

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.006

热改性给水污泥联合酸提液调理促进剩余污泥脱水

张彦平¹, 郑松超¹, 孙雪萌², 李芬³, 李一兵¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 中建六局<天津>绿色建筑科技有限公司, 天津 300451; 3. 哈尔滨理工大学 材料科学与化学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 为了改善剩余污泥的脱水性能,采用热改性给水污泥(HMS)联合其酸提液调理剩余污泥,研究了联合调理对污泥脱水性能的影响和机理。结果表明,当HMS投加量为30%(以干污泥DS计)、酸提液投加量为8 mg/g(以Fe/DS计)时,污泥毛细吸水时间(CST)和污泥比阻(SRF)分别降至10.3 s和 0.83×10^9 s²/kg,较HMS联合FeCl₃的调理效果进一步降低了48.8%和37.3%,药剂使用量降低了约60%。调理过程中,HMS可作为骨架颗粒,使污泥压缩系数由1.39降至0.82,提高污泥的透水性;酸提液中的Fe、Al、Ca等金属阳离子有助于增大污泥絮体体积、使结构更密实,使得分形维数从1.29增至1.65;酸提液及HMS溶解出的阳离子可中和污泥表面的负电荷,使Zeta电位升至0.15 mV,有利于污泥絮体团聚与脱水;在HMS和酸提液的共同作用下,胞外聚合物(EPS)总量降低(多糖降低了30.9%、蛋白质降低了36%),且伴随着紧密结合型EPS(TB-EPS)向疏松结合型EPS(LB-EPS)和可溶性EPS(S-EPS)的转化,从而使得污泥的脱水性能得到较大提高。经HMS联合酸提液调理后,污泥上清液浊度及SCOD较原污泥分别降低了86.9%和73.2%,有利于后续处理。

关键词: 污泥脱水; 给水污泥; 酸提液; 骨架构建; 分形维数

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0039-08

Heat Modified Sludge from Waterworks Combined with Its Acid Extract Conditioning to Promote Excess Sludge Dewatering

ZHANG Yan-ping¹, ZHENG Song-chao¹, SUN Xue-meng², LI Fen³, LI Yi-bing¹

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. China Construction Sixth Engineering Bureau <Tianjin> Green Building Technology Co. Ltd., Tianjin 300451, China; 3. School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: This paper used heat modified sludge (HMS) from waterworks combined with its acid extract to condition excess sludge, and investigated the effect of the combined conditioning on sludge dewatering performance and its mechanism, so as to improve the dewatering performance of excess sludge. When the dosages of HMS and acid extract were 30% and 8 mg/g, the capillary suction time (CST) and specific resistance to filtration (SRF) of sludge were reduced to 10.3 s and 0.83×10^9 s²/kg, respectively. Compared with conditioning by FeCl₃ combined with HMS, the CST and SRF were further

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608166)

通信作者: 张彦平 E-mail: zyphit@163.com

reduced by 48.8% and 37.3%, and the dosage of agent was reduced by 60%. In the conditioning process, HMS served as the skeleton particle, which reduced the sludge compression coefficient from 1.39 to 0.82, and improved the water permeability of the sludge. The cations such as Fe, Al and Ca in the acid extract were conducive to increase the volume and compact the structure of the sludge flocs, and increased the fractal dimension from 1.29 to 1.65. The cations dissolved by the acid extract and HMS neutralized the negative charge on the surface of the sludge, and increased the Zeta potential to 0.15 mV, which was conducive to the agglomeration and dewatering of the sludge flocs. Under the combined action of HMS and acid extract, the total content of extracellular polymer (EPS) decreased (30.9% for polysaccharide and 36% for protein), which was accompanied by the conversion of tightly bounded EPS (TB-EPS) to loosely bounded EPS (LB-EPS) and soluble EPS (S-EPS), indicating that the dewatering property of sludge was greatly improved. After the sludge was conditioned by HMS combined with acid extract, the turbidity and SCOD in supernatant were reduced by 86.9% and 73.2% respectively compared with the raw sludge, which was conducive to subsequent treatment.

Key words: sludge dewatering; sludge from waterworks; acid extract; skeleton construction; fractal dimension

随着我国经济的快速发展,城镇污水处理量不断增大,污泥产量也随之增多,污泥处理与处置已经成为所有污水处理厂必须面对的难点问题。目前常用的污泥处理与处置方法,例如填埋、焚烧、堆肥、建材利用等,对污泥含水率要求较高(含水率<60%),但由于剩余污泥具有高亲水性和生物凝胶结构,污泥中水和颗粒间的结合力很强,导致脱水非常困难。污泥经常规脱水方式处理后,含水率仅能降至75%~85%,较高的含水率制约了污泥的后续处理和利用^[1]。因此,污泥深度脱水成为当前亟需解决的关键问题。

污泥调理是污泥机械脱水的前处理,可有效破坏污泥的胶态结构,减少泥水之间的亲和力,改善污泥的脱水性能^[2-3]。絮凝调理是常用的污泥调理方法之一,主要通过向污泥中加入混凝剂,如铝盐、铁盐、有机高分子聚合物等,使污泥颗粒絮凝,降低污泥比阻(SRF),从而提高脱水性能。考虑到污泥可压缩性较高,压滤时泥饼容易坍塌,脱水效果降低。因此,通常采用骨架颗粒调理与絮凝调理联合以提高污泥脱水性能。常用的骨架颗粒多为惰性材料,如硅藻土^[4]、粉煤灰^[5]、农林废弃物^[6]等,这些惰性材料供给污泥以多孔状格网骨架,降低泥饼的可压缩性,使污泥在高压下保持高渗透状态,增强絮体强度,从而改善污泥脱水性能。研究表明^[7],给水厂污泥中含有CaCO₃、SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃等无机成

分和少量有机成分,具有一定的硬度,可以考虑将其作为骨架颗粒用于剩余污泥脱水处理;与此同时,给水污泥中的混凝剂成分可通过酸液提取后重新利用^[8]。为此,笔者采用热改性给水污泥(HMS)为骨架颗粒(以减少有机成分的溶出),以给水污泥酸提液为絮凝剂,将两者联合对剩余污泥进行调理,分析了联合调理剩余污泥的脱水效果,探讨了调理过程中Zeta电位、胞外聚合物(EPS)、压缩系数(*s*)、分形维数等指标的变化,并测定了上清液浊度和溶解性COD(SCOD)的变化。

1 材料与方法

1.1 试验用污泥

试验用剩余污泥取自天津市某污水厂曝气池,将其重力浓缩后作为脱水试验污泥。剩余污泥的含水率为98.0%、pH为6.6、Zeta电位为-8.44 mV、比阻(SRF)为 2.5×10^9 s²/kg、SS为15 g/L、SCOD为273.25 mg/L、浊度为57.5 NTU、污泥压缩系数(*s*)为1.39。

1.2 热改性给水污泥及酸提液的制备

热改性给水污泥:给水污泥取自天津市某给水厂,自然风干后研磨成粉末,然后置于马福炉中在300℃下煅烧3 h,自然冷却至室温后,得到热改性给水污泥,选取粒径为75~150 μm的污泥粉末备用。原给水污泥的有机成分含量为19.8%,Si、Fe、Al、Ca及其他无机成分的含量分别为24.5%、30.6%、

9.9%、5.7%、9.5%;热改性给水污泥的有机成分含量为7.4%,Si、Fe、Al、Ca及其他无机成分的含量分别为28.2%、35.4%、11.4%、6.6%、11%。

酸提液:先将给水污泥在500℃下煅烧3h,然后取1g煅烧后的污泥置于70℃水浴器皿中,加入20mL、2mol/L的HCl,用保鲜膜密封,磁力搅拌反应1h,然后用0.45μm滤纸抽滤,所得滤液即为酸提液。酸提液中Fe、Al、Ca、Mg的含量分别为9.6、2.7、1.3、0.2g/L。

1.3 试验方法

分别向装有150mL剩余污泥的锥形瓶中投加0、10%、20%、30%、40%、50%(以干污泥DS计)的HMS,以180r/min快速搅拌5min,再投加4、8、12、16、20mg/g(以Fe/DS计)酸提液,调节污泥pH为3,以100r/min慢速搅拌10min,然后静置30min,测定毛细吸水时间(CST)、SRF和含水率;污泥离心后,上清液经0.45μm滤膜过滤,分析蛋白质、多糖、SCOD和浊度等指标的变化情况。

1.4 分析项目与方法

污泥滤饼含水率采用重量法进行测定;CST采用DFC-10A CST测试仪进行测定;SRF采用TG-250比阻测定仪进行测定;EPS采用改进的热提取法^[9]进行提取,其中蛋白质采用考马斯亮蓝G250法进行测定,多糖采用苯酚-硫酸法进行测定;铁离子采用邻菲罗啉法进行测定;Zeta电位采用Zetasizer Nano ZS型纳米粒度和电位分析仪进行测定;污泥压缩系数(s)按经验公式(1)进行计算;污泥的二维分形维数采用图像法进行计算。

$$\frac{SRF_i}{SRF_0} = \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^s \quad (1)$$

式中: P_i 为实际压力,Pa; P_0 为参考压力,Pa; SRF_i 为实际压力对应的比阻值, s^2/g ; SRF_0 为参考压力对应的比阻值, s^2/g 。

2 结果与讨论

2.1 单独投加酸提液对污泥脱水效果的影响

酸提液中主要含有铁、铝、钙、镁等成分,而铁、铝、钙均是调理污泥的絮凝剂有效成分。试验首先研究了酸提液单独调理污泥的最佳药剂投加量和效果,结果如图1所示。可知,污泥经酸提液调理后,CST、SRF和含水率均随酸提液投加量的增加而呈现先减小后增大的趋势。当酸提液投加量为8mg/g时,CST、SRF和含水率均达到最低值,分别为

17.4s、 $0.9 \times 10^9 s^2/kg$ 、70.4%,与原污泥相比,CST和SRF分别下降了27.8%和64.0%;随着酸提液投加量的进一步增加,3个指标反而升高。这是因为,当酸提液投加量较少时,铁、铝等阳离子对污泥颗粒表面的负电荷中和效果较弱,不能有效破坏污泥的胶态结构,使得絮凝调理效果较差;而当酸提液投加量 $>8 mg/g$ 时,过多的阳离子会导致污泥表面电荷反转,增加了絮体之间的静电斥力,从而削弱了污泥絮体之间的相互团聚,阻碍了水分的脱离,使污泥脱水效果变差。因此,单独采用酸提液调理污泥时,酸提液投加量以8mg/g为宜。

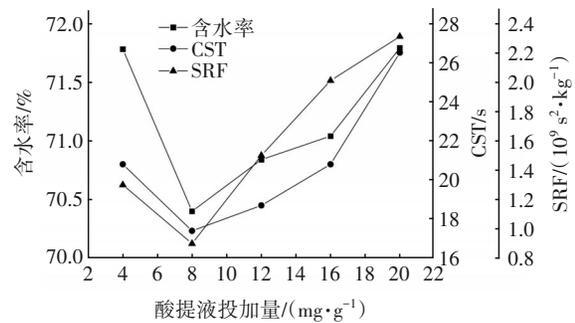
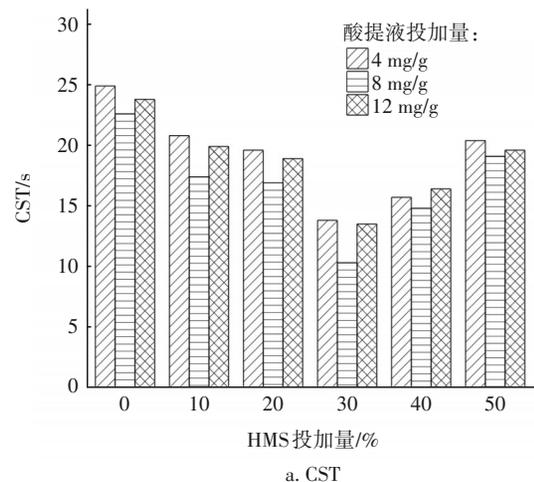


图1 酸提液投加量对污泥脱水效果的影响

Fig.1 Effect of acid extraction solution dosage on sludge dewaterability

2.2 HMS联合酸提液调理污泥脱水的效果

给水污泥经过高温煅烧后有机成分大大减少,无机成分的含量达到92.6%,主要为铁、硅、铝、钙和其他无机成分,并具有一定的硬度,且表面的金属元素在溶液中经水解可带正电荷,具备作为污泥骨架颗粒的潜能。因此,采用煅烧后的HMS作为骨架颗粒,考察其与酸提液联合调理对污泥脱水效果的影响,结果见图2。



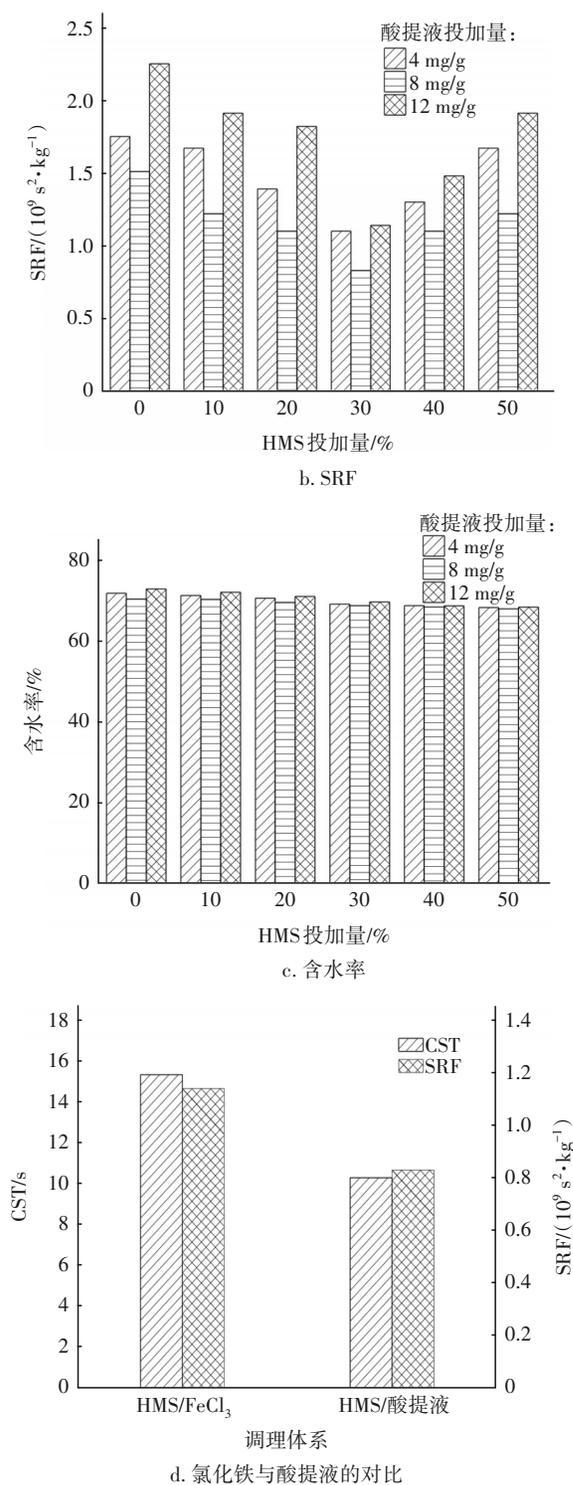


图2 HMS投加量对污泥脱水效果的影响

Fig.2 Effect of HMS dosage on sludge dewaterability

从图2(a)和(b)可以看出,在不同酸提液投加量条件下,CST和SRF均随HMS投加量的增大而呈先降低后升高的趋势。当酸提液投加量为8 mg/g、HMS投加量为30%时,CST和SRF均达到了最小值,分别为10.3 s和0.83×10⁹ s²/kg,与酸提液单独

调理相比,分别下降了40.8%和7.8%,表明HMS的加入有效改善了污泥的脱水效果。这是因为:一方面具有一定硬度的给水污泥可以充当骨架构建体,为污泥中水分的滤出提供通道,进而改善污泥的脱水性能;另一方面,污泥中部分Fe、Al、Ca等元素可在酸性条件下溶出,形成带有正电荷的离子或水解产物,可有效中和污泥表面的负电荷或凝聚污泥絮体颗粒,改变污泥的胶态结构,从而进一步提高污泥脱水性能。图2(c)显示,泥饼含水率随着HMS投加量的增加而降低,当酸提液投加量为8 mg/g、HMS投加量为50%时,含水率最低为68.2%,该指标与污泥脱水过程中其他指标的变化情况不同,这主要是由于固体物质投加量较大时,固体含量在污泥调理中起主导作用,从而导致了含水率降低。由图2(d)可知,与HMS联合FeCl₃调理(两者投加量分别为30%、60 mg/g)效果相比,HMS与酸提液联合调理(两者投加量分别为30%、8 mg/g)污泥脱水的效果更好,CST、SRF分别较HMS/FeCl₃调理体系降低了48.8%和37.3%,同时药剂使用量降低了约60%。

2.3 Zeta电位的变化

Zeta电位是影响污泥脱水性能的重要参数,考虑到酸提液及HMS在溶液中均能释放出带正电荷的离子,会对污泥絮体的Zeta电位产生一定影响,因此在酸提液投加量为8 mg/g的条件下,考察了HMS投加量对污泥Zeta电位的影响,并与HMS联合FeCl₃(投加60 mg/g)调理污泥脱水的效果进行了对比,结果见图3。

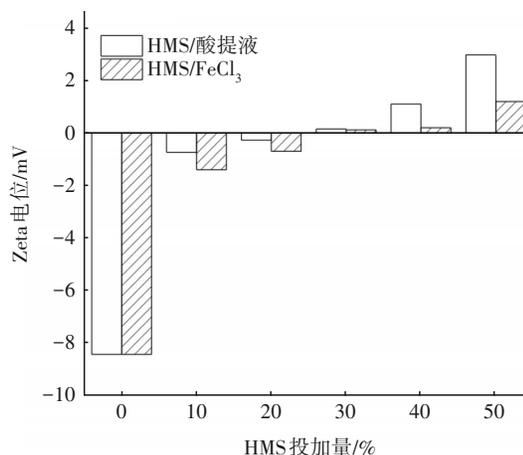


图3 HMS投加量对污泥Zeta电位的影响

Fig.3 Effect of HMS dosage on Zeta potential of sludge

由图3可知,原污泥的Zeta电位为 -8.44 mV ,表面带有一定量的负电荷。加入调理剂后,污泥Zeta电位迅速上升,且随着HMS投加量的增加而升高,当HMS投加量为30%时,污泥Zeta电位升至 0.15 mV ,接近0即等电位点,此时污泥脱水性能较好;当HMS投加量进一步增加时,体系中溶出的带有正电荷的金属离子及其水解产物会导致污泥颗粒表面电荷变号,使得污泥体系出现再稳现象,脱水性能反而变差,这与图2的结果相一致。与HMS/ FeCl_3 调理体系相比,HMS/酸提液调理体系中污泥Zeta电位的上升程度稍高,表明HMS/酸提液调理体系中的正电荷离子强度较高,更有利于污泥脱水。

2.4 EPS的变化

污泥EPS主要由蛋白质和多糖组成,其中含有一 COOH 、一 OH 、一 SH 等强亲水性基团^[10],其组分分布对污泥脱水性能有显著影响。EPS的结构由内而外可以描述为:紧密黏附在细胞壁外且具有一定外形结构的TB-EPS(紧密结合型EPS)、由TB-EPS游离出的黏性聚合物LB-EPS(疏松结合型EPS)和分布在最外层的具有可溶性的S-EPS(可溶性EPS)。TB-EPS位于内层,其中的水分最难脱除^[11]。在酸提液投加量为 8 mg/g 条件下,HMS投加量对污泥EPS组分及分布的影响见图4。

由图4可知,原污泥中多糖和蛋白质含量较高,分别为 149.42 、 167.44 mg/L ,且主要分布在TB-EPS中,分别占总量的 77.71% 和 82.99% ,脱水效果较差^[10]。经HMS联合酸提液调理后,污泥EPS的组分及分布发生了显著变化。图4(a)显示,多糖含量随HMS投加量的增加呈现下降趋势,当HMS投加量为50%时,多糖含量降至 103.29 mg/L ,下降了 30.9% ,其中TB-EPS变化幅度较大,与原污泥相比下降了 56.45% ,而LB-EPS和S-EPS在HMS投加量 $>30\%$ 时反而略有升高。蛋白质的变化趋势与多糖类似,当HMS投加量为50%时,蛋白质含量降至 107.17 mg/L ,与原污泥相比降低了 36% 。这其中可能有两种因素共同作用:其一,HMS颗粒通过吸附及剪切作用将附着在细胞壁外的EPS剥离下来释放到液相中,促使TB-EPS转化为LB-EPS和S-EPS;其二,HMS在酸性体系中溶出的部分阳离子和酸提液共同作用,对EPS产生电性中和及吸附卷扫作用,使液相中的EPS转移到固相中而被去除,导致EPS总量减少。伴随着EPS的剥离、释放,被包裹在EPS中的

结合水也一同被释放至液相,从而改善了污泥的脱水性能。但是当HMS投加量 $>30\%$ 时,HMS对EPS的转化作用大于体系中阳离子对EPS的吸附卷扫作用,故LB-EPS和S-EPS含量会略有升高。此外,有研究认为,污泥絮体中的多糖易与钙、镁离子结合,蛋白质易与铁离子结合^[12]。而酸提液中不仅含有铁离子,还含有铝、钙等离子,因此多种离子共同作用可以较好地调理污泥脱水,并且当铁、铝等离子共存时,可能还会产生协同作用,从而增强铁离子的调理效果^[13]。

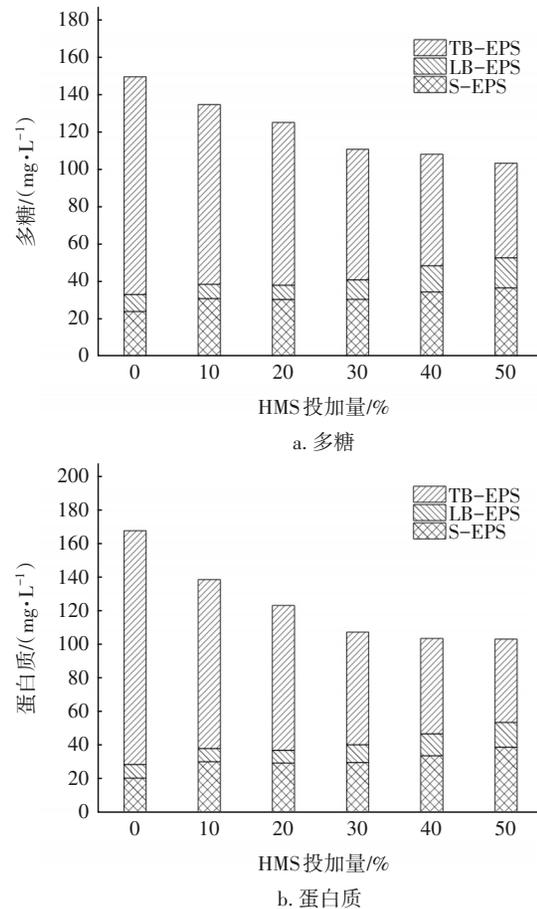


图4 HMS投加量对污泥EPS的影响

Fig.4 Effect of HMS dosage on EPS

2.5 泥饼压缩系数的变化

泥饼压缩系数也是评价污泥脱水性能的一个指标。可压缩性能越高的污泥,压缩系数越高,在受压过程中容易发生变形,堵塞过水通道,导致脱水效果变差。因此,降低泥饼的可压缩性能对改善污泥脱水效果有重要的影响。图5为HMS联合酸提液调理前后,污泥泥饼可压缩性能的变化情况。原污泥压缩系数为 1.39 ,远高于 1 ,可压缩性较高,

不利于污泥压滤脱水。而当投加 30% 的 HMS 和 8 mg/g 的酸提液时,污泥泥饼的压缩系数降至 0.82,与原污泥相比降低了 41%。进一步增加 HMS 投加量至 50% 时,泥饼压缩系数进一步降至 0.69。该结果表明,HMS 在泥饼中可以起到良好的骨架结构和支撑作用,并且 HMS 可以团聚少量污泥颗粒,而酸提液可使这些“团聚体”形成较大且密实的絮体,在泥饼受压时可以抵抗压力的剪切作用^[14],这使得絮体在受压过程中的形变大大减小,透水通道不会被堵塞,泥饼可压缩性降低,污泥脱水性能提高。

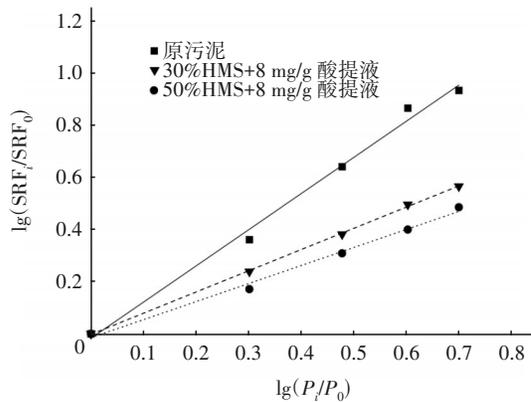


图 5 HMS 与酸提液联合调理对泥饼可压缩性的影响
Fig.5 Effect of HMS and acid extraction solution combined conditioning on sludge compressibility

2.6 絮体分形维数的变化

分形维数可以用来描述不规则絮体结构内部的填充程度,能很好地分析絮体结构的形成和生长,污泥的脱水性能可能与不同酸提液投加量下形成的絮体结构有关。因此试验采用显微摄像机视频图像应用程序对不同酸提液投加量下(HMS 投加量为 30%)的污泥絮体进行拍照,使用 Image-Pro 软件对絮体照片进行二值化处理,测量每一部分的面积(A)和周长(P),在对数坐标轴上绘制 lgA-lgP 图像,图像斜率即为絮体的分形维数,结果见图 6。

原污泥颗粒较小,且形状不规则,此时絮体分形维数较小,为 1.29,污泥的脱水性能较差。当酸提液投加量由 4 mg/g 增至 8 mg/g 时,污泥絮体体积逐渐增大且变得密实,内部空隙减少,此时分形维数随着酸提液投加量的增加而增大,由 1.30 增至 1.65,此时污泥脱水性能最佳(见图 2)。当酸提液投加量 >8 mg/g 时,絮体体积不会明显增大,但内部空隙增多,形状不规则度提高,分形维数由 1.65 降至 1.39。可见,增大酸提液投加量,增加了体系中

的阳离子含量,污泥颗粒所带负电性被中和削弱,絮体颗粒脱稳而逐渐变得密实,可以提高絮体沉降速度,因此污泥调理效果较好;如果继续增大酸提液投加量,污泥颗粒表面会带有相反电荷而产生再稳现象(见图 3),导致絮体之间相互排斥,产生较多空隙,絮体结构不再密实,反而不利于污泥脱水。

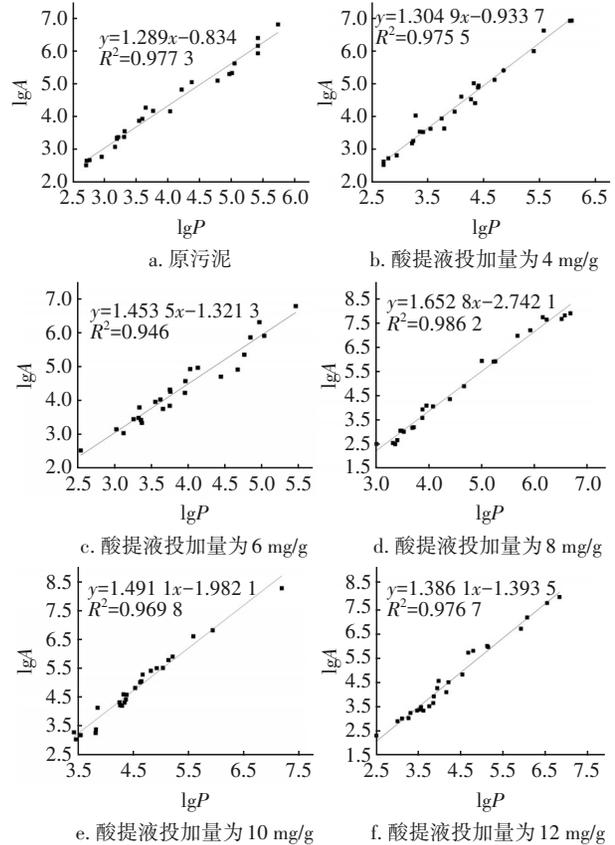


图 6 酸提液投加量对絮体分形维数的影响

Fig.6 Effect of acid extraction solution dosage on fractal dimension of floc

2.7 上清液浊度与 SCOD 的变化

在酸提液投加量为 8 mg/g 条件下,HMS 投加量对污泥上清液浊度及 SCOD 的影响如图 7 所示。原污泥上清液浊度和 SCOD 均较高,经 HMS 联合酸提液调理后,污泥上清液浊度与 SCOD 显著降低。这是因为,在污泥调理过程中,酸提液中的铁、铝、钙等离子对上清液中的悬浮固体及大分子有机物具有一定的絮凝作用;同时,经过高温煅烧后的 HMS 表面粗糙多孔,且覆盖着大量金属离子,有利于吸附去除污泥上清液中的悬浮物及有机物。图 7 显示,在 HMS 投加量为 30%、酸提液投加量为 8 mg/g 的最佳调理条件下,污泥上清液浊度和 SCOD 均达到最小值,分别为 7.5 NTU、73.25 mg/L,相比原污

泥下降了86.9%和73.2%。浊度和SCOD浓度的大幅度降低有利于减少污泥上清液后续处理的难度和费用。

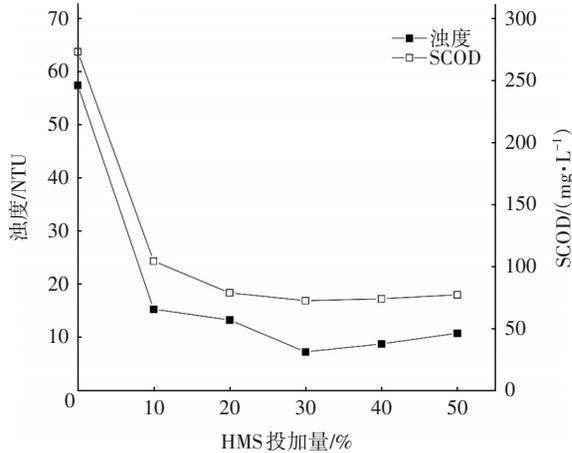


图7 HMS投加量对污泥上清液浊度和SCOD的影响

Fig.7 Effect of HMS dosage on turbidity and SCOD of sludge supernatant

2.8 初步经济分析

经济是评判一种技术能否工业化的主要因素,基于相关研究^[15-16],以100 m³/d、含水率为98.0%的供试污泥为例,采用HMS联合其酸提液调理污泥,在最佳调理条件下,酸提液耗酸量为12.5 L/m³,需浓盐酸量为24.5 kg/m³(盐酸的单价按350元/t计,用量为2.45 t/d),HMS用量为4.5 kg/m³(考虑到给水污泥的资源化利用,未对其费用进行计算),污泥脱水液产生量为0.89 m³/m³,经计算,污泥调理成本约为857.5元/d,比经典的Fenton调理的经济成本(1492.5元/d)大约节省42.5%(考虑到Fenton反应和本试验均在pH=3酸性条件下进行,故未计算体系调节pH所需费用)。在实际应用中,可以考虑采用工业废硫酸或盐酸进行酸提,从而进一步提高该技术的经济性。

3 结论

① HMS联合酸提液调理可以有效改善剩余污泥的脱水效果。当HMS投加量为30%、酸提液投加量为8 mg/g时,CST和SRF分别降至10.3 s和0.83×10⁹ s²/kg,分别较HMS联合FeCl₃调理效果降低了48.8%和37.3%,药剂使用量降低了约60%。

② 采用HMS与酸提液联合调理污泥时,HMS及酸提液释放出的铁、铝、钙等金属阳离子可中和污泥絮体表面的Zeta电位,有利于污泥团聚;HMS

可作为骨架颗粒,增加过水通道,降低污泥的可压缩性;酸提液中的阳离子有助于絮体体积增大、变得更密实,提高絮体分形维数;在HMS和酸提液的共同作用下,污泥EPS被剥离、释放、沉淀去除,同时伴随着TB-EPS向LB-EPS和S-EPS的转化,从而使得污泥的脱水性能得到提高。

③ 经HMS联合酸提液调理后,污泥上清液浊度和SCOD显著降低,在最佳脱水条件下污泥上清液浊度和SCOD分别降低了86.9%和73.2%,降低了后续处理的难度和费用。

参考文献:

- [1] 苏志升,林培真,罗建标,等. 污泥脱水、输送及储存系统的设计探讨与总结[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 76-81.
SU Zhisheng, LIN Peizhen, LUO Jianbiao, *et al.* Discussion and summary on the design of sludge dewatering, pumping and storage system [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(4): 76-81 (in Chinese).
- [2] 郭波,田瑜,范晨,等. 绿色纳米铁/H₂O₂联用两性脱水剂调理污泥研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 62-67.
GUO Bo, TIAN Yu, FAN Chen, *et al.* Sludge conditioning by green iron nanoparticles/H₂O₂ combined with amphoteric dewatering agent [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 62-67 (in Chinese).
- [3] 卓星星,尹兴新,石烁辉,等. 负荷对高盐污泥氧化硫杆菌调理系统脱水效能的影响[J]. 中国给水排水, 2020, 36(23): 27-30.
ZHUO Xingxing, YIN Xingxin, SHI Shuohui, *et al.* Effect of load on dewatering efficiency of high salinity sludge conditioning system with *Acidithiobacillus thiooxidans* [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(23): 27-30 (in Chinese).
- [4] QI Y, THAPA K B, HOADLEY A F A. Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties—a review [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171(2): 373-384.
- [5] 程磊,于衍真,索宁,等. 粉煤灰在污泥调理中的应用进展[J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(4): 37-39.
CHENG Lei, YU Yanzhen, SUO Ning, *et al.* The application progress of fly ash in sludge conditioning [J]. China Resources Comprehensive Utilization,

- 2013, 31(4): 37-39 (in Chinese).
- [6] WANG S, YANG Y K, CHEN X G, *et al.* Effects of bamboo powder and rice husk powder conditioners on sludge dewatering and filtrate quality [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124: 288-296.
- [7] 陶贇. 给水厂排泥水用于污水厂剩余污泥脱水除磷研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- TAO Yun. Study on Sludge Water of Wastewater Treatment Plant is Used to Remaining Sludge Dehydration and Dephosphorization [D]. Nanjing: Southeast University, 2018 (in Chinese).
- [8] 魏美洁, 丁曙东, 王东田, 等. 净水污泥中回收的混凝剂处理印染废水的中试研究[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(11): 110-112.
- WEI Meijie, DING Shudong, WANG Dongtian, *et al.* Application of coagulant recovered from water treatment sludge for treatment of printing and dyeing wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(11): 110-112 (in Chinese).
- [9] 崔飞剑, 李平, 朱凤霞, 等. 盐度对SBR处理垃圾渗滤液污泥胞外聚合物及污泥特性的影响[J]. *环境工程*, 2017, 35(3): 23-27.
- CUI Feijian, LI Ping, ZHU Fengxia, *et al.* Effect of salinity on the extracellular polymeric substances and the characteristics of activated sludge in system of landfill leachate treated by SBR [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(3): 23-27 (in Chinese).
- [10] 童震松, 洪晨, 邢奕, 等. 表面活性剂调理下污泥中胞外聚合物分布与束缚水含量的关系[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(8): 2913-2919.
- TONG Zhensong, HONG Chen, XING Yi, *et al.* Relationship between extracellular polymeric substances and bound water in sludge with surfactant conditioning [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(8): 2913-2919 (in Chinese).
- [11] LIU J, YANG Q, WANG D B, *et al.* Enhanced dewaterability of waste activated sludge by Fe(II)-activated peroxydisulfate oxidation [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 206: 134-140.
- [12] 朱哲, 李涛, 王东升, 等. Ca(II)在活性污泥生物絮凝中的作用研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(4): 612-616.
- ZHU Zhe, LI Tao, WANG Dongsheng, *et al.* Role of Ca(II) in bioflocculation of activated sludge [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(4): 612-616 (in Chinese).
- [13] 秦楠. 聚合氯化铝铁的制备及其复配的研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2016.
- QIN Nan. Research on Preparation of Polymeric Aluminum Ferric Chloride and Its Compounds [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2016 (in Chinese).
- [14] 黄志斌, 陈亮, 高莉莉, 等. Ca²⁺和PAM对污泥流变性和脱水性能的影响[J]. *污染防治技术*, 2003(S1): 48-50, 173.
- HUANG Zhibin, CHEN Liang, GAO Lili, *et al.* Investigation on effect of Ca²⁺ and PAM on sludge rheology and dewaterability [J]. *Pollution Control Technology*, 2003(S1): 48-50, 173 (in Chinese).
- [15] 刘怡君. 芬顿反应强化污泥脱水试验及机理研究[J]. *环境工程*, 2017, 35(4): 55-59.
- LIU Yijun. Experiment study on enhanced dewatering of sludge with Fenton reaction [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(4): 55-59 (in Chinese).
- [16] 洪飞, 孙文全, 朱辉, 等. Fenton-絮凝联合调理对污泥脱水性能影响[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(2): 200-206.
- HONG Fei, SUN Wenquan, ZHU Hui, *et al.* Effects of Fenton-flocculation combined conditioning on sludge dewatering [J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 42(2): 200-206 (in Chinese).

作者简介:张彦平(1978-),女,河北邢台人,博士,副教授,主要研究方向为污水、污泥处理与资源化利用。

E-mail: zyphit@163.com

收稿日期: 2021-04-19

修回日期: 2021-06-03

(编辑:刘贵春)