

# 专利技术交底书

## 一种针对钢铁企业混合电产品的生命周期碳足迹计算方法

技术联系人：王柘

电话：18802141295

邮箱：[wangzhe99@baosight.com](mailto:wangzhe99@baosight.com)

### 1. 发明名称

一种针对钢铁企业混合电产品的生命周期碳足迹计算方法

### 2. 所属技术领域

本发明涉及钢铁冶炼产业中针对混合电产品的投入产出分析，以及生命周期碳足迹分析方法。本发明可广泛应用于冶金企业中，对于发电工序生产的各类电力能源的碳核算，以及混合电产品的碳足迹分析和追溯，为钢铁企业优化电力生产过程中的碳负荷分布提供建议，从而减少最终产出的钢铁产品在全生命周期中的碳排放。

### 3. 技术背景

随着全球气候变化问题的日益严峻，国际社会对各行各业生产过程中的碳排放的限制以及可持续发展的要求逐步严格。在此背景下，中国作为世界上最大的钢铁生产国之一，为了应对国际环境的约束而在碳排放问题上面临着诸多压力。一方面，开放的市场环境使得国内钢铁企业必须面对来自进口钢材的冲击，包括低碳工艺所降低的成本、多元化的产品类型、快速的产品迭代速度等严峻挑战。另一方面，随着全国碳排放权交易市场的开市，节能降碳符合全球气候变化应对的国际趋势，也响应了我国政府对绿色发展的号召。只有减少碳排放、加大技术创新力度、加快钢铁产业升级、促进各大钢铁企业向绿色低碳转型，才有利于中国钢铁行业与国际接轨，负担起可持续发展的社会责任，提

高企业公众形象与社会信誉，提升中国钢铁产品的国际竞争力。

为了实现节能降碳的目标，对于产品碳足迹的测算标准至关重要。在钢铁行业中，钢铁产品碳足迹指的是其生命周期中产生的温室气体排放量，通常以二氧化碳的当量来衡量。碳足迹通常包括两种排放来源：直接排放和间接排放。直接排放是指钢铁生产过程中直接产生的二氧化碳排放，比如燃烧煤气等能源产生的排放，以及生成生石灰等化学反应所产生的二氧化碳排放。间接排放指与钢铁生产活动相关，但不直接由其产生的排放，如原材料和能源在上游开采、生产和运输过程中产生的二氧化碳排放。在众多碳足迹测算方法中，生命周期评价（Life Cycle Assessment，以下简称LCA）提供了一种系统化的环境绩效方法来评价产品从制造、运输、使用和报废等阶段的潜在环境影响，包含了“从摇篮到坟墓”的完整生命周期，因此被各行各业广泛使用。

目前，我国钢铁企业碳核算的计算范围主要包含直接排放，即工厂边界内的所有排放，以及部分间接排放，即外购物料和能源的排放。现有专利技术对于钢铁生产工序中生命周期清单（LCI）的采集分析也侧重于上述边界之中。钢铁生产过程中无可避免地使用大量能源，钢厂自产的以电力为主的能源产品是钢铁产品全生命周期碳排放中的重要组成部分。根据2023年统计数据，我国主要钢铁企业产出的产品中，能源所占的碳排放比例均高于70%，其中电力的碳排放当量平均高达 $1.4\text{kgCO}_2\text{eq/kwh}$ ，远高于我国电厂发电的平均碳排放系数（约为 $0.5\text{kgCO}_2\text{eq/kwh}$ ）。对混合电力产品建立精确的碳足迹测算方法，优化能源生产结构，是我国钢铁企业实现降碳目标的重要保障。

在冶金行业中，以电力为主的能源产品通常由能辅工序负责生产，供生产钢铁产品的主工序使用。多数钢铁企业的用电构成趋于复杂，除了外购国家电网的工业用电、光伏电以外，钢厂还有自备电厂自行发电的燃煤电、燃气电、燃煤气电，高炉工序回收的TRT电，烧结工序回收的ORC电，随着光伏板在企业内的普及，还有部分回收光伏电等。此类电力在混合后统一供给钢铁生产主工序使用。除电厂以外，能辅工序也包括与工业水、纯水、氢气、氧气、氩气、氮气、蒸汽等辅助能源相关的生产工序，此类工序除了相互之间直接的关联外，还有与前置工序的间接关联，以及随之产生的间接消耗。以钢厂自备电厂生产的电力为例，发电需要直接消耗电力，还要消耗工业水、纯水、氮气等辅助产品，而在生产工业水、纯水和氮气产品时又要消耗电力，因此形成电力的第一次间接消耗。由于几乎所有工序都使用电力作为能源，对于电力的间接消耗将会不断迭代，直至无穷多次。由此得出，自产电对电力的直接消耗和叠加后的间接消耗之和，最终构成了自产电对电力的完全消耗。而自产电合并其他来源的电力，最终形成了钢铁生产所使用的混合电力产品。

现有专利中并未检索到针对钢铁企业中电力产品的生命周期分析方法。在相关专利技术中，由宝武集团环境资源科技有限公司提出的《一种转底炉生产DRI球团工艺的生命周期评价方法》（专利申请号 CN 116777285 A）提供了一种针对转底炉生产DRI球团工艺中冶金废弃物的LCA方法，成功提高了对于冶金废料的资源转化率和利用率，优化了DRI球团产品的生命周期碳足迹。此专利技术同样按照各机组单元进行划分，收集现场数据，并对实际工序流程进行建模。然而，由于转底炉工艺生产流程较短、工序数量较少，并不存在工序之间的间接消耗与资源间的互相调用，因此相关专利技术无法应用于混合电力产品的生命周期碳足迹分析。

综上所述，以电力生产工序为首的能辅工序由于其特殊性，经常出现多工序之间互相依赖、资源混用、产品间接消耗的特征，因此使用一般方法进行生命周期清单分析势必产生误差。而现有专利技术在统计钢铁生产中的能源使用情况时多将电力等能源当作外购产品，使用统一的碳排放因子进行计算，或是不依照工序流程进行建模，使用总投入产出数据进行计算。使用上述方法，不仅会使得结果偏离真实值，也无法对于钢厂在能源生产过程中的降碳措施提供具有针对性、建设性的优化方案。

## 4. 发明目的

由于上述缺陷，本发明提出了一种针对钢铁企业混合电产品的碳足迹计算方法，用于测算钢铁企业中混合电力产品的碳足迹。基于Leontief投入产出模型，本发明通过将钢铁企业在电力能源生产过程中的活动数据，按照不同工序单元进行划分，整合生产单位混合电所消耗的原材料、辅助材料、能源，并将与电力生产、使用相关的能辅工序，将实际生产中投入的原材料和产出的产品与其他工序相关联，使用矩阵方法成功构建了混合电产品在各工序中普遍存在的资源互用和间接消耗关系，解决了一般分析方法对于钢铁生产中各类电力工序建模困难的问题。本发明通过开展混合电碳足迹计算，可帮助企业了解其电力产品在上游、厂内生产过程、厂内运输等各阶段的碳排放量及其占比，以利于通过调整混合电结构来制定有效的碳减排方案。本发明能够广泛应用于云计算平台，基于实际生产数据，依据LCA方法论，建立高精度、自动化、可视化、可追溯的混合电力产品碳足迹评价体系和系统。

## 5. 技术方案

本发明的LCA分析规范基于下列标准：

- ISO 14040: 2006 《环境管理 生命周期评价 原则与框架》
- ISO 14044: 2006 《环境管理 生命周期评价 要求和导则》

- ISO 14067: 2018 《产品碳足迹-温室气体量化的要求和指南》
- GB/T 30052-2013 《钢铁产品制造生命周期评价技术规范》

本发明对混合电力产品的碳足迹生命周期评价流程依据ISO 14044: 2006标准、ISO 14067: 2018标准, 以及GB/T 30052标准, 包含以下步骤: 目的和范围的定义, 生命周期清单分析, 以及生命周期影响评价。

## 5.1 目的和范围的定义

### 5.1.1 目的

本发明将目的定义为追溯钢铁企业中混合电力能源产品的生命周期碳足迹。将系统边界定为“从摇篮到大门”, 即包含上游过程(原、辅料的生产、开采与运输), 厂内电力生产过程, 以及厂内运输过程中产生的碳排放。

### 5.1.2 范围

本发明的功能范围为生产一千瓦时电力能源所产生的生命周期碳排放。本发明的建模范围为: 生产电力能源的多道工序, 包括多个火电机组: 燃煤电、燃气电、燃煤气电机组等; 回收电力的多道工序, 包括高炉工序回收TRT电单元, 烧结工序回收ORC电单元, 以及回收光伏电单元; 外购电力, 如外购国家电网的工业用电、光伏电等。此外, 生产工业水、纯水、氢气、氧气、氩气、氮气、蒸汽、鼓风等辅助能源, 以及回收各类煤气的工序, 由于与发电工序存在直接或间接关联, 也纳入系统边界。实际建模需根据各钢铁企业机组单元的真实分布结构进行调整, 本发明仅提供通用方法论作为参考。

## 5.2 生命周期清单分析

### 5.2.1 生命周期清单计算方法

本发明的LCI计算方法遵循GB/T 30052标准, 基本原则为

$$\text{生命周期排放} = \text{直接排放} + \text{各次间接排放} \quad (1)$$

本发明根据上文所述电力产品系统边界，依照以下表达式对不同边界进行划分，分别计算各边界内的碳排放累积量：

$$G = G_D + G_I - G_{BP} + G_T$$

(2)

其中*G*指电力产品在整个系统边界（从摇篮到大门）内的生命周期排放，其他单元定义如下表所示：

边界	定义
$G_D$	电力生产过程直接排放
$G_I$	原材料、外购物料间接排放
$G_{BP}$	副产品抵扣间接排放
$G_T$	外购物料运输过程间接排放

5.2.2 生命周期清单计算步骤

本发明通过以下步骤对电力产品进行LCI分析：

步骤1. 收集现场数据

将钢铁企业与电力生产相关的现场数据，以各工序机组为单位进行收集，包括上述范围内各工序的投入、产出物料和能源，各类排放和废弃物，以及原料运输数据。

步骤2. 收集背景数据

收集边界范围内相关的背景数据，包括各类原材料、辅助材料、能源在上游开采过程中的直接与间接排放系数，以CO2当量为标准。

步骤3. 现场数据分类

将各电力单元以及能辅工序生产过程中投入和产出的物料分为以下类别：

- 输入：原材料、辅助材料、能源、运输数据
- 输出：产品、副产品、固体废弃物

步骤4. 现场数据按照时间进行汇总

根据上述分类将工序现场数据在一定时间跨度内（如年度、月度等单位）进行汇总。

**步骤5. 现场数据检验**

对现场数据进行校验，确保数据准确性。

**步骤6. 统一数据单位**

统一各数据项基本单位，以千克、立方米、千瓦时等单位，对原数据（吨、千立方米等）进行转换。

**步骤7. 建立工序产品映射关系**

根据工序和产品之间的映射关系，如：燃煤发电机组对应火电发电量，建立对照表。

**步骤8. 计算单位消耗量**

针对每个机组单元，计算产品对各类能源和原材料的单位消耗量。对于原材料和能源的单位消耗量 $a_i$ ，即单元过程 $i$ 每功能单位的直接消耗量：

$$a_i = \frac{\text{原料消耗量}}{\text{产品产出量}} \tag{3}$$

对于原料中包含自身产品的工序（如发电机组本身使用了电力），其单位消耗量为：

$$a_i = \frac{\text{产品产出量} - \text{原料消耗量}}{\text{产品产出量}} \tag{4}$$

**步骤9. 建立工序投入产出矩阵**

建立各工序与机组的投入产出矩阵，具体数值以步骤8中单位消耗量表示。

通过单位消耗量构建各工序的投入产出矩阵：

$$D = \left\{ \begin{array}{ccccc} & unit_1 & unit_2 & \dots & unit_n \\ 原材料_1 & m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ 原材料_2 & m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \dots & & & & \\ 辅助材料_1 & f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ 辅助材料_2 & f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & & & & \\ 能源_1 & e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1n} \\ 能源_2 & e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2n} \\ \dots & & & & \\ 产品_1 & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ 产品_2 & p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & & & & \\ 副产品_1 & b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ 副产品_2 & b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ & & & & \\ 固废_1 & w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ 固废_2 & w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2n} \\ \dots & & & & \end{array} \right\} \quad (5)$$

其中 $unit_1$ 到 $unit_n$ 对应工序各机组单元， $m$ 、 $f$ 、 $e$ 、 $p$ 、 $b$ 、 $w$ 为该单元对应类别的各项数据的单位消耗系数。

以我国典型的钢铁企业中能源部门为例，各机组单元清单示例如下：

工序名称	产品名称
电力系统	混合电力
火电机组	火电
余热发电机组	余热电
制氢工艺	氢气
制氧工艺	氧气、氩气、氮气
蒸汽单元	中、低压蒸汽
煤气单元	高炉、焦炉、转炉煤气
天然气单元	天然气
压缩空气单元	压缩空气
鼓风单元	高炉鼓风
水处理厂	纯水、工业水
...	...

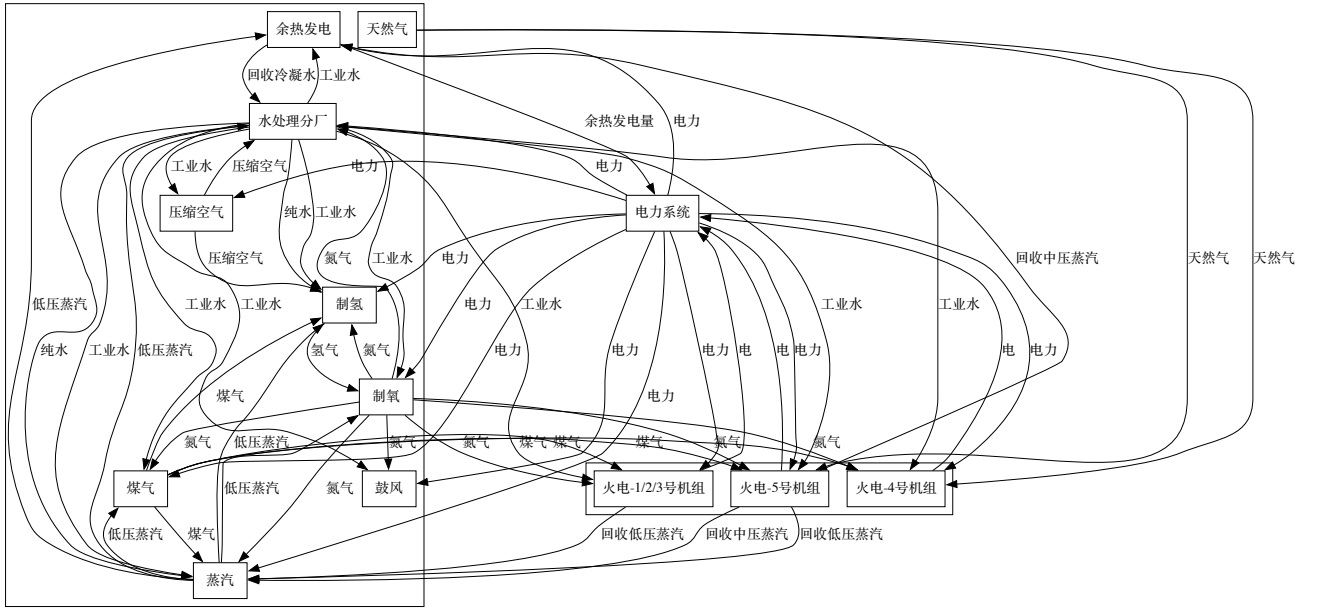
**步骤10. 检索工序间相互关联**

参照步骤9中投入产出矩阵，检索不同工序之间的相互关联，如：制氧工艺使用的电力来自燃煤发电机组。

**步骤11. 建立工序流程图**

依照步骤10结果，建立工序流程图，将各工序与机组单元以节点表示，工序间物料和能源的流动以边表示。依照步骤9中示例机组清单，建立如下流程图：





## 步骤12. 建立直接消耗系数矩阵

根据步骤9中投入产出矩阵以及步骤11中流程图，建立工序之间的直接消耗系数矩阵，结构如下所示：

$$A = \begin{Bmatrix} & unit_1 & unit_2 & \dots & unit_n \\ unit_1 & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ unit_2 & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & & & & \\ unit_n & a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

以 $a_{21}$ 为例，其含义为机组单元1生产一单位的产品使用到了 $a_{21}$ 机组单元2的产品作为其能源，依此类推。具体单元列表以钢铁企业实际生产过程为准，在此不做赘述。

## 步骤13. 计算完全需求系数矩阵

为了正确计算工序之间对资源的间接消耗，本发明使用Leontief方法计算各产品的完全需求系数。根据步骤12中直接消耗系数矩阵，完全需求系数矩阵具体计算方式如下：

$$B = (I - A)^{-1} \quad (7)$$

其中 $I$ 为行列均为各机组单位的单位矩阵，对 $(I - A)$ 求逆，得出完全需求系数矩阵 $B$ 。

## 步骤14. 现场数据划分边界

将各工序消耗的不同物料和能源按照边界条件进行划分，包括直接排放、间接排放（外购物料和能源）、副产品厂内抵扣及外卖抵扣、以及上游运输。

**步骤15. 计算电力产品各边界内碳排放累积量**

以步骤14中的边界范围为参照，将各工序对原材料、能源的单位消耗量，结合背景数据，代入步骤13得出的完全需求系数矩阵，得到电力产品在上游过程和下游过程的碳排放累积量，具体方法如下所述。

得出完全消耗系数矩阵后，根据上文中描述的不同边界，左乘各自物料范围内的投产出矩阵，再左乘对应的排放系数矩阵（ $G_D$ 为直接排放，其他为间接排放系数），最终求和，得出混合电力产品在该边界范围内的生命周期碳排放因子。具体公式如下所示：

$$G = \sum EF \cdot D \cdot B \tag{8}$$

其中 $D$ 为对应边界内原材料的投入矩阵， $EF$ 为包含在 $D$ 中的原材料的间接排放系数矩阵， $G$ 为产品在对应边界内的生命周期碳负荷。此公式可通用于上文所述各边界内的碳负荷计算。

**步骤16. 汇总得出电力产品的生命周期碳足迹**

将电力产品在各边界范围内的累积碳排放进行分类汇总，得到电力产品的生命周期碳足迹。对所有范围内的计算结果并进行汇总后，便能得出混合电力产品在上游过程（原、辅料的生产、开采与运输），厂内电力生产过程，以及运输过程中产生的碳排放的碳负荷分布。