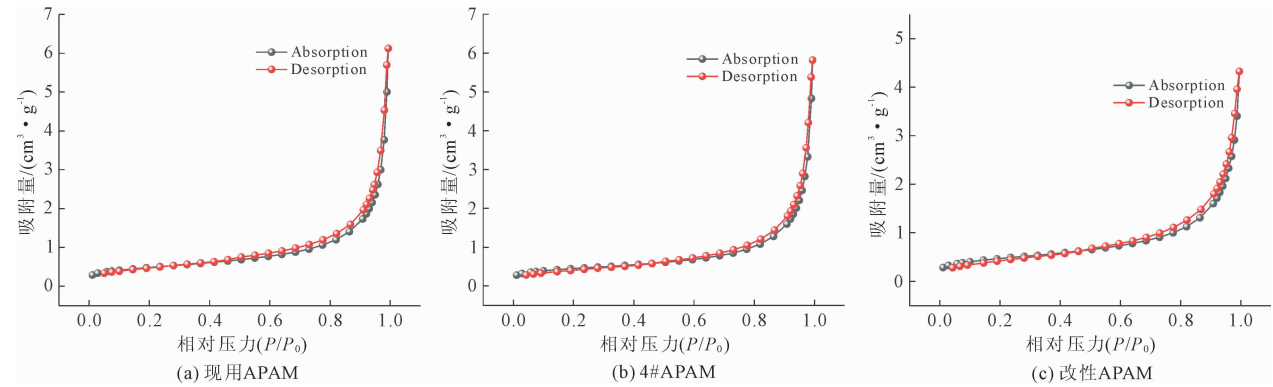


图 9 现用、4#、改性 APAM 处理后污泥的氮气吸附-脱附等温线

由图 9 可知,现用 APAM 污泥样品的比表面积为 $1.731\text{ m}^2/\text{g}$,其次 4#APAM 污泥样品的比表面积为 $1.698\text{ m}^2/\text{g}$,改性 APAM 污泥样品的比表面积最高为 $1.607\text{ m}^2/\text{g}$ 。BET 法测量的是干燥样品的骨架结构,其比表面积表征的是絮体在脱水塌缩后残留孔隙的复杂程度。通常,比表面积越大,污泥颗粒吸附结合水的能力越强,脱水难度也越高,这与三种样品的脱水性能结果完全一致。

3.4 污泥 TGA 分析

通过对低温段失重行为的比较,可以有效地评价絮凝剂的优劣,一个优秀的絮凝剂能够通过吸附、架桥、网捕等作用,有效破坏污泥的胶体结构,将更多的结合水与间隙水转化为易于脱除的自由水,这一改善效果将直接体现在 TGA 曲线低温段的失重特征上,结果见图 10。

在水分主要蒸发区间 ($100\sim150^\circ\text{C}$),改性 APAM 处理样品的 TGA 曲线位置相对最高,表明其在此温度区间的失重反而最小。这并非表明其脱水性能差,恰恰相反,这揭示了改性 APAM 独特的作用机理。

改性 APAM 凭借其卓越的“吸附-架桥”能力,形成了更为密实、庞大的絮体结构。这种结构在脱水过程中表现出优异的“助留”效应:它将水分更紧

密地包裹或束缚在絮体内部的微通道网络中,显著增加了水蒸气在静态常压加热条件下的扩散阻力。因此,在 TGA 测试的 $100\sim150^\circ\text{C}$ 区间内,水分虽然受热汽化,但逸出速率受到抑制,导致失重相对较小。这些水分必须在后续板框压滤所施加的高强度机械压力下,通过外力挤压才能被高效挤出。

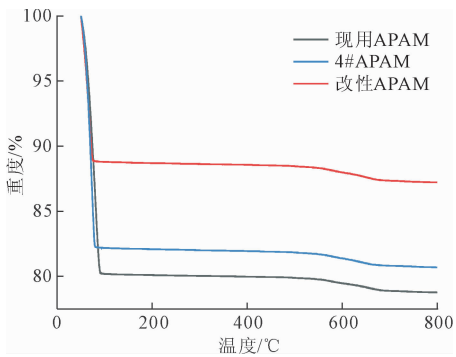


图 10 现用、4#、改性 APAM 处理后污泥热重分析

3.5 洗砂絮凝残留分析

采用 FTIR 对絮凝反应后的污泥样品进行分析,通过对比特征官能团吸收峰的位置、强度和形状变化,推断絮凝剂分子与污泥颗粒表面发生的化学作用,结果见图 11。

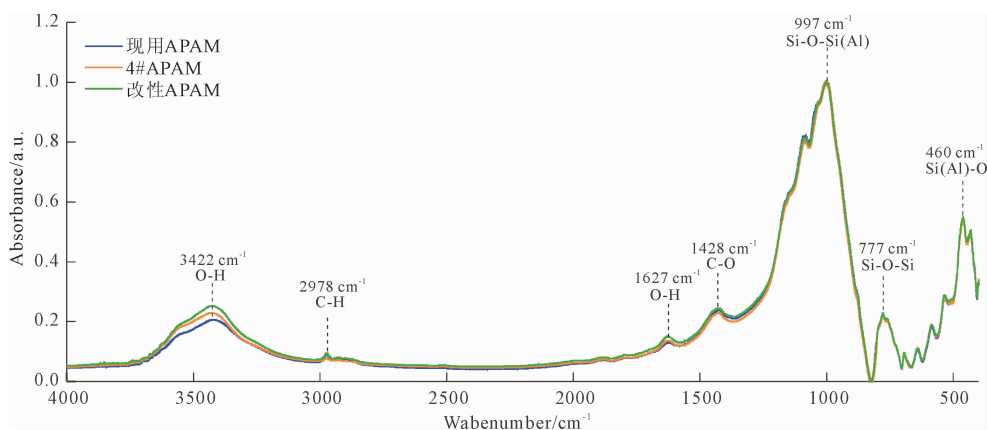


图 11 现用、4#、改性 APAM 处理后污泥 FTIR 分析

絮凝沉降后污泥的红外特征如图 11 所示,絮凝后石粉颗粒的吸收峰组成基本相同,在 $3\,423\text{ cm}^{-1}$ 附近吸收峰与矿物中游离以及表面氢键缔合 O-H 伸缩振动模式相关,在 $1\,627\text{ cm}^{-1}$ 附近吸收峰与水分子 O-H 弯曲振动模式相关。在 $2\,975\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰主要归属于 C-H 伸缩振动模式,来源于石粉中的微量有机组分。在 $1\,436\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰主要归属于碳酸钙中碳酸根 C-O 伸缩振动模式,表明石粉污泥中含有部分碳酸盐成分。在 $1\,090$ 和 $1\,001\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰主要来源于 Si-O-Si 或 Al-O-Si 的不对称伸缩振动模式,表明样本结构以硅铝酸盐为主。在 777 cm^{-1} 附近的连续峰形同样来源于 Si-O 和 Al-O 等结构的伸缩振动模式,是 Si、Al 四面体结构特征峰。 460 cm^{-1} 附近的吸收峰对应 Al-O、Si-O 弯曲振动模式。整体来看,经絮凝剂处理后的污泥样本主要以硅铝酸盐类矿物质为主,并掺杂有碳酸盐及微量有机组分^[23-25]。4#APAM 和改性 APAM 两样本在 $1\,629$ 和 $3\,422\text{ cm}^{-1}$ 附近 O-H 吸收峰相对强度逐渐增加,这是由于 APAM 结合后最直接的作用就是与水分子和表面羟基形成氢键,从而使 O-H 区域吸收峰明显拉伸和增强。这一变化也体现出改性 APAM 表面的吸附量较高,其次是 4#APAM,而现用 APAM 表面的吸附量最低。

4 结 论

(1) 改性 APAM 在处理高浊度花岗岩废水方面表现出优异的适应性,在在优化投加量为 2.5 g/m^3 条件下,可形成平均粒径 $68.35\text{ }\mu\text{m}$ 的密实絮体,上清液浊度降至 25 NTU,显著提升了絮凝沉降效率。相较于现用 APAM,改性 APAM 在关键污泥抽滤阶段耗时由 165 s 降至 144 s,缩短约 12.7%,

压滤后泥饼含水率也降至 21.71%,展现出更优的脱水性能。

(2) SEM 分析表明,改性 APAM 能构建具有高刚性、大孔径的稳定三维网状絮体结构,为压滤过程中水分的顺畅排出提供了持久通道。Zeta 电位与 FTIR 分析进一步证实其分子链在污泥颗粒表面的吸附能力与架桥效率更高。BET 与 TGA 分析结果揭示,改性 APAM 调理后的污泥絮体骨架更为发达,水分赋存形态得到有效改善,更多结合水与间隙水转化为易于机械脱除的自由水。

(3) 综合药剂投加量、脱水效率及泥饼含水率等指标,改性 APAM 在该废水处理体系中具有较好的实用性和经济性,可为同类花岗岩制砂废水的污泥脱水工艺优化提供参考。

参考文献:

[1] 高 升,李 英,张燕春,等. 水电工程砂石加工系统废水处理设计研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023,54(S1):259-262.

[2] 李方平,王海力,王 孟,等. 旭龙水电站混凝土骨料冲洗废水絮凝剂筛选及絮凝条件研究[J]. 安全与环境工程,2023,30(02):241-250.

[3] 王中敏,张登成,陈 锋,等. 金沙江上游苏洼龙至虎跳峡江段鱼类群落结构及分布特征[J]. 生态学杂志, 2025,44(09):2999-3007.

[4] Wei Hua, Gao Boqiang, Ren Jie, et al. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review[J]. Water Research, 2018,143:608-631.

[5] 吴海民,易 枫,郑鸿晖. 絮凝-真空抽滤-土工管袋联合处理泥浆脱水模型试验[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(07):26-33.

[6] 吴 敏,黄英豪,董道武. 污泥板框压滤脱水效率影响

- 因素研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(S1): 16-20.
- [7] Yang Ran, Li Haijiang, Huang Mu, et al. A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment[J]. Water Research, 2016, 95: 59-89.
- [8] 吕伟, 林乃喜, 董兴震. 市政浓缩污泥脱水絮凝机理及板框压滤效率研究[J]. 中国给水排水, 2025, 41(15): 150-155.
- [9] 牛太同, 刘云海, 朱海波, 等. 聚丙烯酰胺生产工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [10] 欧自然, 吴明玉, 杨秀娟, 等. 高分子聚合物及水玻璃改性黄土的水理特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2025, 23(05): 194-200.
- [11] 康长科, 崔宝玉, 沈岩柏, 等. 不同离子型 PAM 调控赤铁矿絮凝沉降的跨尺度机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(05): 1152-1166.
- [12] Zhao Chuanliang, Zheng Huali, Gao Baoyu, et al. Ultrasound-initiated synthesis of cationic polyacrylamide for oily wastewater treatment Enhanced interaction between the flocculant and contaminants[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018(42): 31-41.
- [13] 牛舒. 丙烯酰胺合成技术及产业链分析[J]. 应用化工, 2025, 54(01): 233-239.
- [14] 南京瑞迪高新技术有限公司, 安徽瑞和新材料有限公司. 一种高效处理洗砂废水有机絮凝剂的制备方法: 202210184595.5[P]. 2022-04-29.
- [15] 吴敏, 黄英豪, 董仕骏, 等. 高分子絮凝剂对污泥板框压滤脱水效果及影响机理[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(03): 470-476.
- [16] 雷泽锐, 张明杨, 杜建伟, 等. 强化技术在市政污泥深度脱水中的研究现状[J]. 水处理技术, 2024, 50(12): 14-21, 34.
- [17] 李文婷. 石圪台选煤厂煤泥处理中板框压滤机效率优化[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(S2): 140-143.
- [18] 何华. 给水厂板框压滤机与离心脱水机建设运营成本分析[J]. 给水排水, 2023, 59(08): 8-12.
- [19] Yan Yaping, Wang Gang, Wei Bigui, et al. Removal performance for copper and turbidity with dithiocarboxyl aminomethy-polyacrylamide as flocculant[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 28: 106526.
- [20] 黄英豪, 戴济群. 我国疏浚污泥处置与利用研究进展[J]. 中国水利, 2024(03): 25-28.
- [21] 李世汭, 张洋, 夏新星, 等. 复合调理对污泥机械压滤脱水特性的影响机理分析[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(04): 29-36.
- [22] 李明霜, 朱利军, 徐慧, 等. 阴离子聚丙烯酰胺 (APAM) 和聚二甲基二烯丙基氯化铵 (HCA) 对给水厂污泥水分分布的影响及其与污泥颗粒的作用机制[J]. 环境科学学报, 2021, 41(08): 3121-3129.
- [23] 武玉洁, 沙淑莉, 董妍, 等. 二氧化硅二维漫反射红外光谱特征研究[J]. 有机硅材料, 2019, 33(06): 479-487.
- [24] 张彬, 肖霄, 韩芸娇, 等. 碳酸钙三级红外光谱研究[J]. 无机盐工业, 2021, 53(01): 97-101.
- [25] 方文, 吴振宇, 肖翔, 等. 垃圾焚烧飞灰固化及重金属浸出特性研究[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2022, 50(03): 21-28.