

## 有色金属材料可持续发展与循环经济

左铁镛, 戴铁军

(北京工业大学 循环经济研究院, 北京 100124)

**摘要:** 近年来, 我国有色金属材料产业发展迅猛, 产量已居世界前列并占有重要地位, 对国民经济高速发展做出重大贡献。然而, 从资源、能源和环境的角度分析, 有色金属材料的提取、制备、生产、使用和废弃又是一个不断消耗资源和破坏环境的过程, 直接影响到经济社会的可持续发展。提高有色金属材料产业资源、能源的利用效率, 降低其生产、制造和使用等过程中的环境负荷, 已成为其持续发展的重要任务。因此, 我国有色金属材料产业以“减量化、再利用、再循环”为原则, 广泛开展大、中和小 3 个层面的物质循环, 大力发展有色金属静脉产业, 积极推广生态设计, 研究开发节能型、环保型和循环型有色金属材料, 全面促进有色金属材料产业的生态化改造和技术提升必将对其实施循环经济发展战略、走出一条可持续的发展道路起到重要作用。

**关键词:** 有色金属; 产业; 可持续发展; 循循环经济

中图分类号: T-1

文献标识码: A

## Sustainable development of non-ferrous materials industry and recycling economy

ZUO Tie-yong, DAI Tie-jun

(Institute of Recycling Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The non-ferrous materials industry in China has got swift and violent development in the recent years. The output of many non-ferrous materials has already occupied arranging or important status in the world, and made great contributions to the high-speed development of national economy in China. However, the whole process of the abstraction, preparation, and production, using and discarding of the non-ferrous materials is course of consuming resources and destroying environment, constantly from the view of resources, energy and environment, which directly affects the sustainable development of economy and society. So improving the utilization efficiency for resource and energy, and reducing environmental load in the non-ferrous materials industry that are imminent problem to realize its sustainable development. Taking “reduce, reuse, recycle” as the principle, launching three different scales of recycling of industrial materials extensively, developing the vein industry in a more cost-effective manner, extending the eco-design energetically, researching and developing the materials of saving energy, environmental protection and recycling etc, thus we can change the situations of the high yield and low output value in China’s non-ferrous materials industry, promote the traditional material industry to ecological transformation and upgrade in an all-around way, develop recycling economy, and implement the sustainable developmental road.

**Key words:** non-ferrous materials; industry; sustainable development; recycling economy

1987 年, 联合国环境与发展委员会发表了《我们共同的未来》报告, 提出“可持续发展”的概念<sup>[1]</sup>。可持续发展是既满足当代人的需求, 又不危及后代人

满足其需求的发展, 它包含自然资源观、生态环境观、科技进步观、经济增长观和社会发展观等; 既强调发展, 又强调公平, 其实质是要实现人类整体的协调发展

展。可持续发展观一经提出，就得到世界各国的广泛认同，一些国家根据各自的国情，制定了相应的方针、政策和法律法规，从各个方面推动社会向可持续发展的方向转变，并且收到较好的效果。中国于1994年3月发表了《中国人口、环境与发展的白皮书》<sup>[2]</sup>，正式确立可持续发展战略，并提出相应的对策。10多年来，从中央到地方采取一系列落实可持续发展战略的措施，取得不少成绩。然而，伴随着国民经济的高速增长，人口数量的不断增加，资源匮乏、能源短缺、环境恶化等问题日益严重，使得社会的可持续发展面临着巨大的人口、资源和环境压力。被列为国民经济基础性、关键性的支柱产业，为人类社会的文明进步做出突出的贡献，被誉为“划时代标志”。中国的材料产业，包括钢铁、建材、化工等主要行业，自改革开放以来得到迅猛发展，成为支持国民经济工业化和国防现代化的基础，成为发展高新技术的关键。

与其他材料产业一样，中国有色金属材料产业发展的很快。据统计，中国有色金属材料的产量已居世界前列或重要地位，如表1所示。10种常用有色金属的产量已经由1978年的 $9.963 \times 10^5$ t，上升到2002年的 $1.012 \times 10^7$ t，为1978年的10倍多，跃居世界第一。到2006年已达 $1.917 \times 10^7$ t，连续5年居世界第一位<sup>[3-4]</sup>。总之，从产量上来看，中国已是当今世界的有色金属材料生产大国，有色金属材料产业对国民经济高速发展做出重大贡献。

**表1 2006年中国有色金属材料的总产量及世界排序**

**Table 1 Chinese non-ferrous materials total output and world arranging in 2006**

| Material                          | Output/<br>$10^4$ t | Growth compared<br>with that of last<br>year/% | World<br>arranging |
|-----------------------------------|---------------------|--|--------------------|
| Refined copper                    | 292.50              | 17.80  | 1                  |
| Electrolytic aluminum             | 918.75              | 19.70  | 1                  |
| Alumina                           | 1 323.93            | 54.00  | 1                  |
| Ten kinds of<br>nonferrous metals | 1 917.01            | 17.84  | 1                  |

然而，从资源、能源和环境的角度分析，有色金属材料的提取、制备、生产、使用和废弃又是一个不断消耗资源和破坏人类赖以生存环境的过程，并直接影响到经济社会的可持续发展。因此，探索有色金属材料与资源、环境的关系以及材料及其产业如何实现可持续发展的道路，提高有色金属材料产业资源、能源的利用效率，降低其生产和制造过程中环境负荷，是有色金属材料及其产业发展的一项重要任务。

## 1 对有色金属材料可持续发展的忧虑与反思

综上所述，材料的发展为人类社会的文明进程做出卓越的贡献，人们有理由期盼材料及材料科学与工程将有更大的发展，更辉煌的成就和更卓越的贡献，这也是材料界共同的信念。

但是，我们也应清醒地认识到，有色金属材料作为物质生产的主体，在其制备、生产、使用和废弃全过程中，既是资源、能源的主要消耗者，又是造成破坏和污染生态环境的主要责任者。由此带给人类社会的一系列资源、能源和环境问题：全球气温持续上升、温室效应逐渐加剧、环境污染严重、废弃物排放激增、全球大气异常、南极臭氧层出现空洞、资源短缺等等，这一切又直接制约和影响着有色金属材料及其产业的可持续发展。

### 1.1 资源、能源的供需矛盾日益尖锐

截至2003年，中国查明资源储量的矿产有158种，总量约占世界的12%，居世界第三位，但人均占有量仅为世界平均水平的58%，居世界第53位。45种主要矿产资源人均占有量不到世界平均水平的一半，铜和铝土矿等重要矿产资源人均数量分别为世界人均水平的18%和7.3%<sup>[5]</sup>。多数有色金属矿产资源禀赋不佳，开发利用难度大，选矿和冶炼成本高，集约化生产难，规模效益差。

近年来，随着中国经济快速增长，对矿产资源需求日益旺盛，国内许多有色金属矿产的进口量一直保持快速增长，一些矿产品的对外依存度不断增加。2004年中国铜矿石消费对进口的依存度为70.0%，氧化铝为45.0%，钾盐为77.0%。这既反映我国对外开放不断扩大的积极成果，也反映出我国经济可持续发展对国外资源依赖程度在不断加深，潜存一定的风险和挑战。

据有关专家预测，到2010年中国多数矿产资源供需形势严峻，短缺矿产对外依存度逐步上升，铝和钾的对外依存度高达64%和83%；到2020年，形势更为严峻，对外依存度进一步逐步上升，达到71%和87.6%<sup>[6]</sup>。

在能源消耗方面，中国已经成为世界第一煤炭消费大国和第一石油、电力消费大国。2005年中国能源消耗总量达 $22\ 331.93 \times 10^4$ t标准煤，其中工业能源消耗量为 $158\ 058.37 \times 10^4$ t标准煤，占国内能源消耗总量的70.78%。9种主要材料产业，包括：矿品采选业、

化学原料及制品制造业、化学纤维制造业、橡胶制品业、塑料制品业、非金属矿物制造业、黑色金属冶炼及压延加工业、有色金属冶炼及压延加工业和金属制品业, 其能源消耗量为  $103\ 861 \times 10^4$  t 标准煤<sup>[7]</sup>(见表2), 占工业能源消耗总量的 65.71%, 其中有色金属冶炼及压延加工业能源消耗占 4.55%。并且我国有色金属工业能耗正呈逐年高速增长的形势, 见表3。2005年有色金属工业能耗增长率有所下降, 但年均增长率仍较高,

达 13.60%, 节能降耗形势仍很严峻。

可见, 伴随中国经济的高速增长, 资源、能源的过度消耗, 使得中国资源、能源的供需矛盾日益尖锐, 对外的资源依存度大幅度地上升。因此, 制定中国有色金属材料产业可持续发展战略, 节约资源、能源, 提高其利用效率, 既是时代赋予我们义不容辞的历史责任, 也是有色金属材料产业的惟一选择。

## 1.2 环境形势日益严峻

在有色金属材料的生产和使用过程中, 一方面消耗大量的资源和能源, 另一方面向环境排放大量的废气、废水和工业固体废弃物, 污染环境, 恶化人类赖以生存的空间。表4和表5所列为2005年中国9种主要材料制造业的污染物排放统计数据<sup>[7]</sup>。2005年中国工业废水、废气、固体废物、二氧化硫、烟尘和粉尘的排放量(产生量)分别为  $2.43 \times 10^{10}$  t,  $2.689 \times 10^{13}$  m<sup>3</sup>,  $1.344 \times 10^9$  t,  $2.168 \times 10^7$  t,  $9.49 \times 10^6$  t 及  $9.11 \times 10^6$  t。其中, 有色金属工业材料生产的废水、废气、固

表2 2005年主要材料能源消耗

Table 2 Energy consumption of main material in 2005

| Material  | Standard coal consumption/<br>$10^4$ t | Proportion of industry's total energy consumption/% |
|---|--|---|
| Mining and processing of metal ore                          | 13 251.5                               | 8.38  |
| Manufacture of raw chemical materials and chemical products | 22 494.07                              | 14.23   |
| Manufacture of chemical fibers                              | 1 342.0                                | 0.85  |
| Manufacture of rubber                                       | 1 079.38                               | 0.68  |
| Manufacture of plastics                                     | 1 446.81                               | 0.92  |
| Manufacture of non-metallic mineral products                | 18 849.94                              | 11.93   |
| Smelting and pressing of ferrous metals                     | 35 988.23                              | 22.77   |
| Smelting and pressing of non-ferrous metals                 | 7 188.69                               | 4.55  |
| Manufacture of metal products                               | 2 220.38                               | 1.40  |
| Total   | 103 861.0                              | 65.71   |
| Total energy consumption                                    | 158 058.37                             |   |

表3 2000—2005年我国有色金属工业能耗增长

Table 3 Energy consumption of non-ferrous materials industry in 2000—2005

| Year    | Standard coal consumption/ $10^4$ t | Rate increase of energy consumption/% |
|---------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 2000    | 3 638                               | 8.02                                  |
| 2001    | 4 062                               | 11.65                                 |
| 2002    | 4 804                               | 18.27                                 |
| 2003    | 5 838                               | 21.50                                 |
| 2004    | 6 795                               | 16.39                                 |
| 2005    | 7 188.69                            | 5.79                                  |
| Average |                                     | 13.60                                 |

表4 2005年材料制造业污染物排放情况

Table 4 Volume of emission of industrial waste water, waste gas and solid wastes in China of 2005

| Material  | Waste water/<br>$10^4$ t | Waste gas/<br>$10^8$ m <sup>3</sup> | Volume of solid wastes produced/<br>$10^4$ t |
|---|--------------------------|-------------------------------------|--|
| Mining and processing of metal ore                          | 116 741                  | 5 725                               | 48 714                                       |
| Manufacture of raw chemical materials and chemical products | 339 052                  | 15 887                              | 9 233  |
| Manufacture of chemical fibers                              | 48 516                   | 2 886                               | 342  |
| Manufacture of rubber                                       | 6 118                    | 563                                 | 94   |
| Manufacture of plastics                                     | 2 288                    | 577                                 | 41   |
| Manufacture of non-metallic mineral products                | 48 248                   | 49 860                              | 3 237  |
| Smelting and pressing of ferrous metals                     | 169 934                  | 56 190                              | 23 506                                       |
| Smelting and pressing of non-ferrous metals                 | 33 734                   | 13 183                              | 4 779  |
| Manufacture of metal products                               | 21 057                   | 846                                 | 121  |
| Total   | 785 688                  | 145 717                             | 90 067                                       |
| Occupy the total emission amount percentage/%               | 32.33                    | 54.17                               | 66.99  |

表5 2005年材料制造业二氧化硫、烟尘和粉尘排放量

**Table 5** Volume of emission of sulfur dioxide, soot and dust in China of 2005

| Material  | Sulfur dioxide/<br>10 <sup>4</sup> t | Soot/<br>10 <sup>4</sup> t | Dust/<br>10 <sup>4</sup> t |
|---|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Mining and processing of metal ore                          | 41.1                                 | 23.6                       | 40.3                       |
| Manufacture of raw chemical materials and chemical products | 116.8                                | 53.6                       | 17.5                       |
| Manufacture of chemical fibers                              | 11.5                                 | 4.6                        | 0.1                        |
| Manufacture of rubber                                       | 4.4                                  | 2.0                        | —                          |
| Manufacture of plastics                                     | 1.3                                  | 0.6                        | —                          |
| Manufacture of non-metallic mineral products                | 178.4                                | 133.9                      | 565.7                      |
| Smelting and pressing of ferrous metals                     | 142.2                                | 69.3                       | 125.7                      |
| Smelting and pressing of non-ferrous metals                 | 70.7                                 | 19.2                       | 18.7                       |
| Manufacture of metal products                               | 2.6                                  | 1.7                        | 1.0                        |
| Total   | 569.0                                | 308.5                      | 769.0                      |
| Occupy total emission amount percentage/%                   | 26.25                                | 32.51                      | 84.41                      |

体废物、二氧化硫、烟尘和粉尘的排放量分别占9种材料制造业总排放量的4.29%, 9.05%, 5.31%, 12.43%, 6.22%和2.43%，分别居第6, 3, 4, 4, 5和4位。

有色金属材料产业的三废排放量和固体废物堆存量呈上升的趋势<sup>[8]</sup>，见表6和表7。由表6可见，尽管我国有色金属材料产业环境治理有很大进步，单位废水排放量和固体废物量呈逐年下降的趋势，但2004年仍有 $2.77 \times 10^8$  t废水和 $9.266 \times 10^7$  t固体废物排出。

表6 有色冶金工业“三废”排放量

**Table 6** Volume of solid waste, waste water and waste gas of non-ferrous materials industry

| Year | Volume of solid wastes produced/<br>10 <sup>4</sup> t | Volume of solid water produced/<br>10 <sup>4</sup> t | Sulfur dioxide/<br>10 <sup>4</sup> t | Dust/<br>10 <sup>4</sup> t | Fluoride/<br>10 <sup>4</sup> t | Emission of unit waste water/<br>(t·t <sup>-1</sup> ) | Volume of unit solid waste/<br>(t·t <sup>-1</sup> ) |
|------|---|--|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|---|---|
| 2000 | 8 802.0   | 32 373.7   | 42.45                                | 5.80                       | 5 835.4                        | 41.30   | 11.22   |
| 2001 | 8 965.2   | 32 043.7   | 31.35                                | 5.40                       | —                              | 36.26   | 10.14   |
| 2002 | 13 761.0  | 22 600.0   | 41.56                                | 5.17                       | 4 602.0                        | 22.33   | 13.60   |
| 2003 | 9 923.0   | 22 500.0   | 37.79                                | 5.40                       | 4 470.0                        | 18.32   | 8.08  |
| 2004 | 9 266.0   | 27 700.0   | 40.05                                | 4.88                       | 3 480.0                        | 19.36   | 6.48  |

今后有色金属工业污染物排放量若不大幅下降，那么随着产量的增加，“三废”排放量也将大幅增加。由表7可见，有色金属工业固体废物量大，利用率低。伴随有色金属工业的发展，固体废物产生量和冶炼渣等呈逐年上升的趋势，其堆存量也逐年增加，预计到2010年，有色金属工业历年的固体废物将接近 $2 \times 10^9$  t，占用大量的土地，污染环境。可见，我国有色金属工业在资源利用、环境治理等方面还需做大量的工作，解决目前存在的问题。

通过上述分析，我们应当清醒地认识到，一方面有色金属材料产业和材料工作者，为国民经济发展、国防建设和人民生活水平提高做出巨大的贡献，但另一方面，有色金属材料产业又是资源、能源的主要消耗者和环境污染的主要责任者之一。面对有限自然资源(包括资源型能源)的过度开发、贫化和枯竭的威胁，以及带给环境的日益严重污染，作为有色金属材料工作者应当冷静的思考，积极探索既保证材料性能、数量需求，又节约资源、能源和与环境协调的材料生产技术，制定有色金属材料可持续发展的战略。这是时代赋予我们的义不容辞的历史责任。

## 2 有色金属材料可持续发展的对策

目前，基于国际竞争和可持续发展的需求，世界各国在资源、环境与材料的可持续发展问题上给予高度重视，积极调整经济和科技发展战略。美国、加拿大、日本和欧盟的许多国家都与世界经贸组织、国际标准化组织合作，将有色金属材料和产品的环境标识标准化，以参与全球经济竞争、促进本国工业生产和社会经济的发展。为了在竞争上获得优势，美、日和欧洲在有色金属材料产业中更多地应用环境友好的新材料。在国家层面的科技发展组织和体制建设方面，

表 7 1993—2010 年有色金属工业固体废物产生量和堆存量

Table 7 Volume of solid wastes produced and stock of non-ferrous material industry from 1993 to 2010

| Year | Volume of solid wastes produced/<br>$10^4\text{t}$ | Red mud tailing/<br>$10^4\text{t}$ | Slag/<br>$10^4\text{t}$ | Recycling ratio of solid waste/% | Stock of solid waste/<br>$10^4\text{t}$ | Site area/<br>$10^4\text{m}^2$ | Accumulation stock past years/<br>$10^4\text{t}$ |
|------|--|------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---|--------------------------------|--|
| 1993 | 5 966  | 5 305                              | 324                     | 8.9                              | 4 871                                   | 5 891                          | 134 682  |
| 1997 | 7 702  | 6 970                              | 406                     | 8.0                              | 6 436                                   | 7 490                          | 158 852  |
| 2000 | 8 172  | —                                  | 475                     | 8.0                              | 7 518                                   | 8 068                          | 173 931  |
| 2005 | 8 308  | —                                  | 385                     | 9.4                              | 7 560                                   | 8 093                          | 181 898  |
| 2010 | 8 853  | —                                  | 406                     | 10.0                             | 7 967                                   | 8 539                          | 166 370  |

日本近年明确提出从“技术立国”向“环境立国”转变的国家经济发展策略, 全面制定循环型社会的产业科技发展计划, 以及相应的法规和运行机制。其中有色金属材料制品从源头无毒无害、制造和使用过程的高效节能与污染防治、循环利用等是其相关法制建设和科技发展规划的核心组成部分。

因此, 探索适合中国国情的有色金属材料可持续发展之路, 把循环经济思想渗透或贯穿于有色金属材料的全部生产过程之中, 走一条既符合我国实际; 又借鉴各国经验, 降低资源、能源消耗, 减少三废(废水、废气、固体废物)排放, 提高废弃物循环利用效率, 是我国有色金属材料及其产业实施可持续发展战略的当务之急。

循环经济是按照生态学规律, 模仿生态系统的物质流动和能量转化模式来指导人类社会的经济活动, 并将经济系统和谐地纳入到自然生态系统的物质循环过程中。循环经济是一种以资源的高效利用和循环利用为核心, 以“减量化、再利用、资源化”为原则(3R原则), 以“低消耗、低排放、高效率”为基本特征, 符合可持续发展理念的经济增长模式, 是对“大量生产、大量消费、大量废弃”的传统增长模式的根本变革。因此, 在有色金属材料及其产业发展循环经济, 是落实以人为本、全面协调可持续的科学发展观; 转变经济增长方式, 走新型工业化道路, 建设资源节约型、环境友好型社会; 环境保护由末端治理向污染预防转变, 解决结构性污染的有效措施; 缓解资源约束、减轻环境压力; 实现全面建设小康社会目标, 促进人与自然和谐的必然选择。

## 2.1 坚持“3R”原则

“减量化(Reduce)、再利用(Reuse)、再循环(Recycle)”3R原则, 是循环经济的核心内容, 是提高资源、能源利用效率, 保护生态和促进经济发展所必

须遵循的基本原则。

### 2.1.1 减量化原则

减量化原则属于输入端方法, 旨在减少进入生产过程的物质量, 从源头节约资源和减少污染物排放。它要求投入较少的原料和能源达到既定的生产目的或消费目的, 从而在经济活动的源头就注意节约资源和减少污染。企业可以通过技术改造、采用先进的生产工艺、实施清洁生产来减少单位产品生产的原料使用量, 以达到节约资源和减少废弃物排放的目的。例如, 在皮江法炼镁生产过程中, 采用回转窑煅烧白云石、蓄热式加热炉还原工艺可较大幅度降低白云石的消耗, 提高能源利用效率。

### 2.1.2 再利用原则

再利用原则属于过程方法, 是指产品多次使用或修复、翻新或再制造后继续使用, 尽可能地延长产品的使用周期, 防止产品过早地成为垃圾。目的是提高产品和服务的利用率, 使各种物质和能量各尽其能。有色金属企业拥有大量的设备包括生产设备和运输设备, 在生产工艺、设备的设计中, 应尽量采用标准化设计, 这样不仅可以使备品备件的资源共享, 减少库存, 而且还可以使生产设施非常便捷地升级换代, 而不必更换整套设施。对于运输设备应进行部分零部件的翻新而不必要对整个设备进行替换从而提高运输能力。

### 2.1.3 再循环原则

再循环原则(亦称资源化原则)属于输出端方法, 要求物品完成使用功能后重新变成再生资源, 从而又回到输出端开始新一轮的生产加工。它能使废弃物最大限度地转化为资源, 变废为宝、化害为利, 既可减少自然资源的消耗, 又可减少污染物的排放。资源的循环再利用, 不仅可以延缓甚至解决资源枯竭的问题, 而且可以极大地减缓对环境造成压力。表 8 所列为有色金属工业废金属循环再利用的节能效果<sup>[8]</sup>。由表 8

可见,废有色金属循环再利用的生产能耗要比原生矿金属生产能耗低得多。

值得注意的是,“3R”原则在循环经济中的重要性并不是并列的,不是简单地通过循环利用实现废弃物资源化,而是强调优先减少资源消耗和废物产生。3R原则的优先顺序是:减量化、再利用、再循环。

**表8** 有色金属工业废金属循环再利用的节能效果

**Table 8** Saving energy result of recycling of non-ferrous materials resources

| Metal | Energy consumption/(GJ·t <sup>-1</sup> ) |                       |               | Saving energy proportion/% |
|-------|--|-----------------------|---------------|----------------------------|
|       | Extract uranium from ores                | Production from waste | Saving energy |                            |
| Mn    | 372                                      | 10                    | 362           | 97.3                       |
| Al    | 353                                      | 13                    | 340           | 96.3                       |
| Ni    | 150                                      | 16                    | 134           | 89.3                       |
| Cu    | 116                                      | 19                    | 97            | 83.6                       |
| Zn    | 68                                       | 19                    | 49            | 72.1                       |
| Pb    | 28                                       | 10                    | 18            | 64.3                       |

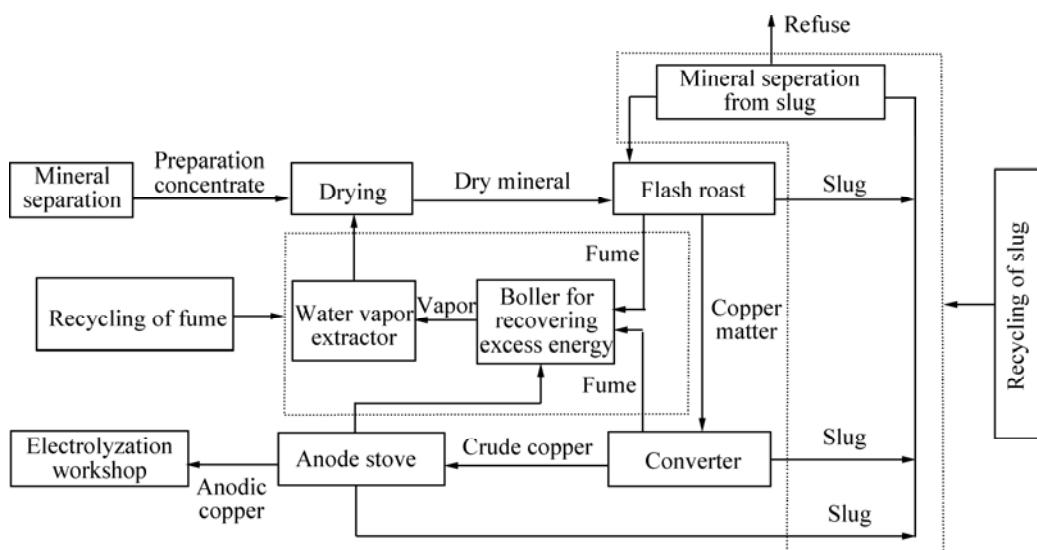
## 2.2 实施“3个层面的物质循环”

通常3个层面的物质循环包括小循环、中循环和大循环,它们都是以企业为主的。小循环发生在企业内部;中循环发生在企业与企业之间;大循环发生在企业与社会之间。这3个层面的物质循环均遵循“3R”基本原则,为循环经济的核心内容。下面分别简述这

3个层面物质循环的具体应用。

1) 小循环——企业内部的物质循环,是循环经济在微观尺度上的基本表现。它是根据生态效率的理念,在企业内部推行清洁生产,实现资源、能源的部分、全部循环或梯次利用。图1所示为江西某铜矿生产企业内部物质循环示意图<sup>[9]</sup>。该铜矿生产企业在生产过程中,不仅重视生产过程的节能减排工作,而且重视企业内部产生的副产品等的回收利用。企业积极推行清洁生产,对生产过程中产生的尾矿、炉渣、烟气、蒸汽等副产资源,积极回收,加以利用,大大提高了企业的资源利用效率,改善了生产环境。

2) 中循环——企业与企业之间的循环,是根据生态学的原理,通过企业间的物质、能量和信息的交换与集成,形成企业间的工业代谢和共生关系,构成生态工业园区,获得企业经营的规模效益和生态效益,提高资源和能源利用效率,改善园区整体的经济、社会和环境表现。如我国安徽省某铜业生态工业园,它由铜矿采选、冶炼、加工、化工企业组成<sup>[10]</sup>,见图2。采选企业的硫酸烧渣被收集,运往化工企业生产硫酸;生产过程产生的蒸汽输往电厂,发电;低压蒸汽、输往废铜拆解厂、铜加工厂和冶炼厂,作为二次能源加以利用;废铜拆解厂、铜加工厂产生的废铜,运往冶炼厂,作为原料重新加工成精铜等等,企业之间构成了副产品再利用、余热余能梯级利用的生态产业链,不同企业之间形成比较完整的闭合工业生态系统,实现园区资源的最佳配置和利用。



**图1** 江西省某铜矿生产企业内部的物质循环

**Fig.1** Recycling of materials within copper enterprise in Jiangxi province

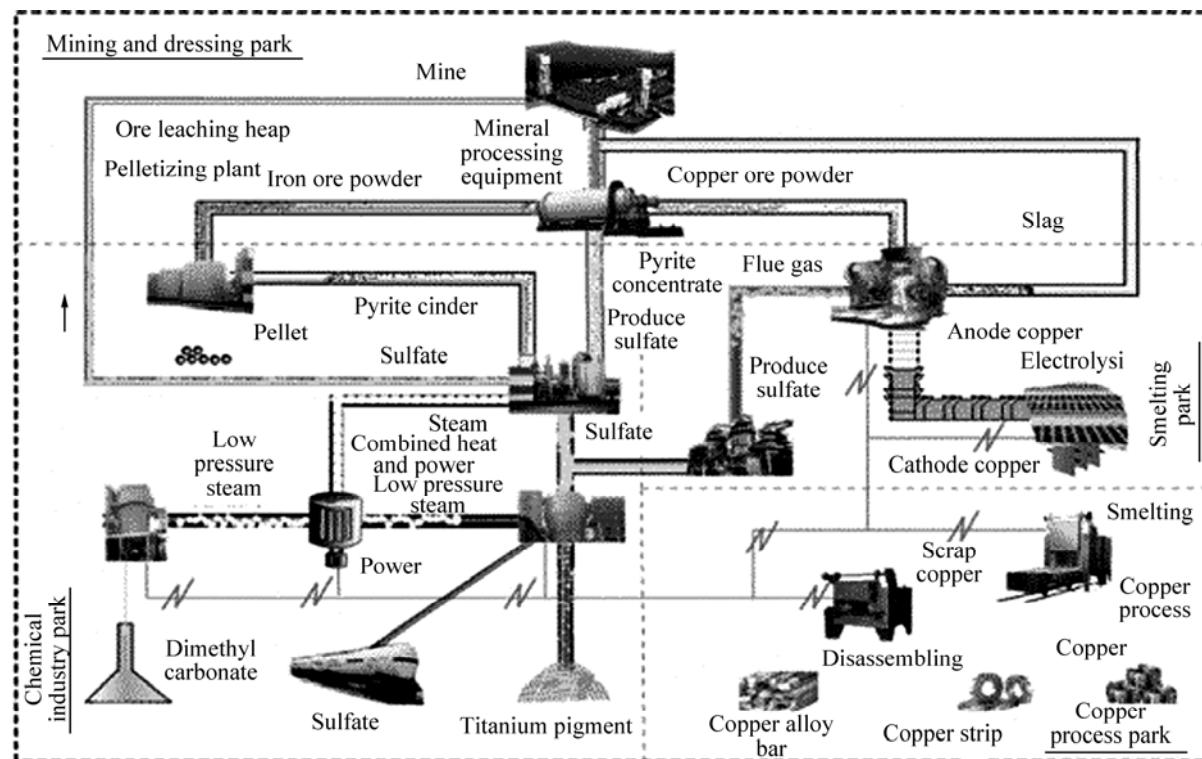


图2 安徽省某铜业生态工业园分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of some eco-industrial park of copper in Anhui Province

3) 大循环——企业与社会之间的物质循环, 在整个城市和社会层面, 围绕城市中水回用和垃圾减量化、无害化和资源化, 建设城市资源循环型社会。以铝—电企业未来将扮演的社会和经济角色来决定铝—电企业循环经济的发展思路, 可进一步拓展有色金属材料生产功能, 使其不仅具有生产功能, 而且还具有社会部分大宗废弃物处理及为相关行业提供原料等功能。铝—电企业在社会层面上可形成以下代谢循环关系: ①向社会提供电力和余热; ②消纳社会消费产生的废铝; ③利用废水处理系统处理社区的废水和污水; ④给建材厂提供生产路基材料和水泥的原材料(具体废物循环状况如图3所示<sup>[11]</sup>)。经过一些技术的开发可以达到物质和能源的减量化, 使得铝—电企业由污染大户发展成为环境友好的循环经济社会的一员。

### 2.3 发展资源再生产业

资源再生产业, 亦称静脉产业, 是以保障环境安全为前提, 以节约资源、保护环境为目的, 运用先进的技术, 将生产和消费过程中产生的废物转化为可重新利用的资源和产品, 实现各类废物的再利用和资源化的产业。静脉产业系统物质流动的过程为: 将产业废物和生活垃圾经过回收、分拣、再生和加工等处理

过程, 转换为再生资源或再生产品, 重新进入消费领域。“静脉产业”是废物资源化的产业, 它是相对于“动脉产业”(开发利用自然资源形成的产业)而言的。发展静脉产业就是要在减少污染物“输出流量”的同时, 减少“污染存量”。

我国铝资源储量极为有限, 相对缺乏, 发展铝资源再生产业, 即静脉产业对我国节约资源、能源, 改善环境具有重要意义。由统计资料可知, 再生铝生产与原铝生产相比节能达97.42%(见表9), 节能效果显著; 而且铝再生与原铝生产相比, 工艺简单, 流程短, 废气、废水、废渣少, 对环境的污染小<sup>[8, 12]</sup>。例如, 用17.5%品位的铝矾土生产铝与用废杂铝生产再生铝进行对比发现, 每再生1t铝, 除节能外, 还节水10.5t, 少用固体材料11t, 少排放二氧化碳0.8t, 少排放硫氧化物0.06t, 少处理废液、废渣1.9t, 免剥离地表土石0.6t, 免采掘脉石6.1t<sup>[13]</sup>。

### 2.4 开展生态设计

传统设计主要是根据用户提出的性能、质量和成本的要求来设计的。这种设计很少考虑节省能源、资源再生利用以及对生态环境的影响。从20世纪80年代开始, 随着全球范围环保意识的加强, 使得设计师

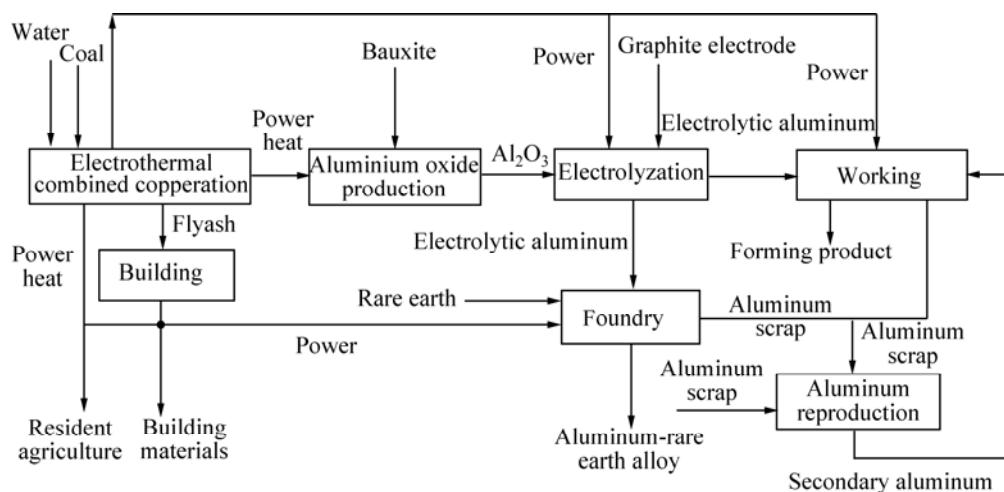


图3 铝—电企业与社会之间的物质循环

Fig.3 Materials recycling between aluminum-electricity enterprise and society

表9 生产再生铝与电解铝所需能量比较

Table 9 Comparison between production of recycling aluminum and original aluminum

| Energy kind           | Electrolytic aluminum/(GJ·t <sup>-1</sup> ) |                 |         | Recycling aluminum/(GJ·t <sup>-1</sup> ) |                            |
|-----------------------|---|-----------------|---------|--|----------------------------|
|                       | Electrolytic and smelting                   | Other processes | Total   | Smelting                                 | Result of saving energy /% |
| Electricity           | 167 609                                     | 7 068           | 174 677 | 1 083                                    | 99.4                       |
| Heavy oil Natural gas | 16 167                                      | 22 314          | 38 481  | 4 414                                    | 88.53                      |
| Total                 | 183 776                                     | 29 382          | 213 158 | 5 492                                    | 97.42                      |

开始考虑第三要素即产品或工艺的环境性能，把可持续发展作为设计的终极目标，于是，就产生生态设计概念。

生态设计是一种新的设计概念，它以产品环境特性为目标，以生命周期评价为工具，综合考虑产品整个生命周期相关的生态环境问题，设计出对环境友好、又能满足人的需要的新产品<sup>[14-15]</sup>。它要求设计人员在产品构思和设计阶段就要把降低能耗、资源再生利用和保护生态环境，与保证产品的性能、质量和成本的要求列为同等重要的设计指标，并保证在一定工艺流程中能够实施。生态设计反映了可持续发展的基本精神，它是在现代科学技术的条件下，以最少的能耗获取最大的社会发展，确保生态系统的良性循环。

生态设计应遵循减量化，再利用，再循环，清洁化，无毒、无害化等原则。例如，通用合金的设计<sup>[13]</sup>。以往总是针对不同的用途开发不同的材料，使材料的种类一直在增加。在循环利用过程中，种类繁多的材料混杂在一起，使废料的循环利用变得非常困难，即使循环利用成功，也往往只能逐次降级利用。所以，

在材料产品设计之初，就从提高金属材料的循环利用性能出发，兼顾各种用途要求。如通过选择适当的化学组分和热加工工艺，以获得大范围变化的显微组织和力学性能，而且简单的组元和类似的化学成分，使产品在循环利用过程中回收的废弃物具有大致相同的成分，易于循环再利用。

### 3 结束语

有色金属材料产业应围绕缓解我国经济发展的资源和能源瓶颈、减少和治理环境污染，突破绿色技术壁垒，实现资源、环境和社会可持续发展的战略目标；以“减量化、再利用、再循环”为原则，广泛开展大、中、小这3个层面的物质循环，建立从材料及产品设计、生产、回收和再利用的循环利用体系；大力有色金属静脉产业，实现废物的再利用和再循环；大力推广生态设计，研究开发节能型、环保型和循环型有色金属材料，改变我国有色金属材料产业目前高产

量、低产值的现状; 全面促进有色金属材料产业的生态化改造和技术提升, 为材料产业发展循环经济, 实施可持续发展战略奠定技术基础。

## REFERENCES

- [1] 世界环境与发展委员会. 我们共同的未来[M]. 北京: 世界知识出版社, 1989.  
The World Commission on Environment and Development. Our common future[M]. Beijing: World Knowledge Press, 1989.
- [2] 中国21世纪议程管理中心. 中国21世纪议程-中国21世纪人口、环境与发展白皮书 [EB/OL]. [2008-04-18]. <http://www.sdinfo.et.cn/acc21/cca21pa.html>.  
The Administrative Center for China's Agenda 21. China's Agenda 21-Population, Environment and Development[EB/OL]. [2008-04-18]. <http://www.sdinfo.net.cn/acc21/cca21pa.html>.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 2007中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007: 9.  
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook, 2007[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007: 9.
- [4] 张其仔. 采掘与冶炼业企业竞争力分析 [EB/OL]. [2008-04-18].  
[http://www.china.com.cn/economic/zhuanti/zgqyjzlb/2007-11/28/content\\_9309851.htm](http://www.china.com.cn/economic/zhuanti/zgqyjzlb/2007-11/28/content_9309851.htm).  
ZHANG Qi-zi. Analysis on the competitiveness of enterprises in mining and metallurgy industry [EB/OL]. [2008-04-18]. [http://www.china.com.cn/economic/zhuanti/zgqyjzlb/2007-11/28/content\\_9309851.htm](http://www.china.com.cn/economic/zhuanti/zgqyjzlb/2007-11/28/content_9309851.htm).
- [5] 陈毓川. 矿产资源展望与西部大开发 [EB/OL]. [2008-04-18].  
<http://scitech.people.com.cn/GB/25509/51788/51790/3631607.html>.  
CHEN Yu-chuan. Prospect of mineral resources and the grand western development program in China[EB/OL]. [2008-04-18]. <http://scitech.people.com.cn/GB/25509/51788/51790/3631607.html>.
- [6] 刘树臣, 李树枝, 吴初国, 王淑玲, 葛振华, 闫卫东, 刘增洁, 马建明, 奚胜, 崔荣国, 张迪. 2004年矿产资源形势回顾 [J]. 国土资源情报, 2005(1): 6-13.  
LIU Shu-chen, LI Shu-zhi, WU Chu-guo, WANG Shu-ling, GE Zhen-hua, YAN Wei-dong, LIU Zeng-jie, MA Jian-ming, XI Shen, CUI Rong-guo, ZHANG Di. Review on the situation of mineral resources in 2004[J]. Information on the National Land and Resources, 2005(1): 6-13.
- [7] 中华人民共和国国家统计局. 2006中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006: 9.  
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook, 2006[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006: 9.
- [8] 邱定蕃, 徐传华. 有色金属资源循环利用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 12.  
QIU Ding-fan, XU Chuan-hua. Recycling of non-ferrous metals resources[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2006: 12.
- [9] 黄志鸿. 铜工业循环经济研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2006.  
HUANG Zhi-hong. Study on the circular economy development for copper industry[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2006.
- [10] 铜陵市循环经济办公室. 铜陵循环经济网 [EB/OL]. [2008-04-18]. <http://www.tlxhjj.gov.cn/>.  
The Office of Tongling City for Recycling Economy. The web for introducing recycling economy in Tongling city[EB/OL]. [2008-04-18]. <http://www.tlxhjj.gov.cn/>.
- [11] 元炯亮. 循环经济与铝业生态系统[J]. 有色金属, 2003, 55(增刊): 27-30.  
YUAN Jiong-liang. Circular economy and ecological system in aluminum industry[J]. Nonferrous Metal, 2003, 55(Suppl): 27-30.
- [12] JOHN C B. Recycling and life-cycle analysis. Metals Handbook[M]. 2nd ed. ASM International, 1998.
- [13] 李宏伟. 机遇与挑战——中国废铝的回收利用与再生铝行业的发展[J]. 有色金属再生与利用, 2003(4): 9-12.  
LI Hong-wei. Opportunities and challenges-recycling of aluminum scrap and development of renewable aluminum industry in China[J]. Recycling and Reuse of Non-ferrous Metals, 2003(4): 9-12.
- [14] 左铁镛, 聂祚仁, 狄向华, 李贵奇. 中国材料环境协调性评价研究进展[J]. 材料导报, 2001, 15(6): 1-3.  
ZUO Tie-yong, NIE Zuo-ren, DI Xiang-hua, LI Gui-qi. Materials life cycle assessment in China[J]. Journal of Materials Review, 2001, 15(6): 1-3.
- [15] 高峰, 聂祚仁, 王志宏, 左铁镛. 中国皮江法炼镁的资源消耗和环境影响分析[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(8): 1456-1461.  
GAO Feng, NIE Zuo-ren, WANG Zhi-hong, ZUO Tie-yong. Resource depletion and environmental impact analysis of magnesium produced using pigeon process in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(8): 1456-1461.

(编辑 龙怀中)