



文章栏目：专论

DOI 10.12030/j.cjee.202112159 中图分类号 X705 文献标识码 A

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. [XIN Baoping, WANG Jia. Three-dimensional properties of hazardous wastes containing heavy metals and their refined classification and grading system[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 355-362.]

涉重危废三维属性及其精细化分级分类体系

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非常独特的大类类别。重金属的不可降解性决定了其环境危害具有持久性, 重金属的不可再生性决定了其资源属性具有稀缺性, 因此, 涉重危废的资源-环境交互属性受到国际社会越来越大的关注。但涉重危废的资源属性和污染属性与物料本身的结构复杂性存在密切关联。一方面, 昂贵/高价金属的提取回收受到其复杂结构的干扰; 另一方面, 高毒/有毒金属的环境行为也受到其复杂结构的影响。为此, 首次提出了涉重危废三维(资源、污染和结构)属性的概念, 给出了三维属性的表征方法和计算公式, 构建了基于三维属性的涉重危废精细化分级分类体系, 建立了有助于无害化处置和资源化利用边界识别的三维属性指标体系, 以期为涉重危废的精准高效监管及切实可靠的无害化处置和科学合理的资源化利用提供理论指导。

关键词 涉重危废; 三维属性; 无害化处置; 资源化利用; 精细化分级分类体系; 边际识别三维属性指标体系

涉重危废指含重金属的危险废物, 其危险特性源于重金属毒性。涉重危废按产生来源可简单地分为材料源危废和工业源危废 2 大类^[1]。材料源危废指重金属基功能材料或产品失效或废弃后演变而成的危险废物; 工业源危废指重金属生产、加工、处理、利用或环境治理过程产生的危险废物。涉重危废是危险废物中资源属性和污染属性都极为突出的大类危废类别, 属于危险废物这一新兴学科的重要细分领域^[1]。

当前, 金属基功能材料和产品正以惊人的速度介入人类生活的各个方面, 如动力锂电池、铅酸电池、镍镉电池等储能器件广泛用于电动汽车、电动自行车、高铁、船舶等电力供给; 贵金属催化剂、有色金属催化剂、FCC 催化剂、钒钛系催化剂广泛用于石油化工、煤化工、制药和烟气脱硝等诸多领域; 电子线路板是家用电器、手机、电脑等电子电器的核心部件; 荧光灯管则广泛用于家庭、城市、舞台等照明亮化和灯光装饰^[2-4]。这些金属基功能材料失效废弃演变而来的各种材料源危废如废旧电池、废催化剂、废电子线路板、废荧光灯管等, 同样以惊人的速度进入环境、危及生态安全、威胁人群健康。

金属是现代产品生产和工业制造的基础性支撑材料, 但在金属冶炼生产过程中会产生烟灰、浮渣、底渣、浸出渣、中和渣、净化渣等多种冶金工业源危废。目前, 全球钢铁年产量接近 19×10^8 t、铝产量近 $7\,000 \times 10^4$ t、铜产量超 $2\,000 \times 10^4$ t、铅锌产量各 $1\,300 \times 10^4$ t、镍产量 250×10^4 t、钴钨钼钒等在 10×10^4 t, 其他稀有、稀散、稀有金属则在百吨至万吨不等。仅我国铜锌铅镍等重有

收稿日期: 2021-12-23; 录用日期: 2021-01-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1900301, 2018YFC190061, 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

色金属冶炼就产排超过 $1\ 000\times 10^4$ t 的冶金工业源危废。酸洗是所有不锈钢产品制作加工之前必不可少的前处理工序, 而电镀则是几乎所有铁质产品制作加工必须的后处理工序。酸洗污泥和电镀污泥是 2 类主要的金属产品加工及表面处理产排工业源危废, 仅我国这 2 类危废的年排放量就超过 500×10^4 t^[5-7]。

2021 年版《国家危险废物名录》^[8] 有 46 大类, 467 小类; 涉重危废占了 18 大类, 148 小类, 涉重危废无论大小类别都占危废总类别的 1/3 左右。当前, 全球危险废物年产量大约 3.3×10^8 t, 我国危险废物年产量 $(0.8\sim 1.0)\times 10^8$ t; 全球和我国的涉重危废年产排总量约分别为 1.0×10^8 t 和 $3\ 000\times 10^4$ t。涉重危废产量巨大、种类繁多、结构复杂、组分多变。无论材料源危废还是工业源危废, 不同产品类型、不同金属冶炼、不同产地来源、不同工序工艺、不同原辅料甚至不同工况条件所产排危废的有毒金属组成、含量和赋存形态都存在很大差异, 危废类别、环境行为、毒性大小、损害方式和危害程度也千差万别^[9-10]。

按产生来源、行业领域、工艺过程的直接分类有助于对涉重危废这一危废细分领域的整体理解, 还会加深对其结构组分复杂性的深刻认识。这种基于产生来源和行业领域分类的主要优点是简单明了且便于溯源识别, 但只能定性描述和依项分类, 不能量化计算和按等分级。显然, 这种表观的分类体系对于无需精确定量描述污染特性的一般固体废物的环境管理是适用的; 但该分类体系对于以高污染、高危害、高风险为主要特征的危险废物的监管则难以应对, 尤其对于污染属性和资源属性都极为突出的涉重危废的精细化管理则愈加困难。为了精确定量地描述涉重危废的污染-资源双重属性, 满足涉重危废精细化管理和科学合理处置利用的迫切要求, 需要构建能够反映涉重危废更本质特性并可量化描述的分级分类辅助体系。

作为危险废物的重要细分领域, 涉重危废具有共同的类别属性, 即其危害特性源于所含剧毒/高毒/有毒金属的毒性, 而其二次资源属性源于所含昂贵/高价/有价金属的回收价值。但由于不同类型、不同来源、不同过程所产涉重危废中昂贵金属、高价金属、低价金属、高毒金属和安全金属的种类、浓度、价态、状态和形态的显著差异, 其污染属性和资源属性也呈现出显著差异^[11-12]。涉重危废之污染属性和资源属性复杂多变的特点给其日常监管、风险控制、无害化处置和资源化利用带来了很大挑战。因此, 精准解析并定量描述各类涉重危废的污染属性和资源属性, 构建涉重危废精细化分级分类体系是破解这一细分领域诸多难题的基础和关键。

实际上, 危险废物的分级分类正逐渐成为危险废物精细化管理的工作重点和核心要务, 已受到国内外学者越来越多的关注并已成为固废/危废学科的研究热点。俄罗斯对危险废物按危害强度实行了 5 级分类, 并按类别实行不同的监管策略; 我国在 2020 年修订的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》^[13](后简称为《固废法》) 中也明确要求, 危险废物要进行分级分类管理。近期, 我国固体废物专家李金惠教授提出了危险废物资源-环境交互属性的概念^[9, 14]。这一概念用于危险废物有用组分之回收价值和有害组分之环境危害的量化描述, 其目的是为危险废物的分级分类管理、无害化处置和资源化利用提供理论依据。但由于危险废物各大类别如有机液态危废、有机固态危废、废酸、废碱、废盐和涉重危废等结构、组成、形态、危害性、资源性等都相差巨大, 用统一的计算公式对所有危废类别的资源属性和污染属性进行定量表征极为困难。

作为危险废物中资源属性和污染属性都极为突出的大类类别, 涉重危废具有与其他大类危废类别完全不同的结构、组成和形态, 其资源属性和污染属性都源于重金属。金属五分法为涉重危废资源属性和污染属性的定量描述和量化计算奠定了分类基础, 高毒/有毒金属赋予涉重危废的污染属性, 昂贵/高价金属赋予涉重危废的资源属性, 污染属性和资源属性之间又存在复杂的交互作用; 而无论资源属性还是污染属性甚至二者之间的交互作用都受到所含低价和无毒安全金属的显著影响, 即涉重危废的资源属性和污染属性与危废物料本身组分的结构复杂性(结构属性)存在密

切关联^[1]。

本文在危险废物资源-环境二元交互属性基础上，首次提出涉重危废之资源属性、污染属性和结构属性的三维属性概念，给出了三维属性的定量表征方法和数学计算公式，构建基于三维属性的涉重危废精细化分级分类体系，进而建立涉重危废无害化处置和资源化利用的边界识别三维属性指标体系，以期为涉重危废的精准高效监管、切实无害化处置和合理资源化利用提供科学的理论支撑。

1 涉重危废三维(资源、污染和结构)属性

涉重危废是危险废物中非常独特的大类类别。重金属的不可降解性决定了涉重危废的环境危害具有持久性和高危性，重金属的不可再生性决定了涉重危废的资源属性具有稀缺性和不可替代性，其无害化处置和资源化利用一直是资源和环境领域的关注热点。涉重危废产排覆盖重金属生产冶炼、重金属制品制造、重金属加工处理、重金属基产品使用、失效及废弃等全产业链，涉及行业众多、金属类型多样、形成过程机制各不相同，以致此类危废组分多变、结构复杂、种类繁多。不同产业链位阶、不同来源、不同行业涉重危废中昂贵金属、高价金属、低价金属、高毒金属和安全金属等5大类别金属之组成、结构、含量均呈现巨大差异。

涉重危废结构复杂多变的特性给其资源-环境交互属性的分析和研究带来很大困扰。一方面，昂贵和高价金属的提取回收受到低价、高毒和安全金属等杂质金属的干扰；另一方面，高毒和有毒金属的环境释放行为和生态安全风险也受到昂贵、高价、低价和安全金属的影响。因此，只有三维属性的概念才能更加精准地量化描述涉重危废的资源、污染、结构特性及其交互作用。资源属性指涉重危废中昂贵/高价/有价金属的潜在回收价值；污染属性指涉重危废中剧毒/高毒/有毒金属释放引发的环境危害和潜在风险；结构属性通常指组成整体各要素的排列、关联及其相互作用，涉重危废结构属性特指其所含组成组分的复杂性及其关联关系。

2 涉重危废三维属性表征及其分级分类

2.1 涉重危废三维属性计算公式

1) 结构属性表征及其计算。熵(entropy)指体系的混乱程度，是热力学第二定律奠基人CLAUSIUS利用统计数学提出的一个用于表征系统状态的物理量。20世纪20年代，BOLTZMANN和PLANCK给出了熵的微观统计公式；1948年，SHANNON将统计熵成功用于信息论，借以说明系统和信息的不确定性^[15]。信息论中，统计熵函数可被用于评价电子废物所有组分的浓度，其概率密度的差别越大，信息量则越小。但迄今为止，该理论只是对废旧电子产品进行了回收潜力的分析，DAHMS等^[15]将统计熵用于产品回收体系的成本估计模型，揭示了复杂固体废物的回收潜力，并发现对于统计熵高于0.5 bit的产品存在明显的回收界限；而对于低浓度的贵重材料回收，ANCTIL等^[16]发现Renyi熵优于Shannon熵。将统计熵分析用于涉重危废的结构复杂性表征(结构属性)；按式(1)和式(2)计算并比较不同约束条件下各类涉重危废的统计熵 H 和 R ^[14-16]。

$$H = -\sum_{i=1}^s p_i \log p_i \quad (1)$$

$$R = \frac{(-\ln \sum_{i=1}^s p_i^q)}{q-1} \quad (2)$$

式中： H 指Shannon熵； R 指Renyi熵； P_i 指样品中某一类或某一种金属的质量分数； q 取值0~1，指反映实际回收率的函数阶次； S 取值5(5大金属的分散度)或覆盖全部金属种类(所有金属的分散度)。

2) 资源属性表征及其计算。涉重危废来源广泛、组成复杂、组分多变，不但含有回收价值大

的昂贵和高价金属,而且含有回收价值较小的低价金属甚至高毒/剧毒金属。但是,即使低价金属(如锌和锰)和剧毒金属(如汞和铬)在高浓度条件下仍然具有较高的资源利用潜力和回收再生价值。此外,金属的提取回收价值不但和其种类、价格和质量浓度有关,而且和其价态、赋存形态及提取分离的易难性有关。为了全面定量地描述涉重危废的资源属性,按式(3)和式(4)进行资源属性的量化计算和精确评价,涉重危废资源属性分析表征涉及昂贵、高价、低价和剧毒4大类金属。

$$\text{资源属性} = \sum_{i=1}^M m_i k_i w_i \quad (3)$$

$$\text{各类金属资源贡献率} = \frac{\sum_{j=1}^N m_j k_j w_j}{\sum_{i=1}^M m_i k_i w_i} \quad (4)$$

式中: m_i 指样品单位质量中某种金属的质量, $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$; k_i 指该金属的市场价格; w_i 指该金属的资源潜力系数,当金属的含量低于最低工业品位时 w_i 取 0,当金属质量浓度高于(含)富矿标准时取 1,当金属质量浓度在富矿标准和最低工业品位之间时取 0.5; M 取值覆盖昂贵、高价、低价和剧毒 4 大类金属的所有金属种类; N 取值覆盖 4 大类中某类金属的所有金属种类。

3) 污染属性表征及其计算。 污染属性是涉重危废三维属性中最本质的属性。涉重危废中不但高毒/剧毒金属赋予其危害特性和污染属性,而且低价金属(如锌和锰)和高价金属(如镍和铜)甚至昂贵金属(如银和铍)也会引发严重的环境污染和健康损害,同样赋予其危害特性和污染属性。当前,我国重金属污染管理实践中按毒性大小把有毒金属分为一类金属和二类金属。一类金属即是金属五分法中的高毒/剧毒金属,二类金属则分散于高价、低价和昂贵金属之中。金属的存在方式又分为水溶态、酸溶态、氧化态、硫化态、残渣态等多种赋存形态,不同赋存形态的金属又表现出不同的释放行为和环境风险。除了金属的类别、性质和赋存形态外,金属的价态、质量浓度及相互作用也影响甚至决定了其危害程度和环境风险。涉重危废的污染属性表征基于特定介质或场景中有毒金属的浸出质量浓度和其环境污染控制标准数值之比(即超标倍数),属无量纲。一类有毒金属包括铅、汞、镉、铬、砷、铊、锑;二类金属包括镍、铜、锌、银、钒、锰、钴。因此,涉重危废的污染属性表征也涉及昂贵、高价、低价和剧毒 4 大类金属,并按式(5)和式(6)进行定量计算。

$$\text{污染属性} = \sum_{i=1}^M \frac{c_i d_i}{s_i} \quad (5)$$

$$\text{各类金属污染属性贡献率} = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{c_j d_j}{s_j}}{\sum_{i=1}^M \frac{c_i d_i}{s_i}} \quad (6)$$

式中: c_i 指某有毒金属在特定介质或场景测定的浸出质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; s_i 指该金属的环境污染控制标准数值; d_i 指金属的毒性强度系数,一类金属取 2,二类金属取 1,其他金属取 0; M 取值覆盖昂贵、高价、低价和剧毒 4 大类金属的所有金属种类; N 取值覆盖 4 大类中某类金属的所有金属种类。

2.2 涉重危废精细化分级分类体系

基于 FP-growth 算法,应用 SPSS 等统计软件分析涉重危废之资源属性、污染属性、各类金属资源贡献率和污染贡献率之间的关联性;基于方差分析表征高毒/剧毒金属的资源贡献率与资源属性的相关性,以及昂贵、高价和低价金属的污染属性贡献率与污染属性之间的相关性,阐明不同来源、不同类型、不同行业涉重危废资源属性与污染属性的交互性差异并确立主导因素。应用划分方法和密度方法等聚类算法如 k-均值、k-中心点和 DBSCAN 对涉重危废进行系统分类,提出结构、资源和污染属性各维度的五级分级标准(极高、高、中、低、极低),构建基于三维属性的涉重危废精细化分级分类体系。

面对危险废物的巨大产排量以及监管压力的不断增加,我国 2020 年修订的《固废法》^[13] 明确

规定，危险废物实施分级分类管理，但目前世界各国对于包括涉重危废在内的危险废物的精细化分级分类体系并未建立。美国提出了对于低风险危险废物豁免的危险废物管理制度，俄罗斯提出了基于环境风险的危险废物 5 级判定标准(极高、较高、一般、较低、极低)^[17]。我国的《国家危险废物名录》^[8]管理制度已由长周期的定时修订发展到及时动态修订，而且增加了豁免管理清单和排除管理清单等危险废物辅助管理和并行管理措施，使得危险废物名录管理的科学性、时效性和合理性显著增强；但该名录仍属基于行业领域的定性分类管理体系，难以反映危险废物之污染属性和资源属性的精确量化分级，不能适应危险废物精细管理和合理资源利用的现实需求。涉重危废精细化分级分类体系的构建将促使涉重危废环境管理实现由“定性”向“定量”的转变、由“合法”向“合理”的转变、由“一刀切”粗放管理向“差别化”精准管理的转变。基于三维(资源、环境、结构)属性的建设策略、实现路径和计算公式均属首次提出，其全面建成对于我国和世界各国的涉重危废监管、处理、处置和利用具有重要指导意义，对于其他类别危险废物的科学管理和合理处置利用也具有重要参考价值。

3 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

一方面，涉重危废的污染属性源于重金属毒性，无害化处置是消除环境危害、阻断环境污染、维护环境安全的必然要求；另一方面，涉重危废往往又具有较高甚至极高的资源属性，安全填埋和水泥窑协同处置等无害化工艺会造成其资源属性的彻底丧失和金属资源的严重流失。因此，从涉重危废中分离提取昂贵、高价和有价金属既可以实现金属资源的循环利用又能够有效减低其环境危害，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。新修订的《固废法》^[13]和相关法律法规对于包括涉重危废在内的危险废物资源化利用提出了要求、加强了引导、扫清了障碍。2020 年起执行的《危险废物鉴别标准通则》^[18]修改并提出危险废物利用处置后判定新规则：具有毒性危险特性的危险废物在其利用过程产生的固体废物，经鉴别不再具有危险特性的，不属于危险废物。2021 年国务院办公厅发布《强化危险废物监管和利用处置能力改革实施方案》^[19]，提出鼓励危险废物利用处置企业规模化发展，并在环境风险可控的前提下探索危险废物“点对点”定向利用许可证豁免管理。

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。无害化是底线，资源化是方向；但涉重危废的资源化利用潜力不但取决于其所含昂贵/高价金属的质量浓度、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/剧毒金属的质量浓度、种类、赋存形态以及低价/安全金属等干扰离子的种类及质量浓度都有密切关系。具有高资源属性、低污染属性、低结构属性的涉重危废因其回收价值高、环境危害小且杂质金属少，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因其回收价值低、环境危害大且杂质金属多，必须无害化处置。因此，需要在全面分析涉重危废三维属性基础上识别确立不同类型涉重危废无害化处置和资源化利用的边际三维属性指标体系，才能确保涉重危废科学、合理、可持续的资源化利用。涉重危废资源化利用潜力和无害化处置潜力归一化指标根据式(7)和式(8)进行计算。

$$RUP = R_1 \times \text{资源指数} - R_2 \times \text{污染指数} - R_3 \times \text{结构指数} \quad (7)$$

$$HTP = R_2 \times \text{污染指数} + R_3 \times \text{结构指数} - R_1 \times \text{资源指数} \quad (8)$$

式中：RUP 为资源化利用潜力；HTP 为无害化处置潜力； R_1 、 R_2 、 R_3 分别是资源属性、污染属性和结构属性的修正系数，取值均在 0~1； R_1 取决于昂贵/高价金属的提取分离易难性(越易取值越大)， R_2 取决于剧毒/高毒金属的脱除分离易难性(越易取值越小)， R_3 取决于杂质金属的干扰效应强弱(越强取值越大)；资源指数、污染指数和结构指数取值均为极高、高、中、低、极低 5 档分别对

应5、4、3、2、1或根据实际情况再行调整间距(或扩大或缩小)^[20]; RUP超过特定值则建议资源化利用,特定值以上按分值进行分级,分为优先级、次优先级和普通级; HTP超过特定值则建议无害化处置,特定值以上也按分值进行分级,同样分为优先级、次优先级和普通级。

基于行业领域和危害特性定性分类的《国家危险废物名录》^[8]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,从环境危害程度,资源利用潜力和物料结构特性3个维度进行定量描述,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。三维属性不同的涉重危废将采取不同的监管措施。对于高污染属性、低资源属性、高结构属性的涉重危废需重点监管其无害化安全处置全过程,防止非法倾倒和不规范填埋。对于高污染属性、高资源属性、高结构属性的涉重危废需着重监管其资源化利用过程产排的二次残渣包括飞灰、底渣、浸出渣和污泥,监测有毒金属的流向、迁移、转化和相间分配行为,有效防范二次残渣的环境风险。对于高资源属性、低污染属性、低结构属性的涉重危废积极引导以“点对点”的方式进行全量资源化利用。

针对特定涉重危废,究竟应该选择无害化处置还是资源化利用是一个非常重要的问题,选择不当将产生严重后果。如果执意将一个资源价值低、环境风险大、只宜无害化处置的涉重危废进行资源化利用,不但会导致严重的污染扩散而且最终造成巨大的投资经济损失。反之,如果执意将一个资源价值高,适宜资源化利用的涉重危废进行无害化处置,不但要支付巨大的处置费用而且还会造成金属资源的不可逆流失。但关于无害化处置还是资源化利用的路径走向往往是一个难以抉择的问题,其主要原因在于,无害化处置和资源化利用的边界条件不清晰,故导致处置利用的路径选择长期以来缺乏可靠的量化指标支持。量化计算涉重危废资源化利用潜力和无害化处置潜力的归一化指标,确立涉重危废无害化处置和资源化利用的边际识别三维属性指标体系,才能真正解决这一关键问题。

涉重危废三维属性概念的提出、计算和定量表征,基于三维属性的涉重危废精细化分级分类体系构建以及无害化处置和资源化利用边际识别三维属性指标体系建立都是为了适应并满足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所提出的原理性、系统性、整体性理论方案和制度设计。需要针对不同来源、不同行业、不同类型涉重危废进行三维属性的全面表征和深入解析,尽快建成涉重危废精细化分级分类体系及无害化处置和资源化利用边际识别性指标体系,加强这一系统性理论方案的应用和制度设计的落地,并在实践中不断修正和完善,以真正发挥理论构建和制度设计的指导作用。

4 结语

涉重危废是危险废物中资源属性和污染属性都极为突出的大类别,其资源属性和污染属性与物料本身的结构复杂性存在密切关联。昂贵/高价金属的提取回收受到复杂结构的干扰,而高毒/有毒金属的环境行为也受到复杂结构的影响,只有三维属性表征才能精准描述涉重危废资源、污染和结构的本质特性。基于给出的数学公式定量计算涉重危废的资源、污染和结构属性,提出了三维属性的五级分级标准(极高、高、中、低、极低),构建了基于三维属性的涉重危废精细化分级分类体系。具有高资源属性、低污染属性、低结构属性的涉重危废因其回收价值高、环境危害小且杂质金属少,适宜资源化利用;具有低资源属性、高污染属性、高结构属性的涉重危废因其回收价值低、环境危害大且杂质金属多,必须无害化处置。基于三维属性的精细化分级分类体系及无害化处置和资源化利用边际识别指标体系构建将为涉重危废的精准监管、合理处置和科学利用提供可靠的理论支持。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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[J]. Bioresource Technology, 2018, 261: 428-440.
- [8] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 公安部, 交通运输部, 国家卫生健康委员会. 国家危险废物名录(2021年版)[EB/OL]. [2020-11-25]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk02/202011/t20201127_810202.html.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] NIU T Q, WANG J, CHU H C, et al. Deep removal of arsenic from regenerated products of spent $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ SCR catalysts and its concurrent activation by bioleaching through a novel mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 65: 1103-1110.
- [12] 王海波. 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.
- [13] 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.
- [14] 黄文博, 李金惠, 曾现来. 固体废物无害化精准定量评估及科学启示: 以典型工业废物为例[J]. 科学通报, 2022: Accepted.
- [15] 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.
- [16] ANCTIL A, FTHENAKIS V. Critical metals in strategic photovoltaic technologies: abundance versus recyclability[J]. Progress in Photovoltaics. 2013, 21(6): 1253-1259.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 国务院办公厅. 强化危险废物监管和利用处置能力改革实施方案[EB/OL]. [2021-05-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-05/25/content_5611696.htm.
- [20] 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)

Three-dimensional properties of hazardous wastes containing heavy metals and their refined classification and grading system

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 is a unique major category in hazardous waste, which have both serious harm to the environment and huge recovery value of metals resources. The resource-environment interaction of hazardous waste containing heavy metals has been receiving great attentions around the world. However, both the resource and environment properties of hazardous wastes containing heavy metals have close relationship with their complexity in structure and components. The extraction and recovery of precious, rare and high-price metals is strongly hindered by the complicated structure and components which have a significant influence on the migration behavior and environmental pollution of toxic heavy metals. In this work, the concept of three-dimensional properties of hazardous wastes containing heavy metals (i.e. resource, environment and structure properties) was put forward for the first time, and the mathematical formula to characterize the three-dimensional properties was given. Further, the refined classification and grading system of the hazardous wastes containing heavy metals was set up based on the three-dimensional properties, and the index system of the three-dimensional properties to identify the border between the harmless disposal and resources utilization was established. This work is of importance for the precise management of the hazardous wastes containing heavy metals and their correct disposal and reasonable resource utilization.

Keywords hazardous wastes containing heavy metals; three-dimensional properties; harmless disposal; resources utilization; refined classification and grading system; border identification index system of three-dimensional properties