

ICS 91.100.15

CCS Q13

CBCA

团 体 标 准

T/CBCA XXX-XXXX

粉煤灰基预拌流态固化土产品碳足迹量 化方法与要求

Quantification requirement and method of product carbon
footprint—Flyash-based Premixed Fluid Solidified Soil
(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国散装水泥推广发展协会 发 布

引 言

在全球积极应对气候变化、大力倡导节能减排的背景下，控制温室气体排放已成为全人类的共同使命。各个行业都在积极探索更加环保、低碳的发展路径。

我国煤基固废（如粉煤灰、煤矸石）年增量超过 30 亿吨，堆存总量已达 70 亿吨以上，不仅大量占用土地资源，还存在自燃、重金属浸出、扬尘污染等环境与安全风险。粉煤灰基预拌流态固化土以工程弃土、粉煤灰、矿渣、固化剂（含激发剂）及水为主要原料，是一种具有自流平、自密实特性的新型岩土材料，近年来在建筑领域得到了广泛关注与应用。该材料不仅实现了粉煤灰等固体废弃物的资源化利用，有效缓解环境压力，还可替代部分水泥，显著降低建材生产的碳排放与成本，具有显著的经济和环境效益。

然而，当前针对粉煤灰资源化利用的标准体系尚不完善，尤其是流态固化土在材料性能、环保指标、施工工艺等方面缺乏统一规范，制约其规模化、标准化应用。因此，制定本团体标准，系统规范其碳足迹量化方法，不仅有助于准确评估该类产品在全生命周期中的碳排放，更可填补标准空白，推动材料性能提升与应用安全，促进产业链协同与技术创新。

本文件系统研究粉煤灰基预拌流态固化土全生命周期温室气体排放特征，旨在为生产企业、科研机构及监管部门提供全链条数据支撑与可操作性指南，协同推进该领域低碳化、标准化发展，助力国家“无废城市”建设与“双碳”目标实现。

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国散装水泥推广发展协会标准化委员会提出。

本文件由中国散装水泥推广发展协会归口。

本文件负责起草单位：

本文件参加起草单位：

本文件主要起草人：

本文件主要审查人：

本文件为首次发布。

目 录

引 言.....	2
粉煤灰基预拌流态固化土产品碳足迹.....	1
量化方法与要求.....	1
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 通则.....	2
5 量化目的和范围.....	2
6 系统边界.....	2
7 数据和数据质量.....	3
8 生命周期清单分析.....	4
9 产品碳足迹影响评价.....	5
10 数据不确定性评估.....	10
11 产品碳足迹报告.....	11
附 录 A（资料性）粉煤灰基预拌流态固化土生产工艺流程图.....	13
附 录 B（资料性）2022 年电力二氧化碳排放因子.....	14
附 录 C（资料性）全球升温潜势 GWP 表.....	15
附 录 D（资料性附录）燃料排放因子的计算公式.....	16
附 录 E（资料性）参数推荐值表.....	17
附 录 F（资料性）产品碳足迹报告模板.....	18

粉煤灰基预拌流态固化土产品碳足迹

量化方法与要求

1 范围

本文件规定了粉煤灰基预拌流态固化土的术语和定义、量化目的、量化范围、数据和数据的质量、生命周期清单分析、产品碳足迹影响评价、产品碳足迹结果解释及产品碳足迹报告。

本文件适用于粉煤灰制备流态固化土的碳足迹量化方法。本文件的制定有助于规范粉煤灰基流态固化土的材料性能、环保指标与碳足迹核算，推动其在大宗固废资源化与绿色低碳建材中的应用。

2 规范性引用文件

GB/T 1596-2017 用于水泥和混凝土中的粉煤灰

GB/T 24067-2024 温室气体 产品碳足迹量化要求和指南

GB/T 32150-2015 工业企业温室气体排放核算和报告通则

GB/T 50146-2014 粉煤灰混凝土应用技术规范

ISO 14064-1:2018 温室气体 第1部分：组织层面指导量化和报告温室气体排放量和清除量的规范

3 术语和定义

3.1

粉煤灰 fly ash

电厂煤粉炉烟道气体中收集的粉末。

[GB/T 1596-2017, 定义 3.1]

3.2

预拌流态固化土 Premixed Fluid Solidified Soil

流态固化土是由工程弃土、粉煤灰、矿渣、固化剂（含激发剂）及水拌合而成，具有自流平、自密实特性的岩土材料。

[DBJ51/T 188-2022, 定义 2.1.2]

3.3

产品碳足迹 carbon footprint of a product; CFP

产品系统中的 GHG 排放量和 GHG 去除量之和，以二氧化碳当量为单位表示，并基于气候变化单一影响类型进行生命周期评价。

[ISO 14067:2018, 定义 3.1.1]

3.3.1

产品部分碳足迹

产品系统中一个或多个选定过程的温室气体排放量和温室气体去除量之和，表示为二氧化碳当量，并基于生命周期中选定的阶段或过程。

3.4

系统边界 system boundary

通过一组准则确定哪些单元过程属于产品系统的一部分。

[GB/T 24044-2008, 3.32]

3.5

温室气体 greenhouse gas; GHG

大气层中自然存在的和由于人类活动产生的能够吸收和散发地球表面、大气层和云层所产生的、波长在红外光谱内辐射的气态成分。

[GB/T 32150-2015, 定义 3.1]

3.6

二氧化碳当量 carbon dioxide equivalent; CO₂e

比较某种温室气体与二氧化碳的辐射强迫的单位。

在辐射强度上与某种温室气体质量相当的二氧化碳的量。

[GB/T 32150-2015, 定义 3.16]

3.7

全球变暖潜势 global warming potential; GWP

将单位质量的某种温室气体在给定时间段内辐射强迫的影响与等量二氧化碳辐射强迫影响相关联的系数。

[GB/T 32150-2015, 3.15]

4 通则

本文件基于粉煤灰资源化利用的紧迫性与标准化需求,按照粉煤灰基预拌流态固化土的碳足迹评价方法建立部分生命周期碳足迹核算体系,包含原材料获取阶段、运输阶段、生产加工阶段,不包括产品的分销阶段、使用阶段和生命末期阶段。为企业低碳生产与碳管理提供依据。产品生命周期中的温室气体排放量应分配到发生温室气体排放的生命周期阶段。在按照相同的时间范围、采用相同方法进行量化且不存在缺项或交叉的前提下,产品碳足迹可由产品部分碳足迹相加得到。

5 量化目的和范围

开展粉煤灰基预拌流态固化土碳足迹量化的总体目的是核算粉煤灰基预拌流态固化土系统边界内所有显著温室气体排放量,计算生产 1t 粉煤灰基预拌流态固化土对全球变暖的潜在贡献,单位以二氧化碳当量(CO₂e)表示。

开展粉煤灰基预拌流态固化土的碳足迹量化研究时,应明确说明以下问题:

—应用意图;

—开展该项研究的理由;

—目标受众(即研究结果的接收者);

6 系统边界

6.1 边界设定

本文件为产品标准,粉煤灰基预拌流态固化土的碳足迹核算采用从摇篮到出厂的部分生命周期评价方法。其系统边界始于原辅料及能源的获取,包括粉煤灰、固化剂(含激发剂)、骨料、水等原材料的获取,以及上述物料从获取地至生产现场的运输环节,并涵盖生产加工阶段所涉及的预处理、激发剂配置与混合、成型与养护等全部过程。本文件不包括产品出厂后的分销、使用阶段的工程服役(按 50 年计)、废弃拆除及再生利用等环节。其碳足迹系统边界如下图所示,该图明确了从原辅料获取到产品成型出厂的范围,并在图注中予以标示。



粉煤灰基预拌流态固化土系统边界图

6.2 原辅料和能源获取阶段

该过程计算原辅料从自然界原料提取开始，到达生产现场时终止，包括：

- 1) 原辅料的获取与运输分销（例如粉煤灰、固化剂、激发剂和泡沫剂等）；
- 2) 能源获取阶段与运输分销或输送（例如汽油、柴油、重油、煤炭、天然气、电力、热力等）。

其中，泡沫剂作为泡沫混凝土生产中的关键添加剂（如蛋白类或表面活性剂），应纳入原辅料环节进行碳足迹核算，建议明确其种类、使用量及对应的碳排放因子，以完善该环节的数据完整性。

6.3 粉煤灰基预拌流态固化土预处理阶段

为提高粉煤灰基预拌流态固化土的活性与均匀性，需开展预处理工作。预处理应包括但不限于对粉煤灰进行筛分（去除>20mm的颗粒）、检测并控制其烧失量（有机质含量≤5%）等。预处理过程包含粉煤灰的初步筛选或研磨工序，最后将其储存备用。该过程产生碳排放的主要环节如下：

- 1) 初步筛选过程
- 2) 研磨
- 3) 原料运输的相关过程
- 4) 燃料、电力等能源消耗相关过程
- 5) 预处理后的粉煤灰储存

6.4 激发剂配置及物料混合阶段

该阶段是通过化学或物理手段激活粉煤灰的潜在活性，主要是将选定的激发剂按照一定的比例溶解在水中，配制成相应浓度的溶液，然后与原料混合。其主要产生碳排放的环节如下：

- 1) 配置激发剂
- 2) 混合搅拌
- 3) 燃料、电力（热力）等能源消耗相关过程

6.5 成型与养护阶段

该阶段是在碱性环境下发生溶解、缩聚和硬化反应，最终形成具有胶凝性能的泡沫混凝土结构。其主要过程产生碳排放主要环节如下：

- 1) 震动辅助
- 2) 适宜温度养护
- 3) 燃料、电力（热力）等能源消耗相关过程

7 数据和数据质量

7.1 数据的描述

数据包括：粉煤灰基预拌流态固化土产品系统量化过程中优先使用现场数据。

现场数据是粉煤灰基预拌流态固化土产品生产阶段各工序或单元的活动数据，是基于实际测量、统计等方式得到的生命周期清单数据，如产品生产阶段的原辅料和能源消耗量、产品产出量、废弃物排放量以及运输量（包括运输方式、运输距离）等。现场数据均为初级数据。

背景数据是无法从现有产品系统中获得的，通常来源于现有的本土化或国际 LCA 数据库、经第三方权威机构认证的产品碳足迹(CFP)或环境产品声明(EPD)报告、公开发表的高质量学术文献等。可量化背景数据为初级数据，如供应商或服务商提供基于现场数据计算得到的生命周期清单数据；背景数据不能量化则为次级数据，如外购原辅材料和燃料的上游排放因子、运输排放因子等。

仅在收集初级数据不可行时，次级数据才能用于输入和输出，或用于重要性较低的过程。引用次级数据宜证明其适用性和可信度，并注明数据来源及选取思路。

初级数据：指通过直接测量、统计、从特定产品系统的供应商或生产商处直接获取的、代表其特定过程的、未经二次处理的原始数据。该类数据针对性强、代表性高、是最优先采用的数据。“现场数据”以及“可量化的背景数据（如供应商提供的基于其现场计算的数据）”都属于初级数据。

次级数据：指并非直接来源于所研究的特定系统，而是从已有的数据库、文献、行业平均报告或通用生命周期清单中获取的数据。该类数据通用性强，但针对性和代表性较弱。通常在无法获取初级数据时作为补充。“不能量化的背景数据，如外购材料的上游排放因子、运输排放因子等”就属于次级数据。

现场数据：特指从产品系统本身的生命周期阶段（生产阶段）通过直接测量和统计获得的数据。它是初级数据的一种最主要形式。包括原辅料和能源消耗量、产品产出量、废弃物排放量、运输量等。

背景数据：指用于构建产品系统背景过程（如原材料开采、能源生产、上游运输、废物处理等）的数据。这些数据既可以是初级数据，也可以是次级数据。

7.2 数据的质量要求

- a) 时间覆盖范围:数据的年份和所收集数据的最小时间长度;
- b) 地理覆盖范围:为实现产品碳足迹研究目的所收集的单元过程数据的地理位置;
- c) 技术覆盖范围:具体的技术或技术组合;
- d) 精度:对每个数据值的可变性的度量(例如方差);
- e) 完整性:测量或测算的流所占的比例;
- f) 代表性:反映实际关注人群对数据集(即时间覆盖范围、地理覆盖范围和技术覆盖范围等)关注程度的真实情况进行的定性评价;
- g) 一致性:对研究方法学是否能在敏感性分析的不同组成部分中统一应用而进行的定性评价;
- h) 再现性:对其他独立从业人员采用同一方法学和数值信息重现相同研究结果的定性评价;
- i) 数据来源:现场数据来源于测量、工程计算、采购记录等，环境排放数据优先采用环境监测报告，所有数据均有相关的数据来源和数据处理算法;
- j) 信息的不确定性。

8 生命周期清单分析

8.1 原辅材料和能源获取阶段

辅助材料和能源获取阶段应收集的初级数据包括:

- a) 原辅材料的运输工具及其核定载重量、运输重量、运输距离
- b) 能源的运输工具及其核定载重、运输重量、运输距离。

8.2 预处理阶段

- a) 粉煤灰预处理过程能源消耗和电力消耗情况
- b) 筛选前后粉煤灰的重量
- c) 球磨时间、温度、颗粒尺寸
- d) 球磨机能耗、电力消耗情况
- e) 筛分后粉煤灰的颗粒级配数据
- f) 粉煤灰的烧矢量检测数据

8.3 激发剂配置及物料混合阶段

- a) 激发剂种类、用量及配比（如碱激发剂的浓度、固体/液体质量）

- b) 激发剂与粉煤灰的混合比例（质量或体积比）
- c) 混合设备类型（如搅拌机型号）、混合时间、转速及能耗
- d) 混合过程中的温度控制参数（如环境温度或加热温度）
- e) 混合后物料的含水率或均匀度检测数据
- f) 固化剂/激发剂的实际参量
- g) 拌合物的塌落度扩展检测记录

8.4 成型阶段

- a) 成型设备类型（如压制成型机）及功率
- b) 成型压力、温度、时间等工艺参数
- c) 单件产品成型能耗（电力/燃料消耗量）
- d) 成型模具的材质、尺寸及使用寿命
- e) 成型合格率及废料产生量（如边角料或不合格品质量）
- f) 试件的抗压强度测试报告

8.5 次级数据收集

粉煤灰基预拌流态固化土产品系统边界内应收集的次级数据主要包括：

- a) 外购原辅材料、燃料等上游生命周期清单数据；
- b) 电(热)力等能源的上游生命周期清单数据；
- c) 运输过程的数据清单等。

8.6 数据审定

在数据收集过程中应对数据的有效性进行检查，以确认并提供证据证明数据质量要求符合 7.2 的规定。

数据审定可通过建立质量平衡、能量平衡、碳平衡和(或)排放因子的比较分析或其他适当的方法。由于每个单元过程均遵守物质和能量守恒定律，因此物质和能量的平衡能为单元过程描述的准确性提供有效的检查。

数据审定可参考行业平均值、检验标准值等常规数据进行交叉审定。

8.7 数据取舍原则

本文件涉及的物质和能源数据的取舍原则如下：

- a) 能源的所有输入均需列出；
- b) 原辅材料的所有输入均需列出；
- c) 辅助材料若符合 d) 和 e) 要求则可忽略；
- d) 忽略的单项物质(能量)流对产品碳足迹的贡献均不应超过 1%；
- e) 所有忽略的物质(能量)流对产品碳足迹贡献总和不应超过 5%，且应在产品碳足迹报告中予以说明；
- f) 道路与厂房等基础设施、各工序设备、厂区内人员办公及生活设施的消耗和排放，均忽略。

9 产品碳足迹影响评价

9.1 一般要求

产品碳足迹为所有 GHG 潜在气候变化影响的总和，通过排放的 GHG 的质量乘以 IPCC 给出的 100 年 GWP(见附录 C)，来计算产品每种 GHG 排放的潜在气候变化影响，以 kgCO_2e 为计量单位。

9.2 产品碳足迹计算方法公式

粉煤灰基预拌流态固化土温室气体排放量按照式（1），将各个过程的二氧化碳当量相加计算得到。

$$GHG_{total} = (C_{byproduct} + C_{trans} + C_{pre} + C_{mix} + C_{cure} + C_{pack}) \times GWP_j \dots\dots (1)$$

GHG_{total} ——粉煤灰基预拌流态固化土碳足迹，单位为 kgCO_2e ；

$C_{byproduct}$ ——原料获取阶段碳排放量，单位为 kgCO_2e ；

C_{trans} ——原辅料、燃料等运输过程的碳排放量，单位为 kgCO_2e ；

C_{pre} ——原材料预处理阶段产生碳排放量，单位为 kgCO_2e ；

C_{mix} ——配料混合阶段产生的碳排放量，单位为 kgCO_2e ；

C_{cure} ——成型与养护产生的碳排放，单位为 kgCO_2e ；

GWP_j ——温室气体 j 的 GWP 值，按附录 C 中的规定取值。

粉煤灰基预拌流态固化土从原料获取到产品过程产生的碳排放量采用过程分析法，按照式（2）进行计算：

$$C_j = \sum_{i=1}^n (AD_i \times EF_i) \dots\dots (2)$$

C_j ——功能单位/声明单位产品在第 j 阶段第 i 种原辅料、燃料获取的温室气体排放量，单位为 kgCO_2e ；

AD_i ——统计期内生产目标产品第 i 种原辅料、燃料的消耗量，单位为 kg 或 m^3 ；

EF_i ——第 i 种原辅料、燃料生命周期温室气体排放因子，单位为 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$ 或 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$ ；

a) 粉煤灰的获取产生的温室气体按照质量分摊法进行计算：

$$C_{byproduct} = \frac{E_{upstream} \times M_{gypsum}}{M_{total}}$$

$E_{upstream}$ ——上游排放企业原工艺的温室气体总排放量，单位为 kgCO_2e ，例如燃煤电厂的原料和能源的获取、运输、工业生产等温室气体总排放量；

M_{gypsum} ——副产粉煤灰基预拌流态固化土的质量，单位为 kg ；

M_{total} ——原工艺所有产出物质的总质量，单位为 kg ，包括主产品电力（按照等热值法折算为质量进行计算）、粉煤灰、副产品、废弃物（废水、废气等）。

根据 ISO 14044 等国际标准，分配时应按优先级顺序考虑：a) 避免分配；b) 按物理关系分配；c) 按经济关系或其他关系分配。只列出一种方法不符合标准实践。

9.2.1 系统扩展法（避免分配）

当粉煤灰用于替代另一种具有相同功能的主流产品时（例如，粉煤灰用于替代部分水泥），宜优先采用系统扩展法。通过扩展系统边界，将原系统（发电）和替代系统（生产被替代产品，如水泥）的环境影响进行综合比较。该方法避免了分配，但需要对被替代产品的生命周期有清晰了解。

9.2.2 经济价值分摊法

当粉煤灰具有显著的市场经济价值，且其价值与主产品（电力）及其他副产品的价值存在较大差异时，宜采用经济价值分摊法。例如，脱硫粉煤灰与普通粉煤灰、不同品级的粉煤灰市场价格差异较大时，采用此法更能反映其真实的环境负担。按照主、副产品在某个设定时间点的平均市场价值比例对总环境影响进行分摊。计算公式如下：

$V_{byproduct}$ ——副产物粉煤灰的市场价值，单位：元；

V_{total} ——原工艺所有产出物质的总市场价值，单位：元（包括主产品电力、粉煤灰及其他副产品）；

$E_{processing}$ ——若副产物需额外预处理（如研磨，分选），需增加该预处理工序的能耗排放。

9.2.3 物理关系分摊法（如质量分摊法）

适用情形：当上述两种方法均不适用，且主、副产品之间的物理特性（如质量、热值）是衡量其产出比例最合理的依据时，可作为默认方法使用。

方法描述：按照主、副产品的质量比例对总环境影响进行分摊。计算公式如下：

$$C_{byproduct} = \frac{E_{upstream} \times M_{gypsum}}{M_{total}}$$

$E_{upstream}$ ——上游排放企业原工艺的温室气体总排放量，单位为 kgCO_2e ，例如燃煤电厂的原料和能源的获取、运输、工业生产等温室气体总排放量；

M_{gypsum} ——副产粉煤灰基预拌流态固化土的质量，单位为 kg ；

M_{total} ——原工艺所有产出物质的总质量，单位为 kg ，包括主产品电力（按照等热值法折算为质量进行计算）、粉煤灰、副产品、废弃物（废水、废气等）。

b) 原料的预处理产生的温室气体

$$C_{screen-dry} = E_{screen} \times EF_{elec} + F_{dry} \times EF_{fuel} + Q_{dry} \times EF_{heat-loss}$$

E_{screen} ——振动筛/分选机电力消耗（ kWh ），通过设备铭牌功率×运行时间计算；

F_{dry} ——干燥燃料（如天然气）消耗量（ m^3 ），根据燃烧器流量计记录；

Q_{dry} ——干燥过程散失的热量（ MJ ），计算公式： $Q_{dry} = m_{ash} \times c_p \times (T_{out} - T_{in})$ ，其中 c_p 为粉煤灰比热容（约 $0.84 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ）；

EF_{elec} ——2021 年电力二氧化碳排放因子；

EF_{fuel} ——燃料的排放因子，计算方式见附录；

$EF_{heat-loss}$ ：按热能来源折算（若使用燃煤锅炉余热，取燃煤排放因子的 15%）；

c) 研磨与活化过程产生的碳排放

$$C_{grind-act} = E_{grind} \times EF_{elec} + M_{NaOH} \times EF_{NaOH} + M_{water} \times EF_{water}$$

M_{NaOH} ——氢氧化钠用量（Kg），按照混凝土质量的 5%-15% 计算；

M_{water} ——工艺水消耗量（t），根据搅拌槽容积×批次数量统计；

EF_{NaOH} ——氢氧化钠排放因子为 2.1 kg CO₂e/kg（中国化工协会《重点化工产品碳排放因子》，含电解法生产+运输）；

EF_{water} ——水排放因子为 0.37 kg CO₂e/t（市政供水，仅处理与输送，参考《城镇水务系统碳核算标准》）。

d) 原料运输过程产生的碳排放

$$C_{trans} = \sum_{j=1}^n (D_j \times W_j \times EF_{trans-mode,j})$$

D_j ——第 j 种原料运输距离（km），需区分公路/铁路/水路，企业物流记录或地图软件测算；

$EF_{trans-mode,j}$ ——运输排放因子，重型卡车：0.12 kg CO₂e/(t·km)（柴油车满载）；铁路：0.03 kg CO₂e/(t·km)（电力牵引），来源于生态环境部《道路运输企业温室气体排放核算指南》；

e) 配料的混合产生的碳排放

$$C_{mix} = E_{mixer} \times EF_{elec}$$

E_{mixer} ——混合机电力消耗量；

EF_{elec} ——电力排放因子；

f) 浇筑成型产生的碳排放

$$C_{press} = E_{press} \times EF_{elec} + M_{mold} \times EF_{steel}$$

参数说明：

M_{mold} ：模具钢材料年损耗量（kg），按模具总质量×年磨损率（通常 0.5%~1%）；

EF_{steel} ：钢材生产排放因子为 2.3 kg CO₂e/kg（含炼钢+轧制）；

g) 养护工艺产生的碳排放

蒸汽养护（燃煤锅炉）：蒸汽生产和养护窑保温

$$C_{cure} = S_{stream} \times EF_{steam} + Q_{insulate} \times EF_{heat-loss}$$

S_{steam} —— 蒸汽用量（kg）= 养护窑容积×蒸汽密度×养护时间×换气次数；

EF_{steam} —— 燃煤锅炉：0.11 kg CO₂e/kg 蒸汽（1MPa 饱和蒸汽，参考《工业锅炉能效与排放测试规程》）；

h) 养护工艺的碳排放分析

养护是流态固化土生产的能耗关键环节之一，不同的养护工艺其碳排放差异显著。为准确核算并引导低碳生产，本文件要求对养护阶段的碳排放进行核算，并鼓励进行多情景对比分析，以识别减碳潜力。

h.1 蒸汽养护

采用燃煤锅炉生产蒸汽，对养护窑中的产品进行加热保温。

碳排放计算公式：

$$C_{cure} = S_{stream} \times EF_{steam} + Q_{insulate} \times EF_{heat-loss}$$

S_{steam} —— 蒸汽用量（kg）= 养护窑容积×蒸汽密度×养护时间×换气次数；

EF_{steam} —— 燃煤锅炉：0.11 kg CO₂e/kg 蒸汽（1MPa 饱和蒸汽，参考《工业锅炉能效与排放测试规程》）；

i) 自然养护

在常温常压下，通过覆盖草帘、塑料薄膜等进行保温保湿，依靠材料自身水化热进行养护，无需外部能源输入。

$$C_{cure-natural} = M_{curing} \times EF_{agent}$$

此过程无直接化石燃料消耗产生的碳排放。碳排放主要来源于可能的遮盖材料（如塑料薄膜）的生产和废弃生命周期，以及养护期间喷洒用水的水泵能耗。若忽略上述微量影响，可将其碳排放计为 0 或一个极低的值。

作为低碳情景的基准，用于对比分析蒸汽养护的碳减排潜力。需分析其是否会影响产品性能（如早期强度、凝结时间）和生产周期。

j) CO₂养护或其他新型低碳养护技术

用工业副产 CO₂ 与粉煤灰基材料中的活性组分（如 CaO, MgO）发生矿化反应，生成稳定的碳酸盐，从而实现 CO₂ 的永久封存，并可能提升产品早期强度。

碳排放计算：

CO₂ 养护过程的碳足迹为负值，其计算核心是准确量化被产品封存的 CO₂ 量，并扣除养护工艺本身的能耗。

计算公式：

封存 CO₂ 量计算公式：

或更详细地表述为

$V_{product}$ ——单次养护的产品的体积（m³）。

CCR ——CO₂ 承载量（Carbonation Capacity Rate），即单位体积产品理论最大可封存 CO₂ 的质量（kg CO₂/m³）。需通过实验测定或基于材料钙镁含量进行理论计算。

$\eta_{reaction}$ ——反应效率，指实际反应封存量与理论最大封存量的比值（%），用于修正实际工艺条件（如温度、湿度、CO₂ 浓度、压力）与理想状态的差距。

$Q_{co2-injected}$ ——注入养护窑的 CO₂ 混合气体的总质量（kg）。

C_{co2} ——注入混合气体中 CO₂ 的浓度（%）。

$R_{participate}$ ——反应物参与比，指材料中实际参与碳化反应的活性组分（如 Ca(OH)₂）占总活性组分的比例（%）。

$E_{process} \times EF_{energy}$ ——养护工艺本身的能耗排放，如 CO₂ 气体压缩、输送、养护窑密封和运行等过程的能耗。

$M_{co2-sequestered}$ ——养护过程中被产品矿物化封存的 CO₂ 质量（kg）。

关键参数获取： CCR 、 $\eta_{reaction}$ 等核心参数应优先通过实际测量或中试验证获取。在可行性研究阶段，可参考公开发表的高质量学术文献或国际 CCU 项目研究数据。

标准遵循：对负值的处理（负排放）应遵循 ISO 14067:2018 《温室气体-产品的碳足迹-量化和沟通的要求与指南》的相关规定，并在报告中明确说明。

保守性原则：在缺乏精确数据时，参数选取应遵循保守性原则，避免过高估计封存效益。

k) 自然养护替代方案

$$C_{cure-natural} = M_{curing} \times EF_{agent}$$

10 数据不确定性评估

10.1 产品碳足迹结果解释

产品碳足迹研究的生命周期结果解释阶段应包括以下步骤：

- 根据生命周期数据质量要求和产品碳足迹影响评价的量化结果，识别显著碳排放环节；
- 对数据的来源一致性和过程的完整性进行评估；

c) 结论、局限性和建议分析;

按照产品碳足迹研究的目的是和范围, 对产品碳足迹影响评价的量化结果进行解释, 解释应包括以下内容:

d) 说明产品碳足迹和各阶段碳足迹;

e) 分析不确定性, 包括取舍准则的应用或范围;

e1) 不确定性评估方法

为量化数据与假设对最终结果的影响, 应进行不确定性评估。推荐采用以下一种或多种方法, 其选择取决于研究的目的、深度和可获取的资源:

敏感性分析: 在保持其他参数不变的情况下, 系统性地改变某个输入参数的值 (通常在其可能的变化范围内, 如 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 或根据数据质量设定更大范围), 观察并计算最终碳足迹结果的变化率, 以识别对碳足迹结果影响最大的关键参数, 并评估其影响程度。

蒙特卡罗分析: 为每个关键输入参数定义一个概率分布函数 (如正态分布、三角分布、均匀分布), 通过计算机进行数千次迭代计算, 每次计算都从各参数的分布中随机取值。最终输出结果的分布情况从而提供一个碳足迹结果的概率分布 (如: 95%置信区间), 更全面的理解结果的不确定性。

f) 详细记录选定的分配程序;

g) 说明产品碳足迹研究的局限性;

h) 对重要输入、输出和方法学选择 (包括分配程序) 进行敏感性检查;

i) 评估建议对结果的影响。

11 产品碳足迹报告

关产品碳足迹评价报告模板, 产品碳足迹评价报告 (参考格式见附录 F), 宜包括以下内容:

a) 基本情况

委托方与评价方信息;

报告信息;

依据的标准;

开展研究的目的;

b) 量化目的:

1) 开展研究的目的;

2) 预期用途。

c) 量化范围:

1) 产品说明, 包括功能和技术参数;

2) 声明单位以及基准流;

3) 系统边界:

4) 取舍准则和取舍点, 列出排除在外的单元过程或因素, 并说明理由和其合理性;

5) 生命周期各阶段描述。

d) 清单分析:

1) 数据收集信息, 包括数据来源;

2) 重要的单元过程清单;

3) 纳入范围的温室气体清单;

4) 分配原则与程序;

5) 数据说明. 包括有关数据的决定和数据质量评价。

e) 影响评价:

1) 影响评价方法;

2)特征化因子:

3)产品碳足迹计算;

4)结果图示(可选)。

f)结果解释:

1)结论和局限性;

2)敏感性分析和不确定性分析结果:

3)电力处理，包括关于电网排放因子计算和相关电网的特殊局限信息:

4)在产品碳足迹研究中披露和证明相关信息项的选择并说明理由。研究中使用的产品种类规则或其他补充要求的参考资料。

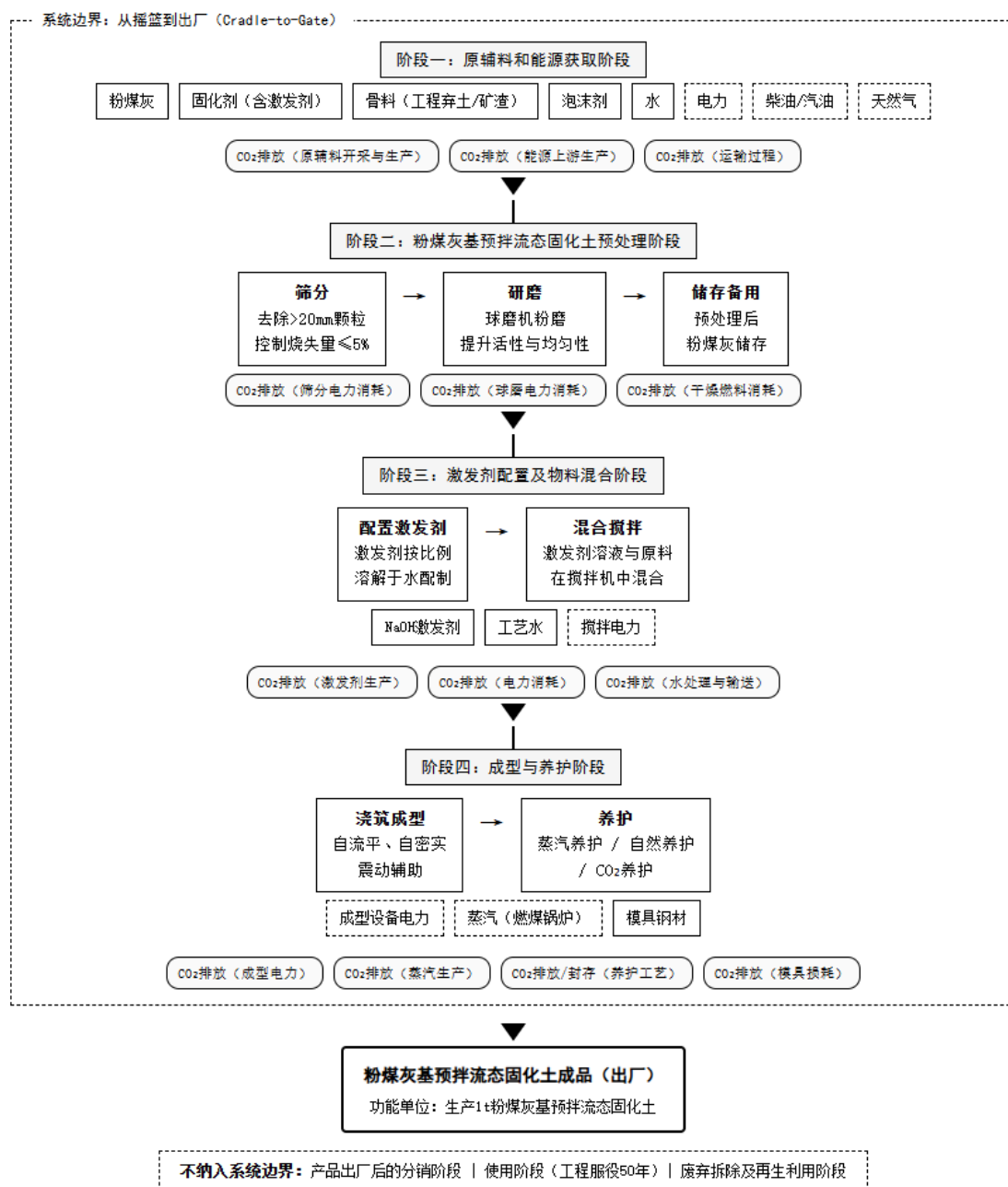
附录 A（资料性）粉煤灰基预拌流态固化土生产工艺流程图
粉煤灰基预拌流态固化土生产工艺流程图

注 1：本流程图对应第 6 章系统边界描述，采用“从摇篮到出厂”的部分生命周期评价方法。

注 2：实线框表示生产工艺单元过程，虚线框为能源/物料输入，虚线边框为系统边界。

注 3：各阶段碳排放计算公式详见第 9 章产品碳足迹影响评价（式 1~式 10）。

注 4：道路与厂房等基础设施、各工序设备、厂区内人员办公及生活设施的消耗和排放均忽略（见 8.7 取舍原则）。



附录 B （资料性）2022 年电力二氧化碳排放因子

表 1 2022 年全国电力平均二氧化碳排放因子

	因子 (kgCO ₂ /kWh)
全国	0.5366

表 2 2022 年省级电力平均二氧化碳排放因子

	因子 (kgCO ₂ /kWh)
北京	0.5580
天津	0.7041
河北	0.7252
山西	0.7096
内蒙古	0.6849
辽宁	0.5626
吉林	0.4932
黑龙江	0.5368
上海	0.5849
江苏	0.5978
浙江	0.5153
安徽	0.6782
福建	0.4092
江西	0.5752
山东	0.6410
河南	0.6058
湖北	0.4364
湖南	0.4900
广东	0.4403
广西	0.4044
海南	0.4184
重庆	0.5227
四川	0.1404
贵州	0.4989
云南	0.1073
陕西	0.6558
甘肃	0.4772
青海	0.1567
宁夏	0.6423
新疆	0.6231

附录 C （资料性）全球升温潜势 GWP 表
全球升温潜势GWP表

温室气体种类	化学分子式	100 年增温潜势
二氧化碳	CO ₂	1
甲烷	CH ₄	27.9
氧化亚氮	N ₂ O	273
三氟化氮	NF ₃	17400
六氟化硫	SF ₆	25200
HFC-23	CHF ₃	14600
HFC-32	CH ₂ F ₂	771
HFC-41	CH ₃ F	135
HFC-125	C ₂ HF ₅	3740
HFC-134	CHF ₂ CHF ₂	1260
HFC-134a	C ₂ H ₂ F ₄	1530
HFC-143	CH ₂ FCHF ₂	364
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	5810
HFC-152a	C ₂ H ₄ F ₂	164
HFC-227ea	C ₃ HF ₇	3600
HFC-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	8690
全氟甲烷（四氟甲烷）	CF ₄	7380
全氟乙烷（六氟乙烷）	C ₂ F ₆	12400
全氟丙烷	C ₃ F ₈	9290
全氟丁烷	C ₄ F ₁₀	10000
全氟环丁烷	C ₄ F ₈	10200
全氟戊烷	C ₅ F ₁₂	9220
全氟己烷	C ₆ F ₁₄	8620
注：部分 GHG 的 GWP 来源于 IPCC 《气候变化报告 2021：自然科学基础 第一工作组对 IPCC 第六次评估报告的贡献》。		

附录 D （资料性附录）燃料排放因子的计算公式

燃料排放因子的计算公式如下所示：

D.1 化石燃料燃烧碳排放

E_{fuel} ——化石燃料燃烧的二氧化碳排放量，单位为 t（吨）；

AD_i ——第 i 种化石燃料活动水平以热值表示，单位为 TJ（太焦）；

EF_i ——第 i 种燃料的排放因子，单位为 tCO_2e/TJ （吨二氧化碳/太焦）；

i ——化石燃料的种类；

D.2 活动水平的数据核算

AD_i ——第 i 种化石燃料的活动水平，单位为 TJ（太焦）；

FC_i ——第 i 种化石燃料的消耗量，单位为 t 或 $10^3 m^3$ （吨， 10^3 标准立方米）；

NCV_i ——第 i 种化石燃料的平均低位发热值，单位为 kJ/kg 或 kJ/m^3 （千焦/千克，千焦/标准立方米）；

i ——化石燃料的种类；

D.3 排放因子数据来源

EF_i ——第 i 种化石燃料的排放因子，单位为 tCO_2e/TJ （吨二氧化碳/太焦）；

CC_i ——第 i 种化石燃料的单位热值含碳量，单位为 tC/TJ （吨碳/太焦）；

OF_i ——第 i 种化石燃料的碳氧化率单位为 %（百分数）；

44/22——二氧化碳与碳的分子量之比；

附 录 E （资料性）参数推荐值表
参数推荐值表

燃料品种		计量单位	低位发热量 GJ/t 或 GJ/10 ⁴ Nm ³	单位热值含碳量 tC/GJ	燃料碳氧 化率
固体 燃料	无烟煤	t	26.7 ^c	27.4×10 ^{-3b}	94%
	烟煤	t	19.570 ^d	26.1×10 ^{-3b}	93%
	褐煤	t	119 ^c	28×10 ^{-3b}	96%
	洗精煤	t	26.334 ^a	25.41×10 ^{-3b}	90%
	其他洗煤	t	12.545 ^a	25.41×10 ^{-3b}	90%
	其他煤制品	t	17.460 ^d	33.60×10 ^{-3d}	90%
	石油焦	t	32.5 ^c	27.5×10 ^{-3b}	100%
	焦炭	t	28.435 ^a	29.5×10 ^{-3b}	93%
液体 燃料	原油	t	41.816 ^a	20.1×10 ^{-3b}	98%
	燃料油	t	41.816 ^a	21.10×10 ^{-3b}	98%
	汽油	t	43.070 ^a	18.90×10 ^{-3b}	98%
	柴油	t	42.652 ^a	20.20×10 ^{-3b}	98%
	煤油	t	43.070 ^a	19.6×10 ^{-3b}	98%
	液化天然气	t	44.2 ^c	17.20×10 ^{-3b}	98%
	液化石油气	t	50.179 ^a	17.20×10 ^{-3b}	98%
	炼厂干气	t	45.998 ^a	18.20×10 ^{-3b}	98%
	焦油	t	33.453 ^a	22.00×10 ^{-3c}	98%
气体 燃料	焦炉煤气	10 ⁴ Nm ³	167.26 ~ 179.81 ^a	13.58×10 ^{-3b}	99%
	高炉煤气	10 ⁴ Nm ³	33.000 ^d	70.8×10 ^{-3c}	99%
	转炉煤气	10 ⁴ Nm ³	84.000 ^d	49.60×10 ^{-3d}	99%
	其他煤气	10 ⁴ Nm ³	52.270 ^a	12.2×10 ^{-3b}	99%
	天然气	10 ⁴ Nm ³	322.38 ~ 389.31 ^a	15.3×10 ^{-3b}	99%
注：部分 GHG 的 GWP 来源于 IPCC 《气候变化报告 2021：自然科学基础 第一工作组对 IPCC 第六次评估报告的贡献》。					

附录 F （资料性） 产品碳足迹报告模板

产品碳足迹报告模板

碳足迹报告（模板）

产品名称：

产品规格型号：

生产者名称：

报告编号：

出具报告机构： （盖章）

日期： 年 月 日

一、概况

1、生产者信息

生产者名称：

地址：
法定代表人：
授权人（联系人）：
联系电话：
公司概况：

2、产品信息

产品名称：
产品功能：
产品介绍：
产品图片：

3、量化方法

依据标准：

二、量化目的

三、量化范围

- 1、功能单位或声明单位
- 2、系统边界
- 3、取舍准则
- 4、时间范围

四、清单分析

1、数据来源说明

初级数据：
次级数据：

2、分配原则与程序

分配依据：
分配程序：
具体分配情况如下：

3、清单结果及计算

生命周期各个阶段碳排放计算说明见表 E.1。

表 E.1 粉煤灰基预拌流态固化土产品生命周期碳排放清单示例

生命周期各阶段	基本流	活动数据	排放因子	GHG 排放量

4、数据质量评价

数据质量可从定性和定量两个方面对报告使用的初级数据和次级数据进行评价，具体评价内容包括：数据来源、完整性、数据代表性（时间、地理、技术）和准确性。

五、影响评价

1、影响类型和特征化因子选择

选择（IPCC）给出的100年全球变暖潜势（GWP）。

2、产品碳足迹结果计算

六、结果解释

1、结果说明

_____公司生产的_____（填写所评价的产品名称），从_____（填写某生命周期阶段）到_____（填写某生命周期阶段）生命周期碳足迹为_____ kgCO₂e。各生命周期阶段的温室气体排放情况如表 E.2。

表 E.2 粉煤灰基预拌流态固化土产品生命周期各阶段碳排放情况

生命周期阶段	碳足迹（kg CO ₂ e/t）	百分比（%）	备注说明
原辅材料和能源获取阶段			

原辅材料运输阶段				
产品 生产 加工 阶段				

2、假设和局限性说明（可选项）

结合量化情况，对范围、数据选择、情景设定等相关的假设和局限进行说明。

3、改进建议
