

战略矿产能源专题——煤

褐煤中伴生低品位锆资源化利用研究进展

李国娟¹, 曹洪杨²

(1. 广东省科技图书馆(广东省科技信息与发展战略研究所), 广东 广州 510070;
(2. 广东省稀有金属研究所, 广东省稀土开发及应用研究重点实验室, 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东省有色金属废料资源化利用与无害化处置工程技术研究中心, 广东 广州 510651)

摘要: 随着战略性新兴产业的快速发展, 社会对稀散金属锆的需求量日益增加。作为锆的一种重要矿产来源, 含锆褐煤的资源化高效利用日益受到重视。本文主要介绍了我国褐煤中锆资源的储量、分布及利用现状, 重点介绍了含锆褐煤中伴生低品位锆资源化利用技术研究进展。分析了锆资源化提取过程存在的问题, 对褐煤中伴生低品位锆资源的高效利用提出建议。

关键词: 褐煤; 锆; 低品位; 资源化利用

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.02.011

中图分类号: TD989; TF843 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2021) 02-0052-06

锆是一种高价值的稀散元素, 亦是重要半导体材料, 已成为当代信息通讯、红外光学、薄膜太阳能电池、催化剂、半导体、生物医学等战略性新兴产业的重要基础材料^[1-2], 2015年起被国家作为战略性金属资源进行收储。锆因其所具有的亲硅、亲铁、亲硫、亲有机的化学性质, 自然界中鲜有独立矿床, 一般以分散状态伴生分布在铅锌矿、煤矿等大宗矿产资源中, 其禀赋低、储量大、赋存状态分散的特性, 造成锆资源难以直接高效提取^[3-4]。随着战略性新兴产业的迅猛发展、全球市场对锆的需求量显著增长。如何科学利用不可再生的战略性锆资源, 已成为科研工作者关注的焦点。

1 褐煤中锆资源储量及分布

我国褐煤保有储量达 1300 亿 t, 其中锆的资源储量约 8000 ~ 10000 t^[5], 主要分布在云南省滇西地区、内蒙古盟胜利煤田和呼伦贝尔盟伊敏煤田, 其中滇西主要 4 大含锆褐煤矿区帮卖矿区、腊东矿区、芒回矿区及等嘎矿区经过近 40 年开发利用, 锆资源已近枯竭^[6-7]。内蒙地区仅锡林郭勒盟乌兰图嘎矿区探明锆金属量已达 3332.45 t, 约占世界已探明锆储量的 30%, 已成为继云南之后新的中国锆都, 但其锆品位较低(一般低于 200×10^{-6})。工艺矿物学研究结果表明, 以乌兰图嘎矿区为代表的内蒙古地区含锆褐煤主要矿物为石英、蒙脱

收稿日期: 2020-01-14; 改回日期: 2020-02-24

基金项目: 广东省科学院专项项目(2019GDASYL-0105079、2020GDASYL-20200402、2019GDASYL-0302011、2019GDASYL-0402003、2017GDASCX-0110、2018GDASCX-0110、2017G1FC0007); 国家自然科学基金(51804083、51704081、21906031); 国家重点研发计划(2018YFC1903104); 广州市科技计划(201904010106); 韶关市科技计划(2018CS11909)

作者简介: 李国娟(1985-), 女, 硕士, 主要从事科技政策和科技情报研究。

通讯作者: 曹洪杨(1980-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 研究方向为三稀金属分离与高值化利用, E-mail: caohongyang2004@163.com

石, 次要矿物为长石、高岭石、伊利石, 同时含有少量三水铝石、角闪石、锐钛矿、黄铁矿, 及微量的锆石、闪锌矿、白钨矿、黄铜矿等, 尚未发现独立的含锆矿物相。学界普遍推测内蒙古地区含锆褐煤中锆主要以有机锆形式存在。内蒙古地区含锆褐煤早期锆品位在 400 g/t 左右, 经过十余年开采, 锆品位已降至 200 g/t, 可开采性逐年下降。

2 褐煤中锆资源的提取工艺

褐煤中锆资源提取包括湿法和火法两大类处理技术。褐煤中锆的存在形式以有机锆为主, 无机矿物形式存在的锆占比较少, 锆主要被煤中的碳所吸附或被腐殖酸螯合。因此, 褐煤中锆的提取主要采用火法将锆转移至烟尘或炉渣中得到锆的富集物, 再经经典氯化蒸馏工艺提取锆。火法燃烧工艺温度与空气含量不同, 锆的存在形式也不同。当褐煤在过量空气中氧化燃烧时, 锆主要以 GeO_2 和硅锆酸盐结构进入炉渣, 少量锆以 GeO 和 GeS 形式挥发进入烟气。燃烧温度越低, 炉渣中锆含量越高; 当褐煤在空气不足的弱还原性气氛下高温燃烧, 锆则主要以高沸点 GeO 形式挥发富集进入烟气。高温还原挥发已成为含锆褐煤提锆的主要工艺, 主体设备为链条炉(近年来为强化挥发, 部分生产企业改用燃烧温度更高的旋涡炉), 褐煤在炉内燃烧, 锆被还原成 GeO 进入烟尘, 烟尘中锆品位可达 1%, 锆富集比近 100, 锆的回收率达 90%。该工艺已在国内外大规模使用, 云南临沧鑫园公司采用该技术每年从褐煤中提取约 10 t 的金属锆, 锡林郭勒通力锆业有限公司年处理 30 万 t 褐煤实现年提取金属锆 30 t 的产能。国外大多数工厂亦主要采用火法从煤中提取锆, 如美国矿务局、Georgia Marble 公司以等^[24]。

高温还原挥发所得含锆烟尘作为氯化蒸馏原料, 其锆品位的高低, 直接影响氯化蒸馏工艺操

作与生产成本。就目前处理锆品位 1% 的烟尘, 氯化蒸馏阶段盐酸用量高、中和成本高、蒸馏残液锆含量高、蒸馏残渣量大等问题仍然突出, 工业生产成本高。如何提高烟尘中锆品位, 已成为低品位含锆褐煤高效、低成本工业化提锆迫切需要解决的技术瓶颈。

2.1 湿法提锆工艺

湿法提锆主要采用盐酸氯化蒸馏工艺, 在将原煤磨碎调浆后, 在加热条件下向浆料中加入浓度大于 7 mol/L 的高浓度盐酸溶液, 将煤中锆直接浸出蒸馏得到四氯化锆^[8]。该工艺较为经典成熟, 锆回收率可达 90%, 但盐酸浓度高且消耗量大、工业成本高, 蒸馏残液盐酸浓度高、且含量一定量砷和铁等杂质, 难回用、难处理, 因此不适合规模化生产。

2.2 燃烧法提锆工艺

燃烧法是目前含锆褐煤提锆的主要工艺^[9-10], 火法燃烧富集可实现含锆褐煤初步分离提锆。火法提锆流程是将含锆褐煤在氧化气氛中燃烧, 因褐煤中含有大量的碳, 燃烧过程可形成一定程度的还原条件, 使褐煤中锆以易挥发的一氧化锆形式挥发到烟尘中, 一氧化锆极易氧化, 经布袋收尘得到二氧化锆形式的含锆烟尘, 烟尘中锆含量一般在 0.3% ~ 1.2%。火法提锆的主体设备为传统链条炉、旋涡炉及改进型链排炉等^[11-12]。传统链条炉火法工艺锆的回收率较低, 一般在 60% 左右, 而采用改进型旋涡炉火法工艺, 锆的回收率可达 85%, 但由于旋涡炉工艺强化了褐煤燃烧行为, 反应温度可达 1300℃, 极高的反应温度使锆充分挥发的同时, 也使得锆极易为二氧化硅所包裹, 形成锆硅共溶体, 使得后续氯化蒸馏提锆难度增大。

2.3 干馏提锆法

燃烧法提锆是目前从褐煤中提取锆的主要方法, 大多在电厂使用, 在热能得到高效利用的同时, 也使褐煤中锆得到有效分离, 但不适用于缺乏锅

炉和发电设备的中小锆企业。而干馏法却较为适合中小锆企业,干馏法再将锆挥发分离的同时,可得到冶金级副产品焦炭^[13]。冯林永等^[14]采用干馏法处理煤矸石,在 1000℃ 下干馏 5 h,锆的挥发率达 86.1%。干馏法与燃烧法相比,反应温度略低、且可以得到优质的冶金级焦炭,但锆的挥发率不及燃烧法,原因在于干馏过程中,褐煤在高温条件下会分解释放出大量的 CO 和 H₂,干馏器中呈强还原性气氛,褐煤中二氧化锆向一氧化锆的转化趋势降低,而向金属锆的深度还原趋势走强,因褐煤中锆分散赋存特性,使得深度还原的金属锆细小颗粒难与含硅物相分离,导致锆的挥发率难以有效提高。如何控制干馏过程反应器中的还原性气氛程度,是提高锆挥发率的有效途径,需要进一步深入研究。

2.4 微生物提锆法

褐煤的碳化程度低,大部分锆以大分子有机配合物形式存在,在一定介质条件的微生物,褐煤中有机锆可被微生物分解成易溶于酸、碱的简单锆离子进入溶液,进而分离提锆^[15-16]。罗道成^[17]采用球菌和水霉菌分解褐煤中有机锆,将破碎至 0.2 ~ 1.5 mm 的原煤用细菌浓度为 10⁹ 个/mL 的微生物浸出液浸出 8 ~ 10 d,锆的浸出率达到 85%,并对微生物浸出锆的机理进行研究,认为褐煤中有机锆的浸出过程分为有机锆分解-碳吸附及锆的解析两个过程,为原地浸出提锆提供了技术基础。从环保角度,微生物法是未来含锆褐煤资源化提锆的发展方向,但含锆褐煤储量大、锆品位低,如何克服微生物法周期长、处理规模小以及原地浸出过程微生物的收集,是微生物法急需解决的技术难题。

3 含锆烟灰中锆的二次富集研究

含锆褐煤火法燃烧工艺所得含锆烟灰中锆品位一般低于 1.0%,直接氯化蒸馏,需要消耗大量

盐酸,同时烟灰中锆硅共溶体的存在,为氯化蒸馏造成阻碍。如果高效破解锆硅共溶体对锆的包裹,进一步提高锆富集物中锆品位,已成为当今锆冶炼行业的共性难题。

二次富集已成为含锆烟灰高效利用的突破口,主要采用再次挥发手段,将含锆烟尘制团后放入鼓风炉或竖炉中进行二次燃烧,得到更高品位的锆富集物。

3.1 控气氛还原挥发法

陈少纯等^[18]通过对含锆褐煤中锆赋存状态的分析,提出了含锆褐煤一次挥发烟尘控气氛还原挥发理论,即在弱还原气氛条件下,使含锆烟灰中锆再次还原成一氧化锆进入二次烟灰中,实现锆硅的二次分离。在实验室条件下,采用控气氛弱还原挥发技术,可得到锆品位 25.32% 的锆富集物,锆回收率达 90%,显著提高锆的富集比。有效降低二次烟尘的灰分,也是提高锆品位与富集比的有效方法。借鉴钢铁冶炼团矿技术,将一次烟尘与粉煤、粘结剂一起制成球团,通过改变物料配比提高球团烧结强度,从而降低二次烟尘中灰分提高锆品位。金明亚等^[19]考察了膨润土、羧甲基纤维素等粘结剂对球团强度和锆挥发性影响,认为膨润土是较为理想的粘结材料,所制球团在链条炉中可以保持稳定结构,球团中粉煤在高温下与烟灰中锆硅共熔体充分接触反应,提高了锆的挥发率,降低了二次烟尘中灰分含量。笔者^[20]根据锆化合物的挥发特性,提出采用黄铁矿作为还原剂,使锆在高温下以 GeS 形式挥发,得到锆品位大于 15.22% 的锆富集物。目前相关研究正在内蒙某锆生产企业进行工业化实验研究。

3.2 烟化挥发法

烟化挥发是有色冶炼中常用的一种富集分离技术,可应该用于含锆烟尘的二次富集提锆^[21]。对于低锆高硅高熔点的旋涡炉含锆烟尘,采用直接烟化技术处理难度较大,因为旋涡炉烟尘是在

极高温下所形成的锗硅固溶体,须在高温熔融条件下解离后才能为碳所还原挥发,为此需要配入溶剂以降低其熔点后还原挥发锗。在将含锗烟尘、铁矿石、熟石灰等按一定比例配料制粒后,用电炉在1300℃熔化4h后,将熔体转移至烟化炉,喷入混有煤粉的空气搅动熔体,加入料重3%的块煤作还原剂,在1150~1250℃烟化吹炼1h,锗的挥发率可达到96%,二次烟尘中锗品位可达4%左右,富集比近10倍。

3.3 氯化蒸馏法

含锗烟尘常见提锗方法为经典氯化蒸馏法^[22],即采用盐酸对含锗烟尘进行氯化蒸馏,锗已形成低沸点的四氯化锗(沸点78℃),其沸点较其他可溶物低,在氯化浸出条件下,四氯化锗易于优先蒸馏出来,经精制、水解得到高纯二氧化锗产品。

3.4 钠化焙解中和法

钠化焙解中和法适合处理富锗烟尘提锗^[23],在含锗烟尘中加入氢氧化钠或碳酸钠,在高温下钠化焙烧,使锗转化为酸溶性锗酸盐,钠化焙烧后,通过添加盐酸控制溶液pH值,得到二氧化锗沉淀,继而经氯化蒸馏-水解得到高纯二氧化锗。该工艺尽管能提高锗回收率,但多次中和操作,酸碱消耗量大,废液难处理。

4 褐煤中锗资源化利用存在问题及建议

锗作为信息通讯、太阳能电池、红外光学、航空航天等战略性新兴产业发展的关键基础材料,正以每年近20%的速度增长。作为一种重要的锗资源,含锗锗煤的资源化高效利用已受到更多关注。但目前从褐煤中提取锗的技术还不够成熟完善,相关生产设备的高效、自动化程度较低,生产成本较高、生产操作环境亟待改善。现有提锗方法主要针对高品位含锗褐煤的开发利用,而随着高品位含锗褐煤资源(锗含量>200 g/t)的开发殆尽,大宗低品位含锗褐煤(锗含量<100 g/t)

的高效绿色利用技术亟待开发;同时根据现有褐煤提锗企业生产实际,优化与改进高温收尘系统,避免高温细粒烟尘的穿滤,可有效提高锗的回收率。

5 结 论

笔者总结了褐煤中低品位锗资源提取利用的技术和生产现状,分析了各种提取技术的优缺点,认为低品位含锗褐煤控气氛二次挥发富集是较为可行的发展方向,既显著提高了二次烟尘中锗的品位,结合后续经典氯化蒸馏技术,可显著降低氯化蒸馏过程高浓度盐酸消耗,也可降低废酸、氯化残渣的产生量和处理成本,但如何对现有链条炉、旋涡炉结构及收尘系统进行改进,最大程度限制高温、细粒含锗二次挥发烟尘的高温穿滤行为,是提高二次富集效果的有效途径。

参考文献:

- [1] 邱定蕃,王城彦.稀贵金属冶金新进展[M].北京:冶金工业出版社,2019:268-269.
- QIU D F, WANG C Y. New progress in rare metal metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019: 268-269.
- [2] 曹洪杨,金明亚,张魁芳,等.锗离子印迹聚合物微球吸附材料的杂化制备及表征[J].中国有色金属学报,2017,27(9):1909-1915.
- CAO H Y, JIN M Y, ZHANG K F, et al. Synthesis and characterization of germanium ion imprinted polymer microspheres as adsorption materials [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(9): 1909-1915.
- [3] 王玲,李存国.褐煤中锗高效提取的实验研究[J].中国煤炭,2005,31(12):52-54.
- WANG L, LI C G. Experimental study on the efficient extraction of germanium from lignite [J]. China Coal, 2005, 31(12): 52-54.
- [4] 张苏江,季根源,王楠,等.中国锗矿资源现状及其可持续发展对策研究[J].矿产保护与利用,2017(2):6-12.
- ZFANG S J, JI G Y, WANG N, et al. Current situation and sustainable development countermeasures of germanium resources in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(2): 6-12.
- [5] 金明亚.低品位锗煤烟尘还原挥发富集锗工艺及机理研究[D].长沙:中南大学,2015.

- JIN M Y. Study on the Process and Mechanism of Germanium Enrichment by Reduction and Volatilization of Low Grade Germanium Coal Fumes [D]. Changsha: Central South University, 2015.
- [6] 邹艳梅, 王少龙, 张玉林. 云南省锗资源现状及开发利用对策研究 [J]. 材料导报, 2006, 20(11): 87-91.
- ZOU Y M, WANG S L, ZHANG Y L. Current situation of germanium resources and development and utilization countermeasures in Yunnan Province [J]. Materials Review, 2006, 20(11): 87-91.
- [7] 赵巍, 牛建兵, 时文中. 临沧褐煤富集氧化焙烧转化成含锗褐煤灰的研究 [J]. 天中学刊, 2009, 24(2): 16-18.
- ZHAO W, NIU J B, SHI W Z. Study on the conversion of Lincang lignite into lignite ash containing germanium by enrichment oxidation roasting [J]. Tianzhong Journal, 2009, 24(2): 16-18.
- [8] 徐东, 陈毅伟, 郭桦, 等. 煤中锗的资源分布及煤伴锗提取工艺的研究进展 [J]. 煤化工, 2013(4): 53-57.
- XU D, CHEN Y W, GUO H, et al. Research progress on the resource distribution of germanium in coal and extraction process of germanium from coal [J]. Coal Chemical Industry, 2013(4): 53-57.
- [9] 李存国, 周红星, 王玲. 火法提取煤中锗燃烧条件的实验研究 [J]. 煤炭转化, 2008, 31(1): 48-50.
- LI C G, ZHOU H X, WANG L. Experimental study on combustion conditions of germanium extracted from coal by fire process [J]. Coal Conversion, 2008, 31(1): 48-50.
- [10] 张小东, 赵飞燕, 郭招华, 等. 煤中稀有金属锗的提取技术研究进展 [J]. 无机盐工业, 2018, 50(2): 16-19.
- ZHANG X D, ZHAO F Y, GUO Z H, et al. Research progress on extraction technology of rare metal germanium from coal [J]. Inorganic Salt Industry, 2018, 50(2): 16-19.
- [11] 孙玉才. 浅析褐煤火法冶炼提锗技术的现状及改进措施 [J]. 内蒙古科技与经济, 2016(9): 74-75.
- SUN Y C. Analysis on the status quo and improvement measures of germanium extraction technology in lignite pyrometallurgical process [J]. Inner Mongolia Science, Technology and Economy, 2016(9): 74-75.
- [12] 康占君. 综述褐煤提锗冶炼技术的环保现状及可持续发展的方法 [J]. 内蒙古科技与经济, 2016(7): 106-107.
- KANG Z J. Review of environmental protection status and sustainable development methods of germanium extraction technology from lignite [J]. Inner Mongolia Science, Technology and Economy, 2016(7): 106-107.
- [13] 张家敏, 雷霆, 张玉林, 等. 用于馏方法提取褐煤中锗并制备焦炭的研究 [J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(12): 69-72.
- ZHNG J M, LEI T, ZHANG Y L, et al. Study on extraction of germanium from lignite and preparation of coke by dry distillation [J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(12): 69-72.
- [14] 冯林永, 雷霆, 张家敏, 等. 含锗褐煤综合利用新工艺研究 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2008(5): 35-37.
- FENG L Y, LEI T, ZHANG J M, et al. Study on a new technology for comprehensive utilization of lignite containing germanium [J]. Nonferrous Metals (Smelting Section), 2008(5): 35-37.
- [15] 朱云, 胡汉, 苏云生. 微生物从煤中浸出锗的基础热力学 [J]. 云南冶金, 2002, 31(3): 105-108.
- ZHU Y, HU H, SU Y S. Thermodynamics of leaching germanium from coal by microorganisms [J]. Yunnan Metallurgy, 2002, 31(3): 105-108.
- [16] 邹本东, 李晓燕, 陈圆圆, 等. 褐煤中锗的连续化学提取及形态分布研究 [J]. 中国检验检测, 2017(1): 20-22.
- ZOU B D, LI X Y, CHEN Y Y, et al. Study on continuous chemical extraction and speciation distribution of germanium from lignite [J]. China Inspection and Testing, 2017(1): 20-22.
- [17] 罗道成. 低品位含锗褐煤中锗的微生物浸出研究 [J]. 煤化工, 2007(4): 44-47.
- LUO D C. Study on microbial leaching of germanium from low-grade lignite containing germanium [J]. Coal Chemical Industry, 2007(4): 44-47.
- [18] 金明亚, 陈少纯, 曹洪杨. 还原挥发法从低品位含锗煤灰中提取锗 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2015(3): 50-53.
- JIN M Y, CHEN S C, CAO H Y. Extraction of germanium from low-grade coal ash by reduction and volatilization [J]. Nonferrous Metals (Smelting Section), 2015(3): 50-53.
- [19] 金明亚, 曹洪杨, 陈少纯, 等. 含锗煤烟尘造球粘结剂的选择 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2018(3): 35-38.
- JIN M Y, CAO H Y, CHEN S C, et al. Selection of binder for pelletization of coal fume containing germanium [J]. Nonferrous Metals (Smelting Section), 2018(3): 35-38.
- [20] 曹洪杨, 陈冬冬, 饶帅, 等. 低品位含锗褐煤烟尘二次富集提锗工艺研究 [J]. 有色金属 (冶炼部分), 2019(12): 30-34.
- CAO H Y, CHEN D D, RAO S, et al. Study on secondary enrichment and extraction of germanium from low-grade lignite fume [J]. Nonferrous Metals (smelting part), 2019(12): 30-34.
- [21] 陈少纯, 臧树良. 稀散金属冶金手册 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2018: 416.
- CHEN S C, ZANG S L. Handbook of Scattered Metal Metallurgy [M]. Changsha: Central South University Press, 2018: 416.
- [22] 王玲, 张云鹏. 煤中锗提取的方法与分析 [J]. 煤化工, 2005(6): 53-57.
- WANG L, ZHANG Y P. Method and analysis of germanium extraction from coal [J]. Coal Chemical Industry, 2005(6): 53-57.

[23] 雷霆, 张玉林, 王少龙. 锗的提取方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.

LEI T, ZHANG Y L, WANG S L. Extraction Method of Germanium [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.

[24] 冯林永, 雷霆, 杨显万, 等. 含锗褐煤的利用现状 [J].

中国有色冶金, 2006(4):50-53.

FENG L Y, LEI T, YANG X W, et al. Current situation of utilization of lignite containing germanium [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2006(4):50-53.

Research Process in Resource Utilization of Associated Low-grade Germanium in Lignite

Li Guojuan¹, Cao Hongyang²

(1.Science and Technology Library of Guangdong(Guangdong Institute of Science and Technology Information an Development Strategy, Guangzhou,Guangdong, China; 2.Guangdong Research Institute of Rare Metals, Guangdong Province Key Laboratory of Rare Earth Development and Application, State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metals, Guangdong Engineering Technology Research Center of Non-ferrous Metal Waste Resource Utilization and Harmless Disposal, Guangzhou, Guangdong, China)

Abstract: With the rapid development of strategic emerging industries, the demand of the dispersed metal germanium is increasing. As an important source of germanium, the efficient utilization of germanium-bearing lignite has been paid more and more attention. The reserves, distribution and utilization status of germanium resources in lignite were mainly introduced, and the development of the resource utilization technology of the associated low grade germanium in lignite were introduced. The problems existing in the process of germanium resource extraction were analyzed, and the suggestions for efficient utilization of the associated low-grade germanium resources in lignite were put forward.

Keywords: Lignite; Germanium; Low grade; Resource utilization

////////////////////////////////////
(上接 101 页)

Research on Performance and Application of Flexible Air Chamber jig

Wang Yemin¹, Kuang Yali²

(1. Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi, China; 2.School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, China)

Abstract: The regular of bed movement of the flexible air chamber jig in the laboratory corresponds with that of the traditional jig. The pulsating water flow produced by the flexible air chamber is more stable. The impulse force of air intake is greater. The flexible air chamber jig could replace the traditional air chamber jig. The application results of the industrial flexible air chamber jig in Zhaogu No.2 coal preparation plant illustrated that the large-scale jig with the flexible air chamber could solve the problem of uneven pulsating water flows. The indexes were superior to the original jig. That brings remarkable economic benefits for the coal preparation plant. Therefore, the application of flexible air chambers in large jigs is good and stable, which provides data support for the research of large-scale jigs.

Keywords: Flexible air chamber; Jigging; Imperfection; Distribution curve; Mismatch content; Loss rate of coal in gangue