

文章编号: 1007-4627(2013)01-0072-07

## 电子束辐照技术在剩余污泥处理中的应用

孙永亮<sup>1,2,3</sup>, 李欣<sup>3</sup>, 王洁<sup>4</sup>, 王菊芳<sup>3</sup>, 李文建<sup>3</sup>, 王弋博<sup>1,2</sup>

(1. 兰州交通大学化学与生物工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 天水师范学院生命科学与化学学院, 甘肃 天水 741001;

3. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

4. 山西大学生命科学学院, 山西 太原 030006)

**摘要:** 电子束辐照技术在剩余污泥处理应用中具有巨大潜能。大量研究表明, 经高能电子束辐照, 污泥中的各种病原菌会有不同程度的死亡、有机物(包括非生物降解物质)大量分解、脱水率提高, 臭味减少, 危害性降低和资源化应用潜能增加。综述了电子束辐照技术在剩余污泥处理中的优势, 重点介绍该技术的应用现状、污泥中污染物的去除机理、处理效果和相关建设费用, 并展望了该高新技术的应用前景和发展方向。

**关键词:** 电子束; 辐照; 污泥

**中图分类号:** Q691.5   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.072

### 1 概述

污泥是在污水处理过程中土壤颗粒、固体残渣及絮状体经过一系列处理而产生的沉淀物。随着社会发展, 城市工业废水和生活污水的排放量和处理量不断逐年增加, 剩余污泥的产量也随之提升。初步统计, 2008年全国产生的剩余污泥量已达 $1.78 \times 10^7$  t。未经处理的剩余污泥中含有大量病原菌(主要是寄生虫、细菌和病毒)、有机物以及N、P和K等营养元素, 直接排放不仅对生态和人体健康存在极大的潜在危险性, 也是一种资源浪费<sup>[1-2]</sup>。目前, 剩余污泥的处理和排放是一项棘手的环境问题, 在污水处理费用中占了很大比例。有氧或厌氧消解、堆肥及高温处理等传统方法可以杀灭大量的病原菌, 但不能充分杀死寄生虫虫卵和微生物孢子, 也不能有效去除污泥中一些非生物降解的有毒有害有机物<sup>[2-5]</sup>。因此迫切地需要一种相对清洁、高效、简便同时无二次污染的剩余污泥处理技术。

20世纪50年代辐照技术开始应用于污水、污泥及其它固体污染物的处理, 70至80年代, 德国、美

国、日本、印度和意大利等都对辐照技术有较多研究, 也开展了相应工程应用, 具体数据见表1<sup>[2, 6-8]</sup>; 国内也进行了辐照处理的研究应用, 但大部分都停留在实验室阶段, 实际应用较少, 规模较小, 具体数据见表2。经过许多国家的研究和实际应用发现, 采用辐照处理污泥有以下优点<sup>[7]</sup>: (1)病原菌杀灭率远远高于传统方法; (2)降解部分有毒有机污染物或提高非生物降解物的生化利用性, 降低有毒污染物在污泥中的含量; (3)减少污泥处理过程中的恶臭气味; (4)增强污泥的一些特性和生物降解率; (5)操作简便, 处理效率高, 处理后的污泥安全性较好。

目前, 常用的剩余污泥处理辐照源有两种:  $\gamma$ 射线和电子束。 $\gamma$ 射线来自于 $^{60}\text{Co}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 两种放射源材料。两种源材料产生的 $\gamma$ 射线性质相似,  $^{60}\text{Co}$ 产生的 $\gamma$ 射线(1.3 MeV)在水中半穿透厚度(The half-value thickness)约为28 cm, 普通剩余污泥中约为25 cm;  $^{137}\text{Cs}$ 产生的 $\gamma$ 射线在水中可达24 cm<sup>[8]</sup>。 $^{60}\text{Co}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 必须进行严格的放射源控制(尤其是 $^{137}\text{Cs}$ 源), 同时运用中要注意 $^{60}\text{Co}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的半衰期, 尤其是 $^{60}\text{Co}$ 的

收稿日期: 2012-03-30   修改日期: 2012-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41161058, 31060065); 甘肃省自然科学基金资助项目(1107RJZE117)

作者简介: 孙永亮(1987-), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 从事微生物诱变育种及机理研究; E-mail: syl43234@163.com

通信作者: 王弋博, E-mail: wangyb02@126.com; 李欣, E-mail: lexll920@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>

表 1 国外辐照技术处理污泥概况\*

国家和地区	辐照源	辐照剂量/kGy	处理量	建设年代	参考文献
德国	$^{60}\text{Co}$ & $^{137}\text{Cs}$	3	-	1973	[2]
德国	电子束	4	500 m <sup>3</sup> /d	1980	[2]
新墨西哥州(美国)	$^{137}\text{Cs}$	10	8 t/d	1978	[2, 6]
波士顿(美国)	电子束	4	15.8 m <sup>3</sup> /h	1976	[6]
迈阿密(美国)	电子束	3.5~4	645 m <sup>3</sup> /d	1984	[6 - 7]
日本	电子束	5	300 kg/h	1987	[7]
印度	$^{60}\text{Co}$	3~3.5	110 m <sup>3</sup> /d	-	[8]

\* - 表示文中未提及。

表 2 国内辐照技术处理污泥研究概况\*

研究单位	辐照源	研究内容	参考文献
北京环境保护研究所	-	污泥中微生物杀灭情况	[2]
南京大学	$^{60}\text{Co}$	污泥辐照处理及农用情况	[9]
中国科学院近代物理研究所	电子束	微生物杀灭情况	[10]

\* - 表示文中未提及。

半衰期只有 5.26 a ( $^{137}\text{Cs}$  半衰期为 20 a), 因此经过一定时间就需要换取或添加辐射源材料, 以保证源的辐射强度, 操作复杂并且危险。相比  $\gamma$  射线的穿透力, 电子束相对较弱, 水中半穿透厚度只有 3 mm/MeV, 但其辐射密度和处理量大, 并且可以随时开关并进行调整<sup>[11]</sup>。因此高能电子束辐照污泥作为一种污泥处理的高新技术, 发展势头迅猛, 比  $\gamma$  射线更适合实际应用, 也不用担心辐射污染。本文重点介绍电子束在剩余污泥辐照方面的应用研究和前景。

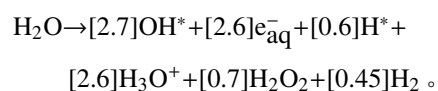
## 2 电子加速器简介

作为辐照源的高能电子束由电子加速器产生, 其按能量强度一般分为 3 类: 低能加速器(0.15~0.5 MeV)、中能加速器(0.5~5.0 MeV)和高能加速器(5.0~10.0 MeV)<sup>[12]</sup>。

由于技术限制, 早期电子加速器最大有效功率较低, 一般在 10 kW 左右。随着技术进步, 加拿大原子能公司(AECL)设计的加速器最大有效功率可达 50 kW, 升级后可以达到 150 kW; 由比利时一家公司设计的加速器最大有效功率可以达到 200 kW<sup>[13]</sup>。随着加速器功率不断提高, 剩余污泥的处理效果也随之提升, 但是随着能量提高所产生的费用也会增长, 因此应根据不同需要选择电子加速器。为达到最佳处理效果, 污泥处理过程一般采用高能电子束作为辐照源。

## 3 辐照处理污泥机理

经过高能电子束辐照, 剩余污泥的生物及理化特性会发生相应变化, 如病原菌数量急剧下降、有毒化学物质浓度降低(非生物降解物转变为可生物降解物)及污泥脱水效果提高等。电子束辐照引起污泥特性变化的作用大致分为两类: 直接作用和间接作用。直接作用主要是针对病原菌, 辐照射线直接作用于病原菌的遗传物质(如 DNA 和 RNA), 导致病原菌死亡。而间接作用致使病原菌死亡的同时也分解污泥中的有机物, 其过程主要是由电子束作用于污泥中  $\text{H}_2\text{O}$  分子以产生自由基, 自由基通过与微生物和有机物反应导致微生物死亡和有机物分解。经过电子束辐照后水分子会发生以下化学反应<sup>[14]</sup>:



$\text{H}_2\text{O}$  分子在吸收 100 eV 的能量时会产生  $[2.7]\text{OH}^{\cdot}$ ,  $[2.6]\text{e}_{\text{aq}}^{-}$ ,  $[0.6]\text{H}^{\cdot}$ ,  $[2.6]\text{H}_3\text{O}^{\cdot}$ ,  $[0.7]\text{H}_2\text{O}_2$  和  $[0.45]\text{H}_2$ 。间接作用反应时间很快, 在  $10^{-7}$  s 左右, 生成的高氧化性物质可以与病原菌的 DNA 和 RNA 以及一些关键酶发生反应, 导致病原菌失活, 同时也会造成污泥中有机污染物的结构遭到破坏, 从而转变为无毒物质或生物可降解物质。在污泥处理过程中, 间接作用比直接作用影响要大<sup>[15-16]</sup>。辐照后, 污泥的脱水效果提

高, 而 COD 变化和恶臭味减少等效果则主要是由于污泥中大量病原菌死亡和各种物质的转化分解所致。

## 4 电子束处理剩余污泥

剩余污泥处理的主要目的是降低污泥中原有污染物含量及含水量等<sup>[17]</sup>, 使之达到相应的无害化处理标准。剩余污泥在未经处理之前含有高浓度的细菌、病毒和寄生虫等。由于地域不同, 污泥中的病原菌种类也有一定差别, 欧洲国家中沙门氏菌危害最大, 而在一些发展中国家寄生虫则是主要的病原菌<sup>[18]</sup>。

传统的生物和化学处理方法在杀菌方面可以达到一定效果, 但是污泥中的部分有机质和一些有毒污染物却不能得到较好分解, 尤其是对于一些非生物降解物质。堆肥、高温处理, 有氧或厌氧消解过程中还会不断有臭气排出, 影响周围环境, 并且对污泥中氮源破坏较大, 导致污泥肥力下降, 影响污泥的后续资源化利用。采用高能电子束辐照处理后的污泥不仅病原菌数目可以达到相应标准, 并且部分有机污染物含量下降, 同时会使大量有毒物质分解或使非生物降解物转化为可生物降解物质。处理过程中的污泥特性也会有一定变化, 比如脱水效果提高等, 并且干净快速的辐照技术还可以有效减少处理过程中产生的恶臭味, 降低臭气污染。

### 4.1 电子束照射对污泥生物特性的影响

由于电子束的直接作用和间接作用, 经过辐照污泥中的微生物和寄生虫会大量死亡, 死亡率与辐照剂量率、剂量分布、辐射质量、微生物种类和环境因素等条件有关。

各种病原菌的  $D_{10}$  ( $D_{10}$ : 病原菌死亡率达到 90% 所需要的辐照剂量) 值一般有所不同。Scott 和 Ahlstron 的研究结果表明, 污泥环境中微球菌、肠杆菌和奇异变形菌属的  $D_{10}$  一般小于 0.5 kGy; 而大肠杆菌的  $D_{10}$  则在 1.4 kGy 左右; 沙门氏菌则随种属不同  $D_{10}$  在 0.5~1.4 kGy 之间变化; 各种病毒的  $D_{10}$  在 1.5~5.0 kGy 之间<sup>[19]</sup>。也有实验证明未经处理的污泥和厌氧处理的污泥的  $D_{10}$  在 3~4 kGy 之间, 脱水后污泥的  $D_{10}$  则在 10 kGy 左右<sup>[20]</sup>。

Capizzi 等<sup>[21]</sup>研究了蛔虫卵对电子束的抗性, 实验中蛔虫卵的来源有两种: 解剖母体所得和从污泥中直接得到。用得到的虫卵污染污泥然后对其进行电

子束辐照。解剖得到的虫卵一部分立刻进行辐射处理, 另一部分则在 4 °C 保存两个月后再进行辐射处理, 最后得到的  $D_{10}$  分别为 1 125 和 661 Gy; 从污泥中得到的虫卵经辐射处理后得到的  $D_{10}$  为 788 Gy。另外, 虫卵的初始存活率和介质含水率也对辐射过程有影响。

### 4.2 电子束照射对污泥有机物的影响

目前, 高能电子束辐照降解有机污染物的研究在污水处理中研究较多。污水和污泥处理过程中电子束降解有机污染物的机制相同, 都是通过电子束与水分子发生反应产生高氧化性能的自由电子和自由基, 再作用于有机污染物使其发生相应降解, 即使是非生物降解物也可以被有效转化, 但由于二者介质不同且存在条件也不相同, 所以降解率也不尽相同。Sampa 等<sup>[22]</sup>研究了电子束对工业污水中染料、酚类和油类物质降解情况。Song 等<sup>[23]</sup>则证明高能电子束可以降解 2-, 3-, 4-硝基酚和 2-, 4-二硝基酚。Zhang 等<sup>[24]</sup>研究发现, 电子束可以降解六氯苯 (Hexachlorobenzene, 简称 HCB), 并且随溶液介质不同降解率也有所变化。Romanelli 等<sup>[25]</sup>利用电子束降解表面活性剂十二烷基硫酸钠 (Sodium Dodecyl Sulfate, 简称 SDS), 辐照剂量从 3~12 kGy 之间变化时, 最低降解率在 70% 左右, 最高降解率可达 96%。

Chung 等<sup>[26]</sup>研究了电子束对实际污泥中有机污染物的降解, 以 16 种多环芳烃 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, 简称 PAH) 类物质作为污染物降解考察对象。研究发现, 在辐照处理过程中, 各种污染物残余量随辐照剂量的增加而不断降低, 因此电子束可以有效降解 PAH, 在辐照剂量达到 5 kGy 时, 16 种 PAH 降解率都接近 90%。Chung 等<sup>[27]</sup>研究了养猪场猪粪及其稀释废水中氨苄青霉素的电子束辐照情况, 实验中猪粪废液的氨苄青霉素含量为 707.2(±)59.7 mg/kg, 水溶液中氨苄青霉素含量为 100 mg/L, 二者辐照剂量都设为 0, 1, 3, 5 和 10 kGy。辐照后发现随辐照剂量增加氨苄青霉素的降解率不断提高, 辐照剂量为 10 kGy 时降解率最高, 猪粪和水溶液中氨苄青霉素的降解率分别达到 98.2% 和 94.7%。

### 4.3 电子束照射对污泥中脱水效果的影响

污泥的脱水效果主要是通过去除污泥颗粒表面及间隙水以降低污泥含水量, 并缩减污泥体积的过程。

由于污泥颗粒和水分子之间存在静电作用, 污泥的脱水效果常常不理想<sup>[28]</sup>。但是污泥经过电子束辐照处理, 泥浆中固体悬浮颗粒数量下降, 脱水效果会根据污泥成分的差异而有不同程度的提高。

Čuba等<sup>[29]</sup>的研究发现, 电子束辐照后污泥中悬浮固体(SS)颗粒数量先小幅增加, 然后开始下降; 未经辐照处理的污泥固体悬浮颗粒一直呈现增加趋势。Zheng等<sup>[30]</sup>的研究表明, 辐照后污泥的总含固率和不稳定颗粒数量都有所下降。Sawai等<sup>[31]</sup>研究也证明, 高能电子束辐射可以提高污泥脱水作用。Wooshin等<sup>[32]</sup>采用SEM(Scanning Electron Microscope)观察不同辐照剂量(0, 1, 5和10 kGy)处理的污泥薄片发现, 随剂量增加污泥的絮状结构破坏程度不断提升, 该研究结果证明电子束辐照可以降低污泥中悬浮颗粒并能提高污泥脱水能力, 因为辐照后污泥絮状结构遭到破坏, 污泥的储水能力会随之降低。

#### 4.4 电子束辐照对剩余污泥的其它影响

辐照导致剩余污泥中大量微生物死亡, 有机质分解, 含固率下降, 从而引起污泥pH值和COD(Chemical Oxygen Demand)等指标的变化, 这从另一方面证明, 电子束辐照技术可以有效杀灭污泥中的病原菌, 并降解相应有机物。

Wooshin等<sup>[32]</sup>的研究表明, 辐照对污泥碱度影响较大, 但pH值变化很小。实验过程中0.25~1.00 cm不同厚度污泥在0~20 kGy的辐照剂量下处理后检测发现: (1)随污泥厚度增加, 辐照后的污泥碱度降低幅度减小; (2)随着辐照剂量增加, 辐照污泥的碱度降低幅度增加; (3)一定范围内改变污泥厚度和辐照剂量的大小, 污泥pH值的变化幅度不超过0.5。Borrely等<sup>[33]</sup>分析发现, 由于污泥中存在 $\text{HCO}_3^-$ 等缓冲物质, 电子束辐射产生的OH与其反应, 造成污泥碱度急剧下降, 而pH值则相对保持稳定。

辐照对剩余污泥COD的影响主要通过可溶性COD(Soluble Chemical Oxygen Demand, 简称SCOD)的变化来表示。Wooshin等<sup>[32]</sup>的实验中随污泥厚度降低或照射剂量的增大, SCOD不断增加, 而总COD(Total Chemical Oxygen Demand, 简称TCOD)变化较小。Shin等<sup>[34]</sup>研究了不同电子束辐照剂量对不同总固体量(Total Solids, 简称TS)污泥COD的影响, TS>1.5%和TS在2.4~3.2%之间的两种污泥(活性污

泥和剩余污泥)分别在0~10 kGy之间的剂量范围内进行处理, 结果表明SCOD随辐照剂量增加而增大, 但TCOD变化不大, 且低剂量比高剂量影响更大(活性污泥辐照前后SCOD比值最大时的剂量为1 kGy, 剩余污泥则为0.5 kGy)。

辐照处理后的污泥进行酸化处理时, 挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acid, 简称VFA)的产量有所增加, 持续产酸的时间也有所延长。Shin等<sup>[34]</sup>采用1 kGy剂量, 发现辐照后的污泥酸化过程中, 不仅VFA产量大大增加, 产酸时间也由原来的16 h增加至48 h; 当采用3和6 kGy辐照剂量时, 产酸时间增加至72 h。

与一般污泥相比, 辐照处理后的污泥生化降解能力有所提高, 并且随辐照剂量增加影响程度增大。辐照后污泥产沼气能力提高, Wooshin等<sup>[32]</sup>采用7 kGy剂量辐照后的污泥沼气总产量提高了22%。

## 5 电子束和其它方法联合处理污泥

电子束辐照技术可单独使用进行污泥处理, 也可以和其他方法联合。日本原子能研究所采用电子束堆肥方法进行污泥处理, 使得堆肥过程中 $\text{CO}_2$ 排放时间从原来的10 d降低到2~3 d<sup>[35]</sup>。Martin等<sup>[36]</sup>则研究了电子束和微波单独及联用处理对污泥中病原菌的杀灭情况。联合处理方式分为3种情况: (1)先采用电子束辐照, 再进行微波辐照; (2)先采用微波辐照, 再进行电子束辐照; (3)电子束和微波同时进行辐照。实验结果表明, 联合处理杀菌效果明显, 优于单独处理, 且联合处理方法(2)优于方法(1), 但都低于方法(3)。电子束剂量和微波辐照时间都对处理效果有影响, 单独处理时, 随辐照剂量增加微生物存活率呈线性下降; 微波处理时, 微生物存活率则呈波浪形下降; 联合处理过程中随电子束辐照剂量和微波辐照时间增加, 微生物数目快速下降。

## 6 辐照处理污泥的费用评估

电子束处理污泥过程中的费用与许多因素有关, 如设备规模、处理量、辐射剂量、是否和其他方法联合处理及当地电价地价等。因此, 不宜将电子束与传统方法处理费用直接比较。总之, 电子束处理的费用主要在于辐照装置的购置和处理厂的初次建设, 运行维修费用较低; 传统处理方法初次建设花费较少, 但处理过程中的运行维修要耗费大量的人力财力。

Osborn 等<sup>[37]</sup>对辐射处理和加热处理污泥过程中的费用做了比较,发现辐照处理费用要低于加热处理。

### 7 电子加速器及实验简介

2009年,中国科学院近代物理研究所与兰州惠昌再生燃料技术有限责任公司开始合作,依托中国科学院近代物理研究所的电子加速器,进行高能电子束污泥无害化处理技术的相应研究。中国科学院近代物理研究所研制的加速器属于直流高压型加速器。其主要结构由高压发生器、电子枪、加速管、束流引出系统及控制系统组成,基本工作原理是:电子束从电子枪阴极发射,通过加速管中的高压电场获得加速,最终从扫描引出装置出射到大气中;辐照样品种经过传动系统被传送到扫描窗下进行辐照。这种加速器结构具有简单、操作方便、长时期运行稳定、故障率低等特点,运行过程中最大能量可达 2 MeV,最大流强可达 40 mA(图 1)<sup>[38-39]</sup>。

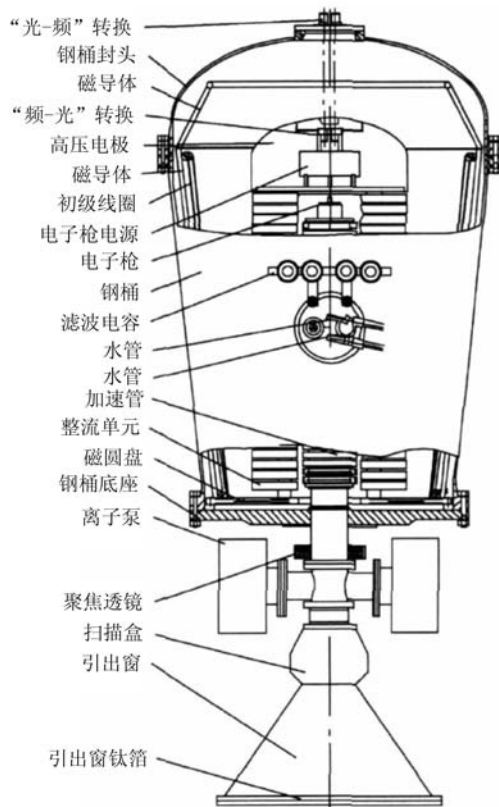


图 1 加速器结构

针对兰州市某生活污水处理厂的剩余污泥(含水率 80%左右),本研究小组主要研究了 5, 10, 15 和 20 kGy 照射剂量下高能电子束对剩余污泥中微生物杀灭

效果以及理化性质的变化。从已有的研究结果可以发现,不同厚度的剩余污泥(0.3, 0.5 和 1.0 cm)经过电子束照射后变化显著,通过平板培养法观察到高能电子束对剩余污泥杀菌率接近 100%;国标法检测辐照后污泥上清液,发现污泥的可溶性 COD (SCOD)、总氮(TN)和总磷(TP)等指标,与对照相比均有不同程度的提高,表明电子束辐照可使污泥中有机质释放并进入水相中,方便对污泥进行后续的堆肥或者消化,并且氮和磷的释放也有利于辐照污泥进行农用或者林用;同时辐照污泥含固率提高,说明电子束辐照对剩余污泥还有一定的脱水左右,有利于剩余污泥的下一步资源化综合利用(图 2)。

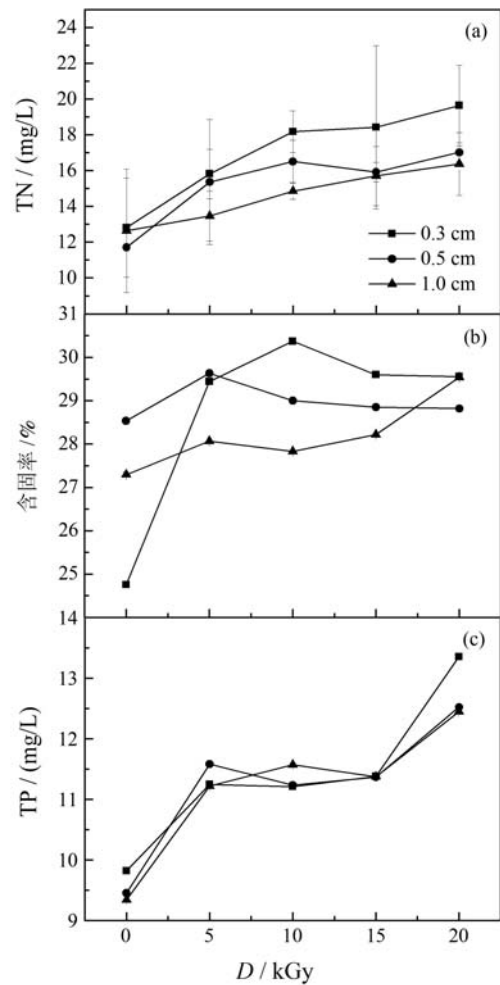


图 2 高能电子束污泥无害化处理后污泥的总氮(TN)、含固率和总磷(TP)的变化情况

### 8 辐照处理后污泥的应用潜能与展望

目前大量剩余污泥只经过初步处理后就作为废物排放,进行简单的填埋或焚烧处理,不仅浪费资源,

而且焚烧、填埋等过程耗能高, 处理率低、稳定性差, 还容易引起二次污染, 继续危害生态环境。辐射处理的污泥质量要优于传统处理方法, 对其回收利用不仅可以解决排放和处置问题, 还可以相应降低处理成本, 促进污泥资源的循环利用, 提高辐照处理污泥的应用价值。目前, 污泥农用和利用污泥热值进行燃料化处理是较好的两种方法。

Rathod 等<sup>[40]</sup>则详细研究了辐照(采用 $\gamma$ 源)过的污泥用作肥料时对土壤和植物特性的影响, 经过实际种植实验证明处理后的污泥可以用作肥料, 但是污泥中重金属的浓度应在规定排放标准之内。Chmielewski 等<sup>[41]</sup>的研究也表明辐照处理的污泥可作肥料, 并可提高作物产量将近 50%。

蒋建国等<sup>[42]</sup>研究了污泥燃料制作过程中含水量及添加物的含量对燃料成型的影响。Zabaniotou 等<sup>[43]</sup>对污泥湿度以及其中的各成分含量、污泥燃料制作过程、燃烧后的气体安全性做了研究, 证明污泥燃料燃烧后不会产生对人体有害的气体, 但是制作燃料的污泥中重金属含量要符合标准, 尤其是 Hg 含量。

电子束辐照技术用于剩余污泥处理已有很多研究和实际应用, 但目前还没有形成一套成熟的操作流程, 从而导致其应用范围较小。另一方面, 含水率 80% 时, 全国年污泥总产生量在“十二五”很快将达到  $3 \times 10^7$  t, 但是目前国内污泥的处理处置还处于一个早期阶段, 大量剩余污泥得不到合适安全的处置和利用, 因此处理后污泥的资源化利用率较低也限制了电子束辐照技术的推广<sup>[44]</sup>。未来电子束在污泥处理方面的发展应着眼于污水和污泥系统化处理, 全面发掘辐照污泥的应用价值, 加强污泥的资源化利用, 同时简化操作过程, 优化操作流程, 联合相关交叉技术, 进一步降低运行费用。

#### 参考文献 (References):

- [1] DI Yunbo, WEI Xianxun, ZENG Guangming, *et al.* Industrial Water Conditioning, 2004, **24**(2): 8(in Chinese).  
(翟云波, 魏先勋, 曾光明, 等. 工业水处理, 2004, **24**(2): 8.)
- [2] BAO Borong, WU Minghong. Nuclear Science and Techniques, 1999, **10**(1): 433.
- [3] LIU Zhaowei, LI Xiang. Science and Technology, 2011, **4**: 52(in Chinese).  
(刘兆伟, 李翔. 科技天地, 2011, **4**: 52.)
- [4] LIU Hongmei, XIONG Wenmei. Environmental Protection Science, 2007, **33**(4): 81(in Chinese).  
(刘红梅, 熊文美. 环境保护科学, 2007, **33**(4): 81.)
- [5] FU Yongxiang, ZUETEH M. Radiation Processing of Polymers[M]. Hanser: Munich, 1992: 71.
- [6] PIKAEV A K. High Energy Chemistry, 1995, **34**(1): 1.
- [7] WANG Jianlong, WANG Jiazhao. Journal of Hazardous Materials, 2007, **143**: 2.
- [8] LESSEL T. Disinfection of Sewage Sludge by Gamma Radiation, Electron Beams and Alternative Methods[C]. Sewage Sludge and Wastewater for Use in Agriculture, Vienna(Austria): the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in FOOD and Agriculture and the IAEA Division of Physical and Chemical Sciences, 1997: 27.
- [9] PIKAEV A K. High Energy Chemistry, 1997, **35**(6): 367.
- [10] ZHAO Yongfu, ZHENG Zheng, YUAN Shoujun, *et al.* Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2005, **19**(2): 129(in Chinese).  
(赵永富, 郑正, 袁守军, 等. 核农学报, 2005, **19**(2): 129.)
- [11] WU Zhenhua, ZHANG Hong, ZHAO Weiping, *et al.* Nuclear Physics Review, 2009, **26**(1): 80(in Chinese).  
(武振华, 张红, 赵卫平, 等. 原子核物理评论, 2009, **26**(1): 80.)
- [12] BORRELY S I, CRUZ A C, MASTRO N L D, *et al.* Progress In Nuclear Energy, 1998, **33**(1/2): 3.
- [13] MONDELAERS W. Nucl Instr and Meth B, 1998, **139**: 43.
- [14] SPINK J W T, WOODS R J. An Introduction to Radiation Chemistry [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1900: 349-355.
- [15] MEEROFF D E. Effects of Ionizing Radiation in Wastewater Treatment and Residuals Processing [D]. Miami (Florida, US): University of Miami, 2001.
- [16] PIKAEV A K. High Energy Chemistry, 2001, **35**(5): 313.
- [17] STRAUB T M, PEPPER I L, GERBA C P. Rev Environ Contam Toxicol, 1993, **132**: 55.
- [18] KEARNEY T E, LARKIN M J, LEVETT P N. Appl Environ Microbiol, 1994, **60**: 3647.
- [19] SCOTT B, AHSTROM P J E. Radiat Phys Chem, 1985, **25**(1/3): 1.
- [20] ČUBA V, POSPÍŠIL M, MÚČKA V. Czechoslovak Journal of Physics, 2003, **53**: 369.
- [21] CAPIZZI S, JANINE S. Wat Res, 2001, **35**(9): 2256.
- [22] SAMPA M, BORRELY S I, SILVA B L, *et al.* Radiat Phys Chem, 1995, **46**: 1143.
- [23] SONG Weihua, ZHENG Zheng, RAMI A-S, *et al.* Radiat Phys Chem, 2002, **65**: 559.
- [24] ZHANG Jibiao, ZHENG Zheng, LUAN Jingfei, *et al.* Journal of Hazardous Materials, 2007, **142**: 431.
- [25] ROMANELLI M F, MORAES M C F, VILLAVICENCIO A L C H. Radiation Physics and Chemistry, 2004, **71**: 409.
- [26] CHUNG B Y, CHO J Y, SONG C H, *et al.* Bull Environ Contam

- Toxicol, 2008, **81**: 7.
- [27] BYUNG Y C, KIM J S, MIN H L, *et al.* Radiation Physics and Chemistry, 2009, **78**: 711.
- [28] MAHMOUD A, OLIVIER J. Water Research, 2001, **44**: 2381.
- [29] ČUBA V, POSPIŠŮ M, ÚČKA V, *et al.* Radiation Physics and Chemistry, 2003, **67**: 545.
- [30] KAZUMI J, ZENG Zheng, WAITE T D. Radiation Physics and Chemistry, 2001, **61**: 709.
- [31] SAWAI T, YAMAZAKI M, SHIMOKAWA T, *et al.* Radiat Phys Chem, 1990, **35**: 465.
- [32] WOOSHIN P, MOONHYUN W, KIM T H, *et al.* Radiation Physics and Chemistry, 2009, **78**: 124.
- [33] BORRELY S I, SAMPA M H O, UEMI M. Environ Appl Ioniz Radiat, 1998, **22**(15): 369.
- [34] SHIN K, HO K. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2003, **109**: 227.
- [35] LIU Xiuhua, DENG Yi, HE Xiaobo. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, **29**(4): 762(in Chinese).  
(刘秀华, 邓义, 何小波. 化工进展, 2010, **29**(4): 762.)
- [36] MARTIN DI, MARGARITescu I, CIRSTE A E, *et al.* Surface Engineering, Surface Instrumentation & Vacuum Technology, 2005, **77**: 501.
- [37] OSBORN D W, HATTINGH W H J. Water SA, 1978, **4**(4): 169.
- [38] CAO Shuchun, LIU Ming, ZHANG Zimin, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(3): 266(in Chinese).  
(曹树春, 刘铭, 张子民, 等. 原子能科学技术, 2009, **43**(3): 266.)
- [39] CAO Shuchun, ZHANG Zimin, LI Zhongping, *et al.* Nuclear Techniques, 2009, **32**(3): 206(in Chinese).  
(曹树春, 张子民, 李中平, 等. 核技术, 2009, **32**(3): 206.)
- [40] RATHOD P H, PATEL J Y C, SHAH M R, *et al.* Applied Soil Ecology, 2009, **41**: 223.
- [41] CHMIELEWSKI A G, ZIMEK Z, BRYL-SANDELEWSKA T, *et al.* Radiat Phy Chem, 1995, **46**: 1071.
- [42] JIANG Jianguo, DU Xuejuan, YANG Shihui, *et al.* China Environmental Science, 2008, **28**(10): 904(in Chinese).  
(蒋建国, 杜雪娟, 杨世辉, 等. 中国环境科学, 2008, **28**(10): 904.)
- [43] ZABANIOTOU A, THEOFILOU C. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008, **12**: 531.
- [44] DAI Xiaohu. Water & Wastewater Engineering, 2012, **38**(2): 1(in Chinese).  
(戴晓虎. 给水排水, 2012, **38**(2): 1.)

## The Application of Electron Beam Irradiation on Excess Sludge Treatment

SUN Yong-liang<sup>1, 2, 3</sup>, LI Xin<sup>3</sup>, WANG Jie<sup>4</sup>, WANG Ju-fang<sup>3</sup>, LI Wen-jian<sup>3</sup>, WANG Yi-bo<sup>1, 2</sup>

(1. School of Chemical and Biological Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. School Life Science and Chemistry, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, Gansu, China;

3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Recently, electron beam irradiation has great potential in dealing with excess sludge. A great deal of studies showed that the electron beam irradiation played an enormous role in promoting the sludge harmless treatment. Most of pathogenic bacteria was dead and lots of organic substances, especially some non-biodegradable ones, were decomposed by the high electron beam irradiation. The irradiated sludge also had low water content, less odour, low hazard and a better application potential in utilization. This paper reviews the application of electron beam irradiation on excess sludge, the advantages and current situation of the irradiation technology. Mechanisms of removing contaminants, effects of treatment and the construction expense are mainly discussed. The future development of this advanced technology are prospected finally.

**Key words:** electron beam; irradiation; sludge

**Received date:** 30 Mar. 2012; **Revised date:** 29 May 2012

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (41161058, 31060065); Gansu Provincial National Natural Science Foundation of China (1107RJZE117)

**Corresponding author:** WANG Yi-bo, E-mail: wangyb02@126.com; LI Xin: E-mail: lexlll920@impcas.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>