

铅酸电池系统的铅流分析

毛建素¹, 陆钟武², 杨志峰^{1*}

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110004)

摘要: 探求铅的工业流动规律, 寻求环境管理的理论依据. 在构建铅酸电池生命周期铅流图基础上, 建立了铅酸电池系统与外部环境之间的联系, 获得了铅的工业流动基本规律. 结果表明, 提高铅的生态效率, 有助于铅矿资源保护和环境改善. 要做到这一点, 需要保持较高的铅循环率、较低的铅排放率. 提出了铅流状况的评价指标. 分析了中国铅酸电池系统中铅的流动. 通过与瑞典某铅酸电池系统中铅的流动进行对比, 发现由于中国铅的循环率低、铅的排放率偏高、铅酸电池年产量持续增长等, 造成了中国铅酸电池系统中铅的生态效率十分低下. 结合中国铅业实况, 分析了铅的循环率低和铅的排放率偏高的成因, 提出了改善对策.

关键词: 铅流分析; 评价指标; 铅酸电池; 生态效率; 铅循环率; 铅排放率

中图分类号: X883 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)03-0442-06

Lead Flow Analysis for Lead-Acid Battery System

MAO Jian-su¹, LU Zhong-wu², YANG Zhi-feng¹

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. SEPA Key Laboratory on Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The rules of lead industrial flow are studied and the theoretical evidence for environmental management is founded. Based on the lead flow diagram of lead acid battery system in its life cycle, the relationship between lead-acid battery system and its exterior environment is established and the elementary rules of lead industrial flow is obtained. The results show that, the increase of lead eco-efficiency can help for lead ore conservation and environmental improvement. To reach such target, it is necessary to keep higher lead recycling rate and lower lead emission rate. Several evaluation indices for the lead industrial flow are proposed. The lead flow analysis for the lead-acid battery system in China is made. By comparing the lead flow of lead-acid battery system in China to that in Sweden, it is found that the lower lead recycling rate, higher lead emission rate and continuous increase of annual output of lead-acid battery result in the low eco-efficiency of lead in the lead-acid battery system in China. By combing the actual status of lead related industries, the primary reasons for the low lead recycling rate and higher emission rate are analyzed respectively and the countermeasures of improvement are proposed.

Key words: lead flow analysis; evaluation indices; lead-acid battery; eco-efficiency; lead recycling rate; lead emission rate

近年来, 伴随中国铅产量和铅制品产量的快速增长, 铅矿资源明显短缺, 不得不依靠进口铅矿石来满足中国需求, 2000 年铅精矿进口量高达国内消费量的 1/3^[1]; 与此同时, 铅的人为排放量已经高达铅的自然循环量的 12.9 倍^[2], 严重威胁到人体的健康. 为此, 亟需寻找措施, 改善中国铅业与外部环境之间的关系, 降低中国铅的环境影响水平.

据统计, 中国大约 66%~70% 的铅用于生产铅酸电池, 并且该比例逐年上升^[3]. 因此, 研究铅酸电池系统中铅的流动, 可望获得保护铅矿资源、改善铅污染现状、有利于可持续发展的战略思路.

本研究在分析铅的工业流动过程基础上, 构建铅酸电池生命周期铅流图, 建立铅酸电池系统与外部环境的定量关系, 获得铅的工业流动规律, 并提出评价铅的工业流动状况的指标. 此外, 以中国铅酸电池系统为例, 分析铅的流动现状, 通过与瑞典某铅酸

电池系统的对比, 找出差距, 提出改善对策.

1 研究方法

1.1 铅酸电池系统及其铅的流动

铅酸电池系统是指以自然资源为起点, 从工业原料生产, 到铅酸电池制造、使用, 以及报废后的回收与物质再生等各个过程的组合^[4]. 为研究其中铅的流动规律, 把铅元素作为铅酸电池的代表物质. 这种情况下, 铅酸电池系统简化为原生铅的生产(含采/选、冶炼、电解等)、铅酸电池制造、使用、以及使用寿命终了后的废铅回收与再生几个阶段.

收稿日期: 2005-04-08; 修订日期: 2005-06-28

基金项目: 国家科技攻关计划项目(2003BA614A-02)

作者简介: 毛建素(1966~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为产业生态学、循环经济、环境科学与工程, E-mail: maojiansu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

从铅矿资源中的铅,到形成铅酸电池的组成元素,再作为废铅资源,返回铅的冶炼部门,铅元素将顺次流过每一生命周期阶段,从而形成了铅酸电池系统中铅的流动.与此同时,在铅元素流经每一阶段时,都不可避免地有一部分以含铅废物、污染物的形式,排放到外部环境之中.从整个铅酸电池系统与外部环境的关系来看,表现为:①向社会提供铅酸电池,满足储存并转移电能的需求;②从自然资源中索取铅矿石,形成铅矿资源负荷;③向外部环境排放含铅废物、污染物,形成铅排放负荷.铅矿资源负荷和铅排放负荷统称环境负荷.

1.2 评价指标

为定量估计铅酸电池系统与外部环境之间的铅流关系,引入生态效率^[5]的概念.

定义单位环境负荷提供的铅酸电池数量为铅酸电池系统的生态效率.其中,与铅矿资源负荷有关的生态效率称为资源效率,用符号 r 表示,单位是 t/t ;与铅排放负荷有关的生态效率称为环境效率,用符

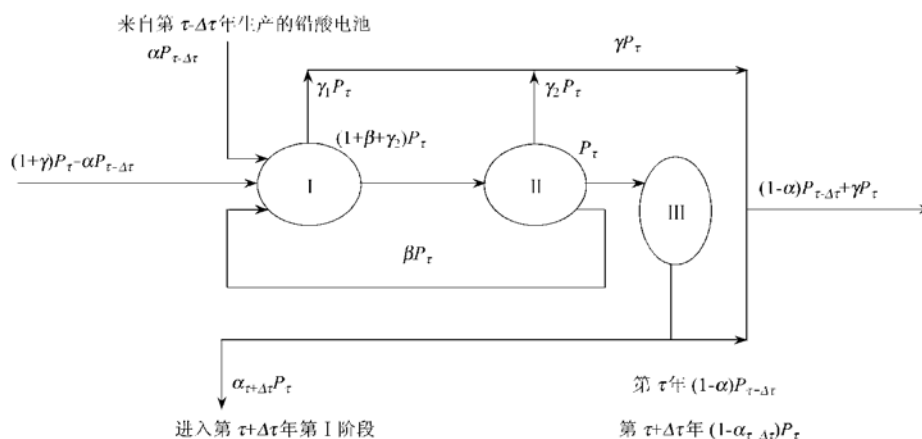
号 q 表示,单位也是 t/t .

不难看出,生态效率越高,意味着获得相同数量的铅酸电池,消耗的铅矿石越少,或者向环境排放的含铅废物、污染物越少,越有利于资源保护和环境改善.

研究中,把铅的资源效率和环境效率作为铅酸电池系统的铅流状态的评价指标.

1.3 铅酸电池生命周期铅流图

考虑到铅酸电池通常可使用几年到十几年,相比之下,各生产过程所经历的时间十分短暂,因此假设:①不计各生产过程所经历的时间;②铅酸电池的使用寿命为 $\Delta\tau$ 年,所有铅酸电池在其生产年份 $\Delta\tau$ 年以后全部报废,形成折旧废铅,并且,在报废当年返回铅业,进行再生处理.这种条件下,根据各生命周期阶段的物质流入量等于流出量^[6],可以绘制出各生命周期阶段铅的流动数量和方向,如图 1 所示,称为铅酸电池生命周期铅流图.考虑到原生铅的生产和废铅再生同属于铅的生产过程,因此,图中将它们合并到一起,并用符号 I 表示.



第 I 阶段: 铅的采选、冶炼; 第 II 阶段: 铅酸电池加工; 第 III 阶段: 铅酸电池使用

图 1 铅酸电池生命周期铅流图

Fig. 1 The lead flow diagram of lead-acid battery in its life cycle

图中, P_τ 、 $P_{\tau-\Delta\tau}$ 分别为第 τ 年和第 $\tau-\Delta\tau$ 年铅酸电池的产量,以含铅量计算, t ; α 为铅的循环率,它是铅酸电池产量中,报废后返回到铅的提炼阶段的铅所占的比例, t/t ; 显然, $\alpha_{\tau-\Delta\tau}$ 是第 τ 年生产的铅酸电池在第 $\tau+\Delta\tau$ 年报废时返回铅业的铅量, t ; $\alpha P_{\tau-\Delta\tau}$ 是产自第 $\tau-\Delta\tau$ 年的铅酸电池在第 τ 年报废时返回铅业的铅量, t ; β 为加工废铅实得率,它是在铅酸电池制造阶段,从加工切屑废料中回收的铅量占该年铅酸电池含铅量的比例, t/t ; γ_1 、 γ_2 分别为 I、II 生命周期阶段的铅排放率,是相应生命周期阶段排放的铅量与该年铅酸电池产量的比值, t/t ; 为

便于应用,定义两者之和为生产阶段的总铅排放率,简称铅排放率,用符号 γ 表示,即 $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$, t/t .

这种通过追踪产品中的某一元素,同时考虑从产品生产到报废之间的“时间差”,来分析产品系统与资源、环境之间的关系的方法,可以称作“元素流分析法”.它是众多物流分析方法^[7,8]中的一种,以考虑从产品生产到报废之间的时间差异为显著特征,由陆钟武院士于 2000 年提出.曾经多次地成功运用到钢铁工业废钢资源^[9]、铁排放量的源头指标^[10]、铅在铅酸电池中的资源服务效率^[11]等问题的研究中.

2 铅流基本规律

2.1 资源效率

由图 1 可见, 在第 τ 年, 投入 $(1 + \gamma) P_{\tau} - \alpha P_{\tau - \Delta\tau}$ 铅矿石, 可获得含铅量为 P_{τ} 的铅酸电池. 根据前文中铅的资源效率的定义, 可整理得到:

$$r = \frac{1}{1 + \gamma - \alpha p} \quad (1)$$

式中, $p = P_{\tau - \Delta\tau} / P_{\tau}$, 是铅酸电池生命周期产量变化比, t/t .

可见, 铅在铅酸电池系统中的资源效率(r) 是铅的循环率(α)、排放率(γ)、和铅酸电池产量变化比(p) 的函数. 进一步分析发现, 提高铅的循环率、降低铅的排放率、提高铅酸电池的产量变化比(即产量下降), 均有利于提高铅的资源效率.

2.2 环境效率

同样的思路, 由图 1 可见, 在第 τ 年为生产含铅量为 P_{τ} 的铅酸电池, 铅酸电池系统将向环境排放 $\gamma P_{\tau} + (1 - \alpha) P_{\tau - \Delta\tau}$ 含铅废物、污染物, 由此可整理得到:

$$q = \frac{1}{\gamma + (1 - \alpha)p} \quad (2)$$

式中各符号意义同前.

可见, 铅在铅酸电池系统中的环境效率(q) 也是铅的循环率(α)、排放率(γ)、和铅酸电池产量变化比(p) 的函数. 进一步分析发现, 提高铅的循环率, 或者降低铅的排放率, 有利于提高铅的环境效率; 降低铅酸电池产量变化比(即产量增长), 将有利于提高铅的环境效率, 这是与产量变化比对资源效率的影响截然不同的.

2.3 环境效率与资源效率的关系

将式(1)与式(2)联立, 解得:

$$\frac{1}{q} - \frac{1}{r} = p - 1 \quad (3)$$

可见, 资源效率与环境效率之间的关系, 与铅酸电池生命周期产量变化比密切相关. 进一步分析发现: ①在产量不变的情况下, 资源效率恒等于环境效率; ②在产量增长的情况下, 资源效率恒小于环境效率; ③在产量下降的情况下, 资源效率恒大于环境效率.

率. 这主要是由于铅酸电池产量的变化引起了产品系统的涨缩: 产量增长, 系统扩张, 资源索取量大而排放量较小, 因而, 资源效率小于环境效率; 反之, 产量下降, 系统收缩, 资源索取量小而排放量较大, 使得资源效率大于环境效率.

从本节分析发现: 铅的循环率、排放率、铅酸电池生命周期的产量变化比是影响铅酸电池系统中铅的生态效率的内在因素, 反映系统内部各组分之间铅的流动关系, 应用中称为生态效率的驱动因子. 可作为评价铅酸电池系统的铅流状态的内部指标.

3 铅酸电池系统中铅的流动(实例分析)

3.1 中国铅酸电池系统的铅流

以中国 1999 年铅酸电池系统为研究背景, 该年精炼铅的国内消费量为 525.00kt^[1]. 据估计, 其中 66.8%^[3], 相当于 350.70kt, 用于生产铅酸电池.

在铅酸电池生产中, 平均每投入 1t 铅金属, 将有 0.92t 进入铅酸电池中, 另有 0.035 6t 以加工废铅的方式得到回收利用, 其余 0.044 4t 以含铅废物、污染物的形式散失到环境中. 铅酸电池的平均寿命估算为 3a^[12].

根据 1999 年回收的废铅数量和废铅的构成^[3], 估计有 90.90kt 废铅酸电池和 12.48kt 加工废铅投入铅的再生. 铅的再生收率估计为 80%~88%^[13], 本文按 86.37% 计算, 共可获得 89.29kt 再生铅, 其余 14.09kt 铅以含铅废物、污染物的形式散失到环境之中. 用于铅酸电池生产其余部分, 261.41kt, 按原生铅计算.

在原生铅的生产中, 涉及选矿、冶炼等过程, 据中国有色金属工业统计, 1999 年选矿收率为 83.8%, 冶炼综合收率为 92.78%, 因此, 为获得 261.41kt 原生铅, 将需要投入含铅量为 336.22kt 的铅矿石, 同时有 54.47、20.34kt 的铅分别损失在选矿和冶炼过程中.

另外, 由于铅酸电池的平均寿命估计为 3a, 因此, 1999 年回收的废铅酸电池是 1996 年生产的. 表 1 中列出了中国 1990~2000 年间的铅酸电池产量. 考虑到表 1 中铅酸电池产量约占全国总产量的

表 1 中国近 10a 精炼铅和铅酸电池产量¹⁾

Table 1 The annual outputs of refined lead and lead-acid battery in the last 10 years of China

年份	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
铅酸电池产量/GW·h	6.980	5.146	6.837	7.773		7.080	9.487			10.394	11.881

1) 数据来源: 中国机械工业年鉴

75%~85%,若1996、1999年分别按77%、78%计算,则可估算出1996年铅酸电池的产量为291.67kt。由于1999年回收废铅酸电池90.90kt,因此,有200.77kt废铅酸电池未能得以回收。或者说,没有能够进入统计数据。

根据以上数据,整理得到中国1999年铅酸电池生命周期铅流图,如图2所示。图中单位为kt。

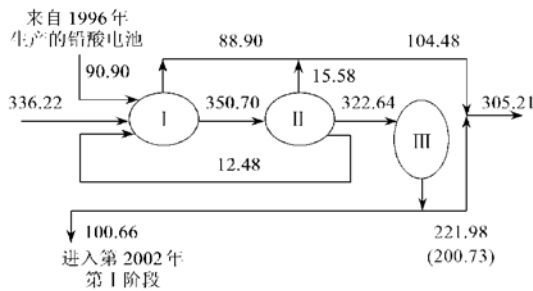


图2 中国铅酸电池生命周期铅流图(1999)

Fig. 2 The lead flow diagram of lead-acid battery in its life cycle for China(1999)

3.2 结果与讨论

(1) 中国铅酸电池系统的铅流评价指标 根据前文中的铅流分析,可整理得到1999年中国铅酸电池系统的铅流评价指标,计算结果列入表2。可见,该系统铅的资源效率和环境效率分别为0.960、1.057t/t。

(2) 与瑞典铅酸电池系统的对比 按照同样的方法,根据文献[14]中的数据,可分析瑞典铅酸电池系统的铅流状况。为便于对比,将瑞典的有关计算结果也汇总到表2中。

可见,在铅酸电池系统中,瑞典铅的资源效率和环境效率已经高达79.02 t/t,分别是中国的82.31、74.76倍。其原因在于:在铅的循环方面,瑞典铅的循环率已高达0.99 t/t,几乎全部循环,而中国仅为0.312 t/t;在铅排放方面,瑞典铅的排放率仅为0.002 655 t/t,而中国却高达0.324 t/t;在产量变化方面,瑞典至少稳定了一个铅酸电池的生命周期5a,而中国仍在持续增长。

表2 中国与瑞典铅的工业流动的对比/(t·t⁻¹)

Table 2 The comparison of the lead industrial flow in China to those in Sweden/(t·t⁻¹)

国家	资源效率	环境效率	循环率	铅排放率	产量比
中国	0.960	1.057	0.312	0.324	0.904
瑞典	79.020	79.02	0.990	0.002 655	1

(3) 原因分析 循环率低下的原因:不难设想,铅的循环率主要与铅酸电池的国内消费与回收、废铅贸易,以及统计数据完整情况等因素有关。

表3中列出了1986~1996年间铅酸电池的生产与国内消费数量。由此推测,由于铅酸电池的出口,大约有7.62%的废铅酸电池不能返回中国铅酸电池系统。

表3 中国铅酸电池产量与国内消费量¹⁾

Table 3 The output and domestic consumption of lead-acid batteries in China

年份	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	平均
铅酸电池产量/GW·h	3.220	5.072	4.550		6.980	5.146	6.837	7.773		7.080	9.487	
铅酸电池出口量/GW·h	0.158	0.477	0.007		0	1.968	0.020	0.014	0.022	0.011	0	
出口量:产量/%	4.91	9.40	0.15		0	38.24	0.29	0.18		0.16	0	7.62

1) 数据来源:产量数据来源于中国机械工业年鉴;出口量数据来源于中国对外经济贸易年鉴

表4中列出了1990~2000年间废铅的贸易额。可见,在废铅的贸易方面,虽然经历了从净出口到净进口的过渡,但其数量相对于铅酸电池产量而言极小,特别是近几年来,废铅的进出口基本平衡,因此可以忽略废铅贸易对铅的循环率的影响。在中国,废

铅酸电池的回收与再生铅厂购买废铅的渠道紧密相关。1999年中国曾有300家再生铅厂,其中只有3家规模较大,生产能力在100kt/a以上,总生产能力500kt左右,实际再生量占中国再生铅总量的一半左右^[15,16]。由此估算,另有一半的废铅,相当于循环

表4 中国废铅贸易数量¹⁾/kt

Table 4 The trade of lead scraps in China/kt

年份	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	平均
出口量	6.132	5.250	1.500	0.621	1.510	0.589	0.152	0.061	1.751	1.060	0.037	
进口量	1.690	0.140	5.712	7.322	5.793	5.690	0.820	0.204	0.007		0.05	
净出口量	4.442	5.110	-4.212	-6.701	-4.283	-5.101	-0.668	-0.143	1.744		-0.013	-0.983

1) 数据来源:进、出口量数据来源于中国对外经济贸易年鉴

率为 0.312, 被私营再生铅厂收购并再生, 而未列入统计数据。

由此推算, 1999 年约有 29.98%, 相当于 87.44kt 的废铅酸电池没有得到回收, 散失到环境中去。

排放率偏高的原因: 根据前文中的铅流分析, 将 1999 年铅酸电池生命周期生产阶段的铅损失数量列入表 5。由此可见, 在与生产过程有关的铅损失中, 52.13% 发生在选矿阶段, 19.47%、13.49% 分别发生在原生铅的冶炼和废铅再生阶段, 其余 14.91% 发生在铅酸电池的制造阶段。

表 5 中国铅酸电池系统的生产过程中的铅损失构成

Table 5 The profile of the lead losses in the production processes of lead-acid battery system in China

项目	选矿	原生铅冶炼	废铅再生	铅酸电池制造	总计
铅损失量/kt	54.47	20.34	14.09	15.58	104.48
百分比/%	52.13	19.47	13.49	14.91	100

根据北京矿冶研究院的调查报告, 中国铅的选矿收率在 81%~86% 之间, 较国外低 5%~15%。这主要是由于, 中国的铅矿多属于以锌为主的铅锌共生、多金属伴生、金属嵌布关系复杂的矿石。铅锌比一般为 1:2.6, 铅矿中伴生铜、银、金、锡、锑、镉等 50 余种有用金属, 并且, 金属矿物之间共生密切, 粒度不均, 多以星点状、细脉状或树枝状等分布于脉石中。造成选矿难度较大。

在原生铅的冶炼中, 存在着企业多、规模小、集中度低、冶炼水平落后等问题。据估计, 目前全国约有几百家冶炼厂, 其中仅 23 家的产量在 10 kt 以上, 10 家最大企业的产量, 仅占国内总产量的 55.27%。在冶炼工艺方面, 仍以传统的烧结-鼓风炉为主。整体看来, 相当于国外 80 年代以前的水平。

在废铅再生中, 存在着企业数量多、规模小、工艺技术落后等问题。据估计, 目前, 中国约有近 300 家废铅再生厂, 生产能力从几十 t 到上万 t 不等, 万吨以上的厂家屈指可数; 工艺上, 约有一半的厂家仍使用传统的小反射炉、鼓风炉和冲天炉等熔炼工艺, 回收率一般为 80%~85%, 最高不过 90%。较先进工艺低 10% 左右^[15]。

在铅酸电池的制造阶段, 铅的加工利用率通常为 0.85~0.95^[17]。按本研究中获得的调研数据看, 约有 28.06kt 铅未得到有效利用, 其中 12.48kt, 占 44.48%, 以加工废铅的形式得到回收, 其余部分, 或散失到环境中, 或者未列入统计数据。据称, 有很大一部分废铅, 是经过私人转送到废铅再生企业

的^[16], 这部分数据很难收集得到。

(4) 改善对策 在铅的资源效率和环境效率的 3 个驱动因子中, 产量变化比取决于社会需求与经济发展, 近期内很难降下来。因此, 改善中国铅酸电池系统中铅的资源效率和环境效率, 将主要通过提高铅的循环率, 降低铅的排放率来实现。

为提高铅的循环率, 建议: ①借鉴国外先进的管理经验, 建立废铅回收法规, 完善回收机制, 制约和引导废铅电池的回收工作步入正常轨道; ②针对铅酸电池试行“出租产品”的消费形式, 促进社会从“产品消费型”向“服务消费型”转变^[18, 19]; ③尝试“以旧换新”的销售形式, 保障废铅回收工作的顺利进行。

为降低铅的排放率, 建议进一步加强矿冶联合企业的管理, 对铅的生产企业实行特别许可证管理制度; 开发或引进采矿、选矿、冶炼新工艺; 推行“清洁生产”, 淘汰落后的工艺、技术和设备, 从而提高铅的综合收率, 降低废铅损失。

(5) 改善前景 若假定 20a 后, 中国铅酸电池系统中铅的资源效率和环境效率分别达到 60t/t, 则意味着获得与 1999 年相同数量的铅酸电池, 只需要投入 5.38kt 的铅矿石, 铅排放负荷也将降低到 5.38kt, 分别是 1999 年铅矿资源负荷和铅排放负荷的 1/62.5 和 1/56.76。届时, 铅矿石消耗水平和铅排放水平都将低于环境承载力, 资源与环境状况将大为改善。

4 结论

(1) 应用“元素流分析法”分析了铅在铅酸电池系统中的流动。构建了铅酸电池生命周期铅流程图。这是分析铅酸电池系统与外部环境之间定量关系的基础。

(2) 确立了铅流评价指标, 其中资源效率和环境效率用于评价铅酸电池系统与外部资源与环境之间的关系; 铅的循环率、排放率、产量变化比用于评价系统内部铅的流动状态。

(3) 获得了铅酸电池系统的铅流规律。结果表明, 提高铅的循环率、降低铅的排放率有助于提高铅的资源效率和环境效率。

(4) 分析了中国铅酸电池系统的铅流状况。结果表明, 与瑞典铅酸电池系统相比, 中国铅的资源效率和环境效率十分低下。其原因主要在于中国铅的循环率较低, 而排放率偏高。

(5) 探讨了中国铅的循环率低下和排放率偏高

的深层原因,提出了改善对策,并预测 20a 后,中国的铅矿资源和环境状况将明显好转。

参考文献:

- [1] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴 [M]. 北京: 中国有色金属工业年鉴出版社, 2001. 323, 344.
- [2] 中国科学院可持续发展研究组. 2000 年中国可持续发展战略报告[R]. 北京: 科学出版社, 2000. 207.
- [3] 李富元, 李世双, 王进. 国内外再生铅生产现状及发展趋势 [J]. 世界有色金属, 1999, (5): 26~ 30.
- [4] Graedel T E, Allenby B R. Industrial ecology [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 110.
- [5] 山本良一. 战略环境经营生态设计——范例 100 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 177~ 179.
- [6] Kleijn R. In= out, the trivial central paradigm of MFA? [J]. Journal of Industrial Ecology, 2000, 3 (2, 3): 8~ 10.
- [7] Ayres R U. Industrial metabolism: theory and policy. The greening of industrial ecosystems [M]. Washington D C: National Academy Press, 1994. 23~ 37.
- [8] Joosten L A J, Hekkert M P, Worrell E, *et al.* STREAMS: a new method for analysis material flows through society [J]. Resources, Conservation and Recycling, 1999, 27 (3): 249~ 266.
- [9] 陆钟武. 关于钢铁工业废钢资源的基础研究 [J]. 金属学报, 2000, 36 (7): 728~ 734.
- [10] 陆钟武. 钢铁产品生命周期的铁流分析——关于铁排放量源头指标等问题的基础研究 [J]. 金属学报, 2002, 38 (1): 58~ 68.
- [11] 毛建素, 陆钟武. 铅在铅酸电池中的资源服务效率 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24 (12): 1173~ 1176.
- [12] 兰兴华, 殷建华. 发展中的再生铅工业 [J]. 中国资源综合利用, 2000, (8): 19~ 21.
- [13] 马永刚. 铅污染现状、原因及对策 [J]. 中国资源综合利用, 2001, (2): 26~ 27.
- [14] Karlsson S. Closing the technospheric flow of toxic metals, modeling lead losses from a lead-acid battery system for Sweden [J]. Journal of Industrial Ecology, 1999, 3 (1): 23~ 40.
- [15] 杨春明, 马永刚. 中国废铅蓄电池回收和再生铅生产 [A]. 见: 中国电工技术学会铅酸蓄电池专业委员会. 第七届全国铅酸蓄电池学术年会论文全集 [C]. 广东: 南海, 2000. 198~ 202.
- [16] 马永刚. 关于改变中国再生铅现状和制定有关政策法规的建议 [J]. 资源节约和综合利用, 2000, 3 (1): 15~ 19.
- [17] 姜松. 中国再生有色金属资源的开发利用 [J]. 中国资源综合利用, 2000, (1): 18~ 21.
- [18] Stahel W R. The functional economy: cultural and organizational change. The industrial green game [M]. Washington D C: National Academy Press, 1997. 91~ 100.
- [19] Stahel W R. The utilization-focused service economy: resource efficiency and product life extension. The Greening of Industrial Ecosystems [M]. Washington D C: National Academy Press, 1994. 178~ 190.