

· 相关技术 ·

基于生命周期评价的预焙阳极生产环境负荷研究

鹿珂伟 葛青 张洪坤 朱思敏 李宝城 孙泽明 刘英

(国合通用测试评价认证股份公司 北京 101407)

摘 要: 预焙阳极是以石油焦、沥青为主要原料, 作为铝电解槽的“心脏”, 成为电解铝生产过程中的第二大消耗性原材料, 然而其生产过程能耗高和炭渣脱落的情况一直倍受关注, 环境负荷压力日益加大。本研究针对预焙阳极材料展开生命周期评价研究, 识别其生产过程的关键生命周期阶段, 辨识能耗和碳排放的关键影响因素, 进一步指导产品改进生产工艺, 寻求绿色制造的途径和方法, 为今后预焙阳极的绿色生产和电解铝行业绿色发展提供一定的参考。

关键词: 预焙阳极; 生命周期评价; 碳排放; 铝电解

中图分类号: TF821 文献标识码: B 文章编号: 1002-1752(2020)10-0058-05

DOI: 10.13662/j.cnki.qjs.2020.10.012

Research on production environmental load of prebaked anodes based on LCA

Lu Kewei, Ge Qing, Zhang Hongkun, Zhu Simin, Li Baocheng, Sun Zeming and Liu Ying

(China United Test & Certification Co., Ltd., Beijing 101407, China)

Abstract: The prebaked anode is made of petroleum coke and asphalt as the main raw materials, which is recognized as the "heart" of aluminum pots, and becomes the second largest consumable raw material in the aluminum production. However, the high energy consumption and the falling off of carbon slag in the production process have attracted much attention, and the environmental load pressure is increasing day by day. In this research, the life cycle assessment (LCA) was carried out for prebaked anode materials to identify key life cycle stages during the production process, find out key influencing factors of energy consumption and carbon emission, further provide directions for products to improve the production process, explore the green manufacturing approaches and methods, and provide some reference for the green production of prebaked anodes as well as the green development of aluminum industry in the future.

Key words: prebaked anode; life cycle assessment; carbon emission; aluminum reduction

预焙阳极是电解铝生产不可或缺的消耗性原材料之一, 每生产 1 吨电解铝, 需消耗约 0.5 吨预焙阳极。2018 年, 国内原铝产量为 3580 万吨, 对应预焙阳极需求量约 1829.5 万吨, 我国原铝及预焙阳极全球产量占比均在 50% 以上, 已成为世界最大的原铝及预焙阳极生产国。然而预焙阳极的快速增长, 相对过剩严重, 其生产过程中的环境问题日益凸显^[1]。

张平采用 EPA 方法对炭素阳极在清洁生产审核中的应用进行了研究, 确定了清洁生产重点审核环节为焙烧车间^[2]; 刘建刚对预焙阳极煅烧炉、焙烧炉进行改善和能源替换研究, 达到了节能降耗的效果^[3]; 李培勋等人采用 LCA 方法研究了电解铝预焙电解和自焙电解工艺的环境负荷, 结果显示预焙电解无论在资源消耗、能源消耗还是污染排放具有明显的优势^[4]; 李桂贤等人研究炭素回转窑余热梯

级利用技术, 有效降低生产过程中的碳排放^[5]。

根据以上研究发现, 当前的研究更多的是对预焙阳极单个工序或烟气处理的技术更新, 少数研究者分析了预焙阳极的清洁生产应用和生产过程的环境影响, 但是对预焙阳极原料到生产过程生命周期的环境负荷以及能耗和碳排放研究较少。本研究采用基于生命周期评价(LCA, Life Cycle Assessment)方法定量研究预焙阳极生产的生命周期环境影响, 识别其环境负荷及关键生命周期阶段, 分析其能耗和碳排放, 寻找改善环境状况的时机和途径, 为预焙阳极行业的绿色可持续发展提供支持。

1 研究方法 with 数据收集

LCA 研究最早追溯到 20 世纪 60 年代, 其中以国际环境毒理学化学学会(SETAC)和国际标准化组织(ISO)最具权威性^[6]。1993 年, SETAC 对 LCA 定义

基金项目: 国家新材料测试评价平台(主中心)资助

作者简介: 鹿珂伟(1992-), 男, 河北省邯郸市, 初级职称, 硕士研究生, 研究方向: 生态环境材料、有色金属冶炼(生命周期评价、绿色设计产品)。E-mail: lukewei@cute.net

收稿日期: 2020-05-27

如下:通过确定和量化与评估对象相关的能源消耗、物质消耗和废弃物排放,评估某一产品、过程或事件的环境负荷;定量评价由于这些能源、物质消耗和废弃物排放所造成的环境影响;辨别和评估改善环境的机会。1997年,ISO修订的标准(ISO 14040)中给出的LCA定义为对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[7-9]。根据ISO 14040标准定义的技术框架为目的与范围的(Goal and Scope Definition)、清单分析(Life Cycle Inventory Analysis)、影响评价(Life Cycle Impact Assessment)和

结果解释(Life Cycle Interpretation)。

1.1 功能单位与系统边界的确定

针对预焙阳极的生产过程,定义其系统边界为从“摇篮到大门”阶段,即原材料获取(石油焦、沥青和冶金焦)、运输、生产阶段(煅烧工序、成型工序和焙烧工序),不包括产品的使用、废气和回收阶段,如图1所示。设定功能单位为1吨预焙阳极合格品,产品符合《YS/T 285-2012 铝电解用预焙阳极》的生产标准^[10]。

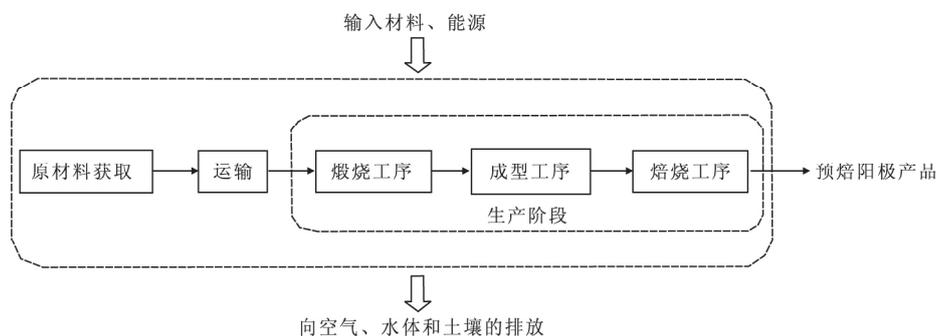


图1 预焙阳极生命周期系统边界

以某企业为例,预焙阳极产品生产工艺参数主要为:煅烧工序采用罐式煅烧炉,煅烧时原料生石油焦由炉顶加料装置加入罐内,在由上而下的移动过程中,逐渐被位于料罐两侧的火道加热。石油焦在罐内停留24~34h,温度为1250~1280℃,最终得到中间产物煅后焦。混捏成型工序中,将生碎、循环废料、煅后焦等按照比例进入预热螺旋机预热,与配方要求量的液体沥青投入混捏机中进行温度大于180℃的混捏过程,混捏时间5~8min。将混捏好的糊料冷却,挤压成型得到生阳极炭块,并送入焙烧车间。炭块在隔绝空气的条件下进行焙烧,焙烧温度1150~1200℃,采用天然气做燃料,焙烧完降温得到阳极产品。

1.2 数据收集与来源

生命周期清单分析是根据预焙阳极实际生产情况和工艺流程,选取能源、资源的输入数据和排放的污染物输出数据,并进行数据审核与平衡分析而获

得准确的清单数据,为之后的影响评价提供依据。

清单数据主要分为实景数据和背景数据。实景数据来自直接调研或供应商提供数据,预焙阳极的生产阶段实景数据来源国内某铝业集团配套的铝电解用炭素企业的现场调研,包括输入原材料、能源和运输等原始数据,运输只包括石油焦和沥青,冶金焦和电石渣等为集团之间运输不作考虑,两种污染物排放数据来源于各车间现场的数据与信息化系统(ERP及MES)实时采集数据,参考SO₂、NO_x和粉尘浓度及废气排放量计算得出。根据预焙阳极生产阶段的主要原辅料消耗、能源气体燃烧直接排放可计算得到生命周期清单,如表1所示。

背景数据:石油焦、液体沥青、电石渣、冶金焦、电力、天然气、公路运输等资源和能源的消耗与排放数据主要来源于GaBi9.0软件数据库中的中国本地数据。

表 1 生产 1 吨预焙阳极的直接消耗与排放

输入/输出		生产过程	输入/输出		生产过程	
资源消耗	石油焦/t	1.04E+00	排放	能源消耗	电力/kWh	1.77E+02
	电石渣/t	6.42E-02		天然气/m ³	4.84E+01	
	液体沥青/t	1.43E-01		CO ₂ /kg	1.05E+02	
	冶金焦/t	2.94E-02		SO ₂ /kg	2.32E-01	
	残极/t	1.07E-01		NO _x /kg	5.16E-01	
	生碎/t	4.99E-02		粉尘/kg	3.95E-02	
	生产水/m ³	2.31E-01		回收利用	蒸汽(余热利用)/kg	7.30E-01
除盐水/m ³	7.59E-01		石膏浆液/kg	1.58E-01		

1.3 环境影响指标

本研究选取初级能源消耗 (PED) 以及 ReCiPe 方法中的环境影响类型全球变暖潜势 (GWP)、酸化效应潜势 (AP)、颗粒物形成潜势 (PMFP)、富营养化潜势 (EP) 和光化学烟雾生成潜势 (POCP) 作为预焙阳极生命周期的环境影响评价指标。

因此特征化计算方法如下:

$$EP_i = \sum EP_{ij} = \sum Q_j \cdot EF_{ij} \quad (1)$$

式中: EP_i ——预焙阳极生命周期的第 i 种环境类别特征化值;

EP_{ij} ——预焙阳极生命周期的第 i 种环境类别中第 j 种污染物的贡献;

Q_j ——预焙阳极生命周期的第 i 种污染物的排放量;

EF_{ij} ——预焙阳极生命周期的第 i 种环境类型中第 j 种污染物的特征化因子。

根据收集的资源、能源和排放数据,在 GaBi 软件建立预焙阳极工艺流程模型,并进行特征化计算,结果如表 2 所示。

表 2 生产 1 吨预焙阳极生命周期环境影响特征化结果

影响指标	单位	原材料获取	运输	阳极生产阶段			总值	余热生产蒸汽
				煅烧	成型	焙烧		
GWP	kg CO ₂ eq	5.41E+02	4.55E+01	8.87E+01	6.80E+01	1.80E+02	9.23E+02	-2.20E+02
AP	kg SO ₂ eq	7.80E-01	1.18E-02	1.93E-01	1.08E-01	1.48E-01	1.24E+00	-3.53E-01
PMFP	kg PM _{2.5} eq	7.57E-04	5.40E-06	8.00E-06	5.45E-06	6.24E-06	7.82E-04	-1.58E-05
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq	1.37E+00	4.25E-02	3.51E-01	1.34E-01	4.48E-01	2.35E+00	-4.36E-01
POCP	kg NO _x eq	2.49E+00	3.73E-02	4.64E-01	2.24E-01	4.06E-01	3.62E+00	-7.26E-01
PED	MJ	9.85E+02	1.52E+01	3.23E+01	2.47E+01	6.48E+01	1.12E+03	-8.03E+01

2 结果与讨论

根据表 2 的产品环境影响特征化结果可得到图 2,显示生产 1 t 预焙阳极的生命周期环境负荷组成,预焙阳极生命周期环境影响潜值最大的是原料获取阶段,贡献了 58.46% ~ 96.79%,生产阶段占生命周期相应环境影响总量的 2.52% ~ 39.73%,运输阶段占比较小,由于原料产品主要选购企业周围省市地区,产品运输距离小,使得产品运输阶段占有较小的环境负荷。

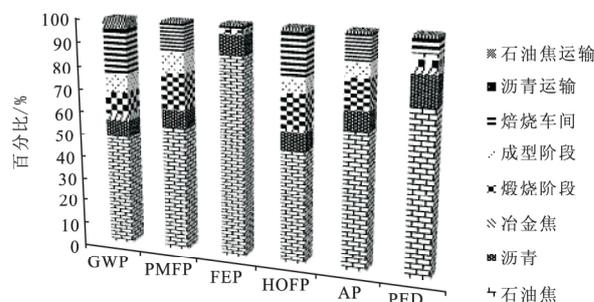


图 2 预焙阳极生命周期各阶段环境影响占比

2.1 碳排放分析

本研究中以 GWP 指标为碳排放研究对象,由表 2 和图 3 可知,生产 1 t 预焙阳极产品的生命周期内碳排放为 922.91 kg CO₂eq,其中产品生产阶段为 336.39 kg CO₂eq。对碳排放结构进行分析,从结果可以看出为预焙阳极生命周期中碳排放贡献最大的阶段为原料获取,其中石油焦生产过程对总碳排放的贡献率为 48.71%;生产阶段的焙烧工序贡献最大,深入分析该阶段 CO₂ 直接排放主要来自于天然气燃烧排放,贡献了 11.40%;在能源生产(天然气和电力)中,电力贡献占比达到 21.34%,电力的消耗直接与生产工艺的多种设备耗电有关,加之我国火力发电为主而造成 CO₂ 排放较多,导致其生产过程中温室气体排放较高;运输对 GWP 的贡献与运输过程中柴油燃烧排放 CO₂ 有关。

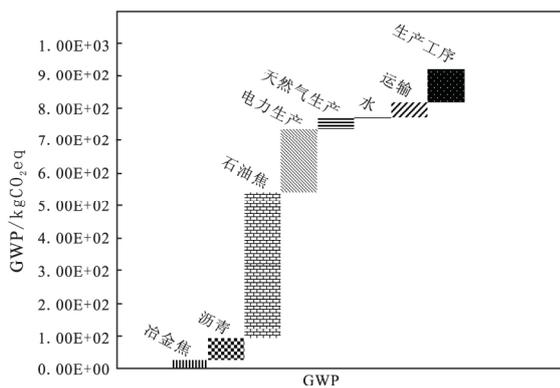


图 3 预焙阳极生命周期各阶段 GWP 构成

2.2 能耗分析

依据预焙阳极生命周期清单,以能源的低热值为当量进行计算和初级能源结构分析,从结果可以看出生产 1 t 预焙阳极产品的生命周期内初级能源消耗为 1.12 GJ。图 4 为各阶段的初级能源消耗构成,其中原料生产阶段对生命周期总能耗的贡献占比为 87.80%,而石油焦所占比例达到了 71.68%,这是由于石油焦是石油裂解焦化而得,需投入大量原油资源,另外煤焦沥青的生产同样消耗较多的化石能源;产品生产阶段的煅烧、成型和焙烧工序,对总能耗的贡献分别为 2.88%、2.20%和 5.77%,深入分析发现煅烧和成型的能源消耗来源于电力生产过程的消耗,焙烧过程主要是天然气的消耗;由于资源产品采用就近地区选购模式,产品运输距离较小,使得产品运输阶段占有较小的能耗比重。从初级能

源结构分析(图 4 折线),预焙阳极初级能源消耗以原油为主,占总能耗的 78.13%,其次为原煤和天然气,贡献比重分别为 11.55%和 10.32%;而产品运输阶段以消耗原油为主,与产品运输的主要能源消耗类型为柴油有关。

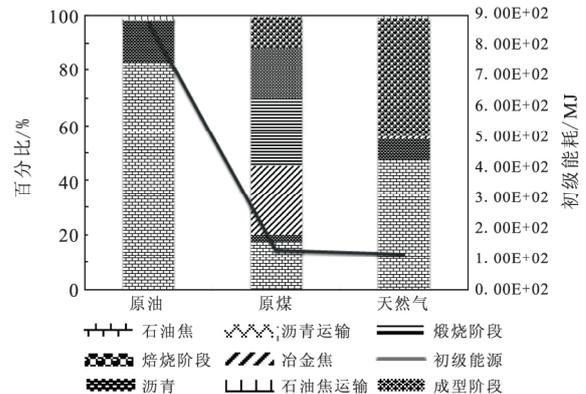


图 4 预焙阳极生命周期各阶段能耗构成

2.3 敏感性检查

敏感性检查重点分析研究中使用的假设、分配方法或模型参数对计算结果是否有显著的影响,来评估结果或结论的可靠性。本研究中以碳排放为研究对象,如图 5 所示,通过改变初级判断的重点物料输入输出参数 20% 来评估 GWP 结果的敏感性,可以计算得到石油焦、电力、煤制沥青、冶金焦和天然气的敏感性分别为 69.50%、12.65%、10.25%、3.61%和 4.79%,水及其它物料的敏感性均较小(小于千分之一)。分析发现 GWP 对原料输入较为敏感,这与石油焦、沥青的生产过程碳排放较多有关,因此改进原料生产或选择减排效果好的上游企

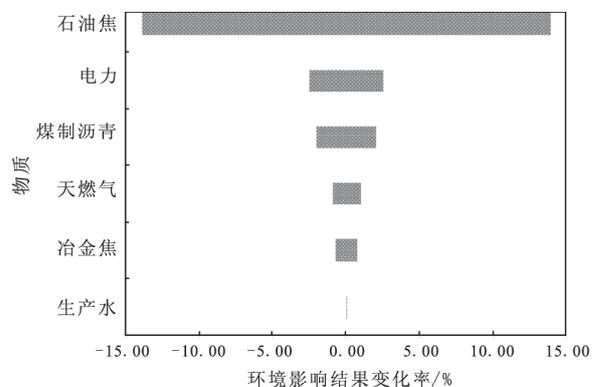


图 5 预焙阳极生命周期 GWP 敏感性分析

业有利于减少炭素生命周期的碳排放; GWP 在生产阶段对能源天然气和次级能源电力的输入更为敏感, 减少电力或者优化设备改变电力结构是减少 CO₂ 排放的直接措施。

研究中根据企业实际生产情况, 余热利用生产的蒸汽在企业内部实现了循环利用, 故采用相应替代产品的环境效益来计算蒸汽的环境负荷, 即蒸汽产品按照替代相同热值的压力蒸汽所获得的环境效益, 来评估其对环境影响的敏感性。通过对蒸汽产品的环境效益进行计算, 发现蒸汽对预焙阳极生命周期的环境负荷影响较为敏感, 尤其是碳排放减少了 23.89%, 其它影响潜值均有降低, 这是由于工业锅炉生产蒸汽主要利用煤燃烧, 排放二氧化碳、硫化物和氮氧化物造成的 GWP、AP 较高的原因。

3 结 语

基于 LCA 方法对电解预焙阳极生产各个阶段的环境负荷进行了探究, 识别影响环境负荷的关键阶段, 并分析了各阶段能耗和碳排放的物质构成。结果显示原料获取阶段占炭素生命周期环境负荷的 50% 以上, 其中石油焦为主要贡献者; 其次为生产阶段, 占到了 25% ~ 40%, 主要来自于煅烧和焙烧阶段。从初级能源消耗构成分析结果来看, 生产 1 t 预焙阳极产品的全生命周期内初级能源消耗为 1.12 GJ, 生产阶段占 10.85%; 预焙阳极初级能源消耗以原油为主, 占总能耗的 78.13%, 其次为原煤和天然气, 贡献比重分别为 11.55% 和 10.32%。碳排放分析显示, 生产 1 t 预焙阳极产品的生命周期内碳排放为 922.91 kg CO₂eq, 其中产品生产阶段占生命周期的 36.45%; 原料获取阶段的石油焦贡献了 48.71%, 生产阶段碳排放主要来自于天然气和电力, 达到了 11.40% 和 21.34%。敏感性分析发现电力、天然气、原料对预焙阳极的影响较为敏感。

原料应考虑碳含量高、硫含量低等方面, 优选合

格的石油焦产品和沥青材料, 制定合理的配料优化方案; 改进煅烧技术提高质量和实收率, 焙烧阶段的优化工艺减少天然气的用量, 减少能源消耗和排放; 在能源结构上进行调整, 有条件选择清洁能源, 同时建议企业研提高自动化控制水平, 平稳运行, 减少电力的投入, 或通过改进设备和工艺来减少原材料等材料的投入量, 均能有效降低预焙阳极生产过程的环境负荷。

参考文献:

- [1] 王凯荣. 电解铝产能“天花板”下铝用炭素如何应对新局面——“2019(第十一届)中国铝用炭素年会暨产业上下游供需对接会”在山东东营召开[J]. 中国有色金属, 2019(19): 52-53.
- [2] 张平. 生命周期评价在炭素企业清洁生产审核中的应用研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2008.
- [3] 刘建刚. 预焙阳极提质增产节能降本研究[J]. 炭素技术, 2016, 35(06): 61-64.
- [4] 李培勋. 电解铝工艺改造的 LCA 研究[C]//中国材料研究学会. 2000 年材料科学与工程新进展(上): 2000 年中国材料研讨会论文集. 2000: 519-524.
- [5] 李桂贤, 邓邦庆, 任剑, 桑杰. 炭素回转窑烟气余热梯级利用技术研究与应用[J]. 轻金属, 2015(7): 36-40.
- [6] 魏薪, 董超芳, 肖葵, 骆鸿, 魏丹, 李晓刚. 材料生命周期评价方法与应用进展[J]. 科技导报, 2012, 30(14): 75-79.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 环境管理 生命周期评价 原则与框架: GB/T 24040-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] ISO. ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (ISO 14040: 2006) [J]. International Standard Iso, 2006.
- [9] ISO. ISO 14044. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044: 2006) [J]. International Standard Iso, 2006.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部. 全国有色金属标准化技术委员会(SAC/TC 243). 铝电解用预焙阳极: YS/T 285-2012 [S]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

(责任编辑 崔丽文)



· 书 讯 ·

2000 年度、2005 ~ 2019 年度《轻金属》杂志合订本(2001 ~ 2004 年每期都有单行本, 价格是全年 240 元, 含邮费), 分别收录了当年刊载的轻金属业界的新技术、新工艺及先进的生产管理方面的论文数百篇。主要内容包括轻金属原料矿山、氧化铝氟化盐、电解铝、铝用炭素、镁、钛、工业硅、轻合金及其加工、轻金属材料等, 还刊载了大量的国际、国内轻金属行业的技术信息。

每年度合订本工本费 260 元/套, 需要订阅的单位或个人请直接与《轻金属》编辑部联系。

电话、传真: 024-23261062

地 址: 辽宁省沈阳市和平区和平北大街 184 号

邮政编码: 110001