

基于生命周期的工业副产石膏制备 胶凝材料碳足迹评价

李 莹¹ 段鹏选² 倪 文¹ 张大江³

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院 北京 100083; 2. 桂林理工大学土木与建筑工程学院 桂林 541004;

3. 北京工业大学材料与制造学部 北京 100124)

摘要: 在“两山”理论、“双碳”目标的新形势下,我国发布了一系列政策及优惠条件鼓励以工业副产石膏为原料制备石膏胶凝材料,包括建筑石膏、 α 型高强石膏、混合相石膏等。迄今为止,国内鲜有关于石膏胶凝材料的碳足迹核算报告。本文基于生命周期评价方法,针对工业副产石膏制备石膏胶凝材料建立碳足迹核算模型,并以磷石膏制备 α 型高强石膏为例进行验证。结果表明, α 型高强石膏产品原料获取、生产、运输三个阶段的碳足迹分别为3.95、288.04、14.31 kg CO₂ eq/t,总量为306.3 kg CO₂ eq/t,其中生产阶段碳排放量最大,是降低能耗、减少碳排放、节约成本的重要环节。本文建立的碳足迹核算模型适用于建筑石膏、 α 型高强石膏、无水石膏、混合相石膏等产品碳足迹核算。

关键词: 工业副产石膏; 石膏胶凝材料; α 型高强石膏; 生命周期评价; 碳足迹

中图分类号: TQ177.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-1625(2023)06-1921-10

DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20230506.001

Carbon Footprint Assessment of Cementitious Materials Prepared from Industrial By-Product Gypsum Based on Life Cycle

LI Ying¹, DUAN Pengxuan², NI Wen¹, ZHANG Dajiang³

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

3. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Under the new situation of “Two Mountains” theory and “Dual Carbon” goals, our country has issued a series of policies and preferential conditions to encourage the preparation of gypsum cementitious materials from industrial by-product gypsum, including calcined gypsum, α high-strength gypsum, mixed phase gypsum, et al. So far, there are few carbon footprint calculation reports on gypsum cementitious materials in China. In this paper, the carbon footprint calculation model of gypsum cementitious materials prepared from industrial by-product gypsum was established based on life cycle assessment method, which was demonstrated through the production of α high-strength gypsum from phosphogypsum. The results show that the carbon footprint in three stages of raw material acquisition, production and transportation of α high-strength gypsum product is 3.95, 288.04 and 14.31 kg CO₂ eq/t, respectively, and the total emission is 306.3 kg CO₂ eq/t. The carbon emission in production stage is the largest, which is an important segment to reduce energy consumption, reduce carbon emission and save costs. The carbon footprint calculation model established in this paper is applicable to the carbon footprint calculation for calcined gypsum, α high-strength gypsum, anhydrite, mixed phase gypsum, et al.

Key words: industrial by-product gypsum; gypsum cementitious material; α high-strength gypsum; life cycle assessment; carbon footprint

收稿日期: 2023-03-06; 修订日期: 2023-04-13

基金项目: 广西科技计划(桂科 AB22035064)

作者简介: 李 莹(1984—)女,博士研究生。主要从事工业副产石膏综合利用技术的研究。E-mail: liying_lry@163.com

通信作者: 段鹏选,教授级高级工程师。E-mail: duanpengxuan@126.com

0 引言

工业副产石膏是工业生产过程中排出的以二水硫酸钙为主要成分的副产物,由于其杂质成分复杂,资源化利用难度大,长期堆存易造成环境污染,已成为制约相关行业可持续性发展的重要因素^[1-2]。石膏胶凝材料是真正意义上的绿色、低碳材料,其碳排放量显著低于水泥、石灰等胶凝材料。以工业副产石膏为原料制备石膏胶凝材料既是“绿水青山”对环境治理的要求,也是建材行业应对“碳达峰、碳中和”的需要,同时是大规模利用工业副产石膏的一条重要途径。目前,国内鲜有关于石膏胶凝材料的碳足迹核算报告。

碳足迹(carbon footprint)是指某项活动过程或某个产品的生命周期内产生的温室气体排放量^[3-4],其概念源于Rees等^[5]提出的“生态足迹”(ecological footprint)。《PAS: 2050 商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》^[6](Publicly Available Specification 2050, PAS: 2050)是目前应用于产品碳足迹核算的主要国际标准之一,其中规定了使用生命周期评价(life cycle assessment, LCA)技术来评价产品的温室气体排放。生命周期评价是对一个产品系统输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价^[7-8],核算阶段可包括原材料生产、制造、运输、使用、废弃全生命周期,即“从摇篮到坟墓”,也可包括原材料生产、制造、运输三个阶段,即“从摇篮到大门”^[9],LCA技术在国际上已成为评估产品碳排放的主导方法^[10]。

在国际环保压力的新形势下,产品的碳足迹认证是未来发展趋势,各个行业均展开了相关产品碳足迹的核算研究。王珊珊等^[11]分别应用PAS: 2050和GHG Protocol国际标准,采用LCA技术对胶合板两种生命周期阶段的碳足迹进行核算和分析;徐西蒙^[10]、阴世超^[12]、赵秀秀^[13]等基于生命周期评价建立了建筑物碳足迹的核算模型,以实际住宅为例计算分析了全生命周期的碳排放数据,并提出相应的减碳途径;Zhang等^[14]基于LCA建立了CO₂核算框架,评价水泥生产过程的环境影响,通过替代原料生产低碳水泥;光文涛等^[15]采用生命周期法核算了高贝利特硫铝酸盐水泥碳足迹,认为采用固废制备高贝利特硫铝酸盐水泥为水泥生产碳减排提供了新思路;白文琦等^[16]应用排放系数法对通用硅酸盐水泥生产阶段的碳足迹进行核算,得到不同品种水泥生产阶段的碳排放数据;徐振华等^[17]核算了磷石膏制硫酸联产水泥过程中的碳排放,结果表明该技术可实现水泥生产的碳减排,同时节约硫磺资源,资源化利用磷石膏。

目前,国内实施了标准《建筑石膏单位产品能源消耗限额》(GB 33654—2017),对建筑石膏产品的能耗进行了限制^[18],还有少部分研究者进行了纸面石膏板的生命周期评价^[19]、磷石膏道路基层材料环境影响研究^[20]、磷石膏基生态水泥的生命周期评价^[21]等工作,而针对不同类型石膏胶凝材料碳足迹进行核算和评价的较少,尤其是 α 型高强石膏产品。为了进一步推动工业副产石膏高附加值利用、促进石膏行业的发展,本文采用简化的“生命周期评价方法”,参照PAS: 2050标准,建立以工业副产石膏为原料制备胶凝材料碳足迹核算模型,包括建筑石膏、 α 型高强石膏、II型无水石膏、混合相石膏等产品,天然石膏制备的胶凝材料的碳足迹核算也可参考该模型进行。最后,本文以磷石膏制备 α 型高强石膏为例分析了该产品“从摇篮到大门”各生命周期阶段的碳足迹分布特征。

1 核算模型

1.1 目标与范围定义

1) 研究目标及方法

本文选择以工业副产石膏为原料制备胶凝材料作为研究对象,参考PAS: 2050标准,对其生命周期过程中排放的温室气体(即碳足迹)进行分析,建立核算模型,并以贵州某公司的磷石膏制备 α 型高强石膏生产为例,通过核算模型计算各阶段的碳足迹,找出碳排放较大的阶段并探索产生原因,为后期针对工业副产石膏资源化利用过程的碳减排提供参考,同时为石膏胶凝材料LCA数据分析提出计算方法及基础数据。

2) 功能单位

进行碳足迹核算首先需要确定功能单位,一般采用产品的销售单位。本文以1 t石膏胶凝材料为功能单位,量化工业副产石膏胶凝材料生命周期阶段的碳足迹。

3) 系统边界

由于石膏产品应用种类较多(包括抹灰石膏、石膏腻子、石膏基自流平砂浆、防火门芯板、石膏隔墙板

等) 循环利用和废弃处置的复杂性和不确定性, 并且数据有限, 本文仅核算分析石膏胶凝材料“从摇篮到大门”的碳足迹。图1为石膏胶凝材料碳足迹核算系统边界, 包括3个部分: 原材料获取阶段的碳足迹、生产阶段的碳足迹和运输阶段的碳足迹。

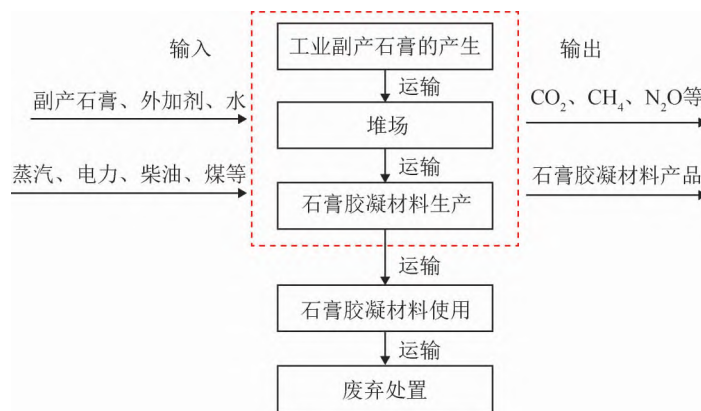


图1 石膏胶凝材料生命周期系统边界(虚线为系统边界)

Fig. 1 Life cycle system boundary of gypsum cementitious materials (dotted line is system boundary)

4) 数据收集及计算依据

①数据收集

收集图1系统边界内石膏胶凝材料的原料获取、生产、运输阶段的定性资料和定量数据。通过监测、计算或估算而得到的数据^[22]均可用于量化核算产品生命周期阶段的输入和输出。数据类型主要包括活动数据和排放因子等^[23]。活动数据包括石膏胶凝材料生产过程中所用的原材料、能源消耗等; 电力和热力的排放因子可参考国家或行业发布的数值。

②取舍原则

石膏胶凝材料碳足迹评价应包括所界定的系统边界内可能对产品碳足迹有实质性贡献的所有温室气体排放与清除, 计算过程中忽略的单项碳排放对系统边界内的碳足迹贡献不得超过1%^[24], 忽略的所有碳排放之和不得超过系统边界内总排放量的5%^[24-25]。

③计算依据

石膏胶凝材料产品生命周期阶段的碳足迹核算依据包括石膏胶凝材料实际生产统计数据、相关原材料企业调研数据、文献资料数据以及国家或行业发布的数据。

1.2 碳足迹核算公式

基于2006 IPCC国家温室气体清单指南^[26]提供的数量模型, 各阶段碳足迹通常以活动数据乘以相应的排放因子来表述^[27]。石膏胶凝材料产品生命周期碳足迹分析过程在系统边界的界定范围进行, 根据各生命周期阶段中使用的材料及能源消耗、温室气体的直接排放等因素, 对各阶段碳足迹进行分解量化, 给出碳足迹的计算公式。

1) 原材料获取

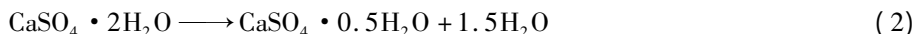
原材料获取碳足迹核算过程包括石膏胶凝材料生产中使用的所有材料, 包括工业副产石膏(也可使用天然石膏)、自来水及外加剂等, 该阶段的碳足迹计算公式见式(1)。

$$G_M = \sum_i \frac{M_i \times \alpha_i}{\eta_i} \quad (1)$$

式中: G_M 为原材料获取阶段的温室气体排放量, $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$; M_i 为第 i 类材料实物量, kg ; α_i 为第 i 类材料的排放因子, $\text{kg CO}_2 \text{ eq/kg}$; η_i 为第 i 类材料的利用率, ≤ 1 。

2) 生产阶段

石膏胶凝材料生产过程是二水石膏的脱水反应过程, 生产过程中仅产生水蒸气, 不会产生其他温室气体。反应式如式(2)所示。



因此,生产阶段的碳足迹主要源于能源消耗,该阶段碳足迹由式(3)进行计算。

$$G_p = \sum_i E_i \times \beta_i + \sum_k O_k \times P_k \quad (3)$$

式中: G_p 为生产阶段的温室气体排放量, $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$; E_i 为第 i 类能源消耗量, kg ; β_i 为第 i 类能源排放因子, $\text{kg CO}_2 \text{ eq/kg}$ 或 $\text{kW} \cdot \text{h}$; O_k 为第 k 类温室气体直接排放量, kg ; P_k 为第 k 类温室气体全球增温潜势。

3) 运输阶段

运输阶段碳足迹主要来自运输过程中的能源消耗和温室气体直接排放,影响因素主要包括运输工具类型的选择、运输距离等。本阶段包括工业副产石膏及外加剂等原材料的运输,由式(4)进行计算。

$$G_T = \sum_i M_i \times D_i \times \gamma_i + \sum_k O_k \times P_k \quad (4)$$

式中: G_T 为运输阶段的温室气体排放量, $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$; M_i 为第 i 类运输的实物量, kg ; D_i 为第 i 类运输距离, km ; γ_i 为交通运输工具的碳排放因子, $\text{kg CO}_2 / (\text{t} \cdot \text{km})$; O_k 为第 k 类温室气体直接排放量, kg ; P_k 为第 k 类温室气体全球增温潜势。

4) 石膏胶凝材料“从摇篮到大门”碳足迹核算

石膏胶凝材料产品生命周期的碳足迹 G 计算公式见式(5)。

$$G = G_M + G_p + G_T \quad (5)$$

式中: G 为石膏胶凝材料产品“从摇篮到大门”的温室气体排放量, $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$ 。

2 结果与讨论

本文以蒸压微晶法制备磷石膏基 α 型高强石膏(α high-strength gypsum, α -HG)为例,演示石膏胶凝材料“从摇篮到大门”碳足迹核算模型的计算过程,分析该高强石膏产品各阶段的碳足迹分布特征,探索产品节能减排的可能途径。

2.1 工艺描述

蒸压微晶法工艺以工业副产石膏为原料,添加适量的外加剂溶液,混合均匀后在转晶器中进行反应,干燥后包装入库。该工艺具有物料传热快、反应周期短、生产效率高、产物性能好、质量稳定且无需废水处理等优点,生产环境绿色清洁,已成功应用于脱硫石膏、柠檬酸石膏、磷石膏等工业副产石膏制备 α 型高强石膏的生产,具体生产流程见图2。

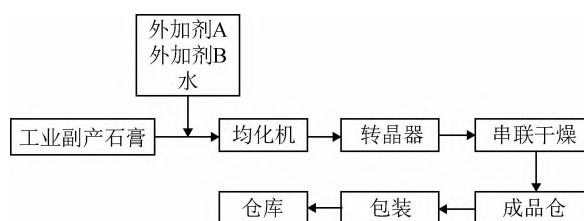


图2 蒸压微晶法工艺

Fig. 2 Autoclaved microcrystalline method process

2.2 清单分析

根据贵州某公司磷石膏制备 α 型高强石膏产品的实际生产过程统计数据,建立产品“从摇篮到大门”生命周期清单,包括工业副产石膏等原材料消耗、蒸汽及电力耗量、运输距离,具体数据见表1。

表1 1 t α 型高强石膏“从摇篮到大门”生命周期清单的活动数据及数据源

Table 1 Activity data and data source of "cradle to gate" life cycle list of 1 t α -HG

Life cycle stage	Material	Unit	Activity data	Data source
Raw material acquisition	Phosphogypsum	kg/t	1 400.0	Production line
	Admixture A	kg/t	2.0	Production line
	Admixture B	kg/t	5.5	Production line
	Running water	kg/t	60.0	Production line
Production process	Steam consumption	kg/t	800.0	Production line
	Power consumption	$\text{kW} \cdot \text{h/t}$	75.0	Production line
Transportation	Phosphogypsum	km/t	50.0	Production line
	Admixture A	km/t	500.0	Production line
	Admixture B	km/t	500.0	Production line

注:原材料消耗、生产能耗、运输距离均由企业提供。

2.3 原材料获取核算

工业副产石膏是上游工业过程产生的副产物,其产生及运输到堆场部分的碳足迹已分配到上游产品中,因此其碳排放因子取0^[28]。根据数据收集原则,估算数据也可用于核算过程,因此外加剂A(有机酸)、B(硫酸盐)碳排放因子可根据企业生产能耗数据估算得出。生产过程对称量精确度要求较高,且收尘可回收利用,原材料利用率较高,因此材料利用率取1。通过式(1)计算原材料获取阶段的碳足迹,结果见表2。

表2 生产1 t α 型高强石膏原材料获取的碳足迹核算

Table 2 Carbon footprint calculation of raw material acquisition for production of 1 t α -HG

Raw material	Carbon emission factor/(kg CO ₂ eq/kg)	Activity data/kg	Calculation results/(kg CO ₂ eq · t ⁻¹)
Phosphogypsum	0	1 400.0	0
Admixture A	1.73 ^a	2.0	3.46
Admixture B	0.08 ^b	5.5	0.44
Running water	0.000 91 ^[10]	60.0	0.05
Total			3.95

注: ^a 根据山东某企业生产1 t有机酸耗标煤0.625 t,按照标煤排放因子2.77 t CO₂ eq/t^[29],计算得出外加剂A排放因子为0.625 × 2.77 = 1.73 kg CO₂ eq/kg; ^b 根据昆明市某企业生产1 t硫酸盐耗标煤0.028 8 t,计算得出外加剂B排放因子为0.028 8 × 2.77 = 0.08 kg CO₂ eq/kg。

由计算结果可以看出,原材料获取阶段碳足迹为3.95 kg CO₂ eq/t。其中外加剂A、B的碳足迹之和为3.90 kg CO₂ eq/t,占系统边界内总排放量的1.3%;自来水消耗产生的碳足迹为0.05 kg CO₂ eq/t,贡献较小,占系统边界内总排放量的0.02%,根据取舍原则,可忽略该部分的碳足迹计算。

2.4 生产阶段核算

α 型高强石膏生产能耗的活动数据来自企业的实际生产记录,主要是蒸汽及电力消耗,不会产生其他温室气体排放,仅需计算式(3)中的第一部分。根据表2中蒸汽和电力耗量,通过式(3)计算生产阶段的碳足迹,结果见表3。

表3 生产1 t高强石膏生产阶段碳足迹核算

Table 3 Carbon footprint calculation of production stage for 1 t α -HG

Energy resource	Carbon emission factor	Unit	Activity data	Unit	Calculation result/(kg CO ₂ eq · t ⁻¹)
Steam consumption	0.305 6 ^c	kg CO ₂ eq/kg	800	kg/t	244.46
Power consumption	0.581 0 ^d	kg CO ₂ eq/(kW · h)	75	kW · h/t	43.58
Total					288.04

注: ^c 实际生产使用1.0 MPa饱和蒸汽(温度为180 ℃左右,热焓值为277 8 kJ/kg^[30])根据热力排放因子0.11 t CO₂/GJ^[25]计算得到生产所用蒸汽的排放因子为277 8 × 0.11/1 000 = 0.305 6 kg CO₂ eq/kg; ^d 电力的排放因子采用国家发展和改革委员会公布的数据0.581 0 t CO₂ eq/(MW · h)^[31]。

由表中数据可知, α 型高强石膏生产过程的碳足迹核算结果为288.04 kg CO₂ eq/t,其中贡献最大的环节为消耗蒸汽进行升温、脱水反应及干燥,占该阶段碳足迹的84.87%。工业副产石膏的特点之一是含有大量的附着水,本工艺生产原料附着水含量18%左右,此部分水在升温 and 干燥过程中需消耗较多能量,从而提高了 α 型高强石膏产品的生产能耗。

2.5 运输阶段核算

此阶段产生的碳足迹主要源于运输工具的选择及能源消耗产生的温室气体排放,主要包括工业副产石膏、外加剂运输至高强石膏生产厂等过程。由于原材料一般均就近获取,多采用公路运输,燃料为柴油,碳排放因子为0.192 kg CO₂/(t · km)^[32-33]。柴油消耗过程除了CO₂之外,还会产生CH₄、N₂O等温室气体^[34-35],根据文献[35]中卡车污染物的排放系数及柴油的碳排放因子,换算出运输过程中1 t产品运输1 km消耗柴油产生的CH₄、N₂O排放量,见表4。通过式(4)计算出产品该阶段的碳足迹,结果见表5。

由结果可以看出,该阶段的碳足迹为14.31 kg CO₂ eq/t。其中外加剂运输的碳排放为0.73 kg CO₂ eq/t,占系统边界内总排放量(见表6)的0.2%;CH₄和N₂O排放总量为0.15 kg CO₂ eq/t,占系统边界内总排放量的0.05%,根据取舍原则,可忽略这两部分的碳足迹计算。

表4 公路运输中其他温室气体排放

Table 4 Other greenhouse gas emission in road transport

Greenhouse gas	Emission coefficient	Unit	Global warming potential ^[25]
CH ₄	$4.63 \times 10^{-6} e$	kg/(t·km)	28
N ₂ O	$6.94 \times 10^{-6} e$	kg/(t·km)	265

注:°由文献[35]可知,消耗柴油产生1 GJ能量排放760.26 g CO₂、1.833 g CH₄、2.749 g N₂O。根据柴油的碳排放因子 $0.192 \text{ kg CO}_2/(\text{t} \cdot \text{km})$,计算出CH₄的排放系数为 $0.192 \times 1.833/760.26 = 4.63 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$; N₂O的排放系数为 $0.192 \times 2.749/760.26 = 6.94 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。

表5 生产1 t α 高强石膏运输阶段碳足迹核算

Table 5 Carbon footprint calculation of transportation stage for production of 1 t α-HG

Transport	Weight/t	Distance/km	Emission of CO ₂ /kg	Emission of CH ₄ /kg	Emission of N ₂ O/kg	Result/(kg CO ₂ eq·t ⁻¹)
By-product gypsum	1.40	50	13.44	9.07×10^{-3}	0.13	13.58
Crystal modifier A	0.002	500	0.19	1.29×10^{-4}	1.84×10^{-3}	0.19
Crystal modifier B	0.005 5	500	0.53	3.56×10^{-4}	5.06×10^{-3}	0.54
Total			14.16	9.56×10^{-3}	0.14	14.31

综上,忽略部分的碳足迹为自来水获取(0.05 kg CO₂ eq/t)、外加剂运输(0.73 kg CO₂ eq/t)以及运输过程中其他温室气体(CH₄和N₂O)的排放总量(0.15 kg CO₂ eq/t),共占系统边界内总排放量的0.30%,小于5%,符合取舍原则。因此为了简化计算,在磷石膏制备高强石膏的碳足迹核算中可忽略运输阶段柴油消耗产生的其他温室气体排放,仅计算CO₂的排放量,以及忽略转晶剂运输和生产用水所产生的碳足迹。

2.6 α 型高强石膏“从摇篮到大门”碳足迹核算结果

根据式(5)计算本工艺过程制备的高强石膏生命周期碳足迹,计算结果见表6。由表6可看出,α型高强石膏“从摇篮到大门”的碳足迹核算结果为306.3 kg CO₂ eq/t,在生产阶段贡献最大,占比94.04%,是探求节能减排的最可能方向。

表6 基于生命周期评价的α型高强石膏碳足迹核算

Table 6 Carbon footprint calculation of 1 t α-HG based on LCA

Life cycle stage	Emission/(kg CO ₂ eq·t ⁻¹)	Proportion/%
Raw material acquisition	3.95	1.29
Production process	288.04	94.04
Transportation	14.31	4.67
Total	306.30	100.00

2.7 生产阶段热耗分析

本工艺生产所用磷石膏(dihydrate, DH)纯度一般为90%左右,杂质中SiO₂占比最大,因此假设杂质为惰性SiO₂,反应物料附着水含量18%(质量分数)左右,转晶温度为130℃,假定初始状态为25℃,成品半水石膏(hemihydrate, HH)附着水含量为0.5%(质量分数),进行物料衡算和能量衡算的简化计算。热力学相关数据来自文献[30],见表7,生产过程热力学框架图见图3。

表7 热力学数据

Table 7 Thermodynamic data

Item	Value/(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Item	Value/(kJ·kg ⁻¹)
Specific heat capacity of DH	0.61	Enthalpy of evaporation of H ₂ O at 100℃	2 257
Specific heat capacity of SiO ₂	0.82	Enthalpy of saturated steam at 180℃	2 778
Specific heat capacity of H ₂ O	4.20	Enthalpy of water at 180℃	763

1) 升温阶段热耗计算(ΔQ1)

由于在饱和蒸汽环境下,130℃时蒸发水较少,大多数仍为液态,为简化计算,忽略此部分水蒸发所需热量。此过程初始状态是25℃,末状态是130℃,通过热力学计算得到升温阶段的热耗ΔQ1为188.81 MJ。

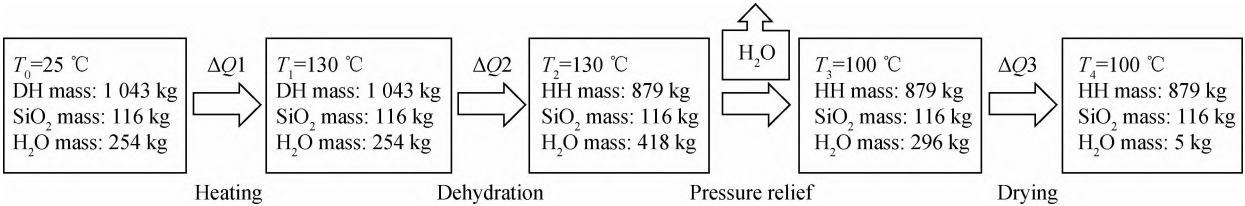


图 3 磷石膏升温、脱水、卸压、干燥过程热力学框图

Fig. 3 Thermodynamic process of heating , dehydration , pressure relief and drying of phosphogypsum

2) 反应阶段热耗计算($\Delta Q2$)

二水石膏脱去 1.5 个结晶水生成半水石膏的反应热参考文献 [36] 数据 95.18 ~ 96.14 kJ/kg (DH) 和德国可耐福公司 [36] 数据 111.6 kJ/kg (DH) ,取 120 kJ/kg (DH) ,以此计算反应阶段的热耗 $\Delta Q2$ 为 125.16 MJ。

3) 干燥阶段热耗计算($\Delta Q3$)

卸压过程中由于釜内外的温度、压力差较大 ,水分形成强烈的扩散运动 ,在此过程中会自发散失较多水分 ,根据实际生产数据(见表 8) 计算可知 ,散失水分的比例约为脱水后物料总水量的 29% ,以此计算得到图 3 中的卸压后物料的含水量为 296 kg。

表 8 卸压阶段物料水分散失生产数据

Table 8 Production data of water loss during process of pressure relief

M_0 /t	C_1 /%	P /%	C_2 /%	M_T /kg	M_S /kg	S /%
10	14.00	95.0	22.40	2 682	570	21.2
10	13.68	95.0	22.18	2 655	567	21.4
10	24.10	90.0	24.96	3 482	1 314	37.7
10	23.94	93.0	27.90	3 504	991	28.3
13	19.38	88.0	23.62	3 967	1 173	29.6
13	18.87	89.0	22.51	3 926	1 291	32.9
13	19.85	90.0	23.63	4 052	1 284	31.7
Average						29.0

注: M_0 为入釜物料质量; C_1 为入釜物料含水率; P 为原料石膏品位; C_2 为卸压后物料含水率; M_T 为脱水后理论总含水量; M_S 为散失水量; S 为散失水量占理论总水量的比例。

此阶段的热耗主要用于物料中的水分蒸发 ,通过热力学计算得到干燥阶段热耗 $\Delta Q3$ 为 656.79 MJ。

4) 蒸汽耗量理论计算

生产阶段的总热耗约为 970 MJ ,由此计算得出附着水含量为 18% 的原料生产过程理论蒸汽需求量约为 481 kg ,而实际生产 1 t 产品蒸汽耗量约 800 kg ,设备热利用率约 60.0% ,此外本工艺生产过程中蒸汽冷凝后的热水及干燥的热风均未被有效利用 ,造成部分能源浪费 ,能耗偏高。通过设备升级提高热利用率 ,同时回收尾气 and 冷凝热水对入釜前物料进行预加热 ,减少生产过程蒸汽耗量。

由三个阶段的热耗分配可以看出 ,蒸汽消耗大部分用于水分的升温及干燥过程。 α 型高强石膏生产能耗偏高的另一方面原因是磷石膏原料附着水含量较高 ,加入外加剂溶液后 ,入釜物料附着水含量常大于 18% 。若采用附着水含量为 12% 的物料进行生产 ,按上述过程计算 ,理论蒸汽需求量为 384 kg ,理论能耗降低约 20% 。通过陈化、晾晒石膏原料等方式可以降低附着水含量 ,减少升温和干燥过程中的水分耗能 ,实现节能。

2.8 产品应用实例分析

α 型高强石膏强度、耐水性能等均优于建筑石膏粉 ,可替代部分水泥制备室内装饰装修材料 ,如石膏隔墙板、石膏自流平砂浆、石膏黏结砂浆、GRG 装饰制品等 ,具有质量轻、强度高、保温隔热性能好、声学反射性能优、防火、绿色环保等特点。本文以石膏基自流平砂浆为例 ,对比水泥基自流平砂浆 ,分析产品的低碳效益。

所采用的磷石膏基 α 型高强石膏达到建材行业标准《 α 型高强石膏》(JC/T 2038—2010) [37] 中 $\alpha 50$ 强度

等级,采用表 9 的配方制备室内用石膏基自流平砂浆,性能满足《石膏基自流平砂浆》(JC/T 1023—2021)中 G25 等级以上,实际烘干抗压强度可达 30 MPa 以上。水泥基自流平砂浆配方根据文献[38-40]中数据整理得到(见表 9),其性能达到《地面用水泥基自流平砂浆》(JC/T 985—2017)^[41]中 C30 等级以上。由此可见,该石膏基自流平砂浆产品可替代表 9 中水泥基自流平砂浆产品用作室内自流平材料。

表 9 自流平砂浆配方及性能

Table 9 Formula and performance of self-leveling mortar

/kg

Type	Cementitious material	Other powder	Sand	Water reducer	Cellulose ether	Emulsion powder	Defoamer	Retarder
Gypsum based	540	10	450	0.9	0.4	3.0	0.5	0.05
Cement based	350	240	390	3.0	0.4	15.0	0.5	0.17

由于混合材和熟料的掺加比例不同,水泥的碳排放范围一般为 590 ~ 930 kg CO₂ eq/t^[16,42],根据文献[43],生产 1 t 普通硅酸盐水泥“从摇篮到大门”的碳足迹取值 870 kg CO₂ eq/t。由表 9 中数据可看出,水泥基自流平砂浆中外加剂、其他粉料用量均高于石膏基自流平砂浆,不考虑其他粉料、砂以及外加剂的碳排放,采用高强石膏替代水泥生产 1 t 自流平砂浆产品的二氧化碳减排量约为 139 kg。

由此可见,若采用 1 000 万吨 α 型高强石膏替代 640 万吨水泥制作 1 852 万吨室内自流平材料,则至少可减少 257 万吨的 CO₂ 排放,同时可资源化利用 1 400 万吨工业副产石膏,节约土地资源约 170 万平方米。因此,采用工业副产石膏制备石膏胶凝材料,具有重要的环境意义和社会意义。

3 结 论

1) 基于生命周期评价方法,参照 PAS: 2050 标准,建立了以工业副产石膏为原料制备的石膏胶凝材料产品碳足迹核算模型,为石膏行业碳减排、参与碳交易提供依据。

2) 应用所建立的碳足迹核算模型,以磷石膏制备 α 型高强石膏为例进行计算,得出原材料获取、生产、运输三个阶段的碳排放分别为 3.95、288.04、14.31 kg CO₂ eq/t,其中生产阶段排放最大,具有较大的碳减排潜力。

3) 工业副产石膏原料中附着水含量对生产过程的能耗影响较大,通过降低工业副产石膏附着水含量,可以显著降低能耗和碳排放量;通过回收利用余热、提高设备热利用率也可以降低能耗。

4) 采用磷石膏制备的 α 型高强石膏替代水泥制备自流平砂浆用于室内地面,可以显著降低单位产品的碳排放量;1 t 石膏基自流平砂浆代替水泥基自流平砂浆,可减少排放 139 kg CO₂,具有显著的碳减排效益。

参 考 文 献

- [1] 纪罗军,赵红林. 从循环经济角度看工业副产石膏的资源化利用[J]. 硫酸工业,2021(9): 1-8.
JI L J, ZHAO H L. Resource utilization of industrial by-product gypsum from the perspective of circular economy[J]. Sulphuric Acid Industry, 2021(9): 1-8 (in Chinese).
- [2] 陈家伟,张仁亮. 工业副产石膏资源化利用生态环境技术发展报告[J]. 广州化工,2020,48(24): 1-3.
CHEN J W, ZHANG R L. Report on ecological environment technology development of industrial by-product gypsum resource utilization[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(24): 1-3 (in Chinese).
- [3] WIEDMANN T, MINX J. A definition of 'carbon footprint' ISA UK research report 0701 [R]. Hauppauge NY, USA: Nova Science Publishers, 2008: 1-11.
- [4] 耿涌,董会娟,郝凤明,等. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(10): 6-12.
GENG Y, DONG H J, XI F M, et al. A review of the research on carbon footprint responding to climate change[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(10): 6-12 (in Chinese).
- [5] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective[J]. Ecological Economics, 1997, 20(1): 3-24.
- [6] 任鲲,周红军. 生物液体燃料碳足迹评价方法综述[C]. 中国石化石化节能减排技术交流会,2015.
REN K, ZHOU H J. A review of carbon footprint assessment methods for bio-liquid fuel[C]. China Petroleum and Petrochemical Energy Conservation and Emission Reduction Technology Exchange Conference, 2015 (in Chinese).
- [7] 张莉. 基于 LCA 的电力行业 CO₂ 排放预测及燃煤电厂实例分析[D]. 杭州: 浙江大学,2017: 17.

- ZHANG L. Prediction of CO₂ emission in power industry and a case study of coal fired power plant based on LCA [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 17 (in Chinese).
- [8] International Organization for Standardization. Environmental management-life cycle assessment-principles and frameworks: ISO 14040—2006 [S]. Switzerland: ISO, 2006.
- [9] 童庆蒙, 沈雪, 张露, 等. 基于生命周期评价法的碳足迹核算体系: 国际标准与实践 [J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018(1): 46-57+158.
- TONG Q M, SHEN X, ZHANG L, et al. Standard system of accounting footprint based on life cycle assessment method: international standards and practices [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2018(1): 46-57+158 (in Chinese).
- [10] 徐西蒙. 基于生命周期理论的建筑碳足迹分析 [J]. 环境科学导刊, 2021, 40(2): 28-34.
- XU X M. Analysis of building carbon footprint based on the life cycle assessment theory [J]. Environmental Science Survey, 2021, 40(2): 28-34 (in Chinese).
- [11] 王珊珊, 杨红强. 基于国际碳足迹标准的中国人造板产业碳减排路径研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(4): 27-37.
- WANG S S, YANG H Q. Study on carbon emission reduction path of China's wood-based panel industry based on international carbon footprint standards [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(4): 27-37 (in Chinese).
- [12] 阴世超. 建筑全生命周期碳排放核算分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 47-70.
- YIN S C. Study of life-cycle carbon emission in buildings [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 47-70 (in Chinese).
- [13] 赵秀秀. 绿色建筑全生命周期碳排放计算与减碳效益评价 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 41-50.
- ZHAO X X. The calculation of green building lifecycle carbon emission and the evaluation of carbon reduction benefit [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 41-50 (in Chinese).
- [14] ZHANG J, LIU G, CHEN B, et al. Analysis of CO₂ emission for the cement manufacturing with economic input-output life cycle assessment [J]. Natural Hazards, 2015: 1-44.
- [15] 光文涛, 隋晓萌, 王鹏刚, 等. 采用固废制备的高贝利特硫铝酸盐水泥碳足迹核算与分析 [J]. 青岛理工大学学报, 2022, 43(4): 34-40.
- GUANG W T, SUI X M, WANG P G, et al. Accounting and analysis of carbon footprint of high belite sulphoaluminate cement prepared with solid waste [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2022, 43(4): 34-40 (in Chinese).
- [16] 白文琦, 杜强, 吕晶, 等. 通用硅酸盐水泥生产的碳足迹研究 [J]. 西安工程大学学报, 2013, 27(4): 472-476.
- BAI W Q, DU Q, LYU J, et al. Research on the carbon footprint in the production of common Portland cement [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2013, 27(4): 472-476 (in Chinese).
- [17] 徐振华, 黄绪泉, 刘立明. 磷石膏制硫酸联产水泥过程中的碳排放核算 [J]. 磷肥与复肥, 2022, 37(2): 46-48.
- XU Z H, HUANG X Q, LIU L M. Carbon emission assessment in the process of production of sulfuric acid integrated with cement from phosphogypsum [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(2): 46-48 (in Chinese).
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑石膏单位产品能源消耗限额: GB 33654—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The norm of energy consumption per unit throughput of gypsum plaster: GB 33654—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese).
- [19] 马丽丽. 纸面石膏板的生命周期评价 [D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- MA L L. The life cycle assessment of plasterboard [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [20] 吕莎莎. 基于 LCA 磷石膏基层材料环境影响研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- LYU S S. Research on phosphogypsum base material environmental impact assessment based on LCA [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012 (in Chinese).
- [21] 张乐. 磷石膏基生态水泥的开发及其生命周期评价研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- ZHANG L. Preparation and the life cycle assessment of eco-cement made from phosphogypsum [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009 (in Chinese).
- [22] 冯志亮. 废旧轮胎全生命周期碳足迹计算 [D]. 天津: 河北工业大学, 2020: 12.
- FENG Z L. Waste tyre life cycle carbon footprint calculation [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020: 12 (in Chinese).
- [23] 赵爱琴, 魏丽, 王虹. 中美温室气体排放核算的对比分析及建议 [J]. 环境保护, 2015, 43(8): 60-63.
- ZHAO A Q, WEI L, WANG H. Comparison of greenhouse gas emission assessment between China and the U. S. and its suggestions [J]. Environmental Protection, 2015, 43(8): 60-63 (in Chinese).
- [24] 中国建筑材料联合会. 绿色设计产品评价规范 纸面石膏板: T/CBMF 124—2021 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021.
- China Building Material Council. Technical specification foreco-design product assessment—gypsum plasterboard: T/CBMF 124—2021 [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2021 (in Chinese).

- [25] 中国电子节能技术协会. 电器电子产品碳足迹评价通则: T/DZJN 001—2018[S]. 北京: 中国电子节能技术协会, 2018.
China Electronic Energy Saving Technology Association. General guideline for electrical and electronic products carbon footprint assessment: T/DZJN 001—2018[S]. Beijing: China Electronic Energy Saving Technology Association, 2018 (in Chinese).
- [26] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [27] 郑 辉, 王 玎, 方丽霞. 生命周期评价视角下的机电产品碳足迹分析模型研究[J]. 天津科技大学学报, 2017, 32(6): 65-72.
ZHENG H, WANG D, FANG L X. A new carbon footprint analysis model of mechanical and electrical products from the perspective of life cycle assessment[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2017, 32(6): 65-72 (in Chinese).
- [28] VENTA G J, et al. Life cycle analysis of gypsum board and associated finishing products[R]. Ottawa: ATHENATM Sustainable Materials Institute, 1997.
- [29] 程亚美. 工业化住宅建筑墙板能耗与碳排放研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2019: 22.
CHENG Y M. Study on energy consumption and carbon emission of prefabricated residential building wallboard[D]. Beijing: North China University of Technology, 2019: 22 (in Chinese).
- [30] 刘光启. 化学化工物性数据手册-无机卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 28.
LIU G Q. Handbook of chemistry and chemical properties-inorganic volume[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 28 (in Chinese).
- [31] 生态环境部办公厅. 关于做好 2022 年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知[EB/OL]. 2022-03-15. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk06/202203/t20220315_971468.html.
General Office of the Ministry of Ecology and Environment. Notice on key work related to the management of greenhouse gas emission report of enterprises in 2022[EB/OL]. 2022-03-15. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk06/202203/t20220315_971468.html (in Chinese).
- [32] 申娟娟. 基于 LCA 的建筑碳足迹测算及减排对策研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2019: 20-30.
SHEN J J. Research on carbon footprint calculation and emission reduction measures of buildings based on life-cycle assessment[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019: 20-30 (in Chinese).
- [33] 崔 鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015: 56.
CUI P. The establishment of a life-cycle carbon emission factor database for buildings and research[D]. Nanjing: Southeast University, 2015: 56 (in Chinese).
- [34] 杨倩苗. 建筑产品的全生命周期环境影响定量评价[D]. 天津: 天津大学, 2009: 48-62.
YANG Q M. Quantificational life cycle assessment of environmental impact of construction productions[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 48-62 (in Chinese).
- [35] 黄志甲. 建筑物能量系统生命周期评价模型与案例研究[D]. 上海: 同济大学, 2003: 39-40.
HUANG Z J. Life cycle assessment model and case study of building energy system[D]. Shanghai: Tongji University, 2003: 39-40 (in Chinese).
- [36] 陈 燕. 石膏建筑材料[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2003: 118.
CHEN Y. Gypsum building materials[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2003: 118 (in Chinese).
- [37] 中华人民共和国工业和信息化部. α 型高强石膏: JC/T 2038—2010[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2011.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. α -high strength gypsum plaster: JC/T 2038—2010[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2011 (in Chinese).
- [38] 郑成艳, 盖广清, 刘圣伟, 等. 水泥基自流平砂浆性能的研究[J]. 商品混凝土, 2009(10): 35-39.
ZHENG C Y, GAI G Q, LIU S W, et al. Study of self-leveling mortar performance[J]. Ready-Mixed Concrete, 2009(10): 35-39 (in Chinese).
- [39] 高淑娟, 刘文斌. 水泥基自流平砂浆的配制[J]. 商品混凝土, 2011(10): 39-40+48.
GAO S J, LIU W B. Preparation of cement-based self-leveling mortar[J]. Ready-Mixed Concrete, 2011(10): 39-40+48 (in Chinese).
- [40] 韩芳芳, 高奎旻, 梁 飞, 等. 一种低成本水泥基自流平砂浆的配制及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(2): 99-102.
HAN F F, GAO K M, LIANG F, et al. A research on the preparation and property of a low-cost cement-based self-leveling mortar[J]. New Building Materials, 2017, 44(2): 99-102 (in Chinese).
- [41] 中华人民共和国工业和信息化部. 地面用水泥基自流平砂浆: JC/T 985—2017[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2017.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Cementitious self-leveling floor mortar: JC/T 985—2017[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2017 (in Chinese).
- [42] 秦于茜. 水泥产品碳足迹核算研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020: 39-42.
QIN Y Q. Research on accounting of carbon footprint of cement products[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020: 39-42 (in Chinese).
- [43] 陈 乔. 建筑工程建设过程碳排放计算方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2014: 26.
CHEN Q. Study on the calculation method of carbon emission during the construction process of architectural project[D]. Xi'an: Changan University, 2014: 26 (in Chinese).