

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.17.019

# 高铁酸钾氧化剩余污泥效能及破解液性质

金润<sup>1,2</sup>, 李祥<sup>1,2,3</sup>, 谈新伟<sup>1,2</sup>, 夏子翔<sup>1,2</sup>, 黄勇<sup>1,2</sup>, 马军<sup>3</sup>,  
倪敏<sup>1,2</sup>

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215002; 2. 苏州科技大学 环境生物  
技术研究所, 江苏 苏州 215002; 3. 哈尔滨工业大学环境学院 城市水资源与水环境国家  
重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 从污泥固体氧化程度(可挥发性悬浮固体VSS、污泥沉降比SV、污泥体积指数SVI、中值粒径)、污泥脱水性能(污泥比阻)和破解后液相中各类物质的浓度水平(TOC、溶解性有机物SCOD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、TP、多糖、蛋白质)方面,考察了高铁酸钾投加量对剩余污泥固体的氧化性能和氧化后破解液的水质特性。结果表明,随着高铁酸钾投加量的增加,污泥VSS逐渐下降,中值粒径先略微下降后上升,污泥比阻急剧上升后下降,沉降性能变化不显著。TOC、SCOD、TN、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、TP、多糖和蛋白质浓度均呈现先快速后缓慢的上升趋势,当投加量为30 mg/gSS(以Fe计)时,上述指标氧化破解后的浓度分别为838、2 153、134、22、29、156和514 mg/L,污泥破解度( $\text{DD}_{\text{cod}}$ )为16%,溶胞比( $\xi$ )为0.16,在该投加量下,可以较为经济地氧化破解剩余污泥。

**关键词:** 高铁酸钾; 污泥破解; 剩余污泥; 氧化; 胞外聚合物

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)17-0118-06

## Performance of Potassium Ferrate for Excess Sludge Oxidation and Property of Cracking Solution

JIN Run<sup>1,2</sup>, LI Xiang<sup>1,2,3</sup>, TAN Xin-wei<sup>1,2</sup>, XIA Zi-xiang<sup>1,2</sup>, HUANG Yong<sup>1,2</sup>,  
MA Jun<sup>3</sup>, NI Min<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and  
Technology, Suzhou 215002, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou  
University of Science and Technology, Suzhou 215002, China; 3. State Key Laboratory of Urban  
Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin  
150090, China)

**Abstract:** This paper investigated the effect of potassium ferrate dosage on the oxidation performance of excess sludge solids and the water quality characteristics of the cracked solution after oxidation from the aspects of sludge solid oxidation degree (VSS, SV, SVI and median particle size), sludge dewatering performance (sludge specific resistance) and concentration of various substances in the liquid phase after cracking (TOC, SCOD,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN,  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ , TP, polysaccharide and protein). With the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478287、51408384); 江苏省特色优势学科二期项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目; 苏州科技大学校基金资助项目(XKZ2017001)

通信作者: 黄勇 E-mail: yonghuang@mail.usts.edu.cn

increase of potassium ferrate dosage, the volatile suspended solids decreased gradually, the median particle size decreased slightly at first and then increased, the specific resistance of sludge increased sharply and then decreased, and the settling velocity of sludge did not change significantly. The TOC, SCOD, TN,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , TP and concentrations of polysaccharide and protein all showed a trend of rapid rise followed by slow rise. When the dosage was 30 mg/gSS (calculated as Fe), the concentrations of the above indexes after oxidation were 838 mg/L, 2 153 mg/L, 134 mg/L, 22 mg/L, 29 mg/L, 156 mg/L and 514 mg/L, respectively, the degree of sludge disintegration was 16%, and the cell lysis ratio was 0.16. At this dosage, the excess sludge could be oxidized and cracked more economically.

**Key words:** potassium ferrate; sludge cracking; excess sludge; oxidation; extracellular polymeric substances

目前,剩余污泥的最终处置给污水处理厂造成了巨大负担,故而国内外学者们在污泥减量方面进行了诸多研究。例如,物理法(热水解、超声波、微波等)和化学法(碱、臭氧、过氧化氢、高铁酸盐等)通过破坏污泥结构实现了污泥解体,还有利用微生物捕食和生物酶等进行污泥破解,也有采用这些方法的多种联合运用,最终都能在不同程度上实现污泥减量化。其中,绿色化学药剂高铁酸钾因其具有氧化性强、消毒除臭、无有毒副产物的特点和优势,近年来在污泥减量化领域逐渐得到关注。对于采用高铁酸钾进行污泥减量化,大多数是通过氧化污泥释放出结合水,着重考察污泥的脱水性能:Liu等<sup>[1]</sup>以毛细吸水时间评价污泥的脱水性,当污泥pH为7.1时,得到高铁酸钾最佳投加量为100 mg/gTS(以Fe计);曹秉帝等<sup>[2]</sup>发现,当pH为3、高铁酸钾投加量为100 mg/gTS时,污泥比阻和含水率达到最低。还有学者通过额外考察破解液的水质来表征污泥破解效果。Liu等<sup>[3]</sup>发现,低剂量的新制碱性高铁酸钾(投加量为0~12 mg/gTS)能有效破解污泥,使部分胞外聚合物(EPS)和细胞物质溶解在水相中;当投加量提高至16~56 mg/gTS时,溶出的大分子物质进一步被降解,污泥的沉降比(SV)和含水率随之降低,沉降和脱水性能得到提高。Ye等<sup>[4]</sup>提出,当污泥pH为6.97时,在0~205 mg/gSS的高铁酸钾投加量范围内,污泥的沉降性能略微提高,但不利于污泥的过滤脱水性能,与此相对应的是液相中EPS的浓度大幅度提高。

污泥被破解后大量细胞物质的溶出致使污泥沉降和脱水性能恶化,溶出的这部分物质同样也会消耗高铁酸钾,如果仅以污泥比阻和沉降性能为减

量效果的参考指标,药剂投加量会明显增加;同时,污泥破解程度与高铁酸钾投加量基本呈正相关关系,但关于减量化后污泥上清液的水质与污泥固相之间的变化关系仍缺乏系统性认识。故而,笔者通过分析污泥固体破解前后的变化、污泥破解液的水质指标,以及破解前后EPS的组成情况,综合评价高铁酸钾投加量对污泥固体、过滤脱水性能和细胞物质溶出情况的影响,旨在为降低污泥减量化成本提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验污泥

污泥取自苏州某污水处理厂(氧化沟工艺)剩余污泥浓缩井,物理化学性质如下:盐度、SS、VSS、TCOD、SCOD、TOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分别为89.5、10 380、7 149、14 466、401.5、175.9、6.8、16.4、5.9、1.1 mg/L, pH为6.77。高铁酸钾的配制浓度约为2 000 mg/L(以Fe计)。

### 1.2 实验方法

取200 mL污泥置于烧杯中,采用六联搅拌器(400 r/min)搅拌1.5 h,搅拌过程中投加不同高铁酸钾。反应结束后,取样测定pH、SV、污泥体积指数(SVI)、SS、VSS、污泥粒径、污泥比阻等指标,并取污泥混合液在3 000 r/min下离心3 min,离心液经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤,测定滤液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP、TOC、SCOD浓度。对破解后污泥中的EPS进行分层提取,并测定每层EPS的蛋白质和多糖浓度。

### 1.3 分析项目及方法

常见水质指标采用《水和废水监测分析方法》(第4版)中的相关方法测定;SCOD采用快速消解法测定;TN、TOC采用Analytik Jena Multi N/C 3000分

析仪测定;污泥TCOD参照《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005)测定;多糖、蛋白质的提取参考文献[5],测定参考文献[6]和[7];污泥粒径采用Malvern MASTERSIZER 3000激光粒度仪测定。污泥溶胞比以 $\xi$ 表示,污泥破解度以 $DD_{\text{COD}}$ 表示,分别按式(1)和式(2)计算。

$$\xi = \frac{\Delta \text{VSS}}{\text{VSS}} \quad (1)$$

$$DD_{\text{COD}} = \frac{\text{SCOD} - \text{SCOD}_0}{\text{TCOD} - \text{SCOD}_0} \quad (2)$$

对破解后污泥中的EPS进行分层提取,并测定每层EPS的蛋白质和多糖浓度,蛋白质和多糖浓度之和即为当层EPS的浓度。各层的EPS提取方法如下:黏液层EPS(S-EPS),取50 mL污泥混合液在2 000g下离心15 min,取上清液经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤后测定;松散附着EPS(LB-EPS),将上一步离心剩下的沉淀物用50 mL磷酸缓冲溶液(pH=7)重悬后,于5 000g下离心15 min,取上清液经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤后测定;紧密黏附EPS(TB-EPS),将上一步离心剩下的沉淀物再次用50 mL缓冲液重悬,对混合液进行超声处理(20 kHz、480 W、10 min)后,于13 000g下离心20 min,取上清液经0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜过滤后测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高铁酸钾投加量对污泥特性的影响

随着高铁酸钾投加量的增加,SS、VSS及VSS/SS值均逐渐降低,当投加量达到25 mg/gSS后,SS和VSS的下降趋势变缓,此时分别减少至9 649和6 088 mg/L,较初始值分别降低了9%和14%,对应的VSS/SS值由初始的0.66降至0.63。可见,污泥固体浓度的降低主要是高铁酸钾氧化VSS和有机物导致的,且随着投加量的增加,污泥释放出的有机物同样会消耗部分高铁酸钾,使得用于氧化污泥本身的高铁酸钾比例降低,SS和VSS的降低趋势趋缓。

随着高铁酸钾投加量的增加,SV和SVI总体呈下降趋势,这与Ye等<sup>[8]</sup>和张彦平等<sup>[9]</sup>的研究结果类似,但在本研究中下降幅度很小。理论上,高铁酸钾氧化致使污泥结构遭到破坏,胞内物质和结合水得以释放出来,污泥固体量减少;同时高铁酸钾的还原产物具有絮凝作用,能进一步提高污泥沉降性,故相应的SV和SVI会减小。不过Liu等<sup>[3]</sup>发现,

当投加高铁酸钾固体时,SV的变化同样很小;而当投加新制碱性高铁酸钾时,需要投加量达到约14 mg/gSS后SV才会大幅度下降,低于此投加量的污泥SV依旧变化不大。Ye等<sup>[8]</sup>也提出当pH为6.95、高铁酸钾投加量大于490 mg/gSS时污泥的沉降性能才有所提高。实验过程中检测到了破解液黏度逐渐增加(随着高铁酸钾投加量的增加,黏度由3.7 mPa·s升至4.1 mPa·s),这是胞内有机物溶出所致,虽然污泥结构明显遭到破坏,但在短时间内沉降性能并未得到改善。这表明在较低投加量的条件下,胞内物质大量溶出,高铁酸钾生成的絮凝性铁化合物Fe(III)能力有限,沉降性能短时间内未能得到有效改善,SV和SVI的变化幅度不够明显。

高铁酸钾投加量对污泥比阻和中值粒径的影响如图1所示。

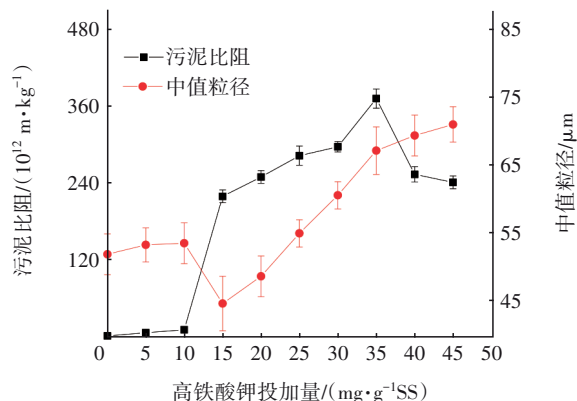


图1 高铁酸钾投加量对污泥比阻和中值粒径的影响  
Fig.1 Effect of potassium ferrate dosages on specific resistance and median particle size

由图1可知,污泥比阻和中值粒径呈现一定的相关性,当高铁酸钾投加量在0~10 mg/gSS时,中值粒径和比阻变化并不明显。随着投加量进一步增大,污泥比阻急剧增大,最高达到371×10<sup>12</sup> m/kg,之后降至200×10<sup>12</sup> m/kg左右,可见高铁酸钾投加量在0~10 mg/gSS时对污泥氧化效果并不明显,增加投加量后,污泥释放出各类细胞物质使得比阻上升,过滤性能变差;而当高铁酸钾投加量增加至35 mg/gSS后,释放到水相中的各类胞内物质越来越多,影响了传质,高铁酸钾会先一步氧化该部分物质而非污泥絮体本身,故而污泥比阻呈下降趋势,但始终高于原污泥。当投加量达到15 mg/gSS时,中值粒径减小至45  $\mu\text{m}$ ,继续增加投加量后可上升至71  $\mu\text{m}$ 。污泥粒径之所以出现这种变化,主要是由于在反应



开始阶段,污泥胶体被  $\text{Fe(VI)}$  破坏,从而使污泥粒径减小,随着反应的进行,高铁酸钾水解所生成的  $\text{Fe(III)}$  具有絮凝性,使得污泥胶体再次凝聚,导致粒径增大。

污泥扫描电子显微镜照片如图 2 所示。可以看出,未经过高铁酸钾处理的污泥絮体结构紧凑完整;而污泥经过高铁酸钾氧化后,原本完整的菌胶团遭到破坏,变得松散不规整,出现纤维状结构,部分细胞裸露出来。可见,高铁酸钾能有效破坏污泥絮体,通过破坏污泥微生物的胞外聚合物,将原本包裹在菌胶团内的细胞暴露出来,进一步还能破坏微生物的细胞壁(膜),使细胞溶解。

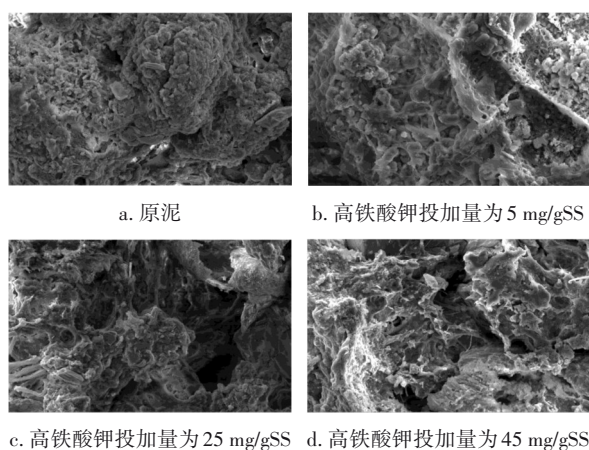


图 2 污泥扫描电子显微镜照片

Fig.2 Scanning electron microscopic photos of sludge

## 2.2 高铁酸钾投加量对污泥破解后水质的影响

由于污泥结构被破坏,使得破解液中含有大量有机碳、氮、磷和小分子化合物等。这部分胞内物质溶出的量能够在一定程度上反映减量化效果。高铁酸钾投加量对污泥破解后水质的影响如图 3 所示。由图 3(a)可知,TOC 和 SCOD 的浓度均随高铁酸钾投加量的增加而上升。当投加量达到 15  $\text{mg/gSS}$  时,TOC 和 SCOD 的浓度分别达到 828 和 1 910  $\text{mg/L}$ ,与原水的 SCOD 和 TOC 相比各提高了 281% 和 268%,有机物释放速率较快,此后有机物浓度上升幅度逐渐变小。随着投加量提高至 30  $\text{mg/gSS}$  时,TOC 浓度升至 838  $\text{mg/L}$ ,较原水提高了 286%,SCOD 浓度升至 2 153  $\text{mg/L}$ ,较原水提高了 316%。当投加量为 45  $\text{mg/gSS}$  时,TOC 和 SCOD 达到最高,浓度比原水分别提高了 431% 和 456%。从图 3(b)可知,  $\text{DD}_{\text{COD}}$  和  $\xi$  的变化趋势与有机物类似,在 30  $\text{mg/gSS}$  投加量下,  $\text{DD}_{\text{COD}}$  达到 16%,  $\xi$  达 0.16;投加量上升至

45  $\text{mg/gSS}$  时,  $\text{DD}_{\text{COD}}$  达到 20%,  $\xi$  达 0.21。污泥被氧化的程度随高铁酸钾投加量的增加而增大,初期上升幅度较大,随着投加量的增加,增幅有所下降。

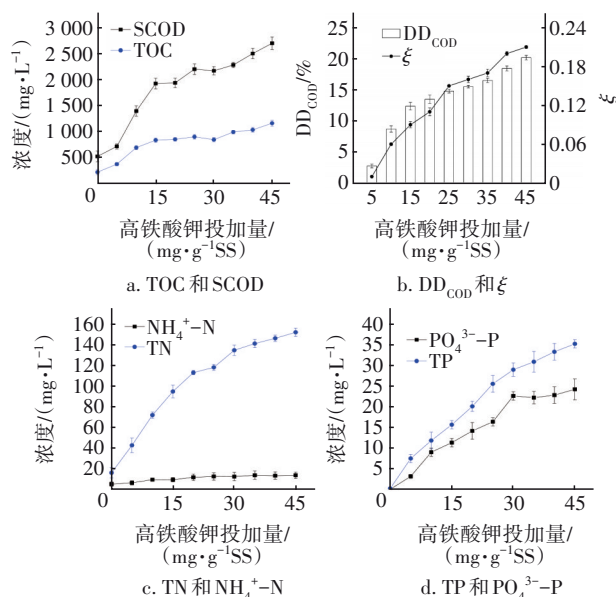


图 3 高铁酸钾投加量对溶出物质浓度的影响

Fig.3 Effect of potassium ferrate dosage on dissolved substance concentration

TN 增加是由于胞内物质溶出,故而 TN 大部分是以有机氮的形式存在于液相中。从图 3(c)可以看出, TN 随着高铁酸钾投加量的增加而升高。当投加量为 30  $\text{mg/gSS}$  时, TN 浓度约为 134  $\text{mg/L}$ , 随后上升趋势变缓,且 TN 浓度始终远大于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度。通常情况下,高铁酸钾与水中含氮有机物反应速率常数的数量级为  $10^0 \sim 10^3 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$ ,而与无机氮反应的为  $10^{-1} \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})^{[10]}$ ,数量级上的差异使得破解液中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  得以积累。  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度随着高铁酸钾投加量的增加而略微上升,但整体变化幅度不大,最高仅达到 14  $\text{mg/L}$ 。

从图 3(d)可知, TP 大部分以  $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$  形式存在,表明污泥破解释放出的有机态磷大多被氧化为  $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ , TP 和  $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$  随着高铁酸钾投加量的增加而上升。当投加量升至 30  $\text{mg/gSS}$  时, TP 和  $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$  的浓度分别为 29 和 22  $\text{mg/L}$ ,而后增加趋势变缓,这是由于增加投加量后,产生了新的  $\text{Fe-PO}_4^{3--}$  沉淀富集在污泥中。

综上所述,随着高铁酸钾投加量的增加,氮、磷和有机物大多呈现明显的升高趋势,且上升曲线的斜率逐渐放缓。当投加量较低时,高铁酸钾对污泥

的氧化作用占主导,污泥溶出氮、磷、有机物到水相中,破解液中各类物质浓度升高。当投加量提高到一定水平后,高铁酸钾过剩,开始氧化污泥已溶出的物质。同时,水解产物 $\text{Fe(III)}$ 具有多相絮凝功能,进一步减缓了各类物质的溶出,但是其总量还在继续增加。

高铁酸钾投加量对EPS的影响如图4所示。

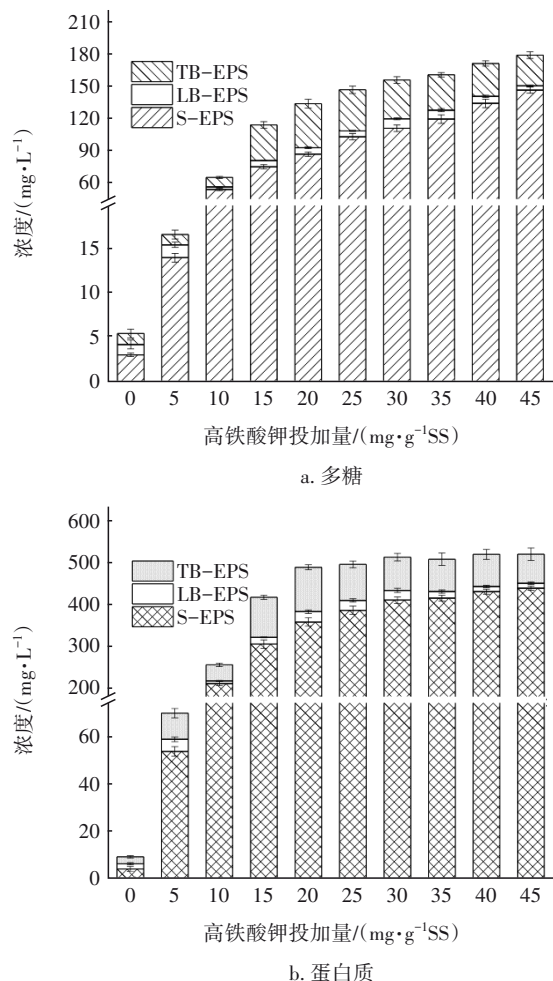


图4 高铁酸钾投加量对EPS的影响

Fig.4 Effect of potassium ferrate dosages on EPS

从图4可以看出,多糖和蛋白质浓度随着高铁酸钾投加量的增加而增大。当高铁酸钾投加量为30 mg/gSS时,多糖和蛋白质总量分别升至156和514 mg/L,比原泥提高了27倍和49倍,随后上升趋势逐渐变缓。与Ye等<sup>[4]</sup>和He等<sup>[11]</sup>的研究结果类似。S-EPS中的多糖和蛋白质均随着高铁酸钾投加量的增加而增大,然后上升幅度趋缓,且蛋白质浓度远高于多糖。LB-EPS和TB-EPS的变化幅度不大。在高铁酸钾投加量较低时,污泥胶体脱落使得

更多的LB-EPS和TB-EPS被提取,然后随着投加量的进一步增加,这部分EPS逐渐向更容易提取的S-EPS转移,LB-EPS和TB-EPS的可提取量下降。

污泥的过滤脱水性能与诸多因素有关,例如EPS组成、污泥粒径、表面电荷等。而污泥含有的大部分结合水存在于EPS中,故一般将EPS作为影响污泥脱水性能最主要的因素。污泥S层中的蛋白质或蛋白质/多糖比例的升高会导致污泥脱水性能变差。高铁酸钾破坏了污泥结构,使得原本结合较为紧密的LB-EPS和TB-EPS向更容易提取的S-EPS过渡,S层的EPS浓度在大幅度提高的同时,污泥比阻同步升高,脱水性能变差,与周俊等<sup>[12]</sup>获得的结果类似。

综上所述,针对短时间内、单一组分的高铁酸钾污泥氧化,在0~45 mg/gSS投加量范围内,污泥比阻与破解液溶出物质的浓度呈现相同的变化趋势,即污泥破解、有机物释放浓度增加的同时,污泥过滤脱水性能变差。相比于投入更多药剂调理污泥,对破解后的污泥进行有机物资源化利用更为经济。从上述分析可以看出,污泥破解度随着高铁酸钾投加量的增加而上升,但结合破解液碳、氮、磷和EPS的浓度变化,一味追求更高的污泥破解度会造成药物过剩。故从污泥固相和破解液水质两方面对污泥减量化程度进行综合考虑,确定最佳高铁酸钾投加量为30 mg/gSS,在此条件下EPS、TN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分别达到670、134和22 mg/L,TOC、SCOD分别为838、2153 mg/L,VSS减少至6020 mg/L,较初始值降低了16%;污泥破解度 $\text{DD}_{\text{cod}}$ 和溶胞比 $\xi$ 分别为16%和0.16,在节省药剂成本的同时,污泥破解程度和营养物质的溶出能够达到一定水平。

### 3 结论

① 高铁酸钾氧化污泥过程中能够破坏有机物,SS、VSS及VSS/SS随着高铁酸钾投加量的增加均逐渐下降。较低投加量下的中值粒径变化不大,随着投加量的升高,中值粒径先因氧化降低,而后由于絮凝作用又进一步升高。由于污泥被氧化后溶出大量物质,且高铁酸钾投加量较低,SV和SVI整体的下降幅度很小。同时,污泥比阻先升高,高铁酸钾过剩后呈下降趋势。

② 随着高铁酸钾投加量的增加,胞内溶出的氮、磷、有机物浓度的变化趋势为先快速上升后趋

缓。当投加量较低时,高铁酸钾氧化污泥的作用占主导,胞内物质大量溶出;当投加量较高时,过剩的高铁酸钾会氧化胞内溶出物质,并具有 $\text{Fe(III)}$ 水解絮凝作用,同样减缓各类胞内物质的溶出。

③ 多糖和蛋白质浓度随着高铁酸钾投加量的增加而上升,且蛋白质浓度远大于多糖。大量S-EPS释放到水相中,导致污泥比阻升高,污泥沉降性能和脱水性能变差。

④ 当高铁酸钾投加量在0~45 mg/gSS范围内时,破解液的碳、氮、磷、EPS浓度均随着投加量的增加而升高,对应的污泥固体破解度和比阻上升、VSS下降。但当高铁酸钾过剩时(达到35 mg/gSS),污泥比阻反而开始下降。

#### 参考文献:

- [ 1 ] LIU Y L, KANG X R, LI X, *et al.* Performance and mechanism of sludge dewaterability enhanced by potassium ferrate pretreatment and calcium chloride addition [J]. *Journal of Water Reuse & Desalination*, 2017, 7(2):136-141.
- [ 2 ] 曹秉帝,张伟军,王东升,等. 高铁酸钾调理改善活性污泥脱水性能的反应机制研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(12):3805-3814.  
CAO Bingdi, ZHANG Weijun, WANG Dongsheng, *et al.* Insights into the mechanism of sludge conditioning with potassium ferrate for improving dewatering property of activated sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35 (12): 3805-3814(in Chinese).
- [ 3 ] LIU Y L, WANG L, MA J, *et al.* Improvement of settleability and dewaterability of sludge by newly prepared alkaline ferrate solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 287:11-18.
- [ 4 ] YE F X, LIU X W, LI Y. Effects of potassium ferrate on extracellular polymeric substances (EPS) and physicochemical properties of excess activated sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 199/200: 158-163.
- [ 5 ] NIU T H, ZHOU Z, REN W C, *et al.* Effects of potassium peroxydisulfate on disintegration of waste sludge and properties of extracellular polymeric substances [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 106:170-177.
- [ 6 ] HERBERT D, PHILIPPS P J, STRANGE R E. Carbohydrate analysis [J]. *Methods in Enzymology*, 1971, 5: 265-277.
- [ 7 ] LOWRY O H, ROSEBROUGH N J, FARR A L, *et al.* Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, 193 (1) : 265-275.
- [ 8 ] YE F X, JI H Z, YE Y F. Effect of potassium ferrate on disintegration of waste activated sludge (WAS) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 219/220 (15) : 164-168.
- [ 9 ] 张彦平,李芬,樊伟,等. 高铁酸盐溶液破解剩余污泥效能研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(6):65-69.  
ZHANG Yanping, LI Fen, FAN Wei, *et al.* Study on performance of ferrate solution disintegration for excess sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(6): 65-69(in Chinese).
- [ 10 ] SHARMA V K. Potassium ferrate ( VI ) : an environmentally friendly oxidant [J]. *Advances in Environmental Research*, 2002, 6(2):143-156.
- [ 11 ] HE Z W, LIU W Z, GAO Q, *et al.* Potassium ferrate addition as an alternative pre-treatment to enhance short-chain fatty acids production from waste activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 174-181.
- [ 12 ] 周俊,周立祥,黄焕忠. 污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34 (7):2752-2757.  
ZHOU Jun, ZHOU Lixiang, HUANG Huanzhong. Optimization of extracellular polymeric substance extraction method and its role in the dewaterability of sludge [J]. *Environmental Science*, 2013, 34 (7) : 2752-2757(in Chinese).

作者简介:金润(1993- ),女,江苏苏州人,硕士研究生,主要研究方向为水污染理论与控制。

E-mail:332671654@qq.com

收稿日期:2020-07-09

修回日期:2021-01-29

(编辑:任莹莹)