

· 环境综合整治 ·

## 火法铜冶炼工艺危废的资源属性评价研究

杨 天<sup>1,2</sup>, 梁 宇<sup>1</sup>, 刘长灏<sup>1</sup>, 刘伟峰<sup>3</sup>

(1. 北京理工大学化学与化工学院, 北京 100081;  
2. 清华大学化学工程系, 北京 100084;  
3. 北京理工大学生命学院, 北京 100081)

**摘要:** 文章构建了火法铜冶炼工艺危废的资源属性评价模型。该模型可以根据危废的化学组成与含量, 通过衡量铜冶炼危废中待回收元素的资源价值 (RV) 及可回收性 (RA) 分别揭示危废潜在资源价值及通过回收实现价值的可能性, 从而系统揭示危废整体的资源属性。运用该模型对某火法铜冶炼企业的 10 种危废样品的资源属性进行了评价。结果表明, 样品中砷滤饼、白烟尘的资源属性相对较高, 应被优先回收, 其次是烧结矿、环保灰和铁矾渣。该模型可以系统的揭示各类铜冶炼危废的资源属性及回收利用的优先顺序, 有助于为危废资源化利用的决策提供科学的依据。

**关键词:** 火法铜冶炼; 危废; 资源属性; 评价模型

中图分类号: X756

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022.02.016

## Study on resource properties of hazardous wastes produced from pyrometallurgical copper smelting technique

YANG Tian<sup>1,2</sup>, LIANG Yu<sup>1</sup>, LIU Changhao<sup>1</sup>, LIU Weifeng<sup>3</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Life Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In this study, a resource attribute evaluation model for hazardous wastes generated from pyrometallurgical copper smelting process was established. Based on the chemical composition and content of hazardous wastes, the potential resource value and the recycling difficulty of hazardous wastes were obtained by the model with measuring the resource value (RV) and recycle ability (RA) of the elements to be recycled from the hazardous copper smelting wastes, thus systematically uncovering the resource attributes of these hazardous wastes. The model was applied to evaluate the resource attribute of ten kinds of hazardous waste samples from a pyrometallurgical copper smelting company. The results showed that the resource attribute of arsenic filter cake and white dust was relatively high with priority to be recycled, followed by sinter, furnace ash and ammonium jarosite. The proposed model could uncover the resource attributes of hazardous wastes from copper smelting and the priority of recycling sequence of those hazardous wastes. It could provide a scientific basis for the decision-making of hazardous waste utilization.

**Keywords:** pyrometallurgical copper smelting; hazardous waste; resource attributes; evaluation model

CLC number: X756

铜是现代社会的经济发展中最重要的基础物质之一<sup>[1]</sup>, 被广泛用于许多领域。在我国, 铜已成为我国仅次于石油的第二大战略原材料<sup>[2-3]</sup>。目前, 全球大约有 80% 的铜是通过火法冶炼工艺生产的, 我国这一比例达 95%<sup>[4]</sup>。火法铜冶炼工艺会产生烟尘、滤饼、石膏、中和渣等含砷、铅和镉等重金属的

危废<sup>[5]</sup>, 对生态环境或者人体健康造成严重威胁<sup>[6]</sup>。近年来, 我国新颁布或修订了如《国家危险废物名录(2021 年版)》<sup>[7]</sup>《固体废物污染环境防治法》<sup>[8]</sup>等法律法规以加强对危废的管理。危废已成为制约我国火法铜冶炼行业实现可持续发展的关键问题。

火法铜冶炼危废中不仅包含了硒、碲、金和银

收稿日期: 2021-03-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1900301)

作者简介: 杨 天(1998-), 男, 博士研究生。研究方向: 产业生态与循环经济。E-mail: vito@francesyang.com

通信作者: 刘长灏(1976-), 男, 博士、副教授。研究方向: 产业生态与循环经济。E-mail: changhaoliu@126.com

引用格式: 杨 天, 梁 宇, 刘长灏, 等. 火法铜冶炼工艺危废的资源属性评价研究[J]. 环境保护科学, 2022, 48(2): 78-84.

等高价值的稀贵金属<sup>[5]</sup>;并且,还含有钼(Mo)、镓(Ga)、铂(Pt)和钛(Ti)等属于稀有矿产资源的金属元素,这些金属是支撑和推动战略性新兴产业发展的重要物质基础,对我国的发展具有重大的战略意义<sup>[9]</sup>。可见,火法铜冶炼危废具有显著的资源属性。近年来,对火法铜冶炼危废的处置和资源化利用,正成为研究的热点<sup>[10]</sup>。研究表明,对其进行资源化利用通常可以实现更好的经济及环境效益<sup>[11]</sup>。因此,推动火法铜冶炼危废的资源化利用,是当前我国固废管理中的一项重要任务,具有十分重要的现实意义和战略意义。然而,火法铜冶炼危废中的元素构成及含量并不稳定,通常会随冶炼原料的组成<sup>[12-13]</sup>、工艺条件的变动<sup>[14-15]</sup>而呈现出差异性,从而导致危废的资源属性的强弱有所不同,给危废的回收和资源化带来不确定性,从而制约危废的资源化利用。因此,当前迫切需要基于火法铜冶炼危废的理化组成,研究构建能够系统揭示危废资源属性的评价模型,为制定危废资源化利用的决策提供科学的依据。

目前,在固废研究领域,学术界主要从原材料关键性(criticality)和可回收性(recyclability)2个方面对与固废资源属性相关的内容进行了评价。原材料关键性是指在一定的时间范围内,评估某一特定群体对某一材料的经济和技术依赖性以及供应中断的可能性的研究<sup>[16]</sup>。SUN et al<sup>[17]</sup>认为,需要对影响城市矿产在市场中发挥作用的因素进行识别。这些因素一般包括其金属组成、资源价值和该资源对社会的重要性以及资源供应的可持续性。他们通过引入原材料关键性的概念,构建了由市场价值、经济重要性和供应风险3个指标组成的资源指数模型,用来揭示城市矿产中金属元素循环利用的潜力。ZUO et al<sup>[18]</sup>基于原材料关键性的概念对我国城市矿产中包含的战略新兴产业发展所必须的高技术金属元素的资源循环潜力进行了研究。可回收性是一种材料重新获得其原始状态下的性能的能力,原始状态指材料在经过加工或为特定用途成型之前的最纯形式<sup>[19]</sup>。可回收性被引入固废资源属性的相关研究中,并被认为是从技术的角度直接反映了电子废弃物中的有价材料经物理、化学或生物处理后回到原材料的可能性或难易程度<sup>[20-21]</sup>。ZENG et al<sup>[22]</sup>引入统计熵理论和品位分级的方法建立了电子废物可回收性的评估模型。FANG et al<sup>[20]</sup>

综合运用金属关键性和可回收性,对电子废弃物中废旧LED中金属循环的潜力进行了研究。由上述研究可以发现,与固废资源属性相关的研究正受到学术界的关注并已取得了一定的研究成果,但已有研究主要体现在城市矿产<sup>[17-18]</sup>和电子废弃物<sup>[20]</sup>方面,有待针对更多的固废开展资源属性的研究。并且,尚未发现有针对火法铜冶炼危废的资源属性进行的相关研究。由此可见,本研究有助于弥补当前研究的不足,对推动火法铜冶炼危废的资源化利用,具有重要的理论意义和实践意义。

## 1 评价模型的建立

本研究中,铜冶炼危废的资源属性是指由该危废所包含的金属元素特点决定而体现出的一种综合的资源特性。这种资源属性,既包括其中金属元素当前所具有的市场价值,还包括这些元素在国家经济社会发展的重要性方面所体现出的资源价值。目前已有的关于城市矿山和电子废弃物的相关研究,虽然与铜冶炼危废在研究对象上有所不同。但这些研究对象的理化组成、回收过程与火法铜冶炼危废有许多相似之处<sup>[17,20]</sup>。如,都含有一定浓度的有价、有害元素(如砷、铅、镉、镉和铜等),以及较低浓度较高价值的元素(如镓、铟、银和铂等)<sup>[18]</sup>;回收过程中都会涉及火法或湿法冶金过程<sup>[20]</sup>,以及复杂的组成与较低的品位都会降低危废中有价元素的可回收性<sup>[22]</sup>。

因此,本文基于对火法铜冶炼危废资源属性的界定,借鉴目前学术界对城市矿山和电子废弃物开展的与资源属性相关的研究,针对火法铜冶炼工艺危废的特点,构建了能够系统衡量其资源属性的模型。该模型通过衡量铜冶炼危废中待回收元素的资源价值( $RV$ )及可回收性( $RA$ )来分别揭示危废潜在资源价值及通过回收实现价值的难度,从而系统的揭示危废的资源属性。其中,资源价值( $RV$ )包含市场价值、经济重要性和供应风险3个指标;可回收性( $RA$ )包含品位分级、统计熵2个指标。

### 1.1 资源价值

1.1.1 市场价值 市场价值( $MV$ )直接反映了企业通过回收危废中的有价元素可获得的市场经济收益。因此,危废中待回收的有价元素的含量与市场价值越高,则危废的潜在资源价值越高。该指标也被用于电子废弃物<sup>[20]</sup>和城市矿山<sup>[17-18]</sup>的资源价值

评价中。市场价值( $MV$ )的计算<sup>[17,20]</sup>,见式(1)。

$$MV = \sum_i x_i MV_i \quad (1)$$

式中,  $x_i$  为危废中待回收元素的质量分数,  $MV_i$  为危废中待回收元素的市场价值<sup>[17]</sup>, 单位欧元每千克, 见表 1。

表 1 火法铜冶炼工艺危废中主要有价元素的市场价值、经济重要性和供应风险

元素	$MV_i$	$EI_i$	$SR_i$
As	1	1.2	4.8
Cu	5.4	4.7	0.2
Zn	2.3	4.5	0.3
Pb	1.8	3.7	0.1
Cd	2.4	0.8	7
Sb	5.2	4.3	4.3
Sn	16.7	4.4	0.8
Fe	0.4	6.2	0.8
Se	19.1	4.5	0.4
Ni	12.4	4.8	0.3
Ti	10.2	3.3	5.4
Ba	0.2	2.9	1.6
Pt	24 816.5	4.9	2.1
Hf	803.4	4.2	1.3
Cr	8.4	6.8	0.9
Mn	1.6	6.1	0.9
Mo	35.8	5.2	0.9
Al	1.6	6.5	0.5
Ga	132.1	3.2	1.4
Mg	2.8	7.1	4
V	331.2	3.7	1.6

1.1.2 经济重要性与供应风险 经济重要性与供应风险指标来源于欧盟<sup>[23]</sup>的“原材料关键性”评价, 并已被引入城市矿产<sup>[17-18]</sup>和电子废弃物<sup>[20]</sup>资源属性的相关研究中。其中, 经济重要性指部分原材料在社会经济系统中发挥着极其重要的作用<sup>[24]</sup>。供应风险指某种原料剩余储量的不足及对进口的依赖, 会导致原材料的稀缺及其供应的中断, 并对国家经济的发展产生严重影响<sup>[6]</sup>。富含价元素的火法铜冶炼危废可以被看成是一种矿物原材料<sup>[2]</sup>, 将其作为二次资源进行回收利用, 可以为一个国家或

地区的发展提供具有高“经济重要性”的元素; 同时, 还可以缓解一个国家或者地区某种有价元素尤其是具有战略意义的元素的“供应风险”<sup>[25]</sup>。因此, 本研究中, 基于对火法铜冶炼危废资源属性的界定, 通过引入经济重要性与供应风险, 还有助于揭示其在国家经济发展的重要性方面所具有的资源价值。

对于经济重要性而言, 如果某种有价元素使用量越大, 在下游行业中的附加值越大, 被其他有价元素替代的可能越小, 则该有价元素在经济系统中起到的作用更为重要。某种元素的经济重要性( $EI_i$ )计算, 见式(2)<sup>[26]</sup>。

$$EI_i = \sum_s (A_{s,i} \times Q_{s,i}) \times SI_i \quad (2)$$

式中,  $A_{s,i}$  为部门  $s$  使用元素  $i$  的比重,  $Q_{s,i}$  为元素  $i$  带来的部门  $s$  的增加值,  $SI_i$  为元素  $i$  的可替代指数。同时, 剩余储量的不足及对进口的依赖, 会导致原材料的稀缺及其供应的中断, 并产生严重的影响<sup>[6]</sup>。因此, 如果某种元素进口依赖越大, 储量越有限, 则供应风险越大, 则某种元素的供应风险( $SR_i$ )的计算, 见式(3)<sup>[26]</sup>。

$$SR_i = \left[ (HHI_{WGI})_{GS} \cdot \frac{IR_i}{2} + (HHI_{WGI})_{EU} \cdot \left( 1 - \frac{IR_i}{2} \right) \right] \cdot (1 - EoL_i) \cdot SI_i \quad (3)$$

式中:  $HHI$  为赫芬达尔指数, 用于衡量产业集中度;  $IR_i$  为元素  $i$  的进口依赖比例;  $EoL_i$  为元素  $i$  的回收利用率,  $SI_i$  为元素  $i$  的替代指数。对于每种元素的经济重要性( $EI_i$ )与供应风险( $SR_i$ ), 本文参照 SUN et al<sup>[17]</sup>与 FANG et al<sup>[20]</sup>的方法, 将相关研究中的计算结果<sup>[23]</sup>代入到后续步骤中, 见表 1。

因此, 如果危废中有价元素的含量以及经济重要性、供应风险越高, 则危废的潜在资源价值越高。危废中待回收有价元素的经济重要性( $EI$ )和供应风险( $SR$ )的计算, 见式(4~5)<sup>[17,20]</sup>。

$$EI = \sum_i x_i \cdot EI_i \quad (4)$$

$$SR = \sum_i x_i \cdot SR_i \quad (5)$$

1.1.3 资源价值的指标整合 在得到危废中各种有价元素的市场价值( $MV$ )、经济重要性( $EI$ )和供应风险( $SR$ )后, 需要对这 3 种指标进行整合得到资源价值( $RV$ )。本文采用 SUN et al<sup>[17]</sup>与 FANG et al<sup>[20]</sup>

的指标整合方法,得到某种危废的资源价值( $RV$ ),见式(6)。

$$RV = (1 + MV)^{1/3}(1 + ED)^{1/3}(1 + SR)^{1/3} - 1 \quad (6)$$

资源价值( $RV$ )综合了体现了危废回收可为企业带来的经济收益以及在国家经济发展的重要性方面所具有的资源价值。较高的  $RV$  将会提高企业回收危废的意愿,并推动政府制定相应的支持政策。

## 1.2 可回收性

危废是多种元素的混合物,分离这些元素会存在一定困难,这意味着危废中元素被回收的可能性会受到影响,从而影响危废资源价值的实现。本研究中,引入可回收性的概念<sup>[25-26]</sup>,用来揭示火法铜冶炼危废中有价元素经物理、化学或生物处理后回到原始状态性能的可能性。可回收性通过综合品位分级与统计熵 2 项指标进行衡量<sup>[22]</sup>。

**1.2.1 品位分级** 品位是指材料的质量或品质,更高品位的废弃物通常更容易转化为有用的产品<sup>[22]</sup>。在对于电子废弃物的研究中,通过量化初始产品和目标产品之间的差异(或距离)得到品位<sup>[22]</sup>。火法铜冶炼危废的回收过程涉及相对更为复杂的分离与富集过程<sup>[10,15,27]</sup>。并且,火法铜冶炼危废中一些元素的含量甚至会显著高于可利用的一次资源(矿石)中的元素含量<sup>[28]</sup>。因此,针对火法铜冶炼危废的实际特点,可以通过量化危废中各元素浓度(初始产品)与可利用的一次资源(矿石)的差异得到品位。如果超过矿石中元素浓度越多,则在现有技术条件下,通过技术手段实现回收的可能性也就越大。

因此,本文将危废中待回收元素的质量分数( $x_i$ )对比该元素工业品位( $IG_i$ )的相对浓度定义为该组分的品位( $D$ ),见式(7)。

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \log_2(x_i/IG_i + 1) \quad (7)$$

式中,工业品位全称为最低工业可开采品位,是指在当前经济技术条件下,工业部门或矿山企业对矿产提出的一项品质指标,浓度低于工业品位的矿物则缺乏开采的价值<sup>[29]</sup>。危废也可以被视为一种矿物<sup>[2]</sup>,如果其中某有价元素的浓度相对工业品位更高,则说明危废中该有价元素更容易被回收并转化为有用的产品,则品位分级越高。火法铜冶炼工艺危废中通常所含有的有价元素所对应的工业品位,见表 2。

表 2 火法铜冶炼工艺危废中含有的主要元素对应的工业品位

元素	工业品位 (质量分数/%)
As	8
Cu	0.5
Zn	4
Pb	1.5
Cd	0.08
Sb	1.25
Sn	0.3
Fe	30
Se	0.08
Ni	0.8
Ti	1.5
Ba	30
Pt	$5 \times 10^{-5}$
Hf	1
Cr	10
Mn	15
Mo	0.07
Al	20
Ga	0.075
Mg	15
V	0.04

**1.2.2 统计熵** 基于工业品位的品位分级并不能完全反映危废的可回收性。对于某些铜冶炼危废,尽管其中铜的浓度相对于工业品位高出很多,但铜的结合形态复杂,还会存在其他对铜的回收造成干扰的元素,使得这些废渣难以被富集和回收<sup>[27]</sup>。通过引入统计熵,可以揭示因样品组成的复杂性以及有价元素所受干扰对可回收性产生的影响,从而更为系统的对可回收性进行评价。

熵是指一个热力学体系的混乱程度,1948 年被 SHANNON 引入信息论,用于反映信息系统的确定性<sup>[30]</sup>。统计熵越大,表明系统的信息量或者混乱程度越大<sup>[31]</sup>。基于统计熵函数,可实现对复杂固体废物回收潜力的评价<sup>[32]</sup>。若样品的组成越集中,则统计熵越小,可回收性越大。当样品的组成成为某一种纯物质时,统计熵为 0,具有最大的可回收性<sup>[22]</sup>。统计熵( $H$ ),见式(8)。

$$H = - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \log_2 x_i \quad (8)$$

式中,  $x_i$  为危废中待回收元素的质量分数,  $n$  为危废所含元素的个数,  $H$  为危废中元素浓度分布的统计熵。

1.2.3 可回收性的指标整合 综合材料的品位分级与统计熵对可回收性的影响可知, 有价元素的品位等级越高、统计熵越小, 则可回收性越高。危废的可回收性, 见式(9)<sup>[20,22]</sup>。

$$RA = \frac{5D}{nH} \quad (9)$$

式中,  $n$  为危废样品所含元素的个数,  $H$  为样品中元素浓度分布的统计熵,  $D$  为样品的品位, 5 为放大系数。通过对可回收性的评价, 进一步揭示了危废潜在资源价值得到实现的可能性, 从而更加系统的衡量了危废的资源属性。

## 2 实例分析

### 2.1 样品与数据来源

本文对建立的资源属性评价模型进行实例分析所用的实际样品采自我国某火法铜冶炼企业, 共采集了 10 种样品, 分别为 1 号样品砷滤饼、2 号样品白烟尘、3 号样品石膏半成品、4 号样品脱硫石膏、5 号样品铁钒渣、6 号样品石膏渣、7 号样品磷石膏、8 号样品烧结矿、9 号样品环保灰和 10 号样品水淬渣。化学元素的组成与含量采用 ICP-AES 测定<sup>[33]</sup>。

### 2.2 资源价值与可回收性评价结果

如前文所述, 危废回收所产生的价值通过一个综合指标资源价值( $RV$ )表示。首先, 根据表 1 危废中每种有价元素的市场价值( $MV_i$ )、经济重要性( $EI_i$ )、供应风险( $SR_i$ ), 以及 10 种危废样品中金属元素的含量, 经过式(1)、式(4)和式(5)的计算, 可以得到每种样品的市场价值( $MV$ )、经济重要性( $EI$ )和供应风险( $SR$ ), 见表 3。然后, 根据式(6)可以得到整合后的综合指标, 即危废的资源价值( $RV$ )。

表 3 可知, 10 种样品资源价值( $RV$ )的范围为 0.23 ~ 1.48, 中间值为 0.43。当样品的  $RV$  值高于中间值 0.43 时, 表明该危废具有相对较高的资源价值<sup>[20]</sup>。其中, 1 号、2 号、8 号、9 号和 5 号样品的  $RV$  值分别为 1.48、1.27、1.11、0.81 和 0.53, 均高于中间值 0.43, 表明其资源价值相对较高。

表 3 某火法铜冶炼企业样品的资源价值 ( $RV$ ) 评价结果

样品	$MV$	$EI$	$SR$
1	2.33	0.62	1.85
2	1.32	1.62	0.93
3	0.72	0.07	0.02
4	0.73	0.2	0.05
5	0.34	1.05	0.3
6	1.12	0.05	0.02
7	1.1	0.1	0.03
8	1.16	2.33	0.3
9	0.84	1.75	0.18
10	0.19	0.6	0.11

注: 1号样品为砷滤饼, 2号样品为白烟尘, 3号样品为石膏半成品, 4号样品为脱硫石膏, 5号样品为铁钒渣, 6号样品为石膏渣, 7号样品为磷石膏, 8号样品烧结矿, 9号样品环保灰, 10号样品水淬渣。

危废回收的可能性或难度通过一个综合指标可回收性( $RA$ )表示。根据表 2 危废中每种有价元素的工业品位以及 10 种危废样品中金属元素的含量, 经过式(7)、式(8)的计算, 可以得到每种样品的品位以及统计熵, 见表 4。然后, 根据式(9)可以得到整合后的综合指标, 即危废的可回收性( $RA$ )。

表 4 某火法铜冶炼企业危废样品的可回收性 ( $RA$ ) 评价结果

样品	$D$	$n$	$H$	$RA$
1	14.38	17	1.38	1.23
2	16.94	15	2.39	0.94
3	3.14	11	1.45	0.39
4	3.24	10	1.65	0.39
5	3.33	16	2.52	0.16
6	3.95	15	1.28	0.41
7	3.7	11	1.48	0.46
8	5.58	13	2.93	0.29
9	6.29	14	3.3	0.27
10	1.21	11	2.54	0.09

表 4 可知, 10 种危废样品的可回收性( $RA$ )的范围为 0.09 ~ 1.23, 中间值为 0.39。当样品的可回收性  $RA$  值高于中间值 0.39 时, 表明该危废具有相对较高的可回收性<sup>[20]</sup>。其中, 1 号和 2 号样品的  $RA$  值分别为 1.23 和 0.94, 高于中间值 0.39, 表明其

可回收性相对较高。7号、6号、3号和4号样品的  $RA$  值依次为 0.46、0.41、0.39 和 0.39, 接近或等于中间值, 说明这些危废的可回收性处于中等水平。8号、9号和5号样品的  $RA$  值均低于中间值, 表明其可回收性相对较低。此外, 10种危废样品的统计熵范围在 1.28~3.30 之间, 所检出的有价元素数量在 10~17 之间, 分布于一个较宽的区间内。这表明, 总体来看, 这些危废样品在组成与分布上具有较明显的差异。原因在于铜精矿中所含元素会在生产过程中进入冶炼系统的各个工序, 并依其赋存形态、理化性质及各生产环节特定的工艺条件等差异, 在不同的生产节点处产生不同组成、不同元素富集程度的危废<sup>[34]</sup>。

### 2.3 资源属性的综合分析

如前所述, 本文建立的火法铜冶炼危废资源属性评价模型通过衡量危废中待回收元素的资源价值( $RV$ )和可回收性( $RA$ )这2个方面系统的揭示危废的资源属性。综合考虑这2个方面, 可以揭示危废资源属性以及回收顺序的优先级, 见图1。

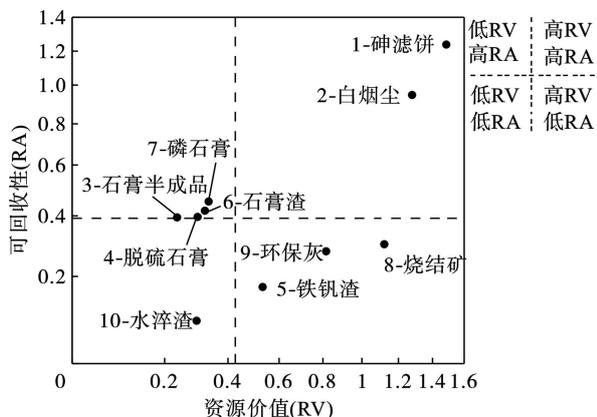


图1 某火法铜冶炼企业危废样品资源属性的四象限图

图1可知, 可将危废样品的资源价值和可回收性放在一个坐标轴内。这样, 通过这2个指标值所对应的中间值将  $RV$  与  $RA$  之间的关系划分为4个象限, 即第一象限表示高  $RV$  和高  $RA$ 、第二象限表示低  $RV$  和高  $RA$ 、第三象限表示低  $RV$  和低  $RA$ 、第四象限表示高  $RV$  和低  $RA$ 。图1可知, 1号样品砷滤饼和2号样品白烟尘位于第一象限, 表明这2种危废的  $RV$  值和  $RA$  值均较高, 因此具有较高的资源属性, 应被优先回收。对于第二象限(低  $RV$  和高  $RA$ )和第四象限(高  $RV$  和低  $RA$ ), 应该综合考虑  $RV$  与  $RA$  的影响来决定回收顺序。例如, 第四象限的样品烧结矿、环保灰和铁矾渣都具有较高的资源价值( $RV$ ), 尤其是烧结矿, 其  $RV$  值在10种样

品中位于第3位。但第四象限中3种样品的可回收性较低。因此, 可针对这3种样品的组成进一步研究能够使其得到有效回收利用的技术。第二象限的样品磷石膏、石膏渣、脱硫石膏和石膏半成品具有相对较低的资源价值, 可回收性也位于边界上, 回收顺序应在第四象限的样品之后。而第三象限(低  $RV$  和低  $RA$ )中只有水淬渣一种样品, 其  $RV$  和  $RA$  值均位于最后, 表明其整体的资源属性最低, 回收的优先级也最低。由此可见, 本文构建的资源属性模型可以有效用于对实际危废样品的评价, 识别出其回收顺序的优先级, 并可为进一步的技术开发提供指导。

### 3 结论与展望

推动火法铜冶炼危废的资源化利用, 对我国建立健全绿色低碳循环发展的经济体系和生态文明建设具有重要的现实意义和战略意义。本文对火法铜冶炼危废的资源属性评价模型进行了研究, 结论如下。

(1) 构建了火法铜冶炼危废资源属性评价模型。该模型基于目前对城市矿山和电子废弃物所开展的“原材料关键性评价”和“可回收性”等与资源属性相关的研究, 由资源价值( $RV$ )及可回收性( $RA$ )两部分组成, 分别用来揭示危废的潜在资源价值及通过回收实现价值的难度, 从而系统的揭示危废的资源属性。其中, 资源价值( $RV$ )包含市场价值、经济重要性和供应风险3个指标, 可回收性( $RA$ )包含品位分级、统计熵2个指标。该模型可以根据危废的化学组成与含量, 系统识别危废整体的资源属性并确定危废回收利用的优先顺序, 为危废资源化利用的决策提供科学的依据。

(2) 针对我国某火法铜冶炼企业实地采样, 取得10种样品, 在获取化学组成后采用模型进行了评价。结果表明, 总体而言, 这些危废样品在组成与分布上具有较为明显的差异, 因此具有不同的资源属性。通过综合分析由资源价值和可回收性构成的四象限图, 可以有效揭示危废样品的资源属性及回收的优先顺序, 并可为进一步的资源化利用技术开发提供指导。通过对象限图的综合分析表明, 该企业样品中的砷滤饼、白烟尘应被优先回收, 其次分别为烧结矿、环保灰和铁矾渣。

(3) 今后研究中, 可在采集更多危废样品的基础上, 运用该模型进行评价, 建立并不断完善我国

火法铜冶炼行业危废资源属性的数据库,并对评价结果汇总后进行综合比较分析,以揭示整个行业所产生的危废的资源属性规律,从而为我国制定铜冶炼行业危废资源化利用的政策提供科学的依据。此外,目前研究主要从资源价值和可回收性方面针对危废的资源属性构建了模型,今后可进一步围绕回收过程的二次影响、回收工艺等因素构建评价模型,从而为综合决策进一步提供指导。

## 参考文献

- [1] LI L, PAN D, LI B, et al. Patterns and challenges in the copper industry in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 127: 1 – 7.
- [2] WANG C, ZUO L, HU P, et al. Evaluation and simulation analysis of China's copper security evolution trajectory[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(8): 2465 – 2474.
- [3] 王威. 全球铜消费格局[J]. *国土资源情报*, 2014(11): 26 – 29.
- [4] NIKOLIĆ I P, MILO ŠEVIĆ I M, MILJIĆ N N, et al. Cleaner production and technical effectiveness: Multi-criteria analysis of copper smelting facilities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 423 – 432.
- [5] 高慧敏. 铜冶炼行业固废和危废的回收与利用研究[J]. *科技经济导刊*, 2018, 26(18): 120.
- [6] 金尚勇, 李永鹏, 陈虎. 铜冶炼危险废物环境管理问题探讨[J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(3): 142 – 143.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 国家危险废物名录(2021年版)[EB/OL]. (2020-11-27)[2021-02-28]. [http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202011/t20201127\\_810202.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk02/202011/t20201127_810202.html).
- [8] 中华人民共和国司法部. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法[EB/OL]. (2020-05-06)[2021-02-28]. [http://www.moj.gov.cn/Department/content/2020-05/06/592\\_3248103.html](http://www.moj.gov.cn/Department/content/2020-05/06/592_3248103.html).
- [9] 李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 等. 稀有矿产资源的战略性评估——基于战略性新兴产业发展的视角[J]. *中国工业经济*, 2014(7): 44 – 57.
- [10] 谢祥添. 铜冶炼过程多型固废整体回收新技术[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2020(2): 23 – 26.
- [11] JAROŠÍKOVÁ A, ETTLER V, MIHALJEVIČ M, et al. Characterization and pH-dependent environmental stability of arsenic trioxide-containing copper smelter flue dust[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 209: 71 – 80.
- [12] 郑春到, 林东和. 闪速熔炼系统 As、Sb、Bi、Pb 的走向分布[J]. *中国有色冶金*, 2015, 44(3): 15 – 18.
- [13] 王治永. 富氧侧吹铜冶炼冰铜品位变化对杂质走向的影响[J]. *有色矿冶*, 2018, 34(2): 32 – 34.
- [14] 刘智明. 铜冶炼烟尘综合回收工艺浅析及建议[J]. *中国有色冶金*, 2015, 44(5): 44 – 48.
- [15] 程利振, 许歆. 铜造钼熔炼杂质元素分布及回收利用研究进展[J]. *有色金属材料与工程*, 2016, 37(3): 103 – 109.
- [16] SCHRIJVERS D, HOOL A, BLENGINI G A, et al. A review of methods and data to determine raw material criticality[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 155: 104617.
- [17] SUN Z, XIAO Y, AGTERHUIS H, et al. Recycling of metals from urban mines – a strategic evaluation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2977 – 2987.
- [18] ZUO L, WANG C, CORDER G D. Strategic evaluation of recycling high-tech metals from urban mines in China: An emerging industrial perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 697 – 708.
- [19] VILLALBA G, SEGARRA M, FERNÁNDEZ A I, et al. A proposal for quantifying the recyclability of materials[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2002, 37(1): 39 – 53.
- [20] FANG S, YAN W, CAO H, et al. Evaluation on end-of-life LEDs by understanding the criticality and recyclability for metals recycling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 624 – 633.
- [21] 曾现来. 典型电子废物部件中有色金属回收机理及技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [22] ZENG X, LI J. Measuring the recyclability of e-waste: an innovative method and its implications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 131: 156 – 162.
- [23] British Geological Survey, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Deloitte Sustainability, et al. Study on the review of the list of critical raw materials: final report. [R]. Publications Office of the European Union, 2017.
- [24] KIM J, LEE J, KIM B, et al. Raw material criticality assessment with weighted indicators: An application of fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Resources Policy*, 2019, 60: 225 – 233.
- [25] CALVO G, VALERO A, VALERO A. Thermodynamic approach to evaluate the criticality of raw materials and its application through a material flow analysis in Europe[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(4): 839 – 852.
- [26] BARANZELLI C, BLAGOEVA D, BLENGINI G A, et al. Methodology for establishing the EU list of critical raw materials: guidelines. [M]. European Union, 2017.
- [27] 廖亚龙, 叶朝, 王祚洋, 等. 铜冶炼渣资源化利用研究进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(8): 3066 – 3073.
- [28] 刘金生, 姜平国, 肖义钰, 等. 从铜渣中回收铁的研究现状及其新方法的提出[J]. *有色金属科学与工程*, 2019, 10(2): 19 – 24.
- [29] 邵厥年, 陶维屏. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [30] SHANNON C. E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379 – 423.
- [31] RECHBERGER H. An entropy based method to evaluate hazardous inorganic substance balances of waste treatment systems[J]. *Waste Management & Research*, 2001, 19(2): 186 – 192.
- [32] DAHMUS J B, GUTOWSKI T G. What gets recycled: An information theory based model for product recycling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(21): 7543 – 7550.
- [33] 李学鹏. 从高砷铜烟尘中综合回收有价金属的应用基础研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [34] 赵晋, 陈春丽. 铜冶炼企业固废产生节点分析及处置措施建议[J]. *有色冶金设计与研究*, 2013, 34(3): 75 – 78.