

专利技术交底书

一种针对钢铁企业混合电产品的全生命周期碳足迹计算方法

技术联系人：

电话：

邮箱：

1. 发明名称

一种针对钢铁企业混合电产品的全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全生命周期碳足迹分析方法。本发明可广泛应用于冶金企业对于能源发电工序以及辅助工序中所消耗物料的碳核算，以及产出的以混合电力为主的各类能源的碳足迹分析和追溯，为优化能源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因子。

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，其中也包括了钢铁行业。为了推动钢铁企业走向低碳、环保，以欧盟为首的国际组织推出了一系列标准和政策措施，例如碳排放配额交易系统（EU ETS）：即通过设定碳排放配额和碳排放交易，鼓励企业进行减排措施以获得额外配额并对超出配额的部分进行罚款，旨在通过市场机制促使企业采取减排措施，为企业提供灵活的减排途径。同时，钢铁企业需要进行碳排放监测与报告，定期向相关监管机构报告其碳排放情况，确保企业的排放数据真实可靠。上述标准鼓励钢铁企业生产绿色

低碳产品以获得环保认证和标志，从而逐步实现碳中和的目标。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，承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，如生产原材料和能源过程中（发电工序等）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。根据ISO 14044：2006标准，LCA分析分为4个步骤：定义目标和范围，生命周期清单分析（Life Cycle Inventory Analysis, LCI），生命周期影响评估（Life Cycle Impact Assessment, LCIA），以及生命周期解释。在钢铁行业中，基于国际上受到广泛认可的LCA标准ISO 14040：2006《环境管理 生命周期评价 原则与框架》和ISO 14044：2006《环境管理 生命周期评价 要求和导则》，世界钢铁协会制定了适用于钢铁产品的LCI方法论，将评价边界设定为从原材料开采到钢厂生产完成（从摇篮到大门）。与此同时，宝钢参照上述标准，制定了GB/T 30052-2013《钢铁产品制造生命周期评价技术规范》，目前已成为我国钢铁行业进行LCA碳足迹分析的主流规范。

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，其碳核算基本计算方法遵循：碳排放 = \sum (消耗量 × 排放系数)，碳排放根据钢铁生产工序流程进行简单累计，分析对象多局限于主要钢铁产品，对于能辅工序中产出的以电力为主的能源产品的生命周期缺乏关注。然而，钢铁生产过程中无可避免地使用大量能源，根据2023年统计数据，宝钢股份有限公司旗下的四大钢铁基地产出的产品中，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1.4kgCO₂eq/kwh，远高于我国电厂发电的平均碳排放系数（约为0.5kgCO₂eq/kwh）。如何优化能源生产工序，使用更加绿色低碳的能源已经成为我国钢铁企业实现降碳目标的重中之重。

钢铁生产中的能辅工序通常指与电力能源相关的工序，以及生产其他辅助能源的工序。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。这些电力在主要生产工序使用的时候大多不会区分来源，因此可以认为能辅工序生产的是混合电力产品。钢铁企业除了自备电厂以外，通常在工业水、纯水、氧气、氩气、氮气、蒸汽等能源供给上也有相关的生产工序，这些能源生产工序除了相互之间直接的生产联系外，还有与前置工序的间接联系，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，这就是自发电对电的第一次间接消耗。由于所有供消耗的产品都有可能消耗电力，依此类推，还有第二次、第三次以至无穷次的间接消耗。于是，自产电对电力的直接消耗和无数次间接消耗之和，就构成了自产电对电的完全消耗，而自产电合并上其他来源的电就形成了钢铁生产最终使用的混合电。

综上所述，能辅工序由于其特殊性，经常出现多工序之间互相调用资源、使用其他工序的产品作为能源等相互依赖的特征，因此使用传统LCI方法进行分析势必产生误差。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，忽略了钢铁企业中包含各发电机组在内的多道能辅工序，与实际情况不符，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。因此，本发明提出了一种基于钢铁企业混合电产品的碳足迹计算方法，通过开展混合电碳足迹计算，可帮助企业了解其产品在上游、钢铁产品制造、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。

4. 发明目的

由于上述缺陷，本发明提出了一种基于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，本发明通过整合生产单位混合电所消耗的原材料、辅助材料、能源，并将各能辅工序在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相互依赖关系，解决了传统LCA分析方法对于钢铁生产中混合电工序建模困难的问题。本发明能够广泛应用于云计算平台，将实际生产数据与LCA理论相关联，建立了高精度、自动化、可视化的混合电产品碳足迹评价体系。

5. 技术方案

本发明对钢铁行业的碳足迹LCA分析原则依据ISO 14044：2006标准，将主要研究对象定义为钢铁企业中生产各类电力能源的工序，以及混合电力产品。目标范围为能辅工序，此类工序负责生产钢铁制造过程中所使用到的各类能源，包括各发电机组生产的电力、中/低压蒸汽、制氧/制氢工艺生产的氧/氢/氮/氩气，以及回收精制的各类煤气等。生产以上产品的工序为本发明的主要核算对象，而炼焦、高炉/焦炉/转炉等工序虽生产煤气，但由于其与主生产工序之间的强关联，并不处于本发明的边界范畴之内。

本发明LCI分析遵循以下步骤：

1. 将各能辅工序生产过程中使用和产出的物料进行汇总，并分为以下类别：
 - 输入：原材料、辅助材料、能源、运输数据
 - 输出：产品、副产品、水体排放、大气排放、固体废弃物
2. 根据上述分类将工序基础数据在一定时间跨度内进行汇总（年度、月度数据等）
3. 对数据进行清洗，移除或修改极端值和不合理数据项
4. 统一各数据项基本单位（千克、立方米、千瓦时等）
5. 建立工序和产品之间的映射关系（如：电厂-加热炉发电对应加热炉发电量）
6. 计算能辅产品对各类能源和原材料的单位消耗量
7. 建立能辅工序投入产出矩阵
8. 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于电厂机组）
9. 建立能辅工序流程图，将工序以节点表示，工序间物料和能源流动以边表示
10. 建立能辅工序之间的直接消耗系数矩阵
11. 通过Leontief投入产出模型计算能辅工序完全消耗系数矩阵
12. 将各工序消耗的不同物料和能源按照边界条件进行划分，如直接排放（消耗的煤气等）、间接排放（外购物料和能源）、副产品厂内抵扣（生产的副产品在厂内回用抵扣的部分）及外卖抵扣（生产的副产品外卖给其他厂家抵扣的部分）、运输（原材料运输过程中产生的间接排放）、废弃物（产出的大气、水体、固体废弃物等造成的环境影响指数和间接排放）
13. 将各工序原材料的单位消耗量乘以ecoinvent数据库碳排放因子，再乘以完全消耗系数矩阵，得到能辅产品在各个边界内的实际碳排放
14. 将各能辅产品在不同边界范围内的碳排放进行汇总，生成报表并等待进一步分析

本发明的建模方法遵循LCA基本原则，即

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

公式如下：

$$b_{T,F,g} = b_{F,g} + \sum a_{T,i} \times b_{i,g} \quad (2)$$

其中 $b_{T,F,g}$ 为生命周期排放， $b_{F,g}$ 为工序直接排放， a_T 为物料单位消耗量， b_g 为物料间接排放系数。根据钢铁企业实际应用，将上述公式变为如下形式

$$G = G_D + G_I - G_{BP} + G_T \quad (3)$$

其中 G 指产品在整个系统边界（从摇篮到大门）内的生命周期排放，其他组成部分对应上述边界，具体如下表所示：

数据项	含义
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_{BP1}	副产品厂内回用、外卖至其他厂家抵扣间接排放
G_T	外购物料运输过程间接排放

为了确保能辅工序间的相互关联能正确体现在模型中，本发明使用Leontief投入产出模型进行LCI分析。首先计算各工序对于原材料和能源的单位消耗量，事先统一单位：

$$a_{T,i} = \frac{\text{原料消耗量}}{\text{产品产出量}} \quad (4)$$

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：

$$a_{T,i} = \frac{\text{产品产出量} - \text{原料消耗量}}{\text{产品产出量}} \quad (5)$$

通过单位消耗量构建各工序的投入产出矩阵：

$$D = \left\{ \begin{array}{ccccc} & unit_1 & unit_2 & \dots & unit_n \\ \text{物料}_1 & m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ \text{物料}_2 & m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \dots & & & & \\ \text{能源}_1 & e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1n} \\ \text{能源}_2 & e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2n} \\ \dots & & & & \\ \text{排放}_1 & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ \text{排放}_2 & p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & & & & \end{array} \right\} \quad (6)$$

其中 $unit_1$ 到 $unit_n$ 为能辅工序各机组单元， m 、 e 、 p 等对应机组单元各项数据的单位消耗系数。

自发电、外购电、回收光伏电、回收TRT电

能辅

通过以上数据，得出能辅工序之间的直接消耗系数矩阵：

$$A = \left\{ \begin{array}{ccccc} & unit_1 & unit_2 & \dots & unit_n \\ unit_1 & a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ unit_2 & a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & & & & \\ unit_n & a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{array} \right\} \quad (7)$$

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。

通过上述矩阵得出能辅工序流程图，

通过Leontief方法计算能辅工序间的完全需求系数矩阵：

$$B = (I - A)^{-1} \quad (8)$$

其中 I 为行列均为各机组单元的单位矩阵，对 $(I - A)$ 求逆，得出完全消耗系数矩阵 B 。

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出产出矩阵，再左乘对应的排放系数矩阵（直接排放或间接排放系数），最终求和，得出能辅产品在该边界范围内的生命周期碳排放因子。

$$G = \sum b_{i,g} \cdot D \cdot B \tag{9}$$

其中 D 为不含直接排放的（除煤气等）原材料的投入矩阵， $b_{i,g}$ 为包含在 D_I 中的原材料的间接排放系数矩阵， G_I 为计算出的能辅产品厂内间接排放生命周期碳负荷。此公式同样适用于其他边界内的碳负荷计算。

得出所有范围内的计算结果并进行汇总后，便能得出各类能辅产品在不同边界内的碳负荷分布，等待进一步分析。

剩余部分

- LCIA分析
- 结果解释
- 云平台部署流程
- 数据开发流程
- 工序流程图、投入产出表，etc.
- 数据可视化
- 。 。 。

参考文献