

综述：冶炼烟灰综合利用研究现状及趋势

虞蔓青*, 宋呈翔, 余军霞, 郭莉#

武汉工程大学化学与环境学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年11月15日; 录用日期: 2024年3月4日; 发布日期: 2024年3月11日

摘要

有色金属生产过程中产生的冶炼烟灰是冶金行业的典型危废, 为明确针对冶炼烟灰开展的相关研究的现状及其发展趋势, 采用文献计量学方法统计分析了Web of Science (WOS)数据库中近三十年来发表的相关文献资料, 并对年度发文量、发文机构、发文期刊、发文作者以及论文关键词等方面进行了综合全面的统计分析。结果表明: 1993~2023年间以“smelting soot”、“smelting ash”、“smelting dust”为关键词的文献共计1792篇, 发文量在1993年至2007年期间呈波动状, 且自2008年开始, 发文量呈现出明显的指数递增趋势, 与有色金属行业的飞速发展密不可分; 相关文献分别发表在393家期刊上, 其中Science of the Total Environment发文量最大, Metallurgist次之, Environmental Pollution排名第三; 共有617家研究机构开展了冶炼烟灰的相关研究, 其中发文量排名第一的是中国科学院, 其次是中南大学以及布拉格查尔斯大学; 共有1105名研究人员发表了相关文献, 其中发文量排名第一和第二的作者均来自布拉格查理斯大学, 分别为Vojtech Ettler和Martin Mihaljevic; 相关文献中出现频次较高的关键词为“lead”、“pollution”、“dust”、“heavy metal”、“soil”等, 表明冶炼烟灰引起的环境污染尤其是土壤中重金属的污染问题是近三十年来的研究热点, 另外, “recovery”、“removal”、“separation”是近年来出现频次较高的关键词, 表明冶炼烟灰的综合回用以及有害元素的分离脱除是未来的研究趋势。

关键词

冶炼烟灰, 研究热点, 发展趋势

Summarize: Research Status and Future Development Trend of the Integrated Utilization of Smelting Soot

Manqing Yu*, Chengxiang Song, Junxia Yu, Li Guo#

School of Chemical and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Nov. 15th, 2023; accepted: Mar. 4th, 2024; published: Mar. 11th, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

In order to clarify the research status and future development trend of smelting soot, the Bibliometrics method is used to statistically analyze the literature on smelting soot published in Web of Science (WOS) database from 1993 to 2023, and the collected literature is analyzed in terms of the annual number of papers, issuing institutions, issuing journals, authors and key words of papers. The results show that: from 1993 to 2023, it was identified as “smelting soot”, “smelting ash” and “smelting dust”. A total of 1792 literatures were used as keywords, and the number of published papers fluctuated from 1993 to 2007, and the number of published papers began to show a trend from 2008. An obvious exponential increasing trend is closely related to the rapid development of the non-ferrous metal industry; The relevant literature has been published in 393 journals. *Science of the Total Environment* has the largest number of articles, followed by *Metallurgist* and *Environmental Pollution*. A total of 617 research institutions have carried out research on smelting soot, of which the Chinese Academy of Sciences ranks first, followed by Central South University and Charles University, Prague; A total of 1,105 researchers published relevant literature, with both the first and second most published authors. Vojtech Ettler and Martin Mihaljevic from Charles University in Prague; Keywords that appear more frequently in related literature “lead”, “pollution”, “dust”, “heavy metal”, “soil”, etc., indicating the environmental pollution caused by smelting soot. In particular, the pollution of heavy metals in soil has been a research hotspot in the past 30 years. In addition, “recovery”, “removal”, “separation”, etc. It shows that the comprehensive reuse of smelting soot and the separation and removal of harmful elements are the research trends in the future.

Keywords

Smelting Soot, Research Status, Development Trend

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

有色金属被广泛应用于建筑、工业、农业等行业[1], 但有色金属矿资源本身的稀缺及原矿品位的持续下降, 致使有色金属资源的供求矛盾日益尖锐[2]。据研究表明, 有色金属冶炼厂排出的烟灰颗粒粒径大多小于 10 μm , 极易被人体吸入而增加致癌的风险, 且对于儿童而言, 仅仅是皮肤接触灰尘中的痕量重金属也有致癌风险[3]。为此, 开发高效的冶炼烟灰回收再利用技术, 不仅可以为有色金属提供新的来源, 对于减少此类有害固废所产生的环境污染和危害具有重要的意义。

目前, 关于冶炼烟灰的综合利用问题, 国内外学者对其展开了以下几个方面的研究: (1) 冶炼烟灰的主要矿物组成、结构及其形成机制; (2) 冶炼烟灰中重金属在周边生态环境中的分布特征、浸出机制及其暴露风险; (3) 冶炼烟灰中重金属综合回用工艺。如 Xu B 等[4]总结分析了铜冶炼开路粉尘形成的机理及回收工艺。Soyseth V 等[5]对冶炼烟灰对人体健康的危害进行了综述。王林松等人[6]综述了现今较为普遍的铜渣冶金回收与净化方法的优缺点。

为了进一步明确关于冶炼烟灰综合利用研究领域的研究热点及发展趋势, 本文采用文献计量学方法对该研究领域的近三十年来发表的相关文献进行了全面和系统的分析, 主要从发文国家、机构、作者、

关键词等方面进行统计分析,以期采用可视化图谱的方式清楚地展现该研究的领域的研究热点和研究趋势,从而系统性地展现出冶炼烟灰综合利用研究的重要意义及其研究趋势。

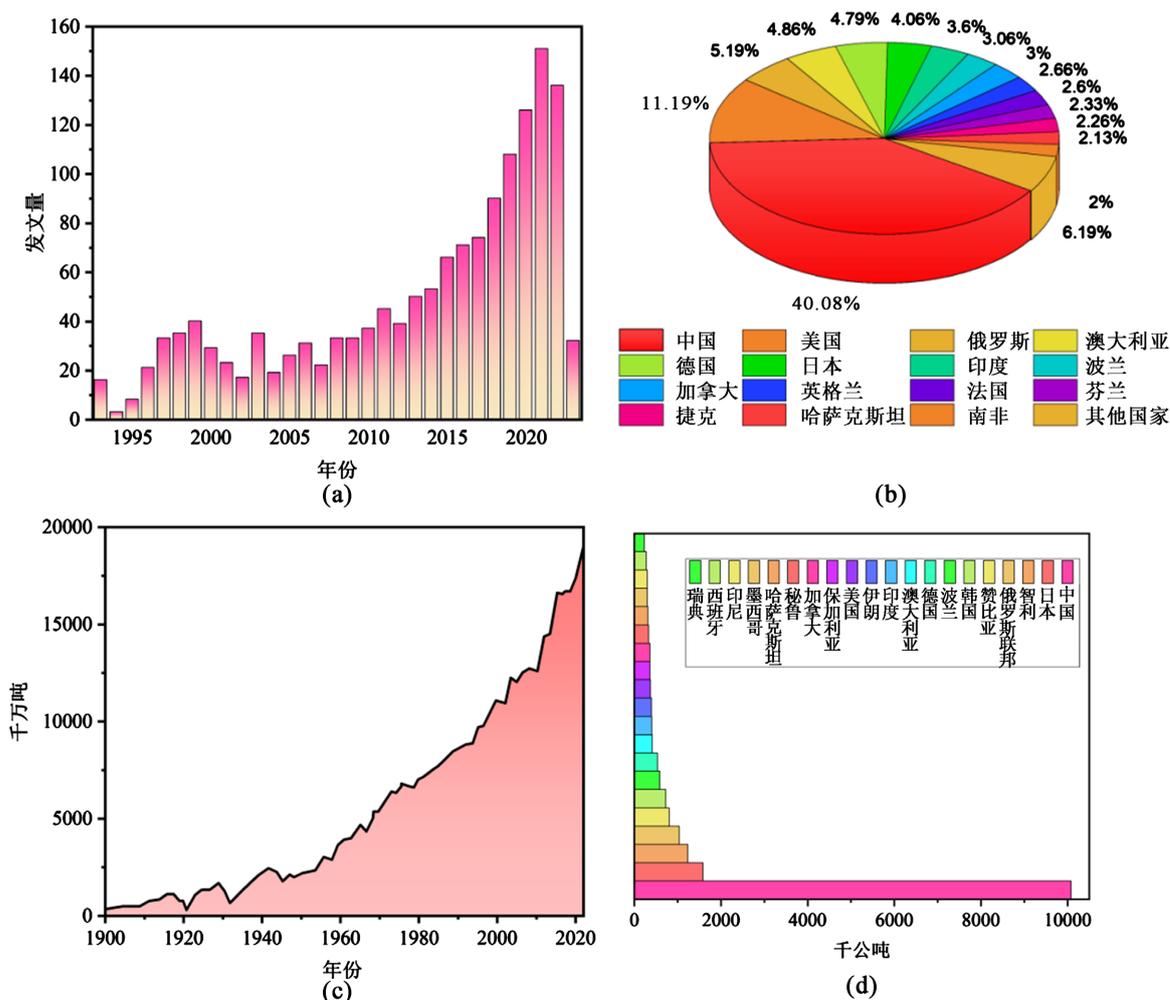
2. 数据来源与统计方法

本文所选取的文献来自于检索系统 WOS (Web of Science),以“smelting soot”、“smelting ash”、“smelting dust”为关键词,共检索了近三十年来(1993~2023年3月)发表的1792篇研究性文献,在此数据基础上,采用 CiteSpace 软件对其进行数据化的统计分析。

3. 结果与讨论

3.1. 近三十年发文量

图 1(a)显示了 1993~2023 年间以冶炼烟灰为研究对象的发文量情况,从图中可以看出,这一研究领域的发文量在 1993~2007 年间呈波动状,且自 2008 年开始,发文量呈现出明显的指数递增趋势,表明研究者们对这一领域的关注持续增加。图 1(b)为部分国家的发文量,在全球发文量较多的国家中,我国的



(a) WOS 发文量; (b) 部分国家发文量; (c) 世界精炼铜总产量; (d) 2022 各国铜产量。

Figure 1. The number of publications of smelting soot-related research in 1993~2023

图 1. 1993~2023 年冶炼烟灰相关研究的发文量

发文量最多, 占总发文量的 40.08%, 美国次之, 占 11.19%。这一研究领域发文量的持续增长与近代的科学技术革命密切相关, 自 20 世纪末 21 世纪初的“电子计算机与互联网革命”的爆发以来, 人们对铜、铅、锌、镍、锡、铝、钨、钼等金属的需求逐年递增, 而大多数有色金属都产自于金属矿的冶炼[7]。以铜为例, 1993~2023 年世界精炼铜的产量一直呈指数递增的趋势(见图 1(c) [8]), 去年仅我国的精炼铜的累计产量就高达 1106.3 万吨(见图 1(d))。

3.2. 主要发文期刊

以“smelting soot”、“smelting ash”、“smelting dust”为关键词的文章共在 393 家期刊上发表, 由表 1 知, 其中 17 家期刊发文量在十篇以上, 从期刊发文量占比、影响因子以及学科网学科类别三个方面统计了 1993~2023 年发文量排名前九的期刊(其合计发文量占总发文量的 32.14%)。发文量排名第 1 的期刊为 *Science of the Total Environment*, 其发文量为 44 篇, 占比为 4.50%; 排名第二的为 *Metallurgist*, 其发文量为 30 篇, 占比为 3.07%; 排名第三的为 *Environmental Pollution*, 其发文量为 28 篇, 占比为 2.87%。发文量排名前 10 名的期刊中, 2022 年平均影响因子为 6.46, 最高达 14.22, 为 *Science of the Total Environment*, 其次为 *Metallurgist*, 再次为 *Environmental pollution*。以上表明有较多的冶炼烟灰综合处理方面的论文发表在具有较高学术影响力的高水平期刊上, 根据期刊类别可以看出冶炼烟灰综合处理技术受到了众多学科领域研究者的关注与研究。

Table 1. Top nine journals in the number of smelting soot research by volume in 1993~2023

表 1. 1993~2023 年冶炼烟灰研究发文量排名前九的期刊

排名	期刊	发文篇数	2022 年影响因子
1	<i>Science of the Total Environment</i>	44	10.75
2	<i>Metallurgist</i>	30	0.89
3	<i>Environmental Pollution</i>	28	9.99
4	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	26	14.22
5	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	20	5.19
6	<i>ISIJ International</i>	19	1.86
7	<i>Atmospheric Environment</i>	18	3.90
8	<i>Journal of Cleaner Production</i>	17	11.07
9	<i>JOM</i>	15	2.59
9	<i>Journal of Geochemical Exploration</i>	15	4.17

3.3. 主要发文机构

以“smelting soot”、“smelting ash”、“smelting dust”为关键词检索统计表明, 在 1993~2023 年共有 617 家机构进行了以冶炼烟灰为研究对象的研究, 表 2 总结了在此方面发文量前九的机构, 其中有七家隶属于我国。这也可以看出我国对冶炼烟灰相关方面的关注及重视。其中发文量排名第一的是中国科学院, 发文量为 90, 其次是中南大学以及布拉格查尔斯大学, 发文量分别是 33 和 30。排名前九的机构其中只有三家机构不属于大学及科学院, 大学及科学院构成了以冶炼烟灰为研究对象的主要研究基地。

通过 CiteSpace 生成的机构共现图谱(图 2)可以看出各机构之间的联系, 圆圈越大代表该机构发文量越多。中国科学院(Chinese Academy of Sciences)与北京师范大学(Beijing Normal University)、南京大学(Nanjing University)彼此之间都有合作; 而中国大学中国科学院(University of Chinese Academy of Sciences)与中国地质大学(China University of Geosciences)两者之间有合作关系。这些机构都是在该领域中发文的佼佼者。

Table 2. Top nine publishing organizations
表 2. 排名前九的发文机构

排名	发文量	发文机构	中文	中心性
1	113	Chinese Academy of Sciences	中国科学院	0.07
2	51	Central South University	中南大学	0.02
3	30	Charles University	布拉格查尔斯大学	0.00
4	25	University of Chinese Academy of Sciences	中国大学中国科学院	0.01
5	14	Kunming University of Science and Technology	昆明理工大学	0.01
6	13	Marign Design & Research Institute of China	中国船舶工程控制中心	0.01
7	12	Geological Survey of the Republic of Slovenia	斯洛文尼亚地质调查所	0.00
7	12	Macquarie University	麦格里大学	0.01
9	11	Chinese Society of Environmental Science	中国环境科学所	0.01
9	11	Czech Institute of Geological Survey	捷克地质调查所	0.00
9	11	China University of Geosciences	中国地质大学	0.01



Figure 2. Co-production map of smelting soot research institutions in 1993~2023
图 2. 1993~2023 年冶炼烟灰研究机构共现图谱

3.4. 主要发文作者

通过 CiteSpace 统计的数据(表 3)可知,一共有 1105 名研究者在 1993~2023 年发表了关于冶炼烟灰相关文献。该表收集了发文量排名前二十的作者的隶属机构和发文量。综上,研究该项目主力军来自于高校的老师及硕士生、博士生。其中发文量第一的 Vojtech Ettler 和第二的 Martin Mihaljevic 都隶属于布拉格查理斯大学。发文量分别是 21 篇及 18 篇。

通过图 3 可知,不同的研究者之间都有着合作关系,如美国环境保护局的 Kirk G Scheckel 与捷克地质调查局的 Ondrej Sebek、Bohdan Kribek 存在合作关系;中国科学院的王智杰,清华大学的黄毅和中南大学的王丽三人的团队之间紧密合作了很多年,特别是在 2010~2013 年之间;中国科学院的刘国瑞,内蒙古农业大学的张明辉和陕西师范大学的杨莉莉三人也是在 2010~2016 之间存在合作关系。

Table 3. The top twenty authors by publication
表 3. 发文量前二十作者

作者	发文量	排名	隶属机构
Vojtech Ettler	21	1	布拉格查理斯大学
Martin Mihal Jevic	18	2	布拉格查理斯大学
刘国瑞	9	3	中国科学院
张明辉	9	3	内蒙古农业大学
Bohdan Kribek	8	5	捷克地质调查局
Ondrej Sebek	8	5	捷克地质调查局
Pekka Taskinen	7	7	阿尔托大学
Kirk G Scheckel	7	7	美国环境保护局
黄毅	7	7	清华大学
Ari Jokilaakso	6	10	阿尔托大学
李忠根	6	10	沈阳化工大学
杨莉莉	6	10	陕西师范大学
Ales Vanek	6	10	捷克生命科技大学
王梅	5	14	北京交通大学
姜晓旭	5	14	黑龙江大学
王智杰	5	14	中国科学院
A G Svyazhin	4	17	国立科学技术大学
陈鹏	4	17	重庆师范大学
Akira Obuchi	4	17	日本国立研究所
Mark Patrick Taylor	4	17	奥克兰大学

3.5. 研究热点及研究趋势

关键词是对一篇文章的主要内容的概括，表 4 是对所搜集的所有文献关键词的概括总结，表中列出了出现频率前 20 的关键词，可以反映出该领域的现在的研究热点，有助于帮助研究者更快的掌握该领域的研究概况，并为其接下来的研究提供思路指导。

将 1993~2023 年在 WOS 上所发的冶炼烟灰论文关键词、出现频率及其中心性进行统计，结果如表 4 所示。由表 4 可知，从出现频次前 15 的关键词可以看出，冶炼烟灰中铅及其它有害物质污染来源解析及对其中锌、铜等有色金属的回收是近年来的研究热点。

采用 CiteSpace 软件对所搜集的文献的关键词进行聚类分析可知，关键词主要分为六类：smelting flue dust (冶炼烟灰)、lead bioavailability (铅生物利用率)、heavy metal (重金属)、toxic element (有毒元素)、selective removal (选择性去除)、arsenic removal (去砷)。

铅和砷这两种有毒元素是冶炼烟灰中对环境及生物等造成较大污染的元素。针对处理冶炼烟灰的污染问题及回收冶炼烟灰中有价金属的研究主要集中在提高冶炼烟灰中各元素浸出的选择性及浸出率，如 Hikaru Sawai 等[9]使用螯合剂洗涤、酸浸和氢氧化物沉淀的技术，实现了冶炼烟灰中铅、砷和铜的高效选择性浸出，从而降低了铅生物利用率；Karimov K A 等[10]氧化浸出技术使铜冶炼粉尘中的铜和砷更有

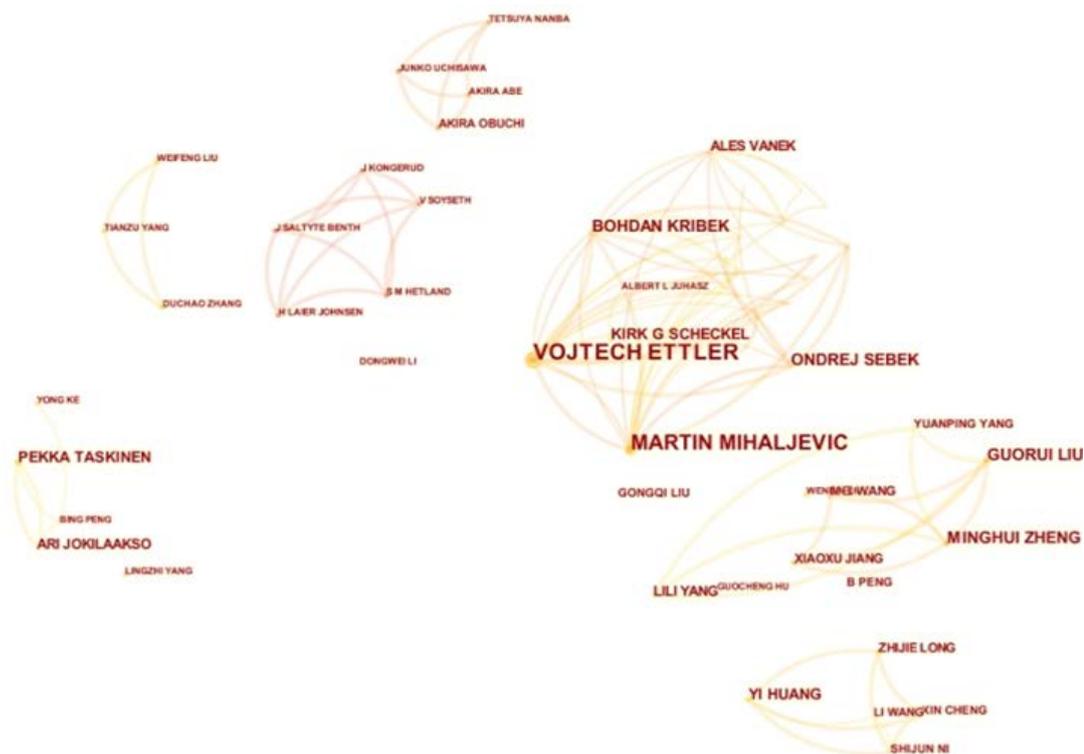


Figure 3. Co-occurrence map of authors' papers on smelting dust in 1993~2023
 图 3. 1993~2023 年冶炼粉尘作者论文共现图

Table 4. Keywords of smelting dust technology papers with top 15 occurrences in 1993~2023
 表 4. 1993~2023 年出现次数前 15 位的冶炼粉尘技术论文关键词

排列	关键词	中文名称	中心性	出现频次
1	lead	铅	0.14	152
2	pollution	污染	0.15	115
3	dust	烟尘	0.14	105
4	heavy metal	重金属	0.18	102
5	soil	土壤	0.11	100
6	exposure	暴露	0.18	64
7	zinc	锌	0.04	58
8	fly ash	飞灰	0.11	56
9	recovery	回收	0.01	49
10	emission	排放	0.05	42
11	slag	矿渣	0.05	40
12	metal	金属	0.04	35
13	removal	移除	0.02	35
14	source apportionment	源解析	0.02	27
15	copper	铜	0.05	23

Table 5. Keywords table of smelting dust in 1993~2023**表 5.** 1993~2023 年冶炼烟灰关键词突现表

关键词	中文名称	开始时间	结束时间	1993~2023 年时间
Exposure	暴露	1993	2004	
Children	儿童	1999	2010	
Soil	土壤	2006	2014	
Speciation	物种形成	2007	2017	
Sediment	沉淀	2012	2016	
Cadmium	镉	2015	2016	
Urban soil	城市土壤	2015	2017	
PM 10	可吸入微粒	2016	2018	
Recovery	回收	2017	2023	
Removal	去除	2017	2023	
Temperature	温度	2017	2020	
Reduction	减少	2018	2020	
Behavior	行为	2018	2023	
Separation	分离	2020	2023	

效的选择性浸出并提高了铜、砷和铁的率；袁佳等[11]采用现代测试技术探究冶炼烟灰中砷及有价金属选择性分离的最佳浸出工艺。利用新的方法或工艺提高冶炼烟灰中各元素浸出的选择性及浸出率不但能解决冶炼烟灰对环境的污染问题而且也能回收冶炼烟灰中有价金属，因此，选择性浸出冶炼烟灰中各元素是近年来的研究热点。

关键词突现表(表 5)可以很好的反映出研究热点兴起的时间以及结束的时间，红色线条表示关键词存在的时间，蓝色线条表示关键词不存在的时间，特别需要注意的是在 2023 年仍然还在出现的关键词，这些关键词是现在该领域的研究热点，这些关键词包括：recovery (回收)、removal (去除)和 separation (分离)，这些关键词也很有可能是未来该领域的研究趋势以及热点，如采用不同工艺提高冶炼烟灰中各元素的选择性浸出率，分离其中有害元素(去除)及有价金属(回收)，这可能与人们环保意识的提高和对冶炼烟灰所带来的环境污染问题的关注有关。通过对不同时期的关键词进行总结，发现在 20 世纪末 21 世纪初研究者们开始意识到冶炼烟灰可能对环境和人类健康造成严重的影响，因此对其进行深入的研究和探索。他们关注冶炼过程中产生的废弃物和污染物，并寻求解决方案来减少或消除这些问题。随着时间的推移，研究者们对冶炼烟灰的研究变得更加广泛和深入，对废弃物的处理和再利用的关注越来越大，特别是在 2008 年至 2023 年期间，冶炼烟灰回收成为研究的热点之一。研究者们探索如何从冶炼废弃物中回收有价值的金属元素，以实现经济和环境的双重效益。例如，唐朝波等[12]创新了清渣技术，用于从含钴铜冶炼渣中回收有价值的金属。而 Katri Avarmaa 等人[13]则研究了高铝渣二次铜冶炼中的贵金属回收，通过使用富含氧化铝的硅酸铁渣进行二次铜冶炼，成功地实现了铜合金中贵金属的高效回收。综上所述，随着时间的推移，对冶炼烟灰的研究在环保和资源利用方面取得了显著的进展。从发文量的增长趋势可以看出，研究者们对这一领域的关注不断增加，致力于解决冶炼过程中产生的废弃物和污染物所带来的环

境和健康问题。对 1993~2023 年冶炼烟灰关键词频次进行统计发现, 1993~2000 年间研究论文的关键词“smelting reduction(还原熔炼)”出现频次最高, 大部分研究集中于解决还原熔炼技术在实际应用过程中存在的问题[14] [15] [16]。2000~2008 年研究论文中较高的频次的关键词主要为“pollution”、“children”、“blood lead”, 说明研究者开始关注冶炼行业对环境造成污染及其对人体造成的危害。Brian L. Gulson 等[17]对在铅冶炼厂附近居住的儿童的健康状况进行了连续十多年的研究, 发现该区域儿童的血铅水平在 10~42 $\mu\text{g}/\text{dL}$ 之间, 较正常血铅浓度 0~9.9 $\mu\text{g}/\text{dL}$ 高了五倍, 导致儿童出现贫血、智力下降、行为障碍、多动症、肾脏损伤等一系列较为严重的健康问题, 并呈逐渐升高的趋势。值得注意的是 2008~2023 年出现较多频次的关键词为“recovery”, 从冶炼废弃物中回收有价金属元素成为近年来的研究热点, 这与有色金属矿物品位的持续下降有关[18]。

4. 结论

(1) 在 1993~2023 年区间, 关于冶炼烟灰的相关文献的发文量在 WOS 上总体呈上升趋势, 从 1993 年的 16 篇增加到 2020 年的 149 篇, 共计 1792 篇。相关文献分别发表在 393 家期刊上, 其中 Science of the Total Environment 发文量最大, 达到 44 篇, 占总发文量的 2.46%, 其次是 Metallurgist, 发文量为 30 篇, 占总发文量的 1.67%, Environmental Pollution 排名第三, 发文量为 28 篇, 占总发文量的 1.56%。这些期刊都是冶炼烟灰研究领域的权威刊物, 反映了该领域的学术水平和影响力。共有 617 家研究机构开展了冶炼烟灰的相关研究, 其中发文量排名第一的是中国科学院, 共发表了 90 篇相关文献, 占总发文量的 5.52%, 其次是中南大学, 发文量为 33 篇, 占总发文量的 1.84%, 布拉格查尔斯大学排名第三, 发文量为 30 篇, 占总发文量的 1.67%。这些研究机构都是冶炼烟灰研究的领军者, 为该领域的发展做出了重要贡献。

(2) 关于冶炼烟灰这一研究领域共有 1105 名研究人员发表了相关文献, 其中发文量排名第一和第二的作者均来自布拉格查尔斯大学, 分别为 Vojtech Ettler 和 Martin Mihaljevic, 他们的发文量分别为 21 篇和 18 篇, 占总发文量的 1.17% 和 1.00%。他们的研究主要集中在冶炼烟灰的成分分析、环境影响评估、重金属迁移转化机制等方面。发文量排名第三的作者是刘国瑞, 来自中国科学院, 他的发文量为 9 篇, 占总发文量的 0.50%。他的研究主要集中在冶炼烟灰的综合回用、有害元素的分离脱除、资源化利用等方面。这些作者都是冶炼烟灰研究的领域专家, 他们的研究成果对该领域的发展有着重要的指导意义。

(3) 关于冶炼烟灰的相关文献中出现频次较高的关键词为“lead”、“pollution”、“dust”、“heavy metal”、“soil”等, 表明冶炼烟灰引起的环境污染尤其是土壤中重金属的污染问题是近三十年来的研究热点。冶炼烟灰中含有大量的铅等重金属, 这些重金属通过风化、淋溶等过程进入土壤, 造成土壤的污染和毒化, 对人体健康和生态环境造成严重的危害。因此, 对冶炼烟灰中的重金属进行监测、评价、控制和修复是该领域的重要任务。另外, “recovery”、“removal”、“separation”是近年来出现频次较高的关键词, 表明冶炼烟灰的综合回用以及有害元素的分离脱除是未来的研究趋势。冶炼烟灰中除了含有重金属等有害元素外, 还含有铜、锌、铁等有价值的金属, 以及硅、铝、钙等无机物, 这些物质可以作为资源进行回收和利用, 实现冶炼烟灰的减量化、无害化和资源化, 提高冶炼烟灰的附加值和环境效益。因此, 对冶炼烟灰中的有价值元素进行分离和提取, 以及对有害元素进行脱除和稳定, 是该领域的重要方向。

基金项目

国家自然科学基金, 基金号: 52104290。

参考文献

- [1] 张鹭鹭. 浅谈我国有色金属矿产资源开发循环经济的发展方向[J]. 世界有色金属, 2020(2): 236-237.
- [2] 王恭敏. 解决我国有色金属资源严重短缺的对策[J]. 世界有色金属, 2004(5): 4-8.
- [3] 程发良, 常慧. 环境保护基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] Xu, B., Ma, Y., Gao, W., *et al.* (2020) A Review of the Comprehensive Recovery of Valuable Elements from Copper Smelting Open-Circuit Dust and Arsenic Treatment. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, **72**, 3860-3875. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04242-0>
- [5] Soyseth, V., Johnsen, H.L. and Kongerud, J. (2013) Respiratory Hazards of Metal Smelting. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, **19**, 158-162. <https://doi.org/10.1097/MCP.0b013e32835ceeae>
- [6] 王林松, 高志勇, 杨越, 等. 铜渣综合回收利用研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(10): 5237-5250.
- [7] Avarmaa, K., O'Brien, H., Klemettinen, L., *et al.* (2019) Precious Metal Recoveries in Secondary Copper Smelting with High-Alumina Slags. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **22**, 642-655. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00955-w>
- [8] 任彦瑛. 中国铜矿资源的现状及潜力分析[J]. 中国金属通报, 2021(1): 5-6.
- [9] Sawai, H., Rahman, I.M.M., Tsukagoshi, Y., *et al.* (2015) Selective Recovery of Indium from Lead-Smelting Dust. *Chemical Engineering Journal*, **277**, 219-228. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.112>
- [10] Karimov, K.A., Naboichenko, S.S., Kritskii, A.V., *et al.* (2019) Oxidation Sulfuric Acid Autoclave Leaching of Copper Smelting Production Fine Dust. *Metallurgist*, **62**, 244-1249. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00781-3>
- [11] 袁佳, 张荣斐, 田佳, 等. 铜烟灰矿物学基因特性研究及选择性浸出工艺[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5): 83-88.
- [12] 唐朝波, 李云, 杨声海, 等. 铜钴冶炼渣还原造钼熔炼回收铜和钴[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(1): 1-5.
- [13] Avarmaa, K., Yliaho, S. and Taskinen, P. (2018) Recoveries of Rare Elements Ga, Ge, In and Sn from Waste Electric and Electronic Equipment through Secondary Copper Smelting. *Waste Management*, **71**, 400-410. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.037>
- [14] 周明. 鼓风炉法处理铅渣的实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2000(2): 9-11+15.
- [15] 周洪武. 熔渣炉的发展与特点[J]. 有色金属(冶炼部分), 1994(1): 39-41.
- [16] 孙铭良, 黄克雄, 马丹文, 等. 黄铁矿精矿对炼铜炉渣的贫化作用[J]. 有色金属(冶炼部分), 1996(4): 12-15+4.
- [17] Morrison, A.L., Swierczek, Z. and Gulson, B.L. (2016) Visualisation and Quantification of Heavy Metal Accessibility in Smelter Slags: The Influence of Morphology on Availability. *Environmental Pollution*, **210**, 271-281. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.030>
- [18] Tian, H., Guo, Z., Pan, J., *et al.* (2021) Comprehensive Review on Metallurgical Recycling and Cleaning of Copper Slag. *Resources, Conservation and Recycling*, **168**, Article ID: 105366. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105366>