

· 污染防治技术 ·

铝盐污泥回收研究进展

俞挺^{1,2}, 沈东旭¹, 杨程¹, 邵钦¹, 宋平三¹, 何丽娜¹, 潘文秀¹, 毕树平^{1*}

(1. 南京大学化学化工学院, 江苏 南京 210093; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要: 简述了铝盐回收的主要方法, 分别为酸溶法、碱溶法、离子交换法和膜分离法, 对每一种方法的原理和特点作了介绍。在此基础上, 对铝盐回收技术的发展趋势做出展望。

关键词: 铝盐污泥; 污水处理; 铝盐回收

中图分类号: X705 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-2009(2009)02-0045-08

Research Progress on Recovery of Aluminum Salt Sludge

YU Ting^{1,2}, SHEN Dong-xu¹, YANG Cheng¹, SHAO Qin¹, SONG Ping-san¹,
HE Li-na¹, PAN Wen-xiu¹, BI Shu-ping^{1*}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The principles and characteristics were briefly described on the methods of acid dissolution, alkali dissolution, ion exchange and membrane separation for aluminum salt recovery. The technology and development trend of aluminum salt recovery were prospected.

Key words: Aluminum salt sludge; Sewage treatment; Aluminum salt recovery

随着社会环境意识和生态理念的逐步普及, 工农业生产废水和城乡生活污水的处理越来越受到大众的关注。与此同时, 随着我国工业化和城市化进程的加速, 污水处理的规模和难度将不断加大, 处理要求也日益提高。在各种水处理工艺中, 混凝是一个重要环节, 比较常见的混凝剂包括铝盐、铁盐和聚胺类高分子等, 以聚合氯化铝 (PACl) 为代表的新型铝盐混凝剂更是被广泛应用^[1]。然而, 不论使用哪种混凝剂, 带来的最大问题都是污泥的处理。混凝剂产生大量的污泥, 造成处置成本和生态环境的巨大负担。特别是随着铝元素的环境和生态毒理研究不断深入, 铝盐污泥回收的必要性就显得日益突出^[2]。从国外研究经验看, 美国有一千多套饮用水治疗设备在使用铝盐 $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ 作为混凝剂来有效地脱除颗粒固体和胶体, 每天超过 200 万 t 水处理污泥从这些公共事业排出^[3]。英国目前年产水处理污泥 182 万 t (干重), 德国也达到了 125 万 t, 并且这些数字在未来十年内还会成倍增长^[4]。对污泥的处置主要有以

下几种途径。

- (1) 直接排放;
- (2) 卫生填埋;
- (3) 焚烧处理;
- (4) 污泥农用;
- (5) 材料加工;
- (6) 能源利用;
- (7) 污泥回用^[5-8]。

几十年来, 国内外学者作了一系列有价值的研究, 形成了酸溶法^[9-21]、碱溶法^[22-23]、离子交换法^[19,24-33]和膜法^[3,21,34-42] 4 种主要回收技术, 此外, 还包括浮选法、真空筛选等法^[43]。限制污泥回用的技术问题主要有两个, 重金属和有机污染物的

收稿日期: 2008-07-08; 修订日期: 2008-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (20575025); 国家自然科学基金资助项目 (NFF7BSJ 0630425)

作者简介: 俞挺 (1985—), 男, 江苏海门人, 在读硕士, 从事环境化学研究。

*通讯作者: 毕树平, bisp@nju.edu.cn

去除。二者的存在使得回收的混凝剂纯度不尽如人意,通常回收的混凝剂无法用于饮用水的处理,从而大大削弱了污泥回用的成本优势。尽管如此该技术具有比较明显的重要意义。

- (1)减少水处理厂使用混凝剂的费用;
- (2)使剩余污泥符合排放标准并且减少费用;
- (3)减少污泥容量和处置费用;
- (4)使污泥更适用于垃圾掩埋场,并且不会产生重金属累积和浸出问题;
- (5)改进剩余污泥的脱水特征;
- (6)提高废水处理设备的使用寿命^[4]。

目前,国内对于各种铝污泥回收方法的研究逐步兴起^[44-46],现对各种主要的回收方法做系统的介绍和比较,并在此基础上展望有关研究的发展趋势。

1 铝盐污泥回收方法

目前使用比较广泛的回收方法是酸溶法、碱溶法、膜法和离子交换法。国内外有关专家已经对此开展了一系列的研究,直接用酸溶、碱溶法、离子交换萃取处理铝污泥是 20 世纪七八十年代的方法,近期的处理方法主要有膜法和改进的离子交换法。但是由于技术条件和经济因素制约,目前国内还是以酸溶法最为普遍。铝盐污泥回收方法见图 1。

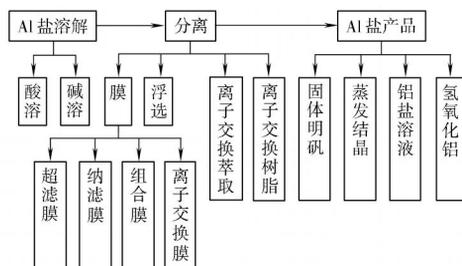


图 1 铝盐污泥回收的方法^[47]

1.1 酸溶法

从 20 世纪 60 年代至今,酸溶法已经经历了 40 年的发展,形成了较为成熟的技术,对该法的研究也较为深入。在酸性条件下,污泥被酸化溶解,其中的铝元素以 Al^{3+} 形态溶出:



结晶后作为铝盐产品被回收,剩余污泥脱水后处理。酸溶法具体流程见图 2。

由于酸溶法的工艺流程比较简单,因此选择合

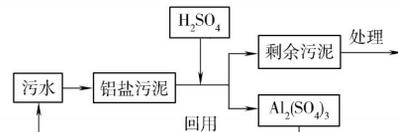


图 2 酸溶法回收铝盐工艺

适的控制条件就显得格外重要,其中尤以 pH 值的控制最为关键。合适的 pH 值范围有:低于 $1.25^{[9-10]}$ 、 $1.7^{[11]}$ 、 $2.0^{[12-14]}$ 、 $2 \sim 2.5^{[15-16]}$ 、 $3^{[17]}$ 、 $3.4^{[18]}$ 、 $3.5^{[19]}$ 。酸度的确定要依污泥的组成而定,过量的酸不但增加了成本,且会造成新的污染,而酸投加不足则会严重影响回收率,二者的平衡需要通过实验确定。酸溶法的主要不足在于选择性差。Comwell 等^[20]认为该法回收的铝盐纯度偏低,含有大量的重金属离子和有机物。由于污泥中的 Fe、Mn、Zn 等重金属离子也会在酸溶时溶出,造成回收后混凝剂中的重金属富集^[19]。此外,有机物也有可能随着铝离子溶解而生成某些致癌物质^[21,37]。图 3 清晰地表明了酸溶法对有机物选择性差的缺点。由于酸溶法存在的缺陷,目前发达国家已相继淘汰了该方法。

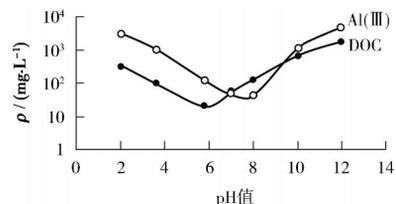


图 3 Allentown 水处理厂 (AWTP) 污泥中溶解有机碳 (DOC) 和 Al(III) 质量浓度随 pH 值变化的曲线^[3]

1.2 碱溶法

由于 Al 在酸性条件和碱性条件下都能溶解为盐的形式,受酸溶法的启发,人们又尝试用 NaOH 或 $Ca(OH)_2$ 等碱溶液来溶解污泥。该法的工艺流程与酸溶类似。碱溶法回收铝盐工艺见图 4。

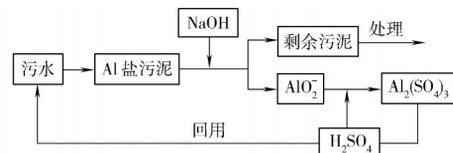


图 4 碱溶法回收铝盐工艺

根据 Masschelein 等^[22]在比利时 Intercommu-

nal Waterboard 水处理厂的试验,当污泥干重小于 20 g/L 时,可用 NaOH 或石灰乳对铝盐污泥溶解,从而有效回收铝盐。在酸度的调节方面,使用 NaOH 需要控制 pH 值为 11.4 ~ 11.8,使用石灰乳则需要控制在 11.2 ~ 11.6,两种方法差别不大。相比而言,用石灰乳可以多除去 10% ~ 15% 的重金属,但 Al 回收率只有 25% ~ 30%;用 NaOH 则能够达到 80%。

该法的主要特点是:

(1) 一定的选择性。碱溶法可以克服酸溶法选择性差的缺点,大部分金属离子会在碱性条件下沉淀从而过滤。同时,Matyasi 等^[23]申请的专利显示,碱溶法能够较好地去除 60% ~ 70% 的有机物,同时保持较高的回收率。但是对同样是两性物质的锌无法分离,因此只有对于含锌较少的污泥,碱溶法才显示出优势。

(2) 成本高。NaOH 的价格远高于硫酸,导致该法的工艺成本居高不下。除了溶解 Al,要除去溶解的有机物也需要大量的碱,并且将碱性的 NaAlO₂ 溶液转化为酸性的铝盐溶液又需要消耗大量的酸^[23]。

1.3 离子交换法

离子交换法主要是指液相离子交换萃取技术,此外也包括离子交换树脂技术。从 20 世纪 70 年代末开始,液相离子交换法逐步获得深入研究^[24-33],而离子交换树脂法则在 2000 年才见报道^[19]。

1.3.1 液相离子交换萃取回收法

该法的流程主要分为两个阶段,见图 5。

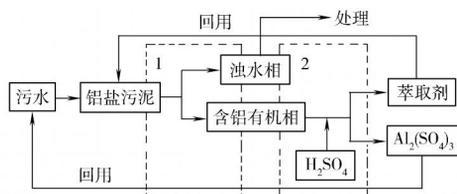


图 5 液相离子交换回收铝盐的流程

第 1 步:萃取。经过酸化后的污泥与有机萃取剂搅拌混合,萃取剂与 Al³⁺ 形成配位化合物,使 Al 转移到有机相。

第 2 步:分离。有机相与 H₂SO₄ 作用,Al 转移到水相,得到浓缩,萃取剂则得以再生。

该法的主要优点是:

(1) 高回收率。Comwell 等^[29-30]通过工厂试验表明,该法的历次铝回收率都达 90% 以上,并且可以控制回收铝盐的浓缩程度。

(2) 高纯度。实验证明,Fe、Zn、Cd、Ni、Mn、Cr 等金属离子与 Al 获得了很好的分离,回收所得的产品可以同商品混凝剂媲美。

(3) 经济性好。在多家工厂的试验都显示出该法的低成本^[24]。

该法的主要局限性在于:

(1) 缺乏环境友好性。该法使用的萃取剂是双(2-乙基己基)磷酸酯和单(2-乙基己基)磷酸酯的混合溶液(含 2% B₁₈O₈),石脑油作为有机溶剂^[27]。使用的部分溶剂带有毒性,并且会对周围环境造成一定的危害,因此该法无法用于饮用水的处理。目前还没有很好的“绿色”溶剂可以替代其萃取剂。

(2) 工艺流程复杂。由于萃取过程条件控制的要求较高,因此整个工艺流程比较复杂,有待进一步简化。萃取后的水相有时夹带有机残液,需对排出的水相再处理。解决的办法是减缓搅拌速率^[31],但又会造成工艺周期的延长,降低运行效率。

1.3.2 离子交换树脂回收法

固相离子交换技术即离子交换树脂也可用来回收铝盐。经过酸溶的铝盐滤液通过阳离子交换树脂,包括 Al³⁺ 在内的大部分金属离子被固定在树脂上,之后再用碱冲淋,Al 元素以 AlO₂⁻ 的形式被洗出,从而实现与其他金属离子及有机大分子的分离。Petruzzelli 等^[18]设计了 IERAL (Ion Exchange Recovery of Aluminium) 过程,将酸化至 pH 值为 3.5 的污泥溶解物通过大孔弱酸丙烯酸系树脂 Purolite C106,再用 0.4 mol/L 的 NaOH 淋洗,获得了高纯度的回收 Al 盐和 Fe 盐,见图 6。涉及的反应如下。

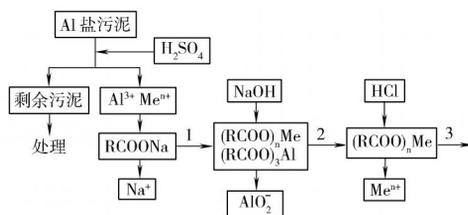


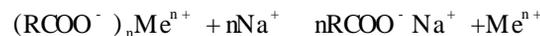
图 6 阳离子交换树脂回收铝盐的工艺 (Me = Zn、Pb、Mg、Mn、Ca 等)

第 1 步: 交换



式中 $\text{Me} = \text{Al}, \text{Fe}, \text{Zn}, \text{Pb}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ca}$ 等;

第 2 步: 淋洗



式中 $\text{Me} = \text{Al}$ 和 Fe ;

第 3 步: 再生



式中 $\text{Me} = \text{Zn}, \text{Pb}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ca}$ 等。

实验表明, 该法的主要优点是:

(1) 高纯度。如图 7 所示, 通过条件控制, 不论是含量较高的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 还是微量的 $\text{Mn}()$ 、 $\text{Pb}()$ 、 $\text{Zn}()$ 都能够与 Al 很好地分离, 回收的 Al 盐质量优于商品 Al 盐混凝剂, 而 Al 回收率则达到 75% ~ 80%。

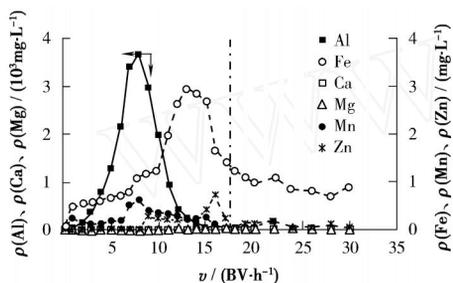


图 7 Purolite C106 树脂中金属离子的再生曲线^[19]

(2) 环境友好性。由于重金属离子溶解后在树脂中依次被洗出, 可以很容易地进行处理, 从而剩余污泥可以安全排放。

(3) 无树脂污染。经过 6 个月 40 多个循环的实验, 没有发现树脂上有有机物的污染, 各项性能保持较好。

该法的局限性如下:

(1) 低效率。由于树脂的交换容量有限, 交换周期较长, 对于大规模的污水处理, 使用 IERAL 技术需要耗费大量的时间。

(2) 适用范围窄。对于含有大量 Fe 元素的污泥来说, IERAL 无法识别 Al^{3+} 和 Fe^{3+} , 因此只能回收铝铁盐, 而不能回收单纯的 Al 盐。此外, 由于有机物往往不带电荷, IERAL 对 COD 含量较高的污泥也无能为力。

1.4 膜分离回收法

膜法是一种新型的分离和浓缩技术, 目前已经被广泛应用于废水处理和资源回收, 由于它的高选择性、低能耗和简易灵活性, 在铝盐回收方面也日益显示出广阔的发展前景, 见图 8。根据膜分离过程机理和使用范围的不同, 可以把膜分离技术分为微滤 (MF)、超滤 (UF)、纳滤 (NF)、反渗透 (RO)、渗析 (D) 电渗析 (ED)、渗透蒸发 (PV) 和气体分离 (GS) 等^[48], 而目前应用到铝盐回收上的技术主要是超滤膜、纳滤膜、离子交换膜以及组合膜。

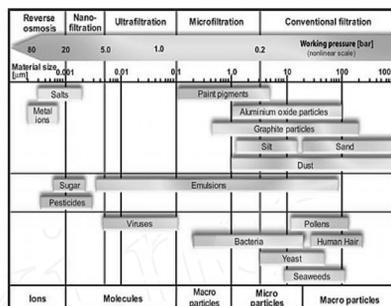


图 8 常用膜分离技术的应用范围^[49]

1.4.1 超滤膜回收法

超滤的推动力是压力差, 由于超滤膜的孔径比较大, 因此操作压力不大, 常常用来筛分小分子溶液中分子质量大于 500 的物质。早在 20 世纪 70 年代, Lindsey 等^[34]就开展了超滤法回收铝盐的研究。在该法中, 首先通过 pH 值为 2.5 的 H_2SO_4 对污泥进行消解, 之后在压力约 34 500 Pa 下使用耐酸的高分子超滤膜过滤。该法的铝回收率接近 90%, 经过 pH 调节后回收的混凝剂即可使用。该法的局限性在于膜污染, 由于污垢阻塞, 超滤膜的透过通量会很快衰减, 因此每通过 4 个循环就要用 NaOH 清洗膜^[35]。为了强化传质, 有时需要加大流量, 从而又增加了该法的动力成本。

1.4.2 组合膜回收法

1991 年, Sengupta 等设计了一种特殊的组合膜二步回收过程 (TCMP) 来改进膜法回收技术^[21-36], 见图 9。这种特殊的聚合物膜由直径约 100 μm 的细小的球形整合交换剂嵌入 0.25 mm 厚的多孔聚四氟乙烯 (PTFE) 膜片组成, 对 Al^{3+} 有高度亲和力。该法的工艺流程分为两步。

第 1 步为 Al^{3+} 的选择性吸附: 当 pH 值为 3.5, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶解, Al^{3+} 被吸附;

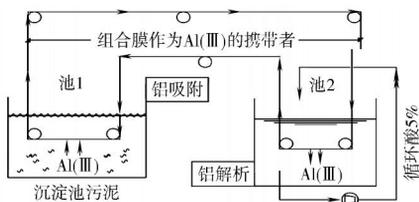


图 9 组合膜法回收铝盐流程 [21]

第 2 步为解吸和膜的再生:当膜完全吸附后,将它导入含有 2% ~ 10% H₂SO₄的搅拌池。

该法的特点在于:

(1)高纯度。经过 4 次循环后,回收的 Al() 中只有极少量的 DOC、Cu() 和 Mn(), 并且杂质重金属的含量与原先污泥中含有的重金属含量之间没有显著的关联 [36]。

(2)耐污染。由于不是压力差或电势驱动,因此不会有通过组成膜的流动,即使经过 30 次循环也没有明显的污垢阻塞和膜污染。

(3)高解吸性能。由于膜上的吸附基团是弱酸性的,因此只需 2% ~ 10% 的 H₂SO₄ 即可溶解吸附的 Al³⁺。

(4)快速。Al() 的吸附速率非常快,接近于 PAC 对有机物的吸附速率。

该法的缺点在于:虽然有选择性,却无法浓缩 Al³⁺ 到高浓度。另外,组合膜在商业上目前还无法大量推广。

1.4.3 离子交换膜回收法

为了克服 UF 膜污染和 TCMF 浓缩能力不强的局限性, Sengupta 等在 2003 年又探索了离子交换膜的一步 Donnan 膜过程 (DMP), 见图 10 [3, 37-39]。该法根据 Donnan 原理,假定在平衡时,左边 (LHS) Al³⁺ 的电化学势与右边 (RHS) 的一样, 即 $\bar{\mu}_{Al}^L = \bar{\mu}_{Al}^R$ 。

$$\mu_{Al}^0 + RT \ln a_{Al}^L + zF\phi^L = \mu_{Al}^0 + RT \ln a_{Al}^R + zF\phi^R$$

式中: 0 是标准态, R、L 分别是右边和左边的状态, $\bar{\mu}$ 是电化学势, μ 是化学势, a 是活度, F 是法拉第常数, ϕ 是电势差, z 是电子转移数, 对 Al³⁺ 是 3, 对 H⁺ 是 1。将上式化为:

$$\frac{F(\phi^L - \phi^R)}{RT} = \ln \left[\frac{a_{Al}^R}{a_{Al}^L} \right]^{1/3}$$

同理,对 H⁺ 可得:

$$\frac{F(\phi^L - \phi^R)}{RT} = \ln \left[\frac{a_{H^+}^R}{a_{H^+}^L} \right]$$

用浓度代替活度,得:

$$\left(\frac{C_{Al}^R}{C_{Al}^L} \right) = \left(\frac{C_{H^+}^R}{C_{H^+}^L} \right)^3$$

通过在膜的右边维持高 H⁺ 浓度, Al³⁺ 就可以从 LHS 转移到 RHS 从而实现反浓度差移动。

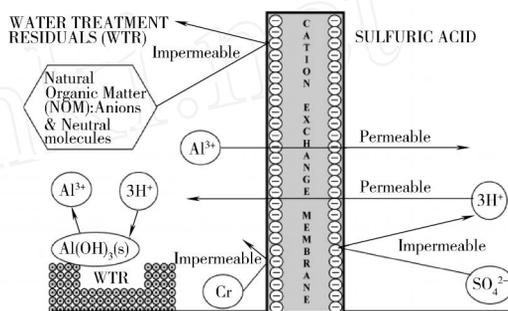


图 10 DMF 回收铝盐原理 [31]

Sengupta 等首先用 DuPont 的 Nafion 117 膜在美国 Pennsylvania 的两个污水处理厂进行了实验 [37], 之后又用均相的 Nafion 117 膜和异相的 Ionac 3470 膜做了对比实验 [31], 通过比较在膜内各个部分的离子的扩散和传输阻力, 认为均相离子交换膜具有更好的回收性能, 如图 11 (a) (b) 所示。

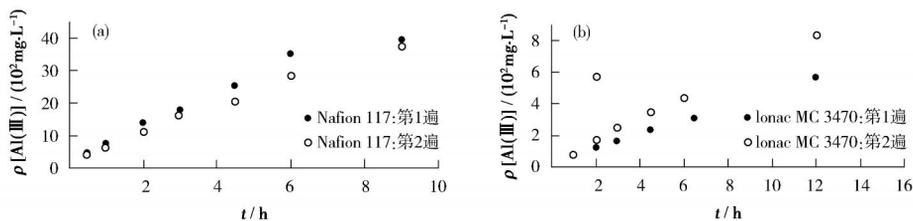


图 11 Al³⁺ 回收曲线 (a) Nafion 117 膜 (b) Ionac 3470 [31]

实验表明该法具有如下特点:

(1)高选择性。该法适用于悬浊固体和自然

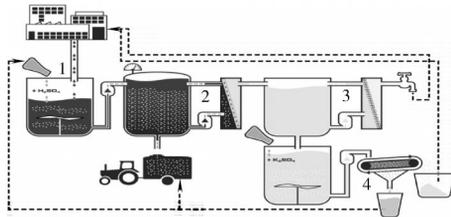
有机物 (NOM) 含量较高的情况下, 并且在这种情况下回收率依然在 70% 以上。

(2)高浓缩度。Al()的浓度在回收的铝盐中比在污泥中高。

(3)耐污染。由于电化学势梯度驱动 Donnan 膜过程,因此污泥的高浊度和高溶解有机碳(DOC)浓度等因素无法影响操作的运行。

1.4.4 REAL™回收法

该法由瑞典的 Feralco 公司设计,根据 Stendahl 等^[40-42]的报道,该法分为以下 4 个步骤,见图 12。



1—酸溶; 2—超滤; 3—纳滤; 4—沉淀。

图 12 REAL™回收示意^[40]

(1)酸溶。H₂SO₄ 溶解 Al(OH)₃, 释放 Al³⁺。溶解 1 g 的 Al 需要 5.4 g H₂SO₄, 污泥被吸入到压力恒定的中压容器。

(2)超滤。悬浊固体和大有有机分子被浓缩在超滤膜,而三价离子例如 Al³⁺ 穿过过滤器。透过的 Al()浓度是与原始污泥相同。但是 COD 有 30% ~ 50% 也透过。当浓缩物达到污泥干重的 15% ~ 20% 时就被排出,开始下一轮。

(3)纳滤。通过纳滤膜使 Al³⁺ 保留,浓度增大。原始污泥含水量 98%,其中 Al 的质量分数为 0.2%,需浓缩。浓缩的程度取决于膜的压力。

(4)进一步沉淀。浓度增大后,在第四步可能沉淀出非常高纯度的复铝盐。该盐在纯化后可以被重复利用作为混凝剂。1 g Al 需要 K₂SO₄ 3.2 g, Al 的量通过纳滤膜的设计密度计算。温度降低,晶体析出,加入 H₂SO₄, 腐殖酸沉降,过滤分离。

2005 年, Stendahl 等在瑞典的 Vasteras 水处理厂进行了中试,测定了如下参数:回收的 K₂SO₄ · Al₂(SO₄)₃ · 24H₂O 中的 TOC 和重金属含量; Al, S, Cu, Zn, COD、DS 的质量平衡; 纳滤膜的水洗循环; 过滤步骤中的流速和温度。

实验结果表明^[40,42], 该法具有如下显著优点:

(1)高纯度。回收的 K₂SO₄ · Al₂(SO₄)₃ · 24H₂O 纯度较高,混凝效果与 PAC 相当。

(2)高回收率。通过 UF 膜的 Al³⁺ 达到 91.5%, 而 NF 膜对 Al³⁺ 的截留几乎是 100% 的。

(3)高浓缩率。NF 膜的主要功能是浓缩,溶液中 Al()质量浓度由酸溶后的 1 847 mg/L 提高到 14 278 mg/L。

(4)经济性好。经过核算,对 Vasteras 这样规模的水处理厂,如果日产质量(干)1.4 t 的污泥,则每年的总成本为 185 800 美元,与普通的处理工艺相差不多。

该法最大的局限性是工艺流程和操作条件复杂,如 UF 的操作温度要求在 120 以上,而 NF 的操作压力达到了 40 × 10⁵ Pa。

2 铝盐回收技术方法特点比较

铝盐回收技术方法特点比较见表 1。

表 1 铝盐回收技术方法特点比较

方法	特点	参考文献
化学溶解法	酸溶法	工艺简单,选择性差,无法回收有机物 [9 - 21]
	碱溶法	一定的选择性,去除大量有机物,成本高 [22 - 23]
离子交换法	液相离子交换萃取法	高回收率,高纯度,经济性,缺乏环境友好性,工艺流程复杂 [24 - 33]
	离子交换树脂法	高纯度,环境友好,无树脂污染低效率,适用范围窄,无法回收有机物 [19]
膜分离法	超滤膜法	操作条件易行,存在膜污染 [34 - 35]
	组合膜法	高纯度,耐污染,高解吸性能,快速,浓缩程度低,膜组件复杂 [21, 36]
	离子交换膜法	高选择性,高浓缩度,耐污染 [3, 37 - 39]
	REAL™法	高纯度,高回收率,高浓缩率,经济性好,工艺流程和操作条件复杂 [40 - 42]

3 结语

铝盐回收技术是一个具有重要科学意义和广泛应用前景的前沿课题。该技术主要包括酸溶法、

碱溶法、离子交换法和膜分离法,涉及多种化学技术和化工工艺。目前限制污泥回用的技术问题主要是重金属和有机污染物的去除以及运行成本。

相应地,对铝盐回收方法的基本评价包括:

- (1) 铝盐回收率和浓缩纯度;
- (2) 回收选择性和纯度;
- (3) 操作复杂程度和工艺成本。

随着我国的环境政策越来越严格,初步的酸溶回收将被逐渐淘汰;碱溶回收首先要克服最大障碍的还是成本问题;而离子交换法由于工艺繁杂和低效,也需要不断的改进。因此,比较有发展前景的将是膜法,特别是组合膜法、离子交换膜法和 REAL™ 法。可以预见,在不久的将来,基于膜法的新技术的不断涌现将是铝盐回收领域的主要特征。

[参考文献]

- [1] 陈军. 水处理絮凝剂的研究进展 [J]. 辽宁化工, 2007, 36 (3): 184 - 186.
- [2] 陈朝阳, 栾兆坤, 张忠国, 等. 总铝浓度对纳米 A_{13} 向 A_{30} 形态转化的影响 [J]. 科学通报, 2005, 50 (14): 1445 - 1449.
- [3] PRAKASH P, HOSKINS D, SENGUPTA A K. Application of homogeneous and heterogeneous cation-exchange membranes in coagulant recovery from water treatment plant residuals using Donnan membrane process [J]. Journal of Membrane Science, 2004, 237 (1 - 2): 131 - 144.
- [4] BABATUNDE A O, ZHAO Y Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2007, 37 (2): 129 - 164.
- [5] 赵亚乾, DAVIS R D. 英国污泥处置现状及其发展概述 [J]. 给水排水, 1998, 24 (9): 28 - 29.
- [6] 普大华, 吴学伟, 李洁. 城市污泥处理处置技术对比 [J]. 中国水运, 2007, 7 (2): 73 - 74.
- [7] 余兰兰, 钟秦. 城市污泥的处置及资源化展望 [J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18 (2): 32 - 34.
- [8] 钟四姣. 污泥资源化利用的研究进展 [J]. 广东化工, 2007, 34 (4): 72 - 75.
- [9] PANSWAD T, CHAMNAN P. Aluminum recovery from industrial aluminum sludge [J]. Water Supply, 1992, 10 (4): 159 - 166.
- [10] 徐美燕, 马燕, 孙贤波, 等. 水厂污泥灼烧化学法铝回收技术 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2006, 32 (11): 1301 - 1305.
- [11] 周恩红, 刘中京, 刘德启, 等. 酸处理化学污泥溶出铝盐影响因素研究 [J]. 中外能源, 2007, 12 (1): 100 - 103.
- [12] FULTON G P. Recover alum to reduce waste-disposal costs [J]. Journal-American Water Works Association, 1974, 66 (5): 312 - 318.
- [13] GOLDMAN M, VARMA M M, WATSON F. Feasibility of alum sludge reclamation [C] // Industrial Waste Conference, Bu-
chart-Hom, 1977, Volume Date, 1976 (31): 367 - 374.
- [14] JMENEZ B, MARTNEZ M, VACA M. Alum recovery and sludge stabilization with sulfuric acid in an APT wastewater treatment plant [J]. Journal of Residuals Science & Technology, 2006, 3 (3): 169 - 176.
- [15] LANG E W. Alum coagulation treatment of kraft in-plant and total mill effluents [C] // Environmental Conference, Cantonment, 1981: 215 - 223.
- [16] 黄圣皓, 陈建隆, 吴志超, 等. 铝盐污泥酸化与混凝剂之回收 [J]. 城镇供水, 2006 (2): 19 - 21.
- [17] RICHARD Y. Sludges from water purification installations applying chemical treatment and experience gained at the ORLY treatment plant [C] // Conference of International Water Conservancy Exhibition, Degrenont, 1975 (6): 1 - 24.
- [18] PETRUZZELL ID, VOLPE A, L MON N, PASSMO R. Coagulants removal and recovery from water clarifier sludge [J]. Water Research, 2000, 34 (7): 2177 - 2182.
- [19] POPE P W, WATERS B D, WARDLE T. Aluminum sulfate recovery in pilot plant [J]. Water Treatment and Examination, 1975, 24 (4): 278 - 296.
- [20] CORNWELL D A, SUSAN J A. Characteristics of acid-treated alum sludges [J]. Journal-American Water Works Association, 1979, 71 (10): 604 - 608.
- [21] SENGUPTA A K, SHIB. Selective alum recovery from clarifier sludge [J]. Journal-American Water Works Association, 1992, 84 (1): 96 - 103.
- [22] MASSCHELEN W J, DEVLEM NCK R, GENOT J. The feasibility of coagulant recycling by alkaline reaction of aluminum hydroxide sludges [J]. Water Research, 1985, 19 (11): 1363 - 1368.
- [23] MATYASIJ, TOTH F, REVESZ L, et al. Method of decreasing the organic substance content of alum earth production cycle performed according to the Bayer technology: United States 4335082 [P]. 1982 - 06 - 15.
- [24] CORNWELL D A. Recovery of aluminum from water treatment plant sludges [C] // International Solvent Exhibition Conference, East Lansing, 1980 (2): 80 - 67.
- [25] WESTERHOF G P, CORNWELL D A. New approach to alum recovery [J]. Journal-American Water Works Association, 1978, 70 (12): 709 - 714.
- [26] CORNWELL D A. An overview of liquid ion exchange with emphasis on alum recovery [J]. Journal-American Water Works Association, 1979, 71 (12): 741 - 744.
- [27] CORNWELL D A, LEMUNYON R M. Feasibility studies on liquid ion exchange for alum recovery from water treatment plant sludges [J]. Journal-American Water Works Association, 1980, 72 (1): 64 - 68.
- [28] PRZYBYLA J, CLNE G C, CORNWELL D A. Quality of products and waste streams produced in the liquid-ion exchange alum recovery process [C] // Journal-American Water Works Association, East Lansing, 1979 (1): 501 - 507.

- [29] CORNWELL D A, CLINE G C. Metals removal from wastewater sludges with liquid-ion exchange [C]//ASCE Environ Eng Div Spec Conference, 1980: 540 - 545.
- [30] CORNWELL D A, WESTERHOFF G P, CLINE G P. Batch feasibility testing of heavy metals removal from wastewater sludges with liquid-ion exchange [C]//Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, 1980(12): 111 - 119.
- [31] CORNWELL D A, CLINE G C, PRZYBYLA J M, et al. Demonstration testing of alum recovery by liquid ion exchange [J]. Journal-American Water Works Association, 1981, 73(6): 326 - 332.
- [32] 徐美燕, 马燕, 孙贤波, 等. 萃取法回收水厂污泥中铝的技术研究 I 清液萃取法 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2007, 33(3): 369 - 374.
- [33] 徐美燕, 孙贤波, 赵庆祥. 萃取法回收水厂污泥中铝的技术研究 II 浆液萃取法 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2007, 33(3): 375 - 378.
- [34] LINDSEY E E, TONGKASAME C. Recovery and reuse of alum from water filtration plant sludge by ultrafiltration [J]. AIChE Symposium Series, 1975, 71(151): 185 - 192.
- [35] LINDSEY E E, SHORTW L. Evaluation of membranes for water pollution control [S]//U. S. NTIS, PB Rep, 1976, (PB - 278353), 61 pp. From: Gov Rep Announce Index (U. S.), 1978, 78(12): 104.
- [36] SENGUPTA A K. Cyclic process for selective coagulant recovery from clarifier sludge: United States 5304309 [P]. 1994 - 04 - 19.
- [37] PRAKASH P, SENGUPTA A K. Selective alum coagulant recovery from water treatment plant residuals using donnan membrane process [J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37(19): 4468 - 4474.
- [38] SENGUPTA A K, CUMBAL L, PRAKASH P. Value added products from innovative applications of donnan membrane principle: two case studies [C]//International Water Conference, 2005(32): 1 - 9.
- [39] SENGUPTA A K, PRAKASH P. Process for selective coagulant recovery from water treatment plant sludge: United States 6495047 [P]. 2002 - 12 - 17.
- [40] STENDAHL K, FARM C, FRITZDORF H, et al. The REAL process—a process for recycling sludge from water works [J]. Water Sci Technol, 2006, 54(5): 235 - 242.
- [41] ULMERT H. Method for treatment of sludge from waterworks and wastewater treatment plants: International, WO/2003/099728 [P]. 2003 - 12 - 04.
- [42] ULMERT H, STENDAHL K. Method for treatment of sludge: International, WO/2005/037714 [P]. 2003 - 04 - 28.
- [43] BOURGEOIS J C, WALSH M E, GAGNON G A. Comparison of process options for treatment of water treatment residual streams [J]. J Environ Eng Sci, 2004(3): 477 - 484.
- [44] 陈静, 许建华. 自来水厂污泥中回收硫酸铝 [J]. 西南给排水, 2004, 26(1): 15 - 18.
- [45] 吴国荣, 王敏. 铝盐混凝剂的特性及其在水处理中的应用 [J]. 江西科学, 2003, 21(1): 67 - 70.
- [46] 姜应和, 张发根. 化学污泥中铝盐混凝剂的回用 [J]. 环境科学与技术, 2003, 26(1): 38 - 39.
- [47] 沈东旭. 离子交换树脂法和膜分离法回收铝污泥中的铝以及纳米 Al_2O_3 电催化降解有机污染物 [D]. 南京: 南京大学, 2007: 5.
- [48] 刘家祺. 分离过程与技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- [49] SOVEREIGN PUBLICATIONS [EB/OL]. (2008 - 05 - 05) [2008 - 07 - 01]. <http://www.sovereign-publications.com/membratec.htm>.

本栏目责任编辑 李文峻

· 简讯 ·

《噪声自动监测系统与应用研究》项目阶段工作会议在南京召开

为推进国家环保公益性行业科研专项经费项目深入开展, 中国环境监测总站于 2009 年 2 月 27—28 日在南京召开《噪声自动监测系统与应用研究》项目阶段工作会议。北京市环境保护监测中心、天津市环境监测中心、乌鲁木齐市环境监测中心站、哈尔滨市环境监测中心站、南京市环境监测中心站等项目协作单位主要领导和课题组成员参加了会议, 特邀江苏省环境监测中心列席会议。

《噪声自动监测系统与应用研究》项目属于国家环保公益性行业科研专项经费项目, 主要研究内容包括: 开展噪声自动监测适用范围, 噪声自动监测系统的性能, 噪声自动监测数据处理、分析和监测结果评价方法研究。通过研究, 为我国噪声自动监测提供技术支持, 推进我国声环境质量监测及其他噪声监测自动化进程。

会议由项目负责人、中国环境监测总站物理室刘砚华主任主持, 会上各单位汇报了研究工作的进展情况和取得的阶段成果, 讨论了下一步的研究方向和重点。刘砚华主任总结了前阶段工作情况并客观地指出存在的问题, 要求项目各参加单位明确研究的方向和目的, 尽快完成《噪声自动监测技术规范》等技术文件的编制。

杨光