

煤灰中提取稀土元素及产业化展望

苗晓鹏¹, 田亚峻^{2*}, 许德平¹, 曹建飞³

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083;

2. 北京低碳清洁能源研究所 工艺工程部, 北京 102211;

3. 中国工程院 战略咨询中心, 北京 100088)

摘 要:稀土元素是发展高科技必需的战略资源,然而稀土元素在全球范围内赋存量少而且分布极不均匀,寻找、发现、提取稀土元素对于国家的科技产业发展具有重要的战略意义。煤炭中常常伴生稀土元素,从煤灰中发现并提取稀土元素正在引起愈来愈多的关注。通过梳理近年来该领域的大部分研究工作,系统综述了稀土元素在煤灰中的赋存情况、以及从煤灰中提取稀土元素的方法;通过分析近五年来国外在该方面的政策和研究动态以及国内目前的研究基础,分析了该产业发展所面临的问题,对我国从煤灰中提取稀土元素的产业化进行了展望,希望对我国在该领域的发展提供参考。

关键词:稀土元素;煤灰;提取技术;产业化

中图分类号:X752

文献标识码:A

文章编号:1004-0277(2018)03-0124-08

“稀土”一词是十八世纪沿用下来的名称,因为当时用于提取这类元素的矿物比较稀少,而且获得的氧化物难以熔化,难以溶于水,也很难分离,其外观酷似“土壤”,而称之为稀土。稀土元素是镧系元素系稀土类元素群的总称,共有 17 种元素,包括 15 个镧系元素(lanthanide)、钇(yttrium, Y)和钪(scandium, Sc)。稀土元素在国民经济各行业有着广泛的应用,主要应用于冶金机械、石油化工、玻璃陶瓷、农业及电子信息、生物、新材料、新能源等高新技术产业^[1]。稀土在高科技领域有着无可替代的作用,在航天、军事以及新材料合成方面不可或缺,因为其具有优异的

光、电、磁、超导、催化等物理特性,能与其它材料组成性能各异、品种繁多的新型材料,因此有“工业味精”、“新材料之母”的美誉。据称当今世界每出现 4 种新技术,其一必与稀土有关。稀土的矿藏分布并不均匀,尤其是高浓度的稀土矿更是分布在少数的国家,因此,美国、日本等发达国家都将它作为战略元素。

煤炭是一种长期经受地质作用的化石,其中禀赋了一定含量的稀土元素。当煤炭燃烧后,其中的稀土元素在煤灰中得到富集。2010 年我国粉煤灰排放量为 4.8 亿吨,2015 年达到 5.75 亿吨。按照这样的速度增长下去,2020 年要增长到 6.58 亿吨以上,2030 年将高

收稿日期:2017-03-13

作者简介:苗晓鹏(1993-),男,陕西岐山人,硕士研究生,主要从事煤转化理论与技术的研究。

* 通讯联系人(E-mail:tianyajun@nicenergy.com)

DOI:10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.201803017

达 9.01 亿吨。目前我国粉煤灰的利用率一直徘徊在 70% 上下,边远地区和煤炭主产区面临的粉煤灰利用率低的问题十分严峻^[2]。目前煤灰主要应用在建筑、农业、化工等方面。在建筑方面主要作为混凝土、水泥等的填充材料;在农业方面主要用于土壤改良和肥料制作;在化工方面主要是提取煤灰中的元素进而合成化工产品。以煤灰作原料来提取高价值的稀土元素,不仅可以生产稀有战略物质,还有可能有效的解决煤灰这一主要的工业废弃物利用率低的问题,产生良好的经济效益和社会效益。

目前,从煤灰中发现并提取稀土元素正在引起世界各国越来越多的关注,尤其是美国、日本等稀土资源稀缺的国家。以美国为例,美国能源部(DOE)2010 年就制定布署了探索多样化稀土供应链的战略计划;2014 年,美国国会要求其能源部对煤灰中提取稀土元素进行可行性评估和分析,并布署了多项研发计划。而我国稀土资源储量占世界总储量的 23%,资源相对丰富,且产量占比高达 86.3%^[3]。尽管煤灰资源丰富,但在该方面刚刚起步,研究相对国外比较滞后。

1 煤灰中稀土元素的赋存情况

随着人们越来越多的关注废弃物的环境影响

和资源化利用问题,煤灰的再利用成为一大研究热点。近些年来,对于煤灰中稀土元素的含量测定,国外专家学者做了大量的研究工作。

Blissett R S 等^[4]分析了六种来自欧洲的电厂粉煤灰,发现来自英国的粉煤灰中稀土元素的含量接近商业开发的最低要求。Danuta Smolka-Danielowska^[5]利用中子活化分析法(INAA)分析了波兰的上西里西亚工业地区火电厂的无烟煤煤灰中稀土元素含量。Ross K Taggart 等^[6]选择了来自美国不同地区的近百种煤灰,采用 ICP-MS 法分析了煤灰中的主要元素含量,发现总的稀土元素含量远远高于常规矿物中的含量。Seredin VV^[7]等通过实验分析了来自于美国、中国、俄罗斯以及欧洲等多个国家的煤和煤灰样品中稀土元素的平均含量及其范围。

国内在这一方面也有一定的研究。雷平^[8]分析了贵阳电厂粉煤灰 PM10 颗粒物中稀土元素。刘文中等^[9]运用 ICP-MS 测定了 51 个淮南煤及其燃烧产物样品中稀土元素的含量,并对煤及其阶段燃烧产物的稀土元素含量进行了比较。姚多喜^[10]等采用 ICP-MS 法测试了不同煤种在不同燃烧条件下获取的飞灰、底灰等 29 个样品的稀土元素含量,分析了稀土元素地球化学特征。

表 1 世界各地区煤灰中稀土元素含量范围

Table 1 Rare earth element content in the coal ash in various areas of the world

Region	Σ RE/10 ⁻⁶	Region	Σ RE/10 ⁻⁶
UK ^[4]	246~481	Tadjikistan ^[7]	950~2113
Poland ^[4]	308~359	Russia ^[7]	841~8426
Lower Kittanning ^[11]	250~750	Belorussia ^[7]	5035
South Korea ^[12]	160~265	USA ^[7]	1460
Japan ^[12]	128	Southwest China ^[7]	804~1968
South Korea ^[13]	188~587. 2	Inner Mongolia ^[7]	721~1247
South Korea ^[14]	294. 87	Yunnan ^[7]	1018~1465
Poland ^[15]	101. 12~543. 08	Guangxi ^[7]	948~1180
Appalachian ^[6]	591	Huainan ^[9]	491~2282
Illinois ^[6]	403	Xiaolongtan Basin ^[10]	46. 6~181
Powder River basin ^[6]	337	Liupanshui ^[10]	166~441
Mongolia ^[7]	2263	Songzao ^[10]	63. 8~640

注:①文献[7]中稀土元素含量以稀土氧化物计算②单个数值指平均值

表 1 汇总了世界各地煤灰中稀土元素的含量范围或平均值,数据均来自已公布的文献资料。可以看到源于不同的地区,不同煤种的煤灰,其稀土元素的含量也千差万别。但总的来说,煤炭在燃烧后,稀土元素在煤灰中的含量较原煤有明显的提升,增加幅度为几倍到二十多倍不等。煤灰中稀土元素的含量(以稀土氧化物计)平均约为 1723×10^{-6} ,最高可达 8426×10^{-6} [7]。而其含量不仅与原煤的产地、种类和其中的稀土含量有关,还与燃煤方式、燃煤温度等多种人为因素相关。

2 煤灰中提取稀土元素方法

从煤灰中提取稀土元素一般采用酸浸法,将煤灰浸于硫酸、盐酸、硝酸等强酸中,煤灰中的稀土元素会以离子的形式进入酸浸液中。然后采用沉淀法、溶剂萃取法、萃淋树脂法等将稀土元素从溶液中分离出来。

2.1 煤灰中稀土元素浸出

先对煤灰进行研磨、干燥等预处理,然后将其浸于盐酸、硫酸等强酸中。煤灰中的大多数金属氧化物(包括稀土金属)会与强酸反应,控制合适的酸浸温度和接触时间,此时,稀土离子被浸出进入酸液中。

对于酸浸这个过程,稀土元素的浸出率是整个过程的重要指标。如果煤灰中稀土元素含量很高,但是大多数稀土元素不能被浸出,其酸浸出率很低。后续从溶液中回收稀土,即使回收率再高,也意义不大。因此国外专家在这方面做了很多工作。

Josiane Ponou 等 [16] 采用浓盐酸来浸取,分别采用不同浓度的盐酸溶液溶解粉煤灰中的稀土和其它金属元素,结果表明当盐酸浓度为 2.5 mol/L 时,稀土元素的浸出率最高。而 Ross K Taggart 等 [6] 使用硝酸溶液来浸取,分析了不同煤灰样的稀土元素在硝酸中的浸出情况,研究发现稀土元素的浸出率与煤灰中总的稀土元素含量并无直接关系,而可能与煤灰样品中的钙元素含量有关。Shunsuke Kashiwakura 等 [17] 采用硫酸作为溶剂来溶解煤灰中的稀

土元素,探索了稀土元素溶解过程中可能的机理,并采用未反应核模型(unreacted core model)对该过程进行了理论性解释。

J Całus Moszko 等 [18] 研究了不同的酸在浸取稀土元素时的区别,采用体积分数为 10%、30% 的硝酸、王水、氢氟酸,先王水后氢氟酸这几种酸,测定了酸浸后酸液中稀土元素的离子浓度。结果表明,采用先王水后氢氟酸的酸浸方法效果最优。

国外学者对于煤灰中稀土元素的酸浸研究主要可概括为下面三个方面:煤灰成分的影响、酸种类的影响以及酸浓度的影响。通过对多种影响因素的深入研究,最终可探索出较优的酸浸方法,以使煤灰中的稀土元素尽可能的完全溶出,这也为之后从酸浸液中分离提取稀土元素提供了有价值的依据。

而国内的在这方面仅仅局限于简单的应用,并未做深入的研究分析。如刘汇东等 [19] 采用碱法烧结-分步浸出法联合提取粉煤灰中稀有金属镓-铋-稀土,其中稀土元素的浸出采用了盐酸酸浸的方法。陈博 [20] 等在研究煤矸石中稀土元素的提取富集工艺时,酸浸过程也采用盐酸来提取稀土元素。中国神华能源有限公司的最新专利 [21] 《一种从粉煤灰中提取镧的方法》中,也是采用盐酸酸溶的方法来得到稀土混合液。

2.2 煤灰基溶液中稀土元素的分离

从煤灰基稀土溶液中分离稀土元素的方法主要有草酸沉淀法 [20,22]、溶剂萃取法 [21~24]、萃淋树脂法 [21,23] 等。此外,生物质吸附法、光束照射法等新的方法也被提及。如 Josiane Ponou [17] 采用 $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 碳化后的银杏叶做吸附剂,从氯化稀土溶液中提取稀土元素,探讨了 pH 值、吸附时间、解吸过程对 Er 离子选择性回收的影响。Tran X Phuoc [25] 等理论性分析探讨了采用光束照射产生的力来从粉煤灰中回收稀土金属的可行性。

目前国外对于从煤灰中提取稀土元素的研究主要集中在酸浸溶出稀土金属的过程,对于从溶出液中如何进一步提取稀土元素研究较少。而国

内对煤灰中提取稀土时的酸浸过程的研究几乎没有。虽然有部分学者研究了从煤灰基稀土溶液中分离富集稀土元素,但大多采用沉淀法从粉煤灰酸浸液中提取出了稀土,而且所得的都是价值低的混合稀土氧化物。要想得到单一的稀土元素,使该产业更快的实现工业化,还需更多的研究者在溶剂萃取法、萃淋树脂法等方向上进行更深入的研究。

3 煤灰中多种元素的联合提取

煤灰的主要化学成分为二氧化硅,氧化铝和氧化铁,其它如氧化钙、氧化镁、氧化钠、氧化钾等含量较小。从煤灰中提取稀土元素时,煤灰中的其它成分对稀土元素的提取有很大影响^[6]。如果在提取稀土之前可以将粉煤灰中的其它有价值的成分提取出来,不仅可以生产其它有价值的产品,而且可以提高稀土元素的提取率。

刘汇东^[18]等采用碱法烧结-分步浸出实验,研究了安稳电厂粉煤灰中稀有金属 Ga、Nb、RE 的联合提取。其基本流程如下:首先通过碱法烧结使稀

有金属 Ti、Ga、Nb、RE 的载体矿物在高温下与无水碳酸钠反应、分解,形成可溶于水或酸的化合物;再依次经过水浸、酸浸溶出,实现不同稀有金属元素的分离和富集。

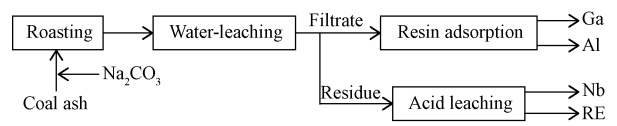


图 1 煤灰中 Ga、Nb、RE 联合提取流程^[13]

Fig. 1 The technology of combined extracting Ga, Nb and RE from the coal ash^[13]

陈博^[19]等在提取煤矸石中的硅、铝的同时提取了稀土元素。基本流程是先对煤矸石进行酸浸处理,矸石中的铝、铁及稀土元素会溶于酸液中。过滤,滤渣用于提取硅,在滤液中加入氢氧化钠,控制 pH 值使铁、钛和稀土元素离子沉淀下来。再次过滤,滤液用于提取铝。然后采用盐酸将滤渣溶解,在溶解液中加入草酸丙酮使得生产草酸盐稀土沉淀。过滤,将得到的草酸盐稀土沉淀物高温煅烧,便可以得到稀土氧化物。

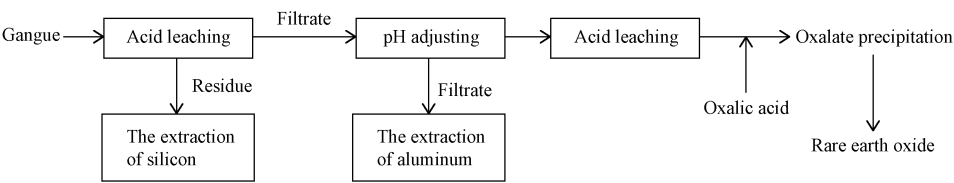


图 2 矸石中 Si、Al、REE 联合提取流程^[14]

Fig. 2 The technology of combined extracting Si, Al and RE from the gangue^[14]

美国 Orbite 技术公司对稀土元素的提取、粉煤灰的资源化利用研究很多。其在最新的专利^[24]中就涉及到了从粉煤灰中联合提取硅、铝、铁、稀土元素、稀土元素的方法和流程。

对于煤灰中多种元素的联合提取,研究的基本流程都是先通过酸浸处理以及碱法沉淀来提取煤灰中占比较大的硅或铝元素。然后再通过沉淀法、萃取法、萃淋树脂法等方法分离出稀土元素。目前我国已有从粉煤灰中提取 Si、Al、Ga 的中试装置,如

果能将分离提取稀土元素的过程与其相结合,使得粉煤灰中的有价元素尽可能的被回收利用,实现粉煤灰的分级、高效利用,必然会带来可观的社会效益和经济效益。

4 产业化现状与思考

4.1 煤灰中提取稀土元素产业化现状

随着国内外专家学者对于煤灰的研究不断深入,一系列的从粉煤灰中提取有价元素的技术

被开发出来,这给煤灰的资源化利用提供了可能。传统矿物的匮乏以及原料价格的上涨也使得人们看到了以煤灰为原料提取硅、铝、稀有金属、稀土金属等有价元素的商业价值。目前我国已有以煤灰提取铝(蒙西集团 40 万吨、神华集团 100 万吨、大唐 20 万吨)、硅(中煤平朔 20 万吨白炭黑)、稀有元素镓(神华准能 4000 吨)等的工业生产装置。

而煤灰中提取稀土元素产业化方面,美国取得了较快的进展。2015 年美国能源部就征集了来自大学、国家实验室和企业的 10 个相关项目,并进行资助。肯塔基大学已在肯塔基州和美国东南地区收集煤炭和煤灰样本,且进行了一些分离稀土元素的中试^[26]。根据美国能源部的研究部署,预计 2020 年就可以开展大规模测试,到 2025 年可以投建规模化工业生产装置^[27]。

4.2 煤灰中提取稀土元素的主要思考

4.2.1 技术性问题

目前,从粉煤灰中提取稀土元素面临的最大问题是技术问题,国内外都还处于研究阶段。美国的进展相对较快,其研究机构在政府的支持下,正在开展多个该方面的项目,目前已经有中试装置出现。国内的研究还处于灰中稀土元素的含量及赋存状态的研究方面。国内的研究还存在资源量、空间状况、赋存情况还没有摸清等问题,且我国的成煤条件复杂,很难找出一个适用于所有矿床粉煤灰的通用技术与方法,所以还需要研究工作者开展大量的研究工作。

4.2.2 经济性问题

阿巴拉契亚美国能源研究中心(AAERC)研究发现从粉煤灰中提取高价值的战略金属其成本可低于 200 美元/吨。而 Neumann Systems 公司初步评估了粉煤灰中所包含可提取金属的潜在价值,大约为 400~750 美元/吨^[28]。着眼于稀土元素,按照目前市场价格水平,某些富含镓和铋的煤炭产生的粉煤灰价值分别可以达到每吨 245 美元和 210 美元。由此可见,从煤灰中提取稀土元素具有一定的

商业前景^[29]。

然而项目是否盈利和其原料、工艺、成本、物流、市场、供应链等环节息息相关,仅仅评价煤灰中可提取稀土元素的价值并不可靠。而且该方面的技术尚处于研究阶段,技术不成熟,所以其经济可行性还有待验证。

4.2.3 环境性问题

从煤灰中提取稀土元素时,必须权衡其对环境的潜在影响。一方面,该过程以煤炭燃烧后的固体废弃物作为原料,本身就是一种有益于环境的技术。另一方面,在整个提取过程中会产生多种新的废物,污染环境。如果能有效的处理和控制在这些新的污染物,定会使该技术变得更加高效、可持续。因此,必须注意到以下几个方面的影响^[30]:①煤灰的储运过程环境影响②稀土的提取与回收过程环境影响③稀土金属的环境风险。

5 结语

煤灰中提取稀土元素不仅可以有效的缓解固体废物煤灰大量堆积所带来环境问题,也可以生产出高价值稀土产品。目前从粉煤灰中提取稀土元素这一方向上国内外的研究重点主要有煤灰中稀土元素的赋存情况,煤灰中稀土元素的浸出以及煤灰基酸浸液中稀土元素的分离这三个方面。有些学者还将其与煤灰中其它有价元素提取相结合,以期实现煤灰的分级、高效利用。近五年来,该方向的产业化研究也取得了较快的进展,国内外都有煤灰中提取稀土元素的专利出现,美国已有中试装置出现。随着专家学者研究的不断深入以及相关问题的改善或解决,相信我国很快会有从粉煤灰中提取稀土元素的工业化装置的出现。煤灰中提取稀土元素的产业化不仅可以扩展我国稀土产品的原料供应链,提升我国在世界稀土行业中的话语权,而且对于国家的科技产业发展具有重要的战略意义。

参考文献:

- [1] 罗非.我国稀土供需预测研究[D].北京:中国地质大学(北京),2007.
Luo F. Research on China's Rare Earth Supply and Demand Forecasting [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007.
- [2] 崔源声.中国粉煤灰利用现状及2050年展望[A].2014亚洲粉煤灰及脱硫石膏综合利用技术国际交流大会论文集[C].朔州,2014
Cui Y S. Present situation and prospect of fly ash utilization in China [A]. 2014 International Fly Ash and Desulfurization Gypsum Comprehensive Utilization Conference Proceedings [C]. Shuozhou, 2014, 1-4.
- [3] 李振民,刘一力,李平,等.世界稀土供应趋势分析[J].稀土,2016,37(6):146-154.
Li Z M, Liu Y L, Li P. Analysis of global rare earth supply trend [J]. Chinese Rare Earths, 2015, 37(6): 146-154.
- [4] Blissett R S, Smalley N, Rowson N A. An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content [J]. FUEL, 2014, 119: 236-239.
- [5] Danuta Smolka-Danielowska. Rare earth elements in fly ashes created during the coal burning process in certain coal-fired power plants operating in Poland Upper Silesian Industrial Region [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101: 965-968.
- [6] Ross K Taggart, James C Hower, Gray S Dwyer, et al. Trends in the rare earth element content of U.S.-based coal combustion fly ashes [J]. Environment Science Technology, 2016, 50, 5919-5926.
- [7] Vladimir V Seredin, Shifeng Dai. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium [J]. International Journal of Coal Geological, 2012, 94(5): 67-93.
- [8] 雷平.粉煤灰中稀土元素的扫描电镜/能谱特征研究[J].电子显微学报,2014,33(5):441-444.
Lei P. Study on characteristics of rare earth elements in fly ash with SEM/EDS [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2014, 33(5): 441-444.
- [9] 刘文中,陈萍,陈健,等.淮南煤及其燃烧产物中稀土元素丰度的比较[J].煤炭学报,2009,34(6):814-818.
Liu W Z, Chen P, Chen J, et al. Comparison on abundance of rare earth elements in Huainan coals and their combustion products [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 814-818.
- [10] 姚多喜,支霞臣,王馨.煤及其燃烧产物飞灰和底灰中稀土元素地球化学特征及集散规律[J].地球化学,2003,25(3):491-500.
Yao D x, Zhi X C, Wang X. Geochemical feature and laws of concentration and dispersion of rare earth elements between coals and their fly and bottom ash [J]. Geachemical, 2003, 25(3): 491-500.
- [11] Steven J Schatzel, Brian W Stewart. Rare earth element sources and modification in the Lower Kittanning coal bed, Pennsylvania: implications for the origin of coal mineral matter and rare earth element exposure in underground mines [J]. International Journal of Coal Geology, 2003, 54: 223-251.
- [12] Thenepalli Thriveni, Yujin Jegal, Ji Whan Ahn. Characteristic Studies of Yttrium Extracted from Coal Ash, SoutKorea [OL]. <http://www.inase.org/library/2015/barcelona/bypaper/EEED/EEED-03.pdf>, 2015/2017-03-12.
- [13] Seok-Un Park, Jae-Kwan Kim, Yeon-Seok Seo, et al. Review on evaluation of rare earth metals and rare valuable metals contained in coal ash of coal-fired power plants in Korea [J]. KEPCO Journal on Electric Power and Energy, 2015, 1(1): 121-125.
- [14] Randolph E Kirchain, Bart Blanpain, Christina Mesker, et al. REWAS 2016 [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2016: 121-127.
- [15] W Franus, MM Wiatrosmotyka, M Wdowin. Coal fly ash as a resource for rare earth elements [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(12): 94-118.
- [16] Josiane Ponou, Gjergj Dodhibi, Ji-Whan Anh, et al. Selective recovery of rare earth elements from aqueous solution obtained from coal power plant ash [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016, 4: 3761-3766.

- [17] Shunsuke Kashiwakura, Yuichi Kumagai, Hiroshi Kubo, et al. Dissolution of rare earth elements from coal fly ash particles in a dilute H_2SO_4 solvent[J]. Open Journal of Physical Chemistry, 2013, 3: 69-75.
- [18] J Całus Moszko, B Białecka, M Cempa-Balewicz. Evaluating the possibilities of obtaining initial concentrates of rare earth elements (REEs) from fly ashes[J]. Metalurgia, 2016, 4(55): 803-806.
- [19] 刘汇东, 田和明, 邹建华. 粉煤灰中稀有金属镓-铌-稀土的联合提取[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 39-43.
Liu H D, Tian H M, Zou J H. Combined extraction of rare metals Ga-Nb-REE from the fly ash[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(11): 39-43.
- [20] 陈博, 来雅文, 肖国拾, 等. 煤矸石中稀土元素的提取富集工艺[J]. 世界地质, 2009, 28(2): 257-260.
Chen B, Lai Y W, Xiao G S, et al. Technique for extraction and concentration of rare earth elements in gangue[J]. Global Geology, 2009, 28(2): 257-260.
- [21] 郭昭华, 王丹妮, 池君洲, 等. 一种从粉煤灰中提取镧的方法[P]. 中国: CN105969994A. 2016-09-28.
Guo Z h, Wang D N, Chi J Z, et al. A method of extracting lanthanum from fly ash[P]. China: CN105969994A. 2016-09-28.
- [22] 张庆龄. 煤灰中稀土元素的富集[J]. 陕西煤炭技术, 1992, 2: 26.
Zhang Q L. The enrichment of rare earth elements in coal ash[J]. Shaanxi coal technology, 1992, 2: 26.
- [23] 董秋实. 粉煤灰酸浸液中镧的分离富集技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2016.
Dong Q S. Study on the technology of separation of lanthanum from acid leaching solution of fly ash[D]. Jilin: Jilin University, 2016.
- [24] R Boudreault, J Fournier, R Simoneau, et al. Processes for extracting rare earth elements from various ores[P]. US: 9410227B2. 2016-08-09.
- [25] Tran X Phuoc, Ping Wang, Dustin McIntyre. Discovering the feasibility of using the radiation forces for recovering rare earth elements from coal power plant by-products[J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26: 1465-1472.
- [26] 产业前沿. 求稀土若渴-美国和煤灰杠上了[OL]. <http://toutiao.com/i6300408476094956034/>, 2016-06-26/2017-03-06.
Industry forefront. Thirst for rare earth-The United States saw the coal ash [OL]. <http://toutiao.com/i6300408476094956034/>, 2016-06-26/2017-03-06.
- [27] 李桂菊, 陈欢欢. 美拟从煤炭回收稀土元素[OL]. <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2014/10/293088.shtml>, 2014-10-21/2017-03-06.
Li G J, Chen H H. United States intends to recover rare earth elements from coal[OL]. <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2014/10/293088.shtml>, 2014-10-21/2017-03-06.
- [28] Currie A. Rare Earth from Fly Ash: A Method Explored[OL]. <http://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/rare-earth-investing/rare-earth-from-fly-ash-a-method-explored/>, 2012-06-25/2017-03-06.
- [29] Lucinda Tolhurst. 从粉煤灰中提取金属的商业性研究[OL]. <http://oicwx.com/detail/623485>, 2015-12-14/2017-03-06.
Lucinda Tolhurst. Commercial research on extracting metals from fly ash [OL]. <http://oicwx.com/detail/623485>, 2015-12-14/2017-03-06.
- [30] Mayfield DB, Lewis AS. Environmental review of coal ash as a resource for rare earth and strategic elements[A]. 2013 World of Coal Ash (WOCA) Conference Proceedings[C]. Lexington, 2013, 22-25.

Extraction of Rare Earth Elements from Fly Ash and Industrial Prospects

MIAO Xiao-peng¹, TIAN Ya-jun^{2*}, XU De-ping¹, CAO Jian-fei³

- (1. China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China;
- 2. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China;
- 3. Center for Strategic and International Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract:Rare earth elements are the necessary strategic resources for the development of high technology. However, rare earth elements are rare and unevenly distributed around the world. Finding, discovering and extracting rare earth elements are of strategic importance for the development of technology industry in China. Rare earth elements are often associated with coal, and the discovery and extraction of rare earth elements from coal ash is attracting more and more attentions. This paper reviews the recent development of research work in this field, and summarizes the occurrence of rare earth elements in coal ash and the extraction method. Through the analysis of policy and research trends of foreign countries in the past five years and the current research foundation in China, issues of the industrial development were analyzed and the industrialization of extracting rare earth elements from coal ash in China is prospected. It can provide reference for the development in this field in China.

Key words:rare earth elements; coal ash; extraction technique; industrialization