

DOI: 10.12164/j.issn.1003-8965.2022.06.012

用后镁碳砖再生工艺的生命周期评价和能耗分析

Life cycle assessment and energy consumption analysis of regeneration process of used magnesia carbon bricks

王靖东¹, 龚先政^{1*}, 周丽玮², 刘宇¹, 辉福美³

(1.北京工业大学 材料与制造学部, 工业大数据应用技术国家工程实验室, 北京 100124;
2.中国建筑材料联合会, 北京 100831; 3.云南濮耐昆钢高温材料有限公司, 云南 昆明 650302)

WANG Jingdong¹, GONG Xianzheng^{1*}, ZHOU Liwei², LIU Yu¹, HUI Fumei³

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, National Engineering Laboratory for Industrial Big-data Application Technology, Beijing 100124; 2. China Building Materials Federation, Beijing 100831; 3. Yunnan Punai Kungang High Temperature Materials Co., Ltd., Kunming 650302)

摘要: 基于生命周期评价(LCA)方法量化分析用后镁碳砖再生工艺过程中资源/能源消耗、污染物排放和环境影响潜力, 其中用后砖再生料的添加比例控制在70%左右, 电熔镁砂和石墨为配料。结果表明, 生产1吨再生镁碳砖中全球变暖潜值最大, 约 $1.45 \times 10^3 \text{kg CO}_2 \text{ eq.}$, 矿产资源耗竭、化石能源耗竭和人类非致癌毒性潜值较大, 分别为 $7.20 \times 10^2 \text{kg Cu eq.}$, $3.49 \times 10^2 \text{kg oil eq.}$ 和 $2.94 \times 10^2 \text{kg 1,4-DCB eq.}$ 。归一化后的总环境影响为3.12, 相对损害最大的影响为人类非致癌毒性, 主要是生产过程中电力需求大造成; 相对损害最大的生产单元过程是配料电熔镁砂和鳞片石墨的生产阶段, 贡献了1.76, 其次是原料加工、原料再生料的生产, 分别贡献1.01和0.12, 坯体制备、热处理和成品加工仅贡献了少量环境影响。

关键词: 用后镁碳砖; 再生利用; 能源消耗; 环境影响评价

Abstract: Based on the life cycle assessment (LCA) method, the resource/energy consumption, pollutant emission and environmental impact potential of used magnesia carbon bricks are quantified. The add proportion of used brick as raw material is controlled at 70%, and fused magnesia and graphite are used as ingredients. The results show that the global warming(GWP) is the largest in the production of 1 ton of recycled magnesia carbon bricks, which is $1.45 \times 10^3 \text{kg CO}_2 \text{ eq.}$, and the potential values of mineral resource depletion (SOP), fossil energy depletion (FFP) and human non-carcinogenic toxicity (HTPnc) are large, which are $7.20 \times 10^2 \text{kg Cu eq.}$, $3.49 \times 10^2 \text{kg oil eq.}$ and $2.94 \times 10^2 \text{kg 1,4-DCB eq.}$, respectively. After normalization, the total environmental impact is 3.12, and the impact of HTPnc with the largest relative damage is mainly caused by the large power demand in the production process. The production unit processes with the greatest relative damage are the production stage of fused magnesia and flake graphite, contributing 1.76, followed by raw material processing and raw material recycling, contributing 1.01 and 0.12, respectively. Blank preparation, heat treatment and finished product processing only contribute a small amount of environmental impact.

Key words: used magnesia carbon bricks; recycling and utilization; energy consumption; environmental impact assessment

中图分类号: X75 文献标志码: A 文章编号: 1003-8965(2022)06-0049-06

0 引言

用后耐火材料是建材、钢铁等高温设备使用后被拆卸的固体废料。据不完全统计, 国内每年产生900万吨以上的用后耐火材料^[1]。这些废料经过拣选和特殊工艺处理, 能够成为价值很高的耐火原料。

镁碳砖作为在高温转炉中使用量较多的耐火制品, 在拆卸的废旧耐火材料中占六成左右^[2]。用后镁碳砖经回收处理得到的再生料可用来生产新的镁碳耐火制

品, 其回收处理工艺如图1, 主要包括除杂、水化处理($\text{Al}_2\text{C}_3 + 12\text{H}_2\text{O} = 4\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{CH}_4 \uparrow$)、干燥破碎、筛分、除铁和均化^[3]。目前, 相关再生料生产再生镁碳砖的研究较多, 结果表明^[4], 以处理后的用后镁碳砖为原料, 不论生产新的镁碳砖还是喷补料, 其耐火指标和性能都符合行业标准要求。随着近年来国内耐火原料优质镁砂价格从2000元/吨上涨到8000元/吨^[5], 以及相关政策和矿山管理条例的颁布, 镁碳质耐火材料的循环生产也从理论试验逐步走向生产线。

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体(51621003); 北京工业大学“城市碳中和”科技创新基金项目(NO.32)

第一作者: 王靖东(1996-), 硕士研究生, 主要从事材料生命周期评价与生态设计研究。WJD_bjut@163.com

通讯作者: 龚先政, 研究员, 教授。

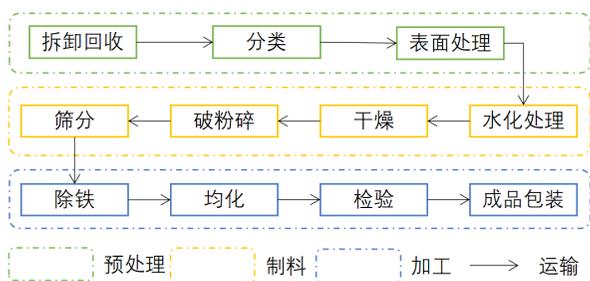


图1 用后耐火材料回收处理工艺

Fig.1 Recycling process of used refractory materials

与镁砂为主要原料的常规工艺相比,用后镁碳砖再生制砖仅增加了用后砖的回收处理,以及在混料工序配方添加比例上存在差别。用后砖的回收处理目前以人工处理为主,处理过程中主要消耗水和电。混料配方因使用场所的不同而添加不同比例的再生原料,同时为保证产品性能和质量,添加电熔镁砂和鳞片石墨为配料,其中鳞片石墨的添加量一般在总含量的5%以下,混料过程中结合剂、添加剂含量为3.5%~4%。表1是几种不同再生砖生产过程中的再生料添加比例。

表1 不同砖再生料添加比例

Tab.1 Recycled material addition ratios of different bricks

再生砖	再生料加入比例 (%)
精炼包镁碳砖	70~85
精炼炉镁碳砖	70~80
精炼包铝镁碳砖	75~93
溅渣护炉再生镁碳砖	80~92
中包耐火料	70~90

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是对一个产品系统生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价,目前已成为指导企业进行清洁生产、开发绿色产品、设计环境协调性材料,以及环境评价标准制定的重要工具^[6]。国内外对耐火材料行业的LCA研究还较少,集中在镁质和刚玉质等耐火材料的能耗和环境影响方面,对耐火材料循环生产的研究集中于用后耐火材料回收处理和再生制砖的性能研究,涉及再生工艺能耗和环境影响评价的几乎没有。利用LCA对用后砖生产工艺中各单元过程能源消耗和环境影响进行分析,评价结果可以为耐火材料再生利用的发展和推广提供参考。

1 研究方法

LCA被广泛应用于产品生产的环境影响评价、物质流和能源消耗分析,一般包括目标与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释4部分内容^[7]。

1.1 目标与范围的确定

基于LCA方法量化用后镁碳砖再生工艺的环境影响潜力,了解用后镁碳砖再生利用能耗分布情况,可为耐火材料循环利用的发展提供参考。

研究选取的功能单位为生产1吨再生镁碳砖,制砖配

方中用后砖再生料添加比例控制在70%左右。选取“从摇篮到大门”的系统边界,即从用后砖的拆卸到直售砖的产出,具体包括:用后镁碳砖的回收制料(原料生产)、电熔镁砂和鳞片石墨的生产(配料生产)、原料与配料的破碎混料和外加剂的生产(原料加工)、成型制坯和养护(坯体制备)、坯体干燥和烘烤(热处理)、拣选和包装(成品加工)。研究中电力、天然气等能源的生产和各级材料的运输核算到相应的单元过程,系统边界如图2所示。

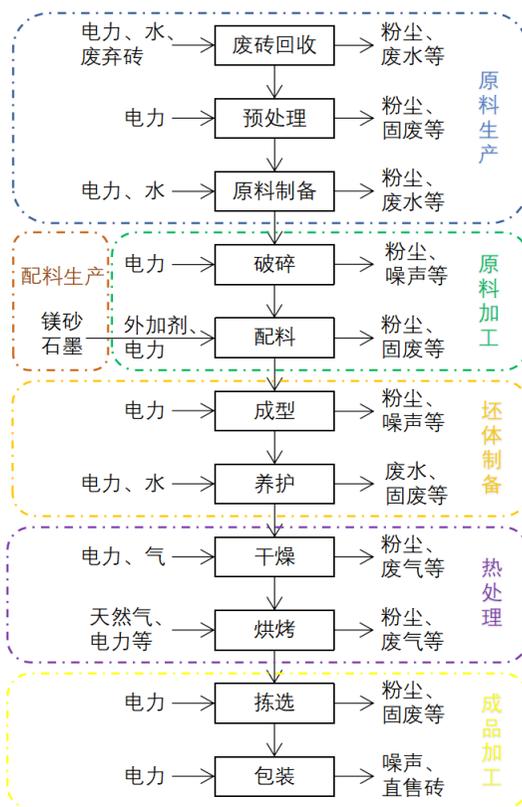


图2 系统边界

Fig.2 System boundary

1.2 清单分析

制砖工艺数据来自国内耐火材料企业实地调研,包括原料生产、原料加工、坯体制备、热处理及成品加工各阶段的物耗、能耗数据。涉及化石能源消耗排放根据企业生产用化石能源的消耗量、低位发热量与排放因子(取自IPCC、EEA与EPA报告)进行估算。配料生产即电熔镁砂和鳞片石墨的生产数据取自中国现行相关单位产品能源消耗限额标准^[8]和国内生命周期评价文献^[9-11]。电力、天然气等能源生产与材料运输背景数据取自北京工业大学Sino-center数据库^[12]。经数据补充和确认,编制生产1吨再生镁碳砖生命周期的输入输出清单,见表2所示。

为保证计算的完整性和一致性,在实际调研的基础上进行了若干假设及说明:

- 1)分析的终端产品为直售定型砖制品,与生产定型制品相比,其余造成的环境影响只占很小一部分,因此数据分析没有考虑生产过程中存在的分配问题;
- 2)用后砖的水化处理过程中涉及CH₄释放,目前相关

表2 再生镁碳砖生命周期清单
Tab.2 Life cycle list of recycled magnesia-carbon brick

环境负荷项目	单位原料	环境负荷值						
		生产	配料生产	原料加工	坯体制备	热处理	成品加工	
资源输入	用后砖	kg	1.17E+03	—	—	—	—	—
	再生原料	kg	—	—	7.00E+02	—	—	—
	电熔镁砂	kg	—	—	2.30E+02	—	—	—
	鳞片石墨	kg	—	—	4.00E+01	—	—	—
	酚醛树脂	kg	—	—	3.50E+01	—	—	—
	铝粉	kg	—	—	5.00E+00	—	—	—
	水	m ³	1.26E+00	—	—	—	—	—
能源输入	原煤	kg	2.47E+01	4.15E+02	6.74E+01	1.31E+01	1.53E+01	1.31E+01
	天然气	m ³	1.65E-01	4.06E+00	1.14E+00	8.72E-02	2.30E+01	8.72E-02
	原油	kg	4.05E-01	1.30E+01	1.13E+00	2.15E-01	1.27E+00	2.15E-01
能耗折算	kgce	6.47E+00	1.63E+02	2.84E+01	3.43E+00	2.81E+01	3.43E+00	
产品	镁碳砖	t	—	—	—	—	—	1.00E+00
空气排放物	CO ₂	kg	4.33E+01	1.00E+03	1.51E+02	2.30E+01	7.93E+01	2.30E+01
	CH ₄	kg	5.76E-04	1.13E-02	1.93E-01	3.05E-04	7.57E-04	3.05E-04
	N ₂ ^O	kg	7.95E-04	1.36E-02	1.50E-03	4.21E-04	5.43E-04	4.21E-04
	CO	kg	6.10E-02	1.06E+00	1.68E+00	3.23E-02	5.98E-02	3.23E-02
	SO ₂	kg	2.94E-01	4.87E+00	9.02E-01	1.56E-01	1.88E-01	1.56E-01
	NOX	kg	2.00E-01	3.45E+00	7.27E-01	1.06E-01	1.77E-01	1.06E-01
	NMVOc	kg	1.60E-03	4.58E-02	1.44E-02	8.46E-04	1.38E-02	8.46E-04
	PM	kg	1.64E-02	3.14E-01	3.10E-02	8.69E-03	1.28E-02	8.69E-03
	As	kg	8.20E-05	1.35E-03	1.55E-04	4.34E-05	5.03E-05	4.34E-05
	Cd	kg	5.22E-07	8.85E-06	9.87E-07	2.76E-07	3.20E-07	2.76E-07
	Cr	kg	6.92E-06	1.16E-04	1.31E-05	3.67E-06	4.25E-06	3.67E-06
	Hg	kg	3.60E-06	6.04E-05	6.81E-06	1.91E-06	2.43E-06	1.91E-06
	Ni	kg	1.03E-05	1.71E-04	1.94E-05	5.44E-06	6.30E-06	5.44E-06
	Pb	kg	7.19E-05	1.20E-03	1.36E-04	3.81E-05	4.41E-05	3.81E-05
	V	kg	1.18E-04	1.94E-03	2.24E-04	6.26E-05	7.24E-05	6.26E-05
Zn	kg	9.85E-05	1.65E-03	1.86E-04	5.22E-05	6.07E-05	5.22E-05	
液体排放物	kg	3.05E-03	6.46E+02	7.48E-01	1.62E-03	1.87E-03	1.62E-03	
固体废弃物	kg	3.05E+01	3.12E+03	5.75E+01	2.74E+00	3.17E+00	2.74E+00	

注:电熔镁砂、鳞片石墨、酚醛树脂和铝粉生产物耗较多,仅列出能耗和排放数据;负荷值中“—”表示该环节未涉及环境负荷项目的输入输出。

工厂尚未安装CH₄排放监测及捕集装置,该部分数据缺失,在本研究中未考虑该部分空气污染物的排放。

1.3 影响评价

选择ReCiPe 2016 midpoint方法体系,利用LCA软件SimaPro9.0进行建模,综合考虑耐火材料环境热点,兼顾清单数据的可获得性、模型特征化和归一化的适用性等多重因素,选取全球变暖(GWP)、臭氧形成-人类健康(HOFP)、颗粒物形成(PMFP)、陆地酸化(AP)、人类非致癌毒性(HTPnc)、矿产资源耗竭(SOP)、化石能源耗竭(FPP)共7项环境影响指标,如表3所示。

2 结果与讨论

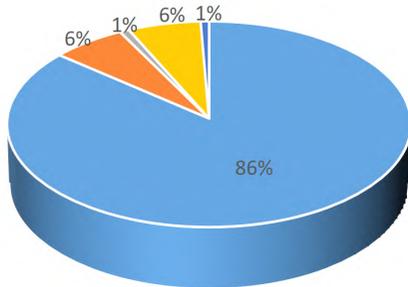
2.1 能源消耗分析

用后砖再生工艺实际上是将原料生产的能耗转移到用后砖的处理上。根据国内主流能耗计算规则^[13]和目前掌握数据进行折算,电熔镁砂为主要原料的常规工艺,生产1吨镁碳砖能耗约为487.59kg标准煤,各单元过程所占综合能耗比例见图3,其中原料生产即耐火原料电熔镁砂和鳞片石墨的生产占总能耗的86%,其次是原料加工和热处理工序,各占总能耗的6%,坯体制备和成品加工分别占总能耗的1%。用后砖再生工艺生产1吨再生镁碳砖的能耗约为235.27kg标准煤,各单元过程所占综合能耗比例见图4,工艺同比能源消耗下降51.75%,其中配料生产占总能耗的69%,镁碳砖作为不烧砖在热处理阶段能耗较低,和原料加工能耗相近,各占总能耗的12%,原料生产、坯体制备和成品加工分别占总能耗的4%、2%和1%。可以看出,对耐火原料生产的改进依然是推动耐火材料节能减排的关键。

表3 再生镁碳砖生命周期评价环境影响类型及单位

Tab.3 Environment impact types and units of recycled magnesia-carbon bricks life cycle assessment

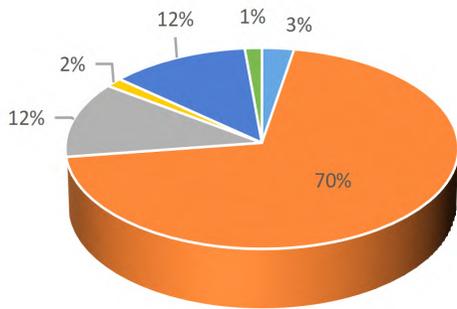
环境影响类型指标	单位	物质
全球变暖潜能值 (Global Warming)	kg CO ₂ eq	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O 等
光化学烟雾对人体损害 (Ozone formation, Human health)	kg NO _x eq	NO _x 等
颗粒物生成 (Fine particulate matter formation depletion)	kg PM2.5 eq	SO _x , PM 等
陆地酸化 (Terrestrial acidification)	kg SO ₂ eq	NO _x , SO ₂ , NH ₃ 等
人体非致癌毒性 (Human noncarcinogenic toxicity)	kg 1,4-DCB eq	重金属类 (As, Cd 等)
矿产资源稀缺性 (Mineral resource scarcity)	kg Cu eq	菱镁矿、石墨等
化石能源消耗 (Fossil resource scarcity)	kg oil eq	原煤, 原煤, 天然气



■ 原料生产 ■ 原料加工 ■ 坯体制备 ■ 热处理 ■ 成品加工

图3 镁碳砖生产能耗分布图

Fig.3 Energy consumption distribution map of magnesia-carbon brick production



■ 原料生产 ■ 配料生产 ■ 原料加工 ■ 坯体制备 ■ 热处理 ■ 成品加工

图4 再生镁碳砖生产能耗分布图

Fig.4 Energy consumption distribution map of recycled magnesia-carbon brick production

2.2 生命周期影响评价和结果分析

2.2.1 LCA特征化结果

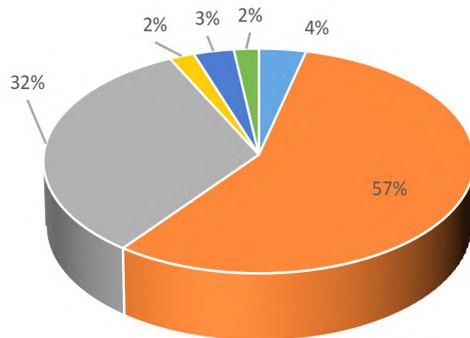
特征化是定量计算LCA环境影响类型的过程, 特征化结果如表4所示。可知, 用后镁碳砖再生工艺生产1吨产品的GWP环境影响为1449.53kg CO₂ eq, 其中配料生产阶段贡献最大, 占总GWP的69.58%, 主要是由于电熔镁砂生产能耗及菱镁矿分解释放; 其次是原料加工阶段, 占比18.74%; 热处理阶段占比因天然气的使用而指标下降。FFP环境影响为347.63kg oil eq, 除配料生产占比依旧

最高外, 原料加工和热处理各占28.85%和7.77%。HOTP、PMFP、AP、HTPnc、SOP指标的潜值分别为5.01kg NO_x eq、3.84kg PM2.5 eq、8.55kg SO₂ eq、294.06kg 1,4-DCB 和730.20kg Cu eq。

2.2.2 LCA归一化结果

归一化能更好地认识研究产品中每个参数的相对大小, 使各项环境影响指标拥有可比性, 以便量化比较研究。归一化结果如表5所示。

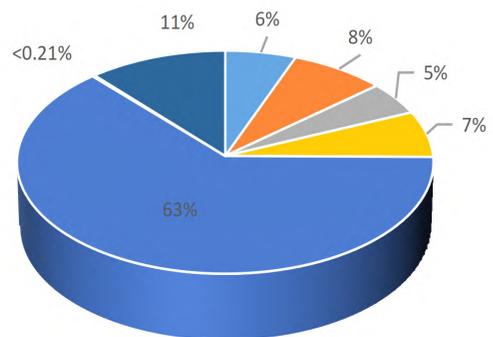
根据表5的相对量化结果可知, 生产1吨再生镁碳砖的综合环境影响总值为3.12, 各单元过程进一步的量化分析见图5和图6。



■ 原料生产 ■ 配料生产 ■ 原料加工 ■ 坯体制备 ■ 热处理 ■ 成品加工

图5 各单元过程的贡献情况

Fig.5 Contribution of each unit process



■ GWP ■ HOFPP ■ PMFP ■ AP ■ HTPnc ■ SOP ■ FFP

图6 各类型环境影响贡献情况

Fig.6 Contribution of various types of environment impacts

表4 生命周期特征化结果

Tab.4 LCA characterization results

影响类型	单位	原料生产	配料生产	原料加工	坯体制备	热处理	成品加工	总计
GWP	kg CO ₂ eq	4.36E+01	1.01E+03	2.72E+02	2.31E+01	7.94E+01	2.31E+01	1.45E+03
HOFp	kg NO _x eq	2.00E-01	3.46E+00	9.55E-01	1.06E-01	1.80E-01	1.06E-01	5.01E+00
PMFP	kg PM _{2.5} eq	1.24E-01	2.11E+00	1.39E+00	6.55E-02	8.67E-02	6.55E-02	3.84E+00
AP	kg SO ₂ eq	3.66E-01	6.12E+00	1.43E+00	1.94E-01	2.52E-01	1.94E-01	8.55E+00
HTPnc	kg 1,4-DCB	1.13E+01	1.53E+02	1.11E+02	6.01E+00	6.56E+00	6.01E+00	2.94E+02
SOP	kg Cu eq	0.00E+00	7.30E+02	4.88E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.30E+02
FFP	kg oil eq	1.09E+01	1.98E+02	1.00E+02	5.79E+00	2.70E+01	5.79E+00	3.48E+02

表5 生命周期归一化结果

Tab.5 LCA normalized results

影响类型	原料生产	配料生产	原料加工	坯体制备	热处理	成品加工	总计
GWP	5.46E-03	1.26E-01	3.40E-02	2.89E-03	9.94E-03	2.89E-03	1.81E-01
HOFp	9.73E-03	1.68E-01	4.64E-02	5.15E-03	8.73E-03	5.15E-03	2.43E-01
PMFP	4.84E-03	8.25E-02	5.44E-02	2.56E-03	3.39E-03	2.56E-03	1.50E-01
AP	8.93E-03	1.49E-01	3.49E-02	4.73E-03	6.14E-03	4.73E-03	2.09E-01
HTPnc	7.62E-02	1.03E+00	7.43E-01	4.03E-02	4.40E-02	4.03E-02	1.97E+00
SOP	0.00E+00	6.40E-03	4.07E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.41E-03
FFP	1.11E-02	2.02E-01	1.02E-01	5.91E-03	2.75E-02	5.91E-03	3.55E-01

由图5和图6可知,研究所涉及的工艺对各类环境影响由大到小为HTPnc、FFP、HOTP、AP、GWP、PMFP、SOP,对总体环境负荷贡献分别为63.28%、11.37%、7.81%、6.69%、5.82%、4.82%和0.21%。在其生产的6个单元过程中,环境综合影响从大到小依次是配料生产、原料加工、原料生产、热处理、成品加工、坯体制备,分别占生命周期总环境影响的56.58%、32.54%、3.73%、3.20%、1.96%和1.96%。

由图7可以看出,再生工艺中HTPnc主要由配料生产和原料加工阶段贡献,HTPnc指标受工艺过程中酸性物质和重金属排放量的影响。两个单元过程中对电力需求较大,我国目前的主要供电方式为火力发电,供电过程中NMVOC、NO_x和重金属排放相对较高,这也是造成整个工艺HTPnc较高的原因。

配料生产阶段实则反映了目前耐火原料电熔镁砂和鳞

片石墨生产的环境影响程度。其中电熔镁砂的生产对各指标的贡献最大,表6是生产1吨电熔镁砂的环境影响(未考虑电极)。电熔镁砂生产的环境影响主要源于电耗和菱镁矿分解,电力供应过程会产生相当一部分的温室气体和酸性气体,也排放不可忽略的PM和重金属元素,电熔镁砂生产过程的间接排放组成主要为温室气体、SO₂和重金属元素等污染物,因此对GWP、AP和HTPnc等指标的贡献较高。通过研究电熔镁砂添加比例降低配方制砖工艺的环境负荷占比依旧较大的结果,可以看出,寻求替代原料仍是最显著的节能减排路径之一。

原料加工过程除了破碎、混料等电耗带来的环境影响外,结合剂(酚醛树脂)和添加剂(铝粉)的生产也贡献一部分环境影响,酚醛树脂作为有机粘结剂在生产过程涉及一系列有机物的排放,铝粉生产也对GWP、SOP和FFP等指标有一定贡献。因此,积极推广使用进步的生产设备如细磨设备中的气流磨、立式磨^[14],研发新型低排无害的结合剂,也是耐火工业节能减排的方向之一。

原料生产是降低镁碳砖生产能耗和环境影响的主要环节,即用后砖处理过程的环境影响小,得到1吨再生料的能源消耗经折算仅为10kg标准煤左右,在节约传统原料和能源的同时减少了耐火原料生产带来的环境损害。用后耐火材料目前有4种使用方式^[15],即直接使用、初级使用、中级使用和高级使用。但是,不少高温行业担心用后砖的直接使用和初级使用会对炉窑的安全性能造成隐

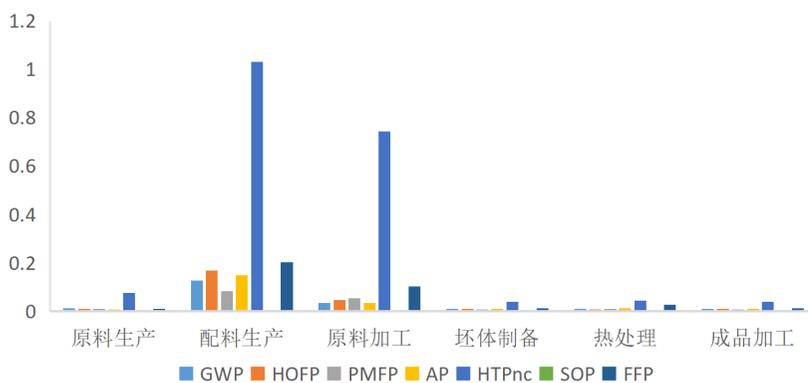


图7 各单元过程归一化结果对比

Fig.7 Comparison of normalized results at each unit process

表6 生产1吨电熔镁砂环境影响评价
Tab.6 The environmental impact of producing 1t electrofused magnesia

类型	GWP	HOFp	PMFP	AP	HTPnc	SOP	FFP
特征化	3.42E+03	1.05E+01	6.51E+00	1.92E+01	5.95E+02	1.90E+03	5.74E+02
归一化	4.28E-01	5.11E-01	2.55E-01	4.69E-01	3.99E+00	1.59E-02	5.86E-01

患,中级使用和高级使用会降低耐火砖的使用寿命从而提高成本,因此,对用后砖再生性能的研究和典型循环案例的推广非常必要。

研究中的镁碳砖为不烧砖,在热处理阶段的环境影响主要源于少量的燃料使用和电耗。加快燃料从重油到焦炉煤气再到天然气的转换、开发新型煅烧技术和节能窑炉等都可以改善目前耐火材料烧成高排放的现状。成型及成品加工阶段各指标贡献基本来自电力使用,可引进全自动化控制系统,提高生产线作业效率,以达到节能减排效果。

3 结论

1)通过对用后镁碳砖再生工艺进行物质和能源输入的统计,进行制砖过程的能耗分析,结果表明,利用用后砖生产1吨直售镁碳砖的综合能源消耗为235.27kg标准煤,相较于常规工艺耗值降低51.75%,在不考虑工艺流程复杂的情况下大幅降低了能源消耗。

2)编制用后镁碳砖生产1吨镁碳砖的生命周期清单并进行环境影响分析,在用后镁碳砖再生工艺物耗、能耗清单编制基础上进行能耗分析、环境影响特征化和归一化分析,结果表明,该工艺生产的全球变暖潜值最大,约为1449.53kg CO₂ eq,工艺过程归一化后总体环境影响为3.12。

3)用后镁碳砖再生工艺的6个生产单元过程的环境负荷从大到小依次是配料生产>原料加工>原料生产>热处理>成品加工=坯体制备。即便在以废砖为原料的工艺中,少量的电熔镁砂的生产依旧贡献相当一部分环境影响。

参考文献

- [1] 宋薇. 废弃镁碳砖制备再生镁碳砖水化技术的研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2012.
- [2] 毛艳丽,景馨,李博. 钢厂用后镁碳耐火材料的再生利用及前景分析[J]. 上海金属,2015,37(03):50-54.
- [3] YB/T 4858-2020,用后耐火材料回收利用技术规范[S].
- [4] 曹雨桐,马北越,付高峰,等. 用后含碳耐火材料的再利用研究现状[J]. 耐火与石灰,2020,45(06):26-29+34.
- [5] 张艳利,程庆先,彭西高. 我国耐火原料的现状与发展[C]//2021年全国耐火原料学术交流会论文集,2021:220-228.
- [6] 陈莎. 生命周期评价与Ⅲ型环境标志认证[M]. 北京:中国质检出版社,中国标准出版社,2014.
- [7] ISO 14040:2006, Supersedes EN ISO 14041:1998, EN ISO 14042:2000, EN ISO 14043:2000, EN ISO 14040-2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework[S].

[8] 耐火材料行业规范条件[N]. 中国建材报,2015-01-09.

[9] 张琪琪. 石墨电极材料的生命周期评价[D]. 北京:北京工业大学,2018.

[10] 房明慧. 典型墙体材料的生命周期评价[D]. 北京:北京工业大学,2013.

[11] Ecoinvent Database[DB/OL]. <http://www.ecoinvent.org/database/database>.

[12] Material Environmental Load Database - Sinocenter[DB/OL]. <http://cnmlca.bjut.edu.cn>.

[13] GB/T 2589-2020,综合能耗计算通则[S].

[14] 刘俊光,魏同. 中国耐火材料工业装备的发展与展望[J]. 耐火材料,2013,47(05):321-328.

[15] 安静. 生命周期视角下的镁质耐火材料产业节能减排分析及建议[C]//2019中国环境科学学会科学技术年会论文集(第一卷),2019:348-351.