

污泥焚烧处理技术及工程实例

一、污泥处理概况	1
1. 填埋	1
2. 堆肥	1
3. 焚烧	1
二、污泥焚烧处理工艺	1
1. 污泥焚烧前处理工艺	2
2. 污泥焚烧工艺流程	2
3. 污泥焚烧设备	3
4. 焚烧污染排放物	3
1) 控制 SO ₂ 的排放	4
2) 控制重金属排放	4
3) 控制二恶英排放	5
三、污泥焚烧工程实例	5
1. 德国 HSM 污水处理厂流化床焚烧工艺	5
2. 荷兰 SNB 污泥焚烧厂	10
3. 浙江大学 65t/d 污泥焚烧炉	10
4. 上海石洞口污泥干化焚烧处理工程	11
四、小结	14
1. 工艺选择时须进行全方位的比较	15
2. 规划和建设大型的污泥处理处置中心	15
3. 引进技术，培育国内设备制造能力	15
4. 建设试验性生产线的必要性	16

一、污泥处理概况

城市污水处理厂、化工、造纸等单位在污水处理过程中产生的污泥，其数量约占总处理水量的 0.5-0.7%，含水率以 95% 计。随着污水处理技术的推广和发展，污泥的排放量大大增加，种类也更复杂，其主要成分为易腐化的有机物，还可能含有多种有毒有害物质。污泥处理的目的是达到减量化、稳定化、无害化和资源化。目前比较成熟的污泥处理方法有填埋、堆肥和焚烧等。

1. 填埋

污泥填埋有直接填埋和卫生填埋两种处理方式。直接填埋的是将简单灭菌处理后的污泥直接倾倒在低地或谷地，而卫生填埋是将污泥运至垃圾填埋场与垃圾合并进行无害化填埋，优点是处理成本低，可增加城市建设土地。缺点是污泥中的有毒有害重金属和病原微生物会污染土地和水资源，必须考虑填埋场的地质、水文和土壤条件，使用受到一定限制。今后污泥填埋处理所占比例将会减少。

2. 堆肥

堆肥处理是将污泥中的有机物进行生物化学降解作用，使之转化为稳定的腐殖质。堆肥处理可以改善土壤的物理性能增加土壤的保肥能力缓冲作用和微生物含量。堆肥法较好地解决了污泥的出路问题，具有一定的经济和社会效益，值得研究发展。

今后的发展方向是提高堆肥的质量，进一步开发利用堆肥产品，培育能提高堆肥速度的菌种，发展各种堆肥原料混合发酵。

3. 焚烧

焚烧是使污泥中的可燃成分在高温下充分燃烧，最终成为稳定的灰渣。焚烧法具有减容、减重率高，处理速度快，无害化较彻底，余热可用于发电或供热等优点。近年来，焚烧法采用了合适的预处理工艺和先进的焚烧方法，满足了越来越严格的环境要求。在发达国家应用较为广泛。当然也不能片面认为焚烧法就是最好的污泥处理方法。

二、污泥焚烧处理工艺

污泥焚烧是将污泥置入焚烧炉内，在过量空气加入情况下，进行完全焚烧。焚烧后最终污泥含水率为 0，其中不存在多环芳烃类污染物，其它有机污染物含量也几乎为 0，重金属离子不能被有效去除，沉积在飞灰和炉渣中，其体积大为

缩小使污泥最终处置极为便利。

1. 污泥焚烧前处理工艺

污泥含水率的多少是污泥焚烧处理中的一个关键因素。它直接影响污泥焚烧设备和处理费用（当污泥挥发物含量高、含水率低时，通常能维持自燃）。因此降低污泥含水率对于降低污泥焚烧设备及处理费用是至关重要的。浓缩污泥的含水率一般在 95%以上，采用机械脱水装置脱水处理后，一般仍高达 75%以上。如此高的含水率一方面不能维持燃烧过程的自动进行，必须加入辅助燃料；另一方面使污泥体积庞大，增加了焚烧过程的运输困难。因此污泥的干燥处理是焚烧过程中必须解决的首要问题。

污泥所含水分性质复杂，有自由水分、间隙水分、表面水分、结合水分等存在形式。常用的方法是污泥经浓缩、脱水后，采用专门的热干燥设备直接或间接干燥，能使污泥的含水率降到 40%以下。

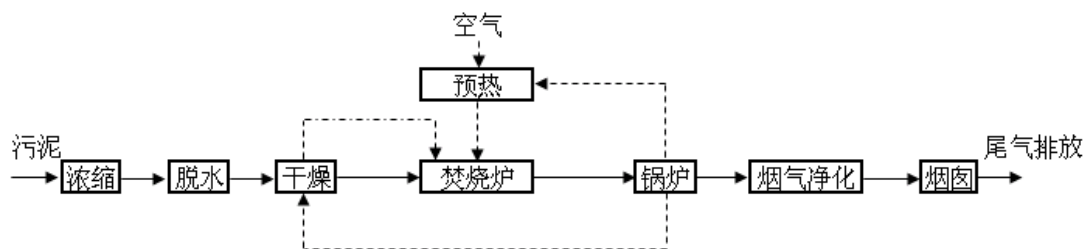
可以考虑使用焚烧炉排烟干燥，有条件的地方也可建成污泥干燥场，根据干燥后的污泥成分可选作燃料，肥料，甚至建材。

一般如将污泥含水率降至与挥发物含量之比小于 3:5 时，可形成自燃，节约燃料。温度、时间、氧气量、挥发物含量也是焚烧能否取得成功的基本条件。温度超过 800℃时有机物才能燃烧。但此时污泥燃烧会产生大量恶臭性刺激气体。为消除此种气体一般将温度升至 1000℃或加设二次燃烧设备。焚烧时间越长，焚烧越彻底，但会增加能耗，因此一般污泥焚烧时间为 0.5h-1.5h。氧气是焚烧的动力，通常由空气供应（空气量不足，燃烧不充分，空气量过多，加热空气会消耗过多的热量也不适宜）。一般采用 50%-100%过量空气。污泥挥发物含量一般可反映出污泥含潜热的量。这部分热量可用于污泥焚烧，但往往不足以支持燃烧，因此还需从外界补充热能。污泥在进入焚化炉前加以必要的预处理能使焚烧更有效地进行。将污泥粉碎可使投入炉内污泥均匀，保障燃烧充分；污泥预热可使其含水率下降，降低污泥焚烧时所耗能源。（有关污泥脱水和干化的详细资料参看《污泥脱水及干化工艺调研报告》）

2. 污泥焚烧工艺流程

污泥焚烧的典型工艺流程如下图所示。来自污水处理厂的剩余污泥经浓缩、脱水、干燥后，进入污泥焚烧炉，余热可用于空气预热、污泥干燥，焚烧炉尾气

经烟气净化系统去除大部分污染物之后，达标经烟囱排入大气。



3. 污泥焚烧设备

污泥焚烧过程中的核心设备是焚烧炉。焚烧炉的选用主要取决于污泥的处理量及其特性，以及财力、技术等。对于处理量小，热值低的污泥采用投资较少的简易焚烧炉是恰当的；对于处理量大，资源利用率高的污泥可使用投资较大、技术装备较好的焚烧炉。日前使用的有立式多层炉，回转窑炉，流化床炉，喷射焚烧炉等。

流化床焚烧炉已被广泛用于焚烧城市生活垃圾和有机固体废弃物。日本、美国、欧洲各国非常重视流化床焚烧炉技术的发展。循环流化床燃烧技术是近十多年来迅速发展起来的一种新型清洁高效燃烧技术。在炉膛下部布置有耐高温的布风板，板上用惰性颗粒作为载热媒体。一次风从炉膛底部进入使炉内获得流态化，二次风从布风板上方引入，燃料从流化床侧部或上部进入，发生强烈的翻腾和循环流动。

流化床焚烧炉燃料适应性广，燃烧热效率高，能有效控制 SO_2 和 NO_2 等有机气体的产生，燃烧热强度高，设备体积小，单位投资少，在低热值燃料焚烧方面有明显的优势。我国污泥成分较复杂、含水量较高、发热值较低，流化床焚烧技术无疑是我国目前实现垃圾和污泥的高效、稳定和 low 污染燃烧的一项重要技术措施。国内中科院、浙江大学、东南大学等单位正在进行流化床锅炉焚烧污泥试验，取得了一定的经济和社会效益。

4. 焚烧污染排放物

污泥焚烧产生大量带飞灰的烟气，这些烟气中含有多种有毒物质，如二恶英、甲硫醇、 SO_x 等，形成一次污染。烟气处理工艺复杂、技术难度大、处理成本昂贵。而且废气的潜在性危害，有些还处在环保工作者的进一步认识、研究之中，如二恶英等。因此，对烟气的治理决不能掉以轻心。

据现有资料看，绝大多数国外污泥焚烧设备已从过去的静电除尘器与干式洗

涤法相结合的处理法转变成为高性能静电除尘器与湿式洗涤设备和脱硝设备相组合的处理方法。少数新厂为去除二恶英、呋喃等有毒物质还采用了袋滤式除尘设备与其它设备相组合的方式。如美国 1991 年建成的一套污泥焚烧设备就采用了干式洗涤器、消石灰喷雾、袋滤式除尘器,可有效地去除二恶英。日本川崎重工采用了湿式洗涤器、袋滤过滤器、脱硝反应塔。日前,国际上除了采用袋滤式除尘器外,还广泛通过改善焚烧炉的燃烧状态以解决这一问题。即保持高温、保持燃烧时间,使污泥得以完全燃烧。污泥焚烧的废气处理工序还有待进一步完善,还有很大的潜力可挖。污泥焚烧后,体积大为缩小,如美 Ayperton 污水厂每日进消化池污泥 9443m³,经消化后为 7930m³,脱水后为 1160m³,焚烧后体积为 99m³,为进泥体积的 1.05%。大大减轻了污泥最终处置的负担。污泥焚烧后的灰渣可以采用安全的土地填埋方法予以处置。污泥焚烧的主要缺点在于能耗太大。如日本污泥焚烧耗能量占污泥处置总耗电量的 70%。每年因此耗重油 $3.9 \times 10^5 \text{m}^3$,而且焚烧装置设备复杂,建设和运用费用高于一般污泥处理方法。因此,国内投入使用的污泥焚烧设施较少。

1) 控制 SO₂ 的排放

流化床锅炉燃料适应性强,燃烧充分,床温一般不超过 850℃,能有效抑制 SO₂ 和 NO₂ 的排放,在燃料中混入石灰石或生石灰脱硫,效果很好且价格低廉。

根据相关文献,采用循环流化床炉焚烧城市污水厂污泥,在炉内添加石灰石或生石灰脱硫情况下,烟气中 SO₂, NO₂ 等有害气体排放完全能达到国家规定的相关标准。由于污泥的含硫量较一般燃煤要低,尤其是污水厂污泥。因此,在污泥焚烧过程中,只要加强控制便能有效抑制 SO₂ 的污染。

2) 控制重金属排放

污泥中通常含有各种有害的重金属,如汞、铜、镉、铅等,这些重金属物质在水中不易降解,性质稳定,进入水体后除通过食物链逐步蓄积外,能被水中的悬浮颗粒吸附而沉入污泥中,造成了污泥中重金属含量较高。污泥的重金属主要以氧化物、氢氧化物、有机络合物等形式存在,其次为硫化物。

重金属的含量直接影响了污泥的处理工艺。重金属含量高的污泥,若用于农业,重金属会富集在植物体内,通过食物链传递给人类,造成毒害作用。此时应考虑用化学方法提取重金属元素,使之能够用于农业,或焚烧处理。

虽然污泥焚烧后的灰渣及飞灰体积比焚烧前大大减少,但有害重金属大多数都富集在残渣中,砷、汞主要富集在飞灰中。在重金属含量不超标的情况下可考虑综合利用,如制水泥,造砖等。若含量超标,不允许直接填埋,通常是采用飞灰再燃装置进行高温熔融处理后,再进行填埋,或采用化学方法将超标的重金属淋滤出来达标后再利用。

3) 控制二恶英排放

二恶英(Dioxin)是指含有两个氧键连接两个苯环的有机氯化物。二恶英的排放和扩散,首先污染大气,然后沉积到地表,进入食物链,最后达到在人体内的积累。即使在极微量的情况下,长期摄入便可引起癌变、畸形等危害。国家环保总局于2000年2月29日发布了《生活垃圾焚烧污染控制标准》,其中在生活垃圾焚烧厂污染排放限值中,明确二恶英排放值不大于 $1.0\text{ngTEQ}/\text{Nm}^3$,并从2000年6月1日起,在我国北京市、上海市、广州市和深圳市试行,2003年6月1日起在全国执行。二恶英主要来源于固体废弃物焚烧、含氯农药合成、纸浆的氯气漂白。其中垃圾焚烧所排放二恶英量为其排放总量的75%以上。因此在污泥焚烧过程中必须严格控制二恶英的排放。通常的做法有:在燃料中添加化学药剂阻止二恶英的生成;在燃烧过程中提高“3T”(Turbulence, Temperature, Time)作用效果,使燃烧物与氧充分搅拌混合,造成富氧燃烧状态,减少二恶英前驱物的生成;在废气处理过程中采用袋式除尘器或活性炭有效抑制二恶英类物质的重新生成和吸附二恶英类物质。通过改进燃烧和废气处理技术,排入大气中的二恶英类物质的量达到最小,被吸附的二恶英类物质随颗粒一起进入灰渣系统中。对灰渣采用熔融处理技术,将灰渣送入温度 1200°C 以上的熔化炉内熔化,灰渣中的二恶英类物质在高温下被迅速的分解和燃烧。

三、污泥焚烧工程实例

1. 德国 HSM 污水处理厂流化床焚烧工艺

在德国污泥焚烧工艺已有40年的历史,1962年第一台焚烧炉在德国投入使用。目前在德国,每年约有2.5-3百万吨的污水污泥产生,其中30%用于农业(堆肥),56%填埋,14%焚烧。由于污泥中含有有害重金属,农民不愿接受,预计用于农业方面的比例会逐年下降。又因填埋土地有限,而对这方面的卫生标准日趋严格,特别是欧盟颁布的《城市废物技术指南》带来更加严格的规定。已经通过

的新版本明文规定，禁止填埋有机物含量超过 5% 的污泥。由于这一法令的颁布，当前被认为最重要的处理路线-----没有无机化的填埋，将不再实用。污泥无机化处理的唯一出路就是污泥焚烧工艺。近年来，焚烧工艺变得越来越成熟，也越来越适应环保的要求。特别是在焚烧炉烟气净化这一重要领域，烟气中的有害成分经过一系列设备的处理后，已完全达到德国严格的大气环保要求。当然，石油危机的影响也不能被忽视，人们在设计焚烧炉时，有意识地考虑到能源的回用。

日前在德国境内，已有近 40 个污水处理厂拥有多年的污泥焚烧工艺的实际运行经验。其中 10 家工厂混烧生活垃圾和污水污泥，20 多家焚烧城市污水污泥，9 家专门进行工业废水污泥的焚烧处理。在德国，污泥焚烧炉首先始于多段竖炉，而后流化床炉逐渐取代多段竖炉。日前，流化床焚烧炉的市场占有率超过 90%，焚烧污泥的含水率在 45%-80% 之间，另外，在燃煤 CFB 锅炉中也在考虑混烧污泥。

在柏林自 1985 年以来运行着欧洲最大的活性污泥流化床焚烧炉，其炉格栅面积为 25m²，处理 75% 水分的污泥 15t/h。德国 Renkum/Netherlands 的 Pareno 造纸厂流化床锅炉用于发电，燃料有四种：废水污泥，20000t/a；脱墨污泥，20000t/a；树皮，40000t/a；辅助燃料为垃圾球（refuse pellets），主要由废纸和木材组成；另外含有 8% 的废料，其灰分含量大约为 11%，锅炉的最大蒸汽连续输出量 22t/h，最大工作压力 75bar，蒸汽压力 50/65bar，蒸汽温度 470℃，给水温度 105℃，排放气体温度 180℃，灰含量（max）30mg/m³。德国 Hamburg-Harburg 技术大学建设的流化床与循环床试验台系统，主要开展流化床和循环床燃用污泥污染排放特性的比较研究。

1) HSM 污泥焚烧处理厂概况

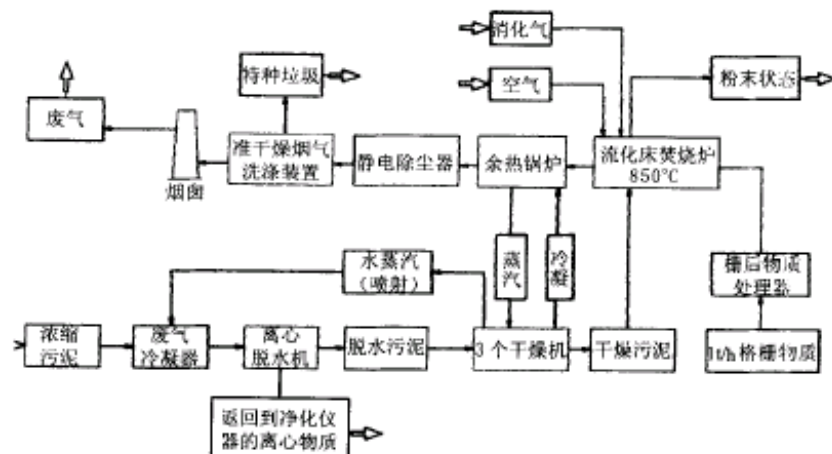
该厂是德国第一个使用焚烧工艺来处理污水污泥的水厂。在 1982 年该厂投入使用两台流化床焚烧炉，取代原来两个已有 20 年历史的多段竖炉。这是由于 HSM 污水处理厂原来的多段竖炉在运行过程中，所排放的烟气对空气造成严重污染，无法达到环保要求；其次它的运行还需要大量的热油和天然气助燃，从而花费巨大；此外，在炉膛内部不能保证炉内的栅后物质和悬浮污泥完全混合一起被燃烧。基于以上劣势，人们决定采用流化床这种新的炉型。该厂污泥焚烧运行的主要技术参数如表 1 所示。

处理污泥量（流化床焚烧炉）	4t/h GTS + 1t/h 栅后物质
残渣量	2040 kg/h 粉末状灰 + 200 kg/h 盐
焚烧	无附加燃料
安装连接功率	1225 kW
自烟囱排出的废气量	30800 m ³ /h(74℃)
排放标准	NO _x ≤ 100 mg/m ³
运转方式	连续运行

HSM 污水处理厂污泥焚烧区主要处理设备有：3 台污泥干燥机，1 台废气冷凝器，1 台污泥输送机，1 台格栅物质处理器，1 座流化床焚烧炉，1 座余热锅炉（饱和蒸汽压 9bar），1 台静电除尘器，1 台准干燥烟气洗涤装置（2 个洗气池，1 个喷射干燥机，1 个静电除尘器），钢结构，100m 高的烟囱等。

2) 污泥焚烧工艺流程

HSM 污水处理厂的污泥焚烧工艺由离心机—干燥机—流化床焚烧炉—余热锅炉—静电除尘器—灰尘贮房—准干燥烟气洗涤装置—烟囱等几部分组成。其工艺流程如下图所示：

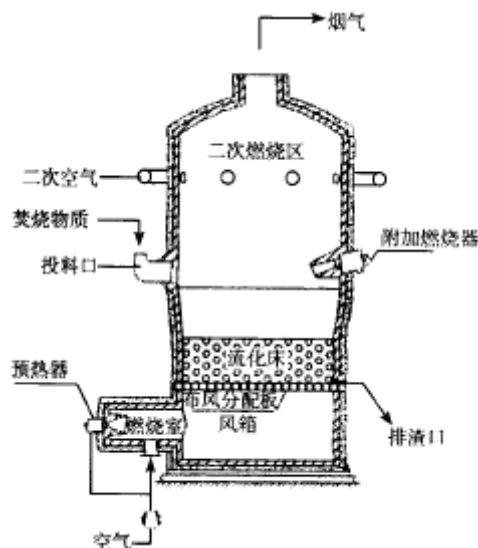


流向离心脱水机的污泥是由约 65%的消化污泥和 35%的剩余污泥所组成，经机械脱水后，污泥含水率降至 75%。在该水厂的污泥焚烧系统所使用的干燥机形式为圆盘干燥机（饱和蒸汽压为 9bar）污泥经过干燥处理后，可达到 50%-55% 的含水率。这种组分的污泥在流化床炉中可保证自行燃烧，无需额外添加助燃剂，可大大减少能源的浪费。

3) 流化床焚烧炉

1982 年投入使用的流化床焚烧炉是该污泥焚烧系统的核心部分。它几乎无须额外添加燃料和烟气再焚烧。因此它大大优于多段竖炉。烟气和飞灰在 850℃

左右时在同一个方向离开焚烧炉，在余热锅炉中温度降至 2100°C ，在接下来的静电除尘器 I 中进行脱尘，剩余的灰尘含量约为 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 。经过准干燥烟气洗涤装置净化后的烟气通过烟囱排放，灰尘被贮存在灰尘贮房中，稍后再利用或者运走。流化床焚烧炉结构如下图所示：



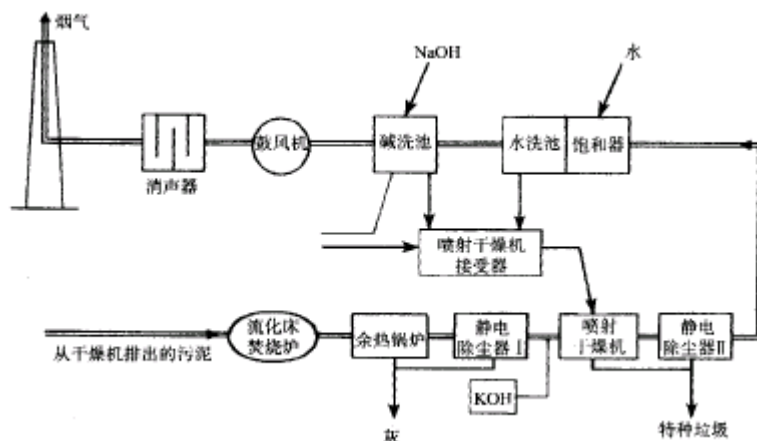
在该焚烧炉的炉膛内，有一个悬浮的焚烧区。当处于静止状态时，炉膛内有一个大约 50cm 厚的细砂床置于喷嘴式气体分配板之上。在焚烧炉运转过程中，热空气从炉膛下部通入，并以一定速度通过分配板，从而细砂床呈“沸腾”状态，产生了一个约 1.5-2.0m 的流化床。污泥从塔侧的投料口投入到流化床上，污泥便急速燃烧。直接位于流化床区域上的炉区是二次燃烧区。该流化床具有的特性是：在焚烧过程中，污泥中有机物所产生的热量，可作为污泥中所含水分蒸发所需的能量，这样对于流化床的一次燃烧区来说，附加燃烧室就不需要了，从而使流化床的温度比烟气的出口要低 $^{\circ}\text{C}$ 。

3) 烟气处理

燃烧过程中过剩空气系数为 1.4，所产生的烟气在 $850-900^{\circ}\text{C}$ 的温度范围从炉膛上部排出，进入余热锅炉（在此所产生的 9bar 的饱和蒸汽用于污泥干燥机的加热），同时烟气在这里被冷却到 210°C 。该流化床的另一特性是它在运转过程中所产生的炉渣非常少，主要是很细的飞灰，散布在烟气中，可通过余热锅炉后的静电除尘器来捕集。烟气中所含有的有害污染物通过喷雾式湿法洗涤去除。在该水厂，共设有 2 个洗气池，分别采用的是水和 NaOH 溶液进行湿法洗涤。

准干燥烟气洗涤装置是由喷射干燥机、静电除尘器 II、两个洗气池所构成，

它的处理流程如下图所示。这套装置是为了进一步去除烟气中尚存的灰尘、重金属和硫、氯、氟、氮氧化物等有害物质，烟尘量可以降低到 $<10\text{mg}/\text{m}^3$ 。特别需要指出的是，对于去除烟气中所含有的金属汞单质和汞离子，HSM 污水厂使用专门的去除方法—活性炭气流吸附法和在碱洗池添加药剂 TMT15。在静电除尘器 I 和喷射干燥机之间的连接管道中，放有一种活性炭 (KOH)，目的是为了吸附烟气中所含有的金属汞单质，大约每 m^3 米烟气需 $300\text{--}330\text{gKOH}$ 。这样含有汞的颗粒在静电除尘器 II 中，可以与烟气完全分离。接着烟气流入到两个洗气池中，第一个为水洗池，主要为吸附灰尘和一些硫氧化物、 HCl 、 HI 等有害气体， $\text{pH}<1$ ；第一个为浓度 33% 的 NaOH 洗气池，主要为去除 SO_2 等酸性气体，同时必须考虑到汞离子的去除，添加少量的 TMT15，使之与 Hg^{2+} 结合后去除。吸收汞的颗粒和其它剩余物（盐）最后一起从静电除尘器 II 中排出，作为特种垃圾被处理。



最终处理后的烟气以 74°C 离开烟气洗涤过程，经 100m 高的烟囱排入大气。

4) 能量利用

HSM 污水处理厂正在运转的整个污泥焚烧系统，非常注重能源的经济性。在保证污泥良好的脱水、干燥和焚烧的前提下，对污泥焚烧流程中各个处理单元所产生的热量进行充分的循环利用。流化床焚烧炉所产生的烟气在 $850\text{--}900^\circ\text{C}$ 被排出，进入余热锅炉，在这里被冷却到 210°C （该温度是静电除尘器工作的适宜温度），此时所产生的 9bar 的饱和蒸汽供给焚烧炉前面的干燥机使用。

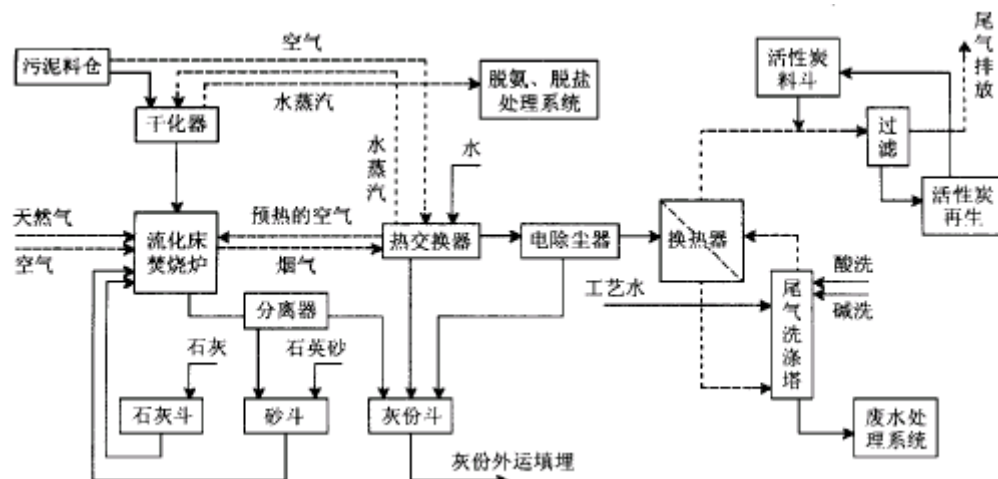
干燥机在对含水率约为 75% 的脱水污泥进行干燥时，将从污泥中所蒸发出来的水分的热量进一步通过废气冷凝器装置收集。该热量分为三部分被利用：一部分作为工厂厂房的直接热源；第二部分是将消化污泥与来自废气冷凝器中的部分热量相混合，可将到达离心脱水机时的液态污泥预加热至 50°C ，利用这种提取

热量的方法可以达到一个意想不到的效果，脱水污泥的含水率提高了 2%，并且节省了 10%的絮凝剂；第三部分，可通过热交换器将热量作为消化池的加热热源。

2. 荷兰 SNB 污泥焚烧厂

SNB 污泥焚烧厂是目前欧洲最大的污泥处理中心，位于荷兰。该中心由荷兰的五个污水处理公司共同投资建设，由 BAMAG 属下的 THYSSEN 公司技术总包，荷兰 STORK 工程公司总承包基建与安装。

该厂处理规模约为 300tDS/d，处理量约为荷兰全国总污泥量的 27%，除处理五个投资者的污泥外，还可以接收其它污水处理公司的污泥。其工艺流程见下图。运达的脱水污泥经半干化后从焚烧炉（隋性粒子流化床焚烧炉）上部进入，焚烧后的烟气经热交换回收热量，回收的热能用于污泥半干化。尾气处理系统包括电除尘、酸洗、碱洗、活性炭吸附和布袋除尘。

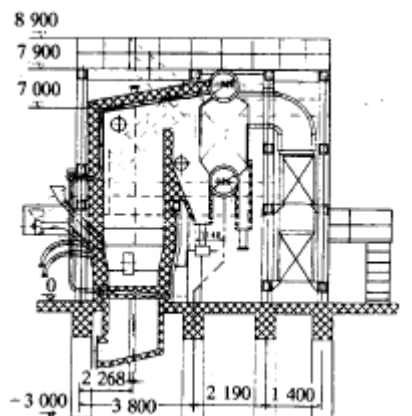


3. 浙江大学 65t/d 污泥焚烧炉

韩国某公司受政府委托，承担清州污水处理厂污泥的焚烧处理项目，浙江大学热能工程研究所承担污泥焚烧炉的设计及供货任务。污泥焚烧炉要求能处理水分为 85.1%的清州污水污泥 65t/d（保证工况），以废油为辅助燃料，同时预留加煤口作为焚烧试验用。还要求能处理废塑料和废橡胶，处理量各为 2.5t/d。

燃料分析数据见下表：

	元素分析/干燥基/%						总计/%		基高位		
	C	H	O	N	S	Cl	灰分	总计	干量	水分	热量/MJ·kg ⁻¹
污泥	42.82	6.44	19.47	7.25	0.07	1.21	22.74	100	14.9	85.1	20.21
废油	66.85	9.65	5.20	2.00			16.30	100	100	0.0	35.44
混合塑料	60.00	7.20	22.60	0.50	1.34		8.36	100	98.0	2.00	26.68
废橡胶	77.65	10.35			2.00		10.00	100	98.8	1.20	41.23



锅炉的负荷调节范围为 44%-100%污泥量。设备制造委托无锡锅炉厂，自动点火装置和辅助油系统由浙江大学热能工程研究所设计和制造。根据韩国某公司给定的设计条件，以尽量高的热空气温度(约 300℃)，计算出需要辅助油为 280kg/h，蒸发量为 2.5t/h，设计床温 850℃，其结构如上图所示。

由于采用废油为辅助燃料，为了增加废油在床内的焚烧份额，采用较低的流化风速 2.21m/s。悬浮段的风速为 1.31m/s，使污泥及废物在炉内停留时间达 5S 以上，从而可以有效破坏烟气中的有害有机物，不致引起二次污染。

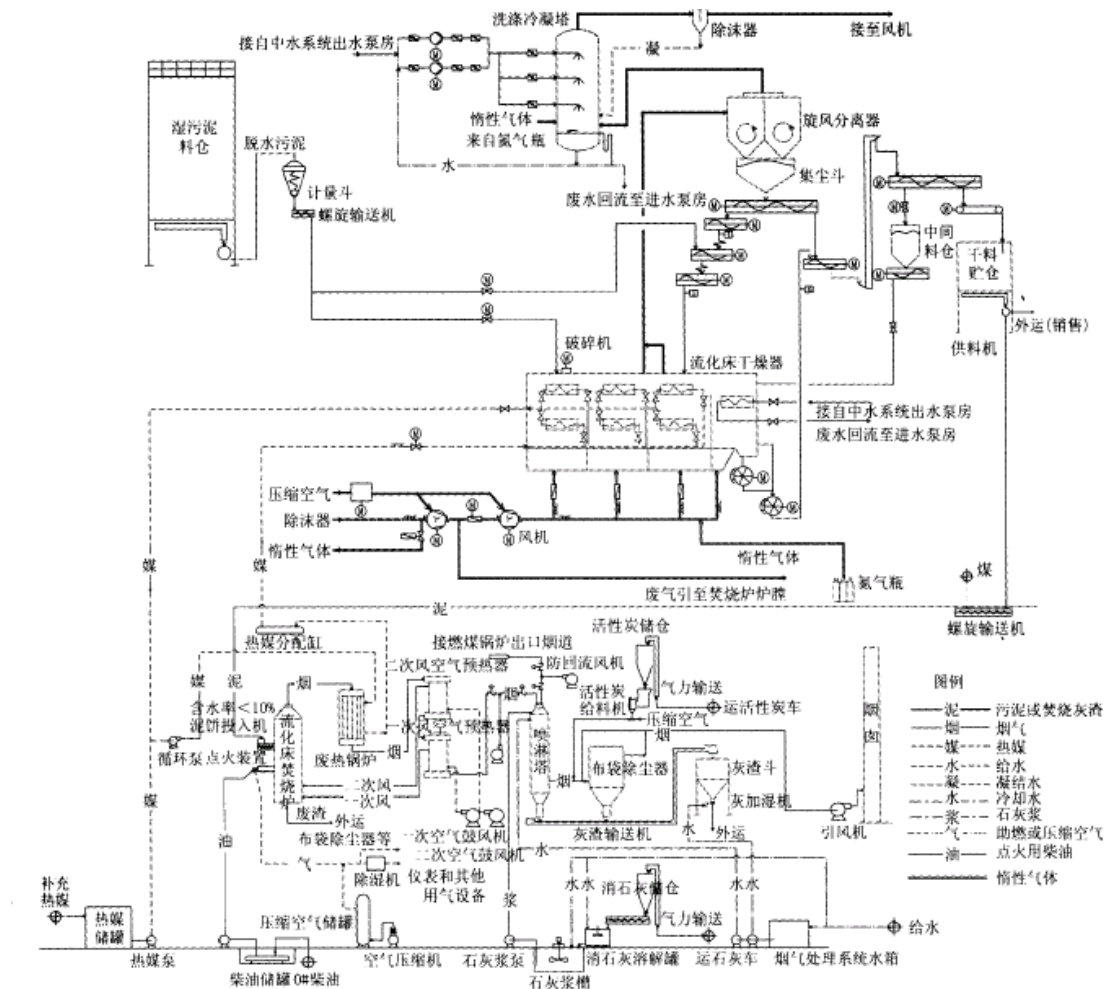
锅炉已于 1996 年 6 月制造完成并运往韩国。经过一年多的安装和调试，于 1997 年 11 月开始投入运行，运行情况良好。由于当地污泥水分高出设计值较多，高达 91.64%，低位发热量只有 925kJ/kg，导致废油的投入量比设计值高许多，炉膛出口烟温也比设计值高 50℃。

4. 上海石洞口污泥干化焚烧处理工程

1) 工程概述

上海石洞口城市污水处理厂设计水量为 40 万 m³/d，采用具有除磷脱氮功能的一体化活性污泥法作为污水处理工艺，处理对象为城市污水(含有大量以化工、制药、印染废水为主的工业废水)，产生的污泥量为 64t/d 干泥，经脱水后含水率为 70%，污泥体积为 213m³/d。

干化焚烧联合处理工艺采用低温干化-高温焚烧两套系统串联运行。采用的流化床干化工艺可以将脱水污泥干化工艺从 70%降低到 10% (最低 5%)。焚烧采用循环流化床焚烧炉通过焚烧干化污泥，以导热油(或蒸汽)形式回收烟气中热量，将回收的热量用于干化系统。该联合工艺可以达到能量的自平衡。污泥干化-焚烧系统工艺图如下：



2) 污泥特性

采用不同的脱水工艺其脱水污泥的含水率是不同的，大致范围是 65%~85%。对于后续干化焚烧处理工艺，脱水污泥的含水率直接影响到后续处理构筑物的规模以及干化焚烧的热量平衡，理论上越低越好，但是机械脱水程度越高，设备投资会增加，加药量也会增加，处理成本随之提高，因此合理选择设计含水率很重要。

理论上脱水污泥含水率在 70%时，可以不加辅助燃料，实现直接燃烧，但是由于污泥中的水分在高温下蒸发（850℃以上），会损失大量热能，所以必须通过高效的高温空气预热器回收这些热量，并将助燃空气预热到 600℃以上。就目

前的工程技术水平而言较难实现。采用目前相对较成熟的低温干化工艺，使污泥中水分在较低的温度下蒸发，以较少的热量降低含水率，提高系统的热效率，使整个系统的热量处于平衡状态。

下面几张图表为该厂污泥的特性参数。在总结已有工程和现有技术的基础上，根据石洞口城市污水处理厂特点采取对脱水污泥进行低温干化高温焚烧联合处理的工艺方案。同时污泥焚烧装置能兼顾焚烧干化污泥和替代燃料。当污泥可以作为绿化基质土或其他用途时，使用替代燃料焚烧，产生的热量干化污泥，干化污泥综合利用，当污泥重金属含量严重超标或污泥出路困难时，直接焚烧干化污泥产生的热量提供干化使用。

表2 污泥元素分析

元素(可燃基)	C	H	O	N	S
含量/ %	35~55	4~6	20~30	115~6	015~115
计算选用值/ %	5313	618	3013	610	115

表3 污泥工业分析

项 目	可燃分	灰分	低位发热量
取 值	65163 %	34137 %	12 686 kJ/kg

注:表中数据指干燥基;本工程污泥不经消化处理。

表4 低位发热量测定值(2001年12月)

样品	低位发热量/ kJ/kg	样品	低位发热量/ kJ/kg
1 #	12 125	4 #	13 716
2 #	11 882	5 #	11 468
3 #	11 078	6 #	15 818

注:平均值为12 681 kJ/kg。

表5 污泥成分测定值

测定值 元素	1 #	2 #	最高允许含量	
			酸性土壤 (pH < 6.5)	中性和碱性土 (pH ≥ 6.5)
镉(Cd 计)	8142	7195	5	20
汞(Hg 计)	01039	8161 × 10 ⁻⁵	5	15
铅(Pb 计)	157	140	300	1 000
铬(Cr 计)	546	766	600	1 000
砷(As 计)	5312	2185	75	75
硼(以水溶性B 计)	8171 × 10 ³	1106 × 10 ⁴	150	150
铜(Cu 计)	1172 × 10 ³	1150 × 10 ³	250	500
锌(Zn 计)	9112 × 10 ³	6159 × 10 ³	500	1 000
镍(Ni 计)	311	216	100	200

注:最高允许值为《农用污泥中污染物控制标准》(GB4284 - 84);
单位为 mg/ kg 干泥。

本工程设计污泥参数：脱水污泥含水率 70%，污泥燃烧热值 11304-15491kJ/kg 干固体。

3) 干化工艺

干化工艺是本系统的核心工艺。由于干化污泥具有易燃、易分解的特点,为保证安全和卫生,干化系统内必须保证低温、低氧状态。同时由于污泥在 40%~60%含水率时具有易粘结的特性,因此选用设备必须防止污泥粘结在换热面,从而降低热效率,甚至影响运行。

经过多次方案比较和设备招标,最终选用了进口流化床低温干化系统。该系统干化温度为 85℃,系统内控制含氧量<4%。该系统的特点是采用流化床干化机。干化过程在流化床内进行,流化床底部布置蒸汽盘管。空气从床底经过盘管加热后进入床身,热空气一方面使床身中的污泥处于流动化,防止污泥粘结,另一方面也与污泥进行充分换热,蒸发其中的水分,蒸发出来的水分和空气一起被引入洗涤冷却塔内,经喷淋后,水分被去除,余下的干空气则循环使用。经干化后的污泥含水率降为 5%~10%。干化系统每蒸发 1t 水分,消耗热能为 2800kJ。

4) 焚烧工艺

经干化系统处理后的污泥储存在干污泥料仓中,通过输料机送入焚烧炉,在投加污泥的同时,可以投加生石灰(用于脱硫)。投加的干污泥经炉内预置的床砂加热后迅速升温,并开始着火燃烧,经燃烧后的污泥被循环流化床床身内的高速气流带出,通过热旋风分离器,将其中比重较大的未燃尽颗粒收集下来,然后重新送入焚烧炉焚烧,燃尽后的轻小颗粒和高温烟气一起进入后续烟道。烟道内布置余热锅炉、空气预热器用于回收热量。

烟气排出前通过半干法脱硫和布袋除尘器除尘,参照《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB18485-2001)的排放标准排放。由于干化污泥燃烧特性接近褐煤,经过循环流化床焚烧炉现场试验,其燃烧特性良好,因此许多国内厂家均有能力配套,技术也相当成熟,采用国产的流化床焚烧炉。

5) 投资及运行费

本工程预计投资 8000 万元(含干化和焚烧设备、土建、自控及辅助设施),运行费用 160 元/t 湿污泥(含水率为 70%,并包含电费、药剂费、人工费、维修费等)。

四、小结

污泥处理过程中,必须进行经济性分析,结合经济发展形势,选择适合的方

法。我国目前土地短缺，填埋法将呈减少的趋势，但对于地广人稀，经济欠发达的西部地区，可考虑污泥填埋后作为林业用地。堆肥法有利于生态保护，可考虑在中西部地区推广使用。东部地区，人多地少，经济发达，可考虑焚烧处理。但焚烧法设备昂贵，运行费用高，污染问题尚未很好解决，因此切不可盲目推崇。以日本为例，由于国土狭小，经济发达，日本的污泥焚烧率达 55%，垃圾焚烧率达 75%，这些焚烧炉容量小，数量大，为了防止烟气中 HCl 对炉管的腐蚀，不得不控制低温燃烧，导致蒸汽温度较低（350℃），平均发电效率仅为 12% 左右。另外，由于对二恶英排放控制不够，造成焚烧站附近居民发病率高，土地严重污染。因此，选择焚烧方式必须考虑地方经济状况，电价水平，使污泥焚烧处理真正走资源化的道路。

在进行污泥焚烧处理的工艺选择中，应注意以下几点：

1. 工艺选择时须进行全方位的比较

污泥焚烧工艺应用较多的是流化床焚烧炉，但是污泥干化技术呈现多样化的格局，各种工艺各有优缺点，与焚烧工艺相结合时有不同的适用条件。对特定地区的污泥处理处置项目在选择工艺时要结合当地情况从以下方面作综合比较：1) 投资成本，要充分考虑设备的使用年限等；2) 运行成本，包括能耗、药耗、日常维护与人员费用等；3) 维护成本，包括易损件的更换成本、停机维护时的设备停运成本、维修人员配置成本等；4) 运行安全评估；5) 最终产品的处置成本及处置方式的可持续性。

2. 规划和建设大型的污泥处理处置中心

荷兰 SNB 污泥处置中心的收支情况说明规模与效益的关联。该厂总投资约 7000 万欧元。根据所提供的数据测算，该厂年运行成本约为 1300 万欧元，年收入为 2200 万欧元，折合每 t 湿泥的处理成本约为 26 欧元，而污泥处理的收费标准为 55-70 欧元。可见，规模效应在污泥焚烧厂的建设中同样发挥了作用，建设一定规模的污泥处理中心可以产生很好的经济效益与环境效益。

3. 引进技术，培育国内设备制造能力

污泥处理处置厂的投资费用很高，设备购置及安装费用占总投资近 80%，若要降低投资成本，关键在于降低设备费用。将整套的设备加以适当分类，大部分设备可以采用“引进技术、国内加工”的方式生产制造，不仅可以大幅降低投资

成本，还能培育国内的环保设备生产能力。

4. 建设试验性生产线的必要性

目前国内污泥焚烧处理厂很少，为了更为准确地测算投资与运行成本、学习建设与运行管理经验，建设具有一定规模的试验性污泥干化焚烧处理厂是很有必要的。