

Low Carbon Cyclic Comprehensive Utilized Technologies in the Mining Tailings Industry

Xingkai Zhang¹, Enji Sun^{1,2}

1. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing, 100012, China

2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

1. Zhangxk@chinasafety.ac.cn, 2. Sunej@chinasafety.ac.cn

Abstract: To reutilize the tailings resource with low carbon concepts and cyclic economic theories, the low carbon cyclic comprehensive utilized technologies and its development models in mining tailings industry were discussed. Firstly, this paper analyzed the status of the national mine tailings resources, followed by re-use technologies on the tailings were analyzed on this basis, finally proposed the ideas of low-carbon and cyclic utilization, built up a low-carbon cyclic economy system in the tailing industry, and provided some useful thinking and approaches to reutilize the tailing resources and develop the low-carbon cyclic economy in tailing industry.

Keywords: mining tailing; low carbon; cycle economy; comprehensive utilized technologies

尾矿产业低碳循环综合利用技术探析

张兴凯¹, 孙恩吉^{1,2}

1. 中国安全生产科学研究院, 北京, 中国, 100012

2. 北京科技大学, 北京, 中国, 100083

1. Zhangxk@chinasafety.ac.cn, 2. Sunej@chinasafety.ac.cn

摘要: 以低碳理念和循环经济理论为指导, 以尾矿资源再次开发利用为目标, 对尾矿产业低碳、循环经济综合利用技术及发展模式进行了探讨。本文首先分析了全国矿山尾矿资源现状, 其次对尾矿资源再利用技术进行了分析, 在此基础上, 最后提出了尾矿产业低碳、循环综合利用的思路, 构建了尾矿产业低碳、循环经济体系, 为尾矿产业发展低碳循环经济及我国尾矿资源的再次利用提供了一定可借鉴的思路和途径。

关键词: 尾矿; 低碳; 循环经济; 综合利用

1 引言

矿产资源是我国工业发展的基础, 我国 90%以上的能源和 80%左右的工业原料都来源于矿产资源。尾矿作为矿产资源开发过程中的伴生物, 不仅占用大量土地, 也给人类生产、生活带来了严重污染和危害, 已受到全社会的广泛关注。^[1]我国矿产资源共生矿床多, 难选冶矿、贫矿多, 导致尾矿特别是有色金属矿山尾矿组分种类多、规模大、潜在价值高。目前, 各种尾矿资源再利用技术已经取得一定成果, 从可持续发展考虑, 需要以低碳理念和循环经济为指导, 发

展尾矿产业低碳、循环综合利用技术和发展模式。

2 尾矿资源特点分析

2.1 尾矿资源现状分析

随着冶金工业的迅速发展, 尾矿的产生量不断增加。当前, 世界各国每年排出的尾矿量约 50 亿吨, 我国 2000 年尾矿排放量达 6 亿吨左右。^[2]随着尾矿量的增多, 尾矿坝越堆越高, 堆坝和管理工作越来越大, 越来越困难, 特别是细粒尾矿及浮选厂排出的尾矿, 对农田、水源产生污染, 严重影响着环境。

我国尾矿资源种类齐全, 但贫矿多, 单一矿少, 共生矿多; 矿石组成复杂, 难选冶矿多。据统计, 我国现有矿山 15.3 万个, 其中 80%的矿产资源为共伴

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NO.50974109); 国家建设高水平大学公派留学研究生项目 (NO.2007104096); “十一五”国家科技支撑计划重点资助项目 (No.2006BAK04B04)

生矿。^[3]由于历史原因，我国选矿回收率不高，综合利用率低，致使尾矿中多种有价值元素含量较高，除目的矿种外，其他有用伴生矿物和非金属矿物仍然排放在尾矿之中，形成人工富化，造成人为富矿。

我国矿产资源开发，特别是一些大型矿山的开发，在开发之初，一般是为了利用其中的某一种主要矿物或成分，从而造成对其他伴生或其生矿物资源利用极不重视，其它矿物资源多数没有得到有效的开发利用。^[4]同多年来的行业分工过细，条块分割式管理的影响也是造成尾矿综合利用难的主要因素。

由于我国多数矿产资源都是多种有用组分共生的，而且各种组分的含量，回收利用的难易程度以及市场需求各不相同，并且，有许多有用组分在当前技术水平下无法经济合理地利用。^[5]因此，尾矿的回收同样存在技术上难点，只有技术上的不断创新和攻关，才能逐步将尾矿中的有用物质提取回收出来，通过加工生产出新的产品。

2.2 尾矿资源再利用技术

目前我国尾矿资源再利用，已经得到国家和企业的重视，在部分企业已经取得了一定应用成果，其中，比较有代表性尾矿综合利用技术如图 1 所示：

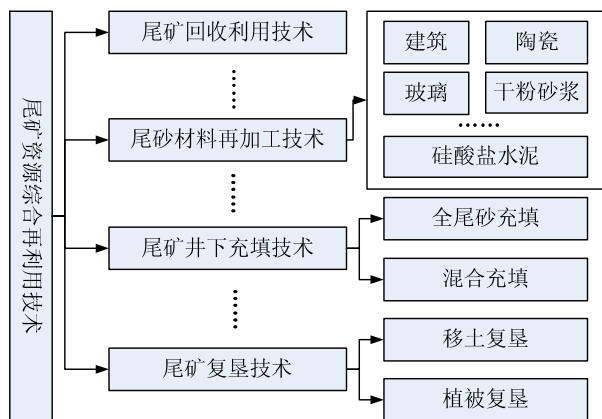


Figure 1. The tailings resources reutilization technologies
图 1 尾矿资源综合利用技术框架图

1) 尾矿回收利用技术

从尾矿中回收有用成分是一种直接、有效地利用尾矿的方式，不但可减少尾矿排放量，更重要的是提供了宝贵的二次矿产资源，防止了资源浪费，是尾矿综合利用的一个重要方面。

在过去的选矿过程中，人们往往仅仅考虑了目的

金属的回收，而忽视了伴生金属的回收利用，赣州有色金属冶炼厂对各矿山钨矿集中处理后所丢弃的尾矿进行综合回收用，获得钨锡混合精矿。目前我国加强了对伴生金属的综合回收力度，大部分有色金属、黑色金属厂矿基本上都能做到在回收目的金属的同时回收伴生金属。攀枝花钢铁团从铁尾矿中回收了钒、钛、钴等多种有色和稀有金属获得较好的经济效益和社会效益。^[6]

2) 尾砂材料再加工技术

根据尾矿的化学成分、矿物成分及粒度特征的差异，在建筑材料领域已经生产出微晶玻璃、玻化砖、建筑陶瓷、免烧尾矿砖、砌块、瓦、轻质材料等，使尾矿的附加值大幅度提高。^[7] 根据尾砂材料本身的特点，可以通过添加不同材料，用于生产干粉砂浆、硅酸盐水泥、建筑材料等。目前，利用尾矿制砖技术日趋成熟，而且品种繁多，如制作烧砖、免烧砖、墙面砖、铺路砖、空心砖等。制作烧结砖尾矿用量大，生产效率高，可用于墙体材料使用。稀土尾矿还是一种新型的制瓷原料，它既可用于胎又可用于釉，又可生产青瓷和生产白瓷，其中稀土尾矿青是一种天然的色釉瓷。

特别是地聚物材料成为近年来新发展起来的一类新型无机非金属材料，它以工业固体废物为主要原料制备的矿物聚合物材料，是一种新型绿色建筑结构材料，可作为普通粘土砖和部分水泥制品的更新换代材料，可大量消耗已堆存的矿山尾矿和其他工业固体废物，为大量堆积矿山尾矿的综合利用提供了一条新的途径。

3) 尾矿井下充填技术

开采矿产资源时地下形成采空区，采空区的存在使岩体的应力发生重新分布，在采空区的周边产生应力集中，使空区顶板、围岩和矿柱发生变形、破坏和移动，甚至出现顶板冒落和地表塌陷。因矿山开采诱发的地面崩塌、滑坡、塌陷等地质灾害和安全事故已十分普遍，是安全生产的重大隐患。^[8]用充填法采矿时，采空区随矿石的采出而被充填，是保护围岩不发生塌陷、实现采矿工业安全生产与环境协调发展最可靠的技术支持。

采用充填法的矿山每开采 1 吨矿石需回填 0.25-0.4m³ 或更多的充填料，尾矿是一种较好的充填料，可以就地取材、废物利用，节省了采集、破碎、运输等生产充填废石的费用，而且有利于保护生态环

境。

4) 尾矿复垦技术

我国矿山企业每年都有相当数量的尾矿库闭库,干涸的尾矿库极易产生扬尘,当风速较大(大于4m/s)时可能产生沙尘暴,甚至可将尾矿库内自生或种植的植物连根拔起,是矿区大气中TSP指标的主要污染源,对环境污染严重。对服务期满的尾矿库进行复垦,不仅可以解决环境污染问题,而且可以增加土地或绿化面积,有利于尾矿库的长期稳定。^[9]尾矿本身也是一种资源,复垦后可以将其更好地保护,以便将来利用。

尾矿复垦一般有两种方法:一种是在尾矿表面覆盖一层厚度适宜的土壤,然后种植适宜的植物。这种方法虽然有效,但需要大量的“好土”,取土、运输、覆盖等一系列工作使这种方法费时费力,而且成本较高,对于土地贫乏的地区难以推广应用。另一种方法是直接在尾矿上种植耐旱、耐风沙植物进行复垦,恢复植被。

2.3 尾矿资源再利用效益

尾矿资源开发利用具有巨大的经济效益、显著的环境效益和长远的社会效益。

1) 巨大的经济效益

尾矿是工业固体废弃物的主要组成部分,中国现有2700多座矿山尾矿库,尾矿积存量达50亿吨以上,其中,铁矿尾矿约26亿吨,有色金属尾矿约21亿吨,金矿尾矿约2.7亿吨,化工尾矿约0.3亿吨,还有建筑材料等非金属矿山也排出大量尾矿。

金属矿山尾矿中大都含有各种有色、黑色、稀贵、稀土和非金属矿物等有价值组分,主要矿物成分由硅酸盐、铝硅酸盐、碳酸盐矿物和微量金属矿物组成,是建筑、陶瓷、玻璃工业的重要矿物原料,整体利用有着重要的经济价值和发展前景。因此,中国矿山尾矿中的资源潜力巨大。

金属矿山尾矿矿物成分适宜,尾砂粒度适中,是建筑、陶瓷、玻璃工业的重要矿物原料,整体利用有着重要的经济价值和发展前景。矿山尾矿中大都含有各种有色、黑色、稀贵、稀土和非金属矿物等有价值组分,尾矿综合利用作为一种资源化的产业潜力巨大。

由于历史等诸多原因,相对于发达国家,中国矿产资源回收利用在很长一段时期处于较低水平,因此遗留下丰富的尾矿资源。据资料统计,尾矿储量已达80~120亿吨,有些尾矿品位甚至已超达原生在采矿

床,尾矿资源利用空间很大。如果这部分资源管理得当,在获得可观收益的同时,还能缓解国家资源供给紧张局面。

2) 显著的环境效益

我国目前尾矿资源尾矿长期堆放在尾矿库中,占据了大量的农用、林用土地,从而导致尾矿库所在地区的土地资源失衡。有些边远地区的乡镇矿山选矿厂甚至直接将尾矿排放在大自然。

由于矿山尾矿多已磨至0.0074mm,储存于尾矿坝中或河道、山谷、低地等地,常渗流溢出,未复垦的尾矿库表面的沙尘可被风吹到库区周围,有时甚至形成沙尘暴,严重恶化周边地区的生活和生产条件。尾矿中的有关成分和残留的选矿药剂也会对大气和水造成严重污染,并导致土壤退化、植被破坏甚至直接危害人畜的生命安全。

矿山尾矿中的氯化物、氰化物、硫化物以及残留的选矿药剂等有毒、有害物质会对地表水、地下水及周边环境造成污染。它们氧化分解产生的有害气体和扬尘,也会对大气环境造成污染。有步骤、大规模、高技术地开发利用尾矿资源,实施资源开发与生态环保并举,是中国尾矿资源综合利用的必由之路。

3) 长远的社会效益

全国固体矿产采选业排出的尾矿及废石将严重影响国土生态环境和经济建设,引起全国人民的关注。尾矿是宝贵的二次矿产资源,矿山尾矿的开发利用将是21世纪矿产综合利用范围最广、潜力最大、经济和社会效益最好的领域之一。

金属矿山尾矿来源广、投资少、见效快,资源开发利用可解决部分再就业问题,改善生态环境。提高矿产资源的利用率是实现矿产资源可持续发展,合理开发利用尾矿资源,最大限度提高矿产资源的利用率,节省大量的矿产资源。

3 尾矿低碳、循环再利用技术

尽管我国在矿产资源综合利用方面取得了很大进展,但我国尾矿综合利用率仅为7%左右,远低于国外60%的利用率,和发达国家相比还存在较大的差距,大量的尾矿只能长期堆放在尾矿库。^[10]在进行尾矿资源再利用中,要充分利用低碳、循环经济理论作指导,研究开发新型综合再利用技术,减少和避免再利用过程中的环境污染、经济损失和社会负担。

3.1 尾矿循环经济体系

循环经济（circular economy）即物质闭环流动型经济，是指在人、自然资源和科学技术的大系统内，在资源投入、企业生产、产品消费及其废弃的全过程中，把传统的依赖资源消耗的线形增长的经济，转变为依靠生态型资源循环来发展的经济。

循环经济倡导的是一种建立在物质不断循环利用基础上的经济发展模式，它要求把经济活动按照自然生态系统的模式，组织成一个如图 2 所示的尾矿资源反复循环流动的过程。

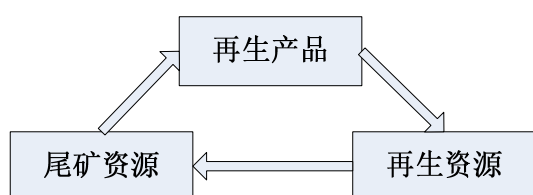


Figure 2. Cycle economy system in tailings resources
图 2. 尾矿资源循环经济体系示意图

作为一种新的经济发展模式，循环经济强调自然资源的低投入、高利用和废弃物的低排放甚至是零排放，使所有资源在这个不断进行的经济循环中得到最合理的利用，从而使人类经济活动对自然资源的负面影响降低至最小化程度。它能有效解决可持续发展的两大障碍——环境污染和资源短缺，从根本上消解长期以来环境与发展之间的冲突。

目前，金堆城铝业公司从保护矿产资源、推进科技进步和杜绝浪费等方面入手，脚踏实地发展循环经济，创建节约铝城。在矿产资源的开采生产中，做到科学配矿，贫富兼采，拓宽采矿空间，提高了回采率。

中国最大的铜工业生产基地江西德兴铜业集团，在铜冶炼生产过程中不断回收废水喷淋矿石，磨矿、选矿，如今每年重复用水量达 2.9 亿吨，复用率为 85% 以上，剩余的废水经环保处理后达标排放，此举不仅减少了废水中酸性物质和重金属离子对沿排放流域农作物和生活饮水的污染，每年还为企业节约取水资金 2000 万元。江铜还建成了烟气制酸系统回收二氧化硫，每年回收二氧化硫制成 100 万吨硫酸，增加产值 3 亿元。

循环经济是当今世界解决可持续发展问题的最佳途径，也是矿业可持续发展的最佳途径，资源浪费和环境污染是一个问题的两个方面，一方面浪费资源，

另一方面污染环境，解决的办法就是按照循环经济的模式，开发矿产资源，首先是要减少尾矿的排放量，从源头节约资源，降低污染；其次，促进资源的高效利用，强化废弃物的回收利用，发挥自然资源的内在价值。

尾矿产业需要依据循环经济发展模式和“3R”原则，建立冶金、有色、化工、建材、煤炭、核工业、黄金矿山及地方矿山尾矿最小量化标准及实施细则，制定尾矿综合利用分类标准、尾矿资源特征检测方法标准、尾矿分析测试与采样方法标准，尾矿开发利用技术标准等等。根据循环经济和资源全利用的要求，将尾矿作为特种勘查对象，对其所含物质的物理、化学特性进行全面分析；对其赋存状态、分布、可选性、经济效益进行科学评价；对其可能产生的环境影响进行系统分析和评价。

3.2 尾矿产业低碳理念

低碳经济和循环经济的根本宗旨是一致的，都是通过制度、政策措施的制定和创新以及科学技术的进步，推动高投入、高消耗、高排放、低效益的社会经济发展模式向低投入、低消耗、低排放、高效益的社会经济发展模式转型，实现经济社会步入可持续发展的良性循环轨道。但低碳经济和循环经济在概念、发展模式、发展侧重点等方面也存在不同之处。

低碳经济的实质是能源高效利用、清洁能源开发、追求绿色 GDP 的问题，核心是能源技术和减排技术创新、产业结构和制度创新以及人类生存发展观念的根本性转变。低碳经济提出的大背景，是全球气候变暖对人类生存和发展的严峻挑战。

随着全球人口和经济规模的不断增长，能源使用带来的环境问题不断地为人们所认识，大气中二氧化碳浓度升高带来的全球气候变化也已被确认为不争的事实。发展循环经济和低碳经济不仅是应对气候变化共同关注的话题，也是转变发展方式、实现可持续发展的战略选择。

当前，中国处在工业化、城市化加速发展阶段，能源及资源消耗量巨大，合理开发利用尾矿资源，是保障矿产资源来源的较好途径，开展尾矿再利用，从尾矿中回收有价成分是提高资源利用率的重要措施，也有利于减少尾矿的排放。

在利用循环经济体系开发尾矿资源再利用技术时，引入低碳理念，尾矿产业低碳经济框架如图 3 所

示,对尾矿资源再利用过程中产生的各种环境消耗进行跟踪,不仅从经济角度衡量资源再利用效益,更要从低碳、环保的角度衡量产业链整体能源消耗,对于高能耗尾矿资源再利用产业进行整理。

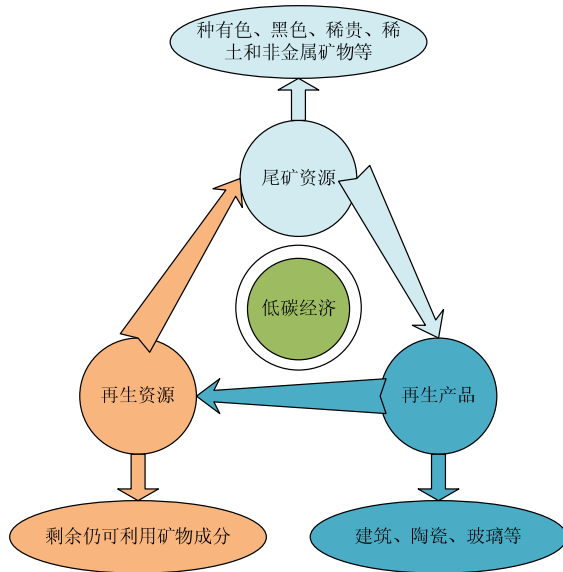


Figure 3. Low carbon economy in tailings industry
图 3. 尾矿产业低碳经济框架图

在低碳经济理念下,中国地质科学院尾矿利用技术中心在北京通州开发区建了一个生产实验基地,可年产微晶玻璃 8000~10000m²,年创效益上百万元,尾矿加入量达 50%。地科院还协助凌源建一条陶粒生产线,年产 18000m³,其中尾砂用量 50%~80%。利用高钙镁型铁尾矿生产出来的高级饰面玻璃,其主要性能优于大理石,而尾矿加入量也达到 70%~80%,另外普通墙体砖是建筑业用量最大的建材之一,其技术简单、投资少,是尾矿综合利用有效的途径之一。

4 结论

只用在充分考虑环境因素,应用低碳、循环经济理念,采用合理、高效的开发技术,对尾矿资源进行再次开发利用,才能取得更好的企业效益、生态效益和社会效益。

本文以低碳理念和循环经济理论为指导,以尾矿资源再次开发利用为目标,对尾矿产业低碳、循环经济综合利用技术及发展模式进行了探讨首先分析了全

国矿山尾矿资源现状,其次对尾矿资源再利用技术进行了分析。在此基础上,最后提出了尾矿产业低碳、循环综合利用的思路,构建了尾矿产业低碳、循环经济体系,为尾矿产业发展低碳循环经济及我国尾矿资源的再次利用提供了一定可借鉴的思路和途径。

References (参考文献)

- [1] Zhu Shengyuan, The Comprehensive Use of Tailings Is One of the Ways to Keep Sustainable Development in Mining Industry in China[J], *Journal of TongLing Finance and Economics College*, 2002, (1), P38 (Ch).
朱胜元, 尾矿综合利用是实现我国矿业可持续发展的重要途径[J], *铜陵财经专科学校学报*, 2002(1), P38.
- [2] Zhang Shuhui, Xue Xiangxin, Liuran et al., Current Situation and Prospect of the Comprehensive Utilization of mining tailings[J], *Mining and Metallurgical Engineering*, 2005, 25(3), P44-47 (Ch).
张淑会, 薛向欣, 刘然等, 尾矿综合利用现状及展望[J], *矿冶工程*, 2005, 25(3): P44-47.
- [3] Dai Xinxiang, Wen Ziyun, Affecting Factors for Geopolymerization Reaction[J], *Journal of Building Materials*, 2005, 5(3): P284-288 (Ch).
代新祥, 文梓芸, 土壤聚合反应的影响因素[J], *建筑材料学报*, 2005, 5(3): P284-288.
- [4] T. Bakharev, Resistance of geopolymer materials to acid attack[J], *Cemem and Concrete Research*, 2005, 35, P658-670.
- [5] Xie Longshui, Development of Cemented Backfilling Technology in Mines[J], *Hunan Nonferrous Metals*, 2003, 19(4): P1(4) (Ch).
谢龙水, 矿山胶结充填技术的发展[J], *湖南有色金属*, 2003, 19(4), P1(4).
- [6] Hua Ming, Zhu Qing, Luo Zhihong, Countermeasure and suggestion to accelerate the recycle economy development of Jiangxi mineral resources estate[J], *China Mining Magazine*, 2007, 16(9): P24-26 (Ch).
花明, 朱青, 罗志红, 加快江西矿产资源产业循环经济发展的对策与建议[J], *中国矿业*, 2007, 16(9): P24-26.
- [7] Yi Xiankui, Hanjing, The State and Proposals for Using of Tailoring Resources[J], *China Tungsten Industry*, 2008, 18(4): P6-8 (Ch).
易先奎, 韩静, 江西尾矿资源利用现状及对策[J], *中国钨业*, 2008, 18(4): P6-8.
- [8] Luo Xianping, Yan Qun, Lu Ling et al., Problems and countermeasures of Treatment and disposal of Solid Waste in nonferrous metal mines in Jiangxi[J], *China Mining Magazine*, 2005, 14(2): P24-26. (Ch).
罗仙平, 严群, 卢凌等, 江西金属矿山固体废物处理与处置存在的问题与对策[J], *中国矿业*, 2005, 14(2), P24-26.
- [9] Zhang Jinrui, Xu Hui, Rao Jun, Recycling Economy and Resourceful Disposal of Mine Tailings[J], *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2005(6): P30-31 (Ch).
张锦瑞, 徐晖, 饶俊, 循环经济与金属矿山尾矿资源化研究[J], *矿产综合利用*, 2005(6): P30-31.
- [10] Zhang Hua, Hu Dewen, Potential analysis and Strategy research on Recycling of China's Secondary Mining Resources[J], *China Mining Magazine*, 2003(12): P48-50. (Ch).
张华, 胡德文, 我国二次矿产资源回收利用分析与对策[J], *中国矿业*, 2003(12): P48-50.