



文章栏目：专论

DOI 10.12030/j.cjee.202202001 中图分类号 X705 文献标识码 A

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. [XIN Baoping, WANG Jia. Theoretical system of resource utilization of hazardous wastes containing heavy metals[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(3): 705-713.]

涉重危废资源化利用理论体系

辛宝平^{1,✉}, 王佳²

1. 北京理工大学材料学院, 北京, 100081; 2. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京, 100044

摘 要 涉重危废是危险废物中污染属性和资源属性都极为突出的大类类别。从涉重危废中提取昂贵/高价/有价金属不但可从源头上阻断重金属进入环境, 而且可实现稀缺金属资源的永续利用, 因而成为环境和资源领域的热点课题。当前, 涉重危废中金属提取回收工艺研究及工程实践大都基于离散物料的孤立个案和技术人员的个人经验, 缺乏系统完整科学的理论指导, 难以适应涉重危废高效、高值、高质的资源化利用需求。为此, 以涉重危废、金属五分法、重金属三维属性及涉重危废精细化分级分类 4 组创制概念为基础, 阐述了涉重危废精细化分级分类体系、涉重危废无害化处置和资源化利用边际识别指标体系、涉重危废金属提取和危险属性降级技术体系、涉重危废脱毒残渣建材化利用标准体系 4 大体系建设必要性及建设内容, 构建了涉重危废资源化利用的理论体系。本研究结果可为涉重危废的资源化利用提供理论支撑。

关键词 危险废物; 涉重危废; 金属提取; 金属五分法; 三维属性; 资源化利用; 理论体系

涉重危废指含重金属的危险废物, 其危险特性源于重金属的毒性, 分为材料源危废和工业源危废^[1-2]。涉重危废是危险废物中最为独特且极为重要的类别之一, 也是《巴塞尔公约》^[3] 和国际社会优先关注和严格监管的大类危废类别。我国《国家危险废物名录》(2021 年版)^[4] 包含 46 大类危废, 其中涉重危废就有 18 大类。重金属的不可降解性决定了涉重危废的环境风险不能完全消除; 而重金属的广泛应用及其基础材料地位又决定了涉重危废具有显著的资源属性和循环利用价值。从涉及的金属类型来看, 包括铬、钼、锌、铅、锡、镉、镍、金、银、铜、钡、铍、砷、硒、碲、锑、汞、铊等各种金属, 这些金属同时属于有毒、剧毒、高价、稀有、稀散、稀贵、战略储备(类)金属。从产排行业来看, 包括金属冶炼生产、金属制品生产、金属加工处理、重金属基功能材料失效和废弃等全产业链。从形成机制来看, 包括金属基材料/产品功能丧失的废旧和失效材料、金属生产/加工过程产生的废渣和废料以及环境污染控制生成的污泥和飞灰等。总之, 涉重危废具有量大、面广、源多、物杂的产排特性^[1-2]。

当前, 从涉重危废中提取回收各种昂贵、高价和有价金属既是从源头控制重金属环境污染的现实需要, 又是实现金属资源循环利用和保障金属资源安全供给的发展需要。涉重危废的资源化利用代表了其处理处置技术的发展方向, 已得到全球固废处置与资源化领域产业界和学术界的广泛关注。面对数量巨大、结构复杂多变、环境风险突出、资源属性各异的涉重危废, 怎样才能实现其科学、合理、高效、高质、高值的资源化利用? 解析涉重危废产排规律和本质特性, 提出金

收稿日期: 2022-02-03; 录用日期: 2022-02-28

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1900104, 2018YFC1900301, 2018YFC1900304); 国家自然科学基金(21777007); 北京市自然科学基金(8172042)

第一作者: 辛宝平(1969—), 男, 博士, 教授, xinbaoping@bit.edu.cn; ✉通信作者

属分离提取的科学原理和工艺技术的优选原则,构建资源化利用的理论体系是实现这一目标的首要前提。

前期工作已完成涉重危废的概念创制、提出了涉重危废资源化利用的实现路径,论证了三维属性(污染、资源和结构属性)量化描述涉重危废特性的科学性,阐述了建立基于三维属性精细化分级分类体系的重要性^[1-2]。但这些前期的理论创制、概念提出和制度设计仍是孤立的、离散的、局部的、单维度的,并没有形成系统化的完整理论体系,不能科学地回答涉重危废高效、高质、高值资源化利用的问题。完整的理论体系既要有基础性概念又要有多维度体系化设计,既要解决金属提取回收技术原理问题又要解决金属提取后二次残渣利用方式和污染控制问题,既要关注掌握不同类型涉重危废产排规律又要研究建立其科学分级分类及精细化管理问题。

涉重危废资源化理论体系包括涉重危废概念、来源及其资源化利用内涵和路径;不同行业和来源涉重危废的产排系数、产排特性和产排规律;不同行业和来源涉重危废资源属性、污染属性和结构属性及基于三维属性的精细化分级分类体系;不同类型涉重危废无害化处置和资源化利用的边际识别及其三维属性指标体系;不同类型涉重危废有价金属提取的技术原理和技术体系;脱毒“脱帽”残渣建材化利用路径选择及其产品安全和环境风险评价体系。该理论体系的构建、发展和成熟将使涉重危废处理处置这一重要细分领域由孤立的个体研究和感性经验上升到系统的科学理论,并为涉重危废资源化利用提供支撑。

1 涉重危废及其资源化利用

1.1 涉重危废及其来源

涉重危废具有突出的危害特性和独有的资源属性。涉重危废概念的创制对于该类别危废更具针对性的分类精准监管、高效处置和高值利用至关重要,对于全球重金属污染防控和金属资源安全供给意义重大,是构成本理论体系的重要基础概念之一。涉重危废指含重金属的危险废物,其危险特性源于重金属毒性。这一创制概念首次将含重金属的危险废物与其他类别危废的边际进行了科学界定,形成了涉重危废这一危险废物的重要细分领域^[1]。

涉重危废概念的提出,覆盖并联通了从金属冶炼生产、金属制品加工、金属表面处理、金属产品废弃到金属循环再生的产排全过程,既凸显了这一危险废物重要细分领域的共有特性也明确了其外延。按外延性质,又可进一步将涉重危废分为材料源危废和工业源危废2类。前者指重金属基功能材料或产品失效或废弃后演变而成的危废,如废旧电池和废催化剂等^[5-6];后者指重金属生产、加工、利用或环境治理过程产生的涉重危废,如电镀污泥和冶炼废渣等^[7-8]。

1.2 金属/重金属五分法

作为危险废物的重要细分领域,涉重危废显示出相当突出的资源-环境二元属性。因此,既要涉重危废中的有毒金属进行固化稳定化甚至脱除以消除其危害特性,又要对涉重危废中的有价金属进行提取回收以实现其资源化利用。长期以来,有价金属定义的泛化和边界不明,尤其是有价金属和有毒金属之间的复杂交错,极大地困扰着涉重危废资源-环境二元属性的精确量化评价,及对涉重危废的精准监管、高效处置和资源化利用。

为了更精准地指导涉重危废中有价金属的回收利用及有毒金属的污染控制,本理论体系将金属/重金属进行了五分法分类^[1],即:1) 昂贵金属,单价 100×10^4 元·t⁻¹ 以上,包括金、银、钯、铂、铑等;2) 高价金属,单价 $(5 \sim 100) \times 10^4$ 元·t⁻¹ (以铜价为下限),包括铜、镍、钴、钼、钒等;3) 低价金属,包括锌、锰、铝等;4) 高毒金属,包括汞、砷、镉、铬、铅;5) 无毒金属,包括钙、镁、铁、钠、钾等。金属五分法为精确反映和评价各类金属/重金属的资源回收价值和环境污染风险提供了分类学支撑,构成了本理论体系的第2个重要基础概念。

1.3 资源化利用路径

涉重危废的资源化利用从本质上讲就是通过调节调控不同金属在溶液-残渣两相中的分配行为(湿法)或在飞灰-熔体-渣体三相中的分配行为(火法)实现目标金属的分离、提取和回收，但不同类别金属需要采取不同的分离提取策略。金属五分法为涉重危废科学合理的资源化利用奠定了分类学基础。涉重危废全量资源化利用的总体原则和实现路径为：提取回收昂贵和高价金属，脱除有毒和高毒金属，保留低价和无毒金属的脱毒残渣进行建材利用。昂贵和高价金属的提取回收实现涉重危废的高值化资源利用，脱毒残渣的建材消纳实现低价和无毒金属的低值化资源利用，有毒和高毒金属的脱除及浓缩实现涉重危废的风险集中管控。

2 不同行业涉重危废产排系数和产排特性研究

2.1 产排系数及其重要意义

产排系数是指在正常技术经济和管理条件下，生产单位产品所产生或排放的污染物数量的统计平均值。产污系数是指生产单位产品所产生的原始污染物的量；排污系数是指经污染控制措施消减后排放到环境中的污染物的量。产排系数与产品类型、生产工艺、生产规模、原辅料使用、设备技术水平及污染控制措施等有关，通过现场实测、物料衡算或理论计算取得。产排系数是污染物统计、环境管理和污染治理的基础性数据^[9-10]。

当前，产排系数在我国水污染和大气污染管理和防治中已发挥重要作用，但危险废弃物和涉重废弃物的产排规律、产排特性和产排系数研究基础却十分薄弱。实际上，产排系数对于危险废弃物和涉重危废产排总量的精确统计、涉重危废的精细管理和精准处理处置更为重要。我国的危险废弃物日常数据收集是采取产废单位主动申报制度，但由于危险废弃物高昂的处置费用和严格的管理要求，产废单位的申报数据往往存在少报、瞒报、漏报的现象，因而导致危险废弃物的真实产排数量难以掌握。借助科学的产排系数推算可有效甄别上报数据的真伪，有助于危险废弃物和涉重危废排放总量的精确掌握，从而为危险废弃物和涉重危废的规范管理和合理处置利用提供可靠的数据支持。

2.2 不同类型涉重危废的产排系数和产排特性

涉重危废这一概念覆盖并联通了重金属冶炼生产、重金属制品制造、重金属加工处理、重金属基产品使用、失效及废弃等上中下游涉重全产业链条。涉重危废涉及行业众多、金属类型多样，危废形成的过程和机制也各不相同，因此，不同行业、不同类型、不同过程涉重危废的产排特性和产排系数存在很大差异。从全产业链过程分析，针对铅、锌、铜、镍、铬、镉、汞、钴、钼等重要有毒重金属，系统研究其从冶炼生产、产品制造、加工处理、失效废弃、到再生循环等不同环节的产排规律、产排特性和产排系数，对于加强涉重危废科学管理、推进涉重危废精准处置利用具有重要意义(图 1)。

涉重危废的危险特性源于重金属毒性。与有毒有机物相比，重金属不能降解、分解和矿化消失，只有形态转变、价态转化和空间位移。基于重金属的这一性质，通过质量平衡计

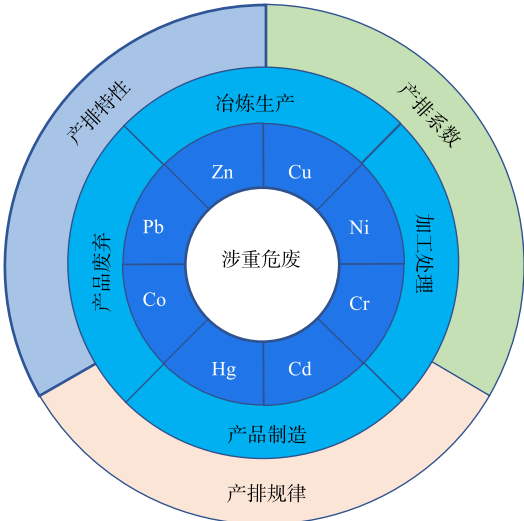


图 1 重金属类型、产业链条和涉重危废产排关联图
Fig. 1 Relevance diagrams of heavy metals types, industrial chain and production and discharge of hazardous wastes containing heavy metals

算(物料衡算法)即可全面了解目标/有毒金属在产物、飞灰、底渣、浸出渣、净化渣、污泥等各相的分布及排入环境的量,并由此表征涉重危废的产排特性和产排系数。在此基础上,进一步研究飞灰、底渣、浸出渣、净化渣、污泥等各类固废/危废中金属赋存形态、液相溶解行为、高温挥发行为及其环境释放行为,从而为涉重危废的风险鉴别及分级分类、无害化处置和资源化利用提供理论依据^[11-13]。

涉重危废的有毒金属产排系数计算公式见式(1)至式(4)。

$$E_{\text{产生}} = Q_{\text{原料}} - Q_{\text{产品}} \quad (1)$$

$$E_{\text{排放}} = \sum W_i \times C_i \quad (2)$$

$$e_{\text{产生系数}} = \frac{E_{\text{产生}}}{P} \quad (3)$$

$$e_{\text{排放系数}} = \frac{E_{\text{排放}}}{P} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{产生}}$ 是有毒金属污染产生量; $Q_{\text{原料}}$ 是原辅料中金属总量; $Q_{\text{产品}}$ 是产品或出品中的金属利用量; $E_{\text{排放}}$ 是金属污染排放量; W_i 是固废/危废*i*的排放量; C_i 是固废/危废*i*中有毒金属含量; $e_{\text{产生系数}}$ 是金属污染产生系数; $e_{\text{排放系数}}$ 是金属污染排放系数; P 是产品(出品)总量。

在现有严格的有毒金属污染排放控制标准下,无论一次危废还是二次危废中有毒金属的污染产生总量和排放总量大致相等,但不同排放途径和来源的有毒金属之环境行为、污染特性和危害强度存在显著差异,因而需要针对典型涉重危废产生、处置和利用全过程加强研究,以识别全产业链环境风险点并研发控制阻隔技术,引导目标金属向高资源利用和低环境风险的循环利用技术工艺和产业发展方式转变。

3 涉重危废三维属性及其精细化分级分类体系

3.1 涉重危废三维属性

涉重危废具有鲜明的资源-环境二元属性,但目前对于该类别危废二元属性的表征都是粗略说明和定性描述,缺乏量化指标和计算公式。这显然对于涉重危废的精细化管理、无害化处置和资源化利用都极为不利。另一方面,涉重危废产排涉及行业众多、金属类型多样、形成过程机制各不相同,以致其组分多变、结构复杂、种类繁多。不同产业链位阶、不同来源、不同行业、不同类型的涉重危废不仅在资源属性和污染属性上差异巨大,在组成和结构方面也千差万别。复杂多变的结构无论对于有毒/高毒金属的环境释放行为还是昂贵/高价金属的分离提取效能都会产生严重影响和干扰。因此,只有三维(资源、污染、结构)属性才能更加客观、准确、全面地反映涉重危废的固有本质特性。三维属性及其量化计算构成本理论体系的第3个基础概念。涉重危废之结构属性、资源属性和污染属性的量化计算公式和方法参考文献^[2]。

3.2 涉重危废精细化分级分类体系

在固体废物/危险废物环境管理中,分级分类聚焦于环境风险管控,只关注固体废物/危险废物的污染属性。为了解决危险废物监管压力和效率之间日益增长的矛盾,新修订的《固体废物污染环境防治法》^[14]专门提出危险废物要进行分级分类管理。目前,我国《国家危险废物名录》^[4]中并没有体现明确的分级分类管理思路,只是通过豁免管理清单和排除管理清单作为辅助和并行管理措施;而美国等国家针对危险废物小微产生源的分级管理措施基本属于名录管理的补充和完善,并不是严格意义上的分级分类,更没有形成完整体系^[15]。

本研究提出的精细化分级分类体系是基于涉重危废三维属性的综合性分级分类,构成本理论体系的第4个基础概念。精细化分级分类体系从环境危害程度,资源利用潜力和物料结构特性

3个维度对涉重危废进行定量描述。在三维属性量化计算的基础上进行5级(极高、高、中、低、极低)分级,再基于定量分级进行综合分类。该体系将突破不同行业领域的传统边界划分,完全按照三维属性量化指标进行分级分类。基于行业领域和危害特性定性分类的《国家危险废物名录》^[4]和基于三维属性的精细化分级分类体系呈相辅相成的互补关系。前者是国家危险废物监管的依据和基础,后者是前者的辅助和补充,共同为涉重危废的高效精准监管、切实无害化处置和合理资源化利用提供科学可靠的理论基础。

4 无害化处置和资源化利用边际识别及其三维属性指标体系

涉重危废的资源-环境二元属性决定了无害化处置和资源化利用并举是涉重危废处置利用的基本原则,但无害化处置和资源化利用是两种完全不同的路径选择。前者为了消除涉重危废的污染特性,凸显了环境效益;而后者为了提取回收稀缺的二次金属资源,体现了经济效益。无害化处置和资源化利用的路径选择显著依赖涉重危废的三维属性。

涉重危废的资源化利用潜力不但取决于其所含昂贵/高价金属的浓度、类型、价格、赋存形态以及金属提取的技术经济性,而且与有毒/剧毒金属的含量、种类、赋存形态以及低价/安全金属等干扰离子的种类及浓度都有密切关系。具有高资源属性、低污染属性、低结构属性的涉重危废适宜资源化利用;而具有低资源属性、高污染属性、高结构属性的涉重危废适宜无害化处置。因此,需要在全面分析涉重危废三维属性基础上,确立可满足不同类型涉重危废无害化处置和资源化利用边际识别的三维属性指标体系,才能确保涉重危废科学、合理、可持续地资源化利用。涉重危废资源化利用潜力和无害化处置潜力归一化指标计算公式参考文献[2]。

5 不同类型危废有价金属提取的技术原理和技术体系

5.1 涉重危废资源化利用的核心要务和关键诉求

涉重危废具有的资源-环境二元属性,决定了其资源化利用的核心内涵是潜在资源价值的最大化回收和环境危害特性的最大化降低,其中的关键诉求是昂贵/高价金属的深度提取以实现最大的经济效益和剧毒/高毒金属的深度脱除以实现残渣的危险属性降级。但无论昂贵/高价金属的提取回收还是剧毒/高毒金属的脱除分离,都需要适宜的技术工艺以及相应的处置成本,工艺选择和费用投入与涉重危废的三维属性存在紧密关系^[16]。基于不同类型涉重危废无害化处置和资源化利用的边际识别,对于资源化利用潜力较高的涉重危废则实现资源化利用,对于资源化利用价值较低的涉重危废则实行无害化处置。

5.2 涉重危废中有价金属提取和危险属性降级的技术体系

火法冶金、湿法冶金和生物沥浸在涉重危废有价金属提取和危险属性降级中各具优劣。总体来讲,火法冶金适宜高浓度、大批量、单一金属的分离提取和危险属性降维,尤其是低沸点、易挥发金属的烟化或挥发提取;湿法工艺适宜中高浓度、中小批量、多金属的同步提取回收;生物沥浸-循环富集适宜低浓度、小批量、多金属深度浸提和危险属性降级^[17-18]。3种金属提取工艺存在较高的互补性和协同性,因此,只有科学合理的工艺组合才能保证有价金属提取和危险属性降级两大诉求的有效达成。例如:火法工艺还原熔融所产的合金或富氧侧吹所产的冰铜、冰镍等富集物料必须借助湿法工艺才能进一步获得高纯度单质态金属或金属盐;湿法工艺所产浸出渣需要借助生物沥浸-循环富集工艺以实现金属的深度提取、液相富集和危险属性降级;生物沥浸工艺有时需要火法或湿法工艺作为前(预)处理,如石化废催化剂需要低温煅烧去除包覆的油类物质后,才能确保生物沥浸高效进行,高浓度电镀污泥则需要前置硫酸浸提再串以生物沥浸才能使其处理规模提高、浸提富集成本减低。

目前,涉重危废中昂贵/高价等目标金属的提取回收技术工艺选择大多依靠孤立的离散实验和

研究者的感性经验。由于缺乏系统完整的科学原理指导以及基于定量分析的优选理论支持,现有的涉重危废金属提取工艺普遍存在设计不合理、标准不统一、技术不规范、路径选择随意性大的问题,加之涉重危废结构复杂多变的特性有时甚至出现技术工艺难以运行的严重状况。这是因为,金属提取工艺选择不但与金属类型性质有关,而且与其含量及赋存形态也存在很大关系,甚至与共存的其他低价、高毒和无毒金属以及处理规模、电价水价、物料配伍等都存在密切关系。所以,需要在三维属性精细化分级分类基础上,深入探究涉重危废三维属性及其分级分类与金属提取优化工艺及其组合之间的内在关联和响应关系,阐明不同分级分类物料提取工艺优选的一般规律和总体原则,构建涉重危废金属提取回收技术优选的多目标多参数定量精准决策体系。

6 涉重危废脱毒残渣的建材化利用标准体系

涉重危废金属提取过程需要在特定反应介质中进行,反应介质中的外加物料会以各种方式进入残渣之中,并改变残渣的元素组成、物相结构、金属含量及其赋存形态。不同的金属提取工艺或工艺组合可实现涉重危废的危险属性降级,但脱毒残渣中各类金属和其他有害组分、含量、赋存形态及环境风险差异较大,其建材化利用方式、途径和使用方向也各不相同^[19]。因此,需要系统分析不同三维属性涉重危废脱毒残渣的物相、结构和组成,识别关联产品安全和环境安全的有害元素和离子,评估脱毒残渣建材化利用的产品安全和环境风险并进行分级分类,建立建材化利用的黑/白名单,进而提出涉重危废脱毒残渣建材化利用的技术规范和标准体系。

基于产品安全的离子/元素限值按式(5)计算;基于环境安全的离子/元素限值按式(6)计算。

$$M \times S_1 \leq L \quad (5)$$

式中: M 指脱毒残渣中关联产品安全的离子/元素含量; L 指建材产品安全要求限值; S_1 指脱毒残渣在建材产品中的掺和比。

$$N \times S_2 \leq K \quad (6)$$

式中: N 指脱毒残渣中关联环境安全的离子/元素含量; K 指建材环境安全要求限值; S_2 指脱毒残渣在建材产品中的掺和比。

脱毒残渣在建材产品中的掺和比 S 取 S_1 和 S_2 二者中的最小值。当 $S \leq 10\%$, 则说明该消纳途径风险大,可列入黑名单;当 $S \geq 30\%$, 则说明该消纳途径风险小,可列入白名单。通过黑/白名单的管理,使脱毒残渣是否采用或采用何种建材化利用的路径判别更加便利。

7 涉重危废资源化利用理论体系构建及意义

涉重危废产排贯穿金属冶炼生产、金属加工处理、金属基材料制备、废弃和再利用等全产业链。金属作为现代生活和工业生产的基础性原材料,其生产、消耗和废弃正以前所未有的规模在全球进行,因此,涉重危废的产生也以前所未有的速度在全球发生。据估算,世界上涉重危废的年产量在 1×10^8 t 左右,我国涉重危废年产量在 $3\,000 \times 10^4 \sim 3\,500 \times 10^4$ t^[1]。涉重危废的长期任意排放是全球环境重金属污染的主因之一,而重金属不能降解的特性又使得重金属污染显示出累积性、持久性和高危害性。但另一方面,涉重危废含有以各种形式存在的多种金属元素,而金属不可再生的特性又赋予了涉重危废独有的二次资源价值。有毒/高毒/剧毒金属赋予涉重危废污染属性,昂贵/高价/有价金属赋予涉重危废资源属性,金属激发的污染属性和资源属性并存是涉重危废最显著的特点。从涉重危废中提取回收有价金属不但能够从源头消除涉重危废的环境危害,而且还可实现稀缺金属资源的循环永续利用,是固体废物处理处置学科及资源再生学科领域的热点课题。

作为危险废物的重要细分领域,涉重危废资源化利用已是国内外经济社会发展的必然趋势,而我国作为世界制造大国,更是面临涉重危废产排量不断增长和金属资源愈加短缺的双重困境,

涉重危废的资源化利用更加紧迫。然而，涉重危废固有的高污染属性给其资源化利用带来很大困扰，在分级分类、提取工艺、风险管控、政策法律等许多方面都面临巨大挑战^[20-21]。目前，针对不同类型涉重危废，世界各国学者在技术层面广泛研究了有价金属高效提取的火法冶炼、湿法冶炼和生物沥浸的工艺优化、过程控制和溶释机理，但基本都是基于特定单一危废物料的孤立个案研究，未见针对涉重危废三维属性的量化分析及精细化分级分类，亦未见无害化处置和资源化利用的边界识别研究，更未见有价金属深度提取和危险属性降级的技术原理探究和技术工艺优选，以及脱毒残渣建材化利用的方式、工艺和标准研究。涉重危废量大、面广、源多、物杂的产排特性，给其高效、高质、高值的资源化利用带来很大挑战。构建基于精细化分级分类的涉重危废资源化利用理论体系是实现这一目标的根本保证，是指导涉重危废资源化利用健康、科学、可持续发展的必然要求，是涉重危废资源化利用从经验数据积累到完整学科形成的必然要求。

涉重危废资源化利用的理论框架以涉重危废、金属五分法、涉重危废三维属性及精细化分级分类4组概念为基础，以涉重危废精细化分级分类体系、涉重危废无害化处置和资源化利用边际识别指标体系、涉重危废有价金属提取和危险属性降级技术体系、涉重危废脱毒残渣建材化利用标准体系4大体系建设为核心，以涉重危废产排系数计算、涉重危废三维属性定量描述、涉重危废资源化利用和无害化处置潜力归一化指数计算、涉重危废脱毒残渣建材化利用风险控制和黑白名单管理4个重要问题为抓手和工具(总体框架见图2)。该理论体系全面系统地回答了涉重危废全量高值化资源利用所涉及的关键问题和重大困扰，有力保障了其资源化利用的过程安全、产品安全和环境安全。该理论体系的构建、发展和成熟将使得涉重危废这一重要细分领域由孤立的个体研究上升到系统的科学理论，并为涉重危废的精细化监管、精准化风险管控和高质化资源利用提供全周期全方位全流程的理论指导。

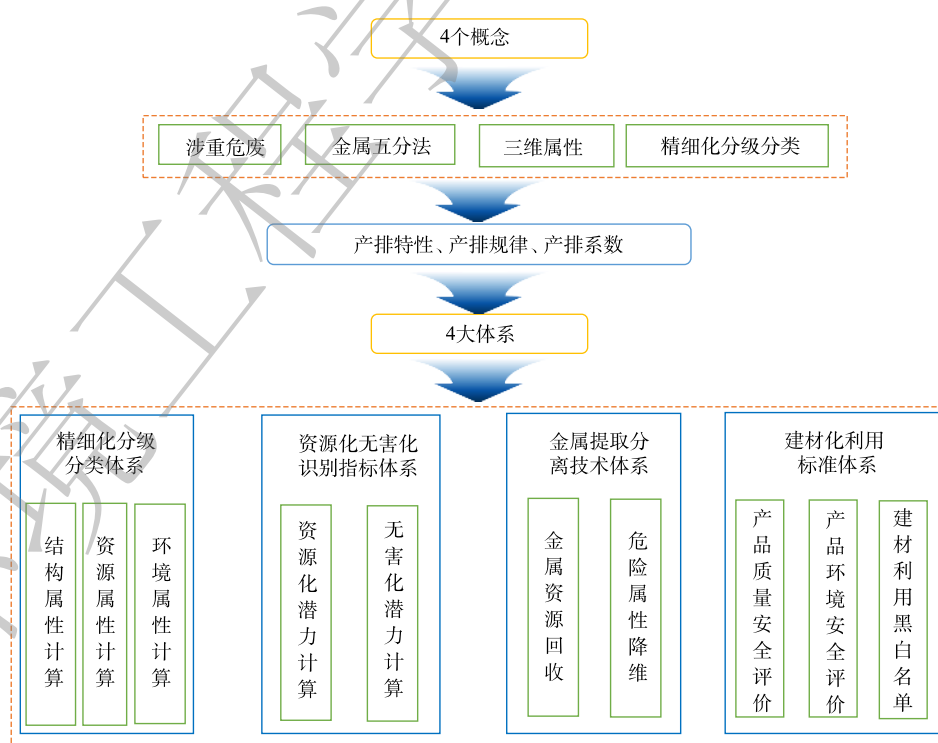


图2 涉重危废资源化利用理论体系的总体框架

Fig. 2 General framework of theoretical system of resource utilization of hazardous wastes containing heavy metals

8 结语

1) 从涉重危废中提取有价回收金属促进其污染属性向资源属性的定向转化, 虽然可从源头消除涉重危废的环境污染而且实现金属资源的循环利用, 但其危险属性对资源化利用构成了极大困扰。为了确保涉重危废的科学、合理、健康、可持续、高值化利用, 构建了涉重危废资源化利用的理论体系。

2) 涉重危废资源化利用的理论体系框架由4组概念和4大体系组成。4组概念包括涉重危废、金属五分法、涉重危废三维属性及精细化分级分类; 4大体系包括涉重危废精细化分级分类体系、涉重危废无害化处置和资源化利用边际识别指标体系、涉重危废有价金属提取和危险属性降级技术体系、涉重危废脱毒残渣建材化利用标准体系。

3) 该理论体系以4组概念为基础、以4大体系建设为核心, 以系统化数学公式和定量计算为工具。该理论体系的提出、发展和成熟将使得涉重危废这一重要细分领域由孤立的个体研究和感性经验上升到系统的科学理论, 为涉重危废的精细化监管、精准化风险管控和高质化资源利用提供全周期全方位的理论指导。



辛宝平(1969—), 男, 理学博士, 教授。从事固体废物/涉重危废资源化利用理论体系和技术原理研究。中国环境科学学会理事、中国物资再生协会湿法冶金分会首席科学家、中国环境科学学会固体废物专业委员会副主任委员、中国环境科学学会重金属污染防治专业委员会副主任委员、中国有色冶金学会环境污染防治专业委员会副主任委员、全国危废处理处置技术联盟学术委员会副主任委员、中华环保联合会固危废及污染土壤专委会副主任委员、中国再生资源回收利用协会危险废物专业委员会副主任委员。在《Chemical Engineering Journal》

《Bioresource Technology》《Journal of Hazardous Materials》《Waste Management》《ACS Applied Materials and Interfaces》等期刊发表SCI和EI论文100余篇, 高水平SCI论文(1区)30篇, 发明专利20余项。在国际上首次创制了涉重危废、金属5分法、三维属性及精细化分级分类等系列概念并构建涉重危废资源化利用的理论体系; 率先将膜生物反应器(MBR)引入生物沥浸领域, 解决了生物沥浸技术周期长、处理量小的行业难题; 撰写了涉重危废资源化利用方面的首部专著; 主持了全国涉重危废产废和处置行业发展现状及技术需求的首次调研; 主持研发涉重危废行业首套100 m³级电镀污泥有价金属生物沥浸-循环富集成套设备和工艺。

参考文献

- [1] 辛宝平, 王佳. 涉重危废概念的提出及其资源化利用[J]. 环境工程学报, 2022, 16(1): 1-9.
- [2] 辛宝平, 王佳. 涉重危废三维属性及其精细化分级分类体系[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 355-362.
- [3] 联合国环境署. 巴塞尔公约(中文)[EB/OL]. 0-08-17]. <http://becr.tsinghua.edu.cn/atm/7/20200817215215207.pdf>.
- [4] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 公安部, 等. 国家危险废物名录(2021年版)[EB/OL]. [2020-11-25]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202011/t20201127_810202.html.
- [5] GAUSTAD G, WILLIAMS E, LEADER A. Rare earth metals from secondary sources: Review of potential supply from waste and byproducts[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 167: 105213.
- [6] KRISHNAN S, ZULKAPLI N S, KAMYAB H, et al. Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview[J]. Environmental Technology and Innovation, 2021, 22: 105525.
- [7] GU T Y, RASTEGAR S O, MOUSAVI S M, et al. Advances in bioleaching for recovery of metals and bioremediation of fuel ash and sewage sludge (review)[J]. Bioresource Technology, 2018, 261: 428-440.
- [8] FUNARI V, BRAGA R, BOKHARI S, et al. Solid residues from Italian municipal solid waste incinerators: a source for "critical" raw materials[J]. Waste Management, 2015, 45: 206-216.
- [9] DING Y J, ZHANG S G, LIU B, et al. Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review[J]. Resources,

- Conservation and Recycling*, 2019, 141: 284-298.
- [10] HAO J J, WANG Y S, WU Y F, et al. Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 157: 104787.
- [11] LI H, EKSTEEN J, ORABY E. Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives: A review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 139: 122-139.
- [12] ZENG X L, GONG R Y, CHEN W Q, et al. Uncovering the recycling potential of "new" WEEE in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50: 1347-1358.
- [13] PATHAK A, KOTHARI R, VINOBA M, et al. Fungal bioleaching of metals from refinery spent catalysts: A critical review of current research, challenges, and future directions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111789.
- [14] 中华人民共和国全国人大常委会. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法(2020年修订)[EB/OL]. [2020-04-29]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/30/content_5507561.htm.
- [15] 胡华龙, 郑洋, 郭瑞. 发达国家和地区危险废物名录管理实践[J]. *中国环境管理*, 2016, 8(4): 76-81.
- [16] NIU T Q, WANG J, CHU H C, et al. Deep removal of arsenic from regenerated products of spent V_2O_5 - WO_3 /TiO₂ SCR catalysts and its concurrent activation by bioleaching through a novel mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 65: 1103-1110.
- [17] 王海北. 我国二次资源循环利用技术现状与发展趋势[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2019, 9: 1-11.
- [18] DAHMUS J B, GUTOWSKI T G. What gets recycled: An information theory based model for product recycling[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41: 7543-7550.
- [19] ANCTIL A, FTHENAKIS V. Critical metals in strategic photovoltaic technologies: abundance versus recyclability[J]. *Progress in Photovoltaics*, 2013, 21: 1253-1259.
- [20] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 危险废物鉴别标准通则(GB 5085.7-2019)[EB/OL]. [2019-11-07]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/201911/t20191114_742433.html.
- [21] MARTINEZ O V, BOOGAAR K G, LUNDSTROM M, et al. Statistical entropy analysis as tool for circular economy: Proof of concept by optimizing a lithium-ion battery waste sieving system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 1568-1579.

(责任编辑: 金曙光)

Theoretical system of resource utilization of hazardous wastes containing heavy metals

XIN Baoping^{1,*}, WANG Jia²

1. School of Material Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China

*Corresponding author, E-mail: xinbaoping@bit.edu.cn

Abstract Hazardous wastes containing heavy metals have both serious environmental threats and high recycling value, which result in global contamination of heavy metals and fierce metals resource loss if discarded without proper treatment. The recovery of valuable metals from hazardous wastes containing heavy metals not only eliminates the pollution of heavy metals at the sources but also recycles the non-renewable metals resources, representing a hot issue in both environmental sciences and metals smelting. However, the works concerning hazardous wastes containing heavy metals are discrete, scattered, individual studies and do not form complete and systematic theory to guide the scientific, efficient and sustainable resource utilization of heavy metals-containing hazardous wastes. In the current work, four important fundamental concepts covering hazardous wastes containing heavy metals, five classification methods of metals, three-dimension properties and precise grading and classification were established, and four important branch systems including precise grading and classification system, harmless disposal and resource utilization boundary identification system, metals extraction/separation technology system and detoxification residue-used building materials quality control standard system were reviewed. Based on the four important fundamental concepts and the four important branch systems, the theoretical system of resource utilization of hazardous wastes containing heavy metals was put forward for the first time.

Keywords hazardous wastes; hazardous wastes containing heavy metals; valuable metals extraction; five classification methods of metals; three-dimension properties; resource utilization; theoretical system