

危废焚烧回转窑的工艺计算研究

张 脉

上海市机电设计研究院有限公司, 上海

收稿日期: 2022年1月11日; 录用日期: 2022年2月14日; 发布日期: 2022年2月21日

摘 要

危险废物是指具有腐蚀性、毒性、易燃性、反应性或者感染性等一种或者几种危险特性的固体或者液体废物。回转窑焚烧处置危险废物因为对危险废物的适应能力较强, 控制稳定, 易于操作, 技术成熟等优点, 被国际上广泛采用。本文根据某危险废物焚烧项目的实际工程案例, 根据危险废物配伍成分表, 对回转窑的物料、热量及设备设计进行了详细的工艺计算研究, 基于此对该项目进行工艺设计。

关键词

危险废物, 回转窑, 工艺计算

Research on Process Calculation of Rotary Kiln for Hazardous Waste Incineration

Mai Zhang

Shanghai Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd. (SIMEE), Shanghai

Received: Jan. 11th, 2022; accepted: Feb. 14th, 2022; published: Feb. 21st, 2022

Abstract

Hazardous waste is solid or liquid waste, which has one or more hazardous properties, such as corrosive, toxic, inflammable, reactive or infectious. Rotary kiln incineration to dispose of hazardous waste is widely used internationally because of its strong adaptability to hazardous waste, stable control, easy operation, and mature technology. According to the actual engineering case of a hazardous waste incineration project and the composition table of hazardous waste, this paper conducts a detailed process calculation and research on the material, heat and equipment design of the rotary kiln, and based on this, the process design of the project is carried out.

Keywords

Waste Salt, Rotary Kiln, Process Calculation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

危险废物是危害人类生态环境和人体健康的重要污染源之一，如不进行有效处置而随意排放，不仅对水环境、空气环境和土壤环境造成严重的影响和破坏，还会对人身的安全健康构成直接威胁，因此，对危险废物的无害化处理和最终安全处置问题已经引起各级政府和全社会的高度重视[1]。

焚烧过程是指在高温供氧的条件下通过焚烧过程处理各种可燃性废物。危险废物的焚烧过程，通常需要借助于自身可燃物质或辅助燃料，调节适当的空气输入，在适当的高温范围内持续一定时间，实现较高的焚毁率、较低的热灼减率，最大程度地降解或分解其中的有毒有害物质，并杀死病毒细菌，同时实现较低的污染排放指标[2]。因此，通过工艺计算并在此基础上对焚烧系统进行正确的工艺设计，并控制危险废物的焚烧过程是实现危险废物无害化、减量化和资源化的关键因素。

2. 回转窑物料平衡计算

2.1. 危险废物配伍成分表

按照近年来危险废物的源相成分及热值分析，高氮、硫、氯含量及高热值是今后危险废物特性的趋势，同时，环保对烟气排放指标的要求日渐严格，基于此，本项目工艺计算将氮、硫、氯提高到一个较高的含量，以使烟气净化措施的配置能使烟气排放指标满足国家规范《危险废物焚烧污染控制标准 GB18484-2020》的要求，见表 1。

Table 1. Compatibility table of hazardous wastes

表 1. 危险废物配伍成分表

名称	C	H	O	N	S	CL	F	P	H ₂ O	A	低位发热量	备注	
固废	28.49	7.42	7.48	2	5	10	0.02	0.5	22.08	17.01	3936.54		
液废	30.75	9.94	12.88	2	5	10	0.02	0.5	26.23	2.68	4573.32		
汇总	28.72	7.67	8.02	2	5	10	0.02	0.5	22.50	15.58	4000		
单位						100%						kcal/kg	质量百分比

本项目设计焚烧量为 100 吨/天。根据对项目所在地危险废物产生来源的市场调查及统计分析，本项目危险废物焚烧的固液比按照 9:1 进行设计。

2.2. 计算实际燃烧所需空气的体积

根据完全燃烧理论公式

$$\begin{aligned}
 & C_x H_y O_z N_u S_v Cl_w F_p P_t + (x + 0.25y - 0.5z + 0.5u + v - 0.25w - 0.25p + 1.25t) O_2 \\
 & = xCO_2 + 0.5(y - w - p)H_2O + uNO + vSO_2 + wHCl + pHF + 0.5tP_2O_5
 \end{aligned} \quad (1)$$

基于危险废物焚烧的理论研究，回转窑内有机物是未完全燃烧的过程，其中有一部分有机物需在二燃室内进行再次升温燃烧。本项目按照 70% 的液废进回转窑，30% 的液废进二燃室进行工艺计算设计。

1) 回转窑内固废进料量为 3750 kg/h，具体成分见表 2:

Table 2. Solid waste feed amount in rotary kiln

表 2. 回转窑内固废进料量

名称	C	H	O	N	S	CL	F	P	H ₂ O	A	单位
质量	1068.38	278.33	280.50	75.00	187.50	375.00	0.75	18.75	828.00	637.80	kg/h
摩尔量	89.03	278.33	17.53	5.36	5.86	10.56	0.04	0.61	46.00		kmol/h

2) 回转窑内液废进料量为 583.33 kg/h，具体见表 3:

Table 3. Feeding amount of waste liquid in rotary kiln

表 3. 回转窑内废液进料量

名称	C	H	O	N	S	CL	F	P	H ₂ O	A	单位
质量	179.38	57.97	75.13	11.67	29.17	58.33	0.12	2.92	153.01	15.64	kg/h
摩尔量	89.03	278.33	17.53	5.36	5.86	10.56	0.04	0.61	46.00		kmol/h

3) 根据公式(1)，得出理论燃烧需要空气量为 $V_{理} = 17586.443 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，再由 3.2 章节回转窑的热量平衡计算得出的空气过量系数为 1.388，则实际燃烧需要空气量为 $V_{实} = 24413.954 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，见图 1。

计算回转窑燃烧所需空气的体积

1、固废燃烧所需空气的体积										
理论所需氧气的体积 (Nm ³ /h)		3126.377				过量空气系数	1.388226		氮氧化物转化率	0.5
理论所需空气的体积 (Nm ³ /h)		14887.510				燃烧转化率	0.65			
实际所需空气的体积 (Nm ³ /h)		20667.225				过量空气中氮气体积 (Nm ³ /h)	16327.11		过量氧气体积 (Nm ³ /h)	1213.7403
2、液废燃烧所需空气的体积										
理论所需氧气的体积 (Nm ³ /h)		566.776				过量空气系数	1.388226		氮氧化物转化率	0.5
理论所需空气的体积 (Nm ³ /h)		2698.933				燃烧转化率	0.65			
实际所需空气的体积 (Nm ³ /h)		3746.729				过量空气中氮气体积 (Nm ³ /h)	2959.916		过量氧气体积 (Nm ³ /h)	220.03706
总的实际空气的体积 (Nm ³ /h)		24413.954								

Figure 1. Calculation table of volume of air actually required for combustion in rotary kiln

图 1. 回转窑燃烧实际需要空气的体积计算表

2.3. 计算实际燃烧产生烟气的体积

回转窑燃烧产生的烟气由以下物质组成：二氧化碳、水、氮氧化物、二氧化硫、氯化氢、氟化氢、五氧化二磷、氮气、氧气及一氧化碳，

由公式(1)，计算回转窑燃烧实际产生的烟气体积，汇总如表 4，成分计算见图 2:

Table 4. The volume of flue gas produced by the combustion of rotary kiln (unit: Nm³/h)

表 4. 回转窑燃烧产生烟气的体积(单位: Nm³/h)

名称	CO ₂	H ₂ O	NO _x	SO ₂	HCL	HF	P ₂ O ₅	N ₂	O ₂	CO	烟气
固废	1296.30	4028.89	60.00	131.25	236.62	0.88	6.77	16357.11	1213.74	31.16	23362.72
液废	217.65	821.22	9.33	20.42	36.81	0.14	1.05	2964.58	220.04	5.23	4296.47
总计	1513.94	4850.11	69.33	151.67	273.43	1.02	7.83	19321.69	1433.78	36.39	27659.19

回转窑烟气成分计算											
1、回转窑完全燃烧											
成分名称	CO ₂	H ₂ O	NO	SO ₂	HCL	HF	N ₂	O ₂	P ₂ O ₅	CO	烟气量
体积 (Nm ³ /h)	1513.94	4850.11	69.33	151.67	273.43	1.02	19321.69	1433.78	7.83	36.39	27659.19
体积 (m ³ /h)	7059.96	22617.48	323.32	707.27	1275.07	4.76	90102.71	6686.12	36.50	169.71	128982.91
体积百分比 (%)	5.47	17.54	0.25	0.55	0.99	0.00	69.86	5.18	0.03	0.13	100.00
分子量 (kg/kmol)	44.00	18.00	30.00	64.00	36.50	20.00	28.00	32.00	142.000	28.00	27.65
比热 (kJ/kmol/k)	53.84	36.60	31.29	49.52	29.65	29.26	30.25	32.31	317.630		32.90
摩尔流率 (kmol/h)	67.59	216.52	3.10	6.77	12.21	0.05	862.58	64.01	0.35	1.62	1236.41
质量流率 (kg/h)	2973.82	3897.41	92.86	433.33	445.54	0.91	24152.11	2048.25	49.62	45.49	34184.84
25℃密度 (kg/m ³)	1.977	0.023	1.248	2.716	1.639	0.921	1.251	1.429	0.000	1.094	1.26718528
烟气比热 (KJ/Kg℃)	1.1589789	回转窑热量利用率	0.94	100℃水的汽化热 (KJ/Kg)	2258.4	灰渣比热 (KJ/Kg℃)	1.00				

Figure 2. Calculation table of flue gas composition of rotary kiln

图 2. 回转窑烟气成分计算表

3. 回转窑热量平衡计算

根据门捷列夫公式，物料的低位发热量

$$Q_d = 4.187(81C + 246H - 26(O - S) - 6W) \tag{2}$$

其中 C、H、O、S、W，分别指入炉危险废物中碳元素、氢元素、氧元素、硫元素以及水的质量百分数。

计算入炉危险废物的低位发热量： $Q_d = 16748.92 \text{ kJ/kg} = 4000 \text{ kcal/kg}$ 。

3.1. 回转窑散热损失计算

1) 设备尺寸计算

根据文献，回转窑的容积热负荷 q_v 范围为 $(4.2 \sim 104.5) \times 10^4 \text{ (kJ/(hm}^3))$ ，根据焚烧工艺设计经验，本项目设计取值为 $43 \times 10^4 \text{ (kJ/(hm}^3))$ 。

根据文献，回转窑的长径比 L/D 范围为 $3.4 \sim 4.2$ ，其中 D 为回转窑内物料流通净内径，单位为 m ， L 为回转窑的长度，单位为 m ，根据焚烧工艺设计经验，本项目设计取值为 4 。

计算回转窑的有效容积 $V \text{ (m}^3)$ ，

$$V = BQ_d/q_v \tag{3}$$

其中 B 为处置量，单位为 kg/h ， Q_d 为物料的低位发热量，单位为 kJ/kg ，安全系数取 1.05 ，经计算 $V = 178.15 \text{ m}^3$ ，再根据 $V = \pi/4 * D^2 * L$ 和长径比，计算得 $D = 3.843 \text{ m}$ ， $L = 15.37 \text{ m}$ 。

根据焚烧工艺设计经验，设计耐火材料总厚度为 320 mm ，则回转窑窑皮内径为 4.48 m 。

回转窑设备设计计算表见图 3。

回转窑设备计算							
1、	回转窑的容积热负荷 q_v 范围	$(4.2 \sim 104.5) \times 10^4 \text{ (KJ/(hm}^3))$		本次设计取值	430000	KJ/(hm ³)	
2、	危废回转窑的长径比 L/D 范围	3.4-4.2		本次设计取值	4		安全系数
3、	计算窑体的有效容积 $V \text{ (m}^3)$	$V=BQ_d/q_v$	178.15	计算回转窑的直径 D	56.74	3.84	计算回转窑的长度 L
4、	校核回转窑内烟气停留时间 $t \text{ (s)}$	$V=Gt(273+T)/273/3600$	$t=273*3600*V/(G(273+T))$	4.97			
5、	计算回转窑内烟气流速 $v_n \text{ (m/s)}$	$v_n=L/t$	3.09	187.14			

Figure 3. Calculation table of rotary kiln equipment design

图 3. 回转窑设备设计计算表

2) 回转窑外表面温度计算

根据实际工程经验,本项目耐火材料由重质耐火砖和轻质保温砖组成,其中重质耐火砖厚度 δ_1 按照220 mm设计,导热系数 $\lambda_1 = 1.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$,轻质保温砖厚度 δ_2 按照100 mm设计,导热系数 $\lambda_2 = 0.42 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$,窑皮厚度 δ_3 按照25 mm设计,导热系数 $\lambda_3 = 0.23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$,回转窑内温度通常控制在850~1100 $^{\circ}\text{C}$,本工艺计算按照1000 $^{\circ}\text{C}$ 。

重质耐火砖内温度 t_1 ,轻质保温砖内温度 t_2 ,窑皮温度 t_3 ,环境温度 $t_4 = 14.7^{\circ}\text{C}$ (项目地年平均温度),根据传热机理:

$$\text{热通量 } q_{\text{热通量}} = (t_1 - t_2) / (\delta_1 / (\lambda_1 A)) = (t_2 - t_3) / (\delta_2 / (\lambda_2 A)) = (t_3 - t_4) / (\delta_3 / (\lambda_3 A)) \quad [4] \quad (4)$$

$q_{\text{热通量}}$: 单位面积的热损失(W/m^2);

$$q_{\text{热通量}} = \sum \xi t / \sum \xi (\delta / \lambda) = 1839.19 \text{ W}/\text{m}^2, \quad t_1 = 1000^{\circ}\text{C}, \quad t_2 = 662.81^{\circ}\text{C}, \quad t_3 = 224.91^{\circ}\text{C}。$$

3) 回转窑散热损失的计算。

首先计算窑皮对流传热系数:

窑皮钢板黑度 ε 取0.28,室外风速 $v = 2.1 \text{ m}/\text{s}$ (项目地平均风速),沿风速方向的宽度 $D = 4.48 \text{ m}$,长度 $L = 15.37 \text{ m}$ 。

根据对流传热系数计算公式:

$$a_R = 5.67 \varepsilon \left((t_3 + 273)^3 + (t_3 + 273)^2 * (t_4 + 273) + (t_3 + 273) * (t_4 + 273)^2 + (t_4 + 273)^3 \right) * 10^{-8} \quad (5)$$

计算得 $a_R = 4.124 \text{ w}/(\text{m}^2\text{k})$;

再次计算窑皮辐射传热系数:

$$\text{根据辐射传热系数 } a_c = (5.93 - 0.015 * t_4) * v^{0.8} / D^{0.2} \quad (6)$$

计算得 $a_c = 7.657 \text{ w}/(\text{m}^2\text{k})$;

对流加辐射传热系数 $a_t = a_R + a_c = 11.782 \text{ w}/(\text{m}^2\text{k})$ 。

$$\text{根据回转窑的热损失 } Q_{\text{热损失}} (\text{kJ}/\text{h}) = 3.14 * L * D * a_t * (t_3 - t_4) * 3.6 * 1.6 \quad (7)$$

计算得 $Q_{\text{热损失}} = 3086208.43 \text{ kJ}/\text{h}$ 。

回转窑散热量计算见图4。

回转窑散热量计算										
1、	耐火砖厚度 (m)	0.22		保温砖厚度 (m)	0.1		窑皮厚度 (m)	0.025	窑内温度 (°C)	1000
	耐火砖热导率 (W/(m·C))	1.2		保温砖热导率 (W/(m·C))	0.42		窑皮热导率 (W/(m·C))	0.23		
2、	单位面积的热损失 (W/m²)	$Q = (t_1 - t_2) / (\delta_1 / (\lambda_1 A)) = (t_2 - t_3) / (\delta_2 / (\lambda_2 A)) = (t_3 - t_4) / (\delta_3 / (\lambda_3 A))$					$q = \sum \xi t / \sum \xi (\delta / \lambda)$	1839.19		
3、	回转窑的热损失 (kJ/h)	3086208.43		窑内耐火砖温度 t_1 (°C)	1000	保温砖温度 t_2 (°C)	662.81			
				窑皮外表面温度 t_3 (°C)	224.91					
4、	环境温度	14.7	°C	辐射传热系数 a_R	4.124	W/(m²·K)	3.59336682			
	外壁温度	224.91	°C	对流传热系数 a_c	7.657	W/(m²·K)	5.42117473			
	黑度 ε	0.28		对流加辐射传热系数 a_t	11.782	W/(m²·K)	9.01454154			
	室外风速	2.1	m/s				3742035.86			
	沿风速方向的宽度	4.48	m							
	外径	4.48	m							
	长度	15.37	m							

Figure 4. Calculation of heat dissipation of rotary kiln

图4. 回转窑散热量计算

3.2. 回转窑的热量平衡计算

根据运行经验: 设定回转窑操作压力-50 pa, 窑尾烟气出口温度1000 $^{\circ}\text{C}$;

计算物料带入热量 $Q_{\text{物料}} = BQ_d = 44310761.15 \text{ kJ/h}$;

计算空气带入热量 $Q_{\text{空气}} = V_{\text{实}} H_{\text{空气}} = 405881.98 \text{ kJ/h}$; 其中 $H_{\text{空气}}$ 为空气的焓值, 单位为 kJ/Nm^3 , 查锅炉设计手册, 经插值计算, 当地温度下空气的焓值为 20.025 kJ/Nm^3 , 详见图 5。

灰渣热损失(由二燃室部分计算得出) $Q_{\text{灰渣}} = m_{\text{灰渣}} \lambda_{\text{灰渣}} = 611492.77 \text{ kJ/h}$, 其中 $\lambda_{\text{灰渣}}$ 为空气的焓值, 单位为 kJ/kg , 查文献, $\lambda_{\text{灰渣}}$ 值为 1 kJ/kg , 详见图 6。

回转窑的热损失 $Q_{\text{热损失}} = 3086208.43 \text{ kJ/h}$, 已由 3.1 章节计算得出;

$$\text{由回转窑的热量平衡公式: } Q_{\text{物料}} + Q_{\text{空气}} = Q_{\text{烟气}} + Q_{\text{热损失}} + Q_{\text{灰渣}} \quad (8)$$

则烟气带走热量 $Q_{\text{烟气}} = 44310761.15 \text{ kJ/h}$ (由空气过量系数迭代计算得出); 假定空气过量并迭代计算, 得出空气过量系数为 1.388。并将此数值用来计算 2.2 章节实际燃烧需要空气量为 $V_{\text{实}} = 24413.954 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 见图 7。

烟气的温焓值												
温度		CO ₂	H ₂ O	NO	SO ₂	HCL	HF	N ₂	O ₂	空气	灰	H ₂
t	T	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/Nm ³	kJ/kg	kJ/Nm ³
0	273	0	0		0			0	0	0	0	
12.5	285.5	22.375	19.0625	0	13.95625	0	0	16.25	16.6875	16.625	10.5	
15	288	26.85	22.875	0	16.7475	0	0	19.5	20.025	19.95	12.6	
25	298	44.75	38.125	0	27.9125	0	0	32.5	33.375	33.25	21	
50	323	89.5	76.25	0	55.825	0	0	65	66.75	66.5	42	
75	348	138.25	115.5179		75.7875			98	101.3393	100.4643	64.5	
100	373	170	151		136			130	132	132	80	
115	388	198.2	174.1		149.095			149.5	152.25	152.1	93.2	
130	403	228.35	197.8	0	158.59			169.3	173.25	172.65	107	
175	448	315.875	268	0	192.475	0	0	228.25	235.125	233.625	147.5	
200	473	358	305		223.3			260	267	266	168	
300	573	559	463		286.6			392	407	403	260	
400	673	772	626		335.3			527	551	542	357	
500	773	994	795		374.4			664	699	684	461	
550	823.00	1112.50	884.83		387.88			735.67	775.83	758.17	512.50	
600	873	1225	969		405.9			804	850	830	560	
700	973	1462	1149		433			948	1004	978	665	
800	1073	1705	1334		455.3			1094	1160	1129	770	
900	1173	1952	1526		475			1242	1318	1282	882	
950	1223	2078.5	1625.75		482.85			1317.5	1398	1360.25	942.25	
1000	1273	2204	1723		491.5			1392	1478	1437	1005	
1100	1373	2458	1925		506.4			1544	1638	1595	1123	
1127	1400	2528.538	1982.645		509.4375			1585.985	1682.28	1638.47	1166.943	
1200	1473	2717	2132		519.1			1697	1801	1753	1261	

Figure 5. Temperature and enthalpy values of different substances

图 5. 不同物质的温焓值

出渣含水率	0.40
出渣含水量(kg/h)	299.87
蒸发水量(kg/h)	94.45
窑尾灰渣量(kg/h)	749.69
湿渣机补水量	394.33

Figure 6. Calculation of the amount of ash and slag at the kiln tail

图 6. 窑尾灰渣量计算

假定空气过量系数	1.388225815	
回转窑操作压力	-50	pa
假定烟气出口温度	1000	℃
烟气带走热量	44310761.15	kJ/kg
物料带入热量	47602616.62	kJ/kg
回转窑散热损失	3086208.43	kJ/kg
灰渣热损失	611492.7677	kJ/kg
空气带入热量	405881.9807	kJ/kg
烟气带走热量	44310797.4	kJ/kg
单变量分析	8.18002E-05	

Figure 7. Iterative calculation of heat in rotary kiln

图 7. 回转窑热量的迭代计算

4. 结语

危险废物的焚烧处置是按化学当量与氧发生燃烧反应，组合式焚烧炉(回转窑 + 二燃室)能够将各种危险废物进行焚烧处置[5]。通过危废焚烧回转窑的工艺计算，可以确定回转窑的设备尺寸、回转窑助燃风的风量以及焚烧后的烟气量，进而可以指导整个回转窑焚烧线焚烧系统(回转窑 + 二燃室)的设备设计、工艺设计、工艺系统设计，以及为后端余热利用系统、烟气净化处理系统的设备及工艺设计提供准确的烟气量及烟气成分数据。实际运行时辅以“3T + 1E”的原则对焚烧系统进行控制，使焚烧残渣的热灼减率、燃烧效率和有机物的焚毁去除率等技术性能指标达到国家和地方标准的要求。

参考文献

- [1] 钱慧国. 回转窑式废弃物焚烧炉的设计[J]. 动力工程, 2002, 22(3): 1819-1823.
- [2] 朱江, 蒋旭光, 刘刚, 严建华, 池通. 回转窑处理危险废弃物技术讨论[J]. 环境工程, 2004, 22(5): 57-61.
- [3] 朱德宗, 孔繁臣, 黄卓武. 化工回转窑设计规定[S]. 北京: 化工部, 1994.
- [4] 陈敏恒, 丛德滋, 方图南, 齐鸣斋. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 张林, 张寅璞. 危险废物焚烧处置的理论和实践[J]. 中国环保产业, 2010(11): 3.