水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

目　录

第一章　城市污泥处理处置概况 …… (1)
第一节　污泥的产生与环境污染问题 …… (1)
第二节　污泥处理处置技术的发展历史与最新动向 …… (2)
一、发展历史 …… (2)
二、最新动向 …… (5)
第三节　污泥处理处置与资源化的意义 …… (8)
第二章　城市污水厂污泥的性质与特点 …… (11)
第一节　污泥的分类 …… (11)
第二节　污泥的性质与特点 …… (12)
一、生物固体的含水量与含水率 …… (13)
二、生物固体的流变特性 …… (14)
三、生物固体的脱水性能与污泥比阻 …… (21)
四、挥发性固体与灰分 …… (22)
五、生物固体的可消化程度 …… (22)
六、湿污泥密度与干污泥密度 …… (23)
七、生物固体的肥分 …… (23)
八、生物固体的热值与可燃烧性 …… (24)
九、生物固体的毒性与环境危害性 …… (26)
第三章　城市污泥的处理处置方法与回用类别 …… (29)
第一节　污泥的处理方法 …… (29)
一、生物固体的浓缩处理 …… (29)
二、生物固体的消化处理 …… (33)

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

三、生物固体的调理（预处理） …… (34)
四、生物固体的干化与脱水处理 …… (41)
五、生物固体的干燥处理 …… (59)
第二节 污泥的处置方法 …… (63)
一、污泥的填埋处置 …… (64)
二、污泥的投海处置 …… (65)
第三节 污泥的回用类别 …… (67)
第四章 城市污泥的堆肥化与农用资源化 …… (68)
第一节 堆肥技术发展概况 …… (68)
第二节 污泥的堆肥化处理 …… (71)
一、堆肥化的基本原理 …… (71)
二、生物固体的好氧堆肥工艺与设备 …… (82)
三、堆肥品质要求与腐熟度 …… (91)
第三节 污泥堆肥农业回用的安全性要求 …… (94)
一、污泥堆肥对土壤生态的改良修复作用 …… (94)
二、污泥堆肥对土壤的可能危害性 …… (95)
三、污泥农业回用的安全性要求 …… (96)
第五章 城市污泥的能源化利用 …… (106)
第一节 城市污泥的厌氧消化处理与沼气利用 …… (106)
一、污泥厌氧消化的基本原理 …… (106)
二、污泥厌氧消化的条件与影响因素 …… (106)
三、厌氧消化工艺与消化池类型 …… (109)
四、污泥厌氧消化的沼气产生与利用 …… (112)
第二节 污泥的焚烧处理与热能利用 …… (115)
第三节 污泥的热化学处理与炼油技术 …… (118)
第六章 城市污泥的材料化利用 …… (122)
第一节 污泥制砖 …… (122)

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

一、干化污泥制砖 …… (122)
二、污泥焚烧灰制砖 …… (125)
第二节 污泥制生化纤维板 …… (126)
一、基本原理 …… (126)
二、制造工艺 …… (127)
三、生化纤维板的性能与问题 …… (130)
第三节 污泥制陶粒 …… (131)
一、陶粒及其分类 …… (131)
二、河湖底泥制陶粒 …… (132)
三、污水处理厂污泥制陶粒 …… (134)
参考文献 …… (137)

中国城镇水网
www.chinacitywater.org

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

第一章　城市污泥处理处置概况

第一节　污泥的产生与环境污染问题

随着日益增加的人口和全球社会的日益城镇化，城市污水的产生量越来越大，生态环境面临日益严重破坏的压力，因此，城市污水的处理势在必行。在城市污水的处理过程中，必然产生大量的污泥（sludge），污泥通常是指主要由各种微生物以及有机、无机颗粒组成的絮状物。1995 年，世界水环境组织为了准确地反映绝大多数污水污泥具有重新利用价值，将污泥（sludge）更名为“生物固体（Biosolids）”，其确切含义是：“一种能够有效利用的富含有机质的城市污染产生物”。鉴于我国现行标准仍沿用污泥一词，本书除作上述说明外，有时也采用原有的污泥名称。另外，本书中讨论的污泥（生物固体）也包括河湖底泥。

生物固体是城市污水处理及废水处理不可避免的副产品，产量巨大（据估计，全球一年可能产生干污泥量达 1 亿 t），含有大量有机质和营养元素，有农用资源化价值，同时可能含有大量的重金属物质、病原菌、病毒微生物和大量的毒性有机物。因此，其产生、贮存、处理处置及资源化利用过程中均可能危害环境，特别是随着发展中国家城镇基础设施的快速发展，污泥海洋处理的禁止、严格填埋标准以及日益严格的农用

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

标准的制定与实施，生物固体的管理已成为目前一个世界性的社会和环境问题。主要表现在：侵占土地、易腐变臭、易污染土壤和地下水，还可能污染河流、湖泊及海洋等地表水体，其中的重金属和毒性有机物容易通过生态系统中的食物链迁移富集，对生态环境和人类健康具有长期潜在的危害性，需要引起高度重视。

第二节　污泥处理处置技术的发展历史与最新动向

一、发展历史

1896年，英国出现了第一座用于处理生活污水的厌氧消化池，1906年，在德国诞生了第一个双层沉淀池（殷霍夫池），1914年在英国建造了活性污泥污水处理试验厂，因此生活污水的生物处理已有100余年的历史，其污泥处理也有近百年历史。经历100余年的发展，生物固体的处理处置技术已日趋成熟。生物固体的处理处置基本流程如图1-1所示。

可见，生物固体的处理与处置是两个不同的概念。生物固体的处理方法主要包括：浓缩、消化、预处理（药剂处理、热处理）、脱水、干燥等，而其处置方法主要包括：填埋、海洋倾弃、肥料农用、焚烧及资源化利用等。从流程来看，生物固体的处理在前，处置在后。各种处理处置方法的单元操作有所不同，如表1-1所示。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

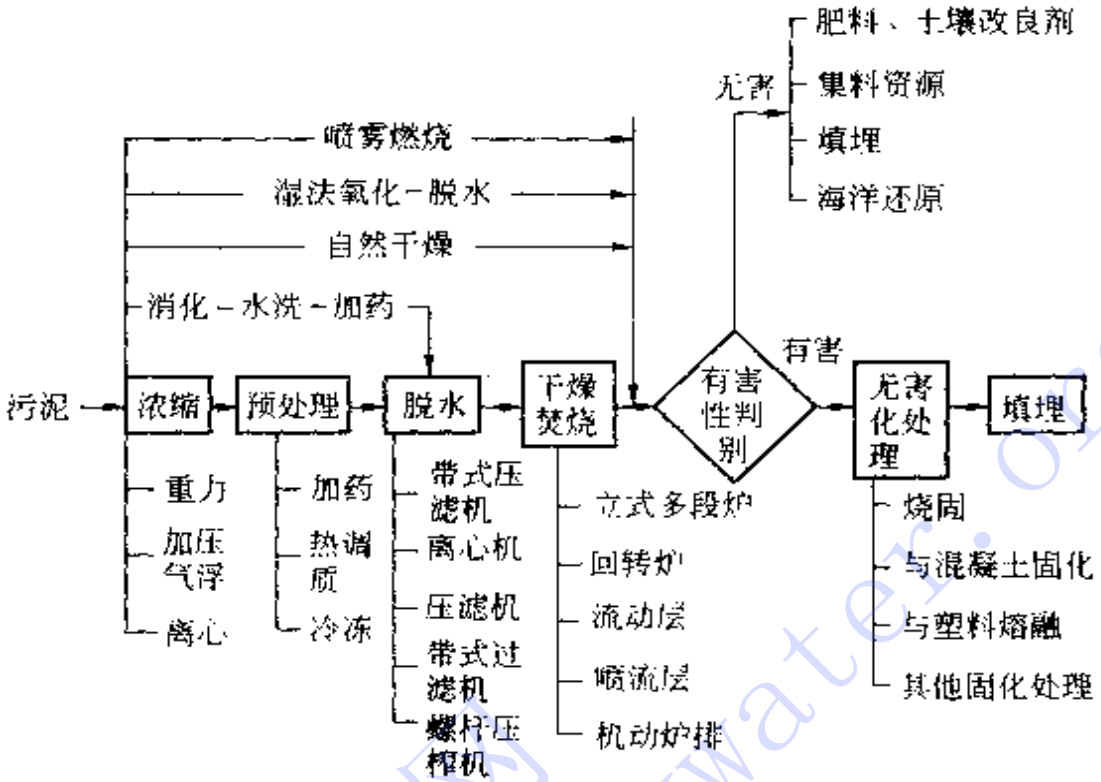


图 1-1 生物固体处理处置的基本流程

表 1-1 污泥的处理目的与单元操作

处理目的		单元操作
浓缩		重力式、气浮式、离心式、反浸透式、蒸发式
消化		厌氧、好氧
预处理	药品调理	石灰、铁盐、硫酸铝、高分子絮凝剂
	热处理	高温高压式、低温加压式、冷冻融通式
脱水		重力式、真空式、毡式、离心式、加压式
干燥		自然式、回转炉式、多段炉式、气流式、流动床式
焚烧		多段炉、回转炉、流动床炉、喷射式焚烧炉、AST 法湿式氧化法、热分解燃烧炉
处置		填埋、投弃海洋、肥料、资源化

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

生物固体处理处置的目的和原则包括：一是稳定化，通过稳定化处理消除恶臭；二是无害化，通过无害化处理，杀灭生物固体中的虫卵及致病微生物等有害物质；三是减量化，通过减量化处理，使之易于运输处置；四是利用，实现生物固体的资源化。流程中生物固体的处理主要是为了实现生物固体的稳定化、无害化和减量化，其处置方法主要是实现生物固体的利用与资源化。

生物固体处理处置技术的发展经历了近 100 年，对其发展阶段进行明确的区分是比较困难的，从整体来讲，生物固体的处理处置技术大体可分为：

1．初始阶段

从 19 世纪末到 20 世纪 20 年代，此阶段是城市污水处理的起始阶段，污水处理相对较少，城市污水厂规模也较小，污泥产生量较少，其处理处置方法是将污泥简单地堆积，用于填平洼地，或在干化场脱水，或将污泥有效地用于农业进行土壤改良，增加土壤肥力。

2．发展阶段

从 20 世纪 20 年代到 80 年代，此阶段发展了生物固体的厌氧消化技术，它使污泥可以得到稳定化与无害化处理，为后续减量化处理与利用创造了条件。生物固体厌氧消化技术具有许多优点，如：减少生物固体容积（1/2～1/3），消除恶臭；产生生物能源——甲烷气；改善生物固体的脱水性能；杀菌、抗菌、灭虫卵等。另外，这一阶段还开发了好氧消化技术以加速生物固体的稳定化和无害化，又发展了各种生物固体的浓缩技术、药剂处理技术、机械脱水技术及加热焚烧技术等，并将各种方法组合成综合处理工艺，逐步能够较好地解决污泥处理问题。以生物固体消化为基础，形成了几大类综合处理工艺：

①消化 + 自然干化；

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

②消化 + 药剂处理 + 机械脱水 + 人工加热干化；

③消化 + 浓缩 + 药剂处理 + 机械脱水 + 焚烧。

3. 成熟阶段

20 世纪 80 年代至今，此阶段的特点有两个，一个是进一步完善生物固体的处理技术，另一个是重视生物固体的处置与资源化利用。在生物固体处理技术方面，进一步取得进展，如生物固体消化工艺。从 20 世纪 80 年代起国际上开始研究开发好氧-厌氧两段消化、酸性发酵 碱性发酵两相消化及中温-高温双重消化等新工艺，但大多数还处在试验室阶段，达到生产规模的不多。

二、最新动向

1. 生物固体无害化工艺

除采用厌氧消化或好氧消化技术外，还开发了辐射处理（β 射线、γ 射线）技术，正在研究微波技术等。在生物固体的浓缩与脱水方面，除传统的重力浓缩外，又发展出气浮浓缩；脱水技术由空气干燥自然脱水（污泥干化床）发展为机械脱水，而机械脱水设备则已由真空过滤发展为板推压滤、离心脱水和带式压滤。

2. 生物固体的处置技术与资源化利用

生物固体的处置技术与资源化利用自 20 世纪 80 年代开始引起世界各国的重视。1995 年世界水环境组织将“污泥”一词改为“生物固体”，标志着人们对城市污水污泥的处理与处置走向成熟，其突出的特点是强调“生物固体”的资源化利用，使其更好地参与生态系统物质循环（地球化学循环和能量流动），走上人类社会与生态系统的和谐共处与可持续发展轨道。

近 20 年来，世界各国已越来越重视生物固体的堆肥化处置与

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

农用资源化技术以及能源化利用技术，逐渐淘汰并禁止广生物固体的投海处置技术。表 1－2 为欧美各国 1983 年生物固体的处置情况，表 1－3 为 1983 年日本生物固体的处置情况。

表 1－2　1983 年欧美各国污泥处置情况

国　名	年干污泥量（万 t）	各种处置方法的比例（%）				
		农田利用	填 地	投 海	焚 烧	其 他
英国	150	41	26	29	4	0
比利时	7	15	83	0	2	0
丹 麦	13	45	45	0	10	0
法 国	84	30	50	0	20	0
西 德	220	39	49	2	8	2
希 腊	0.3	0	100	0	0	0
爱尔兰	2	4	51	45	0	0
意大利	80	20	55	0	5	20
卢森堡	1.1	90	10	0	0	0
荷 兰	23	60	27	11	2	0
奥地利	14	小量	大量	0	30	0
芬 兰	13	40	45	0	0	16
挪 威	5.5	18	82	0	0	0
西班牙	4.5	60	*	20	*	0
瑞 典	21	60	*	0	*	0
瑞 士	15	80	10	0	10	0
美 国	450	31	24	18	21	6
欧洲合计	653.4	37	43	7	8	5

注：西班牙填地与焚烧为 20%；瑞典填地与焚烧为 30%。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 1-3 日本 1983 年的污泥处置情况

类别	填地	填海造地	投海	有效利用	合计	
					（万 m^3/年）	（%）
脱水泥饼	81.5	67.9	1.3	25.4	176.1	76
焚烧灰	14.8	12.3	0	3.0	30.1	13
干燥污泥	1.6	0	0	6.6	8.2	3.5
消化、浓缩污泥	0.3	0	16.9	0.5	17.7	7.5
合计（万 m^3/年）	98.2	80.2	18.2	35.5	232.1	
所占比例（%）	42	35	8	15		100

另据美国环保署估计，1988 年美国的 15 300 个城市污水厂年产干污泥为 760 万 t，但进行有效利用的还不到 40%。在有效利用的污泥中，用于农田的为 33.5 万 m^3，占 94%；用于建材的 2 万 m^3，占 6%。进入 90 年代后，英、美、欧盟各国的情况（如表 1-4 所示）也说明生物固体的农业回用仍是大势所趋，并不断增加。

表 1-4 英、美、欧盟各国生物固体回用与处置情况

国别、组织	各种处置方法比例（%）						
	农业回用	填埋	焚烧	土地恢复	专用地	森林园艺	其他
英国	60	4	19	3	3	2	9
美国	61	17	14	—	2	—	6
欧盟	53	22	22	—	—	—	3

通过简单的对比可以看出，从 20 世纪 80 年代到 90 年代，西方发达国家对生物固体的处置与利用发生了较大的变化，其

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

最新动向是：

①投海处置方法已被弃用；

②填埋处置所占比重有较大幅度降低；

③焚烧处置技术仍然比较重要；

④农业回用日趋重要。

这些都值得引起我们注意和借鉴。

我国城市污水处理及生物固体资源化利用起步较晚。1949年建国前，上海有3个二级污水处理厂投入运行，但都采用湿污泥直接作农肥或经干化床干化后作农肥，没有污泥厌氧消化等稳定处理设施。直至20世纪五六十年代，西安、太原、鞍山、成都等地城市污水处理厂相继建设了污泥厌氧消化池，才取得了一些污泥处理的经验。自20世纪七八十年代开始，城市污水处理发展较快，至1990年建成污水处理厂80余座，日处理能力277万m^3，污水处理率仅为3.44%，而其中有污泥稳定处理设施的只有1/4，污泥处理、处置工艺及配套设备较为完善的还不到1/10。进入90年代，城市污水的处理有了较快的发展，处理量已有较大幅度增加，2000年全国湿污泥产生量已达2 000万t/年（96%含水率），而其中进行稳定处理的很少，大部分用于填埋或农用，故存在严重的卫生与环境污染隐患，必须进行科学的管理与利用。

第三节　污泥处理处置与资源化的意义

生物固体含有大量的有机质和N、P、K等营养元素，如表1-5、1-6所示分别为广东省城市污水厂及桂林市城市污水厂生物固体中有机物及营养元素的含量。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 1-5 广东省部分城市生物固体氮、磷、钾及有机质质量比

项目	城市名称				牛粪
	广州	深圳		佛山	
	消化污泥	生污泥	消化污泥	消化污泥	
有机质（g/kg）	303.77	600.38	261.70	290.32	380.21
全 N（g/kg）	24.98	36.97	19.87	29.60	11.83
全 P（g/kg）	11.66	17.67	12.18	18.37	11.83
全 K（g/kg）	16.05	21.52	12.36	10.28	7.74
有效 N（mg/kg）	2316.94	2449.42	2325.87	2541.56	
有效 P（mg/kg）	1545.16	989.34	522.66	2356.14	
有效 K（mg/kg）	4549.04	899.36	396.28	4915.91	

表 1-6 桂林市城市污水厂不同处理方法产生的生物固体中营养物质质量分数

样品号	处理方法	有机质（%）	N 的质量分数（%）	P_2O_5 的质量分数（%）	K_2O 的质量分数（%）
1	传统活性污泥法	55	7.6	1.1	0.8
2	氧化沟	39	3.8	1.6	0.6
3	A^2/O	37	4.3	2.4	1.4

可见，生物固体中有机质和营养元素含量均很高。一般除 K 含量稍低外，其他营养物质含量甚至高于牛粪、猪粪等农家肥，所以特别适合于做土壤改良剂，用于农林牧地的土壤保养和改良修复。

近 30 年来，由于人口骤增，工业迅速发展，导致了酸雨

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

频繁，致使土壤酸化加重。据报道，我国广东、四川、贵州、广西、江西、福建、江苏、浙江、湖北、湖南、陕西、山东、吉林、上海等20个省市先后出现过酸雨、酸雾或酸雪，其中，四川、广东、贵州、广西已成为与欧洲和北美洲并列的世界三大酸雨区之一。我国9个重要酸雨区的酸化土壤面积已达200万公顷，由于多年来对土地的重用轻养，特别是近几十年来大量使用化肥农药，加上水土流失和土地沙化，导致了土壤肥力的普遍下降。如我国西北黄土高原、黄淮海平原大面积中低产土壤，目前有机质含量已下降到0.6%～1.2%。在东北三江平原，土壤有机质含量已由10%～15%下降到3%～5%。第二次全国土壤普查1403个县的结果显示，我国土壤无障碍性耕地只占耕地面积的15.3%，土壤有机质低于0.6%的耕地占10.6%，耕地总面积的52.6%缺磷、23%缺钾，14%磷钾俱缺，我国已有2/3的土地退化严重，影响了农业生产和粮食产量，关系到农业及整个国民经济的可持续发展。如何才能解决这一严重问题呢？我们只有从生态学的规律和原理出发，通过生态工程手段来尽量对土壤进行修复或改良，积极推行生态农业模式。近年来，日益增长的巨量生物固体和城市有机垃圾为这一问题的解决提供了一定的物质基础，因此，生物固体的农业回用资源化对土壤的生态修复具有重要的战略意义。

由于生物固体含有机质高，易腐变质，且一般含有大量的重金属物质（如铜、铅、砷、镉、汞、铬、铝、镍、硒、锌等）和大量的病原菌及病毒微生物，并可能含有各种毒性有机物，因此，在其农业回用或资源化利用之前，必须进行适当的处理与处置，以达到稳定化、无害化、减量化。可见，对生物固体的处理处置是十分必要的，对其资源化利用有重要的实际意义。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

第二章　城市污水厂污泥的性质与特点

第一节　污泥的分类

生物固体的分类主要有两个依据，一个是依据生物固体的性质，另一个是依据生物固体从污水中分离的过程。

按生物固体的性质，可将其分为污泥和沉渣两大类。以有机物为主要成分的部分称为有机污泥，它是生物固体的主体；以无机物为主要成分的部分称为沉渣。有机污泥的主要特性是有机物含量高，容易腐化发臭；颗粒细小，相对密度较小；含水率高，脱水较困难，呈胶状结构，它往往含有较多的植物营养素、寄生虫卵、致病微生物及重金属离子、毒性有机物等；流动性较好，易于用管渠输送。初沉池、二沉池的沉淀物均属此类。沉渣的主要特性是颗粒较粗，相对密度较大，易脱水；但流动性较差，不易用管渠输送，也不易腐化。沉砂池及某些工业废水物理、化学处理过程中的沉淀物（如铁屑、焦炭沫、石灰渣等）均属沉渣类。

按污水的处理方法（即生物固体从污水中分离的过程），生物固体可分为以下几类：

（1）初沉污泥

指污水一级处理过程中产生的沉淀物，其性质随污水的成分，特别是混入的工业废水的性质而发生变化。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

（2）活性污泥

指活性污泥法处理工艺二沉池产生的沉淀物，扣除回流到曝气池的那部分后，剩余的部分称为剩余活性污泥。

（3）腐殖污泥

指生物膜法（如生物滤池、生物转盘、部分生物接触氧化池等）污水处理工艺中二次沉淀池产生的沉淀物。

（4）化学污泥

指化学强化一级处理（或三级处理）后产生的污泥。

依据污泥的不同产生阶段分类如下：

（1）生污泥

指从沉淀池（包括初沉池和二沉池）排出来的沉淀物或悬浮物的总称。

（2）消化污泥

指生污泥经厌气分解后得到的污泥。

（3）浓缩污泥

指生污泥经浓缩处理后得到的污泥。

（4）脱水干化污泥

指经脱水干化处理后得到的污泥。

（5）干燥污泥

指经干燥处理后得到的污泥。

第二节　污泥的性质与特点

生物固体的性质主要包括：生物固体的含水量与含水率、流变特性、脱水性能与污泥比阻、挥发性固体和灰分、可消化度、湿污泥的密度与干污泥的密度、肥分、污泥的热值与可焚烧性以及生物固体的毒性与危害性等。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

一、生物固体的含水量与含水率

生物固体中所含水分的多少称为含水量，用含水率表示。含水率是指单位质量的生物固体所含水分的质量分数。即

$$P = \frac{m_w}{m_s + m_w} \times 100\% \qquad (2-1)$$

式中：P——生物固体的含水率，%；

m_w——生物固体中的水分质量；

m_s——生物固体的总固体质量。

生物固体的含水率一般都相当大，相对密度接近于1。在生物固体的浓缩过程中，可用下式来换算体积、质量及其中干固体含量之间的关系：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{m_{s1}}{m_{s2}} = \frac{100 - P_2}{100 - P_1} = \frac{c_2}{c_1} \qquad (2-2)$$

式中：V_1，m_{s1}，c_1——含水率为 P_1 时的生物固体体积、质量及干固体质量浓度。

V_2，m_{s2}，c_2——含水率为 P_2 时生物固体的体积、质量及干固体质量浓度。

公式（2-2）适用于含水率在65%以上的生物固体，原因是当 $P<65\%$ 时，生物固体的体积由于颗粒具有弹性，不再收缩。

当生物固体的含水率低到污泥颗粒之间的空隙不再被水填满时，就形成泥饼，泥饼具有体积大体不变的特点，可用以下公式计算：

$$V = \frac{m_s}{(1-\varepsilon)\rho_s\rho_w} \qquad (2-3)$$

式中：V——泥饼体积，L；

m_s——生物固体中干固体的质量，kg；

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

ρ_w——水的密度，kg/L；

ρ_s——干固体相对密度；

ε——污泥孔隙率，一般为 40% ~ 50%。

二、生物固体的流变特性

生物固体含水率高，所含固形物多为微生物，所以实际上是一种生物流体（悬浮液）。流变特性是物质（特别是流体）的一种重要物理性质，流变学（rheology）是研究物质变形与流动的科学，其目的是探索变形、流动等物质的力学行为与其物质结构之间的关系。因此，生物固体的流变特性对污泥的输送、脱水及后续处理与资源化有重要影响。

长期以来，学术界虽已认识到污泥具有非牛顿流体性质，但均只测得污泥为假塑性流体或塑性流体。近年来，笔者对酵母渣泥和广州城市污水处理厂的浓缩污泥等进行研究发现，这些生物固体不是一般的非牛顿流体，它们具有明显的粘弹性流变特征。

1. 关于时变与非时变液体的基本理论

液体可分为牛顿型液体和非牛顿型液体，非牛顿型液体又可分为时变型与非时变型（粘弹性体），图 2-1 为所有非时变型液体的流变曲线（$\tau-\gamma$）图，可见，非时变液体包括：牛顿液体（1）、拟塑性液体（2）、胀塑性液体（3）、宾汉液体——塑性液体（4）、屈服拟塑性液体（5）与屈服胀塑性液体（6）6 种，其特点是流变状态方程中，剪切应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 之间的关系与时间无关

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \qquad (2\cdot4)$$

当 τ 与 $\dot{\gamma}$ 之间的关系与时间有关时，液体为时变型液体，表现出粘弹性。考虑液体在振动情况下的性质，其动粘弹性的流变

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

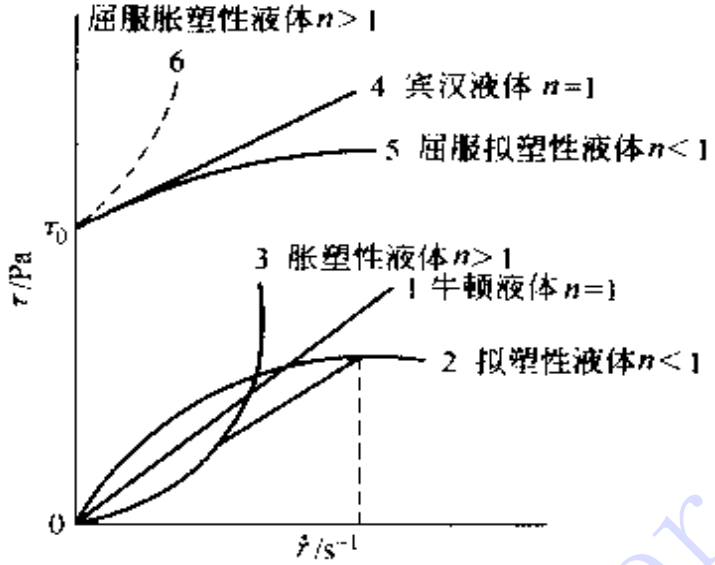


图 2-1 非时变液体的流变曲线

方程为

$$\tau = \gamma_0(G'\sin\omega t + G''\cos\omega t) \tag{2-5}$$

$$|G| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \tag{2-6}$$

$$G' = |G|\cos\delta \tag{2-7}$$

$$G'' = |G|\sin\delta \tag{2-8}$$

$$\tan\delta = G''/G' \tag{2-9}$$

式中：τ 为剪切应力，Pa；$\dot{\gamma}$ 为剪切速率，s^{-1}；$|G|$ 为绝对动弹性模量；G' 为动弹性模量（弹性），称贮存模量；G'' 为弹性模量损失（粘性），又称损耗模量；δ 为相位差。

2. 生物固体的塑性特征

塑性流体又叫宾汉（Bingham）流体，其流变模型为

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma} \tag{2-10}$$

式中：τ_0 为屈服塑应力，Pa；k 为塑性粘度，Pa·s。

前人已测得初沉污泥、消化污泥、及活性污泥的 τ_0 与 k 值，如表 2-1 所示。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 2-1 一些生物固体的 τ_0、k 实测值

生物固体种类	温度（℃）	固含率（%）	τ_0（Pa）	k（Pa·s）
水	20	0	0	0.0098
初沉污泥	12	6.7	42.983	0.2744
消化污泥	17	10	15.009	0.9025
消化污泥	17	12	22.014	0.9614
消化污泥	17	14	29.018	0.9908
消化污泥	17	16	43.027	1.1380
消化污泥	17	18	61.038	1.1576
活性污泥	20	0.4	0.1	0.0589
活性污泥	20	0.4	0.07	0.0491
活性污泥	20	0.2	0.2	0.0687

3. 生物固体的粘弹性

（1）酵母渣泥的粘弹性

图 2-2 所示为酵母渣泥（固含量 127 g/L）在不同温度（25℃、28℃、31℃、35℃）下的 $\tau-\dot{\gamma}$ 流变曲线。不难看出，其表观粘度随温度升高而升高，其流变曲线在 25℃、28℃时类似于 Bingham 型液体，但随着温度升高，其流变曲线出现复杂的变化，成弯曲状，对照图 2-1 可知，它与非时变液体中的任何一种都不相同。由图 2-3 可知，存放时间对其流变特性（$\tau-\dot{\gamma}$）也有影响，当该液体存放 24 h 后，表观粘度有所降低，但 $\tau-\dot{\gamma}$ 曲线仍为弯曲状，说明该液体具有时变性。

对该类渣泥进行粘弹性测试，表明它确实属于粘弹性生物固体，如图 2-4～图 2-7 所示。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

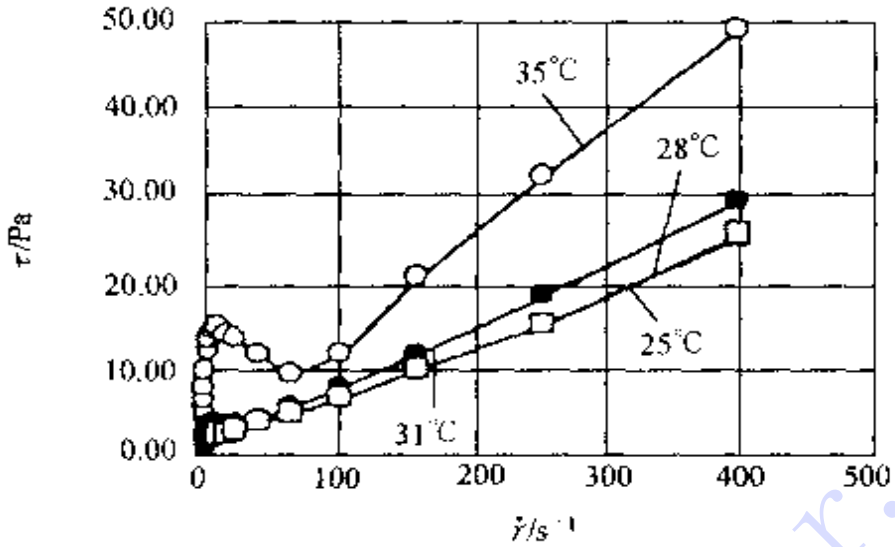


图 2-2　温度对酵母渣泥流变特性的影响

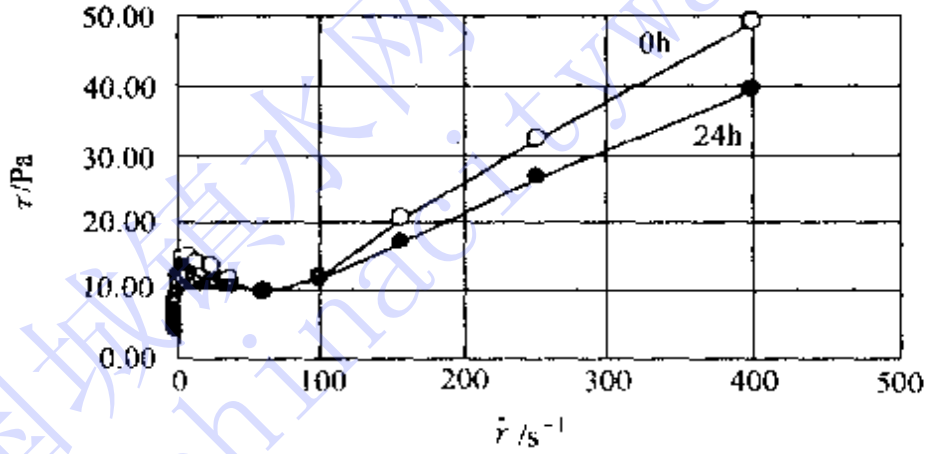


图 2-3　存放时间对酵母渣泥流变特性的影响

由图 2-4 和图 2-5 分析可知，当应变都是 1% 的情况时，温度升高，其弹性有小量增加，而粘性变化不大；由图 2-6、图 2-7 分析可知，当应变都是 10% 时，随着温度升高其弹性和粘性均有大幅度增加。温度的影响在 28～35℃ 范围，特别是 31～35℃ 范围对酵母渣泥的粘弹性有大的影响，这与图

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

2－2所示的结果是一致的。

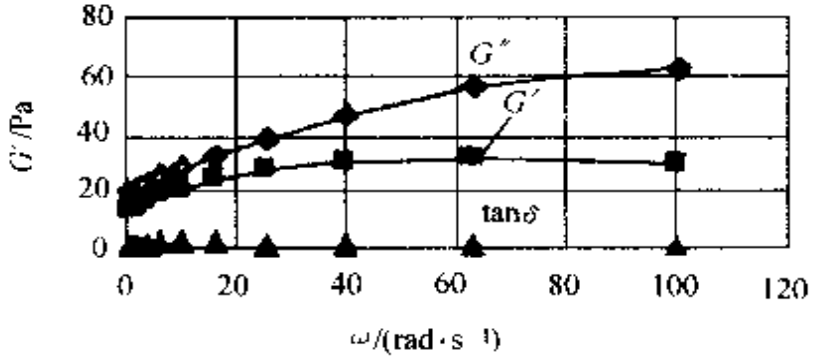


图 2－4　酵母渣泥的粘弹性
（应变：1%，T＝298.2K）

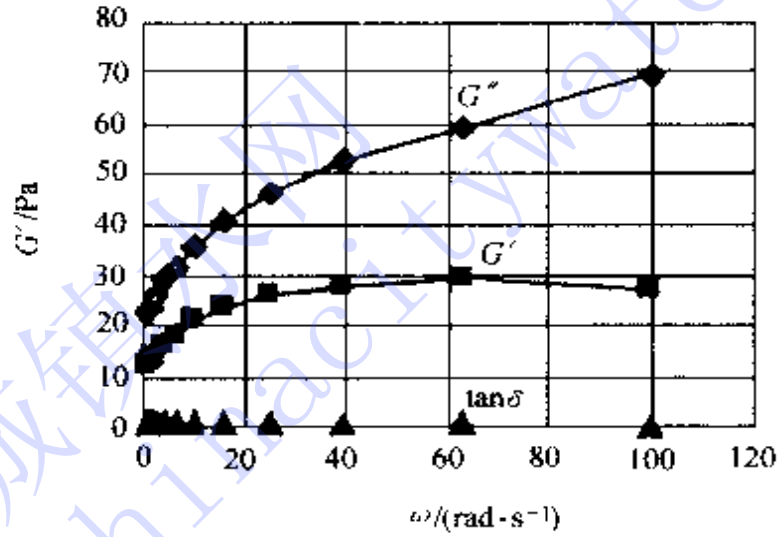


图 2－5　酵母渣泥的粘弹性
（应变：1%，T－ 301.2K）

另外，对照图 2－5、图 2－6 可知，应变增加也对粘弹性有较大影响。

（2）城市污水厂污泥的粘弹性

最近，笔者对广州猎德污水处理厂的浓缩污泥（含水率 96.72%）及离心处理后的污泥的流变特性进行了研究，发现

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

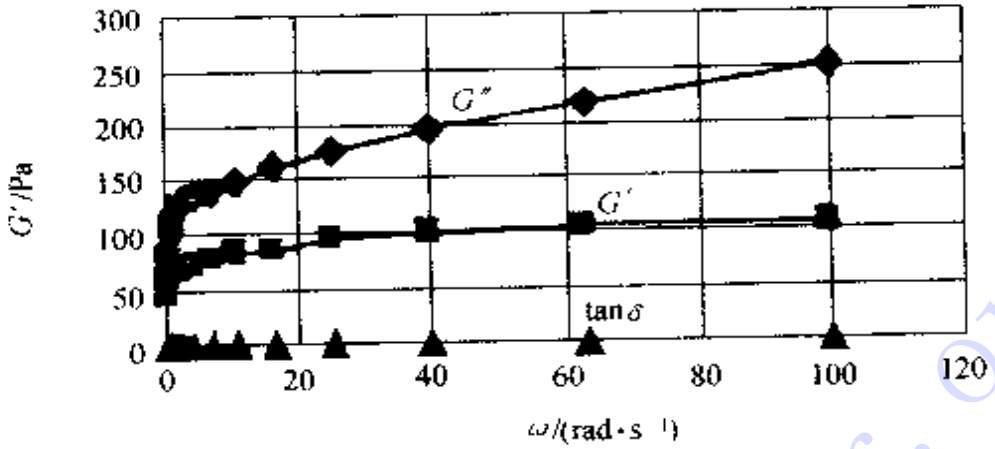


图 2－6　酵母渣泥的粘弹性
（应变：10%，$T=303.2$K）

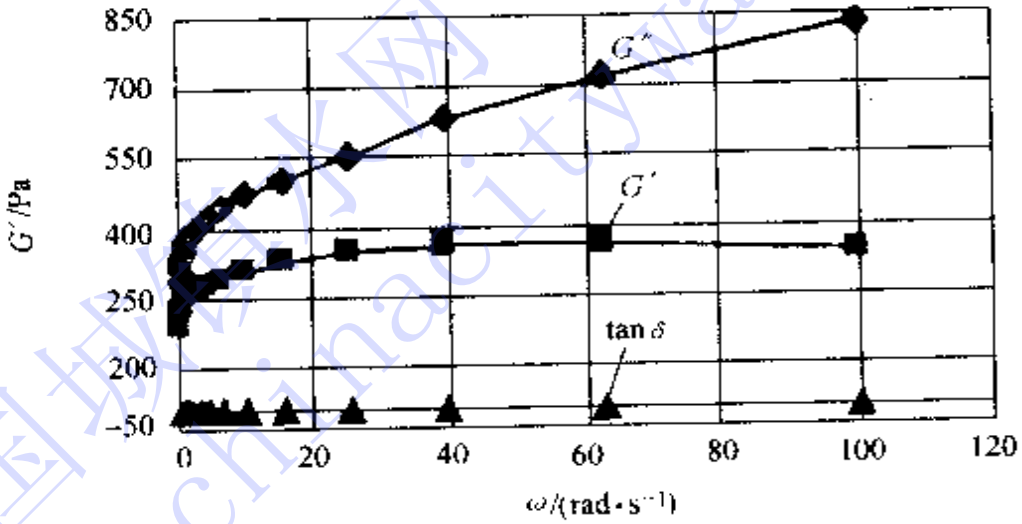


图 2－7　酵母渣泥的粘弹性
（应变：10%，$T=308.2$K）

广州浓缩污泥为屈服拟塑性流体，且具有明显的粘弹性特征。这里仅给出浓缩污泥的部分有关结果，如图 2－8～图 2－10 所示。

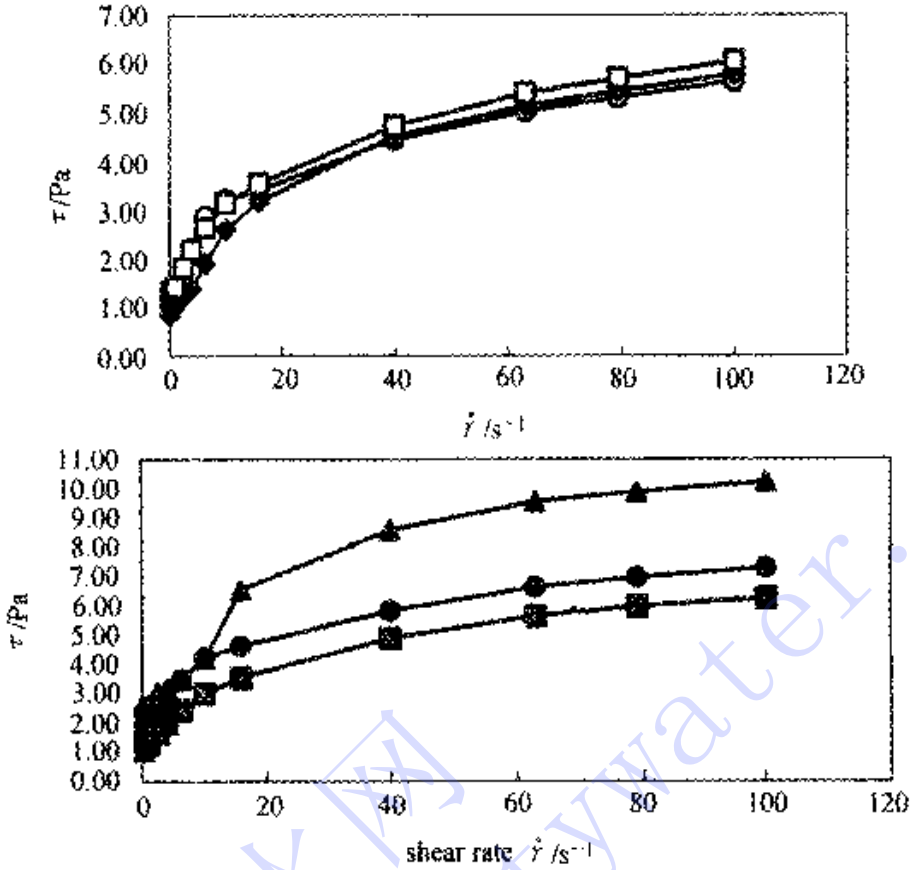


图 2-8 广州浓缩污泥的流变曲线

○—293.2K；◆—298.2K；□—301.2K；
■—305.2K；▲—308.2K；●—313.2K

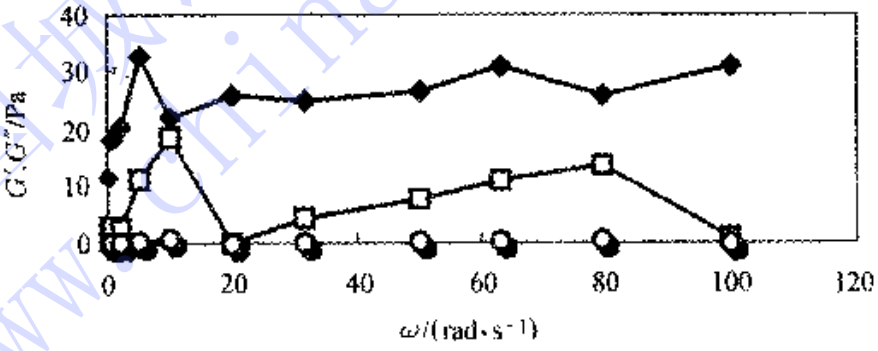


图 2-9 广州浓缩污泥的粘弹性（293.2K，应变≈1%）

◆—G'；□—G''；○—$\tan\delta$

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

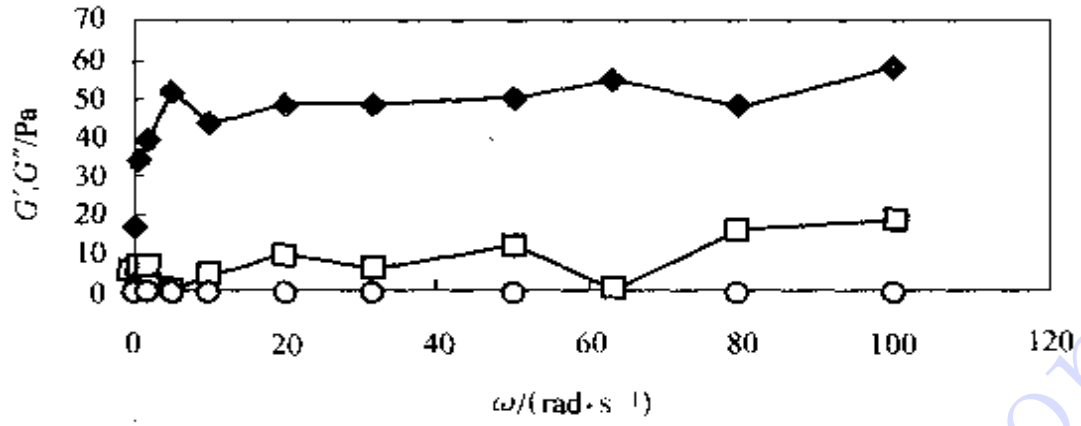


图 2－10　广州浓缩污泥的粘弹性（308.2K，应变＝1%）

◆—G′；□—G″；○—tanδ

三、生物固体的脱水性能与污泥比阻

生物固体中的水分主要有间隙水、毛细结合水、表面粘附水、内部水等 4 类。所谓间隙水是被大小生物固体颗粒包围的水分，约占生物固体中水分的 70%，它并不与固体直接结合，因而容易分离，此类水在中间调节池停留数小时即可显著减少。毛细水是指在固体颗粒接触面上由毛细压力结合，或充满于固体与固体颗粒之间或充满于固体本身裂隙中的水分，约占生物固体水分的 20%，此类水的去除需施以与毛细水表面张力的合力相反方向的作用力，如离心机的离心力、真空过滤机的负压力、电渗力或热渗力等，方可达到去除的目的。表面粘附水是比毛细结合水更难分离的水，它是粘附在生物固体或小颗粒表面上的水分，此类水分分离需采用电解质作为混凝剂辅助进行分离。内部水是指微生物细胞内部的液体。间隙水、毛细结合水、表面粘附水均为外部水，去除内部水必须破坏细胞膜，故使用机械方法难以奏效，可采用高温加热或冷冻等措施将其转变成外部水，也可通过生物分解手段，如好气氧化、堆

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

肥化、厌气消化等予以去除。

为了便于生物固体的输送、处理与处置，要求对生物固体进行脱水处理。脱水性能是指脱水的难易程度，可用有关的过滤装置进行测算。污泥比阻也可反映生物固体的脱水性能，可用于确定最佳的混凝剂及其投加量、最合理的过滤压力及计算过滤产率等。

污泥比阻是指单位过滤面积上，滤饼单位干固体质量所受的阻力：

$$\gamma = \frac{2pA^2b}{\mu\omega} \qquad (2-11)$$

式中：γ——污泥比阻，m/kg；

p——过滤压力，N/m^2；

A——过滤面积，m^2；

b——污泥性质系数，s/m^6；

μ——滤液动力粘度，Pa·s；

ω——单位体积滤液产生的滤饼干重，kg/m^3。

四、挥发性固体与灰分

挥发性固体（VSS）代表生物固体中有机物的含量，又叫灼烧减重。灰分代表无机物的含量，又叫固定固体。可以通过烘干、高温（550℃、600℃）焚烧称重测得。

五、生物固体的可消化程度

生物固体中有一部分易于分解为甲烷（CH_4）、二氧化碳（CO_2）和水，另一部分不易或不能被分解，如纤维素、脂肪、聚乙烯、橡胶制品等。生物固体的可消化程度表示生物固体中挥发性成分被消化分解的百分数，它是生物固体消化的技术界限。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

六、湿污泥密度与干污泥密度

湿污泥的质量等于单位体积所含水分质量与固体物质量之和。湿污泥的质量与同体积水的质量之比，称为湿污泥的密度。用公式表示为：

$$\rho = \frac{P + (100 - P)}{P + \frac{(100 - P)}{\rho_s}} = \frac{100\rho_s}{P\rho_s + (100 - P)} \qquad (2-12)$$

式中：ρ——湿污泥的相对密度；

P——污泥的含水率%；

ρ_s——干固体的相对密度。

若干固体中挥发性固体所占百分数为 P_v，密度为 ρ_v，固定固体的密度为 ρ_f，则干污泥的平均密度为：

$$\rho_s = \frac{100\rho_f\rho_v}{100\rho_v + P_v(\rho_f - \rho_v)} \qquad (2-13)$$

湿污泥的平均密度为：

$$\rho = \frac{25\,000}{250P + (100 - P)(100 + 1.5P_v)} \qquad (2-14)$$

七、生物固体的肥分

生物固体中含有大量的植物营养素、有机物及腐殖质等，如表 1-5、表 1-6 所示。生物固体中的有机物、腐殖质能明显地改善土壤的物理、化学性质，提高土壤微生物的活性，改善土壤的结构，提高保水能力和抗蚀性能，是良好的土壤改良剂。生物固体中的营养元素主要包括 N、P、K。氮能促进植物茎叶的生长，其中的硝态氮可被植物直接利用，氨氮在土壤中分解氧化后可被植物利用。磷能激发植物根部的繁殖，加速

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

成熟和增加植物对病虫害的抵抗能力。钾能促进植物的生长活力，是发育木质枝干、果浆、构成叶绿素的重要成分，并能促进茎叶的生长和增加抵抗病虫害的能力。此外，生物固体中还含有大量的重金属和微量元素，有些对植物生长也是必需的。

八、生物固体的热值与可燃烧性

生物固体的主要成分是有机物，可以燃烧，生物固体的干基热值可以用弹式量热器测定。

据测算，不同来源和性质的生物固体，其干基热值有所不同，如表2-2、表2-3所示。

表2-2 不同污泥的干基热值

污泥种类	干基热值（kJ/kg）
初次沉淀池污泥	
新鲜污泥	15 800～18 162.1
消化污泥	7 189.6
初沉池污泥与腐殖污泥混合	
新鲜污泥	14 880.8
消化污泥	6 729.8～8 109.2
初沉池污泥与活性污泥混合	
新鲜污泥	16 929
消化污泥	7 440.4
新鲜活性污泥	14 880.8～15 190.12

表2-3 不同活性污泥的燃烧热值

成分	污泥			
	1#	2#	3#	4#
C（%）	63.4	65.6	55.0	51.8

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

续表

	污泥			
H（%）	8.2	9.0	7.4	7.2
O（%）	21.0	20.9	33.4	38.0
N（%）	4.3	3.4	3.1	3.0
S（%）	2.2	1.1	1.1	微量
挥发物质（%）	47.9	72.5	51.4	82.0
挥发性固体（kJ/kg（干））	29820.1	29055.18	25406.04	20879.1
总固体（kJ/kg（干））	14316.5	21088.1	13049.96	17138.0

污泥燃烧热值的经验公式有：

$$Q = 2.322\ 4a\left(\frac{100 - P_v}{100 - G} - b\right)\left(\frac{100 - G}{100}\right) \quad (2-15)$$

式中：Q——污泥燃烧的干基热值，kJ/kg；

P_v——挥发性固体百分率，%；

G——在污泥脱水时投加的无机混凝剂量（占污泥干固体质量分数），当用有机聚合物时 $G=0$；

a，b——经验系数，与污泥性质有关，如表 2-4 所示。

表 2-4　污泥的 a，b 值

污泥种类	a	b
新鲜污泥和消化污泥	131	10
新鲜活性污泥	107	5

另有人提出直线方程计算式：

新鲜活性污泥：

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

$$Q = 160.72P_V^{1.085} \quad (2-16)$$

初次沉淀污泥：

$$Q = 197.42P_V^{1.085} - 1626 \quad (2-17)$$

根据经验，有机固体的干基热值与焚烧存在以下关系：

①$Q<3\ 340$ kJ/kg，可燃烧但需辅助燃料；

②$Q\in[3\ 340, 4\ 180]$ kJ/kg，可燃烧，但废热利用价值不大；

③$Q\in[4\ 180, 5\ 000]$ kJ/kg，焚烧供热、发电均可行；

④$Q\geqslant 6\ 000$ kJ/kg，可稳定燃烧供热或发电。

由表2-2、表2-3可见，各类污泥的干基热值均大大超过6 000 kJ/kg，所以干污泥具有很好的可焚烧性。但考虑到工程实际当中，生物固体经脱水后含水率一般只能达到70%～80%，加上生物固体中的挥发性固体只占70%左右，因此，可以对湿污泥的燃烧热值估计如下：

取干基热值高的新鲜污泥，其热值平均约为 $Q_{干}=16\ 000$ kJ/kg。

当含水率为80%时，

$$Q_{湿}=Q_{干}(1-80\%)=3\ 200\ (\text{kJ/kg})$$

当含水率为70%时，

$$Q_{湿}=Q_{干}(1-70\%)=4\ 800\ (\text{kJ/kg})$$

因此，湿污泥的焚烧性不理想，一般需加辅助燃料方可稳定燃烧。新鲜污泥热值较高，消化污泥热值较低，一般需加辅助燃料方可稳定焚烧。

九、生物固体的毒性与环境危害性

生物固体的毒性和危害性主要因其含有毒性有机物、致病

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

微生物和重金属3类物质。

1989年，美国环保局提出的生物固体农用处置规范中，曾特别提出需要监测的25种毒性有机物，并于1993年重新予以修订。其中有毒污染物主要是难分解的有机氯杀虫剂，如艾氏剂/狄氏剂（Aldrin/Dieldrin）、苯并芘（Benzopyrene）、氯丹（Dimethyl nitrosamine）、七氯（Heptachlor）、六氯代苯（Hexachlorobutaclience）、多氯联苯（polychloro biphenyls）等，由于这类优控污染物含量较高，农用后作物中的含量可能比未施用时土壤的培养物高出10倍以上。据王新明、盛国英、闵育顺测定，广州城市污水处理厂生物固体中可检测到毒性有机物50多种，主要包括邻苯二甲酸酯类、多环芳烃、苯酸类、芳香胺类、氨基甲酸、甲酯衍生物和杂环化合物等。因此，可能对环境和人类具有长期的危害性。

生物固体中含有比污水中数量高得多的病原物，主要有细菌类、病毒和虫卵等。常见的细菌有沙门氏菌、志贺氏菌、致病性大肠杆菌、埃希氏杆菌、耶尔森氏菌和梭状芽包杆菌等，常见的病毒有肝类病毒、呼肠病毒、脊髓灰质炎病毒、柯萨奇病毒、轮状病毒等，常见的虫卵有蛔虫卵、绦虫卵等。因此，生物固体必须经过处理处置方可资源化利用。

另外，生物固体中一般含有较大量的重金属物质。当城市污水以生活污水为主时，重金属物质的含量一般都较低；当城市污水中含有较多的工业污水时，重金属物质明显偏高，难以达到农业回用标准，如表2-5所示（吴启堂等列）。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 2-5 不同污水对城市污泥中重金属含量的影响[1]

城市污泥来源	生活污水（%）	工业污水（%）	重金属对污泥的质量比（mg/kg）						
			Cu	Pb	Zn	Hg	Cd	Ni	Cr
广州大坦沙	60	40	2291	245	2138		2.56	462	1550
佛山镇安	90	10	637.0	48.0	19.51		9.37		139.0
深圳滨河	60	40	1719	210	1945	2.95	2.37		195
苏州城西	100	0	88.7	81.6	1738		1.3	18.0	
太原杨家堡	65	35	149.2	54.5	775.1	6.96	0.95	39.1	42.6
太原北郊	70	30	222.6	49.8	1525	6.43	0.65	32.4	271.1
太原殷家堡	35	65	3068	53.3	1423	6.40	4.3	297.1	1411
太原镇城底	100	0	39.3	66.6	168.6	0.68		27.3	43.9
太原古交	100	0	28.4	42.3	261.2	0.61	0.05	32.9	49.1
控制标准[2]			500	1000	1000	15	20	200	1000

1. 不包括街道径流；

2. 土壤 pH>6.5。

中国城镇水网 www.chinacitywater.org

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

第三章　城市污泥的处理处置方法与回用类别

第一节　污泥的处理方法

污泥的处理方法主要有浓缩、消化、调理（预处理）、脱水、干燥等。进行生物处理的目的主要有3方面：

①减少水分，为后续处理、利用和运输创造条件，并减少生物固体最终处置前的容积。

②使生物固体卫生化、稳定化。通过处理，消除生物固体中的有毒有害物质，防止散发恶臭，避免导致病害及污染环境，尽量使生物固体达到稳定无害。

③改善生物固体的成分和某些性质，以利于应用并达到资源利用的目的。

下面就生物固体的几种主要处理方法分别进行介绍。

一、生物固体的浓缩处理

城市污水污泥含水率很高，一般为99.2%－99.8%，体积很大，因而对生物固体的处理、利用及输送都造成困难，故必先进行浓缩。浓缩后的生物固体近似糊状，含水率为95%－97%。生物固体浓缩的脱水对象是间隙水，当生物固体的含水率由99%降为96%时，体积可缩小到原来的1/4，但仍可保持其流动特性，可以用泵输送，运输方便，可大大降低运输费用

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

和后续处理费用。因此，生物固体浓缩是减少污泥体积最经济最有效的方法，特别是对剩余活性污泥的处理，尤其不可缺少。生物固体浓缩的方法主要有重力浓缩、气浮浓缩、离心浓缩等。

1、重力浓缩法

重力浓缩法是利用自然的重力沉降作用，使生物固体中的间隙水得以分离。在工程实际应用中，构造污泥浓缩池进行重力浓缩。重力浓缩池可分为间歇式和连续式两种，前者主要用于小型污水处理厂或工业企业的污水处理厂，后者用于大、中型污水处理厂。

连续式重力浓缩池形同辐射式沉淀池，可分为有刮泥机与污泥搅动装置、不带刮泥机以及带刮泥机的多层浓缩池 3 种。

带刮泥机和搅动装置的连续式重力浓缩池构造如图 3－1 所示。

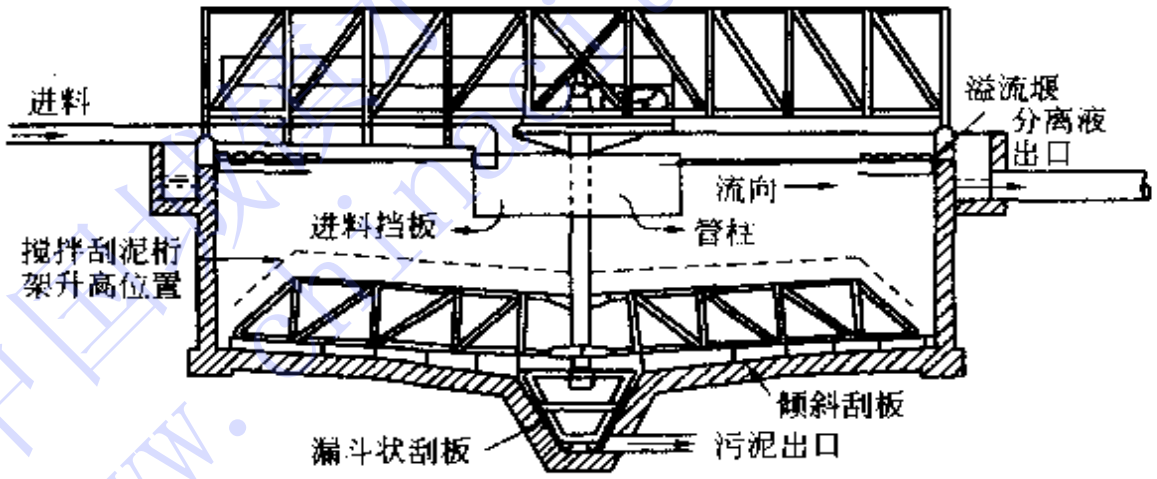


图 3－1　有刮泥机及搅动装置的连续式重力浓缩池

该类浓缩池一般都是直径为 5～20 m 的圆形钢筋混凝土构筑物。池底坡度一般为 1/100～1/12，污泥在水下的自然坡度

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

角为 1/20。进泥口设在池的中心，池周围设溢流堰。自进泥口进入的污泥向池的周围缓慢流动的过程中，固体粒子得到沉降分离，分离液则从溢流堰流入满流槽，被浓缩的污泥经刮泥机刮集到池子中心，然后用排泥管排出（排泥口使用螺旋运输机或泥浆泵）。在刮泥机上安装搅拌杆，连同刮泥机慢速旋转，线速度一般为 2～20 cm/s，可以提高浓缩效果，并缩短浓缩时间 4～5 h。通常，进泥可用离心泵，排泥需用活塞式隔膜泵或柱塞泵等。

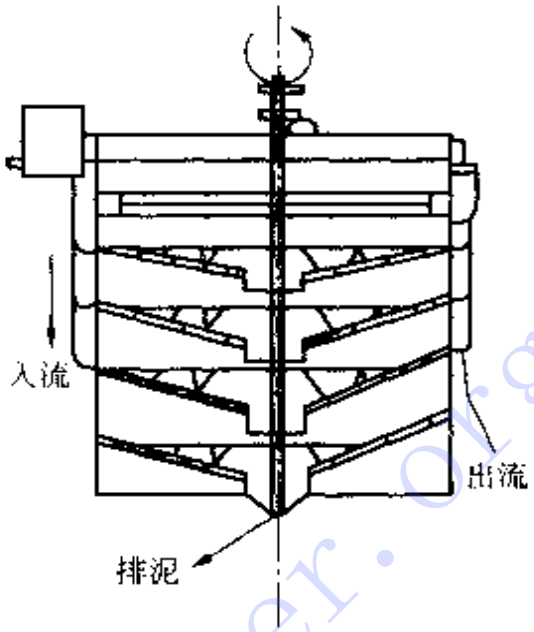


图 3－2　多层辐射式浓缩池

当用地受到限制时，可考虑采用多层辐射式浓缩池，见图 3－2。如不用刮泥机，可采用多斗式浓缩池，斗的锥角保持 55°以上，依靠重力排泥，如图 3－3 所示。

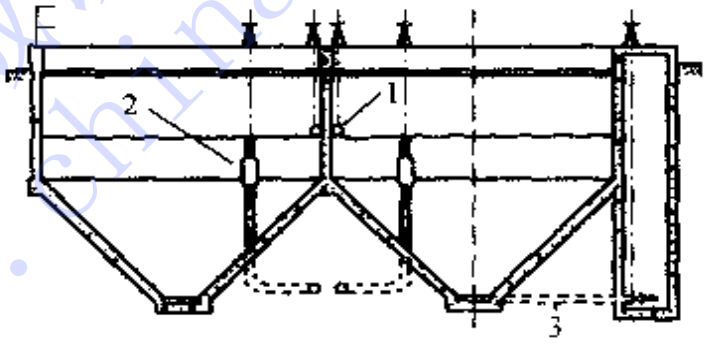


图 3－3　多斗连续式浓缩池
1—进口；2—可升降的上清液排除管；3—排泥管

重力浓缩法操作简便，维修管理及动力费用低，但占地面积较大。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

2. 气浮浓缩法

气浮浓缩与重力浓缩相反，该法是依靠大量微小气泡附着于悬浮污泥颗粒上，减小污泥颗粒的密度而强制上浮，使污泥颗粒与水分离的方法。气浮浓缩适合于粒子易于上浮的疏水性污泥，或悬浮液很难沉降且易于凝聚的场合。

与重力浓缩法相比，此法具有多方面的优点，主要表现在：

①浓缩度高，污泥中的固体物可浓缩到5%～7%。

②固体物质回收率高达99%以上。

③停留时间短，浓缩速度快。其处理时间为重力浓缩所需时间的1/3左右，因此设备简单紧凑，占地面积较小。

④操作弹性大，对于污泥负荷变化及四季气候变化均能稳定运行。

⑤由于污泥混入空气，造成好氧环境，不易腐败发臭。

⑥管理操作简单。

其主要缺点是基建费用和操作费用较高。

气浮法可有多种形式，除普通溶气上浮外，还有真空气浮、加压上浮和生物上浮等。在美国广为使用的是加压上浮法，可用于剩余活性污泥的浓缩。

3. 离心浓缩法

离心浓缩法的原理是利用生物固体中固液的差异，造成不同的离心力进行浓缩，该法占地面积小，造价低，但运行费用与机械维修费用高，经济性较差。一般很少用于污泥浓缩，但对于难以浓缩的剩余活性污泥可以考虑使用。

离心浓缩机主要有盘-喷嘴式、转盘式、篮式、转筒式等，浓缩效果和运行参数如表3　1、表3-2所示。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 3-1 盘-喷嘴式离心浓缩效果

污泥性质	SVI	入流污泥固体质量分数（%）	浓缩污泥固体质量分数（%）	固体产率（kg/h）	回收率（%）
活性污泥	70～350	0.4～1.1	2.5～8.4	95～485	50～99
好氧消化污泥	—	1.8～2.2	2.5～5.6	337～632	70～95

表 3-2 各种污泥离心浓缩后性能

污泥种类	离心机类型	容量（L/s）	供给污泥固体质量分数（%）	浓缩污泥固体质量分数（%）	固体回收率（%）	聚合混凝剂投加量（kg/t）
剩余活性污泥	转盘式(Disk)	9.5	0.75～1.0	5.0～5.5	90	不用
剩余活性污泥	转盘式(Disk)	25.3	—	4.0	80	不用
剩余活性污泥（经粗滤以后）	转盘式(Disk)	3.2～5.1	0.7	5.0～7.0	93～87	不用
剩余活性污泥（经粗滤以后）	转盘式(Disk)	3.8～17.1	0.7	6.1	97～80	不用
剩余活性污泥	篮式(Basket)	2.1～4.4	0.7	9～10	90～70	不用
剩余活性污泥		0.63～0.76	1.5	9～13	90	—
剩余活性污泥		4.75～6.3	0.44～0.78	5～7	90～80	不用
剩余活性污泥	转筒式(Solid-bowl)	6.9～10.1	0.5～0.7	5～8	65	不用
					85	<2.26
					90	2.26～4.54
					95	4.54～6.8

二、生物固体的消化处理

生物固体的消化是指在人工控制条件下，通过微生物的代

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

谢作用，使生物固体中的有机质稳定化的过程。生物固体的消化分为厌氧消化和好氧消化两种，一般说的生物固体的消化是指厌氧消化。

生物固体消化的微生物作用原理、特点、工艺类型、设备、运行管理等将在第五章中予以详述。

三、生物固体的调理（预处理）

生物固体调理是为了提高污泥浓缩和脱水效率的一种预处理。通常，由于有机污泥是以有机物微粒为主体的悬浮液，和水之间有很大的亲和力，可压缩性大，因而难以过滤、脱水。为了提高厌氧消化、过滤和脱水处理的有效性，以及改善污泥的卫生性能，进行调理是十分必要的，非常有利于后续堆肥、焚烧、运输、填埋以及土地利用。

生物固体调理的方法可分为化学法、物理法和生物法。化学调理运用一种或多种化学添加剂以改变污泥的特性，如无机和有机添加剂、臭氧、酸、碱和酶。物理调理是运用物理方法来改变污泥性质，主要有洗涤、热处理、冻融处理及机械能、高压、超声波及辐射处理等。生物调理实际是指好氧或厌氧消化过程。

下面主要介绍常用的洗涤处理、加药处理、热处理及冻融处理。

1. 洗涤处理

洗涤适宜于消化污泥的预处理，其目的在于节省混凝剂用量，降低机械脱水的运行费用。

污泥经厌氧消化后，其挥发性固体大为降低，但其重碳酸盐碱度可由数百 mg/L 增加到 2 000～3 000 mg/L，按固体量计算增加 60 倍以上，因此，在污泥加药处理前如不除掉重碳酸盐，就

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

要多消耗大量药剂，其反应机理如下：

铁盐混凝剂：

$$2FeCl_3 + 3Ca(HCO_3)_2 = 2Fe(OH)_3 \downarrow + 3CaCl_2 + 6CO_2$$

$$FeCl_3 + 3NH_4HCO_3 = Fe(OH)_3 \downarrow + 3NH_4Cl + 3CO_2$$

铝盐混凝剂：

$$Al^{3+} + 3HCO_3^- \longrightarrow Al(OH)_3 \downarrow + 3CO_2 \uparrow$$

$$Al_2(SO_4)_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow 2Al(OH)_3 \downarrow + 3CaSO_4 + 6CO_2 \uparrow$$

按上述反应计算，去除碱度需消耗大量的 $FeCl_3$ 或 $Al_2(SO_4)_3$，由于污泥消化后碱度增加数十倍，因此液相组分的混凝剂消耗量也相应增加几十倍，故对消化污泥直接投加混凝剂处理是很不经济的。

洗涤除可洗去消化污泥中的重碳酸盐碱度外，还可洗去部分颗粒很小、表面积很大的胶体颗粒，从而达到节约混凝剂的目的，同时也能提高污泥浓缩、脱水的效果。污泥洗涤后，碱度、COD、NH_3 - N、pH 值的大致变化如表 3 - 3 所示。

表 3 - 3　洗涤后碱度、COD、NH_3 - N、pH 值的变化

淘洗次数	1 次	2 次	3 次	淘洗后的水
碱浓度(mmol/L)	17.6～27.6	9.3～14.3	6.25～7.65	1.67～6.5
COD(mg/L)	1006～2707	593～1142	439～886	201～394
NH_3 - N(mg/L)	210～322	115.5～199.5	133	59.5～119
pH 值	7.34～8.05	7.25～8.05	7.5～8.05	7.1～8.02

洗涤过程包括：用洗涤水稀释污泥、搅拌、沉淀分离、撇除上清液。

洗涤用水可用二次沉淀池出水或河水，洗涤后的上清液的 BOD 与悬浮物浓度可高达 2 000 mg/L 以上，必须回流到污水处

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

理厂处理，因此势必增加污水处理的费用。经验认为，由于洗涤而节省的混凝剂费用与洗涤水的处理费几乎相等。

洗涤的工艺流程可分为单级洗涤、两级或多级洗涤及逆流洗涤等3种，如图3-4所示。

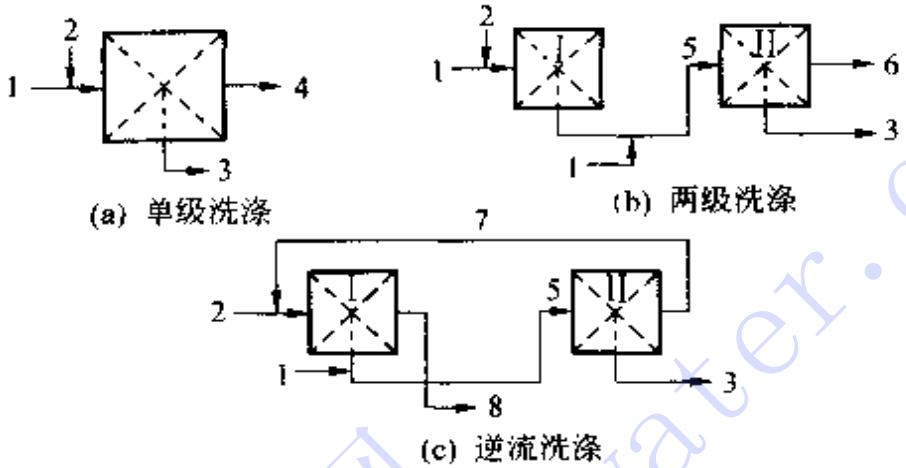


图3-4 污泥的洗涤流程

1—洗涤水；2—消化污泥；3—洗涤后污泥；4—上清级；
5—Ⅰ级洗涤后的污泥；6—Ⅱ级洗涤上清液；
7—Ⅱ级上清液回流；8—洗涤后上清液至初次沉淀池

应该指出，洗涤也有不足之处，主要是：

①洗涤在循环用水过程中，会逐渐富集有机物微粒，并带走污泥中的氮素，降低污泥的肥效。所以，当污泥用做土壤改良剂或肥料时，无需洗涤处理。

②经浓缩的生污泥，洗涤效果较差，此时可采取直接加药的方式进行调理。

2. 药剂调理

加药调理是利用化学药剂来改变污泥的性质，使污泥颗粒絮凝以改善脱水性能的化学调理法。化学药剂主要分助凝剂、混凝剂两大类。

助凝剂主要有石灰、硅藻土、酸性白土、珠光体、污泥焚烧

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

灰、电厂粉尘、水泥窑灰等惰性物质，其本身一般不起混凝作用，而在于调节污泥的 pH 值，改变污泥的颗粒结构，破坏胶体的稳定性，提高混凝剂的混凝效果，增强絮体强度。

助凝剂和混凝剂的使用方法有两种：一种是直接加入污泥中，投加量为 10～100 mg/L；另一种是配制成 1%～6% 的糊状物，预先粉刷在转鼓真空过滤机的过滤介质上，成为预覆助滤层，随着转鼓的运转，每周刮去 0.01～0.1 mm，刮完后再涂。

石灰、水泥窑灰等助凝剂是一类较好的污泥调理剂，较适合于生污泥的调理与稳定化。它可以使污泥的 pH 值提高到 11.0 以上，从而显著降低由沙门氏菌、绦虫卵、孢囊线虫和许多其他病原物所造成的潜在危害。进入 20 世纪 90 年代，欧美等国正在探求用这类方法将污泥调理后，直接堆肥利用的新工艺，省去脱水风干、干燥等环节，具有重要的开发价值和应用前景。

用于污泥调理的混凝剂包括无机混凝剂与有机高分子絮凝剂两类，且主要是阳离子型高分子絮凝剂。

无机混凝剂是一种电解质化合物，主要有铝系和铁系两大类。铝系化合物有：硫酸铝 $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$、明矾 $Al_2(SO_4)_3 \cdot K_2SO_4 \cdot 2H_2O$ 及三氯化铝 $AlCl_3$ 等。铁系化合物主要有：三氯化铁 $FeCl_3$、氯化绿矾 $Fe\begin{matrix}Cl\\SO_4\end{matrix}$、绿矾 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$、硫酸铁 $Fe_2(SO_4)_3$ 等。近 10 年来，人们又在研究开发聚铝铁、聚硅铝等新型的无机高分子絮凝剂。

有机高分子絮凝剂又分为合成高分子絮凝剂和天然高分子絮凝剂。高分子絮凝剂的主要种类见表 3－4。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 3-4 高分子絮凝剂的主要种类

分类		物质名称
聚合度	离子型	
低聚合度（相对分子质量为 1 000 至数十万）	阴离子型	藻朊酸钠、羧甲基纤维素（CMC）等
	阳离子型	水溶性苯胺树脂、聚硫脲、聚乙烯亚胺等
	非离子型	水溶性淀粉、水溶性尿素树脂等
	两性型	动物胶、蛋白质等
高聚合度（相对分子质量为 100 万～1 000 万）	阴离子型	水解聚丙烯酰胺、聚丙烯酸钠、聚苯乙烯磺酸、羧甲基 F691
	阳离子型	聚乙烯吡啶盐、聚乙烯亚胺等
	非离子型	聚丙烯酰胺、聚氧化乙烯等

合成高分子絮凝剂的主要产品是聚丙烯酰胺（PAM）及其阴离子型、阳离子型和两性型衍生物。它是一类应用性能优良的合成高分子系列絮凝剂，其产品约占整个高分子絮凝剂产销量的 80%，除 PAM 系列外，有应用价值的还有聚乙烯亚胺、聚苯乙烯磺酸、聚乙烯吡啶等絮凝剂。

天然高分子絮凝剂及其改性制品，主要有藻朊酸钠、羧甲基纤维素（CMC）等纤维素衍生物、羧甲基淀粉等水溶性淀粉衍生物、改性植物胶 CGA 等植物胶衍生物、壳聚糖衍生物等等，这类絮凝剂一般属于无毒性产品，适于作饮用水源水和食品行业等强化固液分离助剂。

除上述各种混凝剂外，另有一类开始受到重视的絮凝剂是生物絮凝剂。它是由某些微生物在适宜的生理条件（如营养物质、温度等）下，把糖类等转化为粘多糖——微生物胶（或者说微生物分泌的高分子物质）。国外已开始有商品出售，但价格暂时较高，应用性能也有待进一步研究提高。近几年人们对

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

微生物絮凝剂的基础研究做了大量工作，提出微生物絮凝剂性能主要由位于染色体上和染色体外的絮凝遗传基因决定，已从具絮凝性的酵母菌体细胞中分离出相对分子量为37 000 d的多肽和氨基酸类物质，将提高絮凝剂活性的研究引向深入。

3．热处理调理

将污泥加热，污泥中的细胞被分解破坏，细胞膜中的内部水游离出来，可以提高污泥的脱水性能。这种过程称为污泥的热处理。热处理也叫蒸煮处理，对于脱水性能很差的活性污泥特别有效。

污泥热处理被认为是一种钝化微生物最有效的方法之一。污泥经处理后，可溶性COD显著增加，可有利于消化过程的进行，脱水性能可大为改善。热处理污泥经机械脱水后，泥饼含水率可降到30%～45%，泥饼体积减小为浓缩-机械脱水法泥饼的1/4，便于进一步处置。在污泥的焚烧与堆肥处置中，热处理比加药处理更为适合。该法适用于初沉池污泥、消化污泥、活性污泥、腐殖污泥及它们的混合污泥。污泥热处理法的主要缺点是：污泥分离液COD、BOD浓度很高，回流处理将大大增加污水处理构筑物的负荷，有臭气，设备易腐蚀，需要增加高温高压设备、热交换设备及气味控制设备等，费用很高，这些条件通常限制了热处理法优点的充分发挥，因此难以普遍采用。

热处理主要分高温加压处理法和低温加压处理法两种工艺。

（1）高温加压处理法

高温加压处理法是把污泥加温到170～200℃，压力为9.81×10^4～1.47×10^6Pa，反应时间为1～2h。热处理后的污泥经浓缩即可使含水率降低到80%～87%，比阻降到1.0×

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

10^{11} s^2/kg，再经机械脱水，泥饼含水率可降低到30%～45%。

（2）低温加压处理法

低温加压处理法是把污泥加温并控制在150℃以下的热处理法。其主要特点是：分离得到的BOD_5浓度比高温加压法低40%～50%，锅炉容量可减少30%～40%，臭味也大为减少。因此，低温加压法比高温加压法有更好的发展前景。

4．冻融调理

污泥的冻融调理是将污泥冷冻到－20℃再行融解以提高污泥沉淀性和脱水性能的一种处理方式。该法能不可逆地改变污泥结构，使之变得更加紧密，并能减少脱水后污泥残留的水分。

污泥的冻融调理与热处理的共同之处是利用热力学方法改变污泥的温度，但据国外文献介绍，冻融调理所需热量比热处理显著减少，如常温下的1 g污泥水（20℃），冷冻到－20℃下需放热464 J。同样1 g污泥水，从20℃升温到100℃，进行热处理所需热量为2.6 kJ，所以利用热处理（蒸发）与冷冻处理相比，所需热量比值为：$\frac{2.6\times10^3}{0.5\times464}=11.2$。可见，污泥的冷冻脱水比热处理有着明显的经济价值。

污泥冻融后，其胶体性质完全被破坏，颗粒迅速凝聚沉降，上层即为上清液，沉降速度可提高2～6倍，过滤产率比冷冻前提高几十倍之多，因此可以不必用混凝剂处理而自然过滤脱水，节省可观的药剂费用。污泥冻融后，再经真空过滤脱水，可得含水率为50%～70%的泥饼，而用化学调理-真空过滤脱水，泥饼含水率为70%～85%。

对不同种类污泥分别采用冻融调理与化学调理法进行预处理，其脱水效果见表3－5。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 3—5 污泥冻融调理与化学调理脱水效果的比较

污泥种类	原污泥含水率（%）	真空过滤泥饼含水率（%）	
		冻融调理后	化学调理后
电镀污泥	92.5～98.2	54.6～69.3	78.7～87.4
酸洗污泥	97.5	47.0	78.3
炼铁污泥	97.2	55.2	85.1
自来水厂污泥	89.8～95.1	47.7～56.2	72.1～88.5
造纸厂污水污泥	95.1～96.2	52.9～65.2	73.8～79.4

污泥冻融除无需混凝剂，显著提高污泥脱水性能和沉降速度，比热处理显著降低热能消耗等优点外，还有促进胞外多聚体集中从污泥中释放出来，在某些情况下还能有效地杀灭污泥中有害微生物的特点。

冻融调理的主要不足是难以适用于活性污泥，因为活性污泥凝聚作用强烈，其水分子结合的程度比脱水后残余分子结合得更加紧密。

污泥冻融法最早于 1916 年已有报导，英国于 1961 年开始用于自来水厂的污泥处理，以后亦有水厂采用。英国 Harwell 原子能研究所、比利时 Mol 原子能研究所、日本大阪府立放射中央研究所等单位均有采用。此种方法在能够进行自然冷冻的地区可以考虑采用甚至推广，如我国北方地区、世界其他寒冷地区。

四、生物固体的干化与脱水处理

生物固体经浓缩处理后，含水率为 95%～97%，体积还很大，仍可用管道输送。为了有效而经济地进行生物固体的干燥、焚烧、堆肥、填埋等进一步处置，必须充分地脱水而减量

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

化，使之能被当成固态物质来处理。在整个生物固体处理系统中，脱水是最重要的减量化手段。脱水的方式主要有自然干化、机械脱水及热处理法。下面主要介绍生物固体的自然干化与各种机械脱水方法。

1．生物固体的自然干化

自然干化可分为晒砂场与干化场两种。前者用于沉砂池沉渣的脱水，后者用于初沉池污泥、腐殖污泥、消化污泥、化学污泥及混合污泥的脱水。干化后的泥饼含水率一般为 75%～80%，体积可缩小到 1/10～1/2。

（1）晒砂场

晒砂场一般做成矩形，混凝土底板，四周有围堤或围墙。底板上设排水管及砾石滤水层，砾石滤水层一般厚 800 mm，砾石粒径以 50～60 mm 为宜。沉砂经重力或提升排到晒砂场后，很容易晒干，渗出的水由排水管集中回流到沉砂池前与原污水合并处理。晒砂场面积根据每次排入晒砂场的沉渣厚度为 100～200 mm 进行计算。

（2）干化场

干化场是一种较古老、较简便、采用广泛的污泥脱水方法。其原理是依靠渗透、蒸发、撇除 3 种方式脱除水分，此种方式所脱除水分的比例随生物固体的性质和当地气候条件而不同。

根据滤水层构造的不同，干化场可分为自然滤层干化场（无人工排水滤层）和人工滤层排水干化场两种。前者适用于自然土质渗透性能好，地下水位低，渗透下去的污泥水不会污染地下水的地区，例如我国西北、西南某些地区可适当采用此类干化场；后者的底板是人工不透水层，上铺滤水层，渗下去的污泥水由埋设在人工不透水层上的排水管截留，送到处理厂重复处理。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

图 3-5 所示为人工滤层干化场的基本构造。

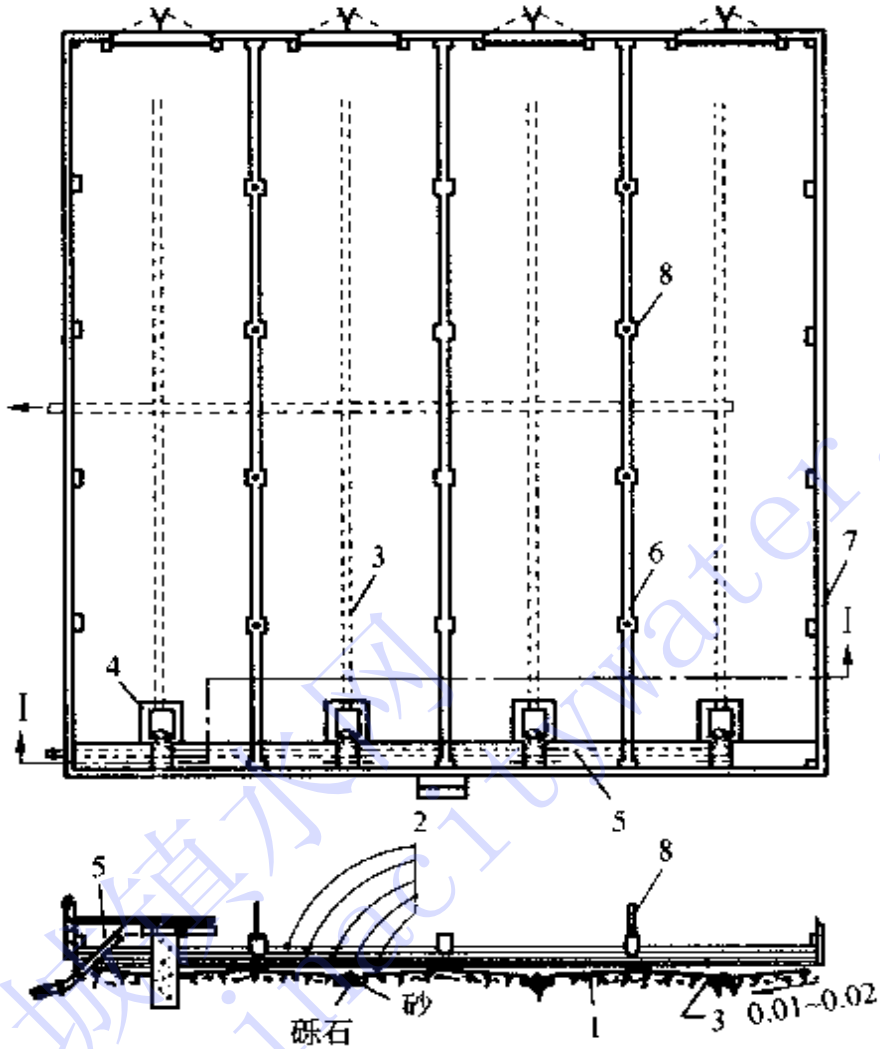


图 3-5 人工滤层干化场

1—不透水底板；2—滤层；3—排水管系统；4—溅泥面；5—输泥管与切门；6—隔墙；7—围堤；8—柱子

它由不透水底板、滤层、排水管系统、布泥系统、隔墙、围堤及泥饼的铲除与运输系统组成。

干化场的脱水方式包括渗透、蒸发、撇除 3 种方式，且以前两种为主。渗透脱水一般在生物固体排入干化场的最初 2～3 d 内完成，此时含水率可降到 85% 左右（也有蒸发作用），

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

接着依靠蒸发继续干化，根据气候条件和污泥性质的不同，1周到几周后含水率可降至70%左右。

该法适用于含无机颗粒多的生物固体，含油脂多的污泥则不易干化。干化场具有结构简单、管理方便、基建费用低、一般不需化学调理等特点，但占地面积大，能占到整个污水处理厂面积的25%；另外，敞开式的干化场卫生性较差，且易受气候条件影响。

2．生物固体的机械脱水

生物固体机械脱水的主要方法有：

①采取加压或抽真空将滤层内液体用空气或蒸汽排除的通气脱水法，常采用真空过滤式；

②靠机械压缩作用的压榨法，对高浓污泥采用压滤式；

③利用离心力作为推动力除去料层内液体的离心脱水法。

日本广泛使用的脱水设备中，真空过滤式占总数的75%，加压过滤式占13%，离心式占12%。几种主要过滤脱水方式的脱水效果（以滤饼中的含水率计）、电耗、基建费与操作运行费的比较见表3-6。

表3-6 几种主要过滤脱水方式的性能与消耗比较（日本）

项目	过滤脱水方式				
	真空式	离心式	过滤压榨式	皮带压榨式	螺旋压榨式
基建费*（日元/t）	1 200	2 300	2 600	1 200	—
运转费*（日元/t）	11 500	22 000	21 000	10 600	—
滤饼水分（%）	70～80	74～80	55～65	65～80	30～65
电耗（kWh/kg污泥）	0.037	0.013	0.055	—	—

注：*为1979年统计数据。

生物固体的过滤、脱水方式及其原理、设备适用范围等情况，已由李国鼎、金子奇列成（见表 3－7）。

表 3－7　污泥的过滤脱水方式及其原理、设备、适用范围

脱水技术	方式	原　理	设备、构造	适用范围
自然脱水	干化床式	利用太阳热量和风的作用进行自然蒸发脱水	分深干化床及浅干化床两种	上水污泥、下水污泥等
	砂滤床式	依靠砂层过滤脱水和利用太阳能和风进行自然蒸发脱水	20～30 cm 厚砂层和 20 cm 的砾石层	上水污泥、下水污泥、脱色废水、洗毛废水、电镀废水等处理后污泥
脱水筛分	凝聚方式	靠添加混凝剂形成的絮凝物进行筛分脱水	由日本各公司开发新装置	可扩大用于工业废水处理
	造粒方式	靠添加混凝剂形成的泥粒筛分脱水	近年来日本各公司正在开发这种方式的装置	广泛用于采石废水及工业废水的处理
真空过滤	间歇过滤方式	用真空泵等机械产生过滤压，间歇地交替进行生成滤饼、脱水和滤饼剥离等工序	叶状过滤器	适用于较少量污泥处理的部门
	连续过滤方式	用真空泵等机械使装在旋转体内的滤材两侧产生过滤压差、脱水和滤饼剥离等工序	连续圆筒型真空过滤器（如奥利佛过滤器）、连续圆盘型真空过滤器（如美国式过滤器）、连续水平型过滤器（如卧式过滤器）、连续带式真空过滤器（如水平带式过滤器及移动盘式过滤器）	广泛适用于较大量污泥处理的部门，有不少机种适用于难过滤污泥的连续处理

水世界－中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区
中国城镇水网 www.chinacitywater.org

续表

脱水技术	方式	原　理	设备、构造	适用范围
加压过滤	间歇过滤脱水方式	用泵或压缩机间歇式顺次进行加压过滤、脱水、滤饼剥离等工序	压滤器（板框式压滤器、全自动压滤器等早已有开发使用）、加压叶状过滤器（如凯利过滤器、斯威特兰型过滤机）	广泛用于污泥的脱水处理
	连续过滤脱水方式	①用泵或压缩机使装在旋转体内的滤材两侧产生过滤压差，连续进行加压过滤、脱水、滤饼剥离等工序。②在滤带间提供滤材进行压榨脱水。③利用螺旋挤压作用过滤脱水	①连续加压转筒过滤器（如奥利佛型连续加压过滤器。②连续加压带式过滤脱水机。③连续螺旋挤压式过滤脱水机	①构造复杂。②适用上水污泥和下水污泥等
离心沉降及离心脱水过滤	离心沉降方式	利用高速旋转体内的离心效果促进污泥的浓缩脱水	离心沉降机（如圆筒型离心沉降机、分离板型离心沉降机等）	适用下水处理厂的各种污泥实例不少，但粒子去除率一般较低，故必须添加混凝剂
	离心脱水过滤方式	依靠设置在高速旋转体内壁的滤材及离心作用进行脱水过滤	离心脱水机（笼式离心机）、离心过滤机	适用例子不少，但维修管理较困难，污泥处理时，需添加混凝剂

中国城镇水网 www.chinacitywater.org
水世界-中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

续表

脱水技术	方式	原理	设备、构造	适用范围
其他	凝聚上浮冷冻脱水毛细管脱水及电渗透脱水等			均为近年来开发的新技术，在实际使用中，还有不少研究课题及设备上的问题要解决

3. 生物固体的真空过滤与设备

真空过滤靠减压与大气压之间产生压力差作为过滤推动力，目前正被广泛地使用。其优点是：能连续生产，操作平稳，整个生产过程可实现自动化，处理量大，适用于各种污泥的脱水；缺点是：脱水前必须预处理，附属设备较多，工序较复杂，运行费用也较高。

真空过滤分为间歇式和连续式两种。间歇式真空过滤器有叶状过滤器，它只适用于处理少量的污泥。连续式真空过滤器分为圆筒形、圆盘形及水平形。圆盘形真空过滤器形式变化较少，根据滤饼剥离排料方式和过滤室构造的不同，圆筒形及水平形又有多种形式。连续式真空过滤器的各种形式、性能及适用范围等已由李国鼎、金子奇汇总如表 3－8 所示。

中国城镇水网 www.chinacitywater.org
水世界-中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 3-8　连续式真空过滤器

分类	型号	性能及适用范围
多室转筒真空过滤器	Oliver 过滤器	使浸在敞开的母液槽中的过滤圆筒旋转进行真空过滤。滚筒内部被分隔成多个小滤室，各滤室由连接管与中央自动阀相通，自动阀则与真空泵及压缩机相连接。各滤室由滤液通路的格栅和滤布分隔而成。吸附过滤、喷水洗涤及干燥操作是在减压条件下进行的，除渣操作则靠喷出压缩空气用刮刀进行。圆筒旋转转速为 1/3～3 r/min。母液槽液面需保持一定，滤饼需要 6～12 mm 厚，以便于剥除。本设备广泛用于下水处理厂。不适用于含粗大沉降性粒子的泥浆的过滤。原料母液范围为 1%～20%
	顶部给料 Oliver 过滤器	为了加大热空气的流通面积，去掉奥利佛型过滤器母液槽，从顶部给料，过滤后靠吸入热空气一次得到干燥的滤饼。适用于含粗大沉降性粒子的泥浆的过滤。
	预涂助滤剂层过滤器	预先在圆筒表面涂上 50～150 mm 厚的过滤助剂层（硅藻土、珍珠岩等）。特别适用于糊状、粘性、胶体性物质或稀泥浆的过滤。除渣方式是助滤剂层和滤饼一起随筒旋转被刮刀切削，每转一周，刮刀缓慢地吃深 0.015～0.15 mm，即切削速度为 2～4 mm/h。过滤速度大，固液分离效果好。随助滤剂层逐渐变薄，过滤速度逐渐增大。预涂助滤剂层需时在 1 h 以内，可连续过滤 12 h～10 d。可用于含有微细颗粒群的稀悬浊液（体积分数在 1%以下）、用普通滤材会迅速堵塞的难过滤母液的过滤（滤渣和助滤剂的混合是不可避免的）。也适用于粘性泥浆、污泥、金属氢氧化物沉淀、废油类等物料的处理。不要压缩空气反吹除渣

中国城镇水网 www.chinacitywater.org
水世界-中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

续表

分类	型号	性能及适用范围
多室转筒真空过滤器	线带式过滤器	用 12～25 mm 间隔配置的 2～3 mm 宽的环形线卷带取代奥利佛型过滤器的刮刀，由此滤饼托起而进行除渣。滤饼被托起后就与真空系统切断联系进行除渣。与奥利佛过滤器相比，需要较大的过滤面积、但薄到 1.6 mm 的滤饼层也可除去，并可用于小颗粒多、难以过滤的物料的处理
	旋管式过滤器	将直径 10 mm 的不锈钢制簧圈，围绕转筒四周平行地缠卷双层，取代滤布作为滤材进行真空过滤。滤饼在簧圈上形成后，随着圆筒转动，到除渣位置时，簧圈离开转筒，两层簧圈上下交替脱开而使滤饼剥落。除渣后簧圈用喷水洗净后再转回转筒上。本设备是为生污泥类难过滤性物料的处理开发的，可广泛用于各种污泥过滤。但对于细小粒子多、凝聚性差的污泥脱水效果不好
	带式过滤器	缠卷在过滤转筒上的环状滤布（尼龙、聚丙烯等）靠转动辊子离开筒面，随后依次进行除渣和滤布洗涤等操作。适用于下水污泥等难过滤物料的过滤，薄到 1.6 mm 的滤饼也能剥离。旋转速度 0.3～1 r/min，真空度 53.3～80.0 kPa。循环周期 0.15～0.9 r/min，需要空气量 0.5～0.8 m^3/（m^2 滤布·min），过滤速度 6～25 kg 固体物质/（m^2 滤布·h），滤饼含水分 65%～75%。在正常过滤时，筒面上每分钟形成 3 mm 的滤饼。原料母液范围为 1%～20%。为了防止滤布在运转中走偏，需设置防止打弯装置。通常，过滤面积 1～70 m^2，转筒直径 0.9～3.6 m。过滤速度大是本过滤器的特点

水世界-中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区
中国城镇水网 www.chinacityw

续表

分类	型号	性能及适用范围
多室转筒真空过滤器	Dorrco过滤器	和以上过滤器不同，在长度/直径比较小的圆筒内表面布置滤材进行内部供液式真空过滤。圆筒兼作母液槽。滤材随圆筒旋转浸入母液中，由减压过滤作用形成滤饼，然后依次进行滤饼脱水、洗涤，滤饼转到料斗上方时，靠滤材反面吹入空气或脉冲地吹压缩空气进行剥离后，经皮带运输机或螺旋输送机排出。对粒度比较大的浓悬浊液（10%以上）需要形成15 mm/min以上的滤饼。本设备适合于沉降速度大的原料母液，形成的滤饼易脱落或必须洗涤的场合是不适用的，有效过滤面积比较小
单室转筒真空过滤器	Bird-Young过滤器	与奥利佛型不同，不设小过滤室、内部分配管及自动阀。在带排水孔的金属圆筒的外周卷上滤材作为过滤面，圆筒内部保持真空，靠脉冲压缩空气的反吹进行除渣。可以处理非常薄的滤饼，往往用于处理过滤速度慢的原料。圆筒过滤面的浸液率5%～50%，旋转速度为0.03～6 min。过滤面积0.1～14 m^2。圆筒的最大直径为1.67 m，价格约是同样大小奥利佛型的2倍。本设备有可高速旋转、对空气及液体流动阻力小、过滤推动力大、洗涤效果良好等优点
圆盘式真空过滤器	美圆盘过滤器	是将木材、铁或青铜制的扇形滤叶10～16个垂直于旋转轴固定成平面圆盘形，以等距配置而成的真空过滤器。自动阀和奥利佛型的相同。圆盘以每6 min转1圈的速度缓慢地旋转，进行过滤、脱水及必要的滤饼洗涤，但洗涤效果不好。到除渣位置时，切断通向扇状滤叶的真空，从滤布反面和缓地吹入空气使滤布膨胀，并用装有刮刀或锥头的旋转除泥辊剥落滤饼。需要4 mm/min以上的速度形成滤饼。在连续旋转式过滤器中建设费用最少、处理能力大，滤饼易碎，便于运输，但滤布膨胀易受损伤

水世界-中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
中国城镇水网 www.chinacitywater.org

续表

分类	型号	性能及适用范围
水平型真空过滤器	平台型过滤器	以水平旋转车轮形平台的上表面作为滤面。平台是由多个扇形过滤室组成的。相当于美国式过滤器一个滤叶水平放置。需要 20 mm/min 的速度形成滤饼，洗涤效果好。靠大型的旋转阀在滤布下面形成真空。在平台上部供给原料母液，每转一周进行一个循环的过滤、洗涤、脱水操作。缺点是约有 3 mm 厚的滤饼会残留在表面上。可用于含比较粗颗粒、容易过滤的泥浆的大流量过滤。母液 10%以上，单位面积的设备制造费高
	翻转盘式过滤器	将平台式过滤器的各滤室，分别独立式形成单个平底锅状的盘与设置了半径方向连通管的中心真空阀连接，盘可靠外侧导轨上滚子进行翻转。到除渣位置时，盘被整个倒过来，用必需的压缩空气除渣。除渣后，盘再转回原来位置，继续操作。可对滤饼进行彻底的洗涤和除渣，但价格贵，机械较复杂
	水平带式过滤器	用带孔的环形传送带保持滤布在滤液吸入池的上面缓慢地移动。将传送带的水平部分用做过滤面，在带的一端供给料液，进行过滤，然后顺次进行洗涤脱水，在另一端滚筒处进行滤布剥离，滤布经下部喷头进行充分地洗涤
	移动盘式过滤器	在固定于环状橡皮带的数个平盘上面进行过滤、洗涤及脱水。原料母液用布料器从上面给料，随着盘的移动，滤液从盘底部通过橡胶带上滤液出口及滤液槽流入真空接受器内。盘子继续移动到过滤器终端进行反转时，滤饼靠重力下落。盘从开始反转到回到原始位置期间，滤布经喷淋水洗涤。本设备适用于容易堵塞滤布泥浆的过滤。料液体积分数在 10%以上。其占地面积、维修操作费用较大

水世界-中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区
中国城镇水网 www.Chinacitywater.org

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

可见，真空过滤形式多样，现仅举数例如下。

图 3-6 为表 3-8 中的转筒真空过滤器中带式真空过滤器的工作原理图。

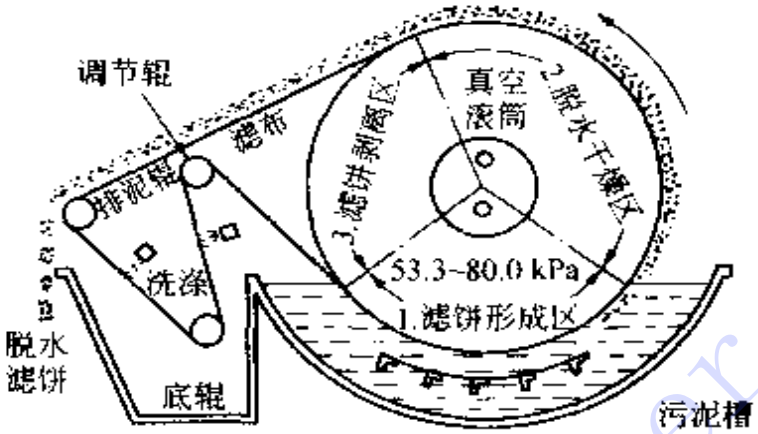


图 3-6 带式真空过滤器工作原理图

图 3-7 为美国圆盘式真空过滤装置构造图。

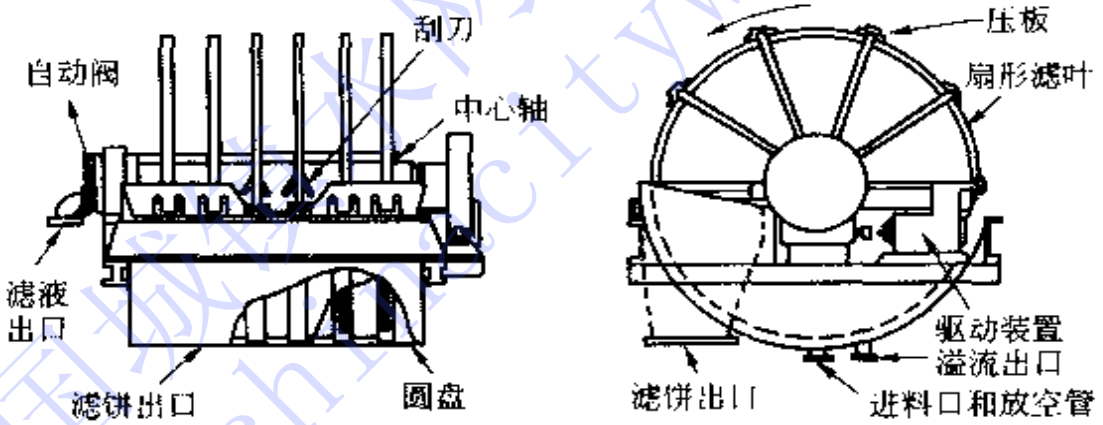


图 3-7 圆盘式真空过滤器工作原理图

图 3-8 为水平带式过滤器透视图。

4. 生物固体的加压过滤与设备

利用各种液压泵或空气压缩机形成大于大气压的压差进行过滤的方式称为加压过滤。压滤的压差通常为(0.3～0.5)×10^6 Pa。所以，其基本原理与真空过滤基本相同，区别在于压滤使用正压，真空过滤采用负压。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

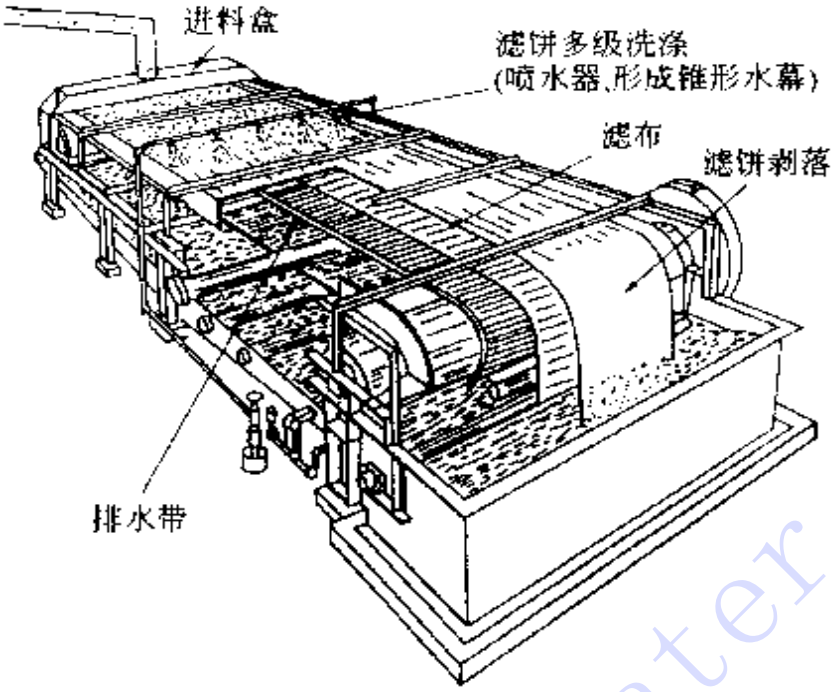


图 3-8　水平带式过滤器透视图

加压过滤经历了由间歇操作到连续操作的发展，以往使用较多的板框压滤机属人工间歇操作，与连续式真空过滤机相比操作麻烦，但现在也已实现了全自动操作。

加压过滤分间歇式和连续式两种，根据不同的压滤形式又可分为若干类型。表 3-9 为压滤器的分类与特点。

表 3-9　间歇式压滤器与连续式压滤器的型式和特点

分类	型　式	特　　点
间歇式压滤	板框型压滤器(图 3-9)	优点：滤材使用寿命长；可通过改变滤框厚度得到不同厚度的滤饼；滤饼厚度均一，易洗涤；制造方便，适用性强 缺点：滤框给料口易堵塞；取滤饼较麻烦；比叫板型过滤器费时 15%左右 脱水滤饼含水率为 45%～80%，其中初沉池污泥 45%～65%，活性污泥 75%～80%，混合污泥 55%～65%，滤液悬浮液浓度 400 mg/L，BOD_5 为 1500～2500 mg/L

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

续表

分类	型　式	特　点
间歇式压滤	凹板型压滤器(图 3－10)	不用滤框而使两则呈凹形 优点：适用于高压，耗时较短，滤饼可自动脱落 缺点：滤材损伤大，更换频繁
	隔膜挤压式凹板型压滤器	与凹板型相比，结构上具有专门的挤压机构，得到的滤饼水分比普通压滤器低 5%～10%。有加压水和压缩空气两种形式。适用于难过滤污泥的处理
	隔膜挤压式滤板——挤压板型压滤器	与隔膜式凹板型相比，结构上将滤板和挤压板交替平行设置，形成各滤室，两者挤压机理相同
连续式压滤	连续旋转式压滤器	分为圆筒型和圆盘型两类。 适用于挥发性、发泡性、高湿性或饱和溶液的泥浆类物料，滤饼润湿程度较低。与 Oliver 真空过滤器在转筒内部抽真空的过滤方式相反，本压滤器由耐压外筒及旋转内筒两层圆筒组成
	滚压带式压滤脱水器(图 3－11)	此类设备是一类得到实际应用的连续式压滤装置，适用于投加高分子混凝剂处理的污泥。悬浮固体回收率可达 95%～96%。主要优点：虽然投加混凝剂，但脱水滤饼几乎没有增加；噪音和振动小；附属设备以及单位处理量的动力费用少。缺点：处理容量较小；洗涤滤布用水量多；易产生臭气；药剂添加波动范围窄 此类压滤器开发的型号较多，主要有：压辊-压辊挤压式，如日立克莱茵式、SKW 型、MRP 型、Unimat 型、旋转式、塔式；转筒-压辊挤压式，如固液分离器、浓缩凝聚物压滤器、RF 脱水机、棚状皮带压滤器、温克勒压滤器、SSP 皮带过滤器；辊-辊-转筒挤压方式，即三级皮带压滤器

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

续表

分类	型　式	特　点
连续式压滤	螺旋压滤器（图 3-12）	该类压滤器是利用重力和螺旋挤压作用的过滤、脱水装置。此装置可以根据污泥性质和脱水速度调节螺旋的推进速度，也可以将污泥进行加热处理，提高脱水速度。用该类压滤器可得到低含水率的滤饼，如下水生污泥加 0.15%～0.3%高分子混凝剂后，用螺旋压滤可得水分为 35%～73%的滤饼，对下水消化污泥同样条件，得到水分为 69%～84%的滤饼

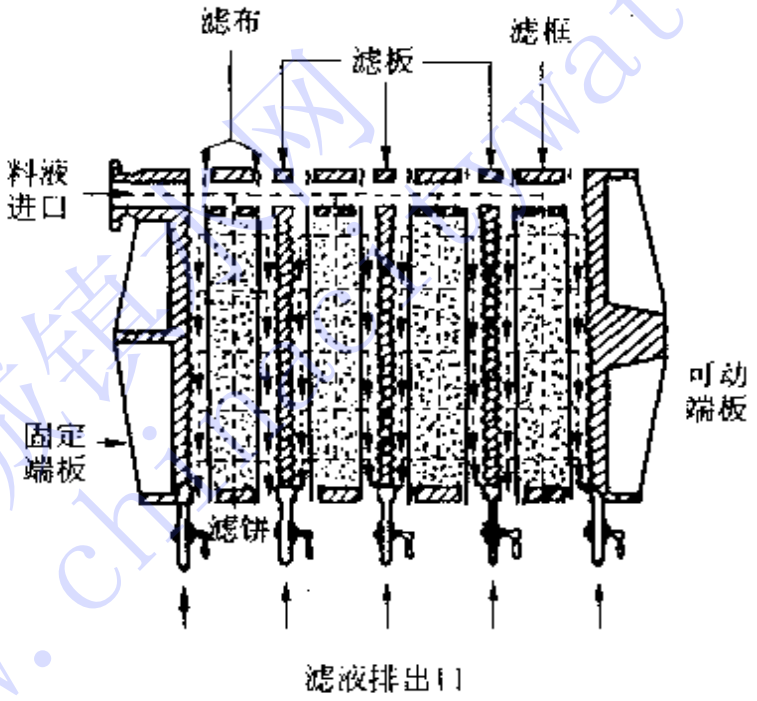


图 3-9　板框型压滤器工作原理图

中国城镇水网 www.chinacitywater.org

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

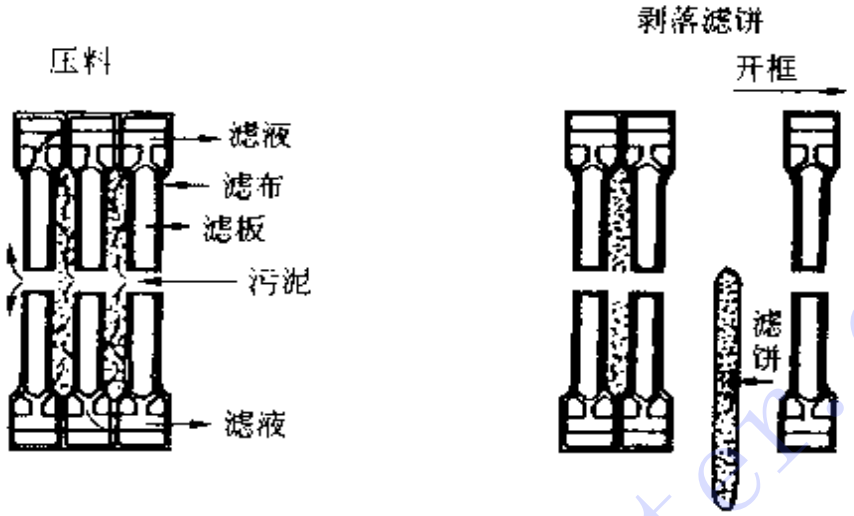


图 3－10　污泥处理专用凹板型压滤器工作原理图

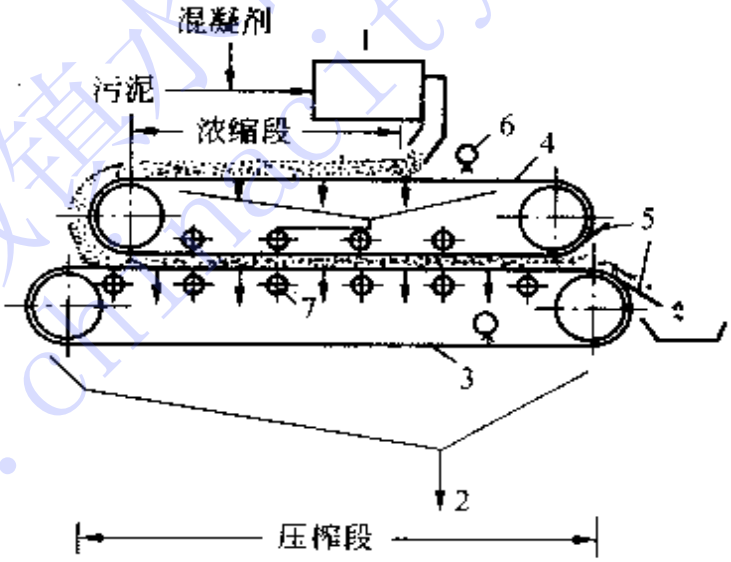


图 3－11　滚压带式压滤脱水器

1—混合槽；2—滤液与冲洗水排出；3—涤纶滤布；
4—金属丝网；5—刮刀；6—洗涤水管；7—滚压轴

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

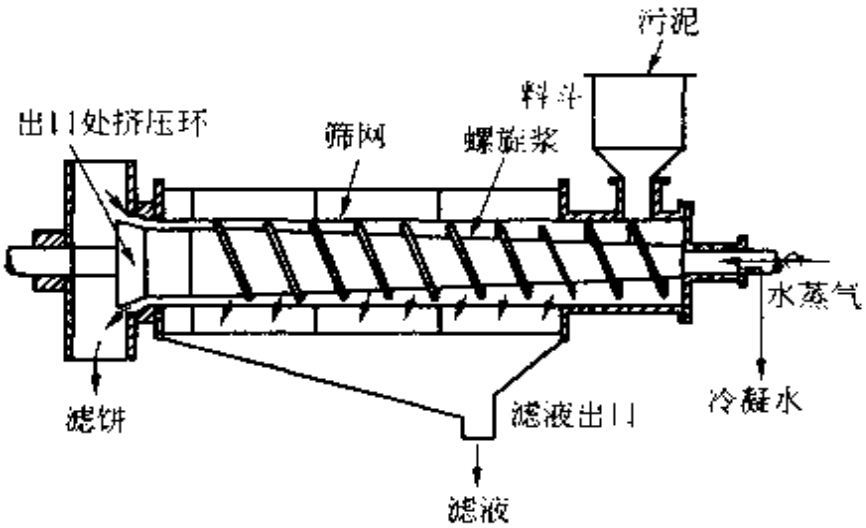


图 3-12 螺旋压滤器工作原理图

5. 生物固体的离心分离

所谓离心分离是指利用离心力取代重力或压力作推动力时，进行沉降分离、过滤及脱水的操作。进行这种分离操作的设备通称为离心分离机。离心分离机在化学工业中应用很早，但用于生物固体（污泥）处理的历史较短。由于高分子混凝剂技术的迅速发展和广泛应用，离心分离也已广泛地用于下水污泥的处理。

离心过滤机适合于非压缩性物料的过滤、洗涤和脱水；离心脱水机则适合于粘度小的液体的分离和洗涤；离心沉降机是利用固-液或液-液间密度差的分离装置，其旋转容器壁设有孔眼，大致分为圆筒型、分离板型及倾析型 3 类，前两者可用于乳状液、固体物质较少的悬浊液等，倾析型用于将沉降速度大、浓度比较高的悬浊液及泥浆分离为固体物质和澄清液。

在生物固体方面用得较广泛的离心机有倾析型离心分离机、分离板式离心沉降机等。

（1）倾析型离心分离机

根据旋转轴的方向可分为立式和卧式两类，适合于生物固

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

体一类浓度比较高的悬浊液的固液分离，在美国、日本等国下水污泥脱水方面得到了广泛的应用。

倾析型离心分离机分圆筒形和圆锥形，如图 3－13 和图 3－14所示，两者都设置有比转筒转速 1 200～8500 r/min 低 5～100 r/min 的螺旋输送机，适应不同处理量、污泥浓度及污泥沉降速度的需要。输送机和转筒速度的差值可以相应地改变，进行这种改变的专门机构叫反馈传动机构，这个机构使一般难以分离的生物固体也可得到较好的分离效果。

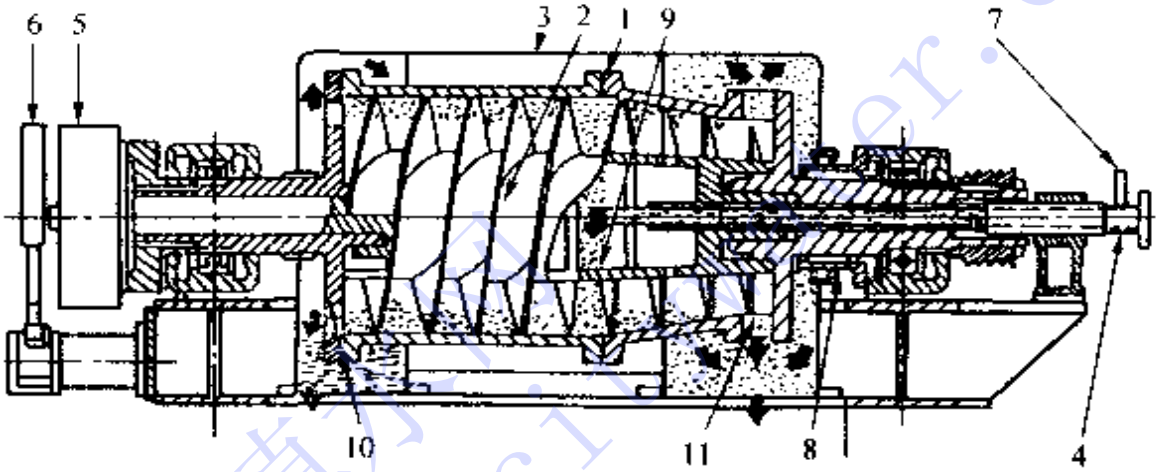


图 3－13 卧式圆筒形倾析离心机

1—快速旋转圆筒-圆锥滚筒；2—涡旋管；3—机身外壳；4—给泥管；5—能调节转筒和涡旋管相对速度的带油浴器的齿轮箱；6—防止齿轮旋转超负荷的安全装置；7—洗涤管；8—即使在危险情况下也能操作的密封装置；9—污泥分配口；10—可调节的澄清液排出口；11—固态物排出口

通常，离心力越大，则污泥颗粒沉降速度越大，固态物质回收率越高，但过高会造成污泥打滑，凝聚物破裂而导致脱水效率下降，也可能造成机械磨损、动力消耗大、形成噪音等，故一般选择离心系数在 2 000 以下的离心机。

该类倾析式离心分离机在斜坡区也有脱水作用，故也可用做离心脱水机，特别是通过缩短水平部分，延长斜坡区成为圆锥形式则更适于脱水。用做脱水机时，由于无需滤布、金属丝

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

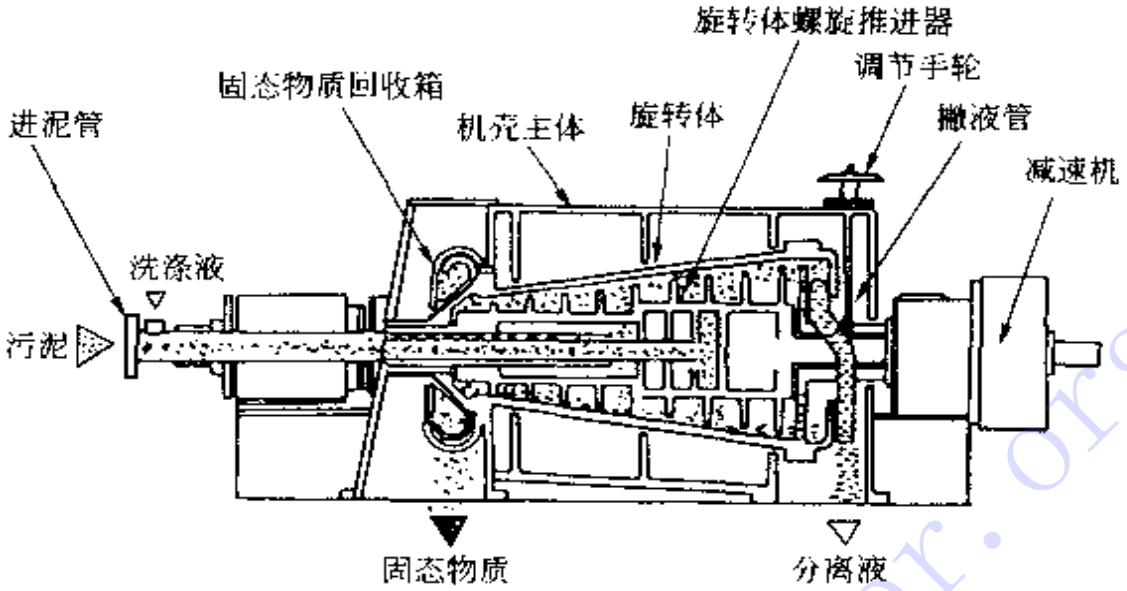


图 3－14　卧式圆锥形倾析离心机

网等滤料，不会发生堵塞问题，并能进行稳定的连续操作，其脱水效果可使下水污泥含水率达 74%～78%。

（2）分离板式离心沉降机

该类设备结构复杂，离心系数为 700～12 000，处理能力 120～70000 L/h，最适合于处理胶体物料。由于悬浮颗粒沉降距离较小，微小而浓度低的粒子也容易被捕集，可通过转筒上细孔连续地排出，故污泥可被浓缩 5～20 倍。因为转筒壁上细孔直径为 1.27～2.54 mm，所以用于生物固体处理时对污泥浓度和粒度有一定限制，通常需对原料污泥进行适当的筛分处理。尽管本设备对有机性生物固体有良好的浓缩能力，但脱水能力不是很强。

五、生物固体的干燥处理

生物固体经脱水处理后，滤饼仍含有 55%～80%的水分，用做肥料或土壤改良剂回用于农田时水分偏高，用于焚烧处理

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

也影响热值和焚烧效果，且不利于分散和袋装运输，因而有必要继续降低其水分含量（20%～40%），主要方法有干燥法、堆肥法、混入干草等。这里只介绍干燥法。

所谓干燥是指通过加热使潮湿物料中的水分蒸发，同时进行传热与传质扩散过程的操作。物料内的水分以液体状态在物料内边移动边扩散到物料表面汽化，或者在物料内部直接汽化而向表面移动与扩散。提高干燥速度的措施有：

（1）破碎物料以增大蒸发面积，增加蒸发速度。

（2）使用尽可能高温的热载体，或通过增加物料与热载体温度差以提高传热推动力。

（3）通过搅拌增大传热系数，强化传热传质过程。

实际上，真正利用干燥法处理生物固体的很少，其原因是：①干燥过程易产生恶臭废气，需脱臭处理；②燃料费用大；③长期以来干燥处理污泥作为农肥回用销路不佳，波动性大；④生物固体中含有重金属；⑤干燥处理后的生物固体投弃处置时会吸收水分恢复原状；⑥可燃性粉尘存在安全技术问题及火灾隐患。

可用于生物固体干燥的装置大体可分为6类：通风干燥器、喷雾干燥器、气流干燥器、旋转干燥器、转鼓干燥器、真空干燥器。

1. 通风干燥器

通风干燥器分为间歇式箱形干燥器和连续式带形干燥器两种。由于占地面积大，动力消耗也大，成品价格高，这类干燥器主要用于需要严格干燥的物料处理，用于生物固体脱水滤饼的干燥很不经济，故应用较少。如将带式干燥器接近出口处设计成可使物料流态化，即带式流化床干燥器，热容量系数比普通带形干燥器大得多[814～2326 W/(m^3·K)]时，还是可以考

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

虑用于生物固体滤饼的干燥的。

2. 喷雾干燥器

喷雾干燥器可分为并流、逆流及错流3种形式。喷雾干燥可省去过滤脱水等操作过程，将液态污泥直接喷雾与热风接触，使水分蒸发而得到干燥，时间仅需5～30 s，但热容量系数小(35～116 W/(m^3·K))，故需较大型装置。对于生物固体而言，存在难以雾化或即使能雾化，也会使喷嘴磨损严重等问题。另外，从经济性角度考虑，也不宜采用。

3. 气流干燥器

气流干燥器也叫急骤干燥器。本装置将潮湿的粉粒状、泥状或块状物料先经分解破碎，或将容易分散的物料不经分解破碎直接加到流速为10～30 m/s的热风中使其分散成粉粒状，以并流形式随热风（400～700℃）输送而得到干燥。

气流干燥器在生物固体处理中可以成功地加以应用。1932年，它最初被用于美国芝加哥的污泥干燥。在休斯顿，采用带有污泥脱臭装置的气流干燥工艺（见图3-15）为：经Oliver旋转真空过滤器过滤的活性污泥，在双浆混炼机内和已干燥污泥混合后进入磨碎机（或破碎机），同时送入从加热炉来的高温气体。

送入干燥管内干燥后的污泥，在旋风分离器中与气体分离，一部分加入成品传送带上，另一部分为了帮助进料湿污泥干燥而送回双浆混炼机。从旋风分离器出来的气体返回加热炉，经预热区预热到650℃可完全脱臭。在磨碎机入口处的气体温度约650℃，到旋风分离器处降低到约100℃，污泥经干燥后水分约5.5%，可用做肥料。

4. 旋转干燥器

旋转干燥器有多种结构形式，用于下水污泥处理的实例不

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

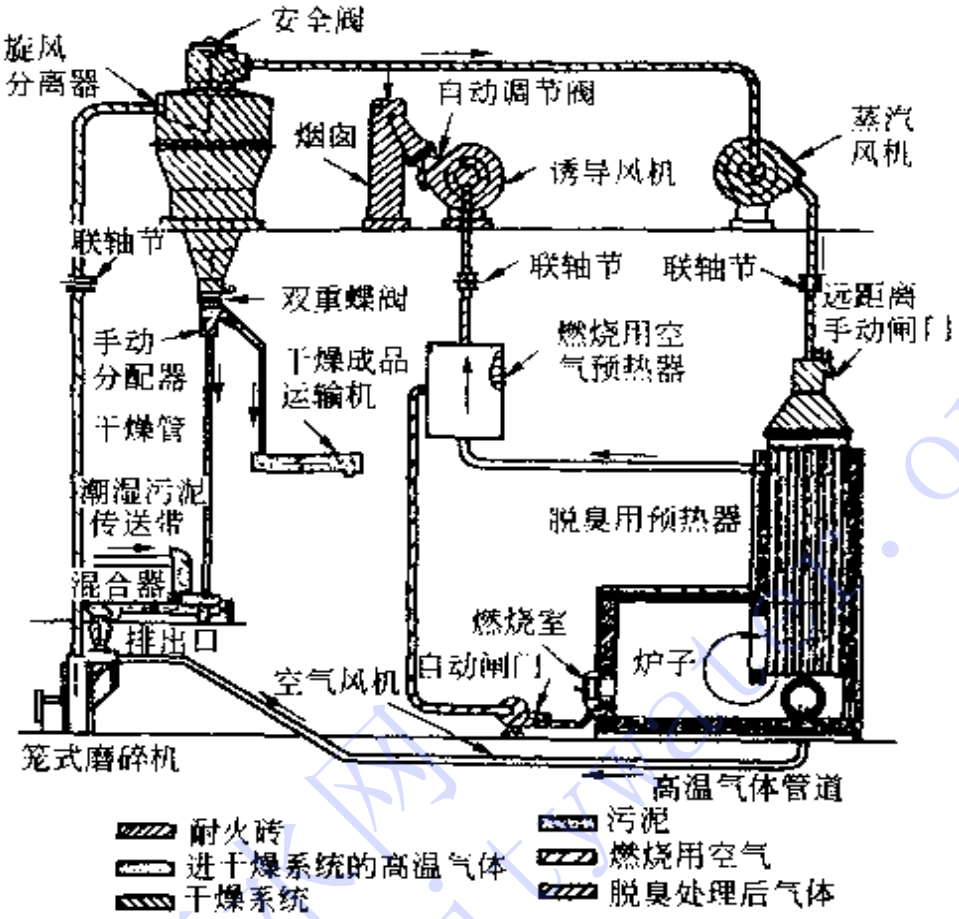


图 3-15 气流干燥处理污泥系统示意图（Houston）

多。其中装有蒸汽管的旋转干燥器可以间接方式传热干燥，比较适用于易产生粉尘或易被破坏变质的物料，传热系数为 116 $W/(m^2 \cdot K)$。

5. 转鼓干燥器

转鼓干燥器适用于液态、膏状或泥状物料的干燥。其原理是转鼓内部通入水蒸气加热，使泥状物料粘附于转鼓外表面，形成厚度为 0.3～5 mm 的薄膜，在转动过程中一周（58～60 s)进行蒸发干燥，表面已干燥的物料用固定的刮刀从圆筒表面刮落。其特点是干燥时间短，可在常压或减压下操作，适用于对热敏感、受热易变质的物料的干燥。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

转鼓干燥器有单转鼓、双转鼓、平行转鼓等多种形式。

6．真空干燥器

真空干燥器是在真空（减压）条件下进行干燥的装置。采用减压干燥是因为：①可降低液体的沸点，加快蒸发速度，缩短干燥时间；②可在较低温度下干燥，适用于热敏性物料的干燥；③可得到含水率低的干燥成品；④会尽可能除去有机物或溶剂物质。

真空干燥的加热方式可用热传导或辐射传热。该方法在生物固体处理中有应用实例：1977 年日本静冈鼎磐田市采用该工艺对厌氧与好氧混合污泥进行处理，处理能力为360 kg/d，污泥水分 98.8%，处理时间为 20 h/d，干燥用水蒸汽压力为 1.9×10^5Pa，成品含水率为 30%～40%，可用做土壤改良剂。

干燥器的种类很多，除上述 6 种外，还有移动床式干燥器、流化床干燥器、造粒干燥器、立式多段炉式干燥器等，随着生物固体资源化利用的发展，干燥技术的应用会有新的发展。

第二节　污泥的处置方法

关于处理后生物固体的处置，通常有两种观点：一种观点认为对经过处理后的生物固体进行填埋、海洋倾弃、焚烧、堆肥、热解、制建材等均可视为“处置”；另一种观点认为只有填埋或海洋倾弃才是真正意义上的“处置”，其他如堆肥农用、焚烧、热解及制建材等均可认为是生物固体的资源化利用。不管何种观点更为正确，因后面将专题讨论生物固体的堆肥农用资源化，消化、焚烧、热解能源化和材料化利用，故这里只对填埋与海洋倾弃作简单讨论。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

一、污泥的填埋处置

填埋是废弃物的中间处理及最终处置方法。根据美国土木工程学会的定义："垃圾卫生填埋是指一种不产生公害，或对公众健康及安全不产生危害的废弃物处置方法，该法使用工程原理将废弃物局限在最小的区域内，每日废弃物倾倒处理完毕后加覆土壤。"

生物固体卫生填埋法是一种自然生物处理法。它是在自然条件下，利用土壤微生物，将生物固体中的有机物质分解，使其体积减少而渐趋稳定的过程。生物固体经过基本处理运到垃圾卫生填埋场后，和城市垃圾及其他固体废弃物按卫生填埋要求和程序填埋起来，在填埋层内的生物化学变化过程大致分为3个阶段。

1. 好氧阶段

在填埋初期（填埋后数十日内）及在填埋场中有通风设施者，土壤微生物中的好气性微生物利用填埋层中的氧气，在适当的含水情况下，将垃圾中的一部分有机物质分解成水、二氧化碳及稳定细胞质，并产生氨化作用，使有机氮转变成NH_4^+-N。

2. 厌氧阶段

大多数填埋场以厌氧为主要工艺。在缺氧或无氧条件下，土壤与垃圾中的厌氧微生物群落，主要有纤维素分解菌、蛋白质水解菌、脂肪分解菌、醋酸分解菌、产氢菌、产甲烷菌等相继起作用，将生物固体和有机垃圾先"液化"，使固体物质变成可溶性有机物，然后经过"酸性发酵"和"碱性发酵"两个阶段，把有机物质转变成甲烷（CH_4）、二氧化碳（CO_2）和水及相当一部分稳定细胞质，含氮有机物中的氮也会有一部分转

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

变成 NH_4^+ - N。

3. 填埋稳定阶段

对整个填埋场而言，垃圾中较易分解的有机物历时约500 d后多数能被分解而接近稳定状态，其生物转化的化学反应详见厌氧堆肥一节。正常情况下，在最初的两年里产气量达到最大，以后逐渐降低，其持续产气期可达10～20年之久或更长。生物固体含有机质高，含水率也高，其本身又含有大量的微生物群落，进入填埋层后，是最易进行生物化学反应并实现转化的对象。

生物固体在填埋过程中，其物质转化是：

生物固体 ---好氧或厌氧作用---> 甲烷、稳定细胞质、二氧化碳、水、氨

所以，既有一部分转变成气态物质（甲烷、二氧化碳），又有一部分仍然以细胞质存在，还有一部分变成水分和氨。甲烷和二氧化碳可作为填埋气加以利用，特别是其中的甲烷经收集处理后可用于发电或变成清洁燃料；稳定细胞质留在填埋层中可以作为潜在肥料或燃料；水和氨流出填埋区作为垃圾渗滤液的一部分，经过渗滤液处理设施而实现无害化。因此，运用现代化卫生填埋技术处理生物固体，可以达到稳定化、无害化和资源化的目的。当然，由于填埋场地日益受限，生物固体填埋处置的资源化利用价值及效益不及直接堆肥农用或其他资源化利用。

二、污泥的投海处置

投海是固体废弃物综合利用后的另一种最终处置方法。沿海城市将生物固体投海处置，已有多年历史，有成功的经验，

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

也有造成严重污染影响环境卫生和海洋生态的失败教训，值得引以为戒。

生物固体的投海有两种方法，一种是驳船装运；另一种是用管道把污泥输送到深海区域，利用海洋的潮流作用将其迅速扩散、稀释。

生物固体投海后，必须保证其所投海区不受污染。生物固体投海后控制的主要卫生指标是投海区的大肠菌群值、浑浊度、油脂及悬浮物浓度。在生物固体的排口处或倾倒点处，难以掌握和控制的有 3 个因素，即生物固体的腐烂、初期稀释程度和扩散程度。因此，海域的潮汐与流动状态、深海生态与自净能力、生物固体的性质决定了污泥投海后的环境影响行为。

依据英国的经验，生物固体投海应离海岸 10 km 以外，深度 25 m，潮流水量为污泥量的 500～1 000 倍。由于海域的自净作用与稀释作用较好，污泥投海区基本不受污染，而且初沉池污泥或消化污泥投入深海区后，还有利于捕鱼量的增加。

然而，美国的情况则有所不同。世界大都市纽约每年约有 1.2×10^6 m^3 的生物固体投入海洋，自 1940 年以来通过长期积累，已使 51.8 km^2 海域受到严重污染，所投海域已变成“死海”。由于生物固体的投弃，造成了污泥的厌氧分解严重，污染了海区的环境卫生，影响其感官性状，海底的重金属浓度提高了 100～200 倍，且发现“死海”有向纽约市和长岛移动的趋势，主要原因是投海污泥未经消化处理，污泥投海区没有激烈的潮流，扩散与稀释作用不明显。美国迈阿密市将污泥倾倒在迈阿密海峡，洛杉矶市则将消化污泥用管道排送到离海岸 11.23 km 的近海区，未发现明显的污染迹象。

尽管如此，深海生态仍是非常脆弱的，随着许多地区，特别是我国环境状况的恶化，不少近海海域富营养化现象严重，

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

“赤潮”频繁。生物固体产生量巨大，含有机物成分高，毒性有机物和重金属种类多，含量丰富，倒入海洋势必造成严重的甚至是灾难性的后果。随着社会的发展，污泥投海处置这一方法近年来已被国际禁止，从 1991 年 12 月 31 日起，美国已禁止向海洋倾倒污泥，1998 年开始，欧盟也禁止向海洋倾倒污泥。

第三节　污泥的回用类别

所谓生物固体的回用即指生物固体的资源化利用，也可以把它看成是生物固体处理后的一种“处置”方法。

前面已简要回顾了生物固体处理处置技术的发展历史，并考察了其处理技术的最新发展动态。依据目前的情况和未来的发展趋势，可以认为生物固体回用将主要体现在以下 3 个方面，即农业回用、能源化利用和材料化利用。

生物固体的农业回用将是主要的发展趋势，即通过对生物固体进行无害化、稳定化处理后用做土壤改良剂或肥料，用于农牧林地的土壤修复和生态工程开发。生物固体的能源化利用也将是不容忽视的回用途径，主要表现为通过生物消化技术制取生物能源、热解炼油或焚烧发电。随着世界能源的日益枯竭和能源需求的日益增长，生物固体的能源化利用可能会有较大的发展。生物固体的材料化利用主要表现在用做建材添加剂、环保材料助剂等，随着对生物固体认识的进一步深入和开发工作的不断进展，相信生物固体在材料化利用方面会不断出现新的进展。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

第四章　城市污泥的堆肥化与农用资源化

第一节　堆肥技术发展概况

“堆肥化”（Composting）系指在控制条件下，利用微生物的生化作用，将废弃物中的有机物质分解、腐熟并转化成稳定腐殖土的微生物学过程。这一定义强调：堆肥原料是有机固体废弃物；堆制过程需在人工控制条件下进行，不同于有机废物的自然腐化与腐烂。

“堆肥”（Compost）系指有机废弃物经过堆肥化处理制得的成品。它是堆肥化过程生物降解和转化的产物，是一类腐殖质含量高的疏松物质，故也称为“腐殖土”。

地球表面的土壤微生态过程类似于堆肥化过程，如地表残留的枯枝落叶、杂草、树皮和其他半固体有机物的分解过程。长期以来，这一过程在生态系统乃至生物圈的物质循环与能量流动中发挥了极为重要的作用。

堆肥化过程虽然是20世纪才发展起来的科学技术，但原始的堆肥方式很早就出现了，在我国和印度等东方国家历史尤其悠久，如我国古籍《氾胜之书》、《齐民要术》和《农书》等对积肥制肥均作过较详细的阐述。我国从古到今就有积肥制肥的传统，非常重视有机肥对土壤的培肥作用。只是到了20世纪80年代，由于化肥的大量使用，才使这一传统受到挑战。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

古老的农肥制取技术在我国农业从古代到现代的可持续发展中作出了重要贡献。

现代的堆肥化技术是在原始的堆肥方式基础上发展起来的。1922 年，贝卡里采用密闭容器对有机物料进行厌氧发酵，再通入空气进行好氧发酵的方法在意大利取得专利，并在意大利和法国广泛使用。

1925 年，印度人爱德华·霍华德将堆肥化技术推向系统化和工厂化，开发了用垃圾、人粪尿、污水污泥、树叶或秸秆等混合物料进行好氧发酵（翻堆）的班加罗法（Bangalore Process，之前他最先开发的是厌氧发酵为主的“印多尔法”），将堆肥化技术向前推进了一大步。

1931 年，荷兰 VAW 公司在搅拌方法方面对班加罗法进行改进，采用起重抓斗车翻堆方式，并于 1932 年建立了范·曼奈法工艺堆肥厂。几乎同时，德国的 Schweinfurt 和瑞士的 Biel 采用了固定式固定床法工艺对磨碎物料进行堆肥。1933 年，在丹麦出现了 Dano（丹诺）堆肥装置，其装置实际上是一种卧式旋转圆筒生物反应器，曾在西欧和日本得到最广泛应用，20 世纪 70 年代最为流行，目前，世界上约有 150 家这样的工厂。20 世纪 40 年代，出现了机械化能力较强的发酵装置——多段立式搅拌发酵仓，通常称为 Earp－Thomas 法。其发酵仓自上而下多层设置，物料由上向下移动，使通气效果和发酵时间大有改进。以后又相继出现了 Frazer Eweson 法、Jersey 法、Naturizer 法、Riker 法、Varro 法等多种改进型发酵装置。将固定发酵槽和搅拌器结合起来，形成新的搅拌式固定床，是堆肥化工艺设备的又一重要进展。其代表工艺主要有 Fairfield Hardy 法、Snell 法、Metro－Wasfe 法和 Tollemache 法等。

以上所述堆肥工艺在对各种固体废弃物（特别是城市生活

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

垃圾和生物固体(污泥))处理方面发挥着重要作用。到20世纪70～80年代，由于城市生活垃圾中的成分日趋复杂，特别是无机成分的日益复杂化，限制了这些机械化程度高的堆肥工艺的推广与应用，垃圾处理曾一度被土地填埋与焚烧所替代。进入20世纪80年代后期，由于可供填埋的土地资源日益紧张，焚烧垃圾二次污染严重，因此用堆肥技术来处理各种有机废弃物又重新引起各国的关注与重视。

作为重要的固体废弃物处理方法，堆肥化与卫生填埋和焚烧法各有特点，如表4－1所列。

表4－1　垃圾处理方法及其特点

方　法	焚　烧	堆　肥 (好氧、厌氧)	卫生填埋 (主要是厌氧)
适应对象	易燃有机垃圾(如塑料、橡胶、皮革、纸、竹木等)	有机垃圾：动植物残渣(厨余、蔬菜、瓜果残屑等)	有机垃圾灰渣等
条件要求	热值 Q(kJ/kg)＜3 344，需辅助燃料；3 344～4 180可燃烧，但废热价值不大；4 180～5 000：供热、发电可行；＞6 000：供热、发电稳定可行	①需要多种微生物；②发酵条件(pH、温度、湿度、通气量、搅拌等)；③原材料要求(颗粒形状、大小、营养配比)	①需要微生物作用；②需集水、防渗漏；③覆土防污染；④集气、防爆炸
主要优点	①减容80%～90%或95%以上；②杀灭病原菌；③回收热能；④占地少，选址灵活，节约运输费用；⑤窑式可用混合垃圾；⑥处理时间短	①天然有机物回归自然，实现物质循环；②杀灭病原菌；③堆肥可改良土壤，提高土壤肥力；④占地少，节省运输成本；⑤操作容量弹性大	①具可伸缩性；②能处理不同类型垃圾；③操作简单；④施工时间较短；⑤填埋后土地可开发；⑥垃圾的最终处理方式

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

续表

方　法	焚　烧	堆　肥 （好氧、厌氧）	卫生填埋 （主要是厌氧）
主要缺点	①气体二次污染；②技术要求高，设备易腐蚀；③炉渣成分复杂；④垃圾量爆增难应付	受季节影响大，市场不稳定；②技术要求高，需熟练人员；③垃圾需严格分类；④处理时间长，好氧1个月，厌氧4个月	①需大量土地；②填埋地点受限，运费高；③遇到不良气候，操作困难；④渗滤水处理难；⑤沉陷需时10～20年；⑥产甲烷气，易爆炸
设备	炉排炉、流化床、旋转炉窑等	①主要发酵设备：连续式设备：旋转式、翻覆式、多塔式等；分批式设备：通风平台。②腐熟设备	①推土机；②压实机；③填土机；④集气装置；⑤渗滤水处理设施
投资与运行费	投资大，运行费高	投资较大、运行费较高	费用相对较小

相比较而言，最适合于有机垃圾的处理处置与资源化的工艺当属堆肥化，对生物固体而言尤其如此。

从堆肥化技术的历史发展可以看出，生物固体可以和城市有机垃圾或秸秆等废物一起进行堆制发酵，达到无害化、稳定化、减量化和资源化的目的。

第二节　污泥的堆肥化处理

一、堆肥化的基本原理

如前文对“堆肥化”的定义所述，堆肥化的实质是有机固体

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

废弃物在微生物的作用下，通过生物化学反应实现转化和稳定化的过程。根据处理过程中起作用的微生物对氧气要求的不同，堆肥化可分为好氧法和厌氧法两种。好氧法是在通气条件下通过好气性微生物活动，使有机废弃物得到降解稳定的过程，此过程速度快，堆肥温度高（一般为 50～60℃，极限可达 80～90℃，故又称高温堆肥）。厌氧堆肥实际上是微生物的固体发酵，对有机固体废物进行降解与稳定化，需通过更复杂的生物化学反应。该过程堆肥速度较慢，堆肥时间是好氧堆肥法的 3～4 倍甚至更多。具体的生物化学反应过程，笔者通过生化反应的“电子流守衡原理”进行了推导，下面分别对好氧过程与厌氧过程进行介绍。

（一）好氧堆肥法的微生物作用原理

1. 微生物的作用过程

好氧条件下进行堆肥化，微生物的作用过程可分为以下 3 个阶段：

（1）发热阶段（主发酵前期，1～3 d）

堆肥堆制初期，主要由中温好氧的细菌和真菌，利用堆肥中最容易分解的可溶性物质（如淀粉、糖类等）迅速增殖，释放出热量，使堆肥温度不断升高。

（2）高温阶段（主发酵、一次发酵，3～8 d）

堆肥温度上升到 50℃以上即可称为高温阶段。由于淀粉、糖类等易分解物质被迅速分解氧化的同时消耗了大量的氧，造成了堆肥中局部的厌氧环境。这样，好热性的微生物如纤维素分解氧化菌逐渐代替了中温微生物的活动，这时，堆肥中残留的或新形成的可溶性有机物继续被分解转化，一些复杂的有机物和纤维素、半纤维素等也开始得到强烈的分解。

由于各种好热性微生物的最适温度互不相同，因此，随着堆

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

肥内温度的上升，好热性微生物也随之发生变化：在50℃左右，主要是嗜热性真菌和放线菌，如嗜热性真菌属（Thermomyces）、褐色嗜热放线菌（Actinomyces thermofuscus）、普通小单胞菌（Micromonosporavulgaris）等。温度升到60℃时，真菌几乎完全停止活动，仅有嗜热性放线菌与细菌在继续活动，缓慢地分解有机物。温度升到70℃时，大多数嗜热性微生物已不适宜生存，相继大量死亡或进入休眠状态。

高温对堆肥化而言是极为重要的，主要表现在两个方面：①高温对快速腐熟起着重要作用。在此阶段中，堆肥内开始了腐殖质的形成过程，并开始出现能溶于弱碱的黑色物质。②高温有利于杀死病原性微生物。病原性微生物的失活取决于温度和接触时间。据研究，60～70℃维持3 d，可使脊髓灰质炎病毒、病原细菌和蛔虫卵失活。根据我国长期的经验，一般认为，堆温50～60℃，持续6～7 d，可达到较好的杀灭虫卵和病原菌的效果。

（3）降温和腐熟保肥阶段（后发酵、二次发酵，需时20～30 d）

经过高温阶段的主发酵，大部分易于分解或较易分解的有机物（包括纤维素等）已得到分解，剩下的是木质素等较难分解的有机物以及新形成的腐殖质。这时，微生物活动减弱，产热量随之减少，温度逐渐下降，中温性微生物又逐渐成为优势种，残余物质进一步分解，腐殖质继续不断地积累，堆肥进入腐熟阶段。腐熟阶段的主要问题是保存腐殖质和氮素等植物养料，充分的腐熟能大大提高堆肥的肥效与质量。为了减弱有机质的矿化作用，避免肥效损失，可采取压紧堆肥，造成厌氧状态的措施。

2. 好氧堆肥化的微生物相变化

堆肥中的微生物相随温度变化而变化，因堆制材料不同而有较大差异。在以一年生植物残体为主要原料的堆肥中，微生物相的变化通常表现为：

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

细菌、真菌→纤维素分解菌→放线菌→木质素分解菌

在以城市污水厂剩余污泥为材料的堆肥中，微生物相的变化如表 4－2 所示。

表 4－2　污泥堆肥中的微生物相的变化（微生物量：$\times 10^5$ 个/g 干土）

菌　　类	堆制天数(d)			旱田	水田
	0	30	60	(26d)	(21d)
好气性细菌	801	192	113	233	292
厌气性细菌	136	1.8	0.97	14.6	21.4
放线菌	10.2	5.5	3.7	47	27
真菌类	8.4	16.5	0.36	2.5	0.80
氨化细菌	34	240	44	—	—
氨氧化细菌	<43	14	0.37	—	—
亚硝酸氧化菌	0.08	>0.003	0.003	0.7	0.001 6
脱氮菌	1 300	9 900	200	1.44	2.86
好气性细菌/放线菌	78.5	34.9	30	4.9	11.0

不难看出，堆肥堆制前的脱水污泥中占优势的微生物为细菌、真菌，放线菌较少。在细菌的组成中，一个显著特征是厌氧菌和脱氮菌相当多，这与污泥中富含易分解有机物、水分多、常呈厌气状态有关。

经 1 个月堆制后（期间经过 65℃的高温后又维持在 50℃左右），细菌数有了减少，但好气性细菌数比原料污泥只略有减少，仍保持 10^7 个/g 干物的数量级；厌气性细菌比原料污泥减少了大约 1%，但真菌数量并没有明显的增长；氨化细菌和脱氮菌却有明显的增加。这说明污泥中的大量蛋白质变成了氨，它经硝化后，又接着发生脱氮作用，即在同一个堆肥系统内，同时存在着氧化反应和还原反应。也就是说，在有机物团块分布不均匀的污泥内，既存在着适于硝化细菌活动的好气环境，也存在着适

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

于脱氮菌活动的厌气环境。堆制到第 60 天，各类微生物的菌数都有下降，但这时好气性细菌仍占优势，真菌和放线菌较少。

从以上分析可知，在剩余污泥的堆肥中，一般都是细菌占优势。

表 4－2 还表明，好气性细菌数与放线菌数之比，可以作为衡量系统内生物相稳定与否的一个指标。旱田、水田中好气性细菌/放线菌之值分别为 5 和 10，与此值相近的值，可认为是生物相稳定程度的一个标准。污泥堆制前，该比值约为 80，堆制 30 天后降为 35，堆制 60 天后为 30，此后再过数十天，生物相就可达到相当稳定的程度。

城市垃圾的堆肥中，与污泥堆肥一样是细菌占优势，但放菌数量更少。另外，在腐熟初期，丝状菌数有所增加，随着腐熟的进行，丝状菌又出现减少现象。对植物生长有害的微生物有不少是丝状菌，因此，在堆肥过程中应控制丝状菌，使之数量减少是很重要的。

总而言之，在堆肥中占优势的微生物是嗜热菌。堆肥过程中相当长的时间温度都在 55℃ 以上，有时甚至达到 80℃。可见，有关好热菌的研究极为重要。

长期以来，关于堆肥法的微生物生化反应机理，特别是生化反应计量学，一直缺乏深入的认识。对于好氧堆肥过程，生化反应的计量方程式一直沿用下列通式：

$$C_xH_yN_uO_v \cdot aH_2O + bO_2 \longrightarrow C_wH_xN_yO_z \cdot cH_2O(\text{堆肥}) + dH_2O + eH_2O(\text{气}) + fCO_2 + gNH_3 + \text{能量} \quad (4-1)$$

笔者提出了生化反应“电子流守衡原理”和“电子计量学”方法，并已推得堆肥原料中各种含氮有机物 $C_aH_bO_cN_d$（如蛋白质、氨基酸、生物固体（污泥）、死菌体等）、碳氢类化合物 $C_aH_bO_c$（如淀粉、纤维素、木质素等糖类物质及酸类

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

物质、脂类物质等）和垃圾及生物固体中本来已有或堆制过程中发酵产生的有机酸 $C_aH_bO_c^-$（如乙酸、丙酸、丁酸、苯甲酸等）类物质的好氧堆肥微生物生化反应计量方程式及生化反应计量学关系式的通式：

$$\frac{1}{r}C_aH_bO_cN_d+\frac{1-f_s}{4}O_2+\frac{\delta f_s}{s}HCO_3^-+\frac{d}{r}H^+=\frac{d}{r}NH_4^+ +$$
$$\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\left(\frac{a}{r}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right)CO_2+$$
$$\left[\frac{1-f_s}{2}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}-\frac{2a-c}{r}\right]H_2O \qquad (4-2)$$

或

$$\frac{1}{r}C_aH_bO_cN_d+\frac{1-f_s}{4}O_2+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^+ +\left(\frac{\delta f_s}{s}-\frac{d}{r}\right)HCO_3^- +$$
$$\frac{d}{r}H^+=\frac{d}{r}NH_4^+ +\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\left(\frac{a}{r}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right)CO_2+$$
$$\left[\frac{1-f_s}{2}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}-\frac{2a-c}{r}\right]H_2O \qquad (4-3)$$

$$\frac{1}{q}C_aH_bO_c+\frac{1-f_s}{4}O_2+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^+ +\frac{\delta f_s}{s}HCO_3^-$$
$$=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\left(\frac{a}{q}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right)CO_2+$$
$$\left[\frac{1-f_s}{2}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}-\frac{2a-c}{q}\right]H_2O \qquad (4-4)$$

$$\frac{1}{q}C_aH_bO_c^-+\frac{1-f_s}{4}O_2+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^+ +\frac{\delta f_s}{s}HCO_3^-$$
$$=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\frac{1}{q}HCO_3^- +\left(\frac{a}{q}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right)CO_2+$$
$$\left[\frac{1-f_s}{2}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}-\frac{2a-c+1}{q}\right]H_2O \qquad (4-5)$$

中国城镇水网 www.Chinacitywater.org

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

好氧堆肥反应的计量学关系式如表4-3所示。

表4-3 好氧堆肥反应的计量学关系式*（细胞分子式 $C_aH_bO_cN_d$）

公式号	C/N	O/C	O/N	$Y_{X/C}$	$Y_{X/O}$	$Y_{X/N}$
(4-2)	$\frac{6as}{7(r\delta f_s - ds)}$	$\frac{2r(1-f_s)}{3a}$	$\frac{4rs(1-f_s)}{7(r\delta f_s - ds)}$	$\frac{M_w r f_s}{12as}$	$\frac{M_w r f_s}{8s(1-f_s)}$	$\frac{M_w r f_s}{7(r\delta f_s - ds)}$
(4-3)	$\frac{6as}{7(r\delta f_s - ds)}$	$\frac{2r(1-f_s)}{3a}$	$\frac{4rs(1-f_s)}{7(r\delta f_s - ds)}$	$\frac{M_w r f_s}{12as}$	$\frac{M_w r f_s}{8s(1-f_s)}$	$\frac{M_w r f_s}{7(r\delta f_s - ds)}$
(4-4)	$\frac{6as}{7q\delta f_s}$	$\frac{2q(1-f_s)}{3a}$	$\frac{4s(1-f_s)}{7q\delta f_s}$	$\frac{M_w r f_s)}{12as}$	$\frac{M_w r f_s)}{8s(1-f_s)}$	$\frac{M_w}{14\delta}$
(4-5)	$\frac{6as}{7q'\delta f_s}$	$\frac{2q'(1-f_s)}{3a}$	$\frac{4s(1-f_s)}{7q'\delta f_s}$	$\frac{M_w q' f_s}{12as}$	$\frac{M_w r f_s}{8s(1-f_s)}$	$\frac{M_w}{14\delta}$
(4-2)* (4-3)*	$\frac{6rs}{7(r\delta f_s - ds)}$	$(1-f_s)$	$\frac{4rs(1-f_s)}{7(r\delta f_s - ds)}$	$\frac{M_w f_s}{8s}$	$\frac{M_w r f_s}{8s(1-f_s)}$	$\frac{M_w r f_s}{14(r\delta f_s - ds)}$
(4-4)* (4-5)*	$\frac{6s}{7q\delta f_s}$	$(1-f_s)$	$\frac{4s(1-f_s)}{7q\delta f_s}$	$\frac{M_w f_s}{8s}$	$\frac{M_w r f_s}{8s(1-f_s)}$	$\frac{M_w}{14\delta}$

其中，$Y_{X/C}$代表以C消耗为基准的微生物得率；$Y_{X/O}$代表以氧消耗为基准的微生物得率；$Y_{X/N}$代表以氮消耗为基准的微生物得率；$M_w = 12a + \beta + 16\varepsilon + 14\delta$；$r = 4a + b - 2c - 3d$；$q = 4a + b - 2c$；$q' = 4a + b - 2c + 1$；$s = 4a + \beta - 3\delta - 2\varepsilon$。$a$，$b$，$c$，$d$ 分别为各电子供体分子式中C、H、O、N的原子数。

* 反应式中C以(CH$_2$O)表示。

应该指出，以上(4-2)～(4-5)诸反应式都是等式，等式两边所有元素都达到了平衡，且电子流也是守恒的。当以生物固体（污泥）作为堆肥原料时，可以根据不同来源的污泥给出具体的分子式以代替 $C_aH_bO_cN_d$，如McCarty将初沉池污泥定为$C_{10}H_{19}O_3N$，消化污泥定为$C_5H_9O_3N$，细菌污泥为$C_5H_7O_2N$

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

等，又因好氧堆肥过程起主要作用的是细菌，所以 $C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta$ 也可用 $C_5H_7O_2N$ 替代而得到具体的好氧堆肥生化反应式及计量关系式。

（二）厌氧堆肥法的微生物作用原理

厌氧堆肥法与好氧堆肥法的不同之处是堆内不设通气系统，因为其实质是厌氧微生物在无氧状态下通过对有机固体物质进行液化、酸性发酵（产乙酸）、碱性发酵（产甲烷）3 个阶段后使有机物质转化并稳定化的过程。实际上是在厌氧发酵两个阶段（酸性发酵、碱性发酵）之前多一个“液化阶段”。

1．液化阶段的微生物反应

液化阶段起作用的微生物包括纤维素分解菌、脂肪分解菌、蛋白质水解菌。在这些微生物的作用下，不溶性物质 $C_aH_bO_cN_d$ 或 $C_{a1}H_{b1}O_{c1}$ 可转变成可溶性大分子物质，电子计量生化反应式为：

$$\frac{1}{r}C_aH_bO_cN_d+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^++\frac{d}{r}H^++\frac{\delta f_s}{s}HCO_3^-=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\frac{1-f_s}{q_1}C_{a1}H_{b1}O_{c1}+\frac{d}{r}NH_4^++\left[\frac{a}{r}-\frac{a_1(1-f_s)}{q_1}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right]CO_2+\left[\frac{(2a_1-c_1)(1-f_s)}{q_1}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}-\frac{2a-c}{r}\right]H_2O \quad (4-6)$$

$$\frac{1}{r}C_aH_bO_cN_d+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^++\frac{d}{r}H^++\left[\frac{(1-f_s)}{q_2}+\frac{\delta f_s}{s}\right]HCO_3^-=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\frac{1-f_s}{q_2}C_{a2}H_{b2}O_{c2}^-+\frac{d}{r}NH_4^++\left[\frac{a}{r}-\frac{(a_2-1)(1-f_s)}{q_2}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right]CO_2+\left[\frac{(2a_2-c_2+1)(1-f_s)}{q_2}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}-\frac{2a-c}{r}\right]H_2O \quad (4-7)$$

$$\frac{1}{q_1}C_{a1}H_{b1}O_{c1}+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^++\left(\frac{\delta f_s}{s}+\frac{1-f_s}{q_2}\right)HCO_3^-=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+$$

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

$$\frac{1-f_s}{q_2}C_{a2}H_{b2}O_{c2}+\left(\frac{a_1}{q_1}-\frac{(a_2-1)(1-f_s)}{q_2}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right)CO_2+$$

$$\left[\frac{(2a_2-c_2+1)(1-f_s)}{q_2}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}-\frac{a_1-c_1}{q_1}\right]H_2O \qquad (4-8)$$

以上诸式中：$r=4a+b-2c-3d$；$q_1=4a_1+b_1-2c_1$；$q_2=4a_2+b_2-2c_2+1$；$s=4\alpha+\beta-2\varepsilon-3\delta$。

由（4-6）～（4-8）式可见，液化反应的微生物都需要消耗一定的 NH_4^+ 和碱度，当电子供体是含氮有机物时，还需要消耗一定的 H^+，且含氮有机物中的氮素会以 NH_4^+ 的形式释放出来（氨化作用）。

2. 酸性发酵阶段的微生物反应

此阶段主要是以上阶段产生的可溶性物质 $C_{a1}H_{b1}O_{c1}$ 和 $C_{a2}H_{b2}O_{c2}$ 作电子供体，在醋酸分解菌和产氢细菌的作用下产生乙酸或氢气的过程。产乙酸的电子计量生化反应式为：

$$\frac{1}{q_1}C_{a1}H_{b1}O_{c1}+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^++\left(\frac{\delta f_s}{s}+\frac{1-f_s}{8}\right)HCO_3^-=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+$$

$$\frac{1-f_s}{8}CH_3COO^-+\left[\frac{a_1}{q_1}-\frac{1-f_s}{8}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right]CO_2+$$

$$\left[\frac{3(1-f_s)}{8}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}-\frac{2a_1-c_1}{q_1}\right]H_2O \qquad (4-9)$$

$$\frac{1}{q_2}C_{a2}H_{b2}O_{c2}^-+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^++\left(\frac{\delta f_s}{s}+\frac{1-f_s}{8}-\frac{1}{q_2}\right)HCO_3^-=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+$$

$$\frac{1-f_s}{8}CH_3COO^-+\left[\frac{a_2-1}{q_2}-\frac{1-f_s}{8}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right]CO_2+$$

$$\left[\frac{3(1-f_s)}{8}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}-\frac{2a_2-c_2+1}{q_2}\right]H_2O \qquad (4-10)$$

产氢气的反应式为：

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

$$\frac{1}{q_1}C_{a1}H_{b1}O_{c1}+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^+ +\frac{\delta f_s}{s}HCO_3^- +\left[\frac{2a_1-c_1}{q_1}-\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}\right]H_2O$$

$$=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\frac{1-f_s}{2}H_2+\left[\frac{a_1}{q_1}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right]CO_2 \qquad (4-11)$$

$$\frac{1}{q_2}C_{a2}H_{b2}O_{c2}+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^+ +\left(\frac{\delta f_s}{s}-\frac{1}{q_2}\right)HCO_3^- +\left[\frac{2a_2-c_2+1}{q_2}-\right.$$

$$\left.\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}\right]H_2O=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\frac{1-f_s}{2}H_2+$$

$$\left[\frac{a_2-1}{q_2}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right]CO_2 \qquad (4-12)$$

由（4-9）～（4-12）式可见，酸性发酵阶段都需要消耗一定的 NH_4^+ 和碱度。

3．碱性发酵阶段的微生物反应

此阶段是产甲烷菌以 H_2 或乙酸、甲醇等为电子供体进行的厌氧发酵过程，当以 H_2 为电子供体时，

$$\frac{1}{2}H_2+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^+ +\frac{\delta f_s}{s}HCO_3^- +\left[\frac{1-f_s}{8}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right]CO_2$$

$$=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\frac{1-f_s}{8}CH_4+\left[\frac{(1-f_s)}{4}+\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}\right]H_2O$$

(4-13)

当以乙酸为电子供体时，

$$\frac{1}{8}CH_3COO^- +\frac{\delta f_s}{s}NH_4^+ +\left[\frac{1}{8}+\frac{f_s}{4}-\frac{(2\alpha+\delta-\varepsilon)f_s}{s}\right]H_2O$$

$$=\frac{f_s}{s}C_\alpha H_\beta O_\varepsilon N_\delta+\frac{1-f_s}{8}CH_4+\left(\frac{1}{8}-\frac{\delta f_s}{4}\right)HCO_3^- +$$

$$\left(\frac{f_s}{8}-\frac{(\alpha-\delta)f_s}{s}\right)CO_2 \qquad (4-14)$$

当以甲醇为电子供体时，

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

$$\frac{1}{6}CH_3OH+\frac{\delta f_s}{s}NH_4^+ +\frac{\delta f_s}{s}HCO_3^- +\left[\frac{3f_s-1}{12}-\frac{(2a+\delta-\varepsilon)f_s}{s}\right]H_2O$$
$$=\frac{f_s}{s}C_5H_7O_2N_5+\frac{1-f_s}{8}CH_4+\left[\frac{1}{24}+\frac{f_s}{8}-\frac{(a-\delta)f_s}{s}\right]CO_2 \quad (4-15)$$

由式(4-13)、式(4-15)不难看出，产甲烷阶段以 H_2 和甲醇为电子供体时，也需要消耗一定的 NH_4^+ 和碱度。由(24)可知，当以乙酸等为电子供体时，将会产生一定量的碱度。

以上(4-2)～(4-15)诸式中，f_s 为电子供体用于新细胞合成的分量。这些反应式实际是有机物填埋、堆肥及消化处理的反应通式。

不难看出，式(4-2)～(4-15)中，除式(4-13)外，其他的反应都产生 CO_2。因此，有机垃圾（包括生物固体）在厌氧堆肥或卫生填埋过程中，除产生一定量的 CH_4 外，还产生大量的 CO_2 气体。含氮有机物 $C_aH_bO_cN_d$ 的好氧与厌氧反应过程均属于氨化反应，这就是垃圾填埋场渗滤液及垃圾堆肥过程产气中均有大量 NH_4^+-N 产生并有 NH_3 释出的原因。

陈鲁言等对垃圾填埋场地下废气的研究表明，在填埋场地下几十米深处，CH_4 的体积分数与 CO_2 的体积分数的比值大致在1.44～1.8之间，且填埋时间越长，产生的 CH_4 和 CO_2 总量越少。对于有机垃圾的沼气发酵（厌氧堆肥与消化），产气成分中 CH_4 与 CO_2 的体积比较高，为1.8～2.23，其中立式沼气池的比值比卧式沼气池的为高。因此，从回收能源的角度来看，垃圾（污泥）沼气发酵的产 CH_4 量较高且容易回收利用；从二次污染的角度而言，垃圾及生物固体（污泥）的填埋不仅对大气产生严重污染，而且渗滤液也是一种重要的二次

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

污染源。因此，垃圾与生物固体的厌氧堆肥与沼气发酵不仅能较好地回收生物能源，还可以获取有机农肥，比卫生填埋处置更为经济合理，环境效益也更好，值得提倡。

二、生物固体的好氧堆肥工艺与设备

由于好氧堆肥化具有发酵周期短（一般只有厌氧堆肥法的1/4左右）、能高温发酵、无害化程度高、卫生条件好且易于实现机械化操作和工厂化生产等特点，故国内外对垃圾、生物固体、人畜粪尿等有机废物采用好氧堆肥化的占多数。垃圾、生物固体的厌氧处理实际以沼气发酵居多，在厌氧消化的同时也生产了有机肥，从厌氧生化反应看，有机垃圾（生物固体）厌氧处理技术较理想的方式是厌氧消化与堆肥相结合。除传统的沼气发酵外，近年来，国际上正在研究开发两段式或两相式垃圾（生物固体）厌氧处理工艺，这里只探讨好氧堆肥的工艺与设备，后面将详细讨论生物固体的消化处理与沼气发酵等。

（一）生物固体好氧堆肥化的基本条件

堆肥原材料应含有充分的有机垃圾，不适合堆肥化的异物如玻璃、塑胶等应予以去除。原料颗粒尺寸以2.5～7.5cm较为适宜，粒径太大则分解缓慢，粒径太小则易造成空气供应不足而产生厌氧情形。

发酵条件：

（1）接种

将1%～5%腐熟堆肥或生物固体（污泥）混入垃圾原料中称为接种。

接种的目的是增加微生物菌源，或增加微生物分解酵素。

（2）含水量

垃圾原料中含水量通常在40%～65%范围。好氧性堆肥

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

时含水量以50%～60%为最佳。含量过高时，部分垃圾将产生厌氧发酵而延长有机物分解的时间；含水量过低时，有机物不易分解；含水量低于12%～15%时，微生物的活动几近停止。

（3）垃圾原料的营养配比

垃圾原料中碳氮比（C/N）应以20～35最适当，碳磷比(C/P)宜维持在75～150之间。C/N比愈大，堆肥化所需时间愈长。

（4）足够的空气量

空气量至少应有50%原有氧量的剩余量。堆肥时耗氧量随堆肥温度而改变，一般在50～60℃之间较好，最大耗氧率与温度的关系式为：

$$W_{O_2} = 0.07 * 10^{0.31T}$$

式中，W_{O_2}为最大耗氧率，$mgO_2/(h \cdot gVS)$；T为绝对温度，K。

（5）发酵温度

一般堆积发酵2～3 d后温度可升至60℃，最高温度可达73～75℃，这样可以杀灭病原菌、寄生虫卵及苍蝇卵。堆肥发酵过程中，温度应维持在50～70℃之间。

（6）pH值

垃圾的pH值在5.5～8之间，自然堆积法最初2～3个月内，pH值会降至5以下，其后升至8.5左右。好氧条件下，pH值应维持在7中性左右，防止pH值超过8.5，以免形成NH_3而损失氮素。

（7）搅拌与翻堆

为防止干燥、硬化，并使水分、温度均匀，消化过程中应依需要进行适当的搅拌与翻堆。一次发酵初期宜每天搅拌一

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

次，二次发酵末期可 3 d 左右才搅拌一次。

（8）防止有害杂物混入

垃圾原料中应防止含多量酸碱物或消毒剂、杀虫剂等阻碍微生物发育与妨碍发酵的工业或家庭废弃物。

（二）好氧堆肥化的工艺流程与设备

1. 堆肥化处理流程

堆肥化处理设备将依处理流程而稍异。垃圾堆肥化处理的流程为：

堆肥原料→选别→破碎→分离→水分调整→主发酵（翻堆、一次发酵）→后发酵（二次发酵）→后处理→成品

2. 发酵设备

垃圾堆肥化处理的主要发酵设备是指流程中主发酵和后发酵两部分的设备。

主要发酵设备可分连续式及分批堆置式两种。

① 连续式发酵设备有：旋转式发酵槽、翻覆式发酵槽、多塔式发酵槽。

② 分批式发酵设备：通风平台。

③ 后发酵设备：腐熟设备。

下面简要介绍几种典型的发酵设备。

（1）旋转式发酵设备

图 4－1 为 Dano 式旋转圆筒式发酵槽垃圾堆肥化系统。该系统中，投入漏斗的垃圾（生物固体）经漏斗底部的裙板供给器与第一带式输送机到达磁选机除去铁质，接着供给徐徐转动的发酵槽，垃圾在该处接受送风及必要的供水，混合、摩擦粉碎后，持续发酵数日，成为堆肥放出发酵槽外。接着由振动筛筛分为细物与粗物，粗物通过滑槽排出进行焚烧处理或填埋处理，细物经选别机除去玻璃等物而成为堆肥制品。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

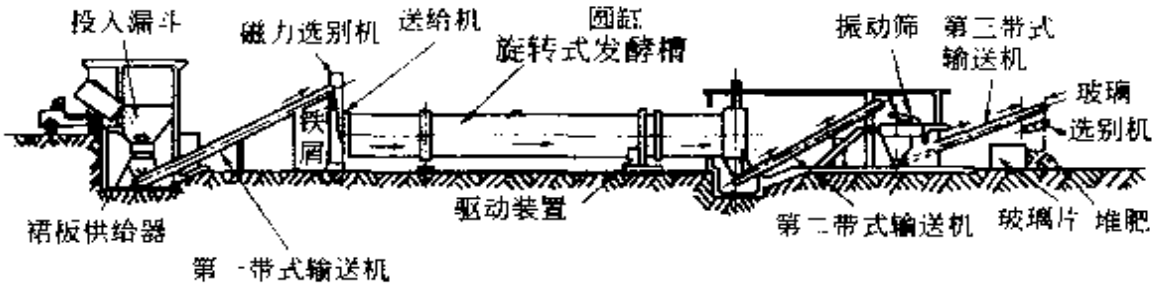


图 4-1　旋转圆筒式发酵槽

旋转式发酵槽为圆筒形，由耐磨性钢铁材料制成。发酵圆筒直径一般为 2~4 m，长 30 m 以下，其径长比应在 1∶10 左右。发酵圆筒的安装倾斜度以 1/100 ~1.5/100 为标准。操作方面应注意以下事项：

①停留时间：视生垃圾的性质与堆肥成品要求而定，通常为 2~4 d。

②发酵槽内充填率以 60% ~70% 为原则，单位发酵槽处理垃圾量以 50t/d 较为经济。

③发酵槽转速应在 1r/min 以下（一般在 0.1 ~0.3 r/min 之间）。

④机械换气者，应采用耐蚀性材料的排风机，其风量应可弹性调节。

⑤旋转驱动设备应采用电力，并需有 30% 以上的安全负荷。

（2）翻覆式发酵设备

翻覆式发酵设备是指在发酵槽里安装翻覆机械，通过翻覆能使发酵原料得以混合，促进迅速发酵的垃圾堆肥化装置。如图 4-2 所示是钻土机翻覆式发酵槽的结构示意图。

堆肥原料由输送机运到发酵槽中心上方，由旋转的输送机

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

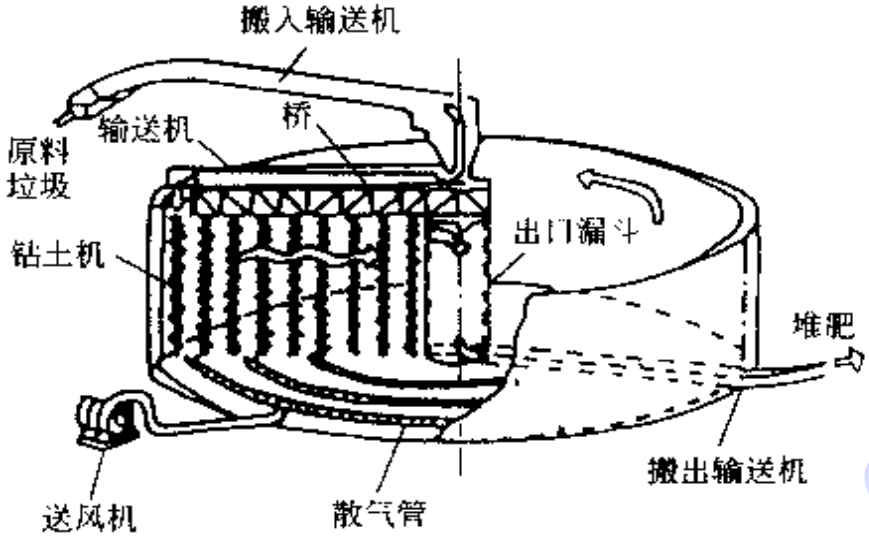


图 4-2　钻土机翻覆式发酵槽

和桥沿槽壁内侧均匀投入发酵槽内。吊于桥上的多架钻土机旋转翻覆以混合发酵槽中的材料，这样使投入的原料立即达到45℃以上的局部环境温度而迅速发酵，即使污泥水分高达70%，也因其水分转移到其他发酵材料中而可立即参与发酵。另外，即使原料恶臭味强，也易被发酵中的材料包覆，发酵槽不致发散恶臭。钻土机将材料从下带上，在自转的同时随桥旋转（公转）以翻覆材料，并将材料从槽壁内侧徐徐转移到槽中央部位出口漏斗，再排出发酵槽而成堆肥。材料的移动速度、滞留时间由公转速度调节。

发酵所需空气从槽底部的数支环状散气管供给。发酵的进行程度随半径方向存在差异。

槽壁附近的通气管因附近水分蒸发量或氧消耗量多，故供给较多的空气，中心附近散气管则供给较少量的空气。这样，随发酵的进行，合理、经济地供给空气，槽内温度常为60～75℃，停留时间可保持5 d。

（3）多塔式发酵设备

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

塔以水平的复数段分隔，堆肥材料堆积于各段塔上发酵，可分为若干种方式。垃圾材料借重力作用从上段塔板下落到下段塔板。各段落板的发酵条件可能有所差异，翻覆法也可能不同，空气供给可从各段塔板强制供给，也可借排气管的通风效果自然供给。

此类设备设计需遵循以下原则：

① 形状可采用立方体式，塔数最少应在 2 层以上，停留时间可参考旋转式发酵槽。

② 材质可采用钢盘混凝土或钢板。

③ 槽内长宽比以 1:5～1:20 为宜。

④ 发酵槽充填率以 50%～60% 为宜。

⑤ 为防止搅拌机轴被垃圾中的草绳或污泥所卷缠，要有适宜的防遮设施。

⑥ 搅拌机的转速及驱动装置、换气设备及基础台均可参照旋转式发酵设备进行设计。

如图 4-3 所示为竖型多段落板式发酵槽，该装置通常为分成 10 段的发酵槽，各段分隔成数块有很多通气孔的隔板，各隔板可以水平轴旋转 90°，各段借此而开闭。各段塔板上的垃圾发酵一段时间后，将隔板旋转 90°，即可通过隔板与隔板间的大间隙落下并得到翻覆。空气从偶数段槽侧面上方的送气管供给，从奇数段槽侧面上方的排气管排出。

通过控制各段垃圾的停留时间，使之依序从最上段落到最下段，成为堆肥。生成的堆肥从最下段取出，其中一部分可用做接种堆肥而返回垃圾原料中。

（4）分批发酵设备

所谓分批发酵是指一次性投入垃圾原料，对其进行翻堆、

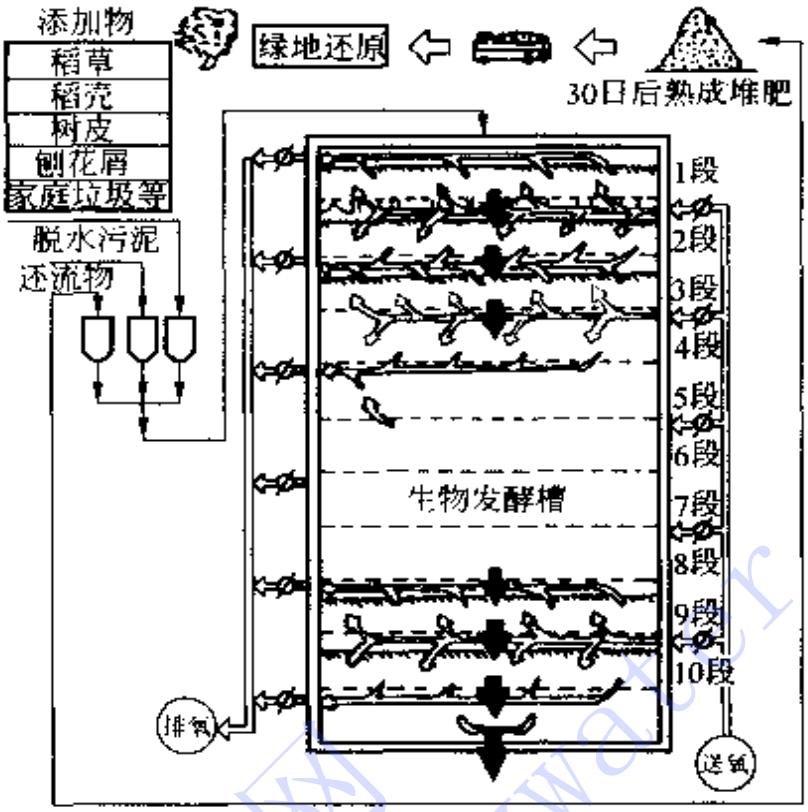


图 4-3 竖型多段落板式发酵槽

通风处理后全部排出的垃圾堆肥化方式。

该类发酵设备以箱式居多。操作时宜注意以下几点：

① 停留时间需根据垃圾的性质、地域性、气候不同来决定。一般发酵时间约为 20d。

② 为防止垃圾水分蒸干并维持发酵温度及垃圾压密性，堆积高度宜在 1～2 m 之间。

③ 平时应每 3 日翻堆一次，但在发酵期间如发现有厌气发酵，则宜每日翻堆一次，直至发酵情况达到好氧性发酵为止。

④ 发酵期间，垃圾水分应保持在 40%～60%。

⑤ 如堆积垃圾仅靠翻堆，其发酵效果不理想时，可考虑

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

设置送风设备。设置送风设备需注意下列事项：

a. 装设电动通风机两台以上；

b. 槽底应配置与堆积面积相等的散气板。

c. 散气板应采用耐酸、耐碱材料制材。

d. 散气板下方应设送风管的混凝土沟，使空气能均匀送入。

e. 散气板的通气率应为 0.15～0.5 Nm^3/（min·m^2 干燥板面积）。

f. 采用自然通风方式者，应有充足的通风孔，并需防止浸出污水由通风孔流出。

（三）生物固体堆肥化应注意的问题

以上工艺和堆肥装置是以垃圾及其他固体的废弃物为主开发研制的，所以用以上堆肥装置对生物固体进行堆肥处理时，宜参入垃圾、秸秆或刨花等物，以利于通气操作，并调配 C/N 比，使之达到一定的要求。

利用生物固体进行堆肥化，可以参照国家颁布的《城市生活垃圾堆肥处理厂技术评价指标》（CJ/T3059—1996）中的有关规定。

按照规定，堆肥原料特性应满足如下要求：密度一般为 350～650 kg/m^3；组成成分中有机物质量分数（湿重）应≥20%；含水率 40%～60%；碳氮比（C/N）为 20∶1～30∶1。另外，pH 值控制在 7～8.5；温度 50～65℃，充气堆肥保持 55℃ 3 d 以上，自然堆肥保持 55℃ 15 d 以上，并翻动 5 次，最高温度不宜超过 75℃；充气堆肥通气量控制在 3.0～3.6 m^3/(m^3 堆肥·h)。

由前述可知，生物固体的含水率、pH 值、粒度等性状在

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

经过调理、浓缩或脱水等处理后与上述要求可能存在较大差距，需要进行适当调整后方可进行堆肥化处理。调整的主要内容如下：

（1）含水率调整

生物固体经过各种处理和脱水后的泥饼含水率一般高达65%～85%，因此通气性差，有必要对其含水率进行调整。调整的方法主要有干燥（如前所述）、二次脱水、掺加辅料、成品回流等。后面两种方法正得到重视和普及。掺加辅料法可将含水率调到60%或更低，通常所用辅料是木屑、稻草、糠壳等。成品回流法适用于含水率为60%～65%的压滤泥饼，不适用于高含水率（80%）泥饼，一般是对含水60%～65%的压滤泥饼加入差不多同等体积的成品，可将含水率降到50%左右，同时也能调节pH值并进行接种，且由于泥饼中难分解物质少，故不必再进行二次发酵，因而具有相当的优越性。

（2）pH值调整

有的生物固体在稳定处理或脱水时，因为添加了石灰（助剂），其脱水泥饼的pH值很高，一般达11～13，所以不适于微生物的生长与发酵。对脱水泥饼进行堆肥处理时，除可用上述成品回流法调pH值外，还可采用向发酵槽里吹入CO_2的办法，使含CO_2的废气在发酵槽里循环。

（3）粒度调整

脱水泥饼一般呈板状、片状或团块状。片状泥饼含水率高，贮存时由于压密也会形成团块状。为了改善板状或团块状泥饼的发酵性能，必要时可进行粉碎以调整其粒度，为此可采用锤磨机进行加工。在工程实际当中，由于掺加辅料或与成品回流混合时，已将泥饼松散开来，达到了调整粒度的目的。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

（4）接种

因脱水泥饼本身已含有大量的微生物，只要条件许可，不一定接种也能发酵。但在使用机械装置进行快速发酵时，为了加速反应，故必须接种。接种有时也可以采用特殊的菌种或专门活性微生物。近年来，已有不少外国公司声称开发出快速堆肥技术，能将堆肥时间缩短到数天甚至两天，就是采用了特殊菌种，不过这类技术的应用一般是有条件的。

前述的几种机械堆肥工艺与装置，即 Dano 式、Fairfield 式和 Schnorr 式发酵槽在生物固体堆肥中均有成功应用，尤以日本研究应用较多。

国外实践表明，条形堆肥对生物固体堆肥处理不失为一种简单易行的方法。美国费城污泥制配中心采用贝尔茨维尔（Beltsville）好氧堆肥法，1987 年可生产干污泥 5 万 t，其特点是在条形堆下部设穿孔管，用真空泵抽气，使空气从污泥混合物通过而充气，排出的气再经过成熟的肥堆过滤以防止散发臭气。

西欧诸国对生物固体堆肥处理方面给予高度重视，有许多成功的经验和技术值得学习和借鉴。

近年来，我国广大科技工作者对生物固体的堆肥与农用资源化给予了越来越多的关注，并取得了不少研究成果，也有不少污水处理厂的生物固体经过一些简单处理后用于农业回用，取得了较好的进展，但也存在着不少问题和环境污染隐患。相信生物固体的堆肥化与农用资源化在我们这个有着优良堆肥制肥传统的农业大国将得到更为科学的巨大发展，发挥其应有的作用。

三、堆肥品质要求与腐熟度

生物固体经堆肥化处理后，其成分和性质都会发生较大改

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

变。堆肥成品要应用于农林牧业，不仅要有足够的肥效，而且要以不污染土壤为原则。因此，有必要对堆肥品质进行评价。评价堆肥的标准，包括肥效成分、腐熟度、有害物质含量和杂质率等。

按照国家标准（CJ/T3059—1996）的规定，城市生活垃圾堆肥产品质量及卫生要求包括：

1．堆肥产品质量（以干基计）

①粒度：农用堆肥产品粒度≤12mm，山林果园堆肥产品粒度≤50mm；②含水率≤35%；③pH 值 6.5～8.5；④全氮（以 N 计）≥0.5%；⑤全磷（以 P_2O_5 计）≥0.3%；⑥全钾（以 K_2O 计）≥1.0%；⑦有机质（以 C 计）≥10%；⑧重金属含量：总镉（以 Cd 计）≤3mg/kg，总汞（以 Hg 计）≤5mg/kg，总铅（以 Pb 计）≤100mg/kg，总砷（以 As 计）≤30mg/kg；⑨卫生要求：蛔虫卵死亡率 95%～100%，粪大肠菌值 10^{-1}～10^{-2}个。

2．腐熟度

腐熟度是指垃圾（生物固体）中的有机物经微生物作用后腐化分解成为成分稳定、不再变化、施于土壤后能提高土壤肥效、增加农作物产量，且对作物没有阻碍的堆肥发酵状态。堆肥腐熟与否对土壤及农作物生长有重要影响，未经充分堆肥腐熟的堆肥，其 C/N 比偏高，（C/N≥30），施于土壤后，有机质仍继续分解，氮素几乎被微生物吸收，致使农作物出现缺氮现象，其生长发育受到阻碍；相反，过熟的堆肥，其碳氮比偏低（C/N≤10），当其分解时，在短时间内放出大量的氮，农作物可能因氮素过多而受害。

判定堆肥的腐熟度，暂无确定的直接标准和指标，目前，主要依据 pH 值、COD、C/N 比、总有机物等测定的经验值作

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

为参考指标。主要分为物理评价指标、化学评价指标、生物评价指标和光谱分析法。

（1）物理评价指标

物理评价指标又称表观分析法，Hang（1980 年）和李国建（1990 年）将腐熟堆肥的表观性质归纳为：堆肥后期温度自然降低；不再吸引蚊蝇；不再有令人讨厌的臭味；由于真菌的生长，堆肥出现白色或灰白色菌丝；堆肥产品呈现疏松的团粒结构。此外，高品质的堆肥应是深褐色，肉眼看上去均匀，并发出令人愉快的泥浆气味。这种方法只能从感官上进行初步判断，难以进行定量分析。

（2）化学评价指标

化学评价指标主要有：pH 值（8～9）、挥发性固体（有机质或全碳）含量、C/N 比、CO_2 释放量、水溶性有机质（酸）含量、水溶性糖含量、生化需氧量 BOD_5、有机质腐殖化程度、生物可降解指数（BI）、铵含量等。

（3）生物评价指标

经验证明，仅用化学分析方法评价腐熟度是不够的，还必须辅以生物分析的方法。生物评价的方法有植物毒性法和微生物评价法。

①植物毒性法

植物毒性用发芽指数（GI）来表示，GI 由下式确定：

$$GI（\%）=\frac{堆肥处理的种子发芽率\times种子根长}{对照的种子发芽率\times种子根长}\times 100$$

GI＞50%，则认为堆肥已腐熟并达到了可接受的程度。用 GI 判断堆肥腐熟度，可将堆肥过程分为 3 个阶段：a. 抑制发芽阶段，此阶段种子发芽几乎完全被抑制，堆肥时间 1～13 d；b. GI 迅速上升阶段，此阶段 GI = 30%～50%，一般发生

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

在堆肥后 26～65 d；c.GI 缓慢上升至稳定阶段，继续堆肥超过 65d，GI 可上升到 90%，这表明植物发芽抑制性物质是在堆肥过程中慢慢消除的。

②微生物评价法

微生物评价法是利用堆肥过程微生物相的变化作为评价依据。Willson 等研究认为，堆肥的腐熟期主要以放线菌为主，因此也可以用堆肥过程中微生物群落的演替来指示堆肥是否达到稳定阶段或是否腐熟。

（4）光谱分析法

最普遍采用的光谱分析法是^{13}C-核磁共振法和红外光谱法。利用这些先进的分析法通过研究有机质的结构变化来判断堆肥腐熟度，可以更敏感地反映堆肥中化学环境的细微差别，并提供更多的结构信息。

用这一方法判断堆肥腐熟度还有待进一步研究和完善。

第三节　污泥堆肥农业回用的安全性要求

一、污泥堆肥对土壤生态的改良修复作用

污泥或污泥堆肥对土壤生态有良好的改良修复作用，主要表现在：

1．明显改善土壤的物理性质

田间试验表明，当污泥施用量≥44.8 kt/ha 时，土壤相对密度会出现明显下降。施用生物固体能改善土壤的导水性能，提高土壤水稳性团聚体数量和土壤蓄水能力，增加土壤的孔隙度。

2．能提高土壤微生物的活性，促进土壤的生物物质循环

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

施加生物固体或生物固体肥料，能增加土壤细菌和放线菌数量分别高达 5～10 倍和 3～4 倍，大大提高土壤的呼吸强度。周立祥等研究表明，生物固体肥对硝化菌和反硝化菌的活性有重要影响。

3．能明显改善土壤的化学性质

施用生物固体能明显提高土壤有机质含量和土壤的 N、P 水平，提高土壤肥力。经碱稳定处理后的生物固体肥因 pH 值较高，对酸性土壤具有调节 pH 值的重要作用。

由于生物固体能改善土质，增加土壤肥力，因此可以用做农林土壤改良剂。在农地上施用时，能提高作物产量，如棉花、油菜、莴苣、水稻、小麦、大豆等。生物固体施用于蔬菜作物（如大白菜、辣椒、花椰菜、包菜、小青菜等）时，可代替 80%的化肥而不减产。在林地上施用时，能对树木的茎粗或增重有促进作用，如红松、山萝、红橡树、黑胡桃木等。

因此，在当前我国土质大面积退化的严峻形势下，采用生物固体堆肥及城市有机垃圾制肥，对土壤进行生态修复具有重要的意义。

二、污泥堆肥对土壤的可能危害性

当生物固体所含重金属、病原物或毒性有机物等超过农用标准（也包括低于有关标准）时，它将对土壤产生污染甚至长期危害，并通过食物链影响动物和人类的身体健康，对生态系统产生重要影响。

研究表明，重金属及类金属对农作物、土壤微生物活动及土壤肥力均有影响，如赵方杰等从英国和德国 3 个长期施用生物固体的田间实验研究中，得出了值得重视的结果：污泥施用后经过 33 年，土壤中的 Zn、Cd 的可提取性和生物有效性并

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

无下降，即使土壤重金属浓度适中，重金属也会对微生物活动、豆类作物的根瘤菌群以及微生物量有不良影响。另外，重金属在土壤中的迁移与转化等环境化学行为相当复杂，对植物也可能存在着毒害作用，因此应当予以高度重视。

当生物固体经碱性稳定化处理或生物堆肥后，其中的大量病原物可以被杀灭，使其进入土壤后危害性得以减轻。当生物固体未经堆制或堆制不充分而被送入土壤时，可对土壤生态造成长期污染并传播开来。由于土壤充当着过滤器和吸附剂的作用，污泥中 92%～97% 的细菌性病原物可被截留在土壤表层 1cm 内，病毒则更易被土壤所吸附，其吸附特征可用典型的 Freundich 或 Langmuir 吸附方程描述。另外，土壤更是虫卵和蠕虫生长发育过程所必需的环境。因此，未经处理或处理不充分的生物固体对土壤存在很大的污染危险。

毒性有机物具有致癌、致畸、致突变性，它们不仅能在土壤中残留，还能被作物吸收进入植株产生危害。因此，要严格按控制标准施用生物固体或生物固体肥，以确保人畜安全。

可见，生物固体在资源化利用作为土壤修复改良剂时，一定要考虑其所含重金属、病原物及毒性有机物对土壤和生态的污染危害作用，因此，必须经过碱性稳定化处理或堆肥处理。应该指出：生物固体在堆肥过程中，由于微生物的作用，其含氮有机物在转化过程中可能会损失氮素。另外，生物固体本身的 C/N 比较低，因此需要根据生物固体营养含量情况和施用土壤情况进行调整补充，以利于土壤的修复。因此，调制有机-无机复合肥是明智的选择和方案。

三、污泥农业回用的安全性要求

生物固体堆肥农用资源化的安全性问题主要包括 3 个方

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

面，即致病微生物、重金属物质与毒性有机物。为此，必须采取必要控制措施，提出安全性的要求。

1．生物固体堆肥农业回用的卫生学要求

城市污水处理厂处理的污水全部或部分来自生活污水，而污水中随着当地人群的健康状况和年龄结构不同存在大量的病原物，常见的有肠道细菌、蠕虫寄生虫及病毒三大类，其他如真菌类、变形虫等极少。污水中的这些病原物在污水处理过程中，大部分被保留或结合在颗粒物上而在污泥中得到浓缩富集，其数量比污水中的数量高出许多。生物固体中发现的主要病原物如表 4－4 所示。

表 4－4　生物固体中常见的病原物

病原细菌	病　毒	蠕　虫　卵
沙门氏菌（伤寒、副伤寒）	脊髓灰质炎病毒（1、2型）	圆线虫属
志贺氏菌	艾柯病毒（7、17 型）	蛔虫
致病性大肠杆菌	柯萨奇病毒（B_1、B_2、B_3、B_4、B_5 型）	鞭毛虫、毛细线虫属
埃希氏杆菌	呼肠病毒	弓蛔虫属
取尔森氏菌	腺病毒（1、2 型）	弓蛔线虫属
梭状芽胞杆菌	轮状病毒	膜壳绦虫属
	甲肝病毒	涤虫属

表中所列病原物在各种污泥，诸如生污泥、消化污泥、剩余活性污泥、混合污泥、洗涤污泥中均有存在。这些病原物在生物固体的处理处置、土地施用及管理过程中可能通过气溶胶、土壤、农作物、牧草、地面水或渗滤进地下水等多种途径

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

而广泛传播，易造成人畜、动物病害及流行，具有潜在和长期的危害性，因此，必须对病原物污染进行控制。控制的方法主要可从两方面考虑：一个是源头控制，即对生物固体进行严格的处理；另一个是加强施用场地的管理。

（1）生物固体中病原物的源头控制

病原物的源头控制方法主要是对生物固体进行消毒处理。消毒的方法包括厌氧消化、干燥、石灰稳定化、辐射与热处理和堆肥稳定化。

生物固体在中温条件下存留 25～30 d，能杀灭绝大多数病原物。如天津纪庄子污水处理厂污泥中温消化后，大肠菌群去除率达 99.2%，肠道致病菌检出率为 0；肠道病毒在厌氧消化过程中能以 75%～97% 的速度很快灭活。然而，厌氧消化不能达到完全灭活病原物的目的，在消化后的污泥中仍能检出病原物，尤其对蛔虫卵杀灭效果较差，还不到 40%。厌氧消化能促进病原物灭活的重要原因可能是消化过程中产生大量的 NH_3 引起的。

干燥是一种较好的病原物灭活手段，在污泥干燥床上（含水率＜20%），对环境因素抵抗力强的蛔虫卵也能灭活，肠道细菌更容易迅速死亡。

生物固体用石灰（生石灰、熟石灰均可）稳定不仅可以调理污泥以利于脱水、降低恶臭、钝化有毒金属，而且能有效地杀灭病原物。在 pH 值＞12 时，埃希氏菌、沙门氏菌能迅速致死，绝大部分大肠菌能被杀灭。脊髓灰质炎病毒和呼肠病毒在 pH 值＞9 时明显脱稳定化。该法对蛔虫卵和绦虫均有一定的杀灭效果。

辐射处理与热处理是较理想的生物固体消毒处理方法。1972 年西德建造了世界上第一座 Co－60 辐射污泥处理厂，随

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

后，美国、加拿大也相继采用该法。辐射处理采用 β 射线和 γ 射线进行，通过射线破坏微生物或病毒细胞中的核酸或核蛋白，达到灭活目的，但该法处理成本太高，达 16.5 美元/t。热处理灭活微生物常可采用巴氏消毒法，对病原细菌、肠病毒及寄生虫卵均有很好的杀灭效果，可达到卫生无害化要求。

生物固体的堆肥处理因有高温期（55～70℃），且持续时间长，而有较好的灭菌效果。另外，生物固体经堆肥化处理后，按一定配方制造有机-无机复合肥，通过挤压或圆盘造粒机时，利用机器造粒的高温或后期干燥处理，也可进一步杀灭残余的病原体，甚至可以完全杀灭肠道致病菌和虫卵，这样的生物固体肥料在农林牧地上施用时，一般不会再存在卫生学的问题。

目前，关于生物固体农业回用的有关卫生学控制指标还很不全面，有待进一步完善。相关标准有：

①《中国混合堆肥卫生标准（GB7959—1987）》规定：大肠菌值＞10^{-2}；蛔虫卵死亡率应达到 95%～100%。

②中国《城市生活垃圾堆肥处理厂技术评价指标（CJ/T3059—1996）规定：大肠菌值 10^{-1}～10^{-2}；蛔虫卵死亡率达 95%～100%。

③《中国农田壤溉水水质标准（GB5084—1992）》规定：大肠菌群数应≤10 000 个/L，蛔虫卵数应≤2 个/L。

④恩格尔贝格粪肥及污泥农用微生物质量指标（1985 年）：大肠杆菌＜1 000 个/100 mL 或 100 g 湿重，蠕虫＜1 个/L 或 kg 湿污泥。

3. 生物固体中病原物的管理控制

一些污水处理厂因资金或技术原因，生物固体未作消毒处理或消毒处理效果不佳，使生物固体卫生学效果不理想。这

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

时，生物固体（堆肥）在农林牧地应用时，应特别注意施用条件和施用区的管理。国外的经验和管理措施主要有：

① 慎重选择施用场地，主要考虑：a. 施用点坡度（≤3%）；b. 地下水位低，离水源远；c. 不施于砂性土壤或渗透性强的土壤。

② 控制生物固体施用区的公共通道 2 个月时间。

③ 控制家畜放牧时间≥1 个月。

④ 控制果蔬种植，施用过生物固体（堆肥）的土壤不宜种植生吃果蔬，或者宜 3 年以后再种植。

⑤ 控制喷施过程。施用时不要与生物固体直接接触。若采用喷施方式，则喷灌设施应远离居民住宅或道路至少 50～100 m。

4. 生物固体堆肥农业回用的有害物限量与控制

生物固体中的有害物质包括无机成分和有机成分，无机成分主要是重金属物质，有机成分主要是毒性有机物（数十种之多）。

研究表明，重金属在土壤中可以长期残留，如英格兰 Woburn 田间试验对生物固体中重金属的迁移特性等进行了长期研究。1942～1960 年期间，施用污泥后土壤中总 Zn、总 Cd 的浓度明显增加，是对照组的 8.5～13 倍。1961 年以来，当停施污泥后，在原施污泥的试验区内由于耕作运动使重金属浓度大幅降低，但 1985 年检测仍有 80% 滞留在表土层中。另外，研究还显示，植物与土壤中的重金属浓度是线性关系，其斜率取决于植物类型和所检测的部位。生物固体肥料中的重金属会降低土壤中的根瘤菌数目，严重影响其生物固氮能力，并且还使土壤中的其他微生物量大幅下降。因此，对生物固体中的重金属进行限制十分必要。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

我国1984年制定了农用污染物控制标准，重点是对重金属含量及施用管理进行限定，有关施用管理规定的具体内容如下：

农用污泥中污染物控制标准

（城乡建设环境保护部1984年5月18日发布）

（一）标准值（见表4-5）

表4-5 农用污泥中污染物控制标准值 （单位：mg/kg干污泥）

项目	最高允许含量	
	在酸性土壤中（pH值<6.5）	在中性和碱性土壤中（pH值≥6.5）
镉及其化合物(以镉计)	5	20
汞及其化合物(以汞计)	5	15
铅及其化合物(以铅计)	300	1 000
铬及其化合物(以铬计*)	600	1 000
砷及其化合物(以砷计)	75	75
硼及其化合物(以水溶性硼计)	150	150
矿物油	3 000	3 000
苯并(a)芘	3	3
铜及其化合物(以铜计**)	250	500
锌及其化合物(以锌计**)	500	1 000
镍及其化合物(以镍计**)	100	200

* 适用于含六价铬极少的具有农用价值的，不适用于含六价铬的工业废渣；

** 暂作参考标准。

（二）其他规定

1. 施用符合标准污泥时，一般每年每亩*用量不超过2 000 kg(以干污泥计)。污泥中任何一项无机化合物接近于

---

* 1亩≈$\frac{1}{15}$公顷。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

本标准时，连续在同一块土壤上施用，不得超过20年。含无机化合物较少的石油化工污泥，连续施用可超过20年。在隔年施用时，矿物油和苯并（a）芘的标准可适当放宽。

2. 为了防止对地下水的污染，在砂质土壤和地下水位高的农地上不宜施用污泥；在饮水水源保护地带不得施用污泥。

3. 生活污泥需经高温堆腐或消化处理后才能施用于农田。污泥可在大田、果园和花卉地上施用，在蔬菜地和当年放牧的草地上不宜施用。

4. 在酸性土壤上施用污泥除了必须遵循在酸性土壤上施用污泥的控制标准外，还应该同时年年施用石灰以中和土壤酸性。

5. 对于同时含有许多种有害物质而含量都接近本标准值的污泥，施用时应酌情减少用量。

6. 发现因施用污泥而影响农作物生长、发育或农产品超过卫生标准时，应停止施用污泥和立即向有关部门报告，并采取积极措施加以解决。例如施石灰、过磷酸钙、有机肥等物质控制农作物对有害物质的吸收，进行深翻或用客土法进行土壤改良等。

（三）标准的监测

1. 农业环境保护部门必须对污泥和施用污泥的土壤、作物进行长期定点监测。

2. 制定本标准依据的监测分析方法是《农用污泥监测分析方法》。

美国、欧洲早在20世纪70年代就提出污泥重金属限量标准，以后不断予以修正。美国环保署1993年制定了503条例（USEPA 503），欧盟在1996年制定了欧盟污泥农用条例（EC条例），对污泥中重金属含量进行规定（目前还在进一步

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

修正当中），其主要限制如表 4－6 所示。

表 4－6　美国和欧洲对污泥农用中重金属限制的比较

生物有机固体 (mg/kg)		美国		欧洲			英国	
		特殊生物有机固体 (mg/kg)	施用量 kg/(ha·年[a])	土壤 (mg/kg)	生物有机固体 (mg/kg)	施用量 kg/(ha·年[a])	土壤 (mg/kg)	施用量 kg/(ha·年[a])
As	75	41	2.0	—	—	—	50	0.7
Cd	89	39	1.95	1～3	20～40	0.15	3	0.15
Cr	3 000	1 200	150	—	—	—	400	15
Cu	4 300	1 500	75	50～140	1 000～1 750	12	135	7.5
Pb	840	300	15	50～300	750～1 200	15	300	15
Hg	57	17	0.85	1～1.5	16～25	0.1	1.5	0.1
Mo	75	75	—	—	—	—	4	0.2
Ni	420	420	21	30～75	300～400	3	75	3
Se	100	36	5	—	—	—	4	0.15
Zn	7 500	2 800	140	150～300	2 500～4 000	30	200	15

	荷兰		瑞典	
	生物有机固体 (mg/kg)[b]	生物有机固体 (mg/kg)	施用量 kg/ha·年[c]	土壤 (mg/kg)
As	15	—	—	—
Cd	1.25	2	0.75	0.4
Cr	75	100	40	30
Cu	75	600	300	40
Pb	100	100	25	40
Hg	0.75	2.5	1.5	0.3
Ni	30	50	25	30
Zn	300	800	600	75

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

续表

	西班牙				
	生物有机固体(mg/kg) pH<7 土壤	生物有机固体(mg/kg) pH>7 土壤	土壤(mg/kg) pH<7	土壤(mg/kg) pH>7	施用量 kg/(ha·年[d])
Cd	20	40	1	3	0.15
Cu	100	1 750	50	210	12
Pb	750	1 200	50	300	15
Hg	16	25	1	1	0.1
Ni	300	400	30	112	3
Zn	2 500	4 000	150	450	30

注：(a) 超过 20 年；(b) 对耕地来说，其值是该值的 2 倍；(c) 10 年平均值；(d) 7 年平均值。

应该指出，要控制和降低生物固体中重金属物质的浓度是很困难的，一般情况下，生物固体的处理处置过程不会降低重金属的浓度，有时甚至还会提高其浓度，如生物固体的堆肥处理，因堆肥处理腐熟后其体积有大幅度降低，因而使重金属浓度得以提高。生物固体堆肥中重金属物质的控制主要应该从源头加以控制，生物固体中的重金属都是来自于废水，城市生活污水中重金属含量很少，重金属主要来自工业污水，因此控制重金属及其他毒性物质的最好办法是将工业污水收集处理与城市生活污水收集处理分开进行。如表 2－5 中，苏州城西，太原古交、太原镇城底的污水均为城市污水时，生物固体中 Cu、Pb、Zn、Hg、Cd、Ni、Cr 的含量均很低，大大低于国家控制标准，因此，城市污水处理厂的建设应从城市规划、废水管网

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

设计等开始就考滤城市污水的单独处理，以利于后续水的回用与生物固体的农业回用。

至于有机毒性物质的限量与控制，目前尚无理想的办法，也缺乏相应的控制标准。尽管研究显示，生物固体在堆肥过程中，通过微生物的作用会降解清除一部分毒性有机物，如硝基芳香烃、农药、多环芳烃等，但总的来说，笔者认为最经济有效的策略是源头控制，与重金属物质一样，将生活污水与工业废水严格分开收集，单独处理将是最为行之有效的。

中国城镇水网
www.chinacitywater.org

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

第五章　城市污泥的能源化利用

生物固体中含有大量的有机质，为其能源利用提供了物质基础。生物固体的能源利用主要有3种形式，即：厌氧消化制沼气；热解处理炼油；焚烧发电或取暖。

第一节　城市污泥的厌氧消化处理与沼气利用

一、污泥厌氧消化的基本原理

生物固体的厌氧消化是在微生物的作用下通过液化、酸性发酵和碱性发酵3个阶段后产生沼气的过程。其基本生化反应式如式(4－6)～(4－15)所示。这里不再重复。

二、污泥厌氧消化的条件与影响因素

1．温度

温度适宜时，细菌发育正常，有机物分解完全，产气量高。根据操作温度的不同，可将厌氧消化分为：①低温消化：可不控制消化温度（≤30℃）；②中温消化：30～35℃；③高温消化：50～56℃。实际上，在0～56℃的范围内，产甲烷菌并没有特定的温度限制，然而在一定温度范围内被驯化以后，温度稍有升降（±2℃），都可严重影响甲烷消化作用，尤其是高温消化，对温度变化更为敏感。因此，在厌氧消化操作运行过程中，应尽量保持温度不变。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

2．污泥投配率

投配率系指每日加入消化池的新鲜污泥体积与消化池体积的比率，以百分数计。根据经验，中温消化的新鲜污泥投配率以6%～8%为宜。在设计时，新鲜污泥投配率可在5%～12%之间选用。若要求产气量多，采用下限值；若以处理污泥为主，则可采用上限值。一般来说，投配率大，则有机物分解程度减少，产气量下降，所需消化池容积小；反之，则产气量增加，所需消化池容积大。

3．营养与碳氮比

消化池的营养由投配污泥供给，营养配比中最重要的是C/N比。C/N比太高，细菌氮量不足，消化液缓冲能力降低，pH值容易下降；C/N比太低，含氮量过多，pH值可能上升到8.0以上，脂肪酸的铵盐发生积累，使有机物分解受到抑制。据研究，各种污泥的C/N比情况如表5－1所示。对于污泥消化处理来说，C/N比以(10～20)∶1较合适，因此，初沉池污泥的消化较好，剩余活性污泥的C/N比约为5∶1，所以不宜单独进行消化处理。

表5－1　生物固体的各基质含量及C/N比

基质名称	生物固体种类		
	初次沉淀污泥	剩余活性污泥	混合污泥
碳水化合物（%）	32.0	16.5	26.3
脂肪、脂肪酸（%）	35.0	17.5	28.5
蛋白质（%）	39.0	66.0	45.2
C/N比	(9.4～10.35)∶1	(4.6～5.04)∶1	(6.80～7.5)∶1

沼气池使用的消化原料的C/N比见表5－2。由表5－2可知，人粪C/N比太低，消化时应该投加高C/N比的原料如牲

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

畜粪便、植物茎秆或禾草等。所以，沼气池应采用粪便与植物秆、叶或草木等混合，才能有效地进行消化，以便利用有机废物制取沼气作为能源。

表 5-2 不同消化原料的 C/N 比

原料名称	C（%）	N（%）	C/N（%）比
人粪便（鲜）	2.5	0.85	2.9:1
猪粪便（鲜）	7.8	0.60	13:1
马粪便（鲜）	10.0	0.42	24:1
牛粪便（鲜）	7.3	0.29	25:1
羊粪便（鲜）	16.0	0.55	29:1
花生茎叶	11.0	0.59	19:1
野草	14.0	0.54	27:1
大豆茎	41.0	1.3	32:1
落叶	41.0	1.0	41:1
玉米秆	40.0	0.75	53:1
干稻草	42.0	0.63	67:1
大麦草	46.0	0.53	87:1

4. 搅拌

搅拌操作可以使鲜污泥与熟污泥均匀接触，加强热传导，均匀地供给细菌以养料，打碎液面上的浮渣层，提高消化池的负荷。20 世纪 40 年代的消化池没有搅拌设施，称标准消化池，其消化时间长，需 30～60 d。有搅拌设备的消化池消化时间为 10～15 d。

5. 酸碱度

酸碱度影响消化系统的 pH 值和消化液的缓冲能力，因此消化系统中有一定的碱度要求。若碱度不足，可投加石灰、无水氨或碳酸铵进行调节。但大量投加石灰，常使碱度偏高，泥

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

量增加，应尽量合理使用。甲烷菌的最佳 pH 值为 7.0～7.5。

6. 有毒物质含量

有毒物质主要包括重金属、Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、NH_4^+、表面活性剂以及 SO_4^{2-}、NO_2^-、NO_3^- 等。

重金属离子能与酶及蛋白质结合，产生变性物质，对酶有混凝沉淀作用；多种金属离子共存时，对甲烷细菌的毒性有互相对抗作用；NH_4^+ 的毒性主要是 C/N 比起作用；表面活性剂 ABS（硬性洗涤剂）允许质量浓度为 400～700 mg/L，软性洗涤剂 LAS 允许浓度可更高些。

阴离子的抑制作用主要来自 SO_4^{2-} 和 NO_3^-。因硫酸还原和 NO_3^- 反硝化都在厌氧条件下进行，且都是微生物的作用过程，反硝化菌和硫酸还原菌与产甲烷菌相比有争夺电子供体的优势，所以厌氧消化产气中可能有 H_2S 和 N_2 存在。当消化池中 SO_4^{2-}（≥5 000 mg/L）和 NO_3^-（COD/N：NO_3^-≤4.1）浓度过高时，会对产甲烷过程产生抑制作用。

三、厌氧消化工艺与消化池类型

目前，比较广泛采用的厌氧消化工艺主要分为 3 类：标准消化法、快速厌氧消化法和两级厌氧消化法。

1. 标准消化法

所谓标准消化法又称一级消化，其原理如图 5－1 所示。生污泥可在 1d 内从 2～3 个入口分批（2～3 次）加入池内，随着分解的进行逐渐分成明显的 3 层，自上而下依次为浮渣层、分离液层和污泥层。污泥层的上部仍可活跃地进行消化反应，下层比较稳定，稳定后的污泥最后沉积于池底。分离液通常返回到废水处理厂入口，但这样容易造成废水综合处理效率降低。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

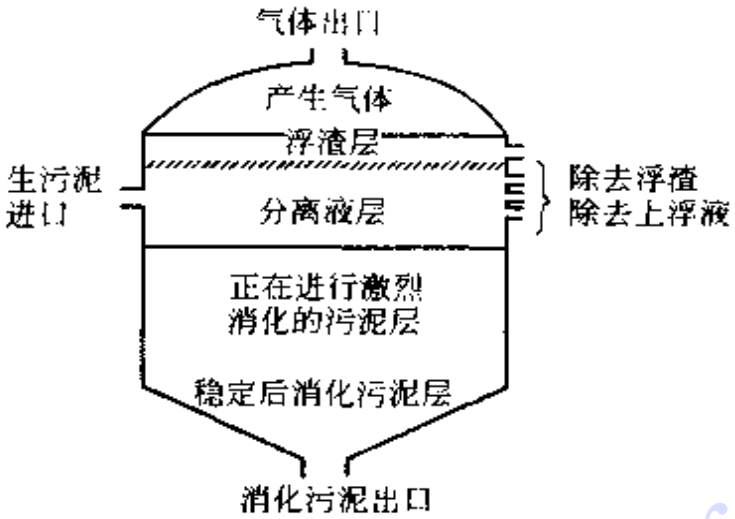


图 5－1　标准消化池工作原理图

2．快速厌氧消化法

图 5－2 是一级快速消化池工作原理图。它与标准消化池的最大差别是消化池内设有搅拌装置，因此混合均匀，操作性能好，可以解决池内沉淀问题，故被逐渐推广使用。

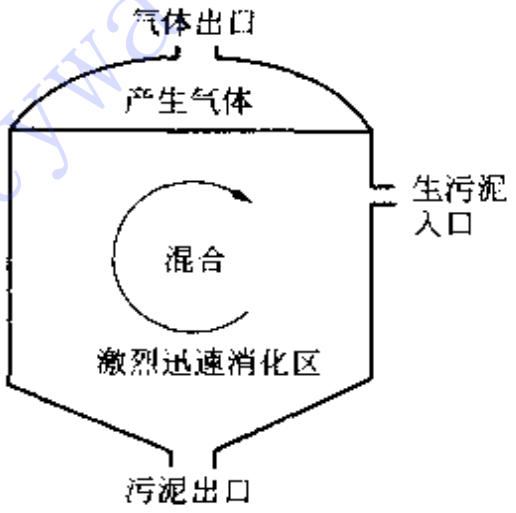


图 5－2　快速消化池工作原理图

3．二级厌氧消化法

图 5－3 为二级消化法示意图。由于它能在各种负荷下操作，故不能确定为属标准消化法或快速消化法。此种方法在第二个消化池内污泥沉降浓缩分离的同时，仍可产生一部分气体，该工艺适合于初沉池污泥或混有少量二沉池污泥的混合污泥的厌氧消化，且运转效果较好。对于活性污泥或其他深度处理废水的污泥，由于消化后难以沉淀分离，则不宜采用此种工艺，

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

而应当采用厌氧接触消化法，如图 5－4 所示。该工艺的特点是将第一快速消化池排出的污泥在第二消化池内进行沉降处理，而从第二消化池底部引出物中的微生物，作为菌种回流到第一消化池，这种工艺比快速消化法分解速度更快。

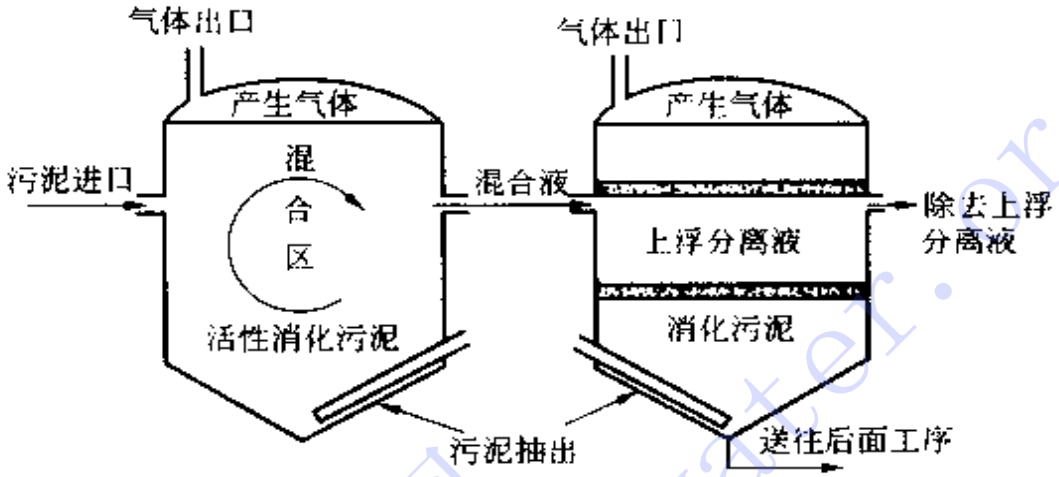


图 5－3　二级厌氧消化工作原理图

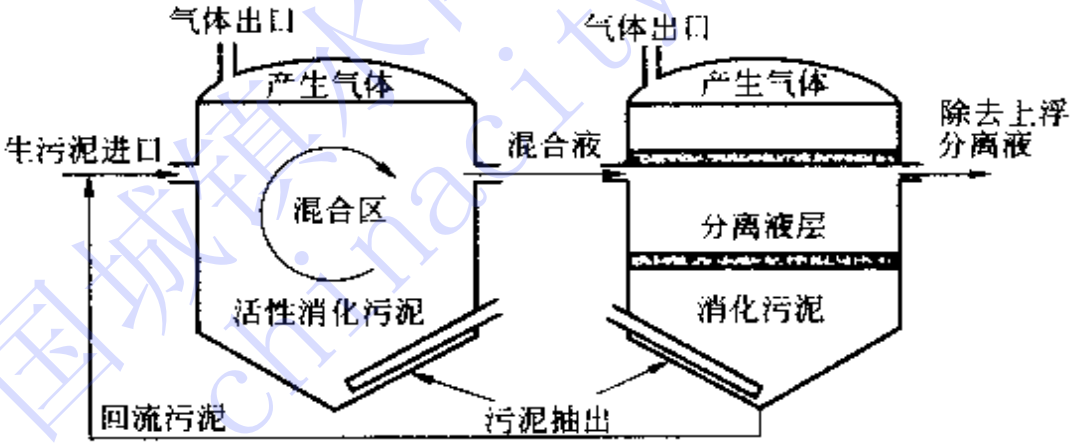


图 5－4　厌氧接触污泥消化工作原理图

此外，近年来，国外正在竞相研究开发所谓两相（两段）式污泥消化工艺，其特点主要是根据污泥和固体有机物厌氧处理的三阶段理论，构造并控制第一段生物反应器，将生物固体中的有机物进行液化与酸性发酵，然后进入第二段的厌氧生物

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

反应器（如 UASB）进行碱性发酵，产生甲烷。国内高延耀、周恭明、周增炎等也已开展污泥两相消化方面的研究。目前这一技术还处于实验室阶段。

消化池的加热方式有内部热交换式、外部热交换式和蒸汽吹入式 3 种。

四、污泥厌氧消化的沼气产生与利用

“沼气”的主要成分是甲烷（CH_4），大约占 60%，其次是 CO_2，约占 35%，此外还有少量其他气体，如水蒸气、硫化氢、一氧化碳、氮气等。它是厌氧微生物作用下产生的可燃性气体，可以收集处理作为燃料加以利用。甲烷的热值很高，燃烧热值达 20 900～25 080 kJ/m^3，密度为 1.1～1.2 kg/m^3，微溶于水。

长期以来，我国农村以人畜粪便和秸秆等为主要原料，进行厌氧消化（消化池为沼气池），产生沼气，既解决了广大农村的能源问题，又减轻了环境污染，取得了世界瞩目的成就。在长期的沼气综合利用实践中，我国农民不仅将沼气作为能源利用，还开发了其综合利用途径，如应用于塑料大棚蔬菜生产，可以为大棚增温保温，为蔬菜大棚提供 CO_2 气肥；沼气养蚕可以加快蚕的孵化，缩短饲养周期，出蚕齐，提高蚕产量和质量；沼气还可以用做农产品保鲜储存剂，控制果蔬、粮食的呼吸强度，减少储藏中的基质消耗，防治虫、霉、病、菌，达到延长储藏时间和保持良好品质的目的。

另外，甲烷是大气“温室效应”的一种重要影响物质，因此，生物固体厌氧消化产生的甲烷应该也能够加以资源化利用。

研究表明，生物固体（污泥）厌氧消化可以产生大量的甲烷，如表 5－3 所示。这为生物固体（污泥）的厌氧消化和沼气资源化利用展示了良好的应用前景。

表 5-3　欧美各国一些处理厂的产气量及成分

污泥种类	处理厂名称	加入的每克有机物的产气量(mL/g)	分解率(%)	每克可能分解的有机物的产气量(mL/g)	沼气成分(%)	
					CH_4	CO_2
沉淀后的生活污水污泥(英霍夫双层沉淀池)	巴登-巴登(原德意志联邦共和国)	483	76.5	631	61.8	37.1
	阿麦斯福特(荷兰)	340	53.3	638		
	埃森-弗罗豪森(原德意志联邦共和国)	442	68.0	650	69.4	30.6
	旧金山(美国)	500	67.0	746	63.0	33.0
	巴尔的摩(美国)	400	45.5	880	65.0	32.5
	柏林(原德意志联邦共和国)	383	30.6	1 250	73.7	17.7
50%工业废水沉淀污泥	杜塞尔多夫(原德意志联邦共和国)	254	46.8	542	69.0	27.0
含有工业废水的生活污水污泥	海尔布隆(原德意志联邦共和国)	136	24.4	558	60.0	35.0
50%工业废水的生活污水污泥	温尼伯(加拿大)	335	49.0	720	66.8	32.7

中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
水世界-中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

续表

污泥种类	处理厂名称	加入的每克有机物的产气量(mL/g)	分解率(%)	每克可能分解的有机物的产气量(mL/g)	沼气成分(%)	
					CH_4	CO_2
含有工业废水的生活污水污泥	华盛顿(美国)	574	59.5	965	62.0	34.0
活性污泥	埃森-雷林豪森(新厂)	269	42.0	640		
	皮奥里亚(美国伊利诺斯州)	233	24.2	963	67.0	32.5
	加里(美国印第安纳州)	399			61.8	30.0
污泥+菜屑	阿麦斯福德(荷兰)	343	32.1	1 037	55.0	45.0
污泥+菜屑+纸屑		358	39.3	911	58.9	41.1
污泥+格栅渣	布达佩斯(匈牙利)	468.6	58.0	810		
格栅渣		320	30.0	1070	60.0	40.0
玉米屑		244	30.5	800	42.5	47.7
麦 秆		342	49.0	700	58.0	
马 粪		250	20.0	1250	60.0	
浮 渣	埃森(原德意志联邦共和国)	545	50.0	1 090		

中国城镇水网 www.chinacitywater.org
水世界-中国城镇水网 www.Chinacitywater.org
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

国外有些污水处理厂用沼气代替燃油在内燃机上使用，使热能变为机械能，又可由沼气发动机带动发电机发电，将机械能变为电能。甲烷的热值约为 2.3 MJ/m^3，则发电量可达 6.4 kW，由于发电机热效率为 25%～31%，所以，每 m^3 甲烷可发电 1.6～1.9 kW，其余的约 70%中，30%变成水套中的热水，30%随烟气流失，10%为散失损耗。污水厂的沼气发电余热可以综合利用，总能源回收率可达 75%～80%，其中 30%发电，45%～50%的热能通过交换后可用于消化池的加温保温。

第二节　污泥的焚烧处理与热能利用

污泥的焚烧是指对脱水或干燥后的污泥，依靠其自身的热值或辅助燃料，送入焚烧炉进行热处理的过程，这是由生物固体具有一定热值和可燃烧性决定的。

污泥的焚烧已有近 70 年的发展历史。1934 年，美国密西根 Dearborn 安装了第一台有记录的污泥焚烧炉，20 世纪 60 年代，用做污泥焚烧的主要是多膛式焚烧炉，目前仍有 170 余座多膛炉在美国运转，81 座在日本运转。由于辅助燃料成本上升和更加严格的气体排放标准，多膛炉逐渐失去竞争力，促使流化床焚烧炉成为较受欢迎的污泥焚烧装置。流化床焚烧炉于 20 世纪 60 年代开始于欧洲，70 年代出现于美国和日本，自 1962 年以来，有 125 座流化床焚烧炉在美国安装，其中 43 座是 1988 年以来安装的。此外，还有逆流回转式焚烧炉和立式焚烧炉。下面简要介绍多膛式焚烧炉与流化床焚烧炉。

1. 生物固体的多膛式焚烧炉

多膛式焚烧炉又称立式多段焚烧炉，如图 5－5 所示，它是一个垂直的圆柱形耐火衬里的钢制设备，内部有许多水平的

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

由耐火材料构成的炉膛，一层一层叠加，一般多膛式焚烧炉可含有4～14个炉膛，从炉子底部到顶部有一个可旋转的中心轴。每个炉膛上有搅拌装置，可以耙动污泥，使之以螺旋形轨道通过炉膛，辅助燃料的燃烧器也位于炉膛上。

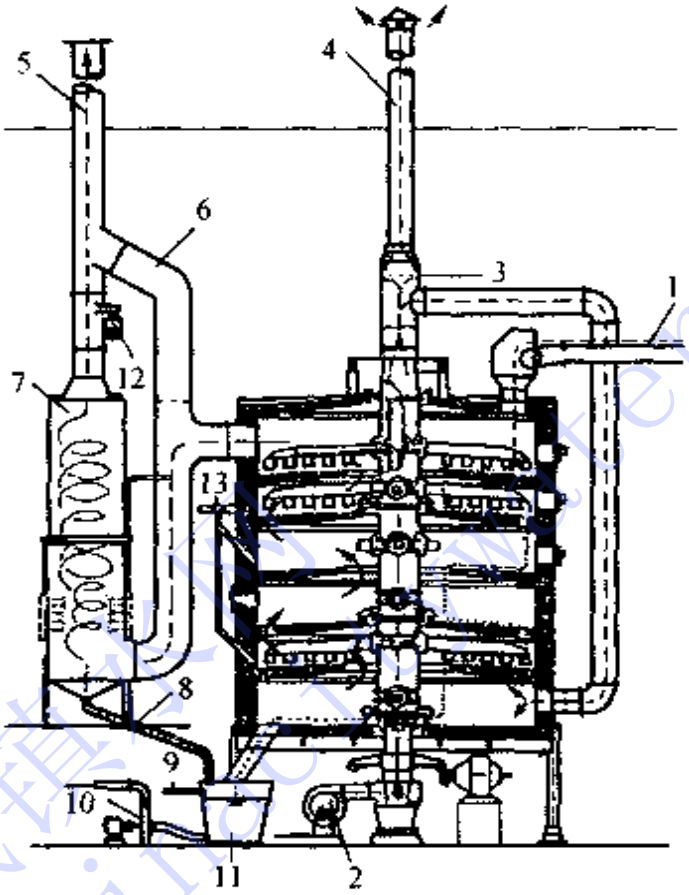


图5-5　立式多段焚烧炉

1—泥饼；2—冷却空气鼓风机；3—浮动风门；4—废冷却气；5—清洁气体；6—无水时旁通风道；7—旋风喷射洗涤器；8—灰浆；9—分离水；10—砂浆；11—灰桶；12—感应鼓风架；13—轻油

多膛炉的工作过程是污泥由上而下逐层下落，顶部两层起污泥干燥作用，温度为480～680℃，可使污泥含水率降至40%以下；中部几层为污泥焚烧层，温度可达760～980℃；下部几层称缓慢冷却层，主要起冷却并预热空气的作用，温度

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

为260～350℃。多膛式焚烧炉的规模为5～1 250 t/d不等，可将污泥的含水率从65%～75%降至0%左右，污泥体积降至10%左右。

根据经验，燃烧热值为17 380 kJ/kg的污泥，当含水量与有机物之比为3.5:1时，可以自燃而无需辅助燃料；否则，应用辅助燃料。辅助燃料有煤气、天然气、消化池沼气、丙烷气或重油等。多膛式焚烧炉在过量空气（体积分数75%～100%）条件下工作比较理想，能产生更多的热能。

2．生物固体的流化床式焚烧炉

流化床式焚烧炉系统由风箱（强制通风室）、空气分配器、流化床和分离区组成。流化床的特点是利用硅砂（粒径0.3～2 mm）为热载体（深度1～1.5 m），在预热空气的喷流下，形成悬浮状态，泥饼加入后，与灼热的砂层进行激烈混合焚烧，如图5－6所示。通常，污泥焚烧的床温为730～870℃，自由空域温度高20～40℃。在自由空域里，气体残留时间通常为5～7s，足以破坏大部分有机物。

流化床是较好的热氧化器，其焚烧气体外排较少，采用适当气体净化器，流化床焚烧炉即可满足严格的气体排放标准。目前，国际上正大力开发自体干燥流化床焚烧系统，英国西北水处理公司设计的消化污泥焚烧装置甚至可以有余热用于发电。

生物固体的焚烧处理具有许多优点：① 污泥可在原位实现最大减量化；②所有病原物均可杀灭，有毒污染物被氧化；③灰泥中的重金属活性比污泥中的要低得多；④使用先进的空气净化设备，可使气体达标排放。随着固体废弃物（特别是生物固体）焚烧技术的不断进展，相信污泥焚烧技术将会成为一种可以接受的污泥管理方式。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

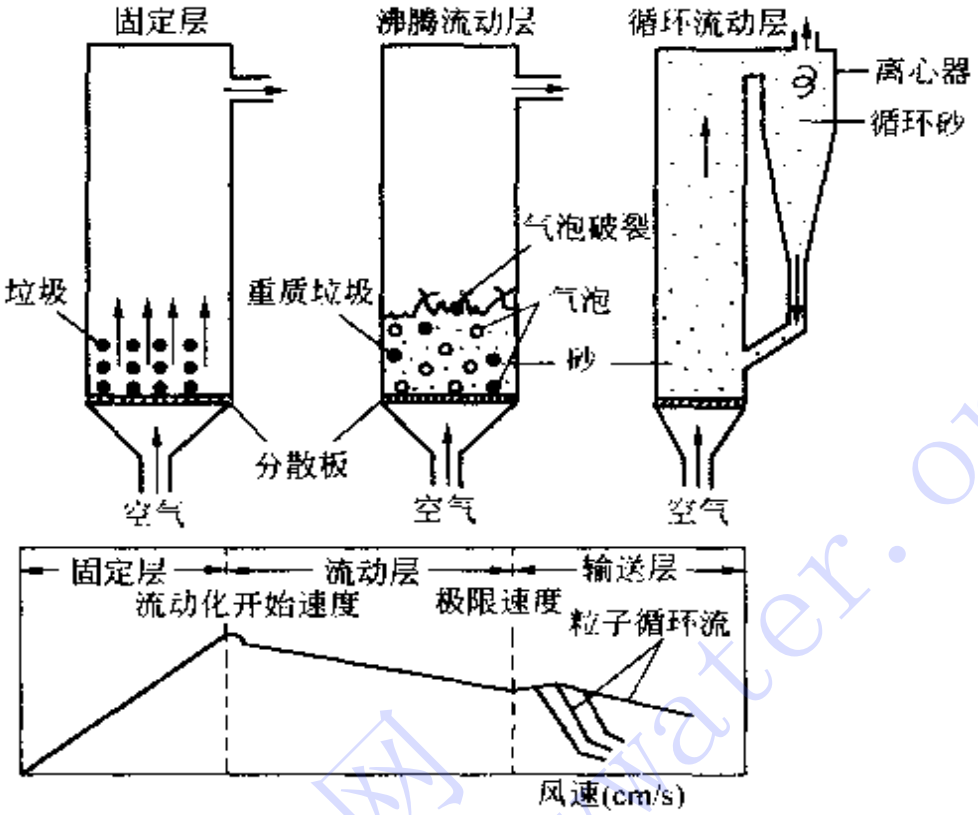


图 5-6 流化床焚烧炉

第三节 污泥的热化学处理与炼油技术

城市污泥的能源化利用，除了厌氧消化制取沼气或焚烧供热发电外，还可以进行低温热处理，制取燃料，即低温炼油技术。该技术是指在 400～500℃常压缺氧条件下，通过对干燥污泥进行热分馏和催化转变，使污泥中的脂类和蛋白质等变成碳氢化合物的过程。

关于污泥低温炼油技术的最早报道可追溯到 1939 年的法国专利，在该专利里，Shibata 首次阐明了污泥热化学转变处理的工艺。到 20 世纪 70 年代末，德国科学家 Bayer 和 Kutubuddin 等对该工艺进行了较深入的研究，基本弄清了低温炼油

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

的转变机制。现已证明，该过程与自然界将固态有机物转变为液态碳氢化合物的过程相似，可分为热分馏和催化转变两个过程，其中，催化转变的作用比热解作用更大。Bayer 及其合作者已明确证实污水污泥中的硅酸铝和重金属（尤其是 Cu）具有催化作用，在催化转变反应中起关键性作用。1983 年，Bridle 和 Campbell 在加拿大建造了一个小规模的连续反应系统，1986 年，在澳大利亚的珀斯（Perth）和悉尼（Sydney）建起了第二代试验厂，这些中试和生产性试验为大规模污泥炼油技术的开发提供了大量的数据和经验。90 年代末，第一座商业规模的污泥炼油处理厂在澳大利亚珀斯的 Subiaco 废水处理厂建造，处理规模可达 25t 干污泥 1 d。

研究与试验表明，污水污泥经过热化学处理后可以转化成 4 种主要产品：油、焦炭、非冷凝性气体和反应水，不同类型污泥其产油率有所不同，如表 5－4 所示，污泥经热化学处理转变所得的油分在质量上类似于中号燃料油，因生污泥中的挥发性固体含量比消化污泥高，所以产油率也高，因此，采用该技术处理污泥以不对污泥进行消化处理更为有利。

表 5－4　典型污泥的低温炼油转化情况

产　品	生污泥		消化污泥		工业污泥	
	产量（%）	污泥能量（%）	产量（%）	污泥能量（%）	产量（%）	污泥能量（%）
油分	30	60	20	50	15～40	50～60
焦炭	50	32	60	41	30～70	30～40
非冷凝性气体	10	5	10	6	7～10	3～5
反应水	10	3	10	3	10～15	2～4

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

图 5－7 所示为温度对产油率的影响。由图可知，温度在400～500℃之间，产油率较高，尤以425～450℃时为佳。

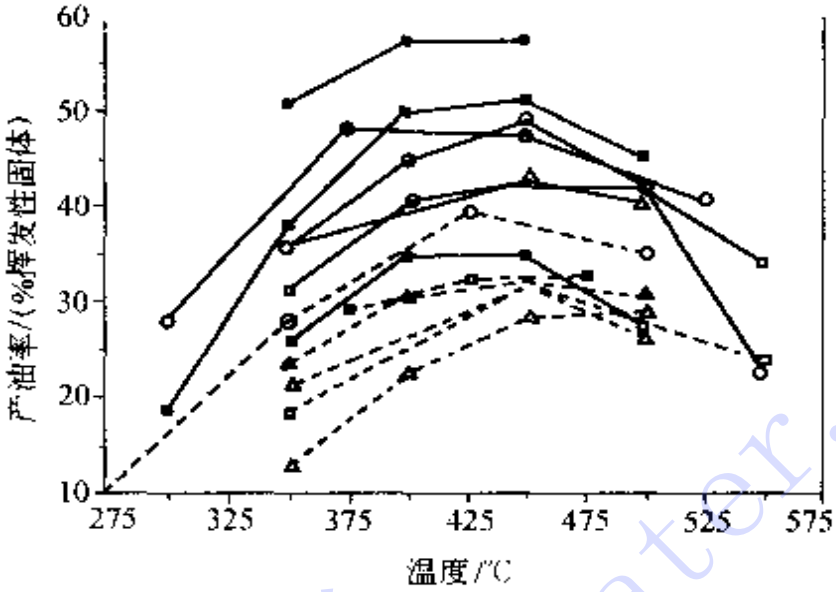


图 5－7　温度对产油率的影响

污泥炼油系统主要由装料斗、反应器、冷凝器、燃烧器及油水分离器等组成，其流程如图 5－8 所示。

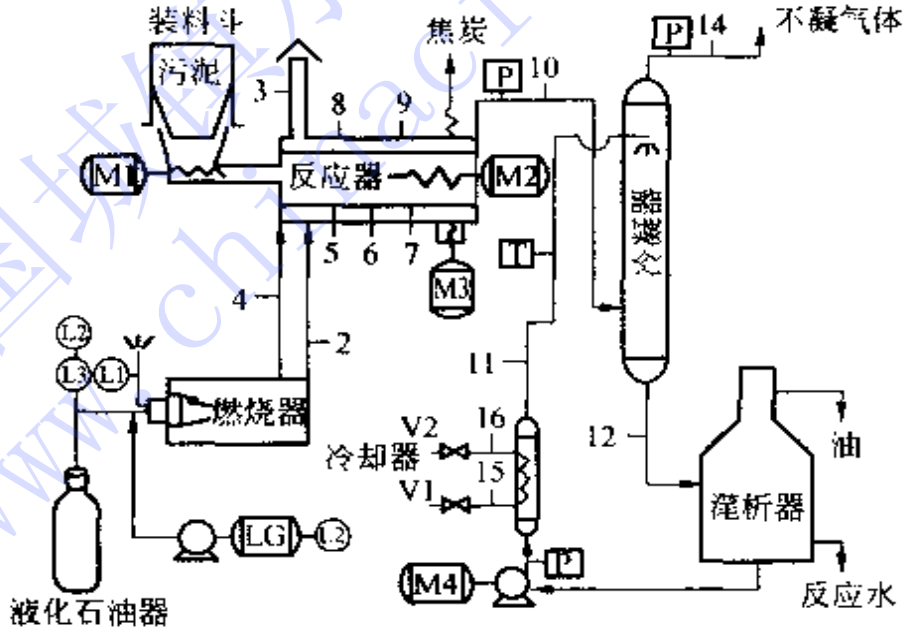


图 5－8　污泥炼油转化系统流程图

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

污泥炼油技术是正在发展中的污泥处理新技术，根据国外的经验，目前的投资成本与运行维护成本均比较高。在澳大利亚，投资成本每吨污泥为1 000～2 000 澳元，运行与维护成本为每吨 100～250 澳元。但是，该技术的环境效益和资源化效益均是很可观的，主要表现在：

①能有效控制重金属排放，特别是 Hg、Ti 的含量。Bridle 等于 1990～1994 年、Wong 和 Ho 于 1999 年的研究结果都表明，在灰烬和炭中，来自污泥的重金属被钝化。

②可回收易利用、易储藏的液体燃油，可提供 700 kWh/t 的净能量。

③可破坏有机氯化物的生成，反应器中燃烧温度应维持尽可能的低（＜800℃），可减少蒸汽中金属的排放，气体净化简单而廉价。

④占地面积小，运输材料负荷减少，运行成本较低。

我国学者何品晶等开展了污泥低温热解处理的小试研究，结果表明：污泥低温热解的适宜反应温度为 270 ℃，停留时间 30 min；脱水泥饼含水率是低温热解能量平衡的主要影响因素，过程能量平衡转折点的含水率是 78%；污泥低温热解处理的总成本低于直接焚烧法。

中国城镇水网 www.chinacitywater.org

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

第六章　城市污泥的材料化利用

第一节　污泥制砖

污泥制砖有两种工艺，一种是用干化污泥加入水泥或粘土等直接制砖，另一种是使用污泥焚烧灰加粘土调配制砖。

一、干化污泥制砖

用城市污泥制砖时，脱水污泥一般可渗入煤渣、石粉、粉煤灰、粘土或水泥等进行调配。张杰等采用制革脱水污泥（含水率60%～70%），渗入煤渣、石粉、粉煤灰、水泥等作为材料，参照砖厂水泥、煤渣空心砖块生产工艺进行了批量试验。试验配比如表6－1所示。

表6－1　污泥、水泥配比量

	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
污泥（%）	5	10	15	20	5	10	5	10
水泥（%）	13	13	13	13	13	13	23	23

将物料粉碎、混合、成型，每批样制砌块60块。将压制成型的砌块先保养1个月，再码堆存放1个月，然后再进行各项物理性能检测和砌块中铬的洗出液检测。检测结果如表6－2所示。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 6-2　砌块性能检测结果

	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
污泥/水泥（%）	5/13	10/13	15/13	20/13	5/13	10/13	5/23	10/23
外观尺寸偏差	合格	基本合格	不合格	不合格	合格	合格	合格	合格
标号（5 块平均值≥3.5MPa）	3.7	0.9	0.4	1	2.04	2.53	2.99	2.80
抗冻性（5 块平均值≥2.8MPa）	2.9	0.7	0.3	1	2.51	2.40	2.69	2.67
抗渗性（mm）	Q 级	—	—	—	Q 级	Q 级	Q 级	Q 级
砖浸出液铬的质量浓度（mg/L）	未检出	0.018	0.074	0.088	0.04	0.170	未检出	0.110

注：绝干制污泥中铬含量为 23～32.6 kg。

试验表明，对砖块强度影响的主要因素有：污泥含量、污泥成分、水泥用量等。①当污泥含量比例高于 10% 时，砖块强度呈显著下降趋势；②由于油脂能直接影响水泥的结合力，故污泥中含油脂和有机物多，将导致成型砌块整体强度下降；③水泥用量在 20%～25% 时，砖块强度较高，铬的固定也较为理想。

我国湖南岳阳化工总厂污水处理厂用石灰中和酸性废水产生大量具有恶臭、黑色、浆糊状的污泥，其含水率为 90%～91%，烘干后密度为 1.94～1.97 kg/L，其化学组成如表 6-3 所示。

表 6-3　化学污泥组成成分

成分	质量分数（%）	成分	质量分数（%）
挥发分	60～70	Pb	0.5
SiO_2	≥10	Cu	0.5

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

续表

成分	质量分数（%）	成分	质量分数（%）
Fe	≥10	As	0.1
Al	2	Sn	0.005
Mg	2	Mo	0.000 7
Bi	0.007	Ag	0.001
Ti	0.015	Ga	0.001
Ni	0.001	Ba	0.03
Co	0.000 5	Be	0.000 5
Ca	1	B	0.001 5
Zn	1	Cr	0.002
Mn	0.05		

将上述干污泥粉碎，掺入粘土和水混合搅拌均匀，制坯成型并进行焙烧。试验证明，污泥比例太高时，砖块难以烧成，最适宜的污泥与粘土配比为 1∶10。表 6－4 所列为污泥砖块的物理性能情况。

表 6－4　污泥砖的物理性能

污泥∶粘土（质量比）	平均抗压强度（MPa）	抗折强度（MPa）	成品率（%）	鉴定标号
0.5∶10	8.036	2.058	83	75
1∶10	10.388	4.410	90	75

可见，当污泥与粘土质量比为 1∶10 时，污泥砖强度可与普通红砖相当。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

二、污泥焚烧灰制砖

有的污泥含有机质或油类物质较多，易对砖块造成不利影响，因此可焚烧取热后，再将其焚烧灰掺粘土制砖。焚烧灰与制砖粘土的化学组成比较见表 6－5。

表 6－5　焚烧灰与制砖粘土的化学组成的比较

	AiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	灼烧减重（g）	其他
焚烧灰 1	13	13.7	9.6	38.0	1.5	15.1	
焚烧灰 2	50.6	12.0	16.5	4.6		10.9	
焚烧灰 3	58.0	15.0	4.8	10.6	1.6	1.6	4.8
制砖粘土	56.8～88.7	4～20.6	2～6.6	0.3～13.1	0.1～0.6		0～6.0

由表 6－5 可见，污泥的性质不同，焚烧灰的成分差别很大。污泥脱水时若加入石灰作为助凝剂，会引起焚烧灰的 CaO 含量增高（如焚烧灰 1）。一般情况下，焚烧灰的成分与制砖粘土的成分接近（如焚烧灰 2、焚烧灰 3）。为了保证砖的质量，用污泥焚烧灰制砖时，应加入适量的粘土与硅砂，使其成分达到制砖粘土的成分标准，最适宜的配料比为：焚烧灰∶粘土∶硅砂＝100∶50∶(15～20)(质量比)。

试验表明，生石灰含量过高的焚烧灰，即使加入粘土与硅砂，烧成的砖块强度仍然较低，不符合标准。砖坯的烧结温度以 1 080～1 100℃为宜，如果温度升到 1180℃，砖块表面将出现熔融现象。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

第二节　污泥制生化纤维板

上海市房地局住宅建筑研究所，曾利用石油化工、印染等工业废水的剩余活性污泥试制生化纤维板，其强度可以达到当时国家三级硬质纤维板标准。武汉城市建设学院金儒林教授曾对城市污泥处理处置做过系统的总结，对污泥制建材也有较系统的介绍，这里将有关方法列出，仅供参考。

一、基本原理

活性污泥中含有大量的有机成分，其中的粗蛋白（占30%～40%）与酶等属于球蛋白，能溶于水及稀酸、稀碱、中性盐的水溶液。利用蛋白质的变性作用，在碱性条件下将其加热、干燥、加压后，会发生一系列物理、化学变化，能将活性污泥制成污泥树脂（蛋白胶），使纤维胶合起来，压制成板。

活性污泥的变性反应过程如下：

1．碱处理

在活性污泥中加入氢氧化钠，蛋白质可在其稀溶液中生成水溶液蛋白质钠盐，其反应式为：

$$H_2N—R—COOH + NaOH \rightarrow H_2N—R—COONa + H_2O$$

这样，可以延长活性污泥树脂的活性期，破坏细胞壁，使胞腔内的核酸溶于水，以便去除由核酸所引起的臭味，并洗脱污泥中的油脂。因此，反应完成后的粘液不会凝胶，只有在水分蒸发后才能固化。

活性污泥碱处理也可以投加氢氧化钙，使蛋白质生成不溶性易凝胶的蛋白质钙盐，以提高活性污泥树脂的耐水性、胶着力和脱水性能。氢氧化钙投加量越多，凝胶越快，其反应式

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

为：

$$2H_2N—R—COOH + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(H_2N—R—COO)_2 + 2H_2O$$

如果碱液浓度高，则蛋白质不仅溶解，而且会很快按肽键水解：

$$—R—CO—NH—R \xrightarrow{H_2O} —R—COOH + R—NH_2$$

2．脱臭处理

活性污泥含有大量的有机物，在堆放过程中，由于微生物的作用，常常散发出恶臭。为了消除恶臭，也为了进一步提高活性污泥树脂的耐水性与固化速度，可加入少量甲醛。甲醛可与蛋白质反应生成氮次甲基化合物：

$$H_2N—R—COOH + HCHO \rightarrow COOH—R—N=CH_2 + H_2O$$

活性污泥中蛋白质的变性与凝胶过程是蛋白质分子逐渐交联增大的过程，在空间结果上形成网络结构。活性污泥中的一些多糖类物质也能起到一定的胶合作用。活性污泥蛋白质凝胶体系的流变特性随网络结构的发展而发生变化，可由牛顿型流体变为非牛顿型流体。

据测定，20%的活性污泥树脂溶液等电点为10.55（所谓等电点是指蛋白质正、负电荷相等的pH值），该参数的控制对生化纤维板的制作有重要作用。另外，活性污泥在碱性条件下制成的树脂，有“盐析”现象产生，容易脱水，不易腐化，且在高温条件下稳定性较好，但当树脂溶液增稠后，“盐析”现象较弱。

二、制造工艺

生化纤维板的制造工艺可分为脱水、树脂调制、填料（纤维）处理、搅拌、预压成型、热压、裁边等7道工序。下面分

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

述之。

1．脱水

活性污泥的含水率要求降至85%～90%。

2．树脂调制

活性污泥树脂调制的方法是：将活性污泥与药品混合，装入反应器搅拌均匀，然后通入蒸汽加热至90℃，反应20min，再加入石灰保持90℃条件下反应40min，即成。其技术指标为：干物质质量分数为22%左右，蛋白质质量分数为19%～24%，pH＝11。各种药品配方如表6－6所示。

表6－6　活性污泥树脂配方（质量比）

配方	活性污泥（干重）	碳酸钠（工业级）	混凝剂			水玻璃35℃质量分数（%）	甲醛（40%）	石灰（CaO 70%～80%）
			三氯化铁	聚合氯化铝	硫酸亚铁			
1	100	8	15		4	30	5.2	26
2	100	8		43	4	30	5.2	26
3	100	8			23	30	5.2	26

表中甲醛、混凝剂、碱液的作用是改善凝胶树脂的性能，去臭，使其经久耐用并易于脱水，水玻璃的作用是增加树脂的粘度和耐水性。

3．填料处理

填料可采用麻纺厂、印染厂、纺织厂的废纤维（下脚料），为了提高产品质量，一般应对上述废纤维进行预处理。

预处理的方法是将废纤维加碱蒸煮去油、去色，使之柔软，蒸煮时间为4h，然后粉碎以使纤维长短一致。预处理的投料质量比为：麻∶石灰∶碳酸钠＝1∶0.15∶0.05。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

一般而言，印染厂、纺织厂的纤维下脚料因长短一致，比较清洁，可以不作预处理。

4．搅拌

将活性污泥树脂（干重）与纤维按质量比 2.2:1 混合，搅拌均匀，其含水率为 75%～80%。

5．预压成型

搅拌料不应停放过久，应及时预压成型，以免停放时间过久造成脱水性能降低。预压成型的装置如图 6－1 所示。预压时，要求在 1min 内，压力自 1.372 MPa 提高至 2.058 MPa，并稳定 4 min 后预压成型，湿板坯的厚度为 8.5～9.0 mm，含水率为 60%～65%。

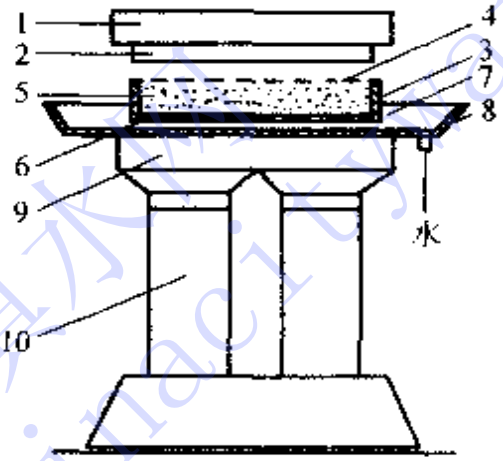


图 6－1　预压成型装置

1—上压板；2—框模盖板；3—框模框架；4—盖网；5—物料；6—垫网；7—筛板；8—集水盘；9—下压板；10—压力缸

6．热压

热压的方法是采用电热升温，使上、下板温度升至 160℃，压力为 3.43～3.92 MPa，稳定时间为 3～4 min，然后逐渐降至 0.49 MPa，让蒸汽逸出，并反复 2～3 次。

湿板坯经热压后，水分被蒸发，致使密度增加，机械强度

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

提高，吸水率下降，颜色变浅。如果湿板坯直接自然风干，可制成软质生化纤维板。

7．裁边

对制成后的生化纤维板实施裁边整理，即可得成品。

三、生化纤维板的性能与问题

生化纤维板的物理力学性能与硬质纤维板的比较见表6－7，其放射性强度见表6－8。

表6－7　生化纤维板与硬质纤维板性能的比较

板　　名	密度（kg/m^3）	抗折强度（MPa）	吸水率（%）
三级硬质纤维板	≥800	≥19.6	≤35
生化纤维板	1 250	17.64～21.56	30
软质纤维板	<350	>1.96	50
软质生化纤维板	600	3.92	70

注：在水中浸泡24 h。

表6－8　活性污泥、活性污泥树脂及水泥的放射性强度

材 料 名 称	β放射性强度（Bq/kg）
活性污泥	111
活性污泥树脂	52.91
水　泥	57.35

由表6－7可见，生化纤维板可达到国家标准。由表6－8可知，活性污泥树脂的放射性能强度低于水泥，符合卫生标准。

由上可知，利用活性污泥制生化纤维板，在技术上是可能

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

的，但由于该研究是20年前所做，对污泥处理与资源化，虽可以提供一条途径，但也存在不少问题，主要有：

①气味。在制造加工过程中易产生臭味，板材成品也有一些气味，因此需要采取防范措施。

②重金属污染与危害需作深入研究。

③工艺适用性。对城市污水活性污泥及其他工业废水的活性污泥，工艺条件、配料、成品强度及性能等均需作进一步的研究。

第三节　污泥制陶粒

一、陶粒及其分类

陶粒是由粘土、泥质岩石（页岩、板岩等）、工业废料（粉煤灰、煤矸石）等作为主要原料，经加工、熔烧而成的颗状陶质物。其特点是：具有浑圆状外形、外壳坚硬且有一层隔水保气的栗红釉层包裹，内部多孔，呈灰黑色蜂窝状。其松散密度为200～1 000 kg/m^3，具有一定的强度。通常将粒径大于5 mm的称为“陶粒”，小于5 mm的称为“陶砂”。

由于陶粒内部为多孔结构，使陶粒具有密度小、强度高、保温隔音效果好、防火、抗冻、耐化学腐蚀、耐细菌腐蚀、抗震性好及施工适应性好等优良性能，所以，可用于建筑保温砼、结构保温砼、高层结构砼、陶粒空心砖块等，亦可用于筑路、桥涵、堤坝、水管等建筑领域，在农业上用于改良重质泥土和作为无土栽培基料，在环保行业可用作滤料和生物载体等。

陶粒按不同分类方法可以分成多种类型。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

①按原料不同可分为：页岩陶粒、粘土陶粒、粉煤灰陶粒、煤矸石陶粒及其他陶粒等5类。

②按松散密度可分为：一般密度陶粒（>400 kg/m³）、超轻密度陶粒（200～400 kg/m³）、特轻密度陶粒（<200 kg/m³）等3类。

③按加工方法不同可分为：普通型陶粒和圆球型陶粒。

④按焙烧工艺不同可分为：烧结型陶粒和烧胀型陶粒。

自1950年以来，我国在陶粒的研究与生产方面得到了很大发展，至1997年，我国有陶粒生产厂家近40个，总的生产能力近2×10^6 m³，其中80%属于700～800级，密度较大，缺少400级以下的轻质陶粒，强度方面只能配置CL300以下的混凝土。由于陶粒特别是轻质陶粒优点多、需求量大，因此，开辟新的陶粒原料，开发新的轻质陶粒有重要意义。城市污泥产量巨大，将其用于陶粒生产可取得巨大的经济效益和环境效益。

二、河湖底泥制陶粒

同济大学王中平、徐基璇开展了以苏州河底泥替代普通粘土烧制陶粒的研究，已取得初步成功。

1. 苏州河底泥的性能

表6-9列出了苏州河浙江路桥泥样的化学成分，表6-10给出了泥样的颗粒分析。

表6-9 苏州河浙江路桥底泥化学成分

样品点	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	IL值
上层	60.32	3.95	9.05	5.72	2.54	2.06	1.75	11.31
中层	65.18	4.30	9.65	4.97	1.92	1.95	1.41	7.90
底层	86.65	1.05	2.65	1.61	1.25	1.02	1.04	2.52

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 6－10　苏州河浙江路桥底泥样品颗粒分析

采样点	颗粒大小（μm）					
	<5	5～10	10～25	25～50	50～100	>100
上层	10	4	31	20	15	20
中层	8	2	9	18	46	17
底层	5	1	2	9	19	64

由表中数据可知，下层泥样几乎都是粉细砂，完全不适合于作为陶粒烧制的原料；上层泥样烧失量较高，说明其含有机物较多，有一定热值，有利于陶粒制品烧制温度的降低；中层泥样介于两层之间，尚可利用。中、上层泥样的矿物组成主要为伊利石和石英，另有少量的方解石、白云石和二水石膏等。

根据生产粘土陶粒的化学组成要求可知，苏州河泥样中二氧化硅的含量偏高，颗粒偏大，三氧化铝的含量略低（普通粘土中该含量为 15% 左右），而含三氧化二铁较低，因此需要设法补充并提高三氧化铁的含量才能烧制出合格的产品。

2．工艺与烧制方案

利用苏州河底泥烧制陶粒的工序为：

挖泥→运到排泥场堆放→自然干燥→加辅料混合→生产成球→筛料进窑预热→焙烧→冷却→分级→成品。

普通粘土只需要在料棚内陈化足够时间，经一道搅拌工程即可，而对于底泥，因含水量很高，必须经排泥场堆放滤水、干燥，并外加辅料用轮碾机混合，方可保证产品质量。

陶粒烧制方案采取了正交试验法，进行了 6 次重复试验。制成品按 GB2842—81 的要求进行常规性能测试。在此基础上，将该工艺在陶粒厂进行现场生产性能中试，所得产品完全满足 GB2842—81《粘土陶粒和陶砂技术指标》的要求。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

测试结果表明，经高温焙烧后，苏州河底泥中的重金属污染物被固熔于陶粒中，在普通水中浸泡1周无任何析出，不会对环境造成新的污染，焙烧成品经王水浸析后，重金属的溶出量均有大幅下降，如表6－11所示。

表6－11　重金属含量测定结果　（单位：μg/g）

样品	处理方法	Pb	Co	Ni	Cd	Cr	As
底泥	$HCl+HNO_3$	19.5	13.6	100.8	0.58	58.1	37.2
	$(H_2SO_4+HNO_3)$浸1h	4.3	2.8	12.4	0.27	0	3.9
陶粒	蒸馏水浸1周	0	0	0	0	0	0

可见，河湖底泥用于烘制陶粒的技术是值得进一步研究开发的，它可望为河湖“富营养化”的治理和生态环境保护提供一条新的途径。

三、污水处理厂污泥制陶粒

近年来，广州华穗轻质陶粒制品厂采用城市污水厂污泥替代河道淤泥或部分粘土烧制轻质陶粒获得成功，已应用于实际生产，日处理污泥量已达300 t/d。

该厂是我国目前规模最大、设备最先进、技术力量雄厚的轻质陶粒及其制品生产企业之一，年产陶粒18.8万m^3，年产轻质陶粒砌块18万m^3。

1．原料组成与工艺流程简介

原料的基本组成是河道淤泥或田泥、城市污水厂污泥、铁矿石、石灰石、粉煤灰等。将污泥脱水，铁矿石粉碎混合，造粒后入窑烘制。其工艺流程如图6－2所示。

图6－2中的煅烧窑系丹麦F.L.SMIDTH公司生产的双筒

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

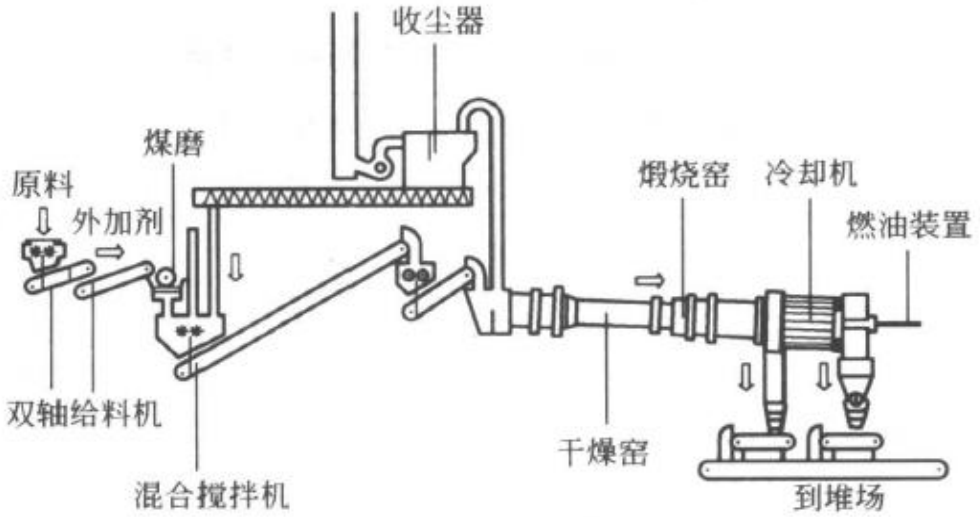


图 6－2　轻质陶粒生产工艺流程

回转窑，陶粒在窑中高温焙烧膨胀而成。

2．陶粒的规格与技术性能

该类陶粒内部具有无毛细现象的蜂巢状多孔结构，外表玻化成坚硬瓷质外壳，具有质轻可浮于水（见图 6－3）、导热系数低、吸水率小、强度高、密度小、耐高温、耐酸碱等特点（见表 6－12），可广泛应用于建材、建筑、工业、农业、交通、绿化、环保等领域中。



图 6－3　陶粒的结构形状

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

表 6　12　轻质陶粒的规格与技术性能

规格 (mm)	堆积密度 (kg/m^3)	1h 吸水率 (%)	筒压强度 (MPa)	导热系数 [W/ (m·K)]
0～25	≤450	≤10.0	1.2	0.21
5～10	≤500	≤12.0	1.5	0.21
5～20	≤420	≤11.0	1.2	0.21
10～20	≤400	≤13.5	1.0	0.21
陶砂≤5	≤750	—	—	0.23

可见，其技术指标符合国家 GB/T17431.1—1998 所规定的要求。

应该注意和需改善的主要问题是：当污泥中含有大量的重金属时，要注意窑炉的烟气治理与控制，以及产品重金属浸出性能的监控。

污泥的材料化利用除上面介绍的几个方面外，国内外均有尝试其他方面的应用，如我国有人研究用于制浆造纸和水泥生产，改性制含碳吸附材料；日本研究用于玻璃生产；德国、瑞士、美国等国曾研究用于制动物饲料等等，不一而足。

进入 20 世纪 90 年代以来，世界各国在污泥处理处置方面的发展趋势是：弃用投海，减少填埋，大力增加农林回用及能源回收，虽然材料化利用的比例还很低，但科学技术的发展往往表现出不平衡性，所以笔者认为污泥的材料化利用将来可能会成为污泥处理处置与资源化的一个重要发展方向之一，值得引起注意和重视。

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

参 考 文 献

1 钱易，米祥友．现代废水处理新技术．北京：中国科学技术出版社，1993
2 金儒林，刘永龄．污泥处置．北京：中国建筑工业出版社，1982
3 Lee D.J．生物固体的调理与脱水．迈向新世纪的有机废弃物管理与利用策略．南京农业大学编，2000年9月
4 贺延龄．废水的厌氧生物处理．北京：中国轻工业出版社，1998
5 上海市环境保护局编．废水生化处理．上海：同济大学出版社，2000
6 [日] 平冈正胜，吉野善弥著．宗永平，林喆译．污泥处理工程学．上海：华东化工学院出版社，1990
7 [日] 岩井重久审，申立澈，名取真著．吴自迈译．污水污泥处理．中国建筑工业出版社，1981
8 Smith S.R.Environmental aspects of land application of biosolids. Proceedings of Inter Work shop on Biosolids Management and Utilization Ed Nanjing Agricultural University, September, 2000, Nanjing, 220～242
9 莫测辉，吴启堂，蔡全英，李桂宋，蒋成爱．论城市污泥农用资源化与可持续发展．应用生态学报，2000，11（1）：157～160
10 王敦球，解庆林，李金城，张学洪，李全民．城市污水污泥的处理及综合利用．桂林工学院学报，1999，19（4）：387～390
11 国家环保局自然保护司编著．中国生态问题报告．北京：中国环境科学出版社，1999
12 李国鼎，金了奇等．固体废弃物处理与资源化．北京：清华大学出版社，1990
13 Wei Q F, B.Lowery, A.E.Peterson.Effect of sludge application on physical properties of a silly clay loam soil. J.Environ.Qual., 1985, 14: 178～180
14 Williams D.E. et.al. Metal movement in sludge-amended soils: a nine

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

－year study．Soil Science，1987，143：124～131

15 周立祥，胡霭堂，戈乃玢．城市生活污泥农田利用对土壤肥力性状的影响．土壤通报，1994，25（3）：126～129

16 莫测辉，吴启堂，蔡全英，等．城市污泥在土壤浸蚀保护中的应用．土壤与环境，1999，8（1）：66～70

17 张增强，薛澄泽．一些草本植物对污泥堆肥的生长响应．西北农业大学学报，1996，24（1）：65～69

18 Sopper W E. Utilization of sewage sludge in the United States for mine land recalmation，In：Hall J Eed.Alternative Uses for sewage sludge. Pergamon Press，1989，21～40

19 Furrier O J，S K Gupta. Phosphate balance in long term sewage sludge and pig slurry fertilized field experiment. In：Williams.J H，G Guide，P.L.Hermite（eds）.Long－term effect of sewage sludge and farm slurry applications.Elsevier Applied Science Publishers，1985.146～150

20 郭媚兰，王逵，张青喜，等．城市污泥农业应用研究．农业环境保护，1993，12（6）：258～262

21 林春野，董克虞，李萍，等．城市污泥农用对土壤和作物的影响．农业环境保护，1994，13（1）：23～25

22 Day A D，R K Thompson，T C Tucker. Effect of dried sewage sludge on barley genotypes.J Environ.Qual.，1983，12：213～215

23 Narwal R P. Plant availability of heavy metals in sludge－treated soil：1. Effect of sewage sludge and soil PH on the yield and chimical composition of Rape J. Environ. Qual.，1983，12：258－365

24 Valdares，J.M. Some heavy metals in soils triated with sewage sludge，their effects on yield and their uptake by plants. J.Environ.Qual.1983.12：49～57

25 Watson，J.E et al.Yield and idal elemental composition of cotton grown on sludge－amended soil. J Environ.Quality.，1985，14：174～177

26 胡霭堂，戈乃玢，周立祥，等．生活污泥农业利用途径研究．见：国家环境保护局编．水污染防治及城市污水资源化技术．北京：科

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

学出版社，1993：988～997

27 Kraske C R，L.J.Fernandez. Biogeochimical responses of a forested watershed to both clearcut harvesting and papermill sludge application. J，Environ.Qual.，1993，22：776～786

28 P.Aarne Vesilind. Treatment and Disposal of waste water sludges. 1974

29 Lia P.B. Fluidized－Bed sludge Incinerator Design. J W P C F，1974，46（8）

30 肖锦，周少奇，钱公望，汪晓军．环境工程导论．北京：中国建材工业出版社，1999

31 周少奇．生物固体肥料在土壤生态修复中的应用．全国首届恢复生态学研讨会，广州，2000

32 王新明，盛国英，闵育顺，等．大坦沙污水处理厂未处理污泥有机污染物的初步研究．广州环境科学，1994，9（2）：13～16

33 李国学、张福锁．固体废物堆肥化与有机复混肥生产．北京：化学工业出版社，2000

34 周少奇．城市垃圾的综合处理与有机垃圾资源化．广州环卫科技会议，广州：1999

35 Zhou S.Q.Thooretical stoichiometry of biological denitrifications. Environmental Technology，2001，22（8）：869～880

36 周少奇．电子流守衡原理在生物反硝化计量学研究中的应用．首届广东青年科学家论坛论文集．北京：中国科学技术出版社，2000：452～455

37 周少奇．有机垃圾好氧堆肥法的生化反应机理．环境保护，1999，3：30－31

38 周少奇，有机垃圾厌氧处理的微生物作用原理．华南理工大学学报，1999，27（9）：81～84

39 王国惠，周少奇，于鲁冀．环境工程微生物学原理及应用．北京：中国建材工业出版社，1998

40 福本勤著．赖耿阳编译．废弃物处理工学．台湾：复文书局，1982

41 华振明，高忠爱，祁梦兰，吴大宝．固体废弃物的处理与处置．北

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

京：高等教育出版社，1996

42 顾夏声，黄铭荣，王占生，等．水处理工程．北京．清华大学出版社，1985

43 陈鲁言，李顺诚，覃有钧．佛山市垃圾填埋场地下废气组成与产量研究．环境科学，1997，18（1）：30－34

44 周立祥，胡霭堂，胡忠明．城市污泥有机氮矿化动态及其影响因素的研究．环境科学学报，1997，17（3）：359－363

45 谭铁鹏．污水污泥处理的资源化技术分析．云南环境科学，1997，16（2）：51－54

46 邓晓林，王国华，任鹤云．上海城市污水处理厂的污泥处置途径探讨．中国给水排水，2000，16（5）：19－22

47 赵丽君，杨意东，胡振琴．城市污泥堆肥技术研究．中国给水排水，1999，15（9）：58－60

48 席运官．有机农业土壤培肥的理论与方法．环境导报，1998，4：37－39

49 刘凤侠．林地处理城市污水污泥——硝态氮在土壤中的迁移及对地下水的影响．城市环境与城市生态，1998，11（suppl）：36－38

50 莫测辉，吴启堂，蔡全英，李桂荣．利用城市污泥防治水土流失．土壤与环境，1999，8（1）：66－70

51 赵鼎，李川．城市污水厂污泥综合利用途径分析．辽宁城乡环境科技，2000，20（2）：58－59

52 赵方杰，S.P.McGrathi，A M Chaudrr，污泥施用地重金属的生物活性．Proceedings of Inter. Wordshop on Biosolid Management and Utilization. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2000：195－214

53 Collomb. J et al. Recovery of helminth eggs in sludge from a waste water treatment plant. Proceedings 3rd Inter Symposium of Processing and Using of sewage sludge Brighton，U.K，1983

54 Roy，D. Microbiology－detection，occurrence and removal of viruses .J Water Pollution Control Federation，1989，52：1839

55 刘凤兰．天津市纪庄子污水处理厂污泥泥质分析与评价．见：国家

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

环保局编．水污染防治及城市污水资源化技术．北京：科学出版社，1993

56 刘燕仁，等．有机 无机复合肥料制造方法研究．农业环境保护，1991，10（3）：141～142

57 Zhou S .Q, Fang H . P. Stoichiometric analysis on the sulfate toxicity of sulfate reduction digestion. C.S. Poon & X.Z. Li eds. Urban Pollution Control Technology. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University Press, 1999

58 周少奇，方汉平．低 COD/N NH_4^+ 比废水的同时硝化反硝化生物处理策略．环境污染与防治，2000，22（1）：18～21

59 卞有生．生态农业中废弃物的处理与再生利用．北京：化学工业出版社，2000

60 金儒霖．中国城市污水厂污泥处理的综述．武汉城市建设学院学报，1994，11（2）：1～12

61 张杰，谢时伟．污泥制砌块探索．中国皮革，2000，29（7）：38～40

62 戈乃玢，马淑芳，秦怀英，等．农业环境保护，1995，14（5）：202～206

63 高延耀，周恭明，周增炎．污泥两相和单相厌氧消化性能比较研究．同济大学学报，1997，25（6）：629～634

64 高延耀，周恭明，周增炎．气浮浓缩污泥两相厌氧消化．同济大学学报，1999，27（1）：43～46

65 赵庆良，王宝贞，G·库格尔．污泥与高浓度有机废物厌氧消化反应中的产气量．环境污染与防治，1997，19（1）：1～4

66 钱君律，甘礼华，李光明，等．上海城市污泥燃烧热的测定．实验室研究与探索，1999（3）：49～51

67 郝以琼，丁文川．关于重庆城市污水污泥的处理处置问题．重庆建筑大学学报，1999，21（6）：1～5

68 陈鸣．城市污水处理厂污泥最终处置方式的探索．中国给水排水，2000，16（8）：23～24

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

69 韦朝海，陈传好．污泥处理、处置与利用的研究现状分析．城市环境与城市生态，1998，11（4）：10～13
70 包伯荣，吴明红，罗文芸，等．辐射技术在废水及污泥处理中的应用．核技术，1996，19（12）：759～764
71 刘善江，徐建铭，李国学．高碑店污泥农用肥效及重金属污染防治．华北农学报，1999，14（1）：118～122
72 李军，陈邦林，胡建斌，等．高温突跃法处理城市污泥的研究．环境科学学报，2000，20（6）：751～754
73 胡龙，何品晶，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
74 张增强，唐新保．污泥堆肥化处理对重金属形态的影响．农业环境保护，1996，15（4）：188～190
75 李香真．污泥中几种重金属元素在砂土中的运移．中国农业大学学报，1997，2（3）：113～118
76 温琰茂，韦照辉．广州城市污泥和土壤重金属含量及其有效性研究．中山大学学报（自然科学版），1996，35（增刊）：217～221
77 张学洪，李金城，解庆林，等．城市污水污泥有机复合肥水稻施肥试验．广西科学，2000，7（3）：232～234
78 王虹．我国污泥制作料的试验与生产现状探讨．城市给水排水，2000，26（9）：1～3
79 景金富，王恩义，严志达，等．污泥复混肥对土壤微生物区系影响的研究．科学通报，2000，16（4）：316～319
80 李艳霞，王敏健，王菊思．环境温度对污泥堆肥的影响．环境科学，1999，20：63～66
81 曲颂华，陈绍伟．城市垃圾与污水厂污泥的混合堆肥研究．环境保护，1998，10：15～16
82 何品晶，邵立明，李国建，等．城市污水处理厂污泥直接热化学液化处理技术．环境科学，1995，16（3）：75～78
83 何品晶，顾国唯，邵立明，等．污水污泥低温热解处理技术研究．中国环境科学，1996，16（4）：254～257

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

84 谭兴立，吴林森，符巩固．陶粒开发应用现状及在湖南的发展前景．湖南地质，1997，26（1）：57－62

85 王中平，徐基璇．利用苏州河底泥制备陶粒．建筑材料学报，1999，2（2）：176－181

86 吴清仁，张拥军，赖洪光．冶炼锌铅湿废渣在水泥熟料烧成中的应用．水泥，2000，（10）：16－17

87 赵由才，徐迪民，陈绍伟．污泥的DSC和TGA分析．环境工程，1994，12（4）：38－41

88 赵义湘．国外污泥已成宝．中国建材，2000（2）：89

89 颖华．用下水道污泥制玻璃．玻璃与搪瓷，2000，22（3）：66

90 卞华松，张仲燕，刘芝玲．有机污泥改制含碳吸附剂工艺及应用．环境科学，1999，20（6）：56～59

91 马志毅，侯红娟，刘瑞强，等．污水厂污泥作吸附剂的试验研究．中国给水排水．1997，13（4）：10～13

92 Lohmann J. H., W. F. Garber. Some recent developments in sewage sludge pumping. Wat. Sci. Tech., 1988, 20(4/5): 227～236

93 Battistoni P. Pre－treatment, measurement execution procedure and waste characteristics in the rheology of sewage sludges and the digested organic fraction of municipal solid waste. Wat. Sci. Tech., 1997, 36(11): 33～41

94 Lotito. H., Spinosa L., Mininni G. and Antonacci, R. The rheology of sewage sludge at different steps of treatment. Wat. Sci. Tech., 1997, 36 (11): 79～85

95 Sozanski, M. M., Kempa E. S., Grocholski, K. and Bien, J. The rheological experiment in sludge properties research. Wat. Sci. Tech., 1997, 36 (11): 69～78

96 周少奇，冯朴荪，唐立民．在气升内环流反应器中云芝悬浮培养发酵液的流变特性．化工学报，1994，45(3)：371－374

97 Zhou S. Q., Tang L. M., Feng P. S., et al. The discovery of yield dilatant fluid and the united model of time－independent fluids. J. of South China Univ. of Tech., 1996, 24(12): 115～119

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

98 周少奇．酵母渣泥流变特性及粘弹性的测试．暨南大学学报(自然科学版),2000,21(1):25～28

99 华彬,陆永生,王贝黎等．含生物活性介质废水体系的流变行为研究．环境工程,2000,18(2):27～29

中国城镇水网
www.chinacitywater.org

0742474

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

98 周少奇．酵母渣泥流变特性及粘弹性的测试．暨南大学学报(自然科学版),2000,21(1):25～28

99 华彬,陆永生,王贝黎等．含生物活性介质废水体系的流变行为研究．环境工程,2000,18(2):27～29

中国城镇水网
www.chinacitywater.org

0742474

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

98 周少奇．酵母渣泥流变特性及粘弹性的测试．暨南大学学报(自然科学版),2000,21(1):25～28

99 华彬,陆永生,王贝黎等．含生物活性介质废水体系的流变行为研究．环境工程,2000,18(2):27～29

中国城镇水网
www.chinacitywater.org

0742474

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

98 周少奇．酵母渣泥流变特性及粘弹性的测试．暨南大学学报(自然科学版),2000,21(1):25～28

99 华彬,陆永生,王贝黎等．含生物活性介质废水体系的流变行为研究．环境工程,2000,18(2):27～29

中国城镇水网
www.chinacitywater.org

0742474

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

98 周少奇．酵母渣泥流变特性及粘弹性的测试．暨南大学学报(自然科学版),2000,21(1):25～28

99 华彬,陆永生,王贝黎等．含生物活性介质废水体系的流变行为研究．环境工程,2000,18(2):27～29

中国城镇水网
www.chinacitywater.org

0742474

水世界-中国城镇水网
www.Chinacitywater.org
水业焦点 | 水业手册 | 企业之窗 | 求职招聘 | 学术论坛
行业论文 | 专家咨询 | 会展信息 | 行业分析 | 下载专区

98 周少奇．酵母渣泥流变特性及粘弹性的测试．暨南大学学报(自然科学版),2000,21(1):25～28

99 华彬,陆永生,王贝黎等．含生物活性介质废水体系的流变行为研究．环境工程,2000,18(2):27～29

中国城镇水网
www.chinacitywater.org

0742474