

doi: 10.7690/bgzdh.2026.02.009

## 工业模块化技术在危废暂存仓中的应用

王雪瑶<sup>1</sup>, 石田<sup>1</sup>, 邱勇军<sup>1</sup>, 王嘉斌<sup>1</sup>, 唐佳军<sup>2</sup>

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 南京 211102; 2. 南京佳荣环保科技有限公司, 南京 211161)

**摘要:** 为解决常规危废存储方法存在存储安全限值较低的问题, 提出工业模块化技术在危废暂存仓中的应用研究。根据危废的来源与产生原理, 对其产排特性进行分析, 通过计算危废中各污染物的产出系数, 以获取其产排系数, 结合危废暂存仓的结构层次, 建立危废存储指标体系, 并求取各指标的综合权重。对暂存仓的功能模块进行分解, 采用模块化技术设计危废暂存仓的存储模块单元与撬块单元, 并将该方法应用于某危废暂存仓设计中。结果表明, 该方法能有效提高危废的存储安全限值。

**关键词:** 工业模块化; 危废; 出暂存仓; 储存安全

**中图分类号:** TP301.6 **文献标志码:** A

## Application of Industrial Modular Technology in Hazardous Waste Temporary Storage Warehouse

Wang Xueyao<sup>1</sup>, Shi Tian<sup>1</sup>, Qiu Yongjun<sup>1</sup>, Wang Jiabin<sup>1</sup>, Tang Jiajun<sup>2</sup>(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;  
2. Jaory Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanjing 211161, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low storage safety limit of conventional hazardous waste storage methods, the application research of industrial modular technology in hazardous waste temporary storage warehouse was proposed. According to the source and generation principle of hazardous waste, the production and emission characteristics of hazardous waste were analyzed, the production and emission coefficients of pollutants in hazardous waste were obtained by calculating the output coefficients of pollutants in hazardous waste, the storage index system of hazardous waste was established combined with the structural level of temporary storage warehouse of hazardous waste, the comprehensive weight of each index was obtained, and the functional modules of temporary storage warehouse were decomposed. The storage module unit and skid unit of hazardous waste temporary storage warehouse were designed by using modular technology, and the method was applied to the design of a hazardous waste temporary storage warehouse. The results show that this method can effectively improve the storage safety limit of hazardous waste.

**Keywords:** industrial modularization; hazardous waste; temporary warehouse; storage safety

### 0 引言

工业、医疗、电力和生活等领域产生的危废含有有毒物质、易燃物质或其他对环境对人类健康有害的成分; 因此, 确保危废的安全存储、环保处理和便于装卸是至关重要的<sup>[1]</sup>。危废的存储如果不当, 将会对空气、水和土壤等环境元素造成影响和污染。危废临时储存仓库的设计最大限度地降低了危废的环境风险水平, 这项用于处理和处置危废的技术目前已得到了广泛应用。

当前, 常用于危废暂存仓设计的方法主要包括编程技术和混合存储立方技术。编程技术通过对暂存仓的各存储功能进行分析, 并且采用语义分解方法对暂存仓的存储任务进行网络化分解, 将分解后的存储功能进行层次编程, 封装成相应的功能函数并存储到上级数据库中。虽然该方法在危废存储可

靠性方面得到了很大提升, 但在后期维护方面需要投入较大的人力与物力, 维护成本较高; 混合存储立方技术基于网络多线程原理设计暂存仓存储墙, 通过解析危废的形成规律与本质特性, 对危废进行单维度存储, 但没有形成完整的存储理论体系, 使得危废的风险问题更加突出。

针对目前既有方法存在的诸多弊端, 笔者以工业模块化技术为核心, 针对危废暂存仓的存储方法进行深入研究, 以期能够实现危废的安全存储, 降低其对生态环境的风险等级。

### 1 工业模块化技术下危废暂存方法设计

危废主要分为材料源危废和工业源危废, 具有量大、面广、源多以及物杂的产排特性<sup>[2]</sup>, 具有较为突出的危害特性和特有的资源属性。为实现对危废更好地储存, 以降低其对周边生态环境的危害

收稿日期: 2024-11-26; 修回日期: 2024-12-22

第一作者: 王雪瑶(1996—), 女, 吉林人, 硕士。

性，应对危废的暂存方法进行研究。具体流程如图 1 所示。

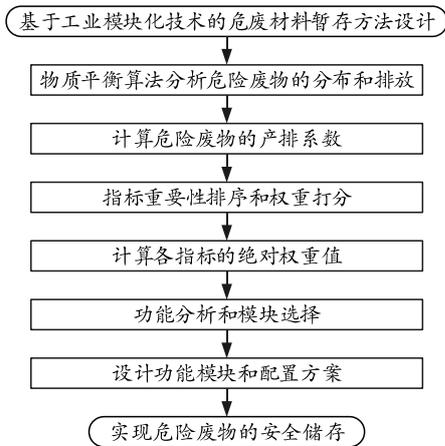


图 1 基于工业模块化技术的危废暂存方法流程

### 1.1 危废的产排系数确定

危废产生和排放系数是指在常规技术经济和管理条件下，储存单位产品产生的污染物的统计平均浓度<sup>[3]</sup>。生产和排放系数与设备技术水平、原材料使用情况以及危废在实际储存过程中的污染控制措施密切相关，可以通过现场测量、物料平衡或理论计算获得，是后续实现模块化存储的基础数据<sup>[4]</sup>。危废产排与储存方式关联如图 2 所示。

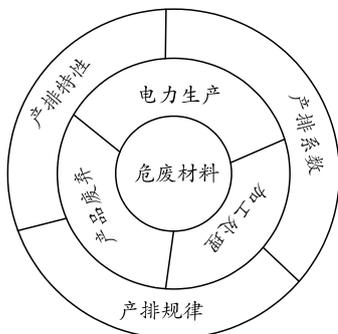


图 2 危废产排与储存方式关联

考虑到蓄电池危废中的重金属无法通过降解、分解和矿化消失来达到减少危害性的目的，只有通过形式、价态和空间位移转化为其他物质，以降低风险性<sup>[5]</sup>；因此，笔者使用物质平衡算法分析危废在产品中的分布以及排放到环境中的 2 个因素，从而得出危废的生产和排放特征以及相应系数。

在电力产品制造过程中，电力工程各个阶段危废的产生和排放系数均存在显著差异。从整个产业链的角度，对危废生产过程的各个阶段进行物料平衡分析，并采用最小二乘法拟合物料平衡因子<sup>[6]</sup>，从而计算出危废的生产和排放系数。

原辅料粉碎、过筛时的物料平衡：

$$A_1 = \frac{b_1 + c_1}{a_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $A_1$  为危废生产工序中的物料平衡因子； $b_1$  为材料最终质量； $c_1$  为不可利用的物料质量； $a_1$  为材料初始质量。

加工处理工序中的物料平衡：

$$A_2 = \frac{b_2 + c_2 + d_2}{a_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $b_2$  为制粒前所有原辅料的总质量； $c_2$  为干颗粒总质量； $d_2$  为加工后的危废液体总质量； $a_2$  为测量量。

则有毒污染物的产生量：

$$E_0 = (A_1 + A_2) \times (Q_1 - Q_2) \quad (3)$$

式中： $E_0$  为有毒金属污染产生量； $Q_1$  为原辅料中的金属总量； $Q_2$  为危废的出品量。

在产品废弃工序中的物料平衡计算公式为：

$$A_3 = \frac{b_3}{a_3} \times 100\% \quad (4)$$

式中： $b_3$  为尾料总量； $a_3$  为取样量。

由于对危废材料配方的严格控制标准，一级和二级危废中有毒污染物的产生量大致相当于排放的总量<sup>[7]</sup>。根据这一理论，采用最小二乘法可计算出在压片工序中的物料平衡因子为：

$$A_4 = \frac{c_4 + b_4 - a_4}{2} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $c_4$  为上道工序中的接收固体物质总量； $b_4$  为素片总量； $a_4$  为该道工序的收率。

危废的污染物排放量为：

$$E_1 = (A_3 + A_4) \sum W_i \times C_i \quad (6)$$

式中： $E_1$  为危废污染物的排放量； $W_i$  为危废  $i$  的排放量； $C_i$  为危废  $i$  中有毒金属的有效含量。

基于用、排原辅料及特征污染物的实测浓度<sup>[8]</sup>，确定单位危废的产物系数为：

$$B_i = E_i \sum (q_k c_k / t) \quad (7)$$

式中： $q_1$  为单位危废的产生量； $c_k$  为材料中污染物  $k$  的实测浓度平均值； $t$  为监测天数。

则危废中污染物  $k$  的产生系数为：

$$f_k = B_i / M_k \quad (8)$$

式中  $M_k$  为污染物  $k$  的总量。

危废的产排系数  $\alpha$ ：

$$\alpha = f_k / (p_0 \times p_1) \quad (9)$$

式中： $p_0$  为材料残损量； $p_1$  为产品计划产量。

根据危废在全产业链中的产出过程与产排之间

的关联原理，计算危废的各个生产工序对应的物料平衡因子，采用最小二乘法拟合各平衡因子，并结合特征污染物的实测浓度，计算求出危废的产排系数，便于接下来计算危废存储指标的权重。

### 1.2 危废存储指标权重计算

危废暂存库是一个由多因素组成的多层次、多变量的复杂人机系统<sup>[9]</sup>。为获取最佳危废的存储方案，笔者在危废产排系数的基础上，计算危废的综合储存权重。危废暂存仓的存储指标如表 1 所示。

表 1 危废暂存仓的存储指标

一级指标	二级指标	三级指标
材料质量 $B_1$	质量合格 $C_1$	质检合格 $D_1$
	在存储期内 $C_2$	产品未变质 $D_2$
		包装完好 $D_3$
暂存仓规划布局 $B_2$	选址 $C_3$	外部距离符合要求 $D_4$
	库区布置 $C_4$	选址位置符合规范 $D_5$
	建筑物与构筑物 $C_5$	总平面布置合理 $D_6$
		安全疏散通道设置合理 $D_7$
安全设施	消防 $C_6$	消防设施完善 $D_8$
	电气 $C_7$	线路布置合理 $D_9$

按照表 1 危废暂存仓的储存指标体系，对具有相同从属关系的同层次内的  $n$  个指标进行重要性排序<sup>[10]</sup>，记为  $x_i^j$ ，表示  $n$  个指标中第  $i$  个重要度为  $j$  的指标，则与各指标的权重系数打分的表达式为：

$$r_i^j = \alpha \times (w_{j-1}^i / w_j^i) \quad (10)$$

式中： $r_i^j$  为第  $i$  个二级指标中第  $j$  指标的重要性分值； $\alpha$  为危废的产品系数； $w_{j-1}^i$ 、 $w_j^i$  分别为第  $i$  位专家对各二级指标和三级指标的权重系数打分。

根据相对重要性程度  $r_i^j$ ，计算各指标权重系数的平均分为：

$$y_i = \left( 1 + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^p r_i^j \right)^{-1} \quad (11)$$

式中  $n$ 、 $m$ 、 $p$  分别为一级指标、二级指标和三级指标的个数。

存储指标的加权向量：

$$\theta_1 = y_1 + C_{m_0-1}^i / 2 \quad (12)$$

式中  $C_{m_0-1}^i$  为从  $m_0-1$  个元素中取出的  $i$  个元素的组合数， $i=1, 2, \dots, m_0-1$ 。

利用式(12)求取结果加权各存储指标的平均分值向量<sup>[11]</sup>，得到各指标的绝对权重值，即：

$$\bar{w}_1 = \sum \theta_1 t_1 \quad (13)$$

式中  $t_1$  为指标权重赋值因子。

则基于环境安全的危废存储限值为：

$$\max L = M_1 \times S_1 \quad (14)$$

式中： $M_1$  为脱毒残渣中安全的离子含量； $S_1$  为危废的物相系数； $L$  为材料安全存储限值。

各存储指标因素的主观赋权权重为：

$$\omega = \frac{\bar{w}_1}{K \times S} \quad (15)$$

式中： $K$  为材料安全环境要求限值，其取值范围为  $[1, 10]$ ； $S$  为关联产品的元素含量。

根据危废在暂存仓的储存原理，建立基于储存安全考虑的暂存仓储存指标体系<sup>[12]</sup>，结合危废产排系数，求取存储指标的综合权重，以明确危废的储存安全等级，为后续完成危废的模块化存储提供有利条件。

### 1.3 危废模块化存储方案设计

对拟设计的危废暂存仓进行功能分析，划分和设计一系列功能模块，并对这些模块进行选择和配置，形成不同的功能，实现对危废的安全储存<sup>[13]</sup>。图 3 为基于模块化设计的危废暂存仓设计结构。

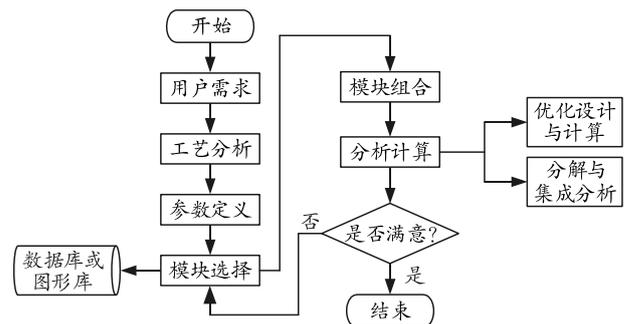


图 3 危废模块化存储方案设计

针对危废储存的特殊性，将每个功能模块分解集成为一个系统，完成暂存库功能模块的整体集成，最终综合设计模块化危废暂存库<sup>[14]</sup>。

由于临时储存仓库规模大、施工周期短、开工程序延迟，传统的施工模式无法满足储存目标。为了按时完成项目建设，根据危废的实际生产和排放系数以及临时储存指标的重量水平，采用了“模块+撬块”的建设理念<sup>[15]</sup>。模块设计基于易于拆卸、运输和快速重新组装的原则；撬块的设计基于功能独立和结构相似的原则以及撬块的可重用性进行集成。危废暂存仓的单元模块设计如表 2 所示。

表 2 危废暂存仓的单元模块设计

单元编号	名称	模块编号	主要设备
A	过滤分离及外输单元	SK-A	过滤分离器
B	低温脱水单元	SK-B	低温分离器
C	进仓分离单元	SK-C	生产分离器
D	低压处理单元	SK-D	低压气冷箱

危废临时储存库的具体建设方案：暂存仓整体采用功能模块化设计，从库区入口到出口共计设置 4 个模块单元，记为 A~D，且每个模块单元内置 3~4 个撬块，主要包括过滤分离模块、低温分离模块、生产分离模块和低压气冷模块；所有模块单元整合并集成成为一个空间阀组；根据危废的类型与来源对其进行分类并存储于空间阀组中。由此实现工业模块化技术在危废暂存仓中的应用。

以危废产排系数与暂存仓存储指标的综合权重为依据，采用模块化技术对危废暂存仓进行建造设计，生成模块化危废存储方案，达到安全存储危废的目的，由此实现了工业模块化技术在危废暂存仓中的应用。

## 2 实例应用分析

为验证所提出的危废模块化存储方法的可行性，以某废物处理暂存仓为研究案例，以测试设计方法的可靠性。

### 2.1 工程概况

某电力工程项目危废临时储存库是一个大型的临时储存库，是当地的重点建设项目，主要目的是优化当地能源结构，促进该地区低碳清洁能源的发展，以实现保护生态环境的目标。

危废暂存仓的地面工程包括新建 3 个注入站、1 个井场和 2 个计量清管站。主要包括含有有机溶剂和蓄电池重金属废物的工艺危废储存室、含有电力实验室废物、酸性废物的电力危废储存间，以及含有废旧蓄电池包装、稀硫酸其他危废储存室。工业和医疗危废储存室位于现场西北侧，其他危废储存室位于场地南侧。库区总平面布置如图 4 所示。

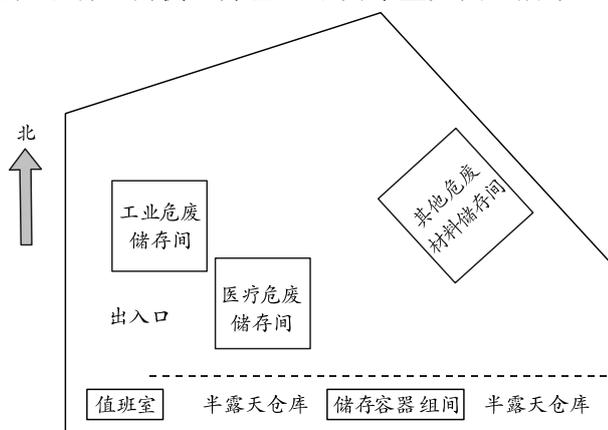


图 4 库区总平面布置

建筑场地周围为 3 m 高的防火实心墙，因此储存区耐火等级为一级；西北侧有出入口，南侧有 2

个半露天仓库，用于存放危废的设备和容器。危废临时储存库建成后，将与周边临时储存库及其配套管道互联互通，实现危废的统一管理和调度。

### 2.2 实验准备

考虑到危废的储存方式等因素，从 2022 年 6~7 月和 11~12 月选择了 2 个阶段的采样和监测，每个采样监测周期持续 3 天，在早上、中午和晚上各采样一次。监测指标为危废的物质平衡系数和产出系数。采集危废污染物量 15% 的平衡样本，并设置样本量 3% 的全程序空白样本，每个采样周期结束后保留 2% 的背景样本。样品分析基于环境保护行业监测和分析方法标准中规定的监测方法。

由于原始数据不仅有反映暂存仓中不同危废储存模式特征的准确数据，而且由于一些不确定因素的影响，也有偏差数据，因此在计算危废产生和排放系数的过程中，采用 Grabbs 检验方法消除工作样本中的异常值和置信度低于 80% 的数据。

### 2.3 实验说明

根据文中设计的方法，将危废暂存仓的功能模块进行分解。参照暂存仓各存储间的空间配置方式，建立组合式模块化暂存仓结构设计样机，在相同属性模块单元中，可对相似件和撬块进行参数调整与快速更换模块中的可换件，实现对各类危废的移置，并结合通信技术实现暂存仓的可编程控制，以此提高危废的安全存储等级。

### 2.4 危废存储安全等级结果分析

利用本文中设计的方法，对危废临时储存库进行了模块化设计。根据临时仓库夹层平台的布置位置以及撬块的特性和质量要求，在每个撬块的边界处进行模块的重新安装。同时，为了满足暂存仓库的模块化设计和预制要求，用于危废低温处理和分离的模块设置为独立模块，并根据重组计划与其他撬块一起现场组装。为测试本方案在危废暂存仓设计中的有效性，对暂存仓采用模块化设计前后的危废存储风险进行分析与计算，其计算公式为：

$$G = \frac{\alpha \times \omega}{1 - \beta} \quad (16)$$

式中：G 为危废储存风险系数； $\alpha$  为危废的产排系数； $\omega$  为存储指标的综合权重系数； $\beta$  为置信度。

采用式(16)对模块化设计前后的危废暂存仓的风险系数进行测算，以评估本文中方法在危废存储安全方面的性能，结果如图 5 所示。

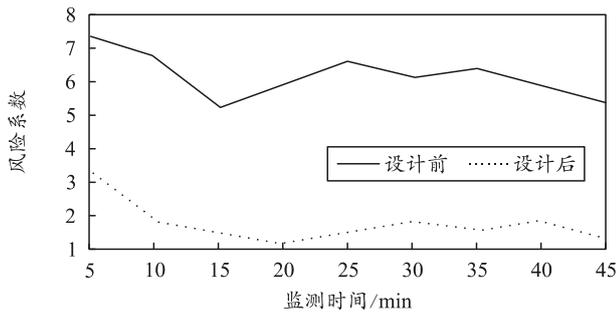


图 5 暂存仓模块化设计前后的危废存储风险对比

未经模块化设计前的危废暂存仓，其危废存储风险系数均在 5 以上，其中风险系数最高为 6.7；而对该暂存仓采用工业模块化设计后，其危废存储风险系数出现显著下降现象，在监测时间内，始终控制在 4 以下，且随着监测时间的增加，存储风险系数也呈持续减小趋势。由此可以说明，基于工业模块化技术设计的危废在暂存仓中的储存方法能够有效降低危废的风险系数。

### 2.5 危废存储安全性对比实验分析

为进一步验证本文中提出的方法在危废安全存储方面的优越性，采用编程技术(方法 1)、混合存储立方技术(方法 2)作为本文中方法的对比方法，并引入危废存储安全限值  $\lambda$  来评价不同方法下的材料存储安全性。 $\lambda$  的值越大，表明危废的泄露可能性越小，则其风险性越低，反之，则越大。对暂存仓周围的 5 处采样点进行监测，得到 3 种方法对于危废存储安全性的结果对比如表 3 所示。

表 3 基于不同方法的危废存储安全限值对比 %

采样点	方法 1	方法 2	本文中方法
1	45.3	56.4	80.6
2	50.1	55.0	84.9
3	44.9	48.7	87.5
4	32.0	40.1	92.6
5	31.8	52.9	89.3

由表 3 可知：在危废暂存仓的不同采样点中，本文中方法得到危废的存储安全限值均要远高于对比方法，存储安全限值最大提升了 60.6%和 52.5%。通过实验结果对比可知：本文中提出的工业模块化设计危废暂存仓，能够实现危废的安全存储。

## 3 结束语

危废的来源较多且组成结构较为复杂，为生态环境带来的风险是不可消除的。为切实降低危废对环境的影响并提高其存储的安全性，笔者结合工业模块化技术对危废暂存仓存储方法展开研究与设

计。通过计算危废的产排系数与暂存仓存储指标的综合权重，对暂存仓进行功能模块化设计，且实际应用结果表明，所提方法能够有效提高危废存储的安全性，从而降低其环境风险。

### 参考文献：

- [1] 林威, 贾莉莉, 沈万玉. 基于 BIM 技术的装配式钢结构住宅模块化设计研究[J]. 安徽建筑, 2021, 28(11): 123-125.
- [2] 陈晖, 于殿勇, 梁风顺, 等. 工业机器人实训平台模块化可重构软件系统研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(2): 93-95, 100.
- [3] 谢奉林. 非标自动化设备的模块化设计分析[J]. 科学技术创新, 2023(6): 211-214.
- [4] 王晓伟, 郭文星, 郑海娟. 于船舶工程技术专业群的课程模块化分工协作教学模式[J]. 九江职业技术学院学报, 2023(1): 42-45.
- [5] 闫亦农. 基于“互联网+”的蒙古族服装个性化定制模块化设计[J]. 毛纺科技, 2023, 51(3): 66-73.
- [6] 辛宝平, 王佳. 涉重危废资源化利用理论体系[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 705-713.
- [7] 刘海婴, 杨锦涛. 模块化设计方法及其在机械设计中的应用[J]. 科技风, 2023(4): 65-67.
- [8] 张建哲, 刘延芳, 陈睿翔, 等. 无人机模块化设计与自组织优化研究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(1): 20-23.
- [9] 吴礼科, 张建新, 谢立中. 火箭武器装备模块化总体设计方法研究[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(1): 33-36.
- [10] 林希宁, 杨旭, 杨照坤. 基于视觉识别的模块化工业机器人工作站的研制[J]. 科学技术创新, 2023(3): 84-87.
- [11] 张书振, 王东亮, 李勇, 等. 二氧化碳的制取及性质检验装置的模块化设计[J]. 实验教学与仪器, 2022, 39(Z1): 73-74.
- [12] 游颖, 彭宁, 程浩, 等. FDM 打印机模块化设计过程评价[J]. 机械设计, 2022, 39(11): 40-47.
- [13] 郑帅, 王海军. 数字化转型何以影响枢纽企业创新绩效基于模块化视角的实证研究[J]. 科研管理, 2022, 43(11): 73-82.
- [14] 陈晖, 于殿勇, 梁风顺, 等. 工业机器人实训平台模块化可重构硬件系统研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 149-151, 171.
- [15] 刘宁, 杜贵明, 熊艳华, 等. 基于视觉检测的工艺品摆件智能装配模块化设计[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 17-22, 31.