

“有机危废高效清洁稳定焚烧处置技术与装备”固废资源化专项

逆流回转式焚烧炉处理低热值高含水率 有机危废研究与实践

华 昀

(恩菲城市固废(孝感)有限公司,湖北孝感432012)

[摘要] 鉴于某危废处置中心当前危废来源的复杂性,针对典型的38种有机危废的水分、灰分、热值和重金属含量进行了定量分析,结果表明危险废物含水率平均为30.62%,灰分含量平均为27.40%,低位热值为2497 kcal/kg,是典型的低热值、高含水率且富含Zn、Cu、Cr和Ni等重金属元素的有机危废。同时本文介绍了逆流焚烧技术的原理,对比分析了逆流与顺流的技术特点,总结逆流焚烧技术的优势与技术难点突破,通过低热值、高含水率有机危废的焚烧生产实践介绍了逆流焚烧技术的焚烧操作、烟气净化工艺、经济指标等。逆流焚烧技术可以实现较低的炉渣热灼减率、二噁英及焚烧烟气排放量,是一种先进的焚烧技术,拓宽了入料范围,实现低热值、高含水率有机危废的高效处置,有助于降低企业成本。

[关键词] 有机危废;逆流回转窑;顺流回转窑;回转式焚烧炉;高含水率;热值

[中图分类号] X705 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-2423(2025)06-0106-09

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.06.016

0 引言

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^[1-2]。目前,我国危险废物污染防治工作仍然面临历史存量高、产废情况复杂、区域处置能力不均衡等挑战。经过多年的建设,很多地区建成了具有较大处置能力的危废处置中心。近些年来,由于危废市场环境的变化,危废企业建成规模大于

产废规模,危废企业面临物料复杂、价格倒挂的严峻局面,存在严重亏损的风险。在当前复杂的市场环境下,如何降低危废处置技术成本,成为危废企业在市场中生存的关键因素。

高氯、高硫、高盐、低比表面积的废物占比越来越大,采用传统的焚烧技术易出现焚烧炉结焦、燃烧不充分、残渣热灼减率高、易停炉、运行时间短等问题^[3-5]。为了解决以上问题,需要开发出原料适应性更好、焚烧效率更高、运行更稳定的焚烧技术。本文依托国家重点研发计划“有机危废高效清洁稳定焚烧处置技术与装备”,针对目前广泛存在的低热值、高含水率有机危废,自主开发了逆流回转式焚烧炉技术,建设了一条处置规模50 t/d的逆流焚烧示范线,为实现低排放、高效率、低成本处置有机危废提供了新路径。

1 有机危废的理化性质分析

有机危废的理化性质直接决定了回转窑焚烧的效率,通常入窑物料需要通过合理的配伍,控制热值、F、Cl和S元素的含量,确保物料自持焚烧,且污染物达标排放。为了查清焚烧炉渣及飞灰中的重金

[收稿日期] 2025-10-23

[基金项目] 国家重点研发计划“有机危废高效清洁稳定焚烧处置技术与装备”(2019YFC1907000);中国五矿集团有限公司科技专项计划项目“矿冶与城市固废协同处置及资源化技术路线研究”。

[作者简介] 华昀(1975—),男,本科,工程师,主要从事固废处置及环保咨询工作。

[引用格式] 华昀.逆流回转式焚烧炉处理低热值高含水率有机危废研究与实践[J].绿色矿冶,2025,41(6):106-114.

HUA Yun. Research and practice on treatment of organic hazardous waste with low calorific value and high moisture content by countercurrent rotary incinerator[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(6): 106-114.

属来源并分析其在窑内中的迁移性质,有必要对入窑物料的水分、灰分和重金属含量进行检测和分析。

本文针对某危废处置中心的配伍前入窑的38种有机危废物料进行了详细的分析,物料种类见表1。

表1 38种有机危废的理化性质

类别	序号	样品名称	pH	闪点/℃	水分/%	灰分/%	低位热值/ (kcal·kg ⁻¹)	氟/%	氯/%	硫/%
HW02	1	工艺废液(液碱+水)	14	>60	—	—	—	0.01	0.04	0.09
	2	工艺废液(双氧水+硫酸)	1	>60	—	—	449	0.01	0.06	0.35
	3	精馏釜残	3	>60	5.45	59.61	1 045	0.01	2.95	0.58
	4	发酵滤渣	—	—	3.17	42.02	2 911	0.03	0.08	0.37
HW06	5	废活性炭	—	—	9.33	64.81	1 521	0.02	1.12	2.86
	6	废有机溶剂1	9	>60	—	—	4 821	0.03	0.11	2.38
	7	废有机溶剂2	6	<28	70.21	3.35	3 024	0.01	0.09	0.01
	8	污泥	—	—	2.06	28.51	4 065	0.13	0.47	0.27
	9	废矿物油	—	>60	—	—	10 981	0.01	0.14	0.64
	10	废洗枪水	5	>60	—	—	1 332	0.01	0.19	—
HW08	11	废有机溶剂3	6	<28	—	—	7 121	0.08	0.06	—
	12	废油泥	—	—	21.92	70.02	3 295	0.01	1.01	0.42
HW09	13	乳化液	4	>60	—	—	754	0.01	0.03	—
HW11	14	精馏残物	14	>60	—	—	3 214	0.02	0.10	0.04
	15	精馏残液1	6	>60	—	—	5 078	0.54	6.48	0.44
	16	精馏残液2	—	>60	—	—	7 084	0.01	0.21	—
	17	精馏残渣	—	—	2.69	12.12	3 645	0.01	0.03	—
HW12	18	废油墨	—	—	40.02	29.74	1 999	0.02	0.50	0.13
	19	废漆渣1	—	—	1.06	68.80	1 579	0.06	0.05	1.55
	20	废漆渣2	—	—	55.36	3.99	2 852	0.01	0.19	0.06
	21	表面处理污泥	—	—	54.11	36.34	851	0.02	0.30	0.14
	22	废漆渣3	—	—	59.48	16.43	3 342	0.03	0.15	0.30
HW13	23	水处理污泥	—	—	—	—	176	0.11	0.13	0.23
	24	干膜渣	—	—	52.88	10.63	2 036	0.01	0.04	—
	25	废胶水	—	>60	—	—	7 023	0.01	0.11	0.03
HW17	26	污泥1	—	—	54.11	36.34	851	0.02	0.30	0.14
	27	电镀污泥	—	—	68.93	14.09	—	0.01	0.04	0.05
	28	废显(定)影液	9	>60	—	—	—	0.01	0.03	—
	29	FeCl ₃ 刻蚀废液	—	>60	—	—	15	0.02	1.60	—
HW49	30	污泥2	—	—	66.66	26.86	—	0.08	0.06	0.04
	31	含油废物	—	—	9.89	6.26	8 126	0.01	0.20	0.81
	32	活性炭	—	—	45.51	14.45	3 419	0.01	0.88	3.15
	33	废铬酸	—	—	43.21	47.36	—	0.01	0.07	0.69
	34	污泥	—	—	60.04	26.68	352	0.32	0.15	0.37
	35	废活性炭1	—	—	21.88	13.06	4 518	0.02	0.04	1.74
	36	废试剂废液	3	>60	—	—	—	0.01	0.04	0.14
	37	废活性炭2	—	—	6.33	87.40	554	0.02	0.05	—
	38	废过滤棉	—	—	8.40	35.36	5 610	0.08	0.29	0.13

1.1 水分

固体生物质燃料中水分的质量分数可采用通氮

干燥或空气干燥法测定,这两种方法均是在105±2℃条件下,根据试样的质量损失计算水分含量。由

于有机危废含有大量挥发性有机物,上述方法计算的结果通常偏大。本文采用常量水分滴定仪测量水分含量,依据《化学试剂 水分测定通用方法 卡尔费休法(GB/T 606—2003)》,计算 38 种典型有机危废水分含量,结果见表 1。

对有机危废的水分进行统计分析,超过 100 t 的物料分别为 HW02 精馏釜残(544.99 t,含水率 5.45%)、HW02 发酵滤渣(600.29 t,含水率 3.17%)、HW06 废有机溶剂 2(523.9 t,含水率 70.21%)、HW11 精馏残渣(192.55 t,含水率 2.69%)、HW12 废漆渣(136.39 t,含水率 55.36%)、HW13 干膜渣(421.97 t,含水率 52.88%),32 种有机危废水分含量平均值为 30.62%。

1.2 灰分

灰分测定参考《煤的工业分析方法 仪器法》(MT/T 1087—2008),利用热灼减率仪进行测量,计算 38 种典型有机危废灰分含量,结果见表 1。

对入厂有机危废灰分进行统计分析,超过 100 t 的物料分别为 HW02 精馏釜残(544.99 t, 59.61%)、HW02 发酵滤渣(600.29 t, 42.02%)、HW06 废有机溶剂 2(523.9 t, 3.35%)、HW11 精馏残渣(192.55 t, 12.12%)、HW12 废漆渣(136.39 t, 3.99%)、HW13 干膜渣(421.97 t, 10.63%),33 种有机危废灰分含量平均值为 27.40%。

1.3 热值

有机危废的热值是每千克物料完全燃烧所释放的热量,有高位热值(Q_{gr})和低位热值(Q_{net})之分。计入燃烧产生的水蒸气的气化潜热时,称为高位热值,不计入燃烧产生的水蒸气的气化潜热时称为低位热值。两者的差别在于水分蒸发和氢燃烧生成的蒸汽潜热是否放出,即低位热值等于高位热值扣除水蒸气的凝结热。实验室利用氧弹量热计测量 38 种典型有机危废的热值,数值属于高位热值。将高位热值转变成低位热值通过式(1)计算,其中 H_2O 的气化潜热约为 2 420 kJ/kg。

$$Q_{net} = Q_{gr} - 2\,420 \left[w_{H_2O} + 9 \left(w_H - \frac{w_{Cl}}{35.5} - \frac{w_F}{19} \right) \right] \quad (1)$$

式中: Q_{net} 为低位热值,kJ/kg; Q_{gr} 为高位热值,kJ/kg; w_{H_2O} 为废物中水含量的质量百分率,%; w_H 为废物中氢含量的质量百分率,%; w_{Cl} 为废物中氯含量的质量百分率,%; w_F 为废物中氟含量的质量百分

率,%。

有机危废的低位热值根据式(1)进行计算,忽略 H、Cl、F 含量的影响,高位热值直接扣除水蒸气的凝结热,得到 38 种典型有机危废的低位热值,其基本趋势与高位热值基本相似,低位热值平均值为 2 497 kcal/kg,见表 1。

1.4 重金属含量

在焚烧过程中,有机危废中的重金属发生复杂的迁移转化,尤其因为氯元素的存在,金属氯化物的蒸气压明显高于氧化态,会造成重金属的加剧挥发。一般来说,焚烧工艺可以实现有机物的削减,但对重金属则是富集作用。研究有机危废及其焚烧产物灰渣中的重金属含量,对于理解焚烧过程发生的迁移转化规律具有重要意义。有机危废中的重金属以及灰渣中的重金属均采用《固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 766—2015)进行分析,结果见表 2。

由表 2 可知,有机危废中重金属 Zn 元素含量普遍较高,其次是 Cu、Cr 和 Ni,另外部分有机危废也含有较高的 Pb、Sb、Ba、Sr 和 Tl 等重金属。

Cu 元素含量高的有机危废包括:HW17 汽车配件电镀污泥、HW49 化工活性炭以及 HW12 废油墨等,含量为 4 000 ~ 6 000 mg/L,主要受使用的原料或工艺的影响。

38 种有机危废均存在 Zn 元素,且含量均较高,普遍超过 1 000 mg/L,HW17 电镀污泥的 Zn 含量甚至超过 3.5 kg/L。这种污泥由于同时含有复杂的有机物,难于回收,故采用焚烧技术进行处置。

HW49 废铬酸中的金属 Cr 元素高达 10.7 g/L。另外,在 HW17 刻蚀废液和污泥中也存在较高含量的金属 Cr 元素。由于六价铬毒性极强,对环境造成严重破坏,故需要重点分析六价铬元素在炉渣及飞灰中的含量及存在状态。

综上所述,本文处理的危险废物是典型的低热值、高水分且富含 Zn、Cu、Cr 和 Ni 等重金属元素的有机危废。

2 逆流焚烧机理及其与顺流技术的对比

2.1 逆流焚烧机理

逆流焚烧的表观形式是烟气流向与有机危废物料走向相逆,但其本质则是热解气化-焚烧的复合过程。第一阶段,热解气化过程利用少量的助燃空气,使部分有机危废燃烧氧化,释放的热量加热未反

表 2 典型有机危废的重金属含量分析

			mg/L										
类别	序号	名称	Cu	Pb	Cd	Ni	Sb	Be	Zn	Cr	Ba	Sr	Tl
HW02	1	制药废液(液碱+水)	7.1	1.4	—	—	—	—	1 280	8.4	—	—	—
	2	制药废液(硫酸+双氧水)	5.1	3.4	—	—	—	—	1 550	23.6	—	—	—
	3	精馏釜残	11.5	—	—	—	—	—	1 930	14.7	—	—	—
	4	发酵滤渣	9.7	—	—	33.8	—	1.2	1 120	50.1	13.9	6.4	—
HW06	5	废活性炭	19.8	—	—	59.0	—	6.1	1 220	178	201	283	—
	6	废有机溶剂 1	2.7	—	1.6	1.6	—	—	1 050	11.5	—	—	—
	7	废有机溶剂 2	168	—	—	2.7	1.2	—	3 250	12.3	—	—	—
	8	污泥	485	—	—	241	—	—	1 030	1 000	7.0	4.4	—
	9	废矿物油	6.0	—	—	—	—	—	628	6.5	—	—	—
	10	废洗枪水	0.6	—	—	0.8	—	—	1 640	6.6	—	—	—
HW08	11	废有机溶剂 3	0.9	8.0	—	—	—	—	1 420	4.0	—	—	—
	12	废油泥	51.4	133	—	11.4	—	1.7	23 700	70.7	59.5	62.6	—
HW09	13	乳化液	18.6	2.6	—	0.4	—	—	3240	7.5	—	—	—
	14	精馏残渣	12.3	—	—	1.7	—	—	2 340	6.9	—	—	—
HW11	15	精馏残液 1	12.6	—	—	4.2	—	—	2 310	5.3	—	—	—
	16	精馏残液 2	69.3	1.9	—	—	—	—	448	—	—	—	—
	17	精馏残渣	2.7	—	—	—	—	—	1 900	3.4	—	—	—
HW12	18	废油墨	4 170	—	—	66.6	—	—	4 790	52.0	512	19.1	—
	19	废漆渣 1	194	192	—	9.2	—	0.5	15 000	59.7	3 800	849	0.7
	20	废漆渣 2	80.4	3.5	—	0.5	—	0.6	330	330	2 280	27.0	—
	21	表面处理污泥	112	617	11.6	24.3	—	32.9	1 060 000	251	1 080	62.3	12.3
	22	废漆渣 3	101	—	—	0.6	—	—	14 800	4.8	1 390	20.8	—
HW13	23	污泥	43.9	—	—	1.4	0.7	—	38 300	6.9	331	—	—
	24	干膜渣	406	—	—	0.7	—	—	780	2.8	—	—	—
	25	废胶水	611	—	—	—	—	—	769	—	—	—	—
HW17	26	污泥 1	115	2 230	24.8	22.7	—	28.2	267 000	507	1 980	131	6.2
	27	电镀污泥	5 430	11.7	—	12.9	—	11.9	3 520 000	2 960	154	85.0	—
	28	废显(定)影液	61.5	78.9	—	2.0	—	—	73.6	197	29.9	—	—
	29	刻蚀废液	110	6.1	—	2 070	—	0.4	—	6 020	—	—	—
	30	污泥 2	524	—	—	134	—	1.6	3 540	156	50.8	428	—
HW49	31	含油废物	105	11.8	—	485	—	0.6	2 540	109	58.8	25.6	15.1
	32	化工活性炭	4 200	16.8	—	39.5	—	2.2	7 160	157	104	89.5	—
	33	废铬酸	157	—	—	1.3	956	3.5	39.9	10 700	125	81.4	—
	34	污泥	131	—	—	17.0	—	4.1	1 060	471	222	875	—
	35	废活性炭 1	47.2	2.8	—	12.7	—	3.7	1 190	51.8	56.1	142	—
	36	废试剂废液	23.3	4.6	—	8.8	—	—	661	29.3	—	—	—
	37	废活性炭 2	35.3	—	—	17.9	—	5.6	1 700	40.9	187	49.4	0.6
	38	废过滤棉	25.5	19.1	—	42.4	3.1	—	2 280	118	2 350	35.4	—

应的垃圾,热分解产生裂解气以及焦炭和焦油;第二阶段,焚烧过程利用充分的助燃空气与可燃气体的混合燃烧,彻底分解二噁英等有害物质,实现达标

排放。

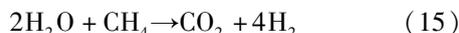
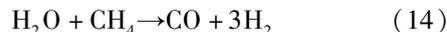
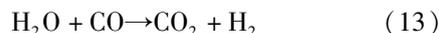
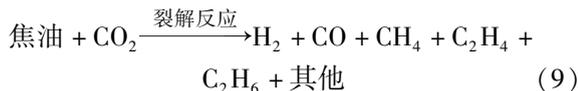
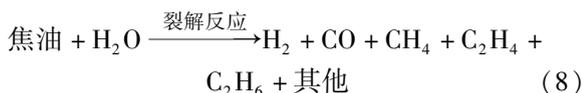
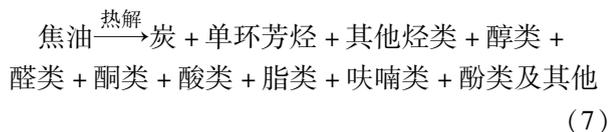
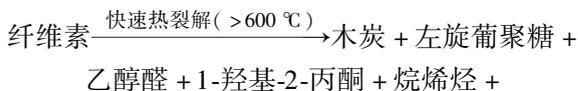
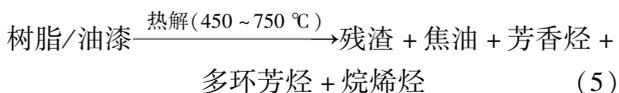
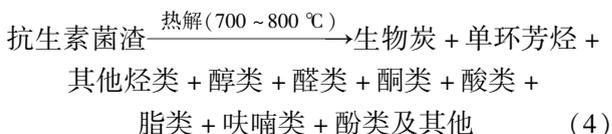
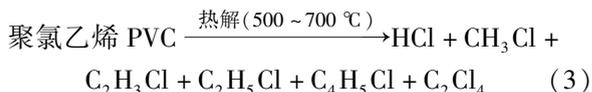
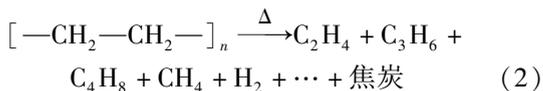
热解气化是逆流焚烧最鲜明的特征之一,包括热解过程和气化过程,两者既有区别又有联系:热解

过程(也可称作干馏)是在相对无氧环境下,发生以有机物热裂解为主的反应;气化过程是空气或水蒸气等气化剂与有机危废及裂解的二次产物发生的氧化、还原反应。热解发生的唯一条件是需要较高温度,而气化过程通常是有机危废发生热解后,再与氧接触反应生成气体。

从逆流焚烧工艺的角度来看,热解发生在入料口窑头处,物料依次发生了水分蒸发、裂解脱水、挥发分的析出等反应(脱甲基、高分子化合物的裂解、脱氢、缩合等反应),最后剩下不可再分解的固定残碳。在有机危废热解气化过程中,物料中的碳元素都是以化合状态存在,不同的热解气化条件会断开不同部位的碳链,最终形成不同的产物。一般来说,影响热解过程的影响因素包括反应温度、升温速率、反应滞留时间、物料特性、压力等。

热解过程发生的反应十分复杂,要分析清楚其中每个反应过程几乎不可能,但是热解产物包括以下5类:①大、中等分子量的有机液体(焦油及部分芳香族化合物);②焦炭;③小分子量的有机液体;④有机酸和芳香族化合物;⑤ CH_4 、 H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 NH_3 、 H_2S 、 HCN 。这说明热解反应总趋势是朝简单物质的方向进行,如果温度足够高,有机危废颗粒中的燃料物质可以通过一连串的反应,逐步转化为 C 和 CH_4 、 H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 等气体。

式(2)~式(6)是有机危废逆流焚烧过程中若干典型的大分子有机物一次裂解反应;式(7)~式(9)是焦油的热解反应,式(10)~式(12)是轻烃的裂解反应,可能来自一次裂解、二次裂解等;式(13)~式(15)是水蒸气与气体的反应,属于气化过程。



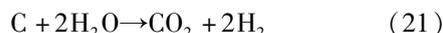
逆流焚烧的气化过程是缺氧状态下的化学反应,与过氧燃烧过程是有区别的。燃烧过程提供了充足氧气,使燃料化学能尽可能多的转变为烟气热能并加以利用,燃烧产物是不可再燃烧的烟气;气化过程只提供有限氧气,使得燃料大部分化学能转移到燃气中,燃气燃烧时再将化学能释放出来,从而降低后端二次燃烧的燃料(天然气或高热值液体危废)补充量。

气化反应包括两种类型,一类是气化剂(O_2 或 H_2O 蒸汽)与固体颗粒或焦炭的非均相气固反应,另一类是气化剂与气态反应产物之间的均相反应。习惯上气化反应分为三组:碳与氧的反应、碳与水蒸气的反应、甲烷生成反应。

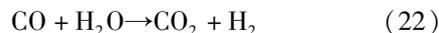
1)碳与氧的反应见式(16)~(19)。



2)碳与水蒸气的反应见式(20)~(21)。

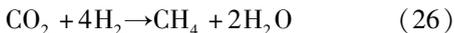
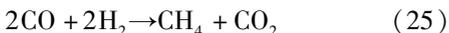


上述两个反应称为水蒸气分解反应,为吸热反应。其中水蒸气主要来自有机危废中的水分和 H 元素,少量来自气化剂(一次风)。反应生成的 CO 可以进一步与水蒸气发生反应式(22)。



3)甲烷生成反应见式(23)~(26)。





燃气中的甲烷,一部分来自生物燃料的热解,另一部分来自碳与燃气中 H_2 反应,或者气体产物之间反应的结果。上述4个反应均为放热反应。

有机危废热解气化过程所得可燃气体是由多种气体组成的混合气体,包括 H_2 、 CO 、 CH_4 、 CO_2 、 N_2 等,另外还有少量的未燃烧/气化 VOCs,以及未裂解的 SVOCs。为了保证达标排放,这些可燃气体需要与 O_2 充分混合燃烧。

2.2 逆流焚烧工艺流程

图1是典型的有机危废逆流焚烧工艺图。配伍

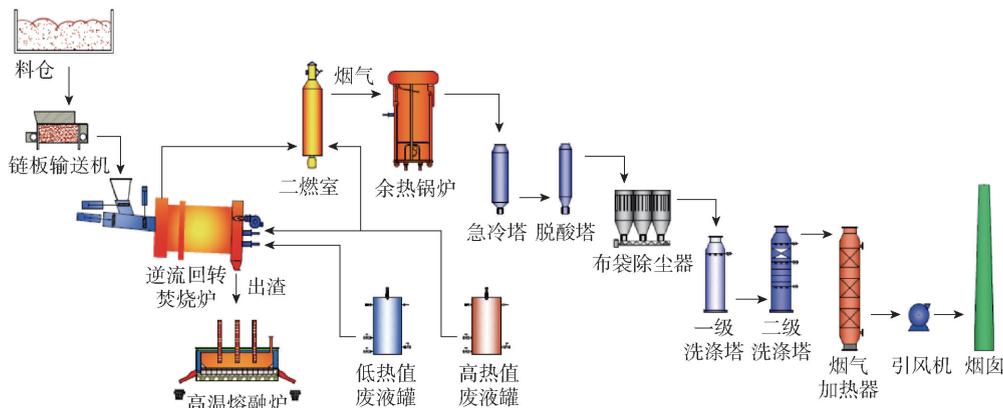


图1 有机危废逆流焚烧工艺流程图

2.3 逆流回转窑与顺流回转窑的对比

回转窑焚烧炉的主体是一个略有倾斜、内衬为耐火砖的钢制空心圆筒,回转窑焚烧炉是一种原料适应性很强,能焚烧多种液体和固体废物的多用途焚烧炉,已经被各国普遍采用。

回转窑焚烧系统一般由回转窑焚烧炉和二次燃烧室组成。危险废物在回转窑焚烧炉内经干燥、可燃物挥发、燃烧、燃烬过程,最后余下不可燃物质成为灰渣经冷却后排出系统;二次燃烧室使挥发性有机物和气体中悬浮颗粒所夹带的有机物完全燃烧,也可作为液体焚烧炉使用。回转窑和二燃室都配有助燃器,以维持炉内温度稳定。按气体和固体在回转窑内流动的方向,回转窑分为顺流式和逆流式两种^[6-7]。

逆流式的设计可提供较佳的气、固混合及接触效果,热传导效率高,可增加燃烧强度。但由于气、固相对速度大,烟气带走的粉尘量相对较高,所以系统的设计尤其重要。顺流式回转窑焚烧炉主要的特点是进料、进风及辅助燃烧器的布置简便,操作维护

后的有机危废通过链板输送机送入逆流回转窑的窑头端,物料在 $900 \sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$ 的窑头端发生激烈且快速的热解气化反应,生成的焦炭及焦油等固态/半固态产物随着回转窑的转动向窑尾端移动,而生成的热解气体随着炉内烟气进入二燃室;物料向窑尾端移动过程中,残余的焦炭和焦油等产物与一次风发生燃烧反应,保证出渣的热灼减率 $\leq 5\%$;进入二燃室的热解气体与二次风燃烧,温度达到 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,与急冷塔相配合进一步降低二噁英的再合成;另外,通过计算窑体内热负荷与热量分配的区间,以及氯、硫和氟元素的合理配比,还可以实现固态废料和废液的协同处置。

方便,有利于废物的进料。在顺流模式下,废物气化成分在窑内的停留时间相对较长。

无论顺流还是逆流技术,物料在回转窑内运动很复杂,运动方式呈周期性的变化,或埋在料层里面与窑一起向上运动,或从料层表面降落下来,但物料颗粒只有在沿表面层降落的过程中,才能沿着窑长方向前进。一般窑身都远大于窑的直径,废物在回转窑内停留时间较长,有的可达几小时,这由窑的长径比、转速、加料方式、燃烧气流流向及流速等因素而定。有机质在回转窑内分解较为充分,焚化彻底,燃尽度高。除了重金属、水或无机化合物含量高的不可燃物外,各种不同物态(固体、液体、污泥等)及形状(颗粒、粉状、块状及桶状)的可燃性废物皆可送入回转窑中焚烧。回转窑的技术可行性指标较高,易于操作。目前国内外采用回转窑式焚烧炉处理危险废物较为普遍。

2.4 逆流回转式焚烧炉的技术优势与技术难点

1) 从源头机理减少二噁英等污染物排放。逆流回转式焚烧炉排放烟气中二噁英的含量远远小于

0.1TEQ-ng/Nm³,部分检测达到0.001TEQ-ng/Nm³,远低于国家排放标准0.5TEQ-ng/Nm³。逆流式回转窑焚烧炉技术的燃烧(缺氧)燃烧本质是一个高温分解过程,通过对一燃室进行缺氧焚烧的自动控制,达到废物所含可燃成分全部释放和部分燃烧,使废物在空气供给量小于理论值的情况下被干燥、加热、部分燃烧、热解、燃烬。由于采用逆流作业,废物进入窑内后直接接触高温热解气体,得到快速脱水裂解燃烧。热解焚烧炉废物焚烧移动方向与烟气流方向相反,使进窑废物在缺氧状态下与高温烟气接触,可促进有机废物热解成小分子气体,减少二噁英生前驱物的生成,从源头减少和控制二噁英的排放。即使是氯等杂质含量较高的废物,逆流焚烧后其二噁英检测值仍然很低。

2)逆流焚烧可以处理高含水分危废,同时保障回转窑耐火材料寿命。危险废物进入回转窑内,首先接触的是高温烟气,其中的水分在高温下瞬间汽化,避免了危险废物在低温状态下长时间与耐火材料接触造成的腐蚀,保护了回转窑的耐火砖。越接近窑头,温度越高,足以使新进入窑内的废物在较短时间内脱水干燥、热解气化。与目前国内外普遍使用的顺流式回转窑相比,逆流式回转窑的耐火材料

寿命可提高1~2年。

3)降低燃料消耗,降低危废综合处置成本。逆流焚烧残渣温度在400℃以内,不需水冷后出渣,既节约能耗,又保证了作业环境的友好。窑头高温区直接连接二燃室,可以将渗滤液直接回喷至高温区蒸发烧尽,绝大部分的燃烧作业在二燃室进行,确保烟气中的剩余有害物质快速彻底分解焚烧,二次燃烧室不需补加燃料,即可达到并超过国家环保标准规定的温度1100℃。

4)逆流焚烧最关键的技术难点在于窑头的结构设计,由于窑头达到1200℃的高温,同时窑头肩负进料排气通畅及高效反应等多重功能,其结构设计存在严重的挑战,很多企业因为窑头的故障频繁难以突破技术瓶颈而放弃逆流技术。

3 生产实践

3.1 入炉物料的配料要求

将高热值与低热值通过暂存库堆放分区,尽量搭配使用。为了提高作业效率,必要时将外来有机危废不经暂存库直接入垃圾坑直接入炉焚烧,在垃圾坑用特制挖机搅拌配料保证入炉物料成分热值均匀。配伍后的焚烧危废成分见表3。

表3 配伍后的焚烧废物成分

元素	C	H	O	N	S	Cl	F	A	水分	总和
含量	34.12	4.27	6.66	1.00	1.50	2.00	0.50	26.5	23.5	100.0

3.2 焚烧操作控制

废料从进料口进入焚烧炉到形成烟气和固态残渣的整个过程包括4个阶段,但这4个阶段并非有明显的界限。

1)加热干燥阶段:物料中含有水分,遇热时所含水分首先蒸发汽化而逸出。

2)挥发分的析出与燃烧:物料受热后,低分子量的物质分解气化,到达着火温度后即生成气相燃烧火焰,热解燃烧反应速度达到峰值。

3)过渡阶段:此时热分解速度下降,挥发分物质仍能保持燃烧。物料剩余部分在高温下碳化并开始表面着火,出现两种燃烧状态并存现象,直到挥发分分解完毕,气相火焰熄灭。

4)燃烬阶段:物料中剩余部分全部碳化并燃烧,再次出现燃烧温度反应峰,随后反应速度急剧下降,最终燃烬。

通过温度场^[6]及窑内焚烧工况的观察分析,逆

流式回转窑前两个阶段明显前移,危废物料在进入回转窑后立刻被干燥和高温热解,形成大量可燃气体进入二燃室,相较传统的顺流式回转窑,燃烧效率有了大幅提升。

3.3 日处理能力和烟气净化工艺

3.3.1 焚烧量的提升

根据入炉物料特点控制窑的转数及推料机给料频率。开炉伊始,通过燃气控制炉温,当炉温达到800℃时给料,当二燃室温度达到1100℃时,随着窑温的稳定、自热反应的高效进行,可以停止天然气投入。根据温度的情况,在二燃室投入低热值废液,往回转窑喷入渗滤液和高热值废液调控回转窑内温度,确保整个焚烧系统的高效稳定运行。焚烧系统处理能力70t/d,其中固废约50t/d,废液20t/d左右。

3.3.2 烟气净化工艺

焚烧炉烟气中的污染物成分包括粉尘、HF、

HCl、NO_x、SO₂、CO₂、CO 和二噁英等。烟气净化包括脱酸、脱硝、除尘、重金属和二噁英类物质吸附。目前危险废物焚烧领域尾气净化工艺主要采用SNCR 脱硝系统、急冷塔、干法脱酸、活性炭吸附和湿法脱酸的组合方式进行烟气处理。本文设计两级湿法脱酸系统,采用两个脱酸塔串联的方式进行,可以保证 SO₂、HCl 等酸性气体的去除率达到《危险废物焚烧污染控制标准》(GB 18484—2020)要求,即便是烟气中酸性污染物含量更高也能保证达标排放。烟气净化系统包括余热锅炉脱硝装置、半干式吸收塔、干式反应塔、布袋除尘器、两级湿法脱酸装置,最后烟气经烟囱处在线烟气检测设备达标排放。危废焚烧产生的有害气体主要通过以下方面进行控制。

3.3.2.1 前端物料组分控制

1) 根据入炉要求和库存废物的情况,科学合理的制定配伍计划单。

2) 根据废物的不同特性进行预处理,使物料能在窑里充分燃烧。

3) 通过分拣、分离、回收金属类废物,减少入炉比例。

4) 控制入炉废物的卤素含量,合理搭配。

5) 控制废物入炉的含水率。

3.3.2.2 中端燃烧过程控制

1) 按照“3T + E”的原则,保持适当的空气过剩系数和窑速,保证危废充分稳定的燃烧。

2) 急冷过程要严格控制,特别是温度的把控。

3) 保持烟气流量稳定,焚烧系统尽量不要有过大波动。

4) 严格控制系统的漏风情况。

5) 特殊情况下添加抑制剂,如石灰、尿素等。

3.3.2.3 后端减排控制

1) 酸性气体通过投加碱性物质去除,如消石

灰、液碱等。

2) 二噁英等物质通过温度控制和投加活性炭吸附去除。

3) 粉尘、重金属等会通过布袋除尘器去除。

3.4 主要设备

逆流回转式焚烧的主要设备见表4。

表4 主要设备

主要设备名称	规格
危废剪切破碎机	处理能力 10 t/h, 出料尺寸 ≤100 mm, 液压驱动(含液压站(水冷)、液压驱动系统、刀箱、电控柜、进料斗、氮气注入装置、支撑及附件)
逆流专用推料系统	防堵料仓、双密封门、防爆机构、推料机构、耐热防变形机构、水冷系统等
逆流回转式焚烧炉	φ3.4 m × 9 m, 内衬耐火材料, 窑头耐高温进料装置、窑头防变形装置、窑头密封及水冷漏料装置
二次燃烧室	直径 4.8 m × 16 m
余热锅炉	锅炉出口温度 550 ℃, 设计工况蒸发量 7.5 t/h, 饱和蒸汽压力 1.3 MPa, 195 ℃, 含电动卸灰阀
骤冷塔	φ3.5 m × 14 m, 壁厚 10 mm, 内衬 KPI 耐酸浇筑料, 外做保温, 含电动卸灰阀
布袋除尘器	分 6 个室, 钢结构、滤袋 1 500 m ² 、脉冲阀、骨架及附件、卸灰螺旋 2 个、集合螺旋 1 个, 卸灰阀 6 个, 上箱体和花板材质 304, 灰斗电伴热
引风机	风量: 50 000 m ³ /h

3.5 经济指标分析

采用缺氧热解技术,将废物中部分有机物热解成可燃气体进入二燃室,有利于提高二燃室的烟气温度,减少燃料的消耗,降低运行成本,主要经济指标见表5。在正常运行状态下,整个焚烧系统无需添加燃料用于升温;同时,燃烧段和燃尽段的废物燃烧为过氧状态下的燃烧,有利于降低焚烧残渣的热灼减率。

表5 2023、2024年焚烧处理量和主要经济指标

年度	经营成本/ (元·t ⁻¹)	电单耗/ (kW·h·t ⁻¹)	燃气单耗/ (m ³ ·t ⁻¹)	液碱单耗/ (kg·t ⁻¹)	活性炭单耗/ (kg·t ⁻¹)	石灰单耗/ (kg·t ⁻¹)
2023	1 441	258.73	9.82	62.62	0.06	4.11
2024	1 031	268.19	8.35	58.46	0.09	2.11

4 结论

1) 示范项目的危险废物含水率 30.62%, 灰分 27.40%, 低位热值 2 497 kcal/kg, 是典型的低热值、

高水分含量且富含 Zn、Cu、Cr 和 Ni 等重金属元素的有机危废。

2) 逆流焚烧技术可以实现较低的炉渣热灼减率、二噁英及焚烧烟气排放量,是一种先进的焚烧

技术。

3)采用逆流回转窑焚烧技术在当前危废处置普遍亏损大环境下具有重要意义。该技术对物料的适应性更强,在同等条件下市场生存能力更强,固体、半固体液态均能处置,可以接受几乎所有厂家不处理的液态低热值物料,处置能力大幅提升;由于物料直接进入高温燃烧腐蚀物瞬间挥发,窑的耐火材料寿命得到大幅延长。在当前危废复杂的市场环境下,仍需不停摸索降本增效的各种技改措施,使危险废物处置成本进一步降低。

[参考文献]

[1] 生态环境部. 2023 年中国生态环境统计年报[R/OL]. 2024, <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthtjnb/202412/>

t20241231_1099687.shtml.

[2] 高术杰, 胡立琼. 典型有机危废的产排特性分析[J]. 有色冶金节能, 2022, 38(5): 1-8.

[3] 曹瑞华, 谭洪毅. 危险废物处置过程中废气处理技术综述[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(1): 121-146.

[4] 闵海华, 王兴戮, 刘淑玲. 危险废物焚烧处置技术应用研究[J]. 环境卫生工程, 2017, 25(2): 68-70.

[5] 赵小燕. 危废焚烧处理的设计难点与对策[J]. 化学工程与装备, 2018(4): 278-280.

[6] 华昀, 高术杰. 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[J]. 有色设备, 2021, 34(1): 10-14.

[7] 仇云飞, 赵发敏, 刘栋. 危险废物逆流式回转窑焚烧工艺探讨[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(3): 63-67.

Research and Practice on Treatment of Organic Hazardous Waste with Low Calorific Value and High Moisture Content by Countercurrent Rotary Incinerator

HUA Yun

(ENFI Municipal Solid Waste Treatment (Xiaogan) Co., Ltd., Xiaogan 432012, China)

Abstract: In view of the complexity of the current source of hazardous waste in a hazardous waste disposal center, this paper quantitatively analyzed the moisture, ash, calorific value and heavy metal content of 38 typical organic hazardous wastes. The results show that the water content of the hazardous waste treated in this paper is 30.62%, the ash content is 27.40%, and the low calorific value is 2497 kcal/kg. It is a typical organic hazardous waste with low calorific value, high water content and rich in heavy metal elements such as Zn, Cu, Cr and Ni. At the same time, this paper introduced the principle of countercurrent incineration technology, compared and analyzed the technical characteristics of countercurrent and downstream, summarized the advantages and technical difficulties of countercurrent incineration technology, and introduced the incineration operation, flue gas purification process and economic indicators of countercurrent incineration technology through the incineration production practice of organic hazardous waste with low calorific value and high water content. Countercurrent incineration technology can achieve lower slag ignition loss rate, dioxin and incineration flue gas emissions. It is an advanced incineration technology, which broadens the scope of feeding, realizes the efficient disposal of organic hazardous waste with low calorific value and high water content, and helps to reduce the cost of enterprises.

Key words: organic hazardous waste; countercurrent rotary kiln; concurrent flow rotary kiln; rotary incinerator; high moisture content; calorific value