

危险废物焚烧设施的环境风险评价

刘华峰, 于可利, 李金惠*, 聂永丰

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 提出了对危险废物焚烧设施进行环境风险评价的意义, 对危险废物焚烧设施的污染源进行了识别, 并分别探讨了正常排放和事故发生情况下危险废物焚烧设施的环境风险评价方法。对事故情况下有毒有害物质的释放机制和释放途径进行了评价, 给出了爆炸和有毒有害气体直接排放 2 类事故后果的估算方法。还对危险废物焚烧设施的系统安全性进行了评价, 确定了焚烧设施系统的安全评价方法。最后以国内应用最为普遍的回转窑焚烧炉为模拟案例对所建立的环境风险评价程序进行了说明。

关键词: 危险废物; 焚烧; 环境风险评价; 安全性评价

中图分类号: X825.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6929(2005)S0-0048-05

Environment Risk Assessment of Hazardous Waste Incineration

LIU Hua-feng, YU Ke-li, LI Jin-hui, NIE Yong-feng

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The significance of carrying out environmental risk assessment on hazardous waste incineration facilities was put forward, the hazardous sources of hazardous waste incineration facility identified, and the environmental risk assessment method of normal operation and accident conditions discussed separately. The releasing mechanism and route of toxic substances from the accident were evaluated. The estimation methods to calculate the two kinds of accidents, i. e. explosion and direct discharging of toxic substances, were provided. The safety of hazardous waste incineration facility was also evaluated, and its safety assessment method defined. At last, rotary kiln, which was the most popular incinerator in China, was given as a simulating case to explain the established environmental risk assessment method.

Key words: hazardous waste; incineration; environmental risk assessment; safe analysis

危险废物焚烧是指高温燃烧危险废物使之分解并无害化的过程, 是一种高温热处理技术, 是我国危险废物处置的主要方式之一。我国目前迫切需要全面、定量地评估危险废物焚烧处置系列设施的安全状况, 从而为安全管理和技术改造提供依据。但是我国的环境风险评价研究还处在初级阶段, 资料的收集及参数的确定尚存在诸多困难, 对危险废物环境风险评价的研究主要集中在鉴别危险废物所带来的环境风险^[1], 论述危险废物风险鉴别的方法、评价内容^[2-3]和危险废物风险评估体系^[4]等方面, 将环境风险分析应用于危险废物焚烧设施的研究鲜见报道。因而有必要对危险废物焚烧设施的环境风险评价程序进一步细化, 使我国危险废物焚烧设施环境风险评价更准确、更有价值, 为下一步风险管理决策的制定提供参考。

1 危险废物焚烧设施的风险源识别

危险废物焚烧设施通常包括危险废物进料系统、焚烧系统、燃烧空气系统、热能利用系统、烟气净化系统、残渣处理系统等。危险废物焚烧设施可能出现的环境风险见表 1。

危险废物焚烧设施的环境风险大致可以分为正常情况下烟气中的有毒有害气体带来的环境风险和由于焚烧设施发生事故产生的环境风险。这 2 类环境风险的评价需要采用不同的评价方法。

2 正常排放时的环境风险评价流程

危险废物焚烧设施正常排放时的环境风险评价主要包括危险识别、毒性评价、暴露评估和风险表征。

2.1 危险鉴别

危险鉴别是化学物质对受体的负面健康影响的定量评价。危险废物焚烧设施的危险鉴别主要筛选有代表性的污染物, 该污染物应包含能支持进行致癌风险和非致癌风险评估的化学物质。

2.2 毒性评价

在毒性评价阶段, 主要考虑污染物质的致癌和非致癌效应, 包括 2 个指标: 致癌斜率因子 (SF) 和非致

收稿日期: 2005-04-10 修回日期: 2005-10-20

基金项目: 国家“十五”科技攻关计划项目(2003BA614A-11-06)

作者简介: 刘华峰(1982-), 男, 安徽涡阳人, 硕士研究生。

* 通讯联系人

癌参考剂量 (R_{fd}) 参数的获取。致癌物的剂量反应关系通常以一生中癌症的发病率(如概率)对剂量的关系——斜率因子 (SF) 来表示,其代表化学物质的致癌能力。给定暴露量,引发癌症的概率是以斜率因子乘以剂量来计算的。与致癌物不同的是,非致癌物有阈值效果。低于某特定剂量,这些物质不会对暴露人群产

生不利影响,这个阈值被定义为参考剂量 (R_{fd})。这 2 个指标的数据来源有: 美国环境保护局的 IRIS(综合风险信息数据库); 联合国环境署国际潜在有毒化学品登记数据库; 中国预防科学研究院等有关卫生和环保部门的有毒有害物质数据库; 化学品或化学物质的物理化学手册。

表 1 危险废物焚烧设施可能出现的环境风险情况

Table 1 Possible environmental risks of hazardous waste incineration facility

风险源	事故类型	原因
烟囱		焚烧设施正常情况排放的烟气中也会含有一定量的有毒有害物质
燃烧空气系统、辅助燃烧装置	事故性停车	由于机械故障(冷却水、除渣、引风、余热锅炉堵塞、压缩空气执行机构等故障)等造成事故性停车,事故排放口紧急打开
烟气净化系统	多种原因造成的烟气净化系统故障	净化系统出现故障,此时焚烧炉烟气由紧急排气筒直接排入空气,短时间内烟气中高浓度有毒物质扩散到空气中
		净化系统中急冷和活性炭吸附出现故障,从而使烟气中二噁英以较高浓度排入空气中
		引风机出现故障,引风机因停电或设备故障停运时,除尘器内压力升高,废气、粉尘外溢,对周围空气环境产生危害
危险废物进料系统、焚烧系统	物料不相容故障	还原性和氧化性危险废物同时送入焚烧炉,在高温下产生剧烈的化学反应,烧坏炉壁,导致危险废物泄漏甚至爆炸事故
	泄漏事故	危险废物中混入高酸碱性物质,焚烧时严重腐蚀炉壁而导致泄漏事故

如果上述数据库或手册中没有致癌斜率因子,则可利用其他参数进行估算,如根据毒理资料或人群流行病学资料估算。

2.3 暴露评估

暴露评估是指估算在可能产生风险处人群所暴露的化学物质浓度。对于危险废物焚烧设施的环境风险评价,其主要是估算烟气中的污染物在不同区域的浓度,可选用的公式如下:

a. 污染物质量浓度:

$$C_{air} = \frac{Q}{2 U_s y z} \exp\left[-\frac{y^2}{2 z^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z - H_e)^2}{2 z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + H_e)^2}{2 z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

式中, C_{air} 为污染物质量浓度, mg/m^3 ; Q 为污染物的毒性当量排放速率, mg/s ; U_s 为在排放高度 H_e 的风速, m/s ; y 为水平扩散参数, m ; z 为垂直扩散参数, m ; y 为水平扩散距离, m ; z 为地面高差, m ; H_e 为有效烟羽高度, m 。

b. 污染物通过呼吸作用进入人体的量:

$$I_c = \frac{C \times CR \times EF \times ED \times RR \times ABS}{BW \times AT} \quad (2)$$

式中, I_c 为每天平均呼吸摄入量; C 为在暴露点的质量浓度, mg/m^3 ; CR 为接触速率,即每天吸入的空气量, m^3/d ; EF 为频率, d/a ,对于焚烧炉取 365 d/a ; ED 为暴露持续时间, a ,取平均寿命 70 a ; RR 为保留因子;

ABS 为血液系统吸收分数; BW 为体重, kg ,成年人取 70 kg ,儿童取 16 kg ; AT 为平均时间, d 。

c. 地面最大浓度公式:

$$z \Big|_{x=x_{max}} = \frac{2Q}{uH_e^2} \times \frac{z}{y} \quad (3)$$

2.4 风险表征

风险表征主要包括计算致癌风险和非致癌风险:

致癌风险 $R = (I_c + B_c) \times SF$

式中, I_c 为致癌物质的长期日摄入量, $mg/(d \cdot kg)$; B_c 为致癌物质在人体内的背景值, $mg/(d \cdot kg)$; SF 为该致癌物质的斜率因子。

非致癌风险指数 $H_I = (I_c + B_c) / R_{fd}$

将所有的致癌物和非致癌物的风险分别相加,从而得到最终的致癌风险和非致癌风险。美国环境保护局定义的致癌物质可接受风险为一生中癌症发病率风险超过正常值 ($10^{-6} \sim 10^{-4}$),非致癌物质的可接受风险指数 < 1.0 。

2.5 不确定性分析

风险评价中每一步所用方法均有不确定性。在危险废物焚烧设施环境风险评价中不确定性的类型包括: 风险鉴别阶段,由于所依据的数据在监测、识别和描述时有一定的限制,会引入不确定性; 暴露评估过程参数模拟的不确定性(例如模型表达的内容不全

面或问题阐述的不充分); 参数值的不确定性(例如使用不完全的或有偏向性的数据); 数据的不确定性,对许多污染物来说,关于给定的暴露途径的致癌特性和非致癌特性的数据信息很少; 风险加和带来的不确定性。

3 事故情况下的环境风险评价流程

事故情况下拟采用的环境风险评价程序如图 1 所示。

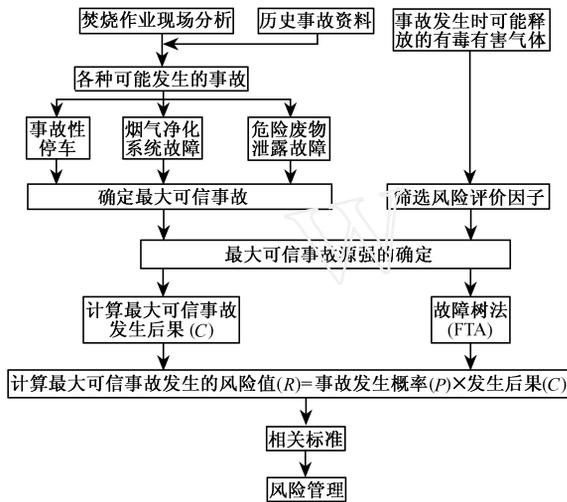


图 1 危险废物焚烧设施的环境风险评价流程

Fig. 1 Environmental risk assessment model of hazardous waste incineration facility

3.1 风险事故发生概率的确立

危险废物焚烧设施环境风险的特点是概率低,但影响是灾害性的、区域性的,且破坏力大。该风险事故的概率求解一般靠统计的办法难以实现,需要对事故进行定性和定量的分析,所以通常采用故障树分析法(FTA)^[5]。FTA是把系统不希望发生的事件作为故障树的顶事件,找出导致该事件可能发生的所有直接因素和原因,并逐步深入分析,直到找出事故的基本原因^[6]。然后,按照已编制的故障树结构,用福塞尔(Fussel)法求出最小割集并计算顶事件发生概率。

3.2 事故后果计算

危险废物焚烧设施易发生的事故所产生的后果大致可以分为爆炸和有毒有害气体的直接排放。

3.2.1 爆炸事故的后果分析

当危险废物焚烧设施燃烧室破裂或操作失误引起燃烧室内易燃气体泄漏时,气体泄漏速度(Q_G)按下式计算:

$$Q_G = Y C_d A P \sqrt{\frac{Mk}{NRT_G} \left[\frac{2}{k+1} \right]^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (4)$$

式中, Q_G 为气体泄漏速度; P 为容器压力; C_d 为气体泄漏系数,当裂口形状为圆形时取 1.00,三角形时取

0.95,长方形时取 0.90; A 为裂口面积; M 为分子量; R 为气体常数; T_G 为气体温度; k 为气体绝热指数; Y 为流出系数。

$$\text{爆炸的损害半径 } R = C_s (NE)$$

式中, E 为爆炸能量,kJ, $E = VH_c$ (V 为参与反应的可燃气体体积, m^3 ; H_c 为可燃气体的高燃烧热值,kJ/ m^3); N 为效率因子,其值与燃料浓度持续展开所造成损耗的比例和燃料燃烧所得能量的数据有关,一般取 $N = 10\%$; C_s 为经验常数,取决于损害等级, C_s 和伤害程度的关系见表 2。

表 2 C_s 和伤害程度的关系

Table 2 Relation between C_s and injury extent

C_s	伤害对象	
	设备	人
0.03	重创建筑物和设备	1%死于肺部损害,75%耳膜破裂,大于50%被破碎片击伤
0.06	对建筑物造成可修复性损害	1%耳膜破裂,1%受爆炸片的严重伤害
0.15	玻璃破碎	受爆炸片的轻微伤害
0.40	10%玻璃破碎	

3.2.2 有毒有害气体直接排放后果

非正常排放条件下的地面质量浓度($C, mg/m^3$)按下式计算:

a. 有风情况($U_0 > 1.5 \text{ m/s}$):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 u_y z} \exp\left[-\frac{y^2}{2 z^2}\right] \cdot F \cdot G_1 \quad (5)$$

其中,

$$F = \begin{cases} \exp\left[-\frac{(2nh - H_c - z)^2}{2 z^2}\right] & n = k \\ \exp\left[-\frac{(2nh + H_c - z)^2}{2 z^2}\right] & n = k \end{cases}$$

$$G_1 = \begin{cases} \left\{ \frac{Ut - x}{x} \right\} + \left\{ \frac{x}{x} \right\} - 1 & t \leq T \\ \left\{ \frac{Ut - x}{x} \right\} - \left\{ \frac{Ut - UT - x}{x} \right\} & t > T \end{cases}$$

式中, F 为混合层反射项; G_1 为非正常排放项; h 为混合层高度; k 为反射次数, $k = 4$ 。

b. 小风($1.5 \text{ m/s} > U_0 > 0.5 \text{ m/s}$)和静风($U_0 < 0.5 \text{ m/s}$):

$$C(x, y, 0) = \frac{QA_3}{(2)^{3/2} \sigma_1^2 \sigma_2} \cdot G_2 \quad (6)$$

$$G_2 = \begin{cases} \frac{1}{A_1} B_1 + 2 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} (1 - B_2) & t \leq T \\ \frac{1}{A_1} (B_1 - B_4) + 2 \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} A_2 (B_3 - B_2) & t > T \end{cases}$$

$$A_0 = x^2 + y^2 + \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_2} H_c \right]^2$$

$$A_1 = \frac{A_0}{2 \sigma_1^2}$$

$$A_2 = \frac{ux + vy}{A_0}$$

$$A_3 = \exp \left\{ - \frac{1}{2A_0} \left[\left(\frac{uy - vx}{\sigma_1} \right)^2 + (v^2 + u^2) \left(\frac{H_c}{\sigma_2} \right)^2 \right] \right\}$$

$$B_1 = \exp \left[- A_1 \left(\frac{1}{t} - A_2 \right)^2 \right]$$

$$B_2 = \left[\sqrt{2A_1} \left(\frac{1}{t} - A_2 \right) \right]$$

$$B_3 = \left[\sqrt{2A_1} \left(\frac{1}{t - T} - A_2 \right) \right]$$

$$B_4 = \exp \left[- A_1 \left(\frac{1}{t - T} - A_2 \right)^2 \right]$$

式中, u, v 分别为 x, y 方向的风速; σ_1, σ_2 分别为小风和静风扩散参数的回归系数。

若事故发生后下风向某处化学污染物 i 的浓度最大值 D_{max} 大于或等于化学污染物 i 的半致死浓度 LC_{50i} , 则事故导致评价区内因发生污染物致死确定性效应而致死的人数 (C_i) 由下式计算:

$$C_i = \int_{in} 0.5 N(X_{in}, Y_{jn}) \quad (7)$$

式中, $N(X_{in}, Y_{jn})$ 为浓度超过污染物半致死浓度区域中的人数。

最大可信事故所有有毒有害物泄漏所致环境危害

$$C, \text{ 为各种危害 } C_i \text{ 总和: } C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

3.3 风险评价

风险值是风险评价表征量, 包括事故的发生概率和事故的危害程度^[7]。其中, 危险废物焚烧设施最大可信灾害事故对环境所造成的风险: $R = P \cdot C$ (R 为风险值, P 为最大可信事故概率, C 为最大可信事故造成的危害)。

危险废物焚烧设施事故情况下的风险评价主要是指危险废物焚烧设施在事故情况下排放的有毒有害气体的风险评价, 具体评价步骤为将计算得到的风险值与相关行业的标准相比较, 也可以将最大可信事故发生情况下的各种污染物浓度值与国家的相关标准, 如《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ2 - 2002) 以及《工业企业设计卫生标准》(TJ36 - 79) 进行比较, 如果

超标, 则认为该项目需要采取安全措施, 以达到可接受水平, 否则项目的建设是不可接受的。

风险事故发生条件下的风险评价也具有不确定性, 需要进行分析。

4 案例分析

以国内应用最为普遍的回转窑焚烧炉为例对其进行环境风险评价。

4.1 最大可信事故的确立

危险废物焚烧处置设施风险事故主要体现为焚烧炉烟气净化系统发生故障。假定危险废物焚烧处置设施最大可信事故为烟气净化系统发生故障。

4.2 最大可信事故发生概率

依据上面确定的危险废物回转窑焚烧炉的最大可信事故从顶事件开始, 逐级地找出所有直接发生原因事件, 按它们的逻辑关系, 用逻辑门连接上、下层事件并做成故障树(见图2)。

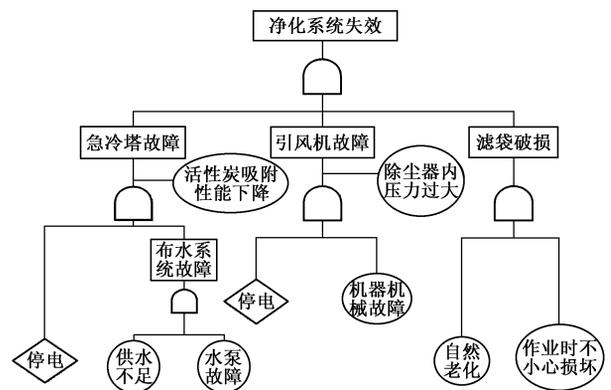


图2 净化系统失效故障树

Fig. 2 Fault tree of gas clarification system

假设底事件失效概率包括: 急冷塔的供水系统出现故障的概率 q_1 , 供电系统出现故障的概率 q_2 , 引风机的供电系统出现故障的概率 q_3 , 引风机出现故障的概率 q_4 , 布袋除尘器的滤袋出现故障的概率 q_5 。则顶事件“烟气净化系统发生故障”的概率 $p = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5$ 。

4.3 最大可信事故发生后果的估算

确定该项目最大可信事故的危险源为 HCl 和二噁英。如果最大可信事故发生, 其源强假定见表3。

表3 风险事故源强假定

Table 3 Premise source of risk accident

排放源	排放总量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	污染物		排放高度/ m	出口内径/ m	出口温度/ °C	排放规律	发生频率/ (次 a^{-1})
		名称	排放量/($kg \cdot h^{-1}$)					
焚烧炉烟气	12 000	HCl	3.08	35	0.5	150	间断 5 min	1×10^{-7}
		二噁英	5.828×10^{-6}					1×10^{-7}

注: 焚烧炉烟气排放量取未经治理的产生量, 二噁英排放量为类比数据。

分别选取静风和风速为 2.0 m/s,大气稳定度为 B、D 和 E,采用式(6)和(7)预测事故情况下 HCl 和二噁英的地面质量浓度。预测结果表明,事故发生 5 min 时静风情况下地面质量浓度出现最大值,HCl 最大地面质量浓度为 0.045 17 mg/m³,可满足标准要求;二噁英最大地面质量浓度为 0.085 48 ng/m³。在事故发生 10 min 后,HCl 质量浓度最大值(0.018 47 mg/m³)出现在 D 类稳定度有风情况下源下风向 800 m 处,能够满足标准限值要求;二噁英最大值(0.034 95 ng/m³)也出现在 D 类稳定度有风情况下源下风向 800 m 处。由此可见,事故情况下对周围空气环境影响比较大,污染物的排放尤其是二噁英排放会对该厂工作人员及周围企业工作人员的身体健康造成一定影响。

5 结论

危险废物焚烧设施的环境风险评价一般应包括建设项目概况、环境风险识别、风险事故频率确定、事故环境影响预测、事故防范措施及应急处理方案等主要内容,其中事故频率及源项的确定是进行风险评价的难点和重点。危险废物焚烧设施的处置工艺、设备非常复杂,存在多种潜在事故,环境风险评价应作为该类项目环境影响评价的重要专题。

参考文献:

- [1] 邱建华. 浅析危险废物的管理与风险评价[J]. 闽西职业大学学报,2003,(1):83-85.
Qiu Jianhua. Short discuss about management and risk assessment of

- hazardous[J]. Journal of Minxi Vocational College, 2003,(1):83-85.
[2] 赵金平,焦述强,邢庆祝. 危险废物风险评价与管理[J]. 工业安全与环保,2004,30(10):38-42.
Zhao Jinping, Jiao Shuqiang, Xing Qingzhu. Risk assessment and management of hazardous wastes[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2004, 30(10):38-42.
[3] 龙朝晖,杨芸,毕朝文. 危险废物的环境风险评价探讨[J]. 中国资源综合利用,2004,(11):21-23.
Long Zhaohui, Yang Yun, Bi Zhaowen. The study of environmental risk assessment of hazardous waste [J]. China Resource Comprehensive Utilization, 2004,(11):21-23.
[4] 金萍. 危险废物风险评估体系及管理模式的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2004.
Jin Ping. The risk assessment system of hazardous waste and the research of the management [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.
[5] 申海玲,程声通. 环境风险评价方法探讨[J]. 上海环境科学,1995,14(1):35-36.
Shen Hailing, Cheng Shengtong. Discuss of environmental risk assessment [J]. Shanghai Environmental Sciences, 1995, 14(1):35-36.
[6] 曹云,徐卫业. 系统工程风险评估方法的研究进展[J]. 中国工程科学,2005,7(6):88-94.
Cao Yun, Xu Weiye. A review on the risk assessment methods of system engineering[J]. Engineering Science, 2005, 7(6):88-94.
[7] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2000.
Hu Erbang. Practical technology and methods of environment hazard evaluation [M]. Beijing:China Environmental Science Press, 2000.

(责任编辑 孔 欣)