

## 可持续的矿冶工业生态系统构建

杨小聪, 郭利杰

(北京矿冶研究总院, 北京 100070)

**摘要:** 运用工业生态学的思想提出实现矿冶工业可持续发展最佳模式——构建矿冶工业生态系统; 阐述了矿冶工业生态系统的概念及特点; 提出了矿冶工业生态系统的构建理论并以此理论构建出未来矿冶工业生态系统的雏形。这种以工业共生为基础的矿冶工业生态系统新模式是解决矿业环境污染、实现矿业可持续发展的最有效方法。

**关键词:** 矿冶工业生态系统; 工业生态学; 矿业可持续发展; 工业共生

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1671-4172(2011)02-000-00

## Industrial Ecosystems of Mineral and Metallurgy for mining sustainable development

YANG Xiaocong, GUO Lijie

(Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, Beijing 100070, China)

**Abstract:** In this paper we bring forward the sustainable development best mode in mining and metallurgy industry that is the building of Industrial Ecosystems of Mineral and Metallurgy (IEMM). It illustrated the concept and characteristic of IEMM and proposed the construction theory of IEMM. This new pattern based on Industrial Ecosystems is the most effective method for solving mining pollution and achieving sustainable development of mining.

**Key words:** Industrial Ecosystems of Mineral and Metallurgy (IEMM); industrial ecology; sustainable development of mining; industrial symbiosis

### 引言

矿冶(采、选、冶)工业是国民经济发展的支柱产业,也是高耗能、高污染产业。传统矿冶工业生产模式所引发的大量环境灾害问题已经成为制约我国社会经济可持续发展的瓶颈。环境污染的“末端治理”不是有效的解决方法,只是将污染问题在空间和时间内移动,废物处理和资源化利用程度低。要综合解决好目前矿冶工业发展中面临的资源浪费和环境污染等突出问题,就必须改变过去“资源-产品-废物”的发展模式,通过“资源-产品-再生资源”的闭环反馈式流程,注重将废料作为资源重新利用,使整个矿冶生产活动基本上不产生或产生尽可能少的工业废物,从而使工业活动对自然资源和环境承载负荷的影响控制在最低限度<sup>[1-3]</sup>。

这种封闭材料循环的工艺变革,并非废物“管端”处理的另一种版本,而是正在兴起的工业生态系统的一部分。所谓工业生态系统是指在一定的区域和范围内,有一批相关的工厂、企业组合在一起,它们共生共存,相互依赖,其联系纽带是废物,其中一个企业产生的废物(或副产品)是另一个或几个企业的“营养物”(原料),构成一个有机的企业“群落”(工业链)体系。这个系统的最大特点是实现物质和能量最优循环,工业废物最小排放,资源利用价值最高而消耗量最小。也即实现物质和能源利用的最大化和废物产量的最小化<sup>[4-5]</sup>。

## 1 矿冶工业生态系统

### 1.1 矿冶工业生态系统概念

传统的矿冶生产模式难以解决其环境污染问题。基于工业生态学原理所建立的矿冶工业生态系统,是针对矿产资源的开发利用过程,在一定的区域范围内规划配置,以产出的废物转换为联系组带的采选冶企业和其他一系列相关配套企业以及这些企业的生产工艺,形成工业生态园区。在该园区内,人文、生态、资源和经济环境相互联系,构成有机整体。园区内的工业废物作为内部资源被重新利用,而使矿产资源得到最大利用。这种以工业共生为基础的矿冶生产模式是解决矿业环境污染、实现矿业可持续发展的最有效方法。

矿冶工业生态系统是以矿产资源的采选冶企业为主体,实现采矿、选矿、冶金产出废物被协同资源化利用。矿产资源开发利用过程中产出的废物主要有采矿废石和矿坑废水、选矿尾矿和选厂废水、冶炼废渣和冶金废水。这些废料的产出量很大,一方面需要采用先进的开采及选冶技术从根源上减少废料产出,多产出合格产品;另一方面要求将废料再次资源化,并作为内部资源被重新循环利用,发挥最大的资源效率并获得最大的经济效益。

## 1.2 矿冶工业生态系统特点

矿冶工业生态系统是一种根据工业生态学原理建立的、符合生态系统环境承载力、物质和能量高效组合利用,以及工业生态功能稳定协调的新型工业组合。该系统应具有以下特点:

1) 工业共生性。工业共生是指通过不同企业之间或同一企业内部的不同生产单元之间相互利用副产品或废物的合作,共同提高企业的生存能力及获利能力,达到节约资源和保护环境的目的。因此,工业共生性的本质是企业间和企业内部的合作,这种合作是以资源循环和能量流动为纽带,以提高资源利用效率和保护环境为目标。

2) 物质循环和能量流动。矿冶工业生态系统通过建立“生产者-消费者-分解者”的“工业链”,建立一种互利共生的“废物交换俱乐部”。这种废物资源化交换过程就是物质循环和能量流动。

3) 动态演化和自适应性。矿冶工业生态系统中的“工业群落”在优胜劣汰的进化法则下具有自动态演化平衡的功能,不会因为淘汰掉一个企业单元而使废物交换系统产生障碍,新加入生态系统的企业单元能使得工业共生网络更加优化。

## 2 矿冶工业生态系统构建与可持续发展

目前,我国已是矿业大国,我国的采选冶技术已达到一定的先进水平,有的甚至达到了国际先进水平。在废物资源化利用方面也已取得了不少成就,具有较强的技术能力,工业生态学所要求的核心企业规模化条件也已具备。因此我国的矿产资源开发与利用,已经具备构建矿冶工业生态系统的条件。

### 2.1 矿冶工业共生网络

我国矿冶工业要实现可持续发展,应以工业共生为基础构建矿冶工业生态系统。而要构建矿冶生态系统,首先必须确定以采选冶工业为核心的工业共生网络所涉及的相关共生工业<sup>[6]</sup>。

1) 采矿、选矿、冶金工业核心共生。矿冶工业所包括的采矿、选矿和冶金工业可形成工业生态系统的核心共生工业。三者都是矿冶工业大宗废物产出源,井下采矿产出废石可部分在采矿工艺环节消纳,用于充填采空区,剩余废石可作为建材工业原料。选矿工业过程产生的选矿废水可在工艺内部形成闭循环,产生的尾矿可用于充填采矿产生的采空区。采选产生的废水可以作为金属冶炼过程的冷却水。

2) 建材工业。矿冶工业和建材工业之间的共生关系十分明显。采矿过程产生大量废石经过破碎加工后,可以成为建筑用砂。冶炼过程产生的冶炼渣经破碎磨细后形成一定细度的炉

渣微粉，与水泥熟料按一定比例混合，生产各种标号的硅酸盐水泥，而剩余的尾渣和尾粉是筑路、生产空心砖和步道砖非常好的原料。

3) 能源工业。金属冶炼过程也是一种能源转换过程，就是将煤炭通过冶金流程转换为热能、可燃气、氢气等能源形式的过程。目前国内最好的炼铅闪速炉生产流程也还有 30% 左右的能源未被充分利用，这为冶金工业与能源工业建立共生关系提供了可能。

4) 化学工业。金属冶炼过程同时还是一种化学反应过程，煤炭在炼焦、冶炼过程中产生的一氧化碳、甲烷和二氧化硫，可作为许多化工产品的生产原料；钢铁冶炼过程中产生的钢渣含有多种对农作物有利的元素，可作为生产化肥的原料。

5) 再生资源工业。冶金工业生产流程可以消纳和处理多个行业的大宗废物。例如可处理各种不同来源的废旧金属、大宗塑料、废轮胎等。

## 2.2 可持续的矿冶工业生态系统构建

矿冶工业生态系统构建是从工业系统整体出发，充分考虑主体核心企业与其他相关企业之间以及企业内部各生产单元之间的生态关系，采用先进技术支撑体系(工业代谢分析、生命周期评价、工业生态设计、生态效益分析、先进管理方法)创造可持续的工业循环经济新模式。

矿冶工业生态系统构建，要坚持循环性、链接性、区域性、高效性的原则<sup>[7]</sup>。矿冶工业生态系统构建框架包括企业组成构建、系统集成、生态工业链设计、非物质化四部分(如图 1 所示)。

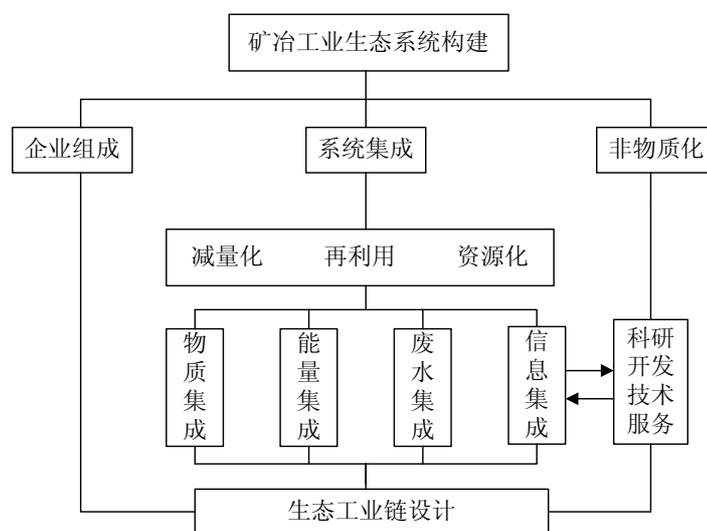


图 1 矿冶工业生态系统框架设计示意图

Fig.1 The sketch map of the process for industrial ecosystems of mineral and metallurgy

1) 企业组成是构成生态工业链网络的物质基础。对于一个新构建的工业生态系统，须根据当地区域资源、产业等特色，结合相关规划、政策及市场供求等方面，寻找和确定矿冶工业系统一个或几个核心采选冶企业，并围绕核心企业派生出一系列以物质或能量交换为纽带的企业，从而构建园区的工业生态系统。

2) 系统集成是构建工业生态系统的关键。在系统集成中，以减量化、再利用、资源化为原则，通过企业、园区等不同层次物质集成、能量集成、废水集成和信息集成，以及园

区产业的非物质化方向发展,达到矿冶工业生态系统内物质和能量最大程度利用和对环境的最小影响。其中物质集成是矿冶工业生态系统的核心部分,即研究一个企业产生的废物如何作为另一企业的原料,在各企业间实现物质最大程度利用,使得工业生态系统对外排放的废物极少甚至实现“零排放”。

3) 生态工业链设计是指依据工业生态学的原理,对2个以上工业企业的物质和能量链接所进行的最优化组合设计或改造。

4) 非物质化设计是指通过小型化、轻型化、使用循环材料和部件以及提高产品寿命,在相同或者甚至更少的物质基础上获取最大的产品和服务,或者在获取相同的产品和服务功能时,实现物质和能量的投入最小化。

在工业共生基础上构建矿冶工业生态系统,形成以采选冶工业为中心的,资源高效利用、环境持续改善的网络型、进化型产业生态结构,将成功实现矿冶工业升级转型和促进我国矿业的可持续发展。通过构建矿冶工业生态系统,不仅为系统内的共生企业创造经济利益,而且能降低整个系统内所需资源的投入,减少对外界环境的污染破坏。这对缓解矿冶工业所在地的资源和环境压力、创建资源循环、生态环境改善、可持续的矿冶工业发展新格局大有裨益。

### 3 矿冶工业生态共生模式

工业共生模式是实现矿冶工业共生的关键,共生模式(也称共生关系)是指参与工业共生各个共生单元相互作用的方式或相结合的形式。它既反映共生单元之间作用的方式,也反映作用的强度;既反映共生单元之间的物质信息交流关系,也反映共生单元之间的能量互换关系。工业生态共生模式按照某一共生单元(企业)在生态工业共生体中的地位和作用,其参与共生主要有以下4种模式:主导型工业共生、平等型工业共生、依附型工业共生和混合型工业共生<sup>[8-9]</sup>。

矿冶工业生态共生模式是以采选冶企业为核心,依据3R原则(减量化、再利用、资源化)、工业生态学原理和清洁生产要求,以交换物质、能量、信息等资源为纽带建立相互依存,相互合作的组织关系形式。由于矿冶工业的特殊性(资源开采),矿冶共生模式又不同于传统工业生态系统模式,工业共生没有明显的种类划分,一般是由以上几种最基本的结构形态组合而成。

矿冶工业生态共生模式是矿冶生态工业园设计的核心内容。共生模式设计以“资源和能源极致利用、废物零排放”为目标,因地制宜选择共生产业链企业,实现最优循环链接方式。基于上述理念设计的未来矿冶工业生态共生系统雏形如图2所示。这种矿冶工业生态共生系统分为核心圈、次级圈和拓展圈。

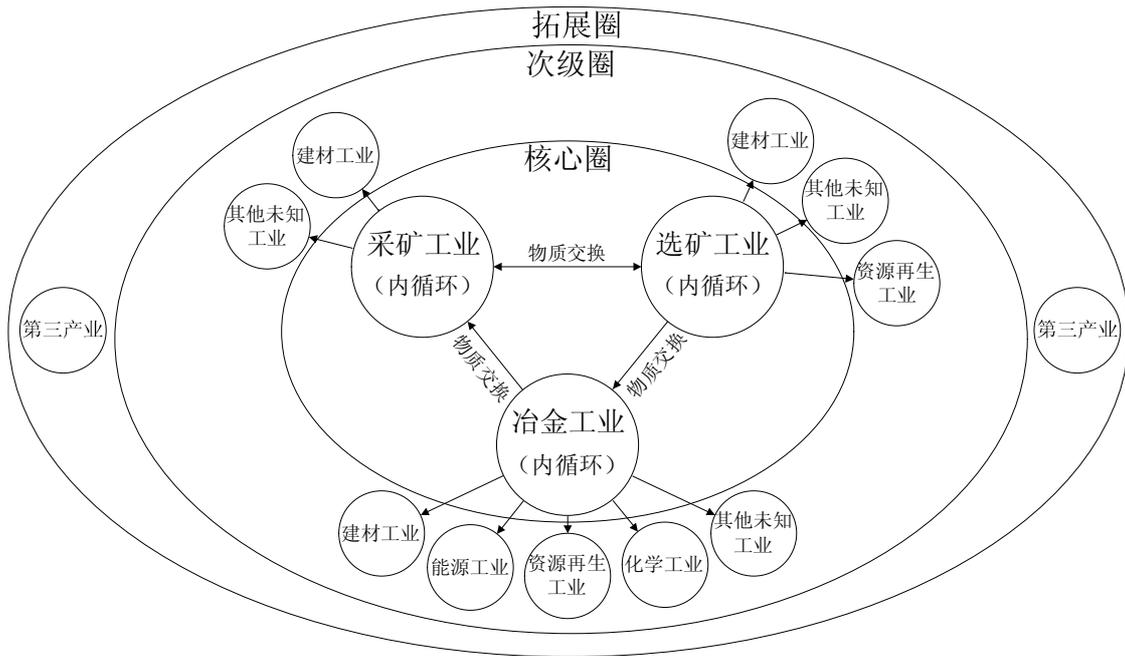


图2 矿冶工业生态共生系统雏形

Fig.2 The model of mineral and metallurgy industrial symbiosis system

#### 4 矿冶工业生态系统实践

矿冶工业生态共生链是一个庞大的系统，是以采选冶为核心，但是采矿、选矿及冶金各系统内又可形成相对独立的工业生态循环链系统。根据矿山生产流程，所构建的矿山废料循环利用流程见图3。这种基于工业生态系统的固体废物处置模式，就是要通过充填尽量利用废石和尾矿，实现废料流出量的最小化<sup>[4-5]</sup>。

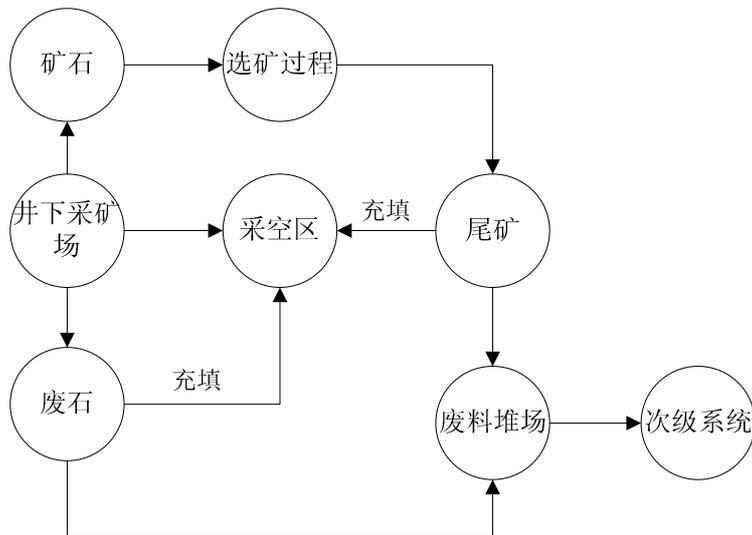


图3 矿山固废循环利用流程

Fig.3 Flow utilization of solid waste in mine

## 5 结语

矿冶工业生态系统是一种理想的矿冶工业组织形式,如果结构组织恰当,它们将成为最大限度减少废物、资源和能源极致利用、环境污染与破坏最小的矿业可持续发展范例。但是,目前还需要做大量研究和实践工作来澄清这种实体的最佳组织模式和经济结构。未来,国家应积极着手建立矿冶工业生态系统的技术和政策支撑体系,并通过示范工程来验证和展示矿冶工业生态共生生产模式对于防控矿业环境污染的有效性和先进性。这将对于推动我国矿业传统生产方式以及污染防治管理方式的转变,对于促进资源、经济和环境的协调发展具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 劳爱乐,耿勇. 工业生态学和生态工业园[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [2] 肖松文,张泾生,曾北危. 产业生态系统与矿业可持续发展[J]. 矿冶工程,2001,21(1):4-6.
- [3] 马迁利,王兆华, 刘海龙. 工业共生视角下钢铁工业生态系统构建[J]. 产业观察,2008(12):95-96.
- [4] 周爱民. 基于工业生态学的矿山充填新模式[J]. 中南大学学报(自然科学版),2004,35(3):468-471.
- [5] Robert Ayres. 创造工业生态系统:一种可行的管理战略[J]. 产业与环境,1997,19(4):7-13.
- [6] 石磊. 工业生态学的内涵与发展[J]. 生态学报,2008,28(7):3356-3364.
- [7] 汤慧兰,孙德生. 工业生态系统及其建设[J]. 中国环保产业,2003(2):14-16.
- [8] 胡瑞霞. 冶金污泥与废料资源化利用研究进展[J]. 化学工程与装备,2001(1):60-62.
- [9] 朱润娥,宋彦忠. 选矿尾矿与选矿废水的处理与利用[J]. 甘肃有色金属,1998(2):36-39.
- [10] 郭利杰. 废石尾砂胶结充填基础力学研究[D]. 北京:北京矿冶研究总院,2007.

作者简介:杨小聪(1965-),男,教授级高级工程师,采矿工程专业,主要从事矿产资源开采技术研究。