

·学科进展与展望·

污泥特性及相关热物理研究方向

彭晓峰 陈剑波 陶涛 李笃中 朱敬平

(清华大学热能系,北京 100084)

[摘要] 随着社会的发展,人们生活和生产所产生的污泥成为一个日益严重的环境问题。本文简要介绍污泥处理对环境保护的重要意义及其现状;讨论活性污泥的分类、工业处理及特性,尤其是结构变化特性及其对污泥处理的重要意义;分析展望污泥特性研究中现有的和潜在的热物理研究方向。

[关键词] 污泥特性,污泥处理,环境保护,热物理方向

引言

污泥泛指由水与废水处理中产生的固液混合物,固含量在 0.25%—12% (w/w) 之间。污泥组成十分复杂,变异性大,水分比例极高而不易脱水,欲使污泥处理达到优良标准,一般要占运行成本 40% 以上^[1]。美国城市处理每吨干燥后的无害污泥花费 1 000—1 600 元人民币,日本东京约 3 000 元人民币,台湾地区约 2 000 元人民币左右。此外,原本废水中所含的有机物、重金属、致病微生物等有害物质在移出后可能被浓缩于污泥中,若得不到处理,必然会对环境造成更严重的污染^[2]。全面深入了解污泥的一般特性,发展妥善处理污泥技术,以达到减量化,无害化,资源化的目标,已成为当前世界普遍关心的重要课题^[3]。中国大陆在污泥处理方面起步较晚,污泥问题同样十分严重。据不完全统计,全国不同规模、不同程度的城市污水厂有 100 多座,污水排放量约为 $4.474 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{天}$ ^[4]。每天所产生的污泥量约为污水处理量的 0.5%—10%,即约 $(2 \times 10^5 - 4 \times 10^6) \text{ m}^3/\text{天}$,数量十分惊人。目前,我国只有在较大城市才进行污泥处理,处理的方法以土地弃置和堆肥为主。污泥处理的投资和运行费用相当巨大,分别占污水厂全厂费用的 12%—30% 和 20%—50%^[5]。以北京高碑店污水处理厂为例,它日产约 500 t 机械脱水污泥,每天需用 50 辆 10 t 的卡车将

它们运到 100—200 km 外的郊区或河北地区弃置,单运输费用就达到全厂运行费用的近 1/3,迫切需求研究和开发低投资和低运行费用的污泥处理工艺、模式和方法。目前,与热物理密切相关的污泥流化床焚烧^[6,7]、利用天然气候冻融处理^[8,9]和利用余热废热调理减容^[10]等方面的研究都方兴未艾。显然,深入研究污泥形成处理中物理化学演变及其对处理过程的影响有重要的学术意义和实际前景。

1 污泥的分类

按来源与处理方式大致可分成如下三类^[11]。

(1) 初级污泥或化学污泥。来自工艺过程的污秽杂物,经由初步混凝后初级废水处理分离所得的污泥。其悬浮固体水合物与多数溶解性有机物尚未经微生物消化分解,污泥颗粒的絮凝形成主要靠化学絮凝药剂聚集等的化学处理,粒径相对较小 ($< 100 \mu\text{m}$) 而致密。

(2) 二级污泥或生物污泥。由生物处理方法所产生的污泥。主要由初级污泥经与好氧性微生物及溶解性有机物接触,摄取水中生物分解成分进行生长繁殖而形成,称为活性污泥。二级污泥结构松散,含水率极高,平均粒径在 100—500 μm 之间,脱水性差。

(3) 三级污泥或消化污泥。初级化学污泥与二级生物污泥混合后在消化槽进一步处理所形成的污

国家自然科学基金重点项目资助。

本文于 2002 年 6 月 5 日收到。

泥即为三级污泥或消化污泥。在消化处理中,分解未能分解的有机物,破坏污泥的高比表面积结构,将吸附于其上的水分剥除成为自由水,改善沉降性与脱水性。

2 污泥颗粒的特性

2.1 物理结构特性

污泥的普遍特性为含水量高,脱水性很差,其组成粒子为水中悬浮固体经不同方式胶结凝聚而成,组成复杂且具有成分的多变性。污泥含水和脱水性、与污泥物理结构、组成成分等密切相关、相互依赖耦合。

给污泥的进一步了解和处理带来最大困难的是污泥颗粒复杂的结构特性。一般相信污泥颗粒为形状不规则,高度非均匀,比表面积与孔隙率极高(孔隙率常大于99%),外观上具有类似绒毛的分支与网状结构的有机聚集体,许多研究表明,分形可以很好地应用在描述污泥颗粒的几何特征及生物聚集体的基质传送,同时颗粒沉降速度及其大小的关系是以分形维度为指数的函数^[12]。对于分形颗粒自身絮凝作用的发生方式,影响该作用的各种因素,以及颗粒如何维系其结构强度,仍旧存在许多疑问。Jorand et al^[13]透过超声波振荡与粒径分析,提出三层结构污泥颗粒模型,认为单一颗粒(约125 μm)是由许多小凝集体(约13 μm)组合而成,而这些小凝集体再由大小约为2.5 μm 的细菌细胞聚集而成,这些小单元分别“镶嵌”在主要成份为细胞间质(ECPs, exocellular polymers)的胶质网状体(gel-like matrix)中,藉而维系整个胶羽的结构;水分则是存在于颗粒之间、网状体间隙(microchannels)、胶体表面,以及微生物体内。许多观察都显示出颗粒内部空间的质量分布呈现高度不均匀性,并且可分成许多层次,在各层所量得的分形维度也不尽相同^[14]。

2.2 化学生物特性

污泥颗粒的形成与结构维持受许多因素的共同影响,化学与生物化学特性显然是最重要的影响因素之一,其作用可以从三个方面认识,化学生物反应与生成物质组成、化学吸附与生物纤维的凝聚作用和生成污泥的后续化学与生物演化过程。利用生物鉴定技术和化学分析方法探讨污泥结构,从对细胞间质(ECPs, exocellular polymers)的萃取和成分鉴定发现^[15],钙离子等金属成分、丝状菌等可能是产生化学与生物絮凝的原因之一。比如,菌体细胞聚集形成胶质网状体完全决定了污泥的特性,甚至以后

的演化方向。有研究者根据上述结果,试图配制人工污泥(synthetic sludge),用来模拟实际的污泥,已经取得一定的成果^[16]。

3 热物理研究分析

3.1 污泥研究中存在的问题

(1)污泥自身絮凝的形成、特性、演变及影响因素。研究表明广泛采用的活性污泥法产生的活性污泥的形成主要取决于其中的微生物的成长过程,并将其分成三个生长期来研究,但目前的研究还是初步的,未得到强有力的实验证明。

(2)污泥的组成物质及分布,其中最重要的是水分分布。污泥组成千差万别,即使是某一种污泥,其成分和分布也是复杂易变,难以测定,将是今后研究的一个重点。

(3)污泥内部空间孔隙结构,结构强度维系与演变。由于污泥结构的可变形性,要求用新的方式和结构参数来表征其特殊的内部结构,仍遗留许多基础性问题没有解决。

(4)各种方法对污泥改性的影响与作用机理。广泛使用的各种物理、化学、生物等方法虽然可以改变污泥成形过程及最终物质结构,产生不同的化学与生物影响,显著改善污泥脱水性,但是其机理还很不清楚,甚至不曾有相关研究。

(5)污泥形成和处理中致病微生物的形成机理、危害和处理方法。

(6)综合组成与结构演变、生物与化学反应、多组分多相流动与相变的内部能质传递研究尚属空白,这种复杂的热物理现象在未来污泥处理与基础现象认识中占据极为重要的地位。

3.2 污泥处理中已有的热物理研究

污泥处理与工艺过程有许多涉及工程热物理学的问题。主要有二个层面:一是应用与热过程有关的污泥处理工艺产生的相关热物理问题;二是污泥的形成、处理及特性研究中存在的许多热物理或与热物理交叉的基础科学问题。工艺过程诸如前处理中的固液分离中的干燥、热调理、冻融调理,以及最终处置里的焚化、热裂解、熔融烧结等,这些过程中的科学问题,实际是上世纪初研究的具体化、延伸和应用。已有的相关的研究主要有:

(1)污泥内水分及迁移特性:污泥的含水率、水分分布及脱水性能是经典的热物理问题。实验表明污泥内存液的膨胀系数与纯水不同,污泥降温速度、溶解盐分都会对结合水及分布造成影响^[17]。其脱

水传递过程目前研究的还极少。

(2)热调理:为增进污泥的可消化性并破坏其高孔隙率结构,在前处理过程中常采用污泥加热法调理^[18]。研究提供的实验数据表明,污泥颗粒的存在对热调理的微观传热机制有很大影响,其可能因素包括颗粒的尺寸与内部表面积等。

(3)冻融处理:为改善污泥的脱水性,有研究指出采用缓慢冷冻再加以解冻之方式可以破坏污泥颗粒的原有结构,而快速冷冻却没有这种效果^[8,9]。另一方面,含盐分污泥进行冻融调理时,发现污泥的颗粒大小与内部结构会影响盐-水共融物(eutectics)的形成^[19],盐分浓度会影响有效冻结速度及脱水性改善。污泥内水的固化过程,以及冰晶成长界面的稳定性,这些问题都尚未深入探讨与定性解析。

(4)无氧热分解:污泥可采取多种热处理方式以达到减容化、稳定化、无害化和资源化,无氧热分解可促使污泥中有机物发生还原作用,产生可供回收利用的低碳石化燃料,如甲烷或乙烷等。也有研究指出,添加药剂,如高分子聚电解质絮凝剂会改变污泥的结构特性(如使之变得较为疏松),影响后续热处理的效果。有研究者^[17]指出,污泥干燥颗粒结构,包括孔隙与表面积会随加热过程而发生改变,明显影响污泥的热裂解效果,其中固体多孔结构可能会在加热速率较为缓慢时发生“表面迁移”等崩塌现象。已有研究均未以明确数据表明整个污泥结构的变化情形,也未阐明污泥传热参数(如热扩散系数)的影响以及和结构的相关性,无法提出一般化的结论。

基础性研究问题最主要体现在复杂的能质传递现象,包括多组分相变传递过程和可变结构内具有生化反应、演变的传递现象。这些实际存在于污泥形成、演变和处理的各个过程,不同于某个工艺过程中具体的热物理问题,而是对污泥结构及其过程进行抽象而产生的基础性研究方向,这方面的研究还几乎是一片空白,深入认识这些现象将可为寻找有效且成本低的处理方法与工艺开辟道路。

3.3 热物理研究的前景

如前所述,污泥研究的最主要问题是污泥形成机理、结构特性和内部的传递过程和生化反应这几个方面,其核心是结构变化、传递过程和界面反应的相互耦合。污泥颗粒的最大特征是其高孔隙率、高含水率且不具固定形态,从生成过程、运输、消化、调理、增稠、固液分离至最终处理过程中,整个结构会因外力的变化、水分的逸散以及温度的改变而使得

污泥的结构变形甚至崩塌,这是污泥结构与其他固定骨架的多孔介质相比最大的不同。因此,未来污泥研究中热物理研究的发展除了继续解决污泥处理工艺相关的具体热物理问题外,另一个重要的研究方向将是与热物理相关的基础性研究,即针对污泥这种高含水、高孔隙、变形程度极大的介质,其内部复杂的能质传递现象,包括多组分相变传递过程和可变结构内具有生化反应、演变的传递现象的描述和表征。这类问题的研究成果,对污泥研究中的各个问题都将有极大的帮助,而且从学科发展的角度看,将有可能产生许多令人激动的交叉研究课题,就应用而言,将可寻求低廉有效的处理方法和工艺,比如有效利用天然气后或废热余热等调理污泥结构和传递特性、污泥自身生化规律控制及处理等,都将是热物理崭新的课题。

4 结束语

在环保标准日益提高的现代社会,污泥处理已经逐渐成为一个重要的议题和研究领域。掌握污泥的特性,通过合适的前处理与后处理,达到资源化利用的目标,是今后课题研究的重要方向。污泥的研究和处理是一个涉及物理、化学、生物等多学科的交叉领域,相关的多孔介质传热传质、界面现象、相变问题、生化反应等耦合问题给热物理工作者带来了丰富的研究课题,展示出崭新的前景。

参 考 文 献

- [1] Vesilind P A. Treatment and Disposal of Wastewater Sludge. Ann Arbor, Mich., USA, 1979.
- [2] Pike E B. Pathogen in sewage sludge -(i) agricultural use of sewage sludge and the control of disease. Water Pollution Control, 1986, **85**: 472.
- [3] 朱敬平,李笃中. 污泥处置(I):简介及胶羽特性,台湾大学《台大工程》学刊,2001,第81期,47—58.
- [4] 蒋成爱,黄国锋,吴启堂. 城市污水污泥处理利用研究进展. 农业环境与发展,1999,第1期,13—18.
- [5] 顾国维. 水污染治理技术研究. 上海:同济大学出版社,1997, 276—322.
- [6] 陈小平,赵长遂,兰计香. 造纸污泥流化床焚烧技术试验研究. 燃烧科学与技术,2000,6(1):15—18.
- [7] 奉华,张衍国,邱天等. 城市污水污泥的热解特性. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(10):90—92.
- [8] Hung W T, Chang I L, Lin W W et al. Unidirectional Freezing of Waste-Activated Sludges: Effects of Freezing Speed. Environ. Sci. Technol., 1996, **30**: 2391—2396.

(下转 305 页)

民航的多个机场投入使用,直接经济效益逾千万元人民币,取代国外进口产品节省外汇近千万美元。

4 研究成果的应用前景及展望

该项目在基础理论方面的研究成果,其科学意义得到高度评价。在应用技术方面的4项成果都将形成具有我国自主知识产权和重大创新的高科技产品,为建设我国独立自主的空中交通管理体系做出重要贡献。这四项成果在2001年度的推广直接经

济效益已超过千万元。同时在该项目的支持下,已经与法国 Thomson 公司合作,建立中法合作“实时软件工程研究中心”和中法合作“实时软件工程硕士培训中心”,并纳入中法两国政府文化交流合作项目,获法国政府和 Thomson 公司资助,主要内容是研发新一代空中交通管理软件。其他合作还包括与美国锡拉丘兹大学、美国新奥尔良大学、日本山梨大学等的交流。

AN INTRODUCTION OF THE RESEARCH ON CRITICAL TECHNIQUES IN NEW-GENERATION ATC SYSTEM

You Zhisheng* Zhang Lin† Zhu Min*

(* Computer College, Sichuan University, Chengdu 610064; † Technological Department, Sichuan University, Chengdu 610064)

Key words ATC, Multi-radar Information Fusion, Radar Alarm Forenotice

(上接 286 页)

- [9] Lee D J, Hsu Y H. Fast Freeze/Thaw Treatment On Excess Activated Sludge: Floc Structure And Sludge Dewaterability. *Environ. Sci. Technol.*, 1994, **28**: 1 444—1 449.
- [10] 胡龙,何晶晶,邵立明.城市污水厂污泥热干燥处理技术及其应用分析. *重庆环境科学*, 1999, **21**(1): 51—53.
- [11] 金儒霖,刘永龄.污泥处置.北京:中国建筑工业出版社,1982.
- [12] Tambo N, Watanabe Y. Physical characteristics of floc-I. The floc density function and aluminum floc. *Water Research*, 1979, **13**:409.
- [13] Jorand F, Zartarian F, Thomas F et al. Chemical and structural(2D) linkage between bacteria within activated sludge flocs. *Water research*, 1995, **29**: 1 639.
- [14] Zartarian F, Mustin C, Bottero J Y et al. Spatial arrangement of the

component of activated sludge flocs. *Water Science & Technology*, 1994, **30**(11):243.

- [15] Forster C F, Dallas-Newton J. Activated sludge settlement-some suppositions and suggestions. *Water Pollution Control*, 1980, **79**:338.
- [16] Ormeci B, Vesilind P A. Development of an improved synthetic sludge: a possible surrogate for studying activated sludge sewerage characteristics. *Water Research*, 2000, **34**(4):1 069.
- [17] 朱敬平,李笃中.污泥处置(Ⅲ):污泥后处理.台湾大学《台大工程》学刊,2001,第83期,59—81.
- [18] Liu Z W, Lee D L. Boiling of biological sludge. *International Communication of Heat and Mass Transfer*, 2000, **27**:221.
- [19] Chu C P, Feng W H, Tsai Y H et al. Unidirectional Freezing of Waste-Activated Sludges: The presence of sodium chloride. *Environ. Sci. Technol.* 1997, **31**:1 512—1 517.

THE SPECIALTIES OF SLUDGE AND ASSOCIATED THERMAL PHYSICAL ISSUES

Peng Xiaofeng Chen Jianbo Tao Tao Lee Duujong Chu Chingping

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract With the development of society, the increasing sludge produced in human life and industry production is becoming a serious environmental problem. This paper briefly discusses the environmental significance and situation of sludge treatment. The emphases are addressed on the classification, processing and characteristics of the activated sludge, especially the characteristic of the variable structure. The existing and future research directions of the sludge characteristics in the thermal physics are analyzed and suggested.

Key words sludge, sludge treatment, thermal physical issue, environmental protection