

危险废物理化性质分析及两种焚烧方式的温度场仿真对比

华 昀¹, 高术杰²

(1. 恩菲城市固废(孝感)有限公司, 湖北 孝感 432100; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 回转窑焚烧处置危险废物,能够最大程度实现工业危险废物的减量化和资源化。然而危险废物种类多、性质复杂,焚烧过程二次污染严重,本文通过分析五种典型危险废物的基本理化性质,利用商业软件设计其焚烧过程的化学反应,模拟仿真顺流回转窑和逆流回转窑内的温度场分布情况,为工程示范提供理论依据。

[关键词] 危险废物; 焚烧; 回转窑; 模拟仿真; 温度场

[中图分类号] TQ172.6; X327

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2021)01-0010-05

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2021.01.003

0 引言

目前,我国危险废物污染防治工作仍然面临历史存量高、新增产量大、区域处置能力不均衡等挑战,危险废物污染风险控制一直是我国环保工作的重点和难点。数据显示,2017 年全国危险废物产生量为 6 936.9 万 t,较 2016 年增长 29.73% 预计在 2023 年将达到 8 978 万 t^[1]。

焚烧处置工业危险废物具有工艺简单、占地面积小以及处置效率高等优点。然而危险废物种类多、性质复杂,焚烧过程二次污染严重,为确保焚烧炉稳定、正常运转,危险废物入炉前,需依据物料的元素成分、热值、相容性等参数进行配伍,以便于焚烧系统能稳定运行。本文分析五种典型的危险废物理化性质,综述危险废物焚烧过程的模拟仿真研究进展,同时采用商用软件模拟仿真逆流回转窑过程的温度场分布情况,为工程化应用提供理论支持。

1 工程概况

孝感市固废处置中心项目于 2019 年 9 月底动

工建设,一期总投资约 2.2 亿元,是国家固废重大专项示范工程,孝感市生态环境补短板工程,也是中国恩菲智能化工厂示范工程。项目占地面积约 118 亩,设计规模为处置危险废物 3 万 t/a,采用中国恩菲拥有自主知识产权、国际先进的“逆流回转式焚烧炉+高温电熔融”危废处置工艺,最大程度达到危废处置的“减量化、无害化、资源化”目标。孝感市固废处置中心项目作为危险废物及医疗废物协同处置工程,其运营将为孝感市及周边地区应对公共卫生突发事件提供坚强有力的保障。

本文重点分析孝感固废处置中心的五种典型的危险废物,包括 HW01 医疗废物、HW06 废有机溶剂与含有机溶剂废物、HW08 废矿物油与含矿物油废物、HW11 精馏残渣、HW12 染料、涂料废物等多种危险废物,按照一定比例配伍后,模拟仿真该混合物的逆流焚烧温度场分布情况。

2 危险废物性质

2.1 医疗废物

医疗废物指的是医疗卫生机构在预防、医疗、保健及其它相关活动中产生的感染性废弃物。医疗废物由于含有较多的病原微生物和人体废弃物,极易传播滋生疾病,不当处理会直接或间接影响医务人员、病人和医院所在地的环境安全。在我国,根据国家卫生部、国家环保总局联合印发的“卫医发[2003]287 号”《医疗废物分类目录》文件,医疗废物被分为感染性废物、病理性废物、损伤性废物、药

[收稿日期] 2020-12-29

[作者简介] 华昀(1975-),男,江苏宝应人,工程师,大学学历,主要从事固废处置工作,现任恩菲城市固废(孝感)有限公司总经理。

[基金项目] 国家重点研发计划(2019YFC1907000)

物性废物、化学性废物五大类。

根据孝感固废处置中心的物料收运规划, 暂未接收医疗垃圾, 本论文的医疗垃圾的理化性质和工业元素分析将引用其他参考文献。张力等人^[2]对 35 例主要病种病例所产生的医疗废弃物成分组成

及理化特性进行了分析研究。该论文将医疗废物分为: 合成纤维类(15.3%)、生物质类(26.3%)、塑料类(43.2%)、橡胶类、无机盐类和金属类(15%), 总计六大类。对其中四种组分的元素分析和工业分析如表 1 所示。

表 1 四种医疗废物组分的元素分析和工业分析^[2]

组分	元素分析/%					工业分析/%					热值 Qb. ad/(kJ/kg)
	Cad	Had	Oad	Nad	Sad	Clad	Mad	Aad	Vad	FCad	
一次性注射器	88.87	8.94	0.14	0.17	1.02	/	0.80	0.06	99.10	0.04	46 771
药液塑料外包装	85.78	13.71	0.20	0.06	0.03	/	0.05	0.13	99.82	/	45 438
一次性输液软管	56.34	7.99	/	0.27	0.9	34.13	0.37	/	93.34	6.20	27 679
棉纱布	42.51	6.35	51.01	/	0.13	/	5.17	0.08	87.60	7.01	17 020

四种样品热值均很高, 平均约为 35 000 kJ/kg, 考虑到还包括无机盐和金属类等不含热值的组分, 采用线性平均求值方法可得, 医疗废物的平均热值约为 30 000 kJ/kg。

2.2 废有机溶剂与含废有机溶剂废物

废有机溶剂是在生产、调配及使用过程中产生的废液, 应用范围广、使用量大。由于没有改变物理性质, 仍然保留着有机溶剂的挥发性、易燃性、脂溶

性和毒性^[3]: (1) 重金属, 例如 Ni、Cu、Pb 等; (2) 芳香烃类有机溶剂, 以苯、甲苯、二甲苯为代表, 具有血液毒性, 可导致白血病; (3) 卤代烃类, 四氯化碳、氯乙烯、四氟乙烯等, 具有肝肾毒性, 可导致脂肪肝和肝细胞坏死、肾功能减退; (4) 脂肪烃类, 以正乙烷最具代表性, 属于低毒类神经毒物, 可引起中枢神经损伤; (5) 醇类溶剂, 以甲醇最常见, 具有较强毒性, 对神经系统影响最大, 还能损害人的视力。

表 2 废有机溶剂(HW06)的理化性质表

送样名称/代号	有机溶剂 1	有机溶剂 2	有机溶剂 3	有机溶剂 4	有机溶剂 5
状态	液态	液态	液态	液态	液态
闪点/℃	30.9	75	28.7	9.2	13.7
水分/%	20.12	/	/	/	/
灰分/%	26.63	/	/	/	/
热值/(kcal/kg)	6 648.57	6 256.63	1 268.49	3 689.41	1 248.51
氟/%	/	/	0.01	0	0.01
氯/%	18.07	0.15	0.75	0.41	0.03
硫/%	0.06	0.05	/	/	/

根据实验室数据分析, 废有机溶剂的卤族元素含量差别较大, 通常需要控制其直接进入回转窑内。一般废有机溶剂是可燃烧的, 可直接作为燃料燃烧, 通常采用喷射枪送入回转窑内进行燃烧处置。

2.3 废矿物油与含矿物油废物

对矿物油常用基础油和添加剂的组成成分分析^[4], 确定了矿物油类废物中可能存在的污染物成分, 并将其分成 3 类, 分别是芳香烃类(苯、乙苯、甲

苯、二甲苯、三甲苯、乙烯基甲苯、苯乙烯)、多环芳烃类(萘、蒽、菲、芘、蒽、芘等)和重金属类污染物。

矿物油主要是含碳原子数比较少的烃类物质, 多数是不饱和烃, 主要成分有 C15 - C36 的烷烃、多环芳烃(PAHs)、烯烃、苯系物、酚类等。废矿物油回收利用占比 75.5%^[5], 不适合回收的废矿物油基本采用焚烧处置。由上表可以看出, 废矿物油热值较

高,卤素元素含量低,是非常好的焚烧物质。

2.4 精馏残渣

精馏或蒸馏残渣一般可以理解为通过精馏或蒸馏分离操作获得有用产品或中间产品的同时,塔釜

会残余一定量的高沸点组分,这些组分大多颜色较深,且具有明显的刺激性气味。精馏残渣作为粘稠焦状物或固态物,大多含有芳烃、酚、醛、酸、醇等易挥发组分。

表3 废矿物油(HW08)的理化性质表

送样名称/代号	废矿物油1	废矿物油2	废矿物油3	废矿物油4	废矿物油5
状态	液态	液态	液态	液态	液态
PH	7	4	5	7	14
热值/(kcal/kg)	12 089.90	11 013.59	11 079.13	4 667.67	534.79
氟/%	/	0.01	/	0.02	0.02
氯/%	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
硫/%	1.05	0.28	/	0.51	0.08

表4 精馏残渣(HW11)的理化性质表

送样名称/代号	精馏残渣1	精馏残渣2	精馏残渣3	精馏残渣4	精馏残渣5
状态	/	固体	液态	固态	固液混合物
水分/%	/	/	/	0.39	/
灰分/%	/	/	/	0.2	/
热值/(kcal/kg)	1 023.04	5 091.55	6 073.59	5 819.93	1 850.91
氟/%	1.17	11.4	/	0.01	0.01
氯/%	0.36	1.96	0.02	0.01	1.63
硫/%	/	0.24	0.16	0.36	1.04

表4所收集的精馏残渣主要来自有机化工行业,有固态、液态,也有固液混合状态,热值大致分布在1 000~6 000 kcal/kg,含有的卤族元素含量因来源不同相差较大。

2.5 染料、涂料废物

染料、涂料广泛应用于汽车、家电、五金、建材等

表面涂装,其废物产生数量和总量在所有危险废物中均占有较大比例,根据人们的习惯称呼,主要的废物包括漆渣、废水处理污泥、废油墨油漆、废溶剂等^[6],其中漆渣占较大比例,本文主要对漆渣的理化性质进行分析。

表5 染料、涂料废物(HW12)的理化性质表

送样名称/代号	油漆渣1	油漆渣2	油漆渣3	油漆渣4	油漆渣5	油漆渣6
状态	固态	半固态	固态	半固态	半固态	固态
水分/%	0.88	74.66	6.76	65.66	45.81	1.47
灰分/%	21.31	0.14	41.10	5.03	13.32	45.58
热值/(kcal/kg)	5 946.28	236.57	3 188.42	2 283.85	3 060.13	3 218.79
氟/%	0.01	0.01	0.61	0.01	0.01	0.01
氯/%	0.44	0.04	0.56	0.23	0.24	0.01
硫/%	0.22	0.27	0.52	0.41	0.09	1.55

由表5可知,不同工艺产生的漆渣,其中的水分和灰分相差很大,水分最高含量可达约75%,热值

大致约为2 000~6 000 kcal/kg;油漆渣的卤族元素含量不高,在焚烧的过程中产生的盐类浓度不高。

3 危险废物焚烧过程的模拟仿真

按照烟气与物料在回转窑内流动方向的不同, 回转窑可分为顺流式回转窑和逆流式回转窑两种。顺流回转窑操作维护方便, 有利于废物的进料及前置处理, 烟气停留时间较长; 而逆流回转窑可提供较好的气、固混合及接触, 传热效率高, 可增加其燃烧速度^[7]。

借助流体力学计算软件, 可以对两种回转窑在燃烧过程的温度分布进行数值模拟, 为回转窑的优化设计提供重要依据。

3.1 顺流回转窑的模拟仿真

危险废物在顺流回转窑的窑内预热、燃烧以及燃烬等各个阶段, 具有较为显著的特征。物料借助窑的转动来促进物料在窑内搅拌混合, 使物料在燃烧的过程中与助燃空气充分接触, 回转窑内的物料不断翻转并缓慢向窑尾运动过程中, 完成烘干、挥发、分解、氧化燃烧、燃烬和排渣的过程。

废料的燃烧过程主要包括废物预热、挥发分析出、挥发分燃烧和焦炭燃烧几个部分。废物燃烧过程的数值计算主要是联合气固两相流流场、挥发分气体反应模型以及碳的异相反应模型进行耦合求解^[8]。

马攀^[8]、李春雨^[9]等人利用专业软件模拟了顺流焚烧炉的温度场分布, 发现: 回转窑窑头的温度较低, 沿轴线方向逐渐升高。该温度场的分布主要是废物进入回转窑后依次经历水分蒸发、热解、挥发分析出和燃烧的过程, 刚进入窑内的危险废物温度较低, 而且水分蒸发和有机物热解都是吸热过程, 使得窑头位置温度相对较低, 随着挥发分的析出和着火燃烧, 使得窑体上部分温度逐渐升高, 在高温烟气和炉腔的对流辐射换热作用下, 温度逐渐升高。窑内

最高温度出现在窑的中部位置, 大约为 1 170 ℃。另外, 漏风及投入窑头燃烧器均对温度场产生影响。

3.2 逆流回转窑的模拟仿真

固体物料在沿回转窑内轴向运动的过程中发生了加热、干燥、物理混合和化学反应等现象, 逆流灰渣式回转窑的特点是, 回转窑与二燃室并排布置, 待焚烧的危险废物入炉后即与高温烟气接触, 危废颗粒从回转窑入口向出口运动的过程中, 物料在窑内翻动, 自由空间里的气体则与颗粒逆向运动。

干燥段明显缩短, 再配以控氧技术, 使高分子物质裂解成小分子物质, 减少生成二噁英前驱物质。产生的可燃气体进入二燃室充分燃烧, 既能够利用热值, 又降低污染物的产生。

危险废物的燃烧过程是一个包括水分析出、挥发份析出、固定碳燃烧的复杂物理化学过程, 本章节利用商业软件, 对危险废物在确定尺寸的“回转窑 + 二燃室”焚烧系统内的燃烧过程进行模拟, 通过调整送风和改变辅助燃烧手段, 对不同工况下焚烧系统内的烟气流速、温度分布和气态产物组分分布特性进行研究, 实现对回转窑焚烧炉的运行优化和指导作用。

根据表 1 ~ 5 的试验数据, 可假设危险废物工业成分如表 6 所示, 挥发分成分如表 7 所示, 设计的化学反应包括:

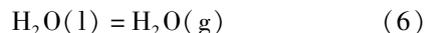
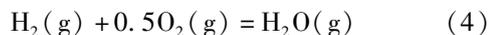
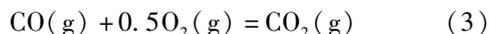
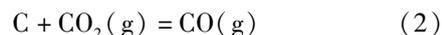
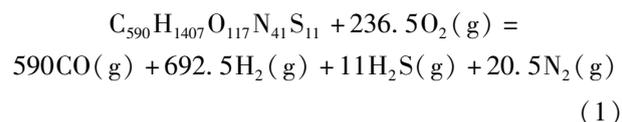


表 6 危险废物工业成分 (wt%)

类别	C	H	O	N	S	A	W	Cl	F	Br	Σ	t/d	LHV/(kJ·kg ⁻¹)
固态	30.00	4.00	5.29	1.60	1.00	21.14	35.95	1.00	0.01	0.01	100.00	57.00	13 807
液态	45.00	5.00	3.00	3.00	1.00	2.00	41.00	-	-	-	100.00	3.00	20 920

表 7 挥发份成分 (wt%)

类别	C	H	O	N	S	Cl	模拟分子式	LHV/(kJ·kg ⁻¹)
固态	60.809	12.162	16.084	4.865	3.040	3.040	C590H1407O117N41S11Cl10	8 290.6
液态	78.947	8.772	5.263	5.263	1.754	0.000	C1202H1591O60N69S10	9 191.9

危险废物在进入回转窑后,发生了复杂的燃烧和物料运输、反应过程,使得回转窑内部的温度变化较大。窑头罩的温度最高,温度范围大约 1 100 ~ 1 200 °C,局部瞬时温度甚至更高,入料的危险废物颗粒经过了固相到半固态(或液相)的变化,随着化学反应的进行,有机物数量的降低,物料表面的温度也逐渐降低。在窑体的中间部分,模拟结果显示温度大概在 900 °C 左右;当物料翻滚输送至窑尾处时,炉渣的温度继续降低,由于回转窑的热灼减率普遍低于 5%,此处的物料成分主要是无机物,温度大概在 400 ~ 500 °C 左右,而有窑尾罩排出的炉渣温度低于 300 °C。

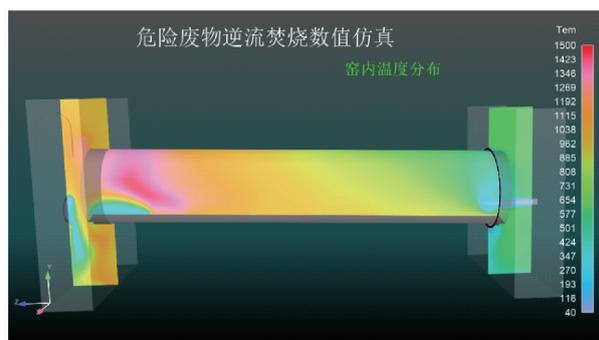


图1 逆流回转窑温度场模拟仿真

4 结论

(1)对五种典型危险废物的理化性质分析可知,医疗垃圾的热值最高,其次分别是废矿物油、废有机溶剂、染料涂料废物和精馏残渣;结合热值大小

和污染物含量可知,废矿物油是在几种危险废物中对焚烧性能最为有利。

(2)根据理化性质、工业成分和挥发成分分析,设计危险废物焚烧的化学反应过程,分别对两种危险废物焚烧工艺的模拟仿真结果对比,发现顺流回转窑的最高温度在中部,大约 1 170 ~ 1 230 °C,而逆流回转窑的最高温度在窑头,最高温度约为 1 200 °C。

[参考文献]

- [1] 常纪文.“十四五”危险废物污染防治改革发展刍议[N].中国环境报,2020-6-8,(003).
- [2] 张力.灾难救援医疗废弃物溯源方法、理化性质及热解特性研究[D].上海:中国人民解放军军事医学科学院,2017.
- [3] 王新亮.废有机溶剂的处置及精馏再利用[J].科学技术创新,2019(27):144-145.
- [4] 苏毅.废矿物油的污染特性及其环境风险研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [5] 卢晓维.苯系产品精馏残渣污染特性及其生物毒性研究[D].北京:北京化工大学,2012.
- [6] 马春燕.基于风险评价方法染料涂料废物的分级管理[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [7] 张绍坤.回转窑处理危险废物的工程设计[J].冶金设备,2010(2):58-62.
- [8] 马攀.危险废物焚烧系统的数值模拟与实验研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [9] 李春雨.典型危险废物在两段式回转窑焚烧系统内的热处理和结渣特性研究及其应用[D].杭州:浙江大学,2011.

Analysis of Physical and Chemical Properties of Hazardous Waste and Simulation Comparison of Temperature Field Between two Incineration Methods

HUA Yun, GAO Shu-jie

Abstract: Incineration of hazardous waste in rotary kiln can reduce and recycle industrial hazardous waste. However, there are many kinds and complex properties of hazardous wastes, and the secondary pollution in the incineration process is serious. This paper analyzes the basic physical and chemical properties of five typical hazardous wastes, designs the chemical reaction in the incineration process by using commercial software, and simulates the temperature field distribution in two kinds of rotary kiln, so as to provide theoretical basis for engineering demonstration.

Key words: hazardous waste; incineration; rotary Kiln; simulation; temperature field

