医疗废物高温热处理技术

盛宏至
（中国科学院力学研究所，北京　100080）

摘　要：阐述了医疗废物焚烧处理工艺与环保要求，并重点介绍了热处理新技术。

关键词：医疗废物；焚烧处理；热处理技术
中图分类号：X799.5　　**文献标识码**：B　　**文章编号**：1006－5377(2004)增－0064－03

Pyrolytic Treatment of Medical Wastes

SHENG Hong-zhi

一、国内外医疗废物管理与处置

北美、欧洲、日本等发达国家对危险废物的管理、焚烧处理技术与污染物排放控制有较高水平。如：美国早已有危险废物焚烧排放控制标准，有关于危险废物及医疗废物焚烧厂选址、建设、调试的手册，危险废物焚烧的质量保证与质量控制程序手册，焚烧炉操作和维修指南，医疗废物的物流管理手册；加拿大环保局有城市固体废物焚烧指导标准，两级焚烧炉，空气污染控制技术，原生垃圾减量焚烧技术的环境特征的焚烧试验及评估手册等。

发达国家对于危险、有害废物处理过程有严格的管理制度。运输、处理及处置过程严格隔离，所有过程要记录在案。由于处理系统是相对封闭的系统，因此污染控制的指标主要为排气、底渣。危险废物焚烧厂一般没有废水排出，因此许多国家标准没有专门的污水排放标准。

在发达国家，高危险性废物处理采用集中处理方式时，整个过程有严格的管理，由专业公司负责，防止污染物扩散。由于要破坏有毒有害化学物品，燃烧温度要求较高，一般采用滚转窑炉，加大量的辅助燃料，温度达1300℃左右。由于底渣及飞灰的化学成分比较复杂，常有大量重金属，因此严格按照危险废物的填埋要求进行填埋。

底渣填埋场地有严格的防渗措施及防雨措施。如：加拿大阿尔伯特省天鹅岭镇的危险废物处理场的焚烧灰渣填埋场不仅有严格的防渗措施，表面全部覆盖，而且全部建在大型厂房之内，以防止雨雪水渗入填埋场，造成渗沥水的污染。

在北美，医疗废物、生化与生物医学废物（Medical Waste，Biomedical Waste）的管理与焚烧处理与其它危险废物的管理与焚烧处理均分开。至于到底采用集中还是分散处理方法，各州(省)有自主权，往往根据本地生产厂商的条件决定，无一定规则。焚烧采用的标准也与其它危险废物不同，着重过程的管理与防止污染物扩散，每一项过程均有记录。包装采用专用密封容器，有明显标志，焚烧时，容器与废物一同入炉焚烧，防止泄露污染。因没有有毒化学品分解的问题，燃烧温度不很高，约1000℃左右，也不搞能源回收，底渣和飞灰按一般性废物填埋处理，不需要严格的防护措施。

另外一类危险废物为低放射性废物，有试验室用的放射源，也有放射性医疗用的放射源等，与生化及其它危险废物分开管理、运输、处理和处置，可以采用焚烧或等离子体技术。一般残渣要求进行玻璃化等安定化处理。

我国对医疗废物的处理比较落后，一场突如其来的SARS灾难袭击我国，大家对医疗废物的处理倍加关心，成为推动我国危险废物处理技术发展的动力。

二、焚烧处理工艺与环保要求

对于有机废物，特别是医疗废物，高温热处理是最合适的技术，可以有效断裂有机化合物的化学键，消灭病原体，达到无害化处理。热处理中的热能还可以考虑回收利用。热处理包括焚烧、裂解、气化等，等离子体处理玻璃化(PP/V)也是热处理技术中的一大类。目前，热处理技术主要指焚烧法。

根据反应时供应的空气量，焚烧可分为富氧燃烧、贫氧燃烧及无氧热解三种。根据空气流动速度，反应器可分为固定床、沸腾床及悬浮床三种。

1. 国内外医疗废物焚烧技术现状

有害废物焚烧处理的技术已经经过近百年的不断发

展，在国外已经形成一种行业，采用的技术也是五花八门，种类繁多。有 Babcock，ABB，Von Roll，Volund，Joy/Svedala，Consumat，CAO，瑞威，三菱－马丁，荏原(Ebara)等多家公司提供焚烧系统。

发达国家处理医疗废物焚烧的技术方案很多，滚窑型焚烧炉与流化床焚烧炉可以焚烧多种废物，但对于医疗废物主要采用两级燃烧的方法，即在一次燃烧室控制空气的供应量，贫氧燃烧裂解，二次燃烧室充分氧化，Consumat(也称 CAO 型)为典型的商业化例子。尽管炉型不尽相同，但整套工艺却相差有限，主要有前处理进料、焚烧和尾气后处理、灰渣处理等。

此外，热解、气化、等离子体处理等工艺有其自身的特点及技术要求。

2. 热处理技术的环保要求

采用焚烧法处理危险废物的主要目的是尽可能使焚烧产物(气体和固体)无害化，最大限度地减容。影响焚烧效率的主要因素为焚烧炉的主燃室操作温度、气体停留时间和气相的湍流程度，即所谓的“3T”原则。

温度：燃烧温度愈高，有机物破坏程度愈高，微量有机副产物的生成量也愈少。但当氧气供应充分时，氮氧化物排放增多，能量消耗增加。一般医疗的生化类废物的焚烧温度在 900～1000℃即可。

时间：高温下的反应持续时间，即在高温下的停留时间愈长，破坏率愈高，持续时间随燃烧温度及焚烧废物的类型变化。时间与温度有密切的联系，焚烧温度高时，时间可以适当缩短。

湍流：湍流强度大时，炉中温度分布及氧含量分布均匀，有利于废物的完全焚毁，所需要的最低燃烧温度也可以适当降低。但湍流是通过提高空气流速来实现的，它将带来较大的能耗，也可能造成焚烧炉出口处颗粒物浓度增大。

试验表明，医疗废物的焚烧温度在 800～900℃之间，气体停留时间在 1.0s 以上时，可以彻底破坏废物中有害成分。国外的有关标准对医院临床传染性废物要求为 900℃和 1.0s。

医疗垃圾焚烧要满足国标 GB18484－2001，其中二恶英的问题是大家关心的问题。

3. 主要污染物及二次污染控制技术

废物种类多，焚烧反应千变万化，产生的二次污染物质也是复杂多变的。下面是几种主要尾气二次污染物产生的原因及防治方法：

(1)一氧化碳(CO)：CO 是炭燃烧不完全的产物。采用二次燃烧室方式，适当提高燃烧温度和适当的空气过剩量，可使 CO 降到最低水平。最新的研究表明，CO 并不能标志二恶英的排放水平。

(2)氮氧化物(NOx)：NOx 有三种来源：①热力氮；②燃料氮；③猝发氮。热力氮是危险废物焚烧中的主要部分。当温度高于 1500℃时，热力氮的产率迅速增加，故燃烧温度一般控制在 1300℃以下。对于缺乏氧的环境，基本不会生成 NOx。普通的烟气处理系统对 NOx 的去除无效，因此应通过控制燃烧参数来控制 NOx 排放。脱除 NOx 的技术主要有：选择性催化剂还原技术，喷氨还原技术和烟气再循环技术等。

(3) 卤化氢：主要指 HCl 和 HF，为酸性气体的主要成分，它们的产生主要取决于进入焚烧炉的废物中卤族元素的含量。HCl 的排放量还与有机氯化物的存在有关，有机氯将几乎全部转化成 HCl。在残渣和飞灰中可发现大量的氯化物。HF 的量取决于进入废物中 F 的含量，其排放量比 HCl 低得多。通常采用中和处理方法脱除酸性气体，有干法、半干法和湿法三种。

(4)硫氧化物(SO_x)：是含硫化合物在燃烧过程中产生的，主要由 SO_2 组成。硫通常以有机化合物形式存在于废物中，也可能以硫酸盐或硫化物形式存在。在燃烧过程中，有机硫和硫化物向 SO_2 的转化反应很快。但是在通常燃烧温度下，硫酸盐可以长时间稳定，因此它们主要存在于残渣中。最新的研究表明，燃料中硫的存在可以减少二恶英的合成。

(5)五氧化二磷(P_2O_5)：是由有机磷农药和其他含磷有机物在焚烧过程中产生的。

(6)粉尘：粉尘中含有重金属及其氧化物。由蒸发而形成的气态金属的排放和在飞灰中的气态金属的冷凝和吸收，在飞灰中形成较高浓度，烟气中颗粒物净化系统对于降低重金属的排放非常重要。

粉尘净化装置的设备主要有以下几类：旋风除尘器、湿式除尘器、布袋除尘器。为防止二恶英的再合成，禁止焚烧炉使用静电除尘器；为控制污水排放，很少使用湿式除尘器；布袋式除尘器是使用最广泛的粉尘净化装置。

对于残渣和飞灰，包括一些工业发达国家在内，多采用先集中贮存而后在指定的区域内填埋或经过物理化学稳定处理后填埋的方法。有玻璃化技术、水泥固型化技术、化学中和降解技术等。

4. 二恶英(Dioxin)问题

二恶英是由两个氧原子键合两个苯环构成，并没有毒性。如果苯环中的某些氢原子被氯原子替代，二恶英就有了毒性，称为多氯代二苯并二恶英(PCDDs)。如果两

个苯环之间仅有一个氧原子键合，另一个为碳的双键键合，该结构称为呋喃。如果呋喃苯环中的某些氢原子被氯原子替代，呋喃就有了毒性，称为多氯代二苯并呋喃(PCDFs)，与 PCDDs 合称二恶英类。二恶英就成了 PCDDs 与 PCDFs 二者的俗称。

二恶英微溶于水，溶于油脂，常温下为固体，吸附于颗粒物。由于二恶英在气体中的浓度为 ppb 量级，难以用常规方法测定，曾用一氧化碳作为二恶英的指示剂。但最新研究发现二者没有相关关系，不能用一氧化碳标志二恶英。研究结果表明，发达国家的二恶英总量 95% 以上不是从垃圾焚烧中产生，而是冶金、化工、油漆等行业产生的。

根据苯环上取代氢原子的氯原子数量和位置的不同，分别有 75 种和 135 种异构体及同系物，毒性大小随氯原子多少和位置而变化。不同的异构体及同系物的毒性不同，因此国际上制定了 17 种有毒二恶英类的国际毒性当量 ITEQ。2378 - TCDD(四氯代二苯并二恶英)毒性最大，因子为 1；12378 - PCDD(五氯代二苯并二恶英)和 23478 - PCDF(五氯代二苯并呋喃)毒性次之，因子为 0.5；其他大部分二恶英的毒性因子在 0.1 到 0.001 之间。排放标准根据国际毒性当量表，将不同浓度的各种二恶英与呋喃的毒性加权合成，成为毒性当量。

研究结果表明，二恶英在 900℃下 2 秒或 1000℃1 秒会彻底分解。但当尾气温度为 300 ~ 400℃时，前驱体在铜、铁等重金属的催化下会再合成二恶英，350℃是合成的峰值。研究结果还表明，尾气中二恶英的含量与原料中的有机氯含量并不呈现线性关系，无机氯也会在降温过程中合成二恶英。因此，降低二恶英的排放措施不仅要遵守 3T 准则，而且要在烟气降温过程中迅速通过二恶英再合成的温度范围，可以采用喷水急冷的方法，但是要损失一些能量不能回收。

降低二恶英排放的办法还有：1) 减少废物中氯的含量；2) 在高于 400℃的温度下将飞灰与烟气分离，除去催化剂；3) 采用三乙醇胺、乙醇胺、异丙醇胺和三乙醇胺与 NaOH、KOH 混合物做为二恶英再合成反应抑制剂；4) 用 V_2O_5 和 WO_3 作为氧化分解二恶英的催化剂；5) 湿法洗涤烟气，用布袋除尘器除尘可以将吸附在飞灰上的二恶英滤除，飞灰另行处理；6) 在干法系统中喷射活性炭吸附；7) 尾气中含有硫会毒化重金属，降低催化作用，减少二恶英再合成，可将废物与煤混烧。

多氯联苯(PCBs)的化学性能极其稳定，并有优良的电绝缘性能和介电性能，因此曾成为电力变压器油和电力电容器油，我国生产了 1 万吨左右。后来发现多氯联苯的毒性很大，停止使用，但销毁会带来严重的污染。由于含氯苯环的裂解温度要求高，多氯联苯在焚烧时裂解不彻底会保留含氯苯环，在尾气中排出，成为尾气降温过程再次合成二恶英的前躯体，十分危险。因此，多氯联苯也列为二恶英类危险废物。

三、热处理新技术

1. 热解(pyrolysis)法

热解法起源于气化技术，学科基础知识与燃烧接近。高温下，有机物的分子键断裂，无机化。裂解需要较高温度，反应时没有大量能量放出，因此需要加入能量。能量加入分内热源(燃料热源)和外热源两类。前者为部分燃料氧化放热，可以是贫氧燃烧气化，也可以是类似两段气化法，间歇地进行燃烧与气化。外热源可以是换热法，如天津龙德在包头的试验炉，用裂解气来燃烧，通过换热器裂解气化医疗垃圾。采用电热法、熔融法加热也是外热源热解，如日本钢管 NKK 等方法，还有处理化学武器的金属熔融、盐熔融等。等离子体热解是外热源热解的一种，具有很多优点。

外热源热解尾气量小，尾气为可燃气，可以回收利用。对尾气处理的设备投资要求低，运行成本低，排放清洁，受到重视。下面是天津龙德提供的热解气成分的原始数据：

气体成分	H_2	N_2	CH_4	CO	CO_2	O_2	C_2H_6	C_2H_4	其它
容积百分比	22.9	40.35	10.25	11.94	4.73	6.98	1.02	1.33	0.5
质量百分比	2.10	51.27	7.44	15.17	9.44	10.14	1.39	1.69	1.36

2. PP/V 还原气氛热解废物

PP/V 是等离子体法热解/玻璃化的英文缩写，具有温度高、裂解速度快、裂解彻底的优点。

等离子体是固体、液体、气体物质三态之外的第四态。等离子体分热等离子体、冷等离子体(非平衡等离子体温度高，正离子温度低)两大类。热等离子体分高温和低温两类，高温等离子体指 20000℃以上的等离子体，用于热核反应等；工业用的等离子体一般温度为 2000 ~ 20000℃，称为低温等离子体。

等离子体处理废物涉及的主要概念有三个：1) 直流电源与交流电源；2) 等离子体弧与等离子体炬；3) 工作气体为氧化气氛或还原气氛。

等离子体处理是外加热源热解处理废物的一种技术，加热速度快，能量大，但并不是将废物加热到 10000℃以上。目前商业化等离子体炉实际的热解温度在 1000 ~ 1400℃范围(一般等离子体弧心温度可以达到 7000℃以上)。等离子体火炬的中心温度在 3000 ~ 4000℃，但接近边缘，温度急剧降低。 **(下转第 69 页)**

可根据处理规模及地区用热情况设计余热锅炉或骤冷塔，并确保1100℃高温烟气快速冷却到220℃以下，以免再合成二恶英。

对于大型集中焚烧站而言，可考虑使用余热锅炉回收热量。对于小型集中焚烧站而言，根据情况可不设余热利用，以减少投资，降低成本。骤冷后的烟气进入文丘里反应塔中，同时由计量给料机将消石灰粉及活性炭粉给入喷射装置，并吹入反应塔中进行反应和吸附，反应塔的设计采用目前世界上最先进的干法净化技术。我院对此技术进行了消化修改，使之更有利于降低成本，反应剂及吸附剂达到充分的循环使用，烟气中酸性污染性气体经过下述化学反应及活性炭吸附，高效生成固体和重金属并被收集。

$$SO_2 + Ca(OH)_2 + 1/2O_2 = CaSO_4 + 2H_2O$$

$$2HCl + Ca(OH)_2 = CaCl_2 + 2H_2O$$

经净化的烟气进入布袋除尘器进一步净化，未反应的活性炭和消石灰随烟气进入布袋除尘器，通过织物布袋将烟气中的颗粒物滤出并收集，净化后的烟气通过引风机和烟囱排至大气。

3. 中央控制系统

医疗垃圾集中焚烧处理为焚烧站采用先进的控制和管理手段创造了条件。焚烧站设中央控制室，实现集中控制，具有适时监测、动态画面、数据储存等功能。焚烧站的功能及参数均显示在计算机屏幕上，重要的数据如一燃室温度、二燃室温度、压力、O_2、CO、NOx、HCl、HF、SO_2、风机参数、辅助燃料等均可适时测量并记录、打印。控制人员可随时调整运行参数，分析、消除运行故障。

4. 回转窑焚烧炉处理医疗垃圾的投资及运行费用

医疗垃圾集中焚烧需要垃圾收费维持焚烧站的日常运行费用。焚烧站的设计不能减少必须的安全保护设施。对于医疗垃圾等危险废物要有特殊安全的贮存设施，而且禁止人员接触危险废物，因此医疗垃圾集中焚烧站要求自动化程度较高。根据我院完成设计的国内危险废弃物焚烧工程，医疗垃圾集中焚烧站的单位总投资为70～180万元，根据处理品种及规模、余热利用、国外技术的引进等有关情况综合考虑。采用回转窑热解焚烧炉处理医疗垃圾运行费用主要包括：用电、辅助燃料、反应剂吸附剂、用水、人员工资、其他费用等，根据处理规模、垃圾热值及其他综合因素，处理费用指标为400～800元/吨垃圾。

四、结论

医疗垃圾集中焚烧处置，是国家技术政策的明确要求，也是解决我国医疗垃圾现存问题的关键和基础。热解焚烧技术是国内外处理医疗垃圾及危险废弃物的最先进、最实用的方法。回转窑热解焚烧炉适合我国医疗垃圾的集中处置，同其他炉型相比，自动化程度高、控制灵活，国内已掌握了其核心技术，技术上成熟、可靠。

参考文献：(略)

(上接第66页)一般仅2000℃左右。

采用等离子体还原气氛裂解废物的优点是：可根据需要调节，等离子体核心温度在4500℃以上，炉内平均温度可达1500℃以上，对提高销毁效率非常有利；而尾气量仅为焚烧法的5%～10%，是高热值可燃性气体，且很清洁，容易回收利用；尾气气体流速低，颗粒物含量极小，可以采用湿法骤冷和洗涤，能量损失小，设备和运行成本低；空气等离子体处理废物的电耗一般为0.5～0.9kW·h/kg。

由于二恶英类是由氧原子键合含氯苯环，因此，如果在没有氧的环境下裂解，切断了二恶英的再合成途径。因此，热解和等离子体热解（基本在还原气氛下处理），排放物中二恶英类的浓度极低。如美国星科(Startech)的空气等离子体技术数据，二恶英类的排放仅为焚烧法的1/1250，即使运行工况变动也不会使二恶英排放超标。

国际上，等离子体技术处理废物主要集中在化学武器销毁、低放射性废物处理、焚烧飞灰处理等，近年在医疗废物处理方面也有应用。

国内等离子体法应用很少，深圳真高科采用了直流等离子体焚烧（不是裂解），力学所研究了交流等离子体弧炉裂解医疗废物。

国际上有关危险废物焚烧的研究人员每年在美国聚会，参加“焚烧、热处理技术国际会议－IT3”交流废物焚烧及热处理的经验，包括焚烧、热解、气化、等离子体技术，甚至化学方法等。至2003年，此会议已经召开了22届，是相关领域最重要的大型国际会议，有关化学武器非军事化处理的论文也是该会议的重要议题。

四、结束语

医疗废物的处理是社会发展必须要解决的环境和社会问题。由于我国现代化事业的快速发展以及对环保要求的提高，医疗废物的安全清洁处置已经引起国家的重视，环保部门已经组织制订了《危险废物焚烧污染控制标准》等相关标准，同时引进了等离子体技术设备，建立了4个示范基地。

参考文献：(略)