

# 我国铅物质流分析研究

郭学益, 钟菊芽, 宋瑜, 田庆华

(中南大学 冶金科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 从铅的生产、铅制品的加工制造、铅制品的使用和废杂铅的处理等阶段详细地阐述了铅循环的“STAF (stocks and flows)”物质流分析模型. 运用此模型分析了 2006 年我国铅的社会存量变化及其流动状况, 并且计算出 2000—2006 年几项重要指标的平均值分别为: 生产阶段的原料自给率  $P_Z = 79.28\%$ ; 生产阶段使用废杂铅的比例  $P_S = 19.08\%$ ; 加工制造阶段的原料自给率  $M_Z = 148.91\%$ ; 加工制造阶段使用废杂铅的比例  $M_S = 30.25\%$ ; 矿石指数  $R = 0.8349$ ; 废铅指数  $S = 0.1949$ . 在此基础上总结了我国在铅资源循环利用方面的不足, 并对铅工业的发展和资源的循环利用提出建议.

**关键词:** 铅; 物质流分析; “STAF (stocks and flows)”模型; 资源循环

**中图分类号:** TF 812

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254—0037(2009)11—1554—08

物质流分析(substance flow analysis, 简称 SFA)是在一个国家或地区范围内, 对特定的某种物质(如铝和铅等)进行工业代谢研究的有效手段. 通过物质流分析, 可以控制有毒害物质的投入和流向, 分析物质流的使用总量和使用强度, 为环境政策提供了新的方法和视角<sup>[1]</sup>. 有色金属工业是以开发矿产资源为基础的原材料工业, 矿产资源的不可再生性, 对有色金属工业实施可持续发展战略影响尤为重大. 因此, 在有色金属资源分析研究领域引进物质流分析方法, 以量化的研究成果为依据, 以经济可持续发展为目标, 制定有色金属资源开发利用及环境保护的方针和政策, 具有更强的可操作性和重要意义<sup>[2]</sup>. 铅可应用于化学电源、化学防腐、防射线辐射、冶金合金、玻璃、电子电器(焊料和电缆等)和机械制造业等领域. 铅及其化合物对人体有较大毒性, 可在人体内积累. 铅是 10 种常用有色金属之一, 产量在铝、锌、铜之后, 居第 4 位, 是我国经济建设中广泛使用的金属材料<sup>[3-4]</sup>. 本文对我国历年来铅物质流的情况进行了分析, 旨在明晰我国铅物质的流向及其资源循环利用的状况, 为实现铅资源的高效综合利用提供指导.

## 1 铅物质流分析的过程选择

### 1.1 铅物质流概述

铅的物质流分析模型由 4 个主要过程组成: 生产、加工制造、使用以及废弃物的处理, 必要时这些过程可再细分为若干小过程, 例如生产可分为采矿、磨粉、熔炼和精炼. 图 1 为铅和铅合金生命周期的物质流分析模型, 概括了这 4 个主要过程和若干小过程以及将它们联系在一起的所有物质流, 但不包括铅在生物圈中的损失<sup>[5-8]</sup>.

我国 2006 年矿山铅产量为 133.06 万 t(文中数据除特别说明外, 均指含铅量), 包括铅矿石、精矿中的铅含量以及混合矿石中的铅含量, 国内生产的精炼铅锭产量为 271.49 万 t<sup>[9]</sup>. 2004—2006 年我国铅锭的产量及消费量, 如表 1 所示.

2006 年我国铅矿、废杂铅和铅金属制品等各种含铅物质的进出口数据, 如表 2 所示. 可见, 铅精矿的进口量很大, 精铅和铅酸电池的出口量也较大. 铅合金和废杂铅的进出口贸易量都很小, 在物质流分析中基本可忽略不计.

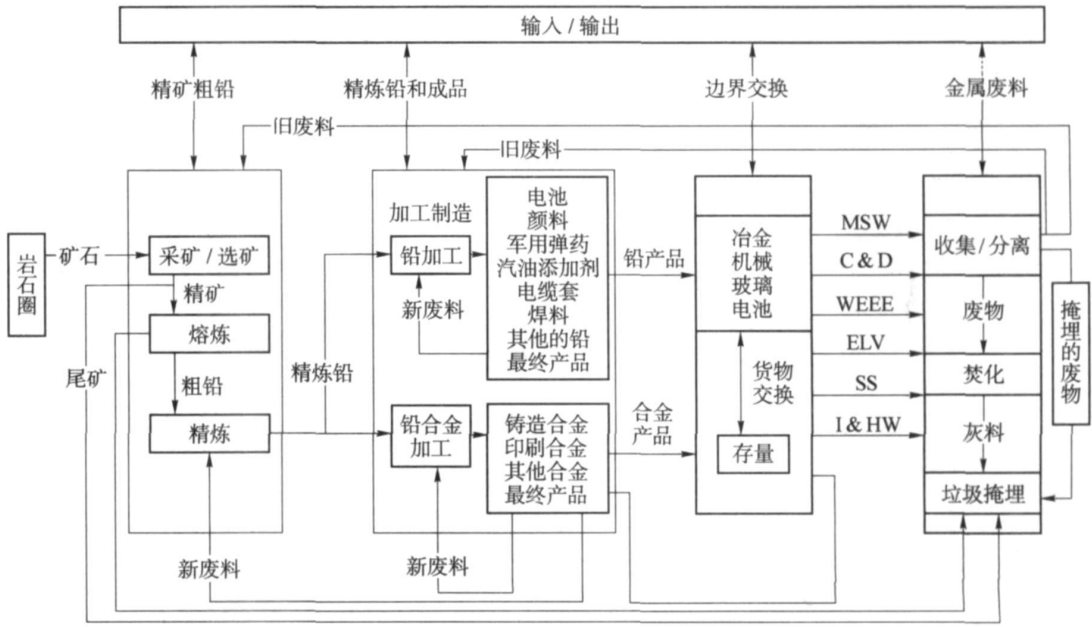


图 1 铅和铅合金生命周期的物质流分析模型

Fig.1 Life cycle stages of lead and lead alloys

表 1 2004—2006 年我国铅锭产量及消费量<sup>[9]</sup>

Table 1 The production and consumption of lead ingot of China in 2004—2006

万 t

项目	2004	2005	2006	项目	2004	2005	2006
国内矿山铅产量	99.72	114.20	133.06	铅锭消费量	143.47	196.46	222.84
粗铅产量	145.78	178.58	209.46	铅锭出口量	46.34	46.50	55.12
铅锭总产量	193.45	239.14	271.49	铅锭进口量	8.48	5.86	5.68

注: 铅锭产量包括来自原生和再生材料的硬铅中的铅。

表 2 2006 年我国铅矿、废杂铅及铅金属制品的进出口情况<sup>[9]</sup>

Table 2 The data of import & export about lead ore, old scraps and lead-product

万 t

项目	出口数量	进口数量	项目	出口数量	进口数量
铅精矿	80	118.87	铅金属制品	4.26	0.60
未锻轧铅(产品)	55.21	5.68	铅材	0.51	0.55
未锻轧铅(产品)中精铅	53.71	3.34	氧化铅/铅丹/铅橙	1.73	0.012
铅合金	1.50	2.34	铅酸蓄电池含铅量	56.12	7.90
废杂铅	0	0.002 3			

## 1.2 铅的生产阶段

铅的生产过程首先要进行矿石的开采和选矿, 铅原矿品位约为 3.24%, 经选矿产出含铅约为 63.83% 的精矿和含铅约为 0.24% 的尾矿. 精矿被送入熔炼炉产出含铅为 95% 的粗铅和渣, 粗铅进一步精炼为含铅 99% 的高纯电解精炼铅<sup>[8]</sup>. 目前世界上电铅基本上都是由火法流程生产的, 其中主要的矿产铅仍采用烧结-鼓风机熔炼流程进行生产, 有的国家针对传统火法流程进行了改造, 发展了直接炼铅法, 在一定程度上减轻了污染物的排放<sup>[10-12]</sup>.

由表1、2可得出2006年我国铅的生产阶段中各种原料的投入量. 流出生产阶段的铅物质流主要为精炼铅、尾矿、熔渣以及在生产过程中可能的金属损耗. 2006年我国矿山铅产量为133.06万t, 选矿效率为84.7%, 由此可得出我国自产铅矿含铅量为157.10万t, 尾矿含铅量为24.04万t. 由铅冶炼的总回收率为94.27%和净进口铅精矿含铅量为24.88万t可推算出2006年我国冶炼渣含铅量为9.05万t<sup>[9]</sup>.

### 1.3 铅制品的加工制造阶段

铅的加工制造过程包括中间产物的生产和最终产品的制造. 精炼铅、铅材及废杂铅经加工制造阶段后成为各种纯铅或铅合金制品. 由加工制造环节产出的新废料有3种去向: 进入生产环节(用于再生铅锭的生产)、重新进入加工制造环节(重熔或直接利用)、进入废物处理环节(作为无害或有害工业废物). 在物质流研究中假定加工制造环节产出的新废料不参与区域间的贸易活动, 则只考虑进入生产环节的和重新进入加工制造环节的新废料.

由生产环节进入加工制造环节的铅物质流是生产环节流出物流的一个分支. 由加工制造环节流入废物处理环节的物质流是废物处理环节流入物流的一个分支. 离开加工制造阶段进入使用阶段的铅物质流量以流入和流出加工制造环节的铅物质流差值来计算.

2006年, 我国铅物质循环中投入加工制造阶段的原料包括国产精炼铅271.49万t, 其中回收的废杂铅的含铅量约为铅锭产量的10%, 即27.15万t. 另外, 80%左右的回收废杂铅(即21.72万t)直接返回加工制造阶段进行处理, 而剩下的20%左右的回收废杂铅(即5.43万t)则返回铅生产阶段.

### 1.4 铅制品的使用阶段

铅的使用过程包括产品的使用和积存, 使用的产品可以是组合体(如蓄电池), 或者用以组成更大体系(如建筑物以及电讯网络)的零部件(如电缆和合金板)<sup>[13]</sup>.

在我国铅主要用于蓄电池、电缆护套和氧化铅(红丹和黄丹), 三者的年平均耗铅量占我国铅年消费总量的85%以上<sup>[14]</sup>. 由于汽车工业是蓄电池的最大用户, 而蓄电池又是铅的最大应用领域, 所以, 我国铅需求增长的主要推动力是汽车工业的发展和汽车保有量的快速增加<sup>[15-16]</sup>.

### 1.5 铅的废物回收处理阶段

废弃物的处理包括废品的收集和分离过程, 其中废弃物中所含的铅成分通过分离和循环而成为二次铅, 其他的废弃部分则送入焚化炉或进行垃圾掩埋. 铅离开废物处理系统的主要途径是循环回收和流失到环境中, 而留存在环境中的则是被进行垃圾掩埋的铅.

我国再生铅回收利用起步较早, 原料来源较多, 85%以上来自废旧铅酸蓄电池, 少量来自电缆包皮、耐酸器皿衬里、印刷合金、铅锡焊料及轴承合金. 长期以来中国在蓄电池销售中采取“交旧买新”办法, 废铅回收情况比较好, 历年来呈逐渐增长趋势<sup>[17]</sup>.

根据文献<sup>[17]</sup>估计, 2006年我国回收的用于生产和加工制造的废杂铅资源总量约为精炼铅产量的45%, 即122.2万t. 其中, 加工制造阶段废料产生率为10%, 即加工制造阶段产生27.15万t的新废料, 而废物回收阶段产生95.05万t的旧废料, 又约有47.53万t用于生产阶段. 由前文可知, 机械加工制造过程中产生的约5.43万t的废杂铅进入生产流程, 所以2006年我国回收的用于生产的废杂铅含铅量约为52.96万t.

统计结果表明, 2001—2006年我国从国外进口的废杂铅的含铅量很少, 基本上可忽略不计. 据文献估算, 国内废杂铅的回收量约为国内精炼铅产量的45%, 即122.2万t<sup>[18]</sup>(见表3). 又由于我国废弃铅酸蓄电池和其他铅制品的回收率接近90%, 所以估算可得报废的铅制品含铅量约为105.61万t, 其中约有10.56万t经废物掩埋流入生物圈<sup>[19]</sup>.

表 3 2001—2006 年我国废杂铅产销状况<sup>[17]</sup>

Table 3 The production and consumption of lead scrap of China in 2001—2006

项目名称	2001	2002	2003	2004	2005	2006
国内精炼铅产量/万 t	119.5	132.5	156.4	193.5	239.1	271.5
国内废杂铅含铅回收量/万 t	53.8	59.6	70.4	87.1	107.1	122.2
国内统计的再生铅产量/万 t	21.2	25.2	28.3	42.5	53.7	58.7
再生铅产量占精铅产量的百分比/%	17.7	20.4	18.0	21.96	22.5	21.6
再生铅产量占废杂铅回收量的百分比/%	39.2	42.3	40.0	48.79	50.1	48.0

## 2 我国铅物质流分析的模型与指标

根据文献[2, 20-23], 尾矿品位为 0.24%; 铅精矿含铅为 64%; 废杂铅含铅为 60%; 铅合金和氧化铝等铅材含铅为 80%; 旧废料直接利用和间接利用率均为 50%, 综合数据整理可得到 2006 年我国的铅物质流图, 如图 2 所示. 根据以上数据整理可以初步分析生产阶段和加工制造阶段的原料自给率和使用废杂铅的比例, 并计算出铅生产阶段的几个重要指标.

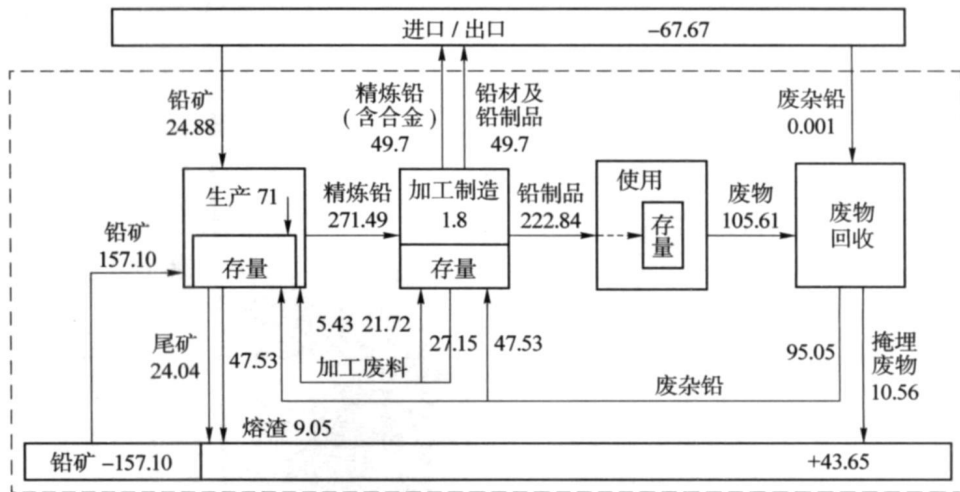


图 2 2006 年中国的铅物质流图(单位: 万 t)

Fig-2 The lead cycle of China in 2006

### 2.1 铅生产和加工制造阶段的原料自给率和使用废杂铅的比例

铅生产过程中投入原料(含铅量)分别为: 自产铅矿 157.10 万 t; 净进口铅矿 24.88 万 t; 国内回收的废杂铅 52.96 万 t(国内旧废料与加工新废料之和为 47.53 万 t + 5.43 万 t = 52.96 万 t). 进口废杂铅忽略不计.

所以, 生产阶段的原料自给率  $P_z$  为

$$P_z = \frac{157.10 + 52.96}{157.10 + 24.88 + 52.96} \times 100\% = \frac{210.06}{234.94} \times 100\% = 89.41\% \quad (1)$$

生产阶段使用废杂铅的比例  $P_s$  为

$$P_s = \frac{52.96}{157.10 + 24.88 + 52.96} \times 100\% = \frac{52.96}{234.94} \times 100\% = 22.54\% \quad (2)$$

铅加工制造过程中投入原料分别为: 自产精炼铅 271.49 万 t; 净出口精炼铅(含合金)49.70 万 t(净出口铅合金实物量中 80% 的铅加上净出口精铅); 净出口铅材及铅制品 42.85 万 t(实物量中铅); 直接利用

的铅新废料 21.72 万 t, 利用的回收废杂铅 47.53 万 t (全部旧废料的一半), 即共约 69.25 万 t 的废杂铅。

所以, 加工制造阶段的原料自给率  $M_Z$  为

$$M_Z = \frac{271.49 + 69.25}{271.49 - 49.70 - 42.85 + 69.25} \times 100\% = \frac{340.74}{248.19} \times 100\% = 137.29\% \quad (3)$$

加工制造阶段使用废杂铅的比例  $M_S$  为

$$M_S = \frac{69.25}{271.49 - 49.70 - 42.85 + 69.25} \times 100\% = \frac{69.25}{248.19} \times 100\% = 27.90\% \quad (4)$$

## 2.2 矿石指数 $R$

矿石指数, 即统计期内铅工业所需铅矿的含铅量与同期内生产的铅产品含铅量之比, 这一指标可以衡量铅工业对铅矿石资源的依赖程度。一个国家铅工业的矿石指数可定义为

$$R = \frac{\text{统计期内铅工业所需铅矿的含铅量}}{\text{统计期内的铅产量}} \quad (5)$$

我国 2006 年铅生产投入的自产铅矿含铅量为 157.10 万 t, 净进口铅矿含铅量为 24.88 万 t, 所以 2006 年铅工业的矿石指数  $R$  为

$$R = \frac{157.10 + 24.88}{271.49} = 0.6703 \quad (6)$$

此矿石指数相当于每生产 1 t 精炼铅, 要投入含铅量为 0.6703 t 的铅矿, 这也说明我国铅生产中, 原生矿石的比例虽然较大, 但是再生铅资源已成为重要的生产原料之一。

## 2.3 铅矿石资源效率 $R_P$

为了衡量物质效率, 需要采用人均或者单位国内生产总值消耗的物质, 这就是效率指标。资源生产率  $R_P$  是其中一个非常重要的效率指标。

$$R_P = \frac{\text{国内生产总值}}{\text{直接物质投入量}} \quad (7)$$

将这一指标引用到铅工业中可得到衡量铅工业中铅矿石等资源节约程度的重要指标——铅矿石资源效率, 它与矿石指数互为倒数, 所以得到我国 2006 年铅工业的铅矿石资源效率约为 1.492。

## 2.4 废铅指数 $S$

废铅指数  $S$  是衡量铅工业废铅资源充足程度的判据。  $S$  值愈大, 铅工业的废铅资源愈充足;  $S$  值愈小, 愈不充足。一个国家的废铅指数可定义为

$$S = \frac{\text{统计期内我国回收的用于生产精炼铅的折旧废铅量与加工废铅量之和}}{\text{统计期内的铅产量}} \quad (8)$$

我国 2006 年铅生产投入的国内回收的折旧铅量为 47.53 万 t, 加工废铅量为 5.43 万 t, 所以我国 2006 年铅工业的废铅指数  $S$  为

$$S = \frac{47.53 + 5.43}{271.49} = \frac{52.96}{271.49} = 0.1951 \quad (9)$$

# 3 我国铅物质流分析的结果讨论

如前所述, 矿石指数是衡量铅工业对铅矿石资源的依赖程度的重要指标。由表 4 可以看出, 在 2002 年, 我国的铅矿石指数出现最低值, 这是长期冶炼能力过快发展和轻视矿业的必然结果, 同时也存在其他原因。

另外, 由于近年来我国废铅资源的回收利用程度逐渐提高, 再生铅的产量在铅锭产量中的比例也呈现出逐年递增的趋势, 所以在工业发展和经济建设对铅的消费需求不断增长的情况下, 2004—2006 年我国精炼铅产量连年递增, 但铅矿石指数则相对比较稳定。相比 2000 年, 2006 年的净进口铅矿量的增幅为 281.69%, 远远大于自产铅矿的增幅(146.83%), 而净出口精炼铅则变化幅度很小(12.49%), 表明近年来

对于铅矿的需求量大幅增长, 而我国的矿产能力不能满足此需求量, 调整产需之间的差额就需要大量进口铅矿。2006 年净进口铅矿在我国铅工业矿产资源总量中的比例约为 32.62%, 比 2000 年提高了将近 10%。

表 4 2000—2006 年我国铅矿石指数

Table 4 The lead ore resource productivity of China in 2000—2006

指数	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
精炼铅产量/万 t	109.99	119.54	132.47	156.41	193.45	239.14	271.49
矿山铅产量/万 t	57.49	67.58	64.07	95.46	99.72	114.20	133.06
自产铅矿/万 t	67.87	79.79	75.64	112.70	117.73	134.83	157.10
净出口精铅量/万 t	44.03	43.50	35.59	39.48	37.86	40.64	49.70
净进口铅矿/万 t	19.93	24.90	27.52	43.46	53.15	65.92	24.88
<i>R</i>	0.798 3	0.875 8	0.778 8	0.998 4	0.883 3	0.839 5	0.670 3

注: 1. 精炼铅产量包括再生铅的产量; 2. 以上各项数据均指铅含量。

如表 5 所示, 2000—2006 年,  $P_Z$ 、 $M_Z$  和  $M_S$  均大致呈现出下降趋势。这种趋势表明, 在铅的生产环节中我国进口的铅矿量越来越大, 其在生产原料中的比例呈现递增趋势; 另一方面,  $M_Z$  始终保持在 135% 以上, 表明在铅的加工制造阶段, 我国产出的铅制品不但可以完全满足我国国内经济建设的需要, 还能保持较高的出口量, 满足欧美等国的生产和生活需求。然而, 2000—2006 年, 随着铅的消费量的逐年递增,  $M_Z$  呈现出逐年下降趋势, 这说明, 随着我国经济建设的快速发展, 我国出口到国外的精炼铅和其他铅制品虽然在数量上保持增长, 但在加工制造阶段铅资源总量中所占的比例出现了一定程度的下降, 这也与我国国产铅精矿满足国内消费的比例(即  $D_M$ )逐年下降的现实情况相符。

2000—2006 年,  $M_S$  均保持在 30% 左右, 说明我国在废旧金属资源的回收和再生利用方面, 废铅的循环再生水平较高。铅对人类健康和自然界的生态环境有很大的危害, 充分利用废铅资源意义重大。虽然与其他金属相比, 我国对于铅资源的回收现状较好, 但是这几年在废杂铅回收量递增的条件下, 其在该阶段生产原料中所占的比例大致呈现出下降趋势。表明在加工制造阶段对铅的需求量增幅较大, 废杂铅的回收量在满足生产要求的水平上有所下降。

表 5 我国 2000—2006 年精炼铅生产、铅加工制造及铅消费阶段的指标变化

Table 5 Indexes of production, manufacture and consumption of China in 2000—2006

阶段	指标	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	平均值
精炼铅生产阶段	$P_Z/\%$	81.76	80.55	78.67	76.72	74.52	73.33	89.41	79.28
	$P_S/\%$	19.63	18.20	20.02	16.34	18.09	18.77	22.54	19.08
	$R/\%$	0.798 3	0.875 8	0.778 8	0.998 4	0.883 3	0.839 5	0.670 3	0.834 9
	$S/\%$	0.195 0	0.194 9	0.195 0	0.195 0	0.195 1	0.193 9	0.195 1	0.194 9
铅加工制造阶段	$M_Z/\%$	163.54	159.11	152.02	156.38	137.95	136.11	137.29	148.91
	$M_S/\%$	33.23	32.34	30.89	31.77	28.04	27.56	27.90	30.25
铅消费阶段	铅的消费量/万 t	66.30	75.99	95.73	128.63	143.47	196.46	222.84	132.77
	$D_M/\%$	86.71	88.93	66.93	74.21	69.51	58.13	59.71	72.02

注: 2000—2006 年铅消费量逐年递增率的平均值为 22.81%。

通过物质流分析可以看出, 2000—2006 年我国铅工业的矿产指数略有上升, 表明原生矿产资源在工业生产原料中的比例略有提高, 但是因为我国铅工业的冶炼能力高于采选能力, 所以矿产资源的供需差距需要大量进口铅矿来填补。

## 4 结论

- 1) 在生产阶段和加工制造阶段,铅的原料自给率平均值分别为 79.28%和 148.91%.
- 2) 在生产阶段和加工制造阶段,废杂铅在原料中所占比例的平均值分别为 19.08%和 30.25%.
- 3) 生产阶段铅的矿石指数和废铅指数平均值分别为 0.834 9 和 0.194 9.

## 参考文献:

- [1] ALLENBY R B, RICHARDS J D. The greening of industrial ecosystems[M]. Washington D C: National Academy Press, 1994: 58-62.
- [2] 岳强. 物质流分析、生态足迹分析及其应用[D]. 沈阳: 东北大学材料与冶金学院, 2006.  
YUE Qiang. The substance flow analysis and ecological footprint analysis & application[D]. Shenyang: College of Materials and Metallurgy, Northeastern University, 2006. (in Chinese)
- [3] 蔡显弟, 冯君从, 江达, 等. 中国铅的消费及回收[J]. 世界有色金属, 1996(6): 37-40.  
CAI Xian-di, FENG Jun-cong, JIANG Da, et al. The consumption and recycling of lead in China[J]. World Nonferrous Metal, 1996(6): 37-40. (in Chinese)
- [4] TUKKER A, BUIST H, OERS L. Risks to health and environment of the use of lead in products in the EU [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006, 49(2): 89-109.
- [5] GUO Xue-yi, SONG Yu. Substance flow analysis of copper in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2008, 52(6): 874-882.
- [6] 郭学益, 田庆华. 有色金属资源循环理论与方法[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2008: 140-209.
- [7] 郭学益, 宋瑜. 有色金属物质流分析方法的研究与应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(5): 332-335.  
GUO Xue-yi, SONG Yu. The study and application of substance flow analysis of nonferrous metal[J]. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(5): 332-335. (in Chinese)
- [8] SPATARI S, BERTRAM M, FUSE K, et al. The contemporary European copper cycle: 1 year stocks and flows [J]. Ecological Economics, 2002, 42(1-2): 27-42.
- [9] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 2007 中国有色金属工业年鉴[M]. 北京: 中国有色金属年鉴编辑部, 2007: 460-570.
- [10] 蒋继穆. 我国铅锌冶炼现状与持续发展[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 52-62.  
JIANG Ji-mu. Status and sustainable development of lead and zinc smelting industry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(5): 52-62. (in Chinese)
- [11] 奚牲. 世界铅生产和供需现状[J]. 国土资源情报, 2005(6): 27-33.  
XI Shen. The production and demand-production of lead in the world[J]. Land and Resources Information, 2005(6): 27-33. (in Chinese)
- [12] 奚牲. 铅的储量、生产、消费、贸易基本状况[J]. 中国金属通报, 2007(14): 26-28.  
XI Shen. The stock, production, consumption and trade of lead[J]. China Metal Bulletin, 2007(14): 26-28. (in Chinese)
- [13] 王金良, 孟良荣. 精铅市场和铅蓄电池的发展[C]//2006 中国动力电池高层论坛论文集. 南京: [s.n.], 2006: 1-27.  
WANG Jin-liang, MENG Liang-rong. The status and development of lead & lead-battery[C]//2006 China Power Battery Forum Proceeding. Nanjing: [s.n.], 2006: 1-27. (in Chinese)
- [14] 冯君从, 靳海明. 中国铅锌的消费趋势[J]. 中国金属通报, 2003(41): 21-23.  
FENG Jun-cong, JIN Hai-ming. The consumption trend of lead-zinc in China[J]. China Metal Bulletin, 2003(41): 21-23. (in Chinese)
- [15] 王金良, 马扣祥. 铅和铅蓄电池工业现状与发展趋势[J]. 电池工业, 2005, 10(6): 364-368.  
WANG Jin-Liang, MA Kou-xiang. Status and development trend of lead and lead-acid battery industry[J]. Chinese Battery Industry, 2005, 10(6): 364-368. (in Chinese)
- [16] 黄仲权. 我国铅锌工业发展的现状与对策建议[J]. 世界有色金属, 2004(8): 4-6, 63.

- HUANG Zhong-quan. The development status and advice of lead-zinc industry in China[J]. *World Nonferrous Metal*, 2004(8): 4-6, 63. (in Chinese)
- [17] 马永刚. 中国废铅蓄电池回收和再生铅生产[J]. *电源技术*, 2000, 24(3): 165-168.  
MA Yong-gang. Recovery of waste lead-acid batteries and the production of regenerated lead in China[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2000, 24(3): 165-168. (in Chinese)
- [18] 曹异生. 中国有色金属再生资源回收利用现状及前景展望[J]. *中国金属通报*, 2006(16): 7-12.  
CAO Yi-sheng. Chinese non-ferrous metals recycling of renewable resources situation and outlook[J]. *China Metal Bulletin*, 2006(16): 7-12. (in Chinese)
- [19] 李富元. 中国废杂铅回收利用现状[J]. *有色金属再生与利用*, 2002(1): 27-32.  
LI Fu-yuan. The recycling of lead scraps in China[J]. *Non-ferrous Metals Recycling and Utilization*, 2002(1): 27-32. (in Chinese)
- [20] 岳强, 陆钟武. 关于中国铜的资源效率研究[J]. *世界有色金属*, 2006(3): 68-70.  
YUE Qiang, LU Zhong-wu. A study about copper resource efficiency for China[J]. *World Nonferrous Metal*, 2006(3): 68-70. (in Chinese)
- [21] 夏川勇. 整个经济物质流研究评述[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(3): 415-421.  
XIA Chuan-yong. Review on studies of economy-wide material flow analysis[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 415-421. (in Chinese)
- [22] RECHBERGER H, GRAEDEL T E. The contemporary European copper cycle: statistical entropy analysis[J]. *Ecological Economics*, 2002, 42(1-2): 59-72.
- [23] 岳强, 陆钟武. 中国铜循环现状分析(I)——“STAF”方法[J]. *中国资源综合利用*, 2005(4): 6-11.  
YUE Qiang, LU Zhong-wu. An analysis of contemporary copper cycle in China (I)——“STAF” method[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2005(4): 6-11. (in Chinese)

## Substance Flow Analysis of Lead in China

GUO Xue-yi, ZHONG Ju-ya, SONG Yu, TIAN Qing-hua

(School of Metallurgical Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In this paper the flow of lead in China, 2006, was traced within the STAF model, and the situation of production, consumption and recycling of lead resources in China were introduced. The SFA is performed on lead flows during its one-year life cycle in detail, and several main average indexes from 2000 to 2006 were calculated as following:  $P_Z = 79.28\%$ ,  $P_S = 19.08\%$ ,  $M_Z = 148.91\%$ ,  $M_S = 30.25\%$ ,  $R = 0.8349$  and  $S = 0.1949$ . Based on the result, the substance flow analysis of lead from 2000 to 2006 has been conducted, and the disadvantages of China in the field of copper resources' recycling were summarized, and some suggestions were put forward for the development of lead industry and the recycling of resources.

**Key words:** lead; substance flow analysis; STAF; resource recycling

(责任编辑 刘 潇)