

# 氟化钙污泥处置及资源化利用

何源<sup>1</sup>, 黄瑛<sup>1\*</sup>, 王瑞慧<sup>2</sup>, 洪锋<sup>1</sup>

(1. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京市环境监测中心站, 江苏 南京 210013)

**摘要:** 综述了现有的氟化钙污泥处理处置技术, 包括浮选富集回用氟化钙, 熔融焚烧实现减量化, 应用于陶瓷、水泥、混凝土制作, 以及利用其化学性质, 作为添加剂用于飞灰的固化稳定, 或者在钢铁行业中充当萤石成为助熔剂。理论分析和试验检测表明上述方法均可实现含氟污泥的减量化、无害化、资源化, 在处理氟化钙污泥时可以根据实际情况选择相应的工艺技术。

**关键词:** 氟化钙污泥; 处置; 资源化利用

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1006-2009(2014)02-0012-05

## Disposal and Utilization of Calcium Fluoride Sludge

HE Yuan<sup>1</sup>, HUANG Ying<sup>1\*</sup>, WANG Rui-hui<sup>2</sup>, HONG Feng<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Nanjing Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

**Abstract:** A review concerning the existing approaches to treat, recycle and utilize calcium fluoride sludge is given in this paper, including floatation to recycle CaF<sub>2</sub>, melting with waterworks sludge, recycling as additive in cement, concrete, porcelain and solidification-stabilization of fly ash, and acting as fluorite in steel-making. All these methods in this paper are feasible in theory and practice, providing a reference to the treatment and proposal of fluoride contaminated sludge.

**Key words:** Calcium fluoride sludge; Disposal; Resource utilization

氟化钙污泥主要来源于无机和有机氟化工生产企业、触摸屏和液晶屏等特种玻璃生产企业及光伏企业。这些企业在处理单晶硅片、电池片、组件、发电系统等产品的过程中, 排放出大量含氟废水, 其中主要污染物是氟离子和悬浮物。废水处理主要采用化学沉淀/混凝处理的方法, 一般先中和后加入氯化钙或氧化钙形成沉淀, 也有先用碳酸钙中和后用絮凝剂沉淀, 产生的污泥中大部分是氯化钙、二氧化硅和碳酸钙等<sup>[1-2]</sup>。

不同氟化工产生的污泥含水率不同, 一般无机氟化工产生的污泥含水率为35%~60%, 而有机氟化工产生的污泥黏性较大, 杂质较多, 更难压滤<sup>[1]</sup>, 其含水率为46%~65%。在两种氟化工所产生的污泥中, 氟化钙成分均占60%以上, 其次为碳酸钙, 以及一些无机颗粒和沉淀时包裹下来的有机物等杂质<sup>[1]</sup>。

氟化钙具有低毒性, 极易被植物吸收, 直接填埋对土壤有害, 进而对作物生长和人类健康构成威胁。氟化钙微溶于水, 处置不当会引起地表水中氟化物浓度增加, 造成地下水含氟量超标<sup>[1]</sup>。《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)规定, 饮用水中氟化物限值为1.0 mg/L。因此, 对于氟化钙污泥的处理处置至关重要。日本对于氟化钙污泥的处理处置技术主要集中在氟化钙的回收制萤石, 以

收稿日期: 2013-10-15; 修订日期: 2014-02-14

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NCET-09-0288); 江苏省科技厅社会发展基金资助项目(BE2012738); 南京市住房和城乡建设委员会科研基金资助项目(201006); 南京市科委青奥基金资助项目(201205045); 南京市环境保护局科研基金资助项目(201006)

作者简介: 何源(1989-), 女, 江苏南京人, 在读研究生, 研究方向为污泥处理处置。

\* 通讯作者: 黄瑛 E-mail: heyuan\_hz@gmail.com

及在水泥和混凝土工业生产中的利用等方面<sup>[3-5]</sup>, 我国和其他国家还将氟化钙污泥用于陶瓷烧结及钢铁冶炼等行业。

### 1 与城市生活污水污泥共熔处理

自1990年以来,在减少污泥数量及污泥再利用方面,熔融技术得到了广泛关注<sup>[6-8]</sup>。城市污水污泥与氟化钙污泥共熔不仅可以降低污泥数量,还可以防止作为工业废弃物的氟化钙污泥造成的相关环境问题<sup>[8]</sup>。

参考日本对下水道污泥熔融处理的工艺及铸铁炉熔铁技术原理<sup>[9-10]</sup>,氟化钙污泥与城市生活污水污泥共熔工艺流程为:将两种污泥泥饼混合后,利用干燥机将泥饼干燥至含水率 $\leq 50\%$ ,干燥后的泥饼与焦炭一同进入熔融炉,产生的炉渣冷却后备后续资源化利用。

已有研究<sup>[11-13]</sup>表明,适当调整城市污水污泥的碱度,以适应烧结或熔融,可以使熔融温度相对较低。Hsiung等<sup>[8]</sup>以氟化钙污泥与城市污水污泥共熔系统为研究对象,探讨了在共熔系统中加入碱性添加剂,以降低系统温度的可行性。氟化钙污泥和城市污水污泥的单独熔融温度分别为 $1\ 378\ ^\circ\text{C}$ 和 $1\ 518\ ^\circ\text{C}$ ,当二者按4:6的比例(质量比)混合时,熔融温度降低至 $1\ 193\ ^\circ\text{C}$ ,碱度为0.82[按 $m(\text{CaO}):m(\text{SiO}_2)$ 计]。在混合泥样中分别添加碳酸钙和碳酸钾,浇铸温度明显下降。试验结果表明,当添加剂的质量分数为2%时,可以在降低熔融温度的同时,减少能耗和运行费用,产生较好的经济效益。

### 2 浮选富集含氟污泥中氟化钙回用

浮选工艺是在固体废物与水形成的悬浮乳液中加入浮选剂,由于物料表面性质存在差异,因而一部分可浮性好的颗粒与水中的微气泡产生吸附,形成密度小于水的气体浮上液面,达到分离物料的目的<sup>[14]</sup>。

分析含氟污泥的颗粒粒级可以发现,污泥的粒级80%以上分布在符合浮选条件的范围内。因此,可对含氟污泥进行集中再浮洗<sup>[1]</sup>。参考已成熟的萤石矿浮选工艺<sup>[2,15-16]</sup>,可以采用一次粗选+多次精选的浮选工艺。常见的捕获剂可选用油酸,同时考虑到浮选对象中可能存在的钙、镁、铁离子,可以选择酸性水玻璃作为诱导剂,降低对浮选

的不利影响。已有试验证明,在酸性环境下浮选指标明显优于中性和碱性。浮选后的精泥中氟化钙质量分数达到90%,可回用到无机或有机氟化工生产中<sup>[1]</sup>。

浮选工艺流程见图1。

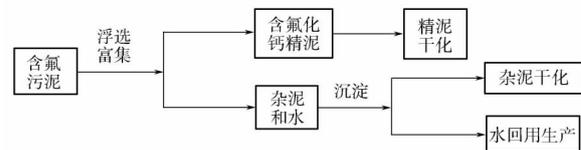


图1 浮选工艺流程

Fig. 1 The flow chart of flotation process

由于油酸凝固点高,难以分散,因而浮选环境温度必须保持在 $30\ ^\circ\text{C}$ 以上才能正常生产<sup>[15]</sup>,给浮选工艺带来了局限性。浮选工艺在生产高精度氟化钙精泥的同时,也会产生含有金属离子及二氧化硅的杂泥和污水,给环境带来二次污染。因此,开发常温下适用的捕获剂,以及完善对杂泥和污水的处理技术,是优化氟化钙浮选富集工艺的关键。

### 3 在陶瓷烧结中再利用

韩嘉智<sup>[17]</sup>提供了利用氟化钙污泥代替部分原材料制作陶瓷的工艺流程:将氟化钙无机污泥在 $150\ ^\circ\text{C}$ 低温干燥,利用干式粉碎法将污泥粉碎成粒径 $< 60\ \mu\text{m}$ 的氟化钙干粉,与矿化剂(如碳酸钙)和粘结剂干式混合后,造粒陈化制成A土料;同时,氧化铝、二氧化硅含量高的矿物(长石、高岭土、石英和黏土)造粒陈化后得到基本土料;将两种土料与粘结剂一起压挤成型后,经高温液相烧结得到最终产品。当污泥添加质量分数在30%以内时,对最终产品的影响不大,制成的陶瓷体抗折强度可达 $3.2 \times 10^6\ \text{N/m}^2$ ,吸水率 $< 1.0\%$ ,耐酸碱碱性佳<sup>[17]</sup>。

氟化钙熔点为 $1\ 414\ ^\circ\text{C}$ ,即使经过 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 高温烧结,仍然保持矿物相结构的稳定性,属于安定性物质。通过单独污泥烧结反应得知,当未添加任何矿物催化剂(矿化剂)时,烧结效果不理想;当添加矿化剂(如碳酸钙)后,发生明显的降低高温矿物相反应现象;若添加适量高铝含量物质(如氧化铝)则可以有效控制烧成陶瓷体的体积变异性,有助于资源化产品的稳定性<sup>[17]</sup>。

在氟化钙污泥资源化过程中,应注意产品的氟

浸出率不得超过规定限值。因此,必须将氟离子有效地固结在产品中,防止对环境 and 人类造成危害。含氟化钙的无机污泥在常温下无法与碱性物质反应,当采取一般方式常温固化时,无法控制氟离子溶于水中,这将造成水的污染。当污泥与其他无机性矿物质以高温液相共同烧制时,污泥中的氟离子将取代玻璃相中二氧化硅的氧离子,而形成另一更高能阶的安定性矿物结晶,可有效防止氟化钙污泥中的氟离子再次溶出而污染水源<sup>[17]</sup>。

氟化钙污泥烧制的瓷砖经耐酸、耐碱试验,产品表面无任何外观变化,具有较好的稳定性,而毒物浸出试验结果中相关重金属离子的含量远低于 EPA 相关法规限值,且氟离子浸出量也远低于限值<sup>[17]</sup>。因此,以高温液相烧制的方法处置氟化钙污泥,既具有安全性,又符合资源回收再利用的原则。

#### 4 在水泥生产中再利用

利用水泥窑处理处置污水厂污泥,不仅可以达到资源化的目的,还可以将污泥中的有毒有害物质中和吸收或固结在水泥中,降低对环境的危害。日本秩父小野田公司利用城市垃圾焚烧炉灰渣和下水道污泥等作为原料生产生态水泥;上海市建委专门立项研究利用水泥窑处理污水厂污泥,并替代部分水泥原料生产出质量达标的生态水泥,使水泥工业成为综合利废、保护环境的绿色工业<sup>[18]</sup>。

水泥厂生产水泥所需要的原料包括石灰石、黏土、砂、铁渣及石膏,前 4 者为生料制备,石膏则为熟料送入水泥粉磨时所需添加的掺料。氟化钙污泥中的钙为水泥所需成分,经适当处理可提供给水泥厂,取代部分原料<sup>[19]</sup>。

利用氟化钙污泥制备水泥的工艺流程见图 2<sup>[20-21]</sup>。

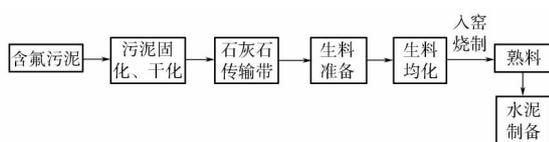


图 2 氟化钙污泥制备水泥的工艺流程

Fig. 2 The flow chart of producing cement using calcium fluoride sludge

污泥干化可以利用水泥窑的余热尾气,使用圆

盘干燥机,使污泥含水率降至  $\leq 30\%$ <sup>[20]</sup>。固化可通过添加稳定剂和固化剂,经过机械搅拌使污泥和药剂混合均匀<sup>[19]</sup>。在生料准备阶段,将氟化钙污泥与其他原料一起混合粉磨,污泥中的氟化钙可替代部分萤石<sup>[20-21]</sup>。制备好的生料进入回转窑煅烧,温度一般为  $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[21]</sup>。在制备氟铝酸盐水泥时,可以添加少量(质量分数  $\leq 5\%$ )的氟化钙污泥替代石膏<sup>[21]</sup>。

日本太平洋水泥公司 2009 年度成果报告书指出,在水泥生产过程中,矿化剂在大多数情况下为氟化钙或氟化钙与硫酸钙组合。综合考察所有含矿化剂成分的工业废弃物发现,氟化钙污泥在经济及利用效率上最优<sup>[5]</sup>。

已有研究表明,该工艺技术在日本水泥生产行业得到了实际应用。为了保证水泥性能不受影响,添加到生产中的氟化钙污泥极其有限,质量分数应  $\leq 5\%$ 。虽然有此限值,但由于多数水泥厂的产量很大,因而利用该方法可以快速消耗并资源化氟化钙污泥。需要注意的是,应对工艺中产生的烟气监测并合理处理,同时应确认成品水泥中的氟浸出量不超过环保限值。

#### 5 在混凝土制造中再利用

混凝土是由水泥、粗、细骨料、水和外加剂按适当比例拌和配制而成的具有所需形态、强度和耐久性的人造石材。大量文献<sup>[22-31]</sup>表明,固体废弃材料(如飞灰、底灰、高炉矿渣、铸造废砂、工业污泥、建筑固废、尾矿砂、废石膏)可被应用于混凝土制造。污泥可被用来替代混凝土生产中所需的部分天然骨料,这种处置方法不仅保护了天然资源,同时使得固体废弃材料被合理再利用,减轻了给环境带来的危害和负担。

Rao 等<sup>[32]</sup>以含氟污泥为研究对象,探讨了其在高密度混凝土试块制备中的应用。将含氟污泥作为部分精细骨料的替代物,以不同的质量分数(1.5%~9%)掺入混凝土中,并对制作出的含污泥的混凝土试样进行抗压强度和毒性浸出试验。抗压强度试验表明,所有试样的抗压强度都远超过承重试件的强度要求(4 MPa~5 MPa);扫描电子显微镜照片显示,由于污泥中所含的颗粒比河砂颗粒粗,且该颗粒有明显的棱角,而河砂颗粒比较圆滑,因而细河砂会填满粗污泥颗粒之间的空隙;当污泥质量分数为 3% 时,试样的干密度最大,抗压

强度也达到最大值。毒性浸出试验表明,所有试样的氟浸出量都远低于最大允许值(2 mg/L)。因此,在密实混凝土块制造过程中,用含氟污泥替代部分河砂作为骨料,可以将氟离子很好地固结在试块材料中。

除了氟浸出量不能超标外,还需考察其他有害成分的溶出量。日本岩手县工业技术中心针对氟化钙污泥用作混凝土添加剂开展研究<sup>[33]</sup>,溶出试验结果表明,有害成分氟、硼、汞、六价铬、镉、铅、砷、硒的溶出量均低于允许值。研究人员将试块埋在干净土壤下20 cm处,模拟混凝土在实际使用环境中有害成分的溶出情况。在埋设2周、2个月及5个月后,埋设物周围土壤中均未监测出有害物质溶出。由此可以认为,该混凝土在实际使用环境中,有害成分溶出的可能性很低。

## 6 用于固化稳定飞灰

固化是国内外较先进的固体废弃物焚烧飞灰处理技术,具有无害化彻底、减容减量程度高、产品性能稳定并可资源化再利用等优点<sup>[34]</sup>。

Kim等<sup>[35]</sup>提出用氟化钙污泥作为添加剂,用于固化稳定飞灰。分别采用普通水泥或白水泥与氟化钙污泥组合成的添加剂,将飞灰、添加剂和水加入搅拌机中搅拌3 min~4 min,混合后倒入直径10 cm、高10 cm的模具中,在温度20℃~23℃、湿度80%~90%的环境下固化28 d。按 $m(\text{飞灰}):m(\text{白水泥}):m(\text{氟化钙污泥})=16:1:3$ 固化稳定,得出的材料试样抗压强度达280 kN/m<sup>2</sup>,重金属和氟离子浸出量也远低于允许排放值。

将氟化钙污泥作为添加剂用于飞灰的固化稳定,不仅降低了固化成本,同时有助于将有害污泥转化为对环境有利的材料。然而在固化工艺中,氟化钙污泥的用量不多,且固化所需的条件严格,周期较长,不适宜快速解决氟化钙污泥产量大的问题。

## 7 应用于钢铁行业

钢材中含硫会影响其品质,在炼制过程中必须进行铁水脱硫,其主要原理是利用石灰脱硫,反应过程如下:



式中生成物二氧化硅由于分子间的化学键作用,熔点较高,在熔炼温度范围内流动性很差<sup>[19]</sup>。而萤石(主要成分为氟化钙)的低熔点决定其可以在炼钢过程中作为一种很好的助熔剂,用来打破二氧化硅的网状结构,协助石灰溶入渣中,成为分子键较小的硅酸盐类,从而提高渣的流动性<sup>[19]</sup>。

由此可知,氟化钙应用在钢铁工业生产中,可有效降低冶炼温度,节省能耗。钢铁冶炼工业对萤石中的氟化钙含量要求比氟化工生产低,因而氟化钙污泥可替代萤石粉剂应用于钢铁生产<sup>[1]</sup>。由于污泥的来源和品质不一,氟化钙污泥应先经过适当的前处理,满足成为助熔剂的条件。可将污泥先均质化,作烧结处理,除去水分,形成具有一定强度的块状,再经过破碎、造粒和筛分,达到使用标准,脱硫后,氟则以多重化合物的形态存在于脱硫渣中<sup>[19]</sup>。

上述处理处置工艺虽然可以大量减少氟化钙污泥,但是依然存在一定的问题,如脱硫后含氟脱硫渣的处置,以及污泥研磨成粒状以备脱硫使用前的防潮措施。此外,采用氟化钙污泥虽然可以降低钢铁冶炼温度,但是前处理烧结过程所需的能量使得整个工艺的能量消耗又有所回升。

## 8 结语

随着电子及化学工业的发展,氟化钙污泥作为含氟废水处理后的产物亟待被合理有效地处理处置。氟化钙污泥因其本身的物理化学特性,可用于陶瓷、水泥、混凝土等砖块材料的制作和炼铁过程中的脱硫,以及浮选回用污泥中的氟化钙,或者将其与生活污泥共熔,以达到减量化<sup>[36-37]</sup>。通过对上述应用途径的分析表明,这些技术具有科学的理论依据,并存在成功的案例,能够实现含氟污泥的减量化、无害化、资源化,然而在不同程度上还存在一定的限制,使得各种工艺不能完全地发挥作用。因此,在处理氟化钙污泥的工艺技术选择上,应根据实际情况决定。

### [参考文献]

- [1] 王方园, 蒋正海. 含氟特种污泥理化特性分析及资源化利用研究[J]. 金华职业技术学院学报, 2006, 6(1): 13-14, 24.
- [2] 周维志. 从佛冈萤石矿中浮选超级萤石精矿的研究[J]. 矿产综合利用, 1986(2): 7-15.
- [3] 富士通. グリーンファクトリーを推進する三重工場の取り組み: 排水に含まれるフッ素を回収、有価物の萤石に転換

- して汚泥を30%削減[EB/OL]. Japan: do eco! 環境レポート 2008 [2013-10-12]. <http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jed/brochures/find/26-3j/34.pdf>.
- [4] 三菱マテリアル. CSR 報告書[R/OL]. [2013-10-12]. <http://www.mmc.co.jp/corporate/ja/03/06/report/pdf/csr2012.pdf>.
- [5] 太平洋セメント(株). セメントクリンカ低温焼成技術の事前研究: Japan, P09015 [R/OL]. (2010-09-03) [2013-10-12]. [http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai\\_201009/20100000001027.html](http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201009/20100000001027.html).
- [6] OHSHIMA Y, MASUTA T. Sludge melting[J]. *Water Science and Technology*, 1991, 23(7): 68-71.
- [7] OKU S, KASAI T, TAKEDA N. Melting system for sewage sludge[J]. *Water Science and Technology*, 1990, 22(12): 319-327.
- [8] HSIUNG J S, HUANG Y C, LI K C, et al. Study on the influence of additives in an industrial calcium fluoride and waterworks sludge co-melting system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 84(4): 384-389.
- [9] 王玉玺. 下水道污泥熔融处理工艺[J]. *天津煤气*, 1991(1): 11-13, 17.
- [10] 谭铁鹏. 日本的下水污泥熔融处理及炉灰的建材资源化[J]. *环境科技(辽宁)*, 1996, 16(1): 87-92.
- [11] HUANG Y C, LI K C, CHIANG H H. Recovering industrial sludge-derived slag as fine aggregate[J]. *Journal of Environmental Science and Health (Part A)*, 2005, 40(1): 193-202.
- [12] HUANG C, PAN J R, LIU Y. Mixing water treatment residual with excavation waste soil in brick and artificial aggregate making[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(2): 272-277.
- [13] MURAKAMI T, ISHIDA T, SASABE K, et al. Characteristics of melting process for sewage sludge[J]. *Water Science and Technology*, 1991, 23(10/12): 2019-2028.
- [14] 蒋建国. 固体废物处置与资源化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [15] 杨金林, 张红梅, 姚燕燕, 等. 常温浮选萤石研究[J]. *化工矿物与加工*, 2005, 34(8): 5-7.
- [16] 徐靖, 张一敏, 宋翔宇. 河南某萤石矿选矿工艺研究[C]//中国冶金矿山企业协会. 中国选矿学术高峰论坛论文集. 乌鲁木齐: 中国冶金矿山企业协会, 2011.
- [17] 韩嘉智. 陶瓷烧结技术应用于氟化钙污泥资源化再利用[J]. *台湾环保产业*, 2003(22): 4-8.
- [18] 施惠生. 利用水泥窑处理污水厂污泥的应用研究[J]. *水泥*, 2002(7): 8-10.
- [19] 关家伦, 郝智和, 林岩. 半导体业氟化钙污泥资源化途径探讨[J]. *减废咨询*, 2002(41): 3-6.
- [20] 郑慧. 一种在水泥窑中协同处理含氟污泥的方法: 中国, 102531429 [P]. 2012-07-04.
- [21] 黄靖宇. 一种含氟污泥制备氟铝酸盐水泥的方法: 中国, 102795795 [P]. 2012-11-28.
- [22] AHMADI B, AL-KHAJA W. Utilization of paper waste sludge in the building construction industry [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2001, 32(2): 105-113.
- [23] TAY J H, HONG S Y, SHOW K Y. Reuse of industrial sludge as pelletized aggregate for concrete [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2000, 126(3): 279-287.
- [24] BAI Y, BASHEER P A M. Influence of furnace bottom ash on properties of concrete [J]. *Structures and Buildings*, 2003, 156(1): 85-92.
- [25] PENPOLCHAROEN M. Utilization of secondary lead slag as construction material [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): 1050-1055.
- [26] ANN K Y, MOON H Y, KIM Y B, et al. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials [J]. *Waste Management*, 2008, 28(6): 993-999.
- [27] BATAYNEH M, MARIE I, ASI I. Use of selected waste materials in concrete mixes [J]. *Waste Management*, 2007, 27(12): 1870-1876.
- [28] ISMAIL Z Z, EL-HASHMI E A. Reuse of waste iron as a partial replacement of sand in concrete [J]. *Waste Management*, 2008, 28(11): 2048-2053.
- [29] PAPPU A, SAXENA M, ASOLEKAR S R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials [J]. *Buildings and Environment*, 2007, 42(6): 2311-2320.
- [30] POON C S, CHAN D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2007, 50(3): 293-305.
- [31] SINGHAL A, PRAKASH S, TEWARI V K. Trials on sludge of lime treated spent liquor of pickling unit for use in the cement concrete and its leaching characteristics [J]. *Buildings and Environment*, 2007, 42(1): 196-202.
- [32] RAO S M, VENKATARAMA-REDDY B V, LAKSHMIKANTH S, et al. Re-use of fluoride contaminated bone char sludge in concrete [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 166(2-3): 751-756.
- [33] 佐々木 秀幸, 平野 高広, 藤原 智徳, 等. フッ化カルシウム汚泥のコンクリート用増粘剤への利用: 岩手県工業技術センター研究報告第12号 [R]. 日本: 岩手県工業技術センター, 2005.
- [34] NISHIDA K, NAGAYOSHI Y, OTA H, et al. Melting and stone production using MSW incinerated ash [J]. *Waste Management*, 2001, 21(5): 443-449.
- [35] KIM Y J, QURESHI T I. Recycling of calcium fluoride sludge as additive in the solidification-stabilization of fly ash [J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2006, 5(5): 377-381.
- [36] 王瑞慧, 宋永忠, 任兰, 等. 南京市污水处理厂污泥处理处置现状 [J]. *环境监测管理和技术*, 2010, 22(4): 4-6.
- [37] 余兰兰, 钟秦. 城市污泥的处置及资源化展望 [J]. *环境监测管理和技术*, 2006, 18(2): 32-34.

本栏目责任编辑 姚朝英