

基于多目标优化的危废焚烧配伍模型研究

郝亮钧^{1,2}, 楚金旺¹, 姚心^{1,2}, 庞慧^{1,3}, 陈鑫¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083;

3. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

[摘要] 危险废物对人体健康和生态环境存在重大危害, 经过焚烧处置能够充分消灭除重金属以外的有害成分, 而危废配伍是保证焚烧系统能够持续、稳定、经济运行的必要过程。基于多目标优化方法和加权求解算法, 构建了同时考虑综合处置量最大和经济效益最优的配伍模型, 并求解得到各目标函数在不同权重下的配伍方案, 不仅保证了危废焚烧处置系统的最大运行能力, 同时兼顾了危废处置企业的最大经济效益, 为企业在不同生产负荷和不同市场环境下的配伍方案提供了依据。

[关键词] 危险废物; 焚烧处置; 多目标优化; 配伍

[中图分类号] X705

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2021)05-0001-04

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2021.05.001

0 引言

危险废物主要指具有腐蚀性、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废物^[1]。对于危险废物处置不当, 不仅会对人体健康造成直接危害, 也会在自然环境中发生迁移转化, 进而对土壤、水体和大气等生态环境造成污染。危废经过焚烧处置, 除重金属以外的其它有害成分可被充分分解和消灭, 减量化效果显著, 同时焚烧产生的热量可回收利用, 用于供热和发电, 具有可观的经济效益^[2-3]。

其中, 危废配伍是危废进入焚烧系统之前的必要操作过程, 即结合各拟焚烧物料粒径、热值、水分、挥发分、硫氯含量、灰渣特性等物理及化学性质, 实现不同物料燃烧特性的有效融合, 使焚烧系统能够持续、稳定、经济运行。

目前, 关于危废焚烧处置配伍方法的研究, 主要集中于单个目标最优, 很少考虑多目标同时最优的情形, 尤其是焚烧处置系统综合处置量和企业经济效益同时达到最优的状态^[4-7]。2017年^[8], 重庆大

学张宏良以重庆市某水泥厂为例建立了水泥窑替代燃料\原料焚烧配伍模型, 用于验证现场配伍数据的合理性, 但并未给出最优配伍方案的求解方法; 2018年^[9], 四川大学梁学栋等提出了一种危废配伍方法, 通过对焚烧指标矩阵进行求解计算, 得到各种危废的配伍权重, 但并未表述配伍原则的控制途径; 2019年^[10], 光大环保技术研究院(南京)有限公司在考虑各配伍原则的基础上, 提出了一种以日处理量最大为目标的配伍方法, 而并未考虑经济效益最大。此外, 缺乏关于多目标最优的配伍算法研究, 使多目标配伍方案的现场实施应用存在困难。

为此, 本文基于多目标优化方法, 同时考虑综合处置量和经济效益最优, 构建了多目标优化的危废配伍模型, 并通过多目标函数的加权求解方法, 获得最优配伍方案, 不仅能够保证危废焚烧处置系统的最大运行能力, 同时能够兼顾危废处置企业的最大经济效益。

1 配伍模型的建立

1.1 配伍原则

在保证物料相容性的基本条件下, 还需满足以下两个主要条件:

(1) 保证合适的热值。

通过配料将热值控制在合适的范围之内。避

[收稿日期] 2021-06-29

[作者简介] 郝亮钧(1990-), 男, 山西忻州人, 工程师, 博士, 主要从事数字孪生算法建模的研究工作。

[引用格式] 郝亮钧, 楚金旺, 姚心, 等. 基于多目标优化的危废焚烧配伍模型研究[J]. 有色设备, 2021, 35(5): 1-4.

免热值过高,使窑内温度超过耐火材料能够耐受的最高温度,而造成的安全问题;同时,避免热值过低,补充天然气等其他辅助燃料,而增加的运行成本。

(2)控制有害物质占比。

控制酸性物质、卤化物、重金属、碱金属等有害物质的占比,进而控制产生烟气的有害气体含量,从而一方面避免对设备产生腐蚀损坏,另一方面保证满足系统的净化能力,烟气能够排放达标。

1.2 配伍模型

假定现有 n 种废物进入焚烧系统协同处置,其中 $a_{1,j}, a_{2,j}, a_{3,j}, a_{4,j}, a_{5,j}, a_{6,j}, a_{7,j}, a_{8,j}, a_{9,j}, a_{10,j}, a_{11,j}, a_{12,j}, a_{13,j}, a_{14,j}, a_{15,j}, a_{16,j}$ 分别表示第 j ($1 \leq j \leq n$, 且 j 为整数) 种废物中的有机碳含量(质量%)、无机碳含量(质量%)、H 含量(质量%)、O 含量(质量%)、N 含量(质量%)、P 含量(质量%)、S 含量(质量%)、Cl 含量(质量%)、F 含量(质量%)、重金属含量(ppm)、碱金属含量(ppm)、 H_2O 含量(质量%)、热值(kcal/kg)、处置量(kg/盘)、处置成本(元/盘)、经济效益(元/盘); b_i 和 c_i 分别表示处置系统对第 i ($1 \leq i \leq 16$, 且 i 为整数) 个指标处置能力的下限值和上限值,如果下限值不存在,则取 $b_i = -\infty$,如果上限值不存在,则取 $c_i = \infty$; d_j 表示第 j 中废物的库存量(盘)。构建相关指标参数矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{16,1} & a_{16,2} & \cdots & a_{16,n} \end{bmatrix}$$

$$b = [b_1, b_2, \dots, b_{16}]^T$$

$$c = [c_1, c_2, \dots, c_{16}]^T$$

$$d = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T$$

设 x_j 为第 j 种废物的处置量,可知, x_j 为大于零的正数。令:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

则入窑处置废物中,有机碳的总含量为 $a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + \dots + a_{1,n}x_n$,表示成矩阵形式为 $a_{1,:}x$,根据废物配伍原则,需满足约束不等式 $b_1 \leq a_{1,:}x \leq c_1$ 。同样地,可得第 i 个项目需满足的约束不等式为 $b_i \leq a_{i,:}x \leq c_i$,其中, $a_{i,:} = [a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n}]$,表示矩阵 A 中第 i 行元素,即各废物关于第 i 个指标的数值。焚烧配伍满足的约束条件为:

$$Ax \geq b \tag{1}$$

$$Ax \leq c \tag{2}$$

另一方面,各废物的处置量不应该超过各废物目前的库存量,即 $x_j \leq d_j$ 。则废物处置量满足的约束条件为:

$$0 \leq x \leq d \tag{3}$$

实施上述配伍规则,处置系统单次综合处置量、单次运行的经济效益分别为:

$$a_{14,1}x_1 + a_{14,2}x_2 + \dots + a_{14,n}x_n \tag{4}$$

$$a_{16,1}x_1 + a_{16,2}x_2 + \dots + a_{16,n}x_n \tag{5}$$

表示成矩阵形式为:

$$a_{14,:}x \tag{6}$$

$$a_{16,:}x \tag{7}$$

由此建立处置系统单次运行综合处置量最大,且济效益最大的配伍模型为:

$$\begin{aligned} \max & a_{14,:}x \\ \max & a_{16,:}x \\ \text{s. t.} & Ax \geq b \\ & Ax \leq c \\ & 0 \leq x \leq d \end{aligned} \tag{8}$$

2 配伍模型的求解

引入剩余变量和松弛变量,将配伍模型(8)转化为标准型:

$$\begin{aligned} \min & -a_{14,:}x \\ \min & -a_{16,:}x \\ \text{s. t.} & Ax - x_b = b \\ & Ax + x_c = c \\ & x + x_d = d \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{9}$$

其中, x_b 为 n 维剩余变量:

$$x_b = [x_{b1}, x_{b2}, \dots, x_{bn}]^T$$

x_c 和 x_d 为 n 维松弛变量。

$$x_c = [x_{c1}, x_{c2}, \dots, x_{cn}]^T$$

$$x_d = [x_{d1}, x_{d2}, \dots, x_{dn}]^T$$

利用专家打分法或加权因子分解法等,确定各个目标函数的权重系数,保证着重考虑的模型目标具有较大权重,设 w_k 为第 k 个模型目标的权重。依据不同模型目标的权重系数,将多目标模型转换为新的单目标加权模型:

$$\begin{aligned}
& \min \omega_1 (-\mathbf{a}_{14,:} \mathbf{x} - y_1)^2 + \omega_2 (-\mathbf{a}_{16,:} \mathbf{x} - y_1)^2 \\
& \text{s. t. } \mathbf{Ax} - \mathbf{x}_b = \mathbf{b} \\
& \quad \mathbf{Ax} + \mathbf{x}_c = \mathbf{c} \\
& \quad \mathbf{x} + \mathbf{x}_d = \mathbf{d} \\
& \quad \mathbf{x} \geq 0
\end{aligned} \tag{10}$$

新的目标模型为单目标规划模型,求解可得整个模型的最优解。

3 案例分析

以某危废处理厂为例,假设有4种物料,配伍物料和处置系统的相关指标参数,如表1所示。

表1 配伍物料和处置系统的相关指标参数

指标	废物1	废物2	废物3	废物4	系统能力
有机碳 C ₁ /(质量%)	27.00	28.80	39.86	41.66	25 ~ 50
无机碳 C ₂ /(质量%)	3.00	3.20	4.43	4.63	0 ~ 5
H/(质量%)	4.00	4.50	3.29	4.29	2.5 ~ 5
O/(质量%)	5.29	7.00	5.38	5.38	4.5 ~ 6
N/(质量%)	1.60	1.40	3.91	3.91	0 ~ 3
P/(质量%)	0.12	0.09	0.21	0.15	0 ~ 0.2
S/(质量%)	1.97	1.00	0.47	0.47	0 ~ 2.5
Cl/(质量%)	1.86	1.50	1.16	1.16	0 ~ 2
F/(质量%)	0.01	0.30	0.30	0.30	0 ~ 1
重金属/(质量%)	0.005	0.008	0.002	0.01	0 ~ 0.01
碱金属/(质量%)	0.27	0.25	0.18	0.21	0 ~ 0.3
H ₂ O/(质量%)	31.13	26.29	18.00	19.00	12 ~ 35
热值/(kcal/kg)	2 600	2 737	2 976	2 480	2 500 ~ 3 000
处置量/(kg/盘)	5 500	7 000	3 500	6 500	85 000 ~ 95 000(kg)
处置成本/(元/盘)	100	120	160	200	0 ~ 5 000
经济效益/(元/盘)	150	200	300	400	10 000 ~ + ∞
库存量/(盘)	200	210	190	200	

设 x_j 为第 $j(j=1,2,3,4)$ 种废物的处置量,建立焚烧系统综合处置量和经济效益最大的配伍模型,求解可得不同权重分配下的配伍方案,如表2所示。

表2 不同目标权重下的配伍方案

权重分配	综合处置量	0	0.5	1
	经济效益	1	0.5	0
配伍方案	废物1	3.656 1	2.173 1	2.313 5
	废物2	0.789	8.685 4	9.117 3
	废物3	9.222	10.646 3	10.432 2
	废物4	6.366 3	0.505 9	0.037 3

4 结论

基于多目标优化方法和加权求解算法,得到了兼顾处置系统最大运行能力和处置企业最大经济效益的最优配伍方案,不仅能够满足焚烧处置系统的持续稳定运行,而且可以为企业在不同生产负荷和不同市场环境下提供最佳的配伍方案。

[参考文献]

- [1] GB5085—2007, 危险废物鉴别标准[S].
- [2] Orloff K, Falk H. An international perspective on hazardous waste practices[J]. International journal of hygiene and environmental health, 2003, 206(4-5): 291-302.
- [3] Zhu H M, Yan J H, Jiang X G, et al. Study on pyrolysis of

- typical medical waste materials by using TG-FTIR analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(1): 670 - 676.
- [4] 褚衍旭,高勇,李东,等. 危险废物焚烧处置工艺进料配伍研究[J]. *环境与可持续发展*, 2018, 43(6): 165 - 167.
- [5] 刘国勇. 危险工业废物焚烧处置工艺概述及焚烧配伍[J]. *科技创新导报*, 2017, 14(21): 115 - 116.
- [6] 邢杨荣. 危险废物焚烧配伍与燃烧反应分析[J]. *环境工程*, 2008, 26(s1): 203 - 204.
- [7] 纵瑞耘,李琦,葛藤,等. 危险废物焚烧处置进料预处理及配伍探讨[J]. *山东化工*, 2021, 50(13): 240 - 241.
- [8] 张宏良. 危险废物理化特性分析及水泥窑替代燃料/原料焚烧配伍研究——以重庆市某水泥厂为例[D]. 重庆:重庆大学, 2020.
- [9] 四川大学. 一种危废焚烧配伍方法: 中国, 109708114 A [P]. 2019. 05. 03.
- [10] 光大环保技术研究院(南京)有限公司. 一种危险废弃物焚烧处置的配伍方法: 中国, 201910290354. 7 [P]. 2019. 04. 11.

Study on the Compatibility Model of Hazardous Waste Incineration Based on Multi-objective Optimization

HAO Liang-jun, CHU Jin-wang, YAO Xin, PANG Hui, CHEN Xin

Abstract: Hazardous waste causes great damage to the human health and ecological environment, and its harmful components except heavy metals can be fully eliminated by incineration. And the compatibility of hazardous waste is a necessary process to ensure sustainable, stable and economical operation of the incineration system. Based on the multi-objective optimization method and weighted solution algorithm, a compatibility model has been established in consideration of the largest comprehensive disposal capacity and optimal economic benefits. And the compatibility schemes of all target functions under different weights are solved, which not only guarantee the maximum operation capacity of hazardous waste incineration disposal system but also accommodate the largest economic benefits of hazardous waste disposal companies, providing a basis for the companies' compatibility schemes under different production loads and different market environment.

Key words: Hazardous waste; incineration disposal; multi-objective optimization; compatibility

