

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2022.05.018

# 碳达峰碳中和背景下稀土产品的生命周期评价

赵国庆<sup>1</sup>, 洪 湃<sup>2</sup>, 班 华<sup>1</sup>, 徐 津<sup>3</sup>

(1. 包钢集团节能环保中心, 内蒙古 包头 014010;

2. 上海易碳数字科技有限公司, 上海 200439;

3. 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014030)

**摘 要:**在当前“碳达峰、碳中和”的背景下,稀土企业在制订低碳规划的过程中,对于减碳措施的减碳潜力没有数字化的概念,缺乏量化的评价手段,缺乏科学的数据支撑。生命周期评价为解决这些问题提供了科学的方法和工具。采用生命周期评价方法对包钢稀土产品稀土抛光粉、钕铁硼磁性材料、储氢合金粉等从原材料采集、生产加工的“从摇篮到大门”的生命周期过程进行了全面的、数字化的环境影响评价。提出了稀土生产过程中主要副产品的分配方法。以碳排放指标为例,解析了稀土产品生命周期碳排放的构成,在各个工序的分布情况,从而能够发现产品全流程碳排放的最大影响因素,进而制定科学的减碳策略。应用生命周期评价方法可以系统化、定量地地对稀土企业进行低碳规划。

**关键词:**碳达峰碳中和;稀土产品;生命周期评价;分配方法;生命周期碳排放

**中图分类号:**TF845;TD955;F426

**文献标志码:**A

**文章编号:**2095-1744(2022)05-0144-05

## Life Cycle Assessment for Rare Earth Product under the Background of Carbon Peak and Carbon Neutrality

ZHAO Guoqing<sup>1</sup>, HONG Pai<sup>2</sup>, BAN Hua<sup>1</sup>, XU Jin<sup>3</sup>

(1. Baotou Steel Group Energy Conservation and Environmental Protection Technology Industry Co., Ltd.,  
Baotou 014010, China;

(2. Shanghai E-C Digital Technology Co., Ltd., Shanghai 200439, China;

(3. Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, China)

**Abstract:** In the current context of “carbon peak and carbon neutrality”, rare earth companies are formulating low-carbon plans. However, they have no digital concept of the potential of carbon reduction measures, lack of quantitative evaluation methods, and lack of scientific data support. A method for applying life cycle assessment (LCA) provides scientific methods and tools for solving these problems. A “from cradle to gate” LCA is used to do environmental impact assessment on Baotou Steel’s rare earth products, such as rare earth polishing powder, neodymium iron boron magnetic material, hydrogen storage alloy powder, etc. The allocation method of the by-products in the rare earth production process is proposed. The composition of the life cycle carbon emissions of rare earth products and the distribution of each process are analyzed, so that the largest influencing factors of carbon emissions in the entire product process can be found, so as to formulate scientific carbon reduction strategies. The application of life cycle assessment methods can systematically and quantitatively make low-carbon planning for rare earth enterprises.

**Key words:** carbon peak and carbon neutrality; rare earth products; life cycle assessment; allocation method; life cycle carbon emissions

收稿日期:2021-09-02

基金项目:包头稀土研究院开放课题(2021G2264)

Fund: Baotou Research Institute of Rare Earths(2021G2264)

作者简介:赵国庆(1969—),正高级工程师,主要从事环境保护研究工作。

引用格式:赵国庆,洪湃,班华,等. 碳达峰碳中和背景下稀土产品的生命周期评价研究[J]. 有色金属工程,2022,12(4):144-148.

ZHAO Guoqing, HONG Pai, BAN Hua, et al. Life Cycle Assessment for Rare Earth Product under the Background of Carbon Peak and Carbon Neutrality[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(4): 144-148.

随着中国提出“碳达峰、碳中和”目标,各行业、企业逐步开展低碳工作。《有色金属行业碳达峰实施方案》初步提出:到 2025 有色金属行业力争率先实现碳达峰,2040 年力争实现减碳 40%。这一计划比全国的碳达峰时间要至少提前五年。稀土产业是有色金属碳排放重点行业,稀土企业的碳达峰、碳中和需要统筹谋划目标任务,科学制定行动方案。但是目前的现状是,企业对碳排放没有数量的概念,对减碳的方法和途径具体减碳潜力没有数字化的概念,缺乏科学的数据支撑。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是定量计算产品生命周期环境负荷和环境影响的国际标准化方法<sup>[1-3]</sup>。产品碳足迹也是采用 LCA 方法计算的<sup>[4]</sup>。LCA 可以考察产品的环境性能,指出减少产品环境负荷和环境影响的方向和途径,制定提高产品的环境性能的决策方案,从而实现循环经济和清洁生产的目标。LCA 定量化、全流程的特点,对于解决“碳达峰、碳中和”工作中存在的问题,提供了很好的方法和工具。由于稀土产业主要分布中国,因此针对稀土产品的 LCA 研究目前主要是国内的高校

做了一些尝试<sup>[5-7]</sup>,但尚无企业进行系统化的开展。

## 1 研究方法

本研究在 LCA 及产品碳足迹相关国际标准的大框架下,结合包钢稀土实际情况,开展稀土产品的生命周期评价研究,提出包钢稀土产品 LCA 方法学,系统化地建立稀土产品 LCA 评价计算模型。通过研究掌握稀土产品生命周期环境指标及其在各阶段的分布;通过使用与 LCA 结果相关的影响类型,从环境影响角度审查一个产品系统;识别稀土产品生产系统的综合环境影响;掌握减少产品环境负荷和环境影响的方向和途径等;为包钢稀土产品生态设计提供支撑平台。特别是在“碳达峰碳中和”背景下,从全流程系统化的视角为企业低碳发展相关决策提供数字化的科学依据。

### 1.1 稀土产品生命周期评价研究边界及主要产品生产流程

研究对象为包钢稀土的稀土抛光粉、钕铁硼磁性材料、储氢合金粉三类产品,产品线的中间过程覆盖了稀土盐类、稀土氧化物、稀土金属等见表 1。

表 1 包钢稀土生命周期评价产品及中间产品

Table 1 Baotou Steel's rare earth life cycle assessment products and intermediate products

| Product Category    | Product or intermediate product                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rare earth ore      | Rare earth concentrate, strong magnetic medium tailings                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Rare earth solution | Samarium europium gadolinium solution, light rare earth solution, samarium chloride solution, praseodymium neodymium chloride solution, gadolinium chloride solution, holmium chloride solution, dysprosium chloride solution, mixed rare earth chloride solution, europium chloride solution, yttrium chloride Solution, terbium chloride solution, lanthanum cerium chloride solution                                                                                                                                                                                 |
| Rare earth salts    | Europium carbonate, cerium praseodymium carbonate, cerium carbonate, samarium carbonate, praseodymium neodymium carbonate, neodymium carbonate, lanthanum cerium praseodymium carbonate, lanthanum cerium carbonate, lanthanum carbonate, holmium carbonate, yttrium oxalate, terbium oxalate, gadolinium oxalate, dysprosium oxalate, chloride Cerium praseodymium, cerium chloride, samarium europium gadolinium chloride, praseodymium neodymium chloride, neodymium chloride, lanthanum cerium praseodymium chloride, lanthanum cerium chloride, lanthanum chloride |
| Rare earth oxide    | Yttrium oxide, terbium oxide, cerium oxide, neodymium praseodymium oxide, neodymium oxide, lanthanum oxide, holmium oxide, gadolinium oxide, dysprosium oxide                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Rare earth alloy    | Yttrium iron, holmium iron, gadolinium iron, dysprosium iron                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Rare earth metals   | Yttrium, praseodymium, lanthanum, praseodymium, cerium, neodymium                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Final product       | Rare earth polishing powder, NdFeB magnetic material, hydrogen storage alloy powder                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

稀土生产系统是由不同功能的工序按照先后关系串联并集成运行的复杂过程系统。本研究的边界为包钢稀土产品(稀土抛光粉、钕铁硼磁性材料、储氢合金粉)生产系统。稀土产品的生产经过了不同工序和单元,因此工序和单元的划分是建立产品生产系统模型的重要基础,同时也是现场数据收集边界是否清晰的重要保证。

本研究的包钢稀土产品(稀土抛光粉、钕铁硼磁性材料、储氢合金粉)生命周期系统边界,分 4 个阶段:外购原辅料与能源开采、生产阶段,运输阶段,自有矿山采选、稀土产品生产阶段,副产品循环再利用阶段,不含下游使用过程。如图 1 所示。

本研究数据主要来源包括:

1) 稀土产品的生产制造数据来源于包钢实际生

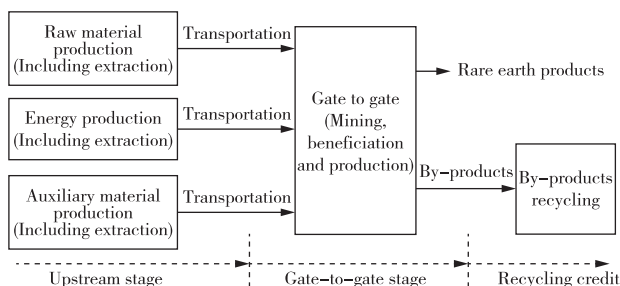


图1 包钢稀土产品 LCA 研究边界

Fig. 1 LCA research boundary of rare earth products

产数据；

2) 部分能源及能源介质来源于包钢实际生产数据；

3) 外购原辅料与能源开采、生产数据主要来源于外购商业数据库数据<sup>[8]</sup>和根据包钢稀土上游供应商提供的生产数据制作而成的 LCA 数据；

4) 运输数据来源于企业运输距离及运输方式统计数据按产量加权平均；

5) 稀土生产过程中产生的副产品的再利用按实际用途统计数据。

## 1.2 稀土产品生命周期清单计算方法

生命周期清单数据包括资源消耗、能源消耗、大气污染排放、水体污染排放、固体废弃物排放等方面的数据。

生命周期清单的基本计算逻辑如式(1)所示<sup>[9]</sup>，生命周期清单数据是基本流在所定义的生命周期过程的累积，基本流是以功能单位为基准的环境负荷。基本流  $g$  (如  $\text{CO}_2$  的排放) 的累积量

$$b_{T,F,g} = b_{F,g} + \sum a_i b_{i,g} \quad (1)$$

式中： $b_{T,F,g}$  为以功能单位  $F$  为基准的基本流  $g$  的累积量； $b_{F,g}$  为以功能单位  $F$  为基准的基本流  $g$  在产品生产过程的直接流量； $a_i$  为原燃料在产品系统中单元过程  $i$  每功能单位的直接消耗量； $b_{i,g}$  为基本流  $g$  在单元过程  $i$  的直接流量； $\sum a_i b_{i,g}$  是以功能单位为基准的基本流  $g$  在上游过程和下游过程的累积量，主要视研究边界所包含的单元过程而定(kg)。

根据此计算逻辑，开发了基于矩阵法的稀土产品生命周期清单计算方法，引入矩阵描述稀土产品生命周期各单元过程的物流、能流、环境流，建立生命周期各单元过程的关联。

## 1.3 稀土产品生产过程中的数据分配问题

### 1.3.1 铁尾矿

铁矿石采选后的尾矿作为原材料继续选稀土、选铁矿石，铁精矿与铁尾矿按元素流进行分配，即按照铁精矿与铁尾矿中总铁含量的比例进行分配。

尾矿做其它用途的，按尾矿的实际用途，采用系统扩展法进行分配。例如尾矿用于修筑路基的材料，替代了原需用到的砾石、砂石等，可以按实际替代比例，用砾石、砂石的 LCA 数据作为使用尾矿的环境收益数据。

### 1.3.2 原料净化、稀土萃取分离、稀土盐类制备等工序中共生产品的分配

关于复杂共生系统可根据化学能、熵等物理化学方式进行分配，但对于企业实际应用来说，存在理解困难，难以推广应用的问题。实际操作中，可采用质量分配、价值分配等简化处理。本研究中按产品质量进行分配，也可按照价值分配进行对比分析。

原料净化，产出轻稀土溶液、钐钕钆溶液等共生产品；稀土萃取分离，产出氯化镧铈溶液、氯化镨钕溶液等共生产品；稀土盐类制备产生碳酸镧铈、碳酸镨钕等共生产品，这几个工序均可按照质量分配，配合价值分配进行分析对比。

### 1.3.3 其他渣料、泥料的负荷分配方法

同样渣料、泥料等主要的副产品被用于替代功能类似的产品。例如，渣料、泥料可被用于筑路材料等。因为副产品的环境收益取决于其最终用途，所以从环保的角度上本方法允许对副产品使用不同的替代回收方式。这也强调了副产品回收利用的环保价值。系统扩展法还用于分配稀土生产过程中产生的粉尘、金属屑、废油等。

采用系统扩展法的关键是正确地选择功能对等的替代系统。所以本研究给予很大的关注以确保选取的替代系统与实际相一致。

## 2 结果与分析

由于生命周期清单计算指标众多，在碳达峰、碳中和背景下，本文重点考察二氧化碳排放。产品二氧化碳排放在全生命周期各个阶段的分布如表2所示。副产品循环再利用阶段，按分配方法，其碳排放相当于抵扣了相应替代产品的环境负荷，其环境负荷为负值，即产生了环境收益。这种计算方法鼓励副产品更多的回收，更高附加值的利用，负值数据反映了对环境的效益。副产品的循环再利用主要来自生产过程中的尾矿、渣用于铺路材料的收益。

表 2 产品生命周期环境负荷阶段分布

Table 2 Phase distribution of environmental load in product life cycle

| Product                       | Gate to gate(mining, beneficiation and production) | Transportation | Upstream contribution | Recycling credit |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|----------------|-----------------------|------------------|
| Rare earth polishing powder   | 11.7                                               | 0.4            | 98.1                  | -10.2            |
| NdFeB magnetic material       | 59.3                                               | 0.1            | 42.2                  | -1.6             |
| Hydrogen storage alloy powder | 54.7                                               | 0.1            | 48.5                  | -3.3             |

表 2 分布结果表明,稀土抛光粉产品的主要碳排放分布在外购原辅料及能源阶段,占比达到 98.1%,将外购原辅料与能源开采、生产阶段进一步解析开,如图 2 所示,其主要来源为氨水的生产、氧化钙的开采与生产、外购电网电的排放。

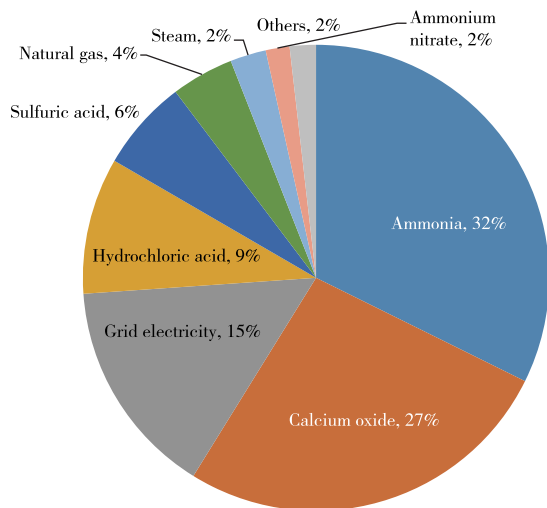


图 2 稀土抛光粉外购原辅料及能源的碳排放

Fig. 2 Carbon emissions from purchased raw materials and energy sources of rare earth polishing powder

钕铁硼磁性材料和储氢合金粉的分布相似,内部工序的碳排放占一半以上,图 3 和图 4 分别是储氢合金粉和钕铁硼磁性材料碳排在内部生产工序的分布情况。合金锭退火工序是储氢合金粉的工艺流程中碳排放最大的工序,其次是氧化镧电解和合金锭熔炼工序。钕铁硼毛坯生产工序是钕铁硼磁性材料产品制备过程中碳排放最大的工序,一个工序占比高达 65%,是碳减排的关键工序。

类似地,将各个工序的数据进一步解析开,就能够看出各个工序的碳排放构成,能够准确找出产品全流程碳排放的最大影响因素,从而制定科学的减碳策略。

### 3 结论

采用生命周期评价方法对包钢稀土产品稀土

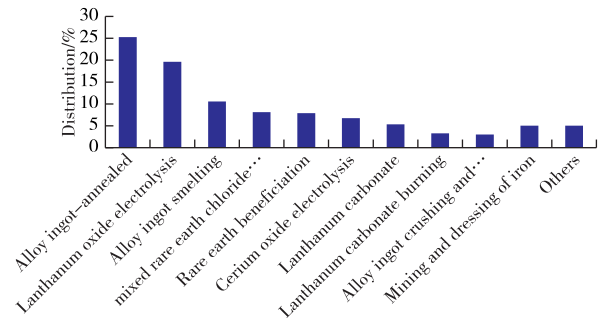


图 3 储氢合金粉碳排在内部生产工序的分布

Fig. 3 Distribution of carbon emissions from hydrogen storage alloy powder in internal production processes

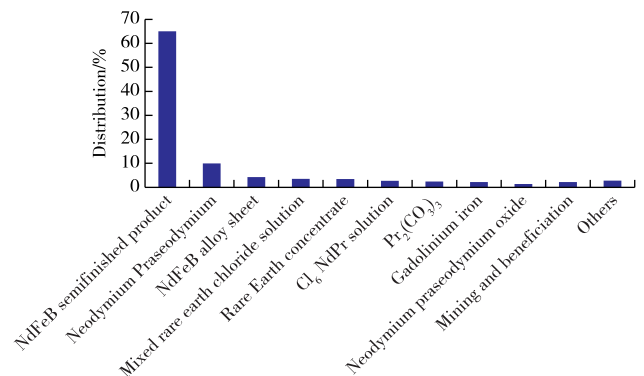


图 4 钕铁硼磁性材料碳排在内部生产工序的分布

Fig. 4 The distribution of carbon emissions of NdFeB magnetic materials in internal production processes

抛光粉、钕铁硼磁性材料、储氢合金粉等从原材料采集、生产加工的“从摇篮到大门”的生命周期过程进行了全面的、数字化的环境影响评价。提出了稀土生产过程中主要副产品的分配方法。以碳排放指标为例,解析了稀土产品生命周期碳排放的构成,在各个工序的分布情况,从而能够发现产品全流程碳排放的最大影响因素,从而制定科学的减碳策略。

稀土企业“碳达峰、碳中和”路径规划应站在稀土全产业链、产品生命周期全过程的高度,科学系统的制定减碳路线图。应用生命周期评价方法可以系统化、量化地对稀土企业进行低碳规划。

## 参考文献:

- [1] International Standard Organization. Environmental management-Life cycle impact assessment-Principles and frame-word; ISO 14040; 2006 [S]. Geneva; ISO Standards Press,2006.
- [2] International Standard Organization. Environmental management-Life cycle impact assessment-Requirements and guidelines; ISO 14044; 2006 [S]. Geneva; ISO Standards Press,2006.
- [3] International Standard Organization. Greenhouse gases—Part 1:Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals; ISO 14064—1; 2018[S]. Geneva;ISO Standards Press,2018.
- [4] International Standard Organization. Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification; ISO 14067; 2018[S]. Geneva;ISO Standards Press,2018.
- [5] 魏娟萍,基于 LCA 的离子型稀土生产环境生态累积火用耗研究[D]. 赣州:江西理工大学,2016.
- WEI Juanping. Research on the ecological cumulative exergy consumption of the production environment in ion-absorbed rare earth based on LCA[D]. Ganzhou; Jiangxi University of Science and Technology,2016.
- [6] 邱川. 典型稀土材料制备的生命周期评价[D]. 北京:北京工业大学,2016.
- QIU Chuan. Life cycle assessment of manufacturing of typical rare earth material [D]. Beijing; Beijing University of Technology,2016.
- [7] 李子健. 中国氧化稀土生产环境影响的生命周期评估[D]. 北京:清华大学,2014.
- LI Zijian. A life cycle assessment of environmental impacts from the production of rare earth oxides in China[D]. Beijing; Tsinghua University,2014.
- [8] 上海易碳数字科技有限公司,jimuLCA database[CP/DK]. 上海:上海易碳数字科技有限公司,2021.
- Shanghai E-C Digital Technology Co., Ltd. jimuLCA database [CP/DK]. Shanghai; Shanghai E-C Digital Technology Co.,2021.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 钢铁产品制造生命周期评价技术规范(产品种类规则)GB/T 30052—2013 [S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- China National Standardization Administration Committee. Life cycle assessment specification on steel products (Product category rules); GB/T 30052—2013 [S]. Beijing;China Standard Press,2014.

(编辑 崔 颖)