

中国镁产业生态系统物质流与价值流的生命周期分析

董书恒^{1,2,3}, 逯承鹏^{1,2*}, 邢 冉^{1,2,3}, 薛 冰^{1,2}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 辽宁沈阳 110016;

2. 辽宁省环境计算与可持续发展重点实验室, 辽宁沈阳 110016; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

【摘 要】 基于物质流分析基本框架, 构建了镁产业生态系统的物质流分析模型, 定量分析了2015年我国宏观层次镁金属材料在其生命周期各个阶段的物质流与价值流, 并核算了以皮江法工艺炼镁产生的生态包袱, 同时结合 e!Sankey pro 4.5.3 绘图软件进行可视化表达与分析。结果表明: ①原镁生产过程中资源消耗量较大, 皮江法工艺每生产 1t 原镁的非生物资源输入量和资源直接输入量分别达到 59.3t 和 16.4t, 而生态包袱约为资源直接输入量的 3.6 倍, 物质输入端优化的关键在于提高白云石与燃料的利用效率。②2006—2015 年镁产业生态包袱整体呈现上升趋势, 清洁生产与循环经济是新时代镁产业生态化发展的对策。③皮江法炼镁的资源物质投入类别中硅铁与煤的价格居高, 影响了价值产出率; 废镁潜在利用价值较大。④受国内与国际市场需求的影响, 迫切需要调整镁产品生产结构以应对未来发展挑战。最后, 从资源利用效率、节能减排、回收利用体系、优化产品结构等方面提出了环境管理措施, 以期为我国金属镁等矿产资源的循环利用以及绿色发展提供决策依据。

【关键词】 产业生态系统; 镁资源; 物质流; 价值流; 中国

【中图分类号】 F124.5; K901

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252 (2019) 06.0050.07

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2019.06.050

引言

党的十九大报告明确提出, 要推进资源全面节约和循环利用, 降低能耗、物耗, 实现生产系统和生活系统循环链接。镁资源及镁质材料是国民经济发展的重要物质基础, 镁合金被誉为 21 世纪绿色工程材料和战略性新材料, 并有望成为继钢、铝之后的第三大基础金属结构材料^[1,2]。然而从资源环境角度进行分析, 由于矿产资源不同阶段均伴随着物质消耗与能量转化并产生环境压力^[3,4], 因而镁资源的开采、运输、加工、消费及废弃物处置过程也是资源消耗和环境污染的过程^[5,6]。经济活动引起的生态和环境影响主要取决于进入经济系统的自然资源与排放到自然环境系统中的废弃物质的数量和质量^[7], 前者引起生态与环境的不断退化, 后者导致了环境污染^[8]。物质流分析 (Substance Flow Analysis, SFA) 作为工业代谢研究的有效手段, 通过物质流分析可以控制特定物质 (如镁和铝等) 的投入与流向及其使用总量和强度进而为环境政策提供新的视角^[9,10]。生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 作为环境评估的有效工具主要应用于量化研究物质与能量利用及其废弃物产生的环境排放进而评估一种产品、过程或生产活动造成的环境负载^[11,12]。SFA 更加注重物质材料流动的数量、结构和特征, 而 LCA 则重点研究资源消耗与环境污染

排放, 两者都是从系统或者过程的各子阶段入手, 而 LCA 分析中结合 SFA 分析可有效弥补其时间和空间等方面信息的局限性并提高数据全面性, 从而提高对经济活动产生的环境评估的准确性^[13,14]。

我国是全球菱镁矿资源最为丰富的国家, 已探明的菱镁矿储量达到 34 亿 t, 占全世界总储量的 27%, 总保有储量矿石 38 亿 t, 居世界第 1 位。白云石与菱镁矿是我国镁产业工业生产的主要矿物来源, 已探明白云石矿储量 40 亿 t 左右, 主要分布于辽宁、河南和山西等省份。菱镁矿空间分布表现为大型矿床多且分布相对集中的特征, 目前探明储量的矿区达到 27 处, 重点分布于辽宁、山东和西藏等 9 个省份, 占全国的 85%, 其中, 辽宁省菱镁矿储量最为丰富, 达到 30.52 万 t。镁产业涉及的冶炼、加工及设备制造等不同类型的企业在地理空间上分布广泛, 东部地区主要以镁深加工企业以及涉镁设备企业为主, 在江苏和浙江两省集聚特征显著, 在河南和山东等省份集聚特征也较为明显。镁冶炼企业主要集中于山西和陕西两省, 其中, 山西的镁冶炼企业省内分布较广, 北部的五台县、中部的太原市、南部的闻喜县均有分布, 其中以闻喜县规模最大; 陕西省内则主要集中在北部的府谷县与神木县。镁合金企业主要分布在山东、河南和陕西以及宁夏等省份, 镁粉加工

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41701142)、中国科学院青年创新促进会 (2016181) 和辽宁省自然科学基金计划重点项目 (20170540898) 资助。

作者简介: 董书恒 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为产业生态, E-mail: heng_dsh@163.com。

*** 责任作者:** 逯承鹏 (1984—), 男, 博士, 助理研究员, 硕士生导师, 主要从事产业生态与区域可持续性研究, E-mail: luchp@iae.ac.cn。

企业则以河南省、河北省和辽宁省为主。我国的镁产业具有明显的资源和地理分布特征,在国家对工业污染严格管控以及企业对资源成本和资源利用率综合考量的背景下,针对我国镁产业的物质流与价值流并行分析可以从更全面的视角准确反映镁产业发展存在的关键问题。综上,本文基于物质流分析基本框架,通过构建镁资源及其主要产品的物质流分析模型,结合实地调研数据,从宏观层面定量计算和解析了2015年中国镁资源在生产阶段、加工阶段及使用与废弃阶段等主要生命周期阶段的物质流与价值流,并利用e!Sankeypro 4.5.3绘图软件绘制桑基图,将物质流与价值流进行可视化表达与分析,同时计算皮江法炼镁的非生物资源投入量和生态包袱,以期为我国金属镁等矿产资源的全面节约、循环利用以及绿色发展提供决策依据,进而推进我国生态文明战略的实施。

1 方法与数据

1.1 物质流分析框架

物质流分析是关于特定系统中某一物质或者元素流动和贮存的分析^[15,16]。根据物质守恒原理,物质或者元素从自然界获取在进入生产与排放的整个流动过程中其数量是保持不变的^[17-19]。边界确定的经济系统的物质守恒可以表现为:系统总输入=系统总输出+系统净累计量,如式(1)所示:

$$\sum Q_{\text{input}} = \sum Q_{\text{output}} + \sum Q_{\text{store}} \quad (1)$$

式中, Q_{input} 表示物质的总输入量; Q_{output} 表示物质的总输出量; Q_{store} 表示物质在系统内的净累计量。

针对某一元素构建其生产生命周期的物质流分析框架需要考虑元素流与经济系统及环境系统边界的关系。系统内依据各部门的上下游关系,存在元素的纵向流动以及循环流动,对于这两个方向的元素流定量核算,有助于循环经济模式的分析与优化。经济系统与环境系统存在材料与能量的输入与输出过程,为分析资源利用效率与环境压力提供了基本的分析框架。基于上述理论构建镁产业物质流分析框架(图1),图中虚线表示系统的边界,时间跨度为一年。研究步骤包括:①确定系统各部门上下游关系;②界定经济系统与生态环境系统的边界;③描述系统内物质的流动方向与流动量,构建物质流分析指标清单,包括非生物资源输入量、物质直接输入量、生态包袱、进出口量和物质循环量等;④量化物质内元素含量以及核算系统内元素物质流质量;⑤分析评价,提供政策参考。

1.2 生态包袱计算

生态包袱指为获得有用物质或产品而使用的没有直接进入交易和生产过程的物料^[20,21],是衡量产业生态系统中资源消耗与环境扰动的核心指标之一,一般某一种产品的生态包袱为生产该种产品的物质投入总质量减去产品质量。原镁生产过程中,首先是白云石的开采,涉及矿山开挖及大

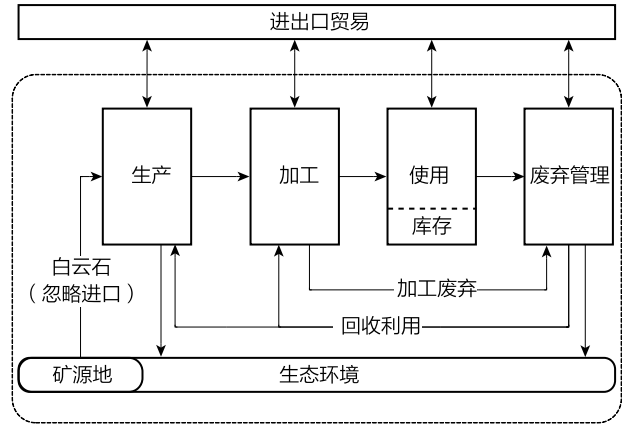


图1 镁产业物质流分析框架

量岩石的凿碎,该过程中碎石以及残渣并未直接进入原镁产品生产过程,因此将其称为隐藏流。一般认为,生态包袱能够从产业系统的输入端有效和全面地揭示该产品在生产过程中资源消耗以及生态环境影响,其计算公式为:

$$W = MI - M = \sum_{i=1}^n m_i \partial_i - M \quad (2)$$

式中, W 为生态包袱; MI 为非生物资源输入量; M 为产品质量; m_i 为生产该产品过程中 i 类物质的消耗量; ∂_i 则表示生产该产品过程中 i 类物质的资源消耗强度。

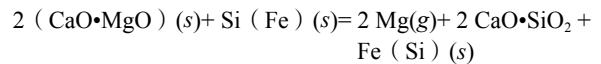
功能单位的物质消耗,定义为单位产品的物质消耗,计算公式为:

$$MIPS = \frac{MI}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \partial_i}{S} \quad (3)$$

式中, S 表示单位服务功能; MI 、 m_i 、 ∂_i 所表示的意义与式(2)相同。

1.3 皮江法炼镁生产工艺

皮江法,又称硅热法,是我国目前常用的一种还原法炼镁工艺过程(图2),主要包括:①将白云石置入窑中经过煅烧形成煅白;②煅白经破碎之后,与含硅75%的还原剂硅铁和矿化剂萤石通过球磨机压制为球团;③在高温(1200℃)和真空(1.33~13.3Pa)下将球团放入还原罐中经过还原得到粗镁;④粗镁再经溶剂精炼处理则得到商品镁。该还原反应过程可表示为:



式中, g 表示气体; s 表示固体。

在实际的工业生产中,适合皮江法制镁的白云石其化学组成成分中 MgO 的含量应为19%~21%^[22],根据在辽宁省大石桥市镁产业的实际调研可知,实际生产中,1t镁一般需要消耗11t左右的白云石。

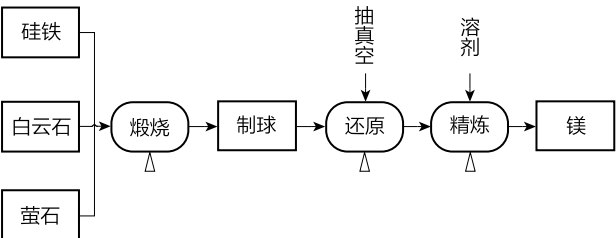


图2 皮江法制镁工艺流程

1.4 物质流分析参数清单

选取 2015 年为时间点，以皮江法工艺生产的 1t 原镁为基本功能单位开展物质流分析测算。2015 年，我国原镁总产量为 85.21 万 t，由于电解法炼镁产量所占比例 1% 左右，约为 0.85 万 t，皮江法生产的原镁产量占 99%，为 84.36 万 t。对 2015 年皮江法炼镁的各项参数进行集成，作为镁元素的系统物质流分析开展的基础，进而得到镁资源及其相关产品在其生命周期各阶段的具体参数清单（表 1）。

表1 2015 年镁生产过程中的各项参数清单

项目	具体参数	公式	来源依据
主要工艺	原镁产量（皮江法）	$99\% \times \text{原镁产量}$	高峰 ^[14]
生产阶段 单耗	白云石	10.6t/t	孟树昆 ^[22]
	萤石	0.21t/t	孟树昆 ^[22]
	硅铁	1.05t/t	孟树昆 ^[22]
	煤气	$13\,800\text{m}^3/\text{t}$	申明亮 ^[23]
	锅炉用煤	1.0t/t	孟树昆 ^[22]
	火电	$1800\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$	申明亮 ^[23]
加工阶段	镁合金	按含镁量 90% 计	高峰 ^[14]
	镁 / 合金废料产出率	4% ~ 10%	高峰 ^[14]
	镁 / 合金废料含镁量	15% ~ 45%	高峰 ^[14]
使用与 废弃阶段	回收金属量	$15\% \times \text{金属产量}$	高峰 ^[14]
	进出口镁废料含镁量	$30\% \times \text{废料产生量}$	高峰 ^[14]
	废料循环利用量	加工阶段： $70\% \times \text{废料量}$ 生产阶段： $30\% \times \text{废料量}$	高峰 ^[14]

1.5 价值流分析数据清单

如果将产品的价值反映在其组成元素上，则产品中的每一种元素都会成为价值的运输体。由此可知，若用某一元素代表一种产品，那么该产品的价值就可以简化成该元素的价值，随着物质流动，单位质量的元素离开生命周期的某一阶段时的价值即是该股物质流在这一阶段元素的价位，并且等于相对应物质流的价值除以物质流中元素的质量^[24]，单位为元 / t。对于镁产业生态系统中废弃物填埋处置的成本通常以负值表示。镁产业价值流分析所需基础数据涵盖系统前端的物质资源输入价值、系统过程中的物质流动价值与循环价值、后端的废弃填埋消耗价值。海关的进出口价格数据是以美元 / t 为单位计算，国家统计局公布的 2015 全年人民币平均汇率为 1 美元兑 6.2284 元。各矿产资源价格和单位成本数据根据辽宁省大石桥市镁产业的

实际调研所得，原镁价格来源于 2016 年《中国有色金属工业年鉴》，镁合金价格来源于中国镁质材料网（<http://www.mzclw.com.cn>），镁粉、镁牺牲阳极和废镁的国内价格来源于中国有色金属价格网（<https://www.zh818.com/youse-feijiu>），其进口及出口价格则源于海关数据网（<http://www.hgsj.com>），价值流分析数据清单详见表 2。

表2 2015 年镁产业价值流项目清单

项目	市场	价格	单位成本	数据来源
白云石 原矿	国内	50 元 / t	530 元 / t · Mg	调研数据
硅铁	国内	2150 元 / t	2 257.5 元 / t · Mg	调研数据
萤石	国内	2700 元 / t	567 元 / t · Mg	调研数据
煤	国内	400 元 / t	1 800 元 / t · Mg	调研数据
电	国内	0.4 / (kW · h)	400 元 / t · Mg	孟树昆 ^[22]
原镁	国内	年均价 1.3 万元 / t	—	中国有色金属工业 年鉴（2016）
镁合金	国内	27 450 元 / t	—	中国镁质材料网
镁及 镁制品	进口	39 738 美元 / t	—	海关数据
	出口	4 135 美元 / t	—	
	国内	15 250 元 / t	—	
镁粉	进口	4 604 美元 / t	—	海关数据
	出口	2 379 美元 / t	—	
	国内	15 250 元 / t	—	
镁牺牲 阳极	国内	20 000 元 / t	—	中国有色金属价格网
废镁	国内	6 300 元 / t	—	中国有色金属价格网
	进口	1 598 美元 / t	—	
	出口	2 060 美元 / t	—	
固体填埋	国内	140 元 / t	—	调研数据

2 结果与分析

2.1 中国镁产业物质流分析

2.1.1 镁的生产阶段

生产阶段涉及能源物质的投入包括白云石、硅铁、萤石、煤气、煤炭、火电等。由于我国白云石和萤石这两种矿产资源极其丰富，基本没有矿石进口，因此可以认为白云石等矿石资源经过开采后直接进入原镁的生产阶段，之后经过煅烧、配料、还原、精炼等具体工艺，产生的熔渣则排入生态环境系统。借鉴已有研究^[14,22]中单耗指标与消耗强度指标核算得到皮江法炼镁过程中消耗的白云石、硅铁、煤和电的总量（表 3）。

据核算（图 3），2015 年我国原镁生产阶段，原料白云石的输入量为 894.20 万 t，在煅烧阶段有 482.90 万 t 的废渣与废气排放到环境中，配料阶段的环境排放少。在还原阶段，由于辅料中硅铁和萤石分别作为还原剂与催化剂而存在，因此也以残渣与废弃物的形式排放到环境中，共计 428.80 万 t。精炼阶段将粗镁在约 710℃ 高温下加热熔化之后用溶剂精炼后产生 4.40 万 t 的废物排放。

表3 2015年镁生产阶段各物质消耗量

项目	白云石	萤石	硅铁	煤	电
单耗指标	10.6t/t	0.21t/t	1.05t/t	4.5t/t	1 000kW·h/t
消耗强度系数	1.44t/t	2.93t/t	31.7t/t	1.64t/t	2.67kg/kW·h
物质消耗总量	894.19 万 t	17.72 万 t	88.58 万 t	379.61 万 t	843.6GW·h
资源消耗总量	1 287.63 万 t	51.92 万 t	2 807.99 万 t	622.56 万 t	225.24 万 t

进入使用与废弃阶段，一部分用于铝合金、合金铸件、炼钢脱硫等消费领域，另一部分为 35.40 万 t 充当库存（如图 5 中红线所示），镁制产品在这一阶段的库存量根据质量守恒计算得到。

2.1.4 镁的全生命周期物质流分析

综合各阶段的物质流分析结果，得到 2015 年我国镁产业物质流动总图（图 6）。可以看出，2015 年，镁的整个生命周期中物质流动量呈现逐级减小的趋势，原镁生产与产品加工这两个阶段物质流动量最大。经核算（表 4），2015 年，采用皮江法工艺生产，生产 1t 原镁的

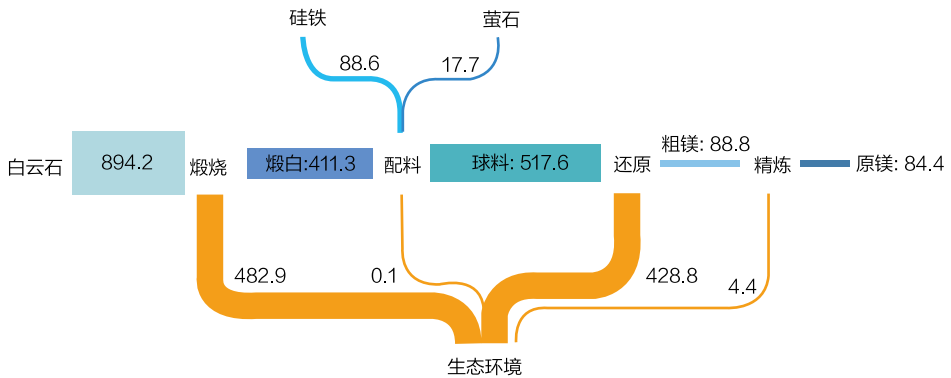


图3 生产阶段镁物质流动图（单位：万t）

2.1.2 镁的加工阶段

原镁加工产品包括镁锭、镁粉（镁粒）、镁牺牲阳极和镁合金等主要产品，由图 4 可知，其中以镁锭与镁合金量最多，分别为 48.00 万 t 和 24.20 万 t，占原镁总量的 84.7%，镁产品的净出口量为 40.66 万 t，出口量占国内镁产品总产量的 47.9%。镁的加工制造阶段产生的废镁中有一部分以原料的形式返回到生产阶段，另一部分则进入加工阶段继续加工生产镁。

2.1.3 镁的使用与废弃阶段

镁合金及加工材料在使用寿命结束并报废后形成的废杂镁通常经过分类回收后再次返回生产或加工阶段再次利用。在镁的使用过程中，诸如在炼钢过程中作为炼钢脱硫剂以及在铝合金及其他合金铸件制造过程中作为金属还原剂被使用后产生的后废弃物则可以直接填埋方式进入生态环境系统。由图 5 可知，加工阶段的镁产品有 44.04 万 t

非生物资源输入量达到 59.3t，资源直接输入量达到 16.4t。原镁生产的生态包袱约为资源直接输入量的 3.6 倍。白云石与煤的资源直接输入占比分别为 64.8% 与 27.5%，而资源消耗强度占比分别为 25.8% 与 12.5%，而硅铁的资源直接输入占比与资源消耗强度占比分别为 6.4%、56.2%，表明在炼镁过程中，硅铁消耗以及生态包袱在资源输入总量中均占有较大比重，潜在环境压力不可忽视，白云石与煤在经济系统中属于高消耗低效率的物质，而硅铁属于低消耗高效率的物质。

表4 资源消耗情况

	白云石	萤石	硅铁	煤	电
资源直接输入占比	64.8%	1.3%	6.4%	27.5%	—
资源消耗强度占比	25.8%	1.0%	56.2%	12.5%	4.5%

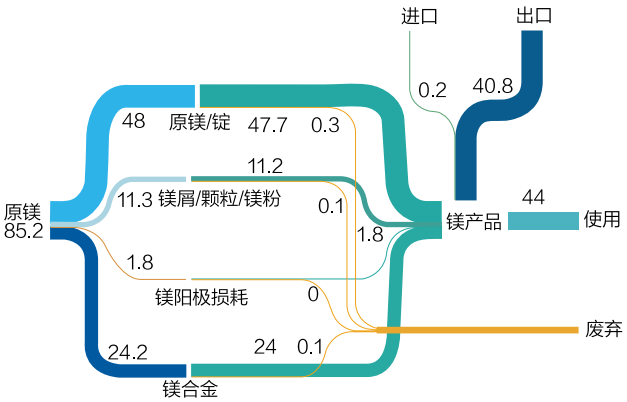


图4 加工阶段的镁物质流动图（单位：万t）

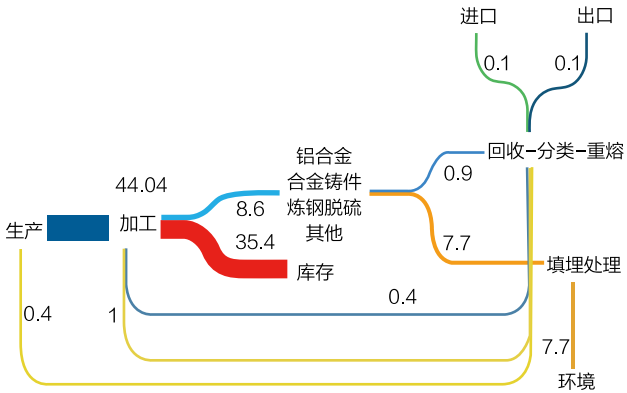


图5 使用与废弃阶段的镁物质流动图（单位：万t）

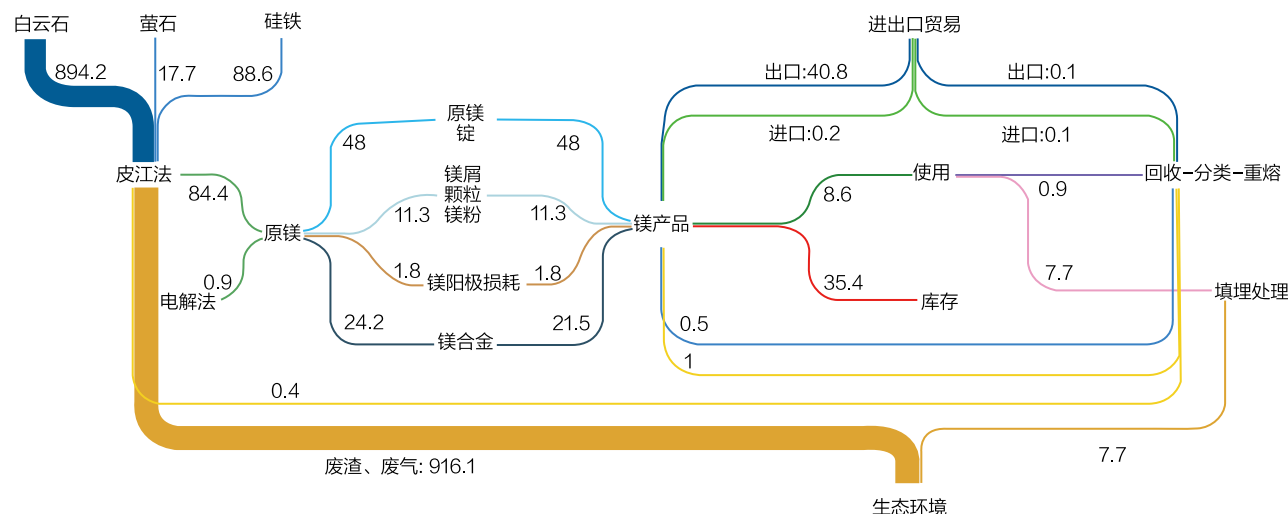


图6 2015年中国镁物质流动图 (单位: 万t)

基于2015 镁产业总物质流动态图(图6), 进而核算物质流各项关键指标, 结果见表5。镁的循环效率作为衡量镁产业废镁资源通过回收重新用于原镁冶炼利用程度的关键指标, 即单位时间内回收利用的镁与生产的原镁的比值, 其值越大, 表明镁循环回收量越大及再生镁产量在精炼原镁产量中的比例也越大。经计算, 2015 年中国镁循环效率为0.05t/t, 可以看出国内废镁资源回收利用水平较低。镁环境效率, 定义为在镁产品生命周期中单位镁的释放, 即排放到自然环境中的镁与精炼原镁比值。用镁环境效率可以在一定程度上有效体现镁的释放对生态环境系统的影响, 一般来讲, 其值越低表明获得同等质量的精炼原镁所释放的废镁越少, 即对生态环境系统的干扰与影响越小; 反之, 则影响越大。经计算, 2015 年中国原镁生产过程中的镁环境效率为0.09t/t, 表明中国镁工业在加工到废弃这一阶段对环境污染的影响程度较低, 主要的污染集中在生产冶炼阶段。

表5 2015 镁产业物质输入与隐藏流

指标分类	单位	数量
非生物资源输入总量	t	5.0×10^7
物质直接输入量	t	1.38×10^7
单位产品的物质直接输入量	t/t	16.36
生态包袱(隐藏流)	t	4.91×10^7
功能单位的物质消耗	t/t	59.21

根据2006—2015 年镁产业物质流的生态包袱核算结果(图7)可知, 2009 年产业的环境包袱最低 3.61×10^7 t, 而2014 年环境包袱最高 6.29×10^7 t, 之后有所下降。2006—2015 年镁产业的生态包袱处于整体扩大态势, 这主要是由于国内外镁产品市场对我国原镁产量的过度依赖所导致, 而原镁生产阶段的环保工艺升级与普及推行速度落后于原镁的生产速度, 加之原镁生产企业规模大小不一, 环保工艺的普及难度较大, 因此镁工业的粗放式发展仍然持续。

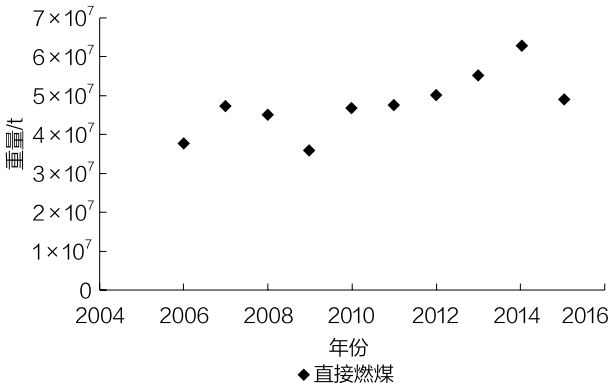


图7 2006—2015年皮江法炼镁生态包袱变化

2.2 中国镁产业价值流分析

在经济系统中, 物质流动总是伴随着价值的流动, 二者是同步的。在表2 的基础上, 将物质流与物质单价进行结合运算得到2015 年中国镁产业的元素价值流动图(图8), 因生产阶段的废物处理价值无法计算, 此处忽略。由图8 可知, 皮江法炼镁的资源物质投入类别中硅铁与煤的价格居高, 同时由于皮江法炼镁对于硅铁、萤石的品味具有一定的要求, 使得炼镁初期资源投入的价值量占到产品价值的38.6% 以上, 限制了价值产出率。产品出口价值量占产品总价值的42.1%, 其余产品价值留在国内, 一部分作为库存价值, 这部分价值与物质不同, 由于需要存储空间以及维护, 这部分价值不会带来价值收入, 反而会带来额外价值消耗; 而另一部分价值随镁的流动进入使用与消耗阶段, 其价值产生转化, 目前, 这两部分价值流很难进行定量化评价。考虑进出口价值、循环利用价值以及填埋处理价值, 废镁的静态库存价值量占废镁流动价值总量84% 以上, 这主要是国内的废镁循环利用技术发展较为缓慢以及对废镁的回收分类的管理体系尚未形成所导致, 废镁处于搁置状态。2015 年废镁的

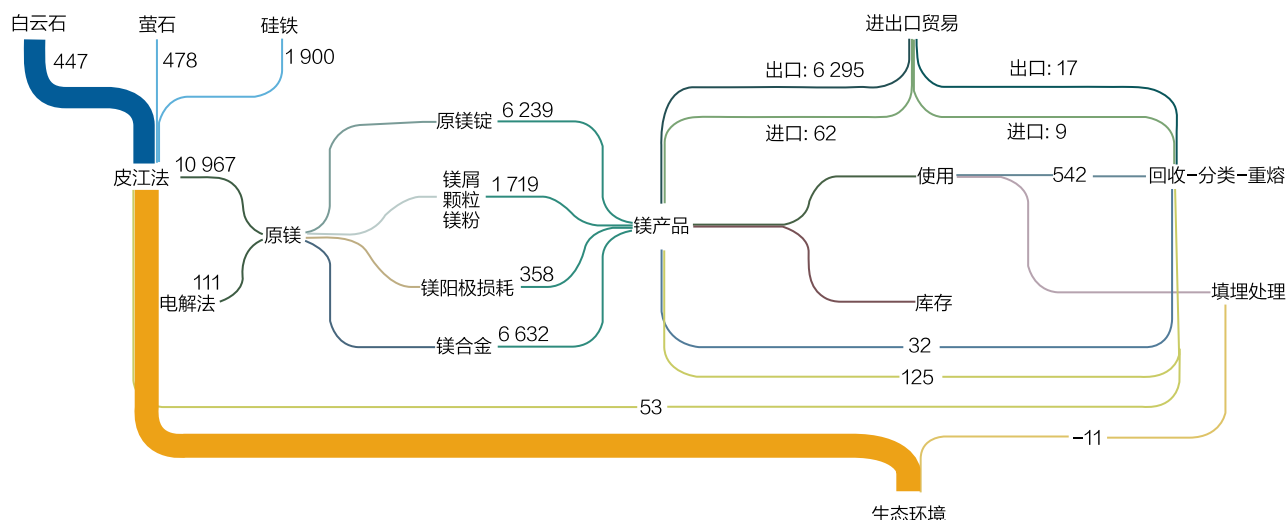


图8 2015年中国镁产业价值流动图（单位：百万元）

循环利用价值达到 1.78 亿元，相当于白云石价值的 39.8%，潜在价值较大。从系统的各部门视角出发，生产阶段价值产生量为 109.67 亿元，价值增量为 62.87 亿元；原镁加工后转化为各种镁产品，这一过程的价值增量为 38.7 亿元；镁产品出口过程中主要以原镁及镁合金的贸易创汇为主。通过对部门价值流动进行分析，不难看出，我国的镁产业受国内与国际市场需求结构的影响，单纯的效益追求限制了我国镁产业向高端领域发展。因此，调整镁产业的生产结构是提升我国镁产业的重要突破口。从物质流与价值流的关系来看，生产阶段为减量增值过程。原镁产量占矿石输入量的 9.5%，考虑输入的能源成本，皮江法炼镁的生产阶段价值增量占价值产生量的 57.32%。加工阶段为增量增值过程。镁锭的产量约是镁合金产量的 2 倍，但是在价值总量上低于镁合金。这说明高端镁合金的发展有助于原镁产业的升级发展。使用与废弃阶段为减量减值过程。废镁的回收利用率及价值均处于较低水平，完善废镁回收利用体系是今后产业发展应该关注的问题。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于物质流分析基本框架，构建了镁产业生态系统的物质流分析模型，在宏观层面对 2015 年中国镁产业在皮江法生产工艺的生产阶段、加工阶段和使用与废弃阶段及全生命周期的物质投入产出进行核算并进行可视化表达，同时计算出各项资源利用、物质循环以及生态包袱等指标，在此基础上，核算分析镁资源的价值流。主要结论如下：①原镁生产过程中的资源物质消耗量较大，采用皮江法生产镁工艺，生产 1t 原镁的非生物资源输入量达到 59.3t，而资源直接输入量达到 16.4t，并且该过程的生态包袱也较大，约为资源直接输入量的 3.6t。白云石与煤的资源直接输入占比分别为 64.8% 与 27.5%，而资源消耗强度占比分别为 25.8% 与

12.5%。炼镁的资源输入总量中硅铁消耗与生态包袱所占比重较大并对环境产生不可忽视的压力。白云石与煤在经济系统中属于高消耗低效率的物质，而硅铁属于低消耗高效率的物质。② 2006—2015 年镁产业生态包袱整体呈现上升趋势，清洁生产与循环经济是今后我国镁工业生态化发展的必然选择。③在皮江法炼镁的资源物质投入类别中，硅铁与煤这两种投入资源的价格均较高，加之皮江法炼镁对于硅铁、萤石的品味具有一定的要求，使得炼镁初期资源投入的价值量占到产品价值的 38.6% 以上，降低了价值产出率。由于国内的废镁循环利用技术发展较为缓慢，以及对废镁的回收、分类的管理体系尚未形成，同时考虑进出口价值、循环利用价值以及填埋处理价值，废镁的静态库存价值量占废镁流动价值总量 84% 以上，但是循环利用价值达到 1.78 亿元，具有较大的潜在利用价值。生产阶段价值产生量与价值增量分别为 109.67 亿元和 62.87 亿元；原镁加工后转化为各种镁产品，这一过程的价值增量为 38.7 亿元。④我国镁产品出口主要以原镁及镁合金的贸易创汇为主，受国内与国际市场需求结构的影响，这种单纯的效益追求影响和限制了我国镁产业进一步向高端领域发展。

3.2 讨论

我国镁资源的开发与应用具有越来越明显的国家战略优势，未来将成为我国少有的补充或接替成为国民经济主要金属基础材料的国家战略资源，但在产业结构调整、节能减排、进一步提升国际地位等方面仍然有提升的空间。首先，应加大投入研发应用镁资源高效与可持续开发利用关键技术，提升镁产业的资源利用效率，尤其是生产端的白云石、煤矿和硅铁的生产效率。其次，炼镁过程中的潜在环境压力不可忽视，而主要的污染集中在生产冶炼阶段，因此，需进一步加大节能减排投入，强化该阶段节能减排关键技术应用，如新型蓄热式竖罐还原炼镁技术等，采用循环经济模式清洁化生产，全过程充分利用资源，使生产

过程中的废物最小化、资源化、无害化,同时提高原镁生产阶段的环保工艺升级与普及推行速度。再次,完善废镁回收利用体系,提升废镁的回收利用率,充分利用废镁价值。最后,加快从产业链低端向高精制造、高附加值的加工、深加工产品的高端产品发展,进一步优化产品结构并加快国内企业的国际化步伐,以应对国际市场变化。

参考文献

- [1] 刘艳飞,张艳,于汶加,等.全球原镁需求预测及中国合理产能分析[J].资源科学,2015,37(5):1047-1058.
- [2] 中国镁网.潘复生:镁合金产业潜力无限[EB/OL].(2018-05-18)[2019-04-20].<http://www.chinamagnesium.net/html/news/2018-5/201851820866.shtml>.
- [3] HENCKENS M L C M, RYNGAERT C M J, DRIESSEN P P J, et al. Normative principles and the sustainable use of geologically scarce mineral resources[J]. Resources policy, 2018, 59: 351-359.
- [4] 黄裕普,逯承鹏,肖骁,等.东北老工业区矿业城市产业生态系统演化与重构——以辽宁大石桥为例[J].生态学报,2018,37(10):3146-3154.
- [5] 高峰,聂祚仁,王志宏,等.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.
- [6] REN W X, XUE B, LU C P, et al. Evaluation of GHG emissions from the production of magnesite refractory raw materials in Dashiqiao, China[J]. Journal of cleaner production, 2016, 135: 214-222.
- [7] SONG J L, YAN W Y, CAO H B, et al. Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China[J]. Journal of cleaner production, 2019, 215: 570-581.
- [8] 黄和平,毕军,李祥妹,等.区域生态经济系统的物质输入与输出分析——以常州市武进区为例[J].生态学报,2006,26(8):2578-2586.
- [9] 郭学益,宋瑜,王勇.我国铜资源物质流分析研究[J].自然资源学报,2008,23(4):665-673.
- [10] 逯承鹏.产业共生系统演化与共生效应研究[D].兰州:兰州大学,2013.
- [11] 王玉涛,王丰川,洪静兰,等.中国生命周期评价理论与实践研究进展及对策分析[J].生态学报,2016,36(22):7179-7184.
- [12] 黄蓓佳,赵凤,赵娟,等.建筑材料隐含环境影响评估[J].环境科学研究,2017,30(6):929-936.
- [13] BOUMAN M, HEIJUNGS R, VAN DER VOET E, et al. Material flows and economic models: an analytical comparison of SFA, LCA and partial equilibrium models[J]. Ecological economics, 2000, 32(2): 195-216.
- [14] 高峰.生命周期评价研究及其在中国镁工业中的应用[D].北京:北京工业大学,2008.
- [15] TIAN X, WU Y F, QU S, et al. Deriving hazardous material flow networks: a case study of lead in China[J]. Journal of cleaner production, 2018, 199: 391-399.
- [16] 周传斌,吕彬,施乐荣,等.我国城市生活垃圾回收利用率测算及其统计数据收集对策[J].中国环境管理,2018,10(3):70-76.
- [17] XU Z C, CHAU N S, RUZZENENTI F, et al. Evolution of multiple global virtual material flows[J]. Science of the total environment, 2019, 658: 659-668.
- [18] LI Q F, ZHONG W Q, WANG G S, et al. Material and value flows of iron in Chinese international trade from 2010 to 2016[J]. Resources policy, 2018, 59: 139-147.
- [19] 逯承鹏,陈兴鹏,张子龙,等.基于MFA的兰州市经济增长与环境压力关系变化分解分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2013,49(5):604-610.
- [20] HODGSON G M. Darwinian coevolution of organizations and the environment[J]. Ecological economics, 2010, 69(4): 700-706.
- [21] 王永卿,张均,王来峰.我国矿山固体废弃物资源化利用的重要问题及对策[J].中国矿业,2016,25(9):69-73,91-91.
- [22] 孟树昆.中国镁工业进展[M].北京:冶金工业出版社,2012.
- [23] 申明亮.电解法与皮江法炼镁的效益比较及分析[J].有色冶金节能,2009,25(5):6-9,15-15.
- [24] 燕凌羽.中国铁资源物质流和价值流综合分析[D].北京:中国地质大学(北京),2013.

Life Cycle Analysis on Material and Value Flows of Magnesium Industry Ecosystem in China

DONG Shuheng^{1,2,3}, LU Chengpeng^{1,2*}, XING Ran^{1,2,3}, XUE Bing^{1,2}

(1. Key Lab of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Key Lab for Environmental Computation and Sustainability of Liaoning Province, Shenyang 110016, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the material flow analysis framework, the material flow analysis method and model of magnesium industry ecosystem were constructed to quantitatively analyze the material flow and value flow of China's macro level magnesium metal material in each stage of its life cycle in 2015. The ecological burden of magnesium production by pidgeon process was calculated and combined with e! Sankey pro 4.5.3 drawing software for visual expression and analysis. The results showed that: ① the resource consumption was large in the production of raw magnesium. The input amount of non-biological resources and the direct input amount of resources for each 1t of raw magnesium produced by pidgeon method were 59.3t and 16.4t respectively, and the ecological burden was about 3.6 times of the direct input amount of resources. The optimization of source material input was to improve the utilization efficiency of dolomite and fuel. ② the overall ecological burden of magnesium industry showed an upward trend from 2006 to 2015. Clean production and circular economy are the countermeasures for the ecological development of magnesium industry in the new era. ③ the price of ferrosilicon and coal in the resource material input category of pidgeon magnesium smelting was high, affecting the value output rate. The waste pidgeon have a relatively large potential value. ④ Affected by the domestic and international market demand structure, it is necessary to adjust the production structure of magnesium industry to meet the development challenges of magnesium industry. Finally, the environmental management measures were put forward from the aspects of resource utilization efficiency, energy saving and emission reduction, recycling system and optimization of product structure, so as to provide decision-making basis for the recycling and green development of mineral resources such as metal magnesium and magnesium in China.

Keywords: industrial ecosystem; magnesium resources; material flow; value flow; China