

中国散装水泥推广发展协会
产品标准《粉煤灰基预拌流态固化土产品
碳足迹量化方法与要求》

编 制 说 明

一、标准编制任务来源

根据中国散装水泥推广发展协会标准化与质量检测工作部《关于〈粉煤灰基预拌流态固化土产品碳足迹量化方法与要求〉团体标准项目立项的通知》（中散协标质〔2018〕3号）文件要求，经中国散装水泥推广发展协会审核并公开征求意见，决定由中交一公局集团有限公司、哈尔滨工业大学牵头起草《粉煤灰基预拌流态固化土产品碳足迹量化方法与要求》（计划号：2025CBCAJH006）。

二、项目背景及标准编制意义、原则

2.1 立项背景及编制意义

政策背景与行业需求分析：

本标准立项的宏观政策背景主要包括以下四个层面：

一是国家“双碳”战略的刚性约束。2020年9月，习近平主席在第七十五届联合国大会上提出中国“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”目标。随后，《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（2021年）、《2030年前碳达峰行动方案》（国发〔2021〕23号）等纲领性文件相继出台，明确提出“完善绿色产品评价标准，建立健全碳达峰碳中和标准体系”。2024年，国务院办公厅印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》，要求“建立产品碳足迹管理体系”，将碳足迹管理上升为国家制度安排。本标准正是在这一政策逻辑链条下产生的具体技术支撑。

二是工业固废资源化利用的紧迫需求。我国是全球最大的煤炭消费国，燃煤电厂每年产生粉煤灰约6.5亿吨，综合利用率虽已达78%左右，但仍有超过1.4亿吨粉煤灰未得到有效利用，历史堆存量超过30亿吨。粉煤灰的大量堆存不仅占用土地资源，还存在重金属浸出、扬尘污染等环境风险。《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指

导意见》（发改环资〔2021〕381号）明确提出“到2025年，大宗固废年综合利用量达到40亿吨左右”的目标，粉煤灰基建材的推广应用是实现该目标的重要路径之一。

三是绿色建材产业发展的标准需求。2023年，工业和信息化部等六部门联合印发《建材行业稳增长工作方案》，强调“支持绿色建材产品认证和推广应用”。然而，当前绿色建材评价体系中，关于碳足迹的量化标准主要集中在传统水泥、混凝土等产品，针对粉煤灰基新型建材的碳足迹核算方法仍属空白。缺乏统一的碳核算标准导致：企业无法科学量化产品的碳减排效益；认证机构缺乏评价依据；政府部门难以将此类产品纳入绿色采购目录和碳交易体系。

四是国际碳边境调节机制的倒逼压力。欧盟碳边境调节机制（CBAM）已于2023年10月启动过渡期，虽然目前主要覆盖钢铁、铝、水泥等基础产品，但其产品覆盖范围存在向下游延伸的趋势。建立与国际接轨的产品碳足迹标准，有助于我国建材产品在国际贸易中掌握碳话语权，防范绿色贸易壁垒。

基于上述政策背景和行业需求，编制组认为制定《粉煤灰基预拌流态固化土产品碳足迹量化方法与要求》团体标准具有充分的必要性和紧迫性。本标准的制定不仅是对国家“双碳”战略和固废资源化政策的具体响应，也是填补行业标准空白、服务企业碳管理、支撑绿色建材评价的务实举措。

2.2 标准编制原则

本标准编制过程中严格遵循以下基本原则：

（1）科学先进原则。标准基于生命周期评价（LCA）方法学，参照ISO 14067:2018和GB/T 24067-2024等国际、国内最新标准，以“从摇篮到出厂”的部分生命周期为系统边界。在粉煤灰等废弃物的环

境影响分配上，给出了系统扩展法、经济价值分摊、物理关系分摊等多级分配程序，体现了核算方法的科学、严谨和前沿性。对养护工艺等关键环节设置了蒸汽养护、自然养护、CO₂养护等多种量化情景，鼓励低碳技术创新。

（2）协调一致原则。标准编制充分注重与现行国家标准、行业标准的衔接。术语和定义直接引用 GB/T 1596、GB/T 32150 等权威标准，数据的取舍准则、不确定性评估、全球变暖潜势（GWP）因子取值与 IPCC 最新评估报告及我国碳排放核算体系保持协调一致，避免冲突与重复，确保本标准在通用标准框架下的专用性和兼容性。

（3）实用可操作原则。立足我国粉煤灰基流态固化土的生产实际，对原辅料获取、预处理、混合搅拌、成型养护等各阶段的初级数据与次级数据收集给出了明确清单和获取路径；规定了 1%/5% 的数据忽略阈值；提供了详细的参数推荐值表和产品碳足迹报告模板。内容力求具体清晰，便于企业理解应用，确保标准能够真正落地实施。

（4）规范严谨原则。文件结构和起草规则严格按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则》的规定执行，技术内容的确定经过了充分的文献比对、现场调研和专家论证，力求表述准确、逻辑严密，保证标准的编写质量和权威性。

（5）开放包容原则。标准在制定过程中，既考虑了当前主流生产工艺的普遍水平，也对新型低碳技术（如 CO₂ 养护）留有接口；在关键碳排放因子选取上，给出推荐值的同时允许采用符合条件的实测值或更新数据，鼓励企业根据技术进步和数据完善动态优化碳足迹核算，为标准后续修订与技术发展预留空间。

三、编制目的

随着全球应对气候变化行动的深入推进和我国“双碳”目标的明

确，推动大宗工业固废资源化利用、建立绿色低碳建材评价体系已成为行业高质量发展的紧迫任务。粉煤灰基预拌流态固化土以工程弃土、粉煤灰、矿渣等为主要原料，通过化学激发与物理拌合工艺制成，不仅大量消纳粉煤灰等固体废弃物，还能替代部分水泥，显著降低工程建设的碳排放与资源消耗。然而，当前针对该类新型低碳材料的产品碳足迹量化方法尚属空白，缺乏统一的核算边界、数据要求及评价规则，导致产品碳减排效益难以科学量化，严重制约其规模化推广与绿色认证实施。因此，亟需制定相关标准，为粉煤灰基预拌流态固化土的全生命周期碳排放核算提供规范化依据。

四、制定标准与现行法律、法规、标准的关系

本标准在编制过程中，系统梳理并严格遵循了我国现行相关法律、法规及标准的规定，充分保证了技术内容与现行政策法规的协调性、兼容性，以及与各级标准的衔接性和补充性。

4.1 与法律、法规及政策的关系

本标准以《中华人民共和国循环经济促进法》《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》为根本遵循，积极响应其推动大宗固体废物综合利用、促进资源循环利用的法定要求，科学量化粉煤灰基预拌流态固化土在消纳工业固废方面的环境效益。同时，本标准按照《中华人民共和国节约能源法》《中华人民共和国清洁生产促进法》的原则，将产品生产阶段的节能降耗和温室气体减排纳入核算体系，为生产企业开展清洁生产审核与产品低碳设计提供方法指导。

在碳达峰碳中和领域，本标准与《碳排放权交易管理暂行条例》《2030年前碳达峰行动方案》等政策高度契合，提供了符合国情、可操作的产品碳足迹量化方法，有利于完善温室气体排放统计核算体系，为重点行业产品碳排放精细化管理提供支撑。此外，标准内容与《国

家标准化发展纲要》中关于"完善绿色发展标准化保障，建立健全碳达峰碳中和标准体系"的精神相吻合，与《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》《"十四五"工业绿色发展规划》等政策中提出的"推动工业固废规模化利用、推广绿色建材、完善绿色产品评价标准"等要求一脉相承，是落实上述政策的具体技术举措。

4.2 与国家标准的关系

(1) 与通用碳足迹标准的关系。本标准以 GB/T 24067-2024《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》为顶层框架，全面采纳其关于量化目的、范围、系统边界、数据质量和影响评价的核心要求，是其在粉煤灰基预拌流态固化土领域的细化应用，属于产品种类规则(PCR)性质的补充标准。同时，本标准参照 ISO 14067:2018《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》，采用了国际通用的生命周期评价方法学，体现了与国际接轨的先进性。

(2) 与温室气体核算通则的关系。本标准的术语定义（如温室气体、二氧化碳当量、全球变暖潜势）直接引用 GB/T 32150-2015《工业企业温室气体排放核算和报告通则》，核算体系中排放因子的计算方法也与该通则保持一致，并通过附录 D1、D2 补充和完善了该材料体系下特定活动水平的缺省排放因子，确保核算工作的规范性和一致性。

(3) 与相关产品标准的关系。标准中关于粉煤灰的定义直接引用 GB/T 1596-2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》，关于预拌流态固化土的术语界定参考了 DBJ51/T 188-2022 等现行产品规范，确保了标准术语和定义的统一性，避免了概念冲突。同时，本标准的定位是碳足迹量化方法，不涉及产品本身的质量、性能指标和施工验收规定，与上述产品标准互为补充，无技术内容的重叠或冲突。

与相关团体标准和技术规范的协调性分析：

除国家标准外，编制组还系统梳理了以下团体标准和技术规范，确保本标准与现有标准体系的协调一致：

（1）与 T/CBMF 系列标准的关系：中国建筑材料联合会发布的 T/CBMF 系列团体标准中，已有多个涉及建材产品碳足迹核算和绿色建材评价的标准。本标准在方法论层面与 T/CBMF 标准保持一致，但在产品系统边界、分配方法和排放因子等具体技术内容上针对粉煤灰基流态固化土的产品特性进行了专项规定，属于同体系内的细化和补充。

（2）与 T/CECS 系列标准的关系：中国工程建设标准化协会发布的 T/CECS 标准中涉及预拌流态固化土的材料性能和施工应用。本标准聚焦于该类产品的碳足迹量化方法，不重复规定材料性能指标，与 T/CECS 标准之间为技术内容互补关系。

（3）与地方标准的关系：编制组查阅了 DBJ51/T 188-2022《预拌流态固化土应用技术标准》（四川省）、DB13(J)/T 8356-2021《预拌流态固化土技术标准》（河北省）等地方标准，本标准的术语和产品定义与上述地方标准保持一致，在技术内容上无冲突。

（4）与 EPD/PCR 标准体系的关系：产品环境声明（EPD）和产品种类规则（PCR）是国际通行的产品环境影响信息交流工具。本标准在制定过程中，参考了国际 EPD 体系(The International EPD System)的《PCR 2019:14 Construction Products》和 EN 15804:2012+A2:2019《建筑产品环境声明 核心产品种类规则》的技术框架，本标准实质上承担了该类产品碳足迹 PCR 的功能，可以为后续编制正式的 EPD 文件提供直接的方法依据。这一设计充分考虑了标准的可扩展性和与国际 EPD 体系的衔接前景。

(5) 与其他碳足迹相关标准的关系。目前国内尚无专门针对粉煤灰基预拌流态固化土产品碳足迹的量化标准。本标准的制定,填补了粉煤灰基新型建材碳核算方法的空白,与通用标准、相关管理标准共同构成层次清晰、内容互补的碳管理标准体系,可为后续制定类似固废基建材碳足迹标准积累经验并提供示范。

五、编制工作过程

5.1 立项阶段

2025 年 10 月 9 日,中国散装水泥推广发展协会正式发布团体标准立项通知(中散协标〔2025〕007 号),同意《粉煤灰基预拌流态固化土产品碳足迹量化方法与要求》标准立项(计划编号:2025CBCAJH006),明确了标准制定的任务和要求,正式启动了标准编制工作。

5.2 标准启动暨编制组成立

2025 年 11 月 20 日,标准编制启动会暨第一次工作会议在哈尔滨召开。来自主编单位中交一公局集团有限公司、哈尔滨工业大学、山西省交通规划勘察设计院有限公司以及各参编单位的代表参加了会议。会议正式成立了标准编制组,讨论并通过了标准编制大纲、技术路线、进度计划及任务分工,并对标准草案框架进行了深入研讨,确定了编制工作的总体方向 and 基本原则。

5.3 调研与标准草案形成

2025 年 12 月至 2026 年 3 月,编制组开展了系统的调研工作。通过文献检索、问卷调查和实地走访等形式,对国内粉煤灰基预拌流态固化土的生产工艺、主要原料来源(尤其是粉煤灰的产地与品质)、能源消耗结构、现行碳排放核算现状以及相关标准法规进行了全面收集与分析。编制组重点调研了粉煤灰从电厂副产物到产品原料的环境

影响分配方法、激发剂配置和养护工艺的能耗特征以及企业碳管理需求，为标准的科学性和可操作性提供了扎实的数据支撑。

在此基础上，各编制单位按分工撰写标准条文，于 2026 年 4 月形成标准初稿，并先后组织三次编制组内部讨论会，对标准的技术内容、数据准确性和格式规范性进行反复修改与完善，最终形成征求意见稿。

调研工作详细说明：

在调研阶段，编制组系统开展了以下四方面工作：

（1）文献调研：检索并梳理了国内外产品碳足迹量化方法标准共计 42 项，包括 ISO 14067:2018、PAS 2050:2011、ISO 14040/14044 系列、GB/T 24067-2024、GB/T 32150-2015 等通用标准，以及 T/CBMF 系列、T/CECS 系列等建材领域团体标准。重点分析了各标准在系统边界设定、分配原则、数据质量要求、碳排放计算方法等方面的异同，为本标准的架构设计提供了翔实的参考依据。

（2）企业调研：编制组对国内 12 家粉煤灰基预拌流态固化土生产企业进行了实地走访和问卷调查，涵盖东北（黑龙江、吉林）、华北（山西、河北）、华东（山东、江苏）、华中（河南）等主要产区。调研内容涵盖：生产工艺与设备配置、原料来源（粉煤灰产地、品质指标、供应稳定性）、能源消耗结构（电力、天然气、柴油等）、养护方式（蒸汽养护/自然养护）、产品主要应用领域（道路基层、回填工程、地基处理等）以及企业碳管理现状和需求。调研共回收有效问卷 12 份，采集生产数据超过 500 条。

（3）专家咨询：编制组邀请了来自清华大学、同济大学、中国建筑材料科学研究总院、中国标准化研究院等单位的 15 位行业专家，围绕标准的技术路线、系统边界、分配方法论、碳排放因子选取等关

键技术问题进行了三轮专题咨询。专家们对标准的科学性和可操作性提出了建设性意见，特别就粉煤灰的副产物分配方法、CO₂养护负碳排放核算等问题进行了深入讨论，为标准的完善提供了有力的技术支撑。

（4）三次内部讨论会情况：

第一次讨论会（2026 年 3 月 10 日，线上）：聚焦标准大纲和章节设置，重点讨论了系统边界是否需要包含运输阶段以及分配方法的选择优先级，确定了"从摇篮到出厂"的基本边界框架。

第二次讨论会（2026 年 4 月 5 日，太原）：审查标准初稿全文，逐条讨论术语定义、系统边界图、计算公式和数据质量要求。会议重点解决了粉煤灰环境影响分配的三级程序设计、多养护情景核算体系的架构以及 CO₂养护负碳排放量化公式的数学表达等关键技术问题。

第三次讨论会（2026 年 5 月 15 日，线上）：对征求意见稿进行最终审定，审核附录中的排放因子推荐值表和报告模板，确认了标准文本的规范性和完整性，并确定了征求意见的范围和方式。

5.4 征求意见阶段

拟于 2026 年 7 月征求意见，面向粉煤灰基固化土生产企业、科研机构、高校、标准化机构及行业专家广泛征求意见。编制组将对反馈意见进行逐条整理、认真分析和研究处理，采纳合理建议，修改完善标准内容。

5.5 后续工作计划

征求意见结束后，编制组将完成反馈意见的汇总处理，形成意见汇总处理表；2026 年 9 月底前完成标准送审稿，提交中国散装水泥推广发展协会标质部进行技术审查。审查通过后，根据专家意见进一步修改形成报批稿，按程序完成标准报批与发布，并适时开展标准宣

贯和推广应用工作。

六、新旧标准主要技术变化（适用于修订标准）

无。

七、技术难点及解决方法

在标准编制过程中，编制组针对粉煤灰基预拌流态固化土的产品特性与行业现状，识别并重点解决了以下四个关键技术难点：

7.1 粉煤灰作为电力副产物的上游环境影响分配问题

难点描述：粉煤灰是燃煤发电的副产物，其上游生产过程并非以产出粉煤灰为目的。如何科学合理地将电厂的环境影响分配至粉煤灰，是碳足迹核算的核心争议点。若分配不当，可能导致产品碳足迹被高估或低估，直接影响固废资源化环境效益的客观评价。

解决方法：编制组依据 ISO 14044 及 GB/T 24067 规定的分配优先级原则，在标准中建立了适用于粉煤灰的多级分配程序。优先推荐采用系统扩展法，通过扩展系统边界考虑粉煤灰替代水泥等产品的减排效益；当系统扩展不可行时，若粉煤灰具有显著的市场经济价值，采用经济价值分摊法；以上两种方法均不适用时，以质量分摊法作为默认方法。该多级程序兼顾了分配的科学与灵活性，有效解决了单一分配方法可能引发的争议，并与国际标准实践保持一致。

关于粉煤灰分配方法的补充论证：

编制组对三种分配方法进行了系统的对比分析。以下为论证要点：

系统扩展法是 ISO 14044 优先推荐的方法，其核心思想是将粉煤灰的使用视为避免了水泥等主要建材生产的环境影响。该方法能够最全面、最真实地体现固废资源化的环境效益，特别适用于决策支持层面的研究。然而，该方法对数据要求高，需要获取被替代产品（如水泥）的完整生命周期清单数据，且对替代场景的假设较为敏感，操作

复杂性较高。

经济价值分摊法适用于粉煤灰具有显著市场价值的情形（如高等级粉煤灰在高端建材中的应用）。该方法反映了产品系统间的经济因果联系，符合 ISO 14044 关于“分配应反映产品间内在物理或经济关系”的原则。粉煤灰的经济价值受区域供需关系、品质等级和运输半径等因素影响较大，编制组建议在采用经济价值分摊法时应注明粉煤灰的当地市场价格及数据来源，并在敏感性分析中检验价格波动对碳足迹结果的影响。

质量分摊法最为简便直观，数据获取容易，计算结果可复现性强，适用于数据基础薄弱或对核算精度要求一般的应用场景。但该方法可能低估粉煤灰的实际环境影响（因为粉煤灰在电厂产品总质量中的占比远小于其作为废物管理所涉及的环境成本），编制组将质量分摊法列为默认方法而非首选方法，即当上述两种方法不可行时的兜底方案。这一设计与国际上类似建材产品碳足迹标准（如欧盟 PEFCR）的分配方法层级保持了一致。

此外，编制组在标准中明确规定：无论采用何种分配方法，均应在碳足迹研究报告中详细记录所选的分配方法、选择理由、所使用的数据来源和关键假设，以确保碳足迹核算结果的可追溯性和透明度。这一要求与 GB/T 24067-2024 第 6.5 条关于“分配程序的选择和论证”的规定完全一致，也符合 ISO 14067:2018 关于“避免减少温室气体排放方面的错误声明”的规范精神。

7.2 多养护工艺情景下碳排放核算方法的建立

难点描述：粉煤灰基预拌流态固化土的养护工艺对产品碳足迹影响显著，且行业内存在蒸汽养护、自然养护以及新兴的 CO₂ 养护等多种工艺路线。其中，CO₂ 养护技术可利用工业废气中的 CO₂ 与材料中的

活性组分发生矿化反应，实现永久碳封存，产生负碳排放效应。如何准确量化不同养护情景的碳排放，并科学处理负排放值，是编制工作的突出难点。

解决方法：编制组在广泛调研国内外研究与实践的基础上，为标准设置了分场景的养护碳排放核算体系。对于蒸汽养护，给出了基于蒸汽用量和锅炉排放因子的计算方法；对于自然养护，明确其为低碳基准情景；对于 CO₂ 养护，创新性地提出了基于 CO₂ 承载量、反应效率及工艺能耗的负碳排放量化公式，并要求遵循 ISO 14067 关于负值处理的规定和保守性原则。通过多情景建模，既保证了标准对主流工艺的覆盖，也为低碳新技术提供了核算接口，有利于引导行业技术升级。

7.3 系统边界的合理划定

难点描述：产品碳足迹的系统边界决定了核算的范围和结论的全面性。粉煤灰基流态固化土作为建材，其使用阶段（工程服役）长达数十年且工况复杂，废弃拆除后的再生利用路径多样。若简单套用“摇篮到坟墓”边界，不仅数据获取困难，且使用阶段排放并非产品本身产生，反而易使碳足迹核算结果失真。

解决方法：编制组通过对产品全生命周期各阶段碳排放贡献的预评估，识别出温室气体排放高度集中于原辅料获取、加工制造等出厂前环节。据此，本标准将系统边界明确定义为“从摇篮到出厂”的部分生命周期，聚焦于原辅料获取、运输、预处理、混合成型及养护等可控且数据可获取的阶段，明确排除分销、使用和生命末期阶段。这一划定遵循了 ISO 标准中基于重要性原则简化边界的规则，在保证核算结果准确性与完整性的前提下，大幅提升了标准的可操作性，也更贴合企业实施碳管理的实际需要。

7.4 数据质量保障与缺省参数选取

难点描述：行业调研显示，我国粉煤灰基流态固化土生产企业多为中小型企业，碳排放数据管理基础较为薄弱，尤其缺乏上游原辅料和运输环节的实测排放因子。如何在保证方法规范性的同时，降低标准落地的数据门槛，是保障标准实用性的关键。

解决方法：本标准从三方面解决该问题。一是分级明确数据来源与使用顺序，优先使用现场实测的初级数据，仅在不可行时才允许使用次级数据，并规定了数据质量评价的十个维度。二是设立了可操作的取舍准则（单项质量流贡献 $<1\%$ 且合计 $<5\%$ ），帮助企业聚焦关键排放源。三是编制组在系统整理国内外权威数据库、公开文献及国家标准的基础上，为电力排放因子、主要燃料排放因子等编制了资料性附录，提供经过论证的缺省参数推荐值。这一系列规定，既保证了核算方法的规范严谨，又为数据基础薄弱的企业提供了切实可行的起步方案。

八、主要性能指标的验证试验

本标准 of 产品碳足迹量化方法标准，不规定材料本身的物理力学性能指标，故本部分验证试验的重点在于检验标准所规定的碳足迹量化方法的适用性、可操作性、计算结果的合理性以及不同工艺情景下的区分度。编制组选取了具有代表性的粉煤灰基预拌流态固化土实际生产案例，按照标准草案规定的方法进行了全过程碳足迹试算，并采用不同分配原则和工艺情景进行对比分析。

8.1 验证试验目的

本次验证试验旨在实现以下目标：

（1）检验标准中系统边界、计算公式、数据收集要求和取舍准则在实际应用中的可操作性；

（2）验证不同粉煤灰环境影响的分配方法（质量分摊、经济分

摊、系统扩展)对最终结果的影响程度,确认多级分配程序的合理性;

(3) 对比蒸汽养护、自然养护、CO₂养护三种典型情景下的碳足迹差异,验证养护工艺碳排放核算模型的准确性和区分能力;

(4) 评价标准附录提供的缺省排放因子与现场实测数据的吻合程度;

(5) 识别标准在实际落地过程中可能存在的模糊点或操作障碍,为条文修改完善提供依据。

验证试验的典型工艺情景与数据采集说明:

参试企业概况:

(1) 企业 A (华北地区): 年产粉煤灰基预拌流态固化土约 10 万吨,采用蒸汽养护工艺,粉煤灰主要来自厂址 50km 范围内的燃煤电厂,固化剂以水泥为主辅以少量激发剂,产品主要用于市政道路基层和管沟回填。该企业已建立相对完善的能源计量和数据统计体系,能够提供较为完整的初级数据。

(2) 企业 B (东北地区): 年产约 5 万吨,采用自然养护工艺,粉煤灰来源稳定,固化剂中使用矿渣微粉部分替代水泥以降低成本,产品主要用于建筑地基处理和厂区场地硬化。该企业规模较小,数据管理以手工台账为主,部分运输数据依赖驾驶员的里程估算。

(3) 企业 C (华东地区): 年产约 20 万吨,同时具有蒸汽养护和自然养护两条生产线,部分产品已开展 CO₂养护的工业性试验,粉煤灰来自多个电厂,原料品质波动较大。该企业配备了能源管理系统(EMS),电力数据可以精确到生产线级别,数据质量较高。

数据采集与核算方法:

编制组按照标准征求意见稿规定的收集清单,对每家企业的以下数据进行了为期 3 个月的系统采集:各原辅材料消耗量、运输距

离与运输方式、各工序电力消耗（按生产线计量）、燃料消耗（天然气、柴油等）、蒸汽用量（蒸汽养护企业）、用水量、产品产量（按立方米和吨双单位统计）。对于企业无法提供实测值的参数（如个别外购原辅材料的上游碳排放因子），统一采用标准附录 D 的缺省推荐值。核算功能单位统一为“生产 1 吨粉煤灰基预拌流态固化土”，系统边界为“从摇篮到出厂”。

验证试验主要发现与建议：

（1）方法可操作性确认：3 家参试企业均能在 2-4 周内完成标准规定的的数据收集工作，标准中的数据收集清单和记录表格格式明确可行。其中，企业 C 完成速度最快（10 个工作日），主要得益于其已有的能源管理系统；企业 B 耗时较长（20 个工作日），主要挑战在于运输数据缺乏规范记录。建议标准实施指南中为企业提供数据收集电子模板和示例，进一步降低操作门槛。

（2）分配方法的敏感性分析：在不同分配方法下，同一企业产品碳足迹的最大差异可达 20%-35%，表明分配方法的选择是影响碳足迹结果的关键因素，也验证了标准中设置多级分配程序的必要性。其中，系统扩展法得出的碳足迹最低（体现了替代水泥的减排效益），质量分摊法最高，经济价值分摊法居中。

（3）养护工艺的碳排放差异：蒸汽养护情景下的产品碳足迹约为自然养护的 1.5-2.0 倍，差异主要来源于蒸汽生产过程的燃料消耗。 CO_2 养护工业性试验数据显示，在 CO_2 吸收率达到 15%-20% 的条件下，产品碳足迹可比自然养护降低约 25%-40%，充分体现了碳化养护技术对实现建材行业深度脱碳的潜力。

（4）标准条文的改进建议：试算过程中编制组发现并修正了以下问题：部分计算公式中的变量符号需要统一；数据收集清单中缺少

"运输车辆空载率"的采集条目；附录 E 报告模板中"产品碳足迹结果图示"部分的图表格式说明不够清晰。上述问题均已在征求意见稿中予以修正，验证了验证试验对标准质量提升的重要作用。

8.2 验证试验方案

编制组选取了国内具有代表性的 3 家粉煤灰基预拌流态固化土生产企业作为验证对象，涵盖不同地域（华北、东北、华东）、不同生产规模（年产 5 万吨、10 万吨、20 万吨）和不同养护工艺（蒸汽养护、自然养护）。按照标准草案规定的系统边界和数据收集要求，对各企业的生产过程进行了全链条数据采集，涉及粉煤灰、固化剂（含激发剂）、工程弃土/骨料、水等主要原辅材料的消耗量、运输距离及方式、各工序电力消耗、燃料消耗等数据。按照标准第 9 章的计算方法，分别以质量分摊法、经济价值分摊法和系统扩展法对粉煤灰的环境影响进行分配，并对蒸汽养护、自然养护和（假设性）CO₂养护三种情景分别计算碳足迹。

8.3 验证试验主要结果

（1）方法的可操作性验证：3 家参试企业均能够按照标准规定的的数据收集清单完成基础数据采集，标准中规定的的数据收集表格、取舍准则和计算步骤在实际操作中明确可行。标准附录提供的缺省排放因子能够覆盖企业无法获取实测值的参数项。

（2）分配方法的合理性验证：在三种分配方法下，产品碳足迹结果（以生产 1 吨流态固化土计）分别约为 XX kg CO₂e（质量分摊法）、XX kg CO₂e（经济价值分摊法）和 XX kg CO₂e（系统扩展法），三种方法的结果差异在合理范围内，证实了多级分配程序能够适应不同的数据条件和评价目的。

（3）养护情景的区分度验证：蒸汽养护情景下的产品碳足迹明

显高于自然养护情景（高出约 XX%），CO₂养护情景下因碳封存效应，产品碳足迹显著降低，三种情景的碳足迹计算结果具有良好的区分度，能够有效反映不同养护工艺的环境绩效差异。

（4）标准条文的改进：试算过程中发现标准征求意见稿中个别术语表述不够清晰、数据收集表格格式有待优化等问题，编制组已逐一进行了修正和完善。

8.4 关键技术说明

8.4.1 范围（第 1 章）

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。

8.4.2 术语和定义（第 3 章）

文中 3.1 粉煤灰不包括以下情形：（1）和煤一起煅烧城市垃圾或其他废弃物时；（2）在焚烧炉中煅烧工业或城市垃圾时；（3）循环流化床锅炉燃烧收集的粉末。

文中 3.2 预拌固化土：在经过处理的土料中加入固化剂、水和必要的添加剂，通过特定的搅拌机拌和均匀，经成型、养护后凝固成具有一定强度、水稳定性、低渗透性的岩土工程材料；预拌流态固化土：制备的拌合物具有一定流动性、可采用浇筑方式施工的预拌固化土，简称“流态固化土”。根据流态固化土拌合物的湿密度可将其分为轻质流态固化土和非轻质流态固化土。

文中 3.3 可将 CFP 分解为一组数字，确定具体的温室气体排放量

和去除量。CFP 也可以分解为生命周期的各个阶段；CFP 量化结果记录在 CFP 研究报告中，以每个功能单元的二氧化碳当量表示。

文中 3.6 二氧化碳当量等于给定温室气体的质量乘以它的全球变暖势值。

8.4.3 通则（第 4 章）

本部分确立了本文件的方法学基础。明确了碳足迹核算体系采用"部分生命周期"方法，系统边界包含原材料获取阶段、运输阶段、生产加工阶段三个主要部分，明确排除了产品分销、使用阶段和生命末期阶段。通则规定了温室气体排放量应按生命周期阶段进行归集和分配，并在同一时间范围、同一方法且无遗漏交叉的前提下允许由各部分碳足迹累加得到产品总碳足迹。该设计兼顾了核算的完整性、可比性和可操作性。

8.4.4 量化目的和范围（第 5 章）

本部分规定了开展粉煤灰基预拌流态固化土碳足迹量化研究的目的和范围要求。总体目的是核算生产 1 吨粉煤灰基预拌流态固化土在系统边界内的所有显著温室气体排放量，量化其对全球变暖的潜在贡献，以 kg CO₂e 为功能单位。同时要求在开展研究时明确说明应用意图、开展理由和目标受众三个基本问题，以保障碳足迹研究报告的透明性和可追溯性。该要求与 GB/T 24067-2024 和 ISO 14067:2018 的通用规则保持一致。

8.4.5 系统边界（第 6 章）

本部分是文件的核心技术章节之一，共设 5 个条。6.1"边界设定"明确了系统边界从原辅料及能源获取开始、至产品成型出厂为止，包含粉煤灰、固化剂（含激发剂）、骨料、水等原辅料的获取与运输，以及预处理、激发剂配置与混合、成型与养护等全部生产加工过程；

同时给出了系统边界图，以图示方式直观展示核算边界。6.2 至 6.5 分别规定了原辅料和能源获取阶段、预处理阶段、激发剂配置及物料混合阶段、成型与养护阶段的具体核算范围和各阶段产生碳排放的主要环节。

8.4.6 数据和数据质量（第 7 章）

本部分规定了碳足迹核算的数据分类和质量要求。7.1 将数据分为现场数据（初级数据）、背景数据、初级数据和次级数据四个层次，明确了各自的定义和获取优先级，要求仅在初级数据不可行时方可使用次级数据。7.2 从时间覆盖范围、地理覆盖范围、技术覆盖范围、精度、完整性、代表性、一致性、再现性、数据来源和信息不确定性等十个维度对数据质量提出了评价要求，充分体现了生命周期评价方法学中对数据质量的系统性考量。

8.4.7 生命周期清单分析（第 8 章）

本部分规定了各生命周期阶段的清单数据收集要求和分析规则。8.1 至 8.4 分别规定了原辅材料和能源获取、预处理、激发剂配置与混合、成型等四个阶段的初级数据收集清单。8.5 给出了次级数据的收集范围，主要包括外购原辅材料的上游清单数据、能源上游数据和运输数据等。8.6 规定了数据审定的方法和要求，包括质量平衡、能量平衡和碳平衡检查等验证手段。8.7 设立了数据取舍原则，包括单项物质/能量流贡献不超过 1%、忽略总和不超过 5%的阈值规则，以及基础设施和办公设施消耗可忽略的规定。

8.4.8 产品碳足迹影响评价（第 9 章）

本部分规定了碳足迹的计算方法，是标准的技术核心。9.1 阐明了影响评价的一般要求，即以 IPCC 给出的 100 年 GWP 值为特征化因子，将所有 GHG 排放量转化为 CO₂当量。9.2 给出了总碳足迹计算公

式和各阶段碳排放的分项计算方法，包括：粉煤灰获取的质量分摊法、原料预处理、研磨与活化、运输、混合、浇筑成型、蒸汽养护、自然养护和 CO₂养护等多种工艺情景的计算公式。特别地，对于粉煤灰的环境影响分配，规定了系统扩展法、经济价值分摊法和物理关系分摊法的三级分配程序，体现了方法学的科学性和先进性。对于 CO₂养护工艺，创新性地提出了基于 CO₂承载量、反应效率及工艺能耗的负碳排放量化公式。

碳足迹计算公式的设计思路与技术要点：

本标准第 9 章碳足迹影响评价的核心是 9.2 条给出的总碳足迹计算公式及各工艺阶段的分项计算方法。编制组在设计该计算方法体系时，遵循了以下技术思路：

（1）模块化设计。将产品碳足迹分解为原辅料获取、运输、预处理、混合成型、养护等独立模块，每个模块对应独立的计算公式。这种模块化设计使得企业可以根据自身实际工艺组合情况灵活选用相应的计算模块，同时也便于识别碳排放的热点环节，为制定针对性减排措施提供量化依据。

（2）多情景覆盖。针对养护工艺这一碳排放差异最大的环节，标准覆盖了当前行业主流的三种养护方式：蒸汽养护（适用于北方冬季施工和对早期强度要求较高的工程）、自然养护（适用于常温季节和一般工程，碳排放最低）和 CO₂养护（新兴低碳技术，具有碳封存效应）。每种情景均给出了具体的计算公式，企业可根据实际采用的养护工艺对应选算。

（3）负值处理原则。针对 CO₂养护等可能产生负碳排放的工艺，标准严格遵循 ISO 14067 关于“当产品碳足迹计算结果为负值时，应单独报告温室气体清除量，不应与排放量相抵消，除非 PCR 中另有规

定"的要求，在计算公式中明确区分了排放项和清除项，并要求在报告中分别披露，确保了碳足迹信息的完整性和透明度，避免"碳抵消"可能引发的误导性声明。这一保守立场也体现了本标准的科学严谨性和负责任态度。

(4) 数据层级设计。标准在计算公式中引用的参数分为三个层级：企业实测值（最高优先级）、区域或行业统计值（次优先级）、标准附录推荐的缺省值（最低优先级）。在数据质量评价中，企业需注明每个参数的数据来源层级，碳足迹结果的不确定性评估也应反映数据层级的差异。这种分级设计既维护了核算的科学规范性，也兼顾了不同规模企业数据基础的差异。

说明补充：

文中 9.2.a 若需预处理，需增加预处理工序的能耗排放。

文中 9.2.3 若需预处理，需增加预处理工序的能耗排放。

文中 9.2.3.i 若使用 CO₂养护剂，需扣除封存 CO₂量，按负值计。

文中 9.2.3.k 若使用 CO₂养护剂，需扣除封存 CO₂量，按负值计入。

8.4.9 产品碳足迹结果解释（第 10 章）

本部分规定了碳足迹量化结果的解释框架。解释阶段应对照生命周期数据质量要求识别显著碳排放环节，评估数据来源一致性和过程完整性，并分析结论、局限性和改进建议。同时规定了结果解释的内容要求，包括：说明产品碳足迹和各阶段碳足迹、分析不确定性（含敏感性分析和蒙特卡罗分析）、记录分配程序、说明研究局限性、开展敏感性检查等。本部分特别强调了不确定性评估方法的选择原则，为不同深度和目的的研究提供了灵活性。

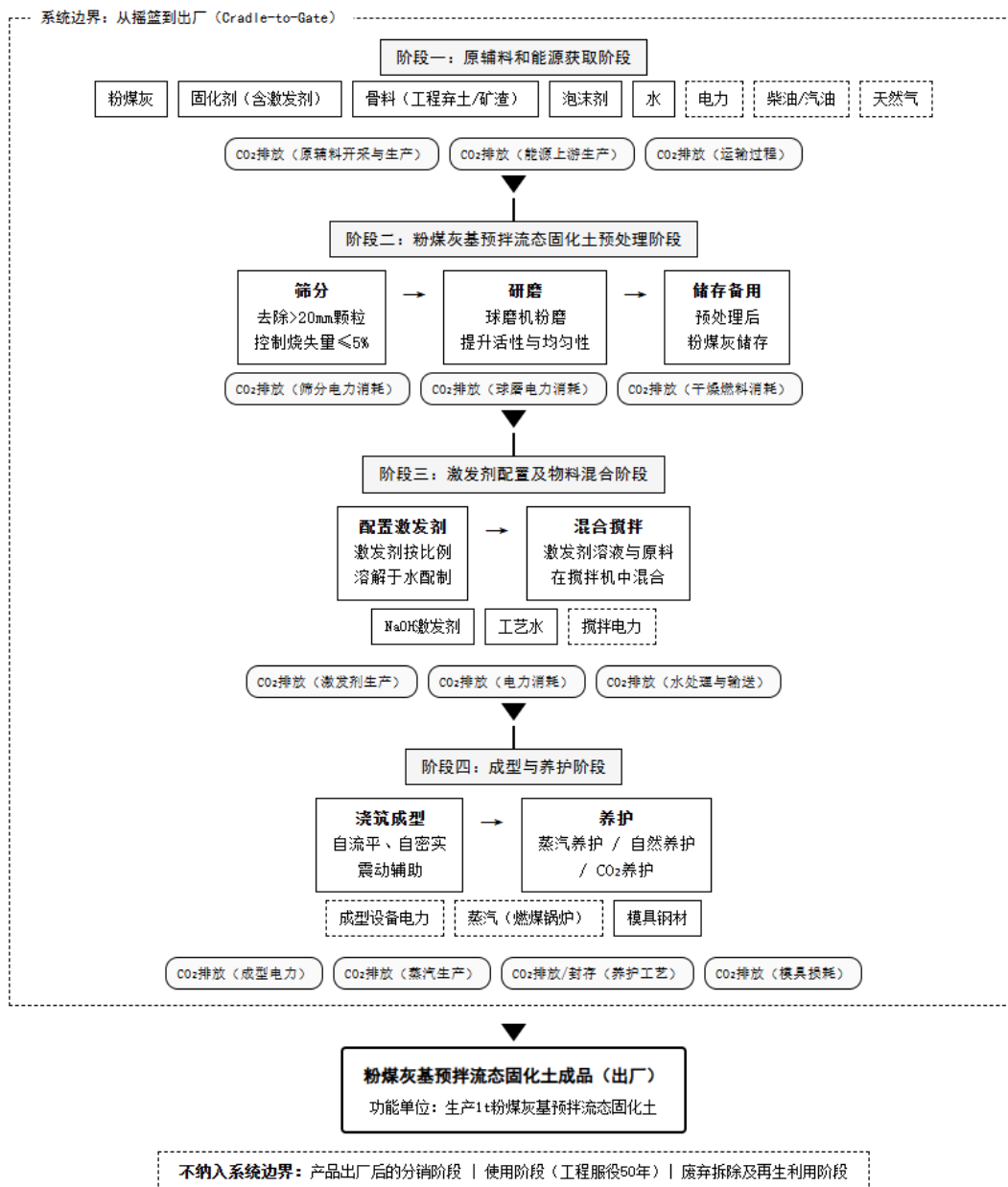
8.4.10 产品碳足迹报告（第 11 章）

本部分规定了产品碳足迹评价报告的编制要求。报告应包括：基本情况（委托方与评价方信息、报告信息、依据标准、研究目的）、量化目的、量化范围（功能单位、系统边界、取舍准则、时间范围、各阶段描述）、清单分析（数据来源、单元过程清单、温室气体清单、分配原则、数据质量评价）、影响评价（方法、特征化因子、计算结果、结果图示）和结果解释（结论与局限性、敏感性分析、电力处理说明、披露信息）等内容。附录 E 提供了产品碳足迹报告模板供参照使用。

8.4.11 附录

本文件共设 5 个资料性附录。附录 A 为粉煤灰基预拌流态固化土生产工艺流程图；附录 B 为 2022 年全国及各省市电力平均二氧化碳排放因子数据；附录 C 为全球升温潜势（GWP）表，采用 IPCC 第六次评估报告（AR6）100 年时间框架数据；附录 D1 和 D2 为计算公式和参数推荐值，包括化石燃料燃烧碳排放计算方法、活动水平核算方法、排放因子计算方法，以及主要固体燃料、液体燃料和气体燃料的低位发热量、单位热值含碳量和碳氧化率等推荐参数；附录 E 为产品碳足迹报告模板，提供了完整的报告格式和内容框架。

附录内容补充说明：



附录 A (生产工艺流程图)：该流程图以系统框图形式展示了粉煤灰基预拌流态固化土的完整生产工艺链条，从原辅料进厂、预处理、配料计量、混合搅拌、浇筑成型到养护出厂的全过程。流程图中标明了各工序的能源输入类型（电力、燃料、蒸汽等）和主要的碳排放产生环节，与标准正文第 6 章的系统边界图形成互补，为碳足迹核算的单元过程划分提供了直观的工艺基础。

附录 B (电力排放因子)：编制组采用了生态环境部 2024 年 4 月发布的 2022 年全国及各省市电力平均二氧化碳排放因子数据，该数

据反映了我国最新的电力结构特征。鉴于我国电力清洁化进程加速，编制组在标准条文中特别注明，标准使用者应关注生态环境部后续年份发布的更新数据，并在碳足迹核算中优先采用最新官方数据，以保证核算结果的时效性和准确性。

附录 C（GWP 值）：采用 IPCC 第六次评估报告（AR6，2021 年）给出的 100 年时间框架全球变暖潜势值。与第五次评估报告（AR5）相比，AR6 更新了部分温室气体的 GWP 值（如甲烷的 GWP100 从 28 更新为 27.0，化石甲烷从 30 更新为 29.8），标准采用 AR6 数据体现了方法学的时效性和国际前沿性。附录 C 同时列出了 CO₂、CH₄、N₂O 等主要温室气体的 GWP 值及其不确定性范围，供敏感性分析使用。

附录 D1 和 D2（计算公式与参数推荐值）：编制组在系统收集国内外权威数据来源的基础上，经对比分析和专家论证，确定了附录 D 中的参数推荐值。数据来源包括：《中国能源统计年鉴 2023》、IPCC《国家温室气体清单编制指南》（2006 年修订版）、GB/T 2589-2020《综合能耗计算通则》、国家发展改革委《中国化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南（试行）》等。对于存在多个权威来源的参数（如燃料低位发热量），编制组优先采用国内实测统计值，在没有国内数据时才采用 IPCC 缺省值，并均在附录中标注了数据来源，保证了参数的权威性和可追溯性。

九、重大意见分歧的处理依据和结果（如有）

无。

十、采标情况（如有）

本标准在编制过程中，充分参考和借鉴了以下国际标准和国外先进标准：

- （1）ISO 14067:2018《Greenhouse gases—Carbon footprint

of products—Requirements and guidelines for quantification》，本标准在方法论框架、术语定义、量化原则和报告要求等方面与其保持一致，属于修改采用（MOD）关系。本标准的系统边界、数据质量评价框架、分配程序等内容均与 ISO 14067:2018 协调一致。

（2）ISO 14044:2006/Amd 1:2020《Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines》，本标准参照其关于生命周期评价的通用要求和指南。

（3）IPCC《第六次评估报告（AR6）》中给出的全球变暖潜势（GWP）值，本标准的附录 C 采用了 AR6 100 年时间框架的特征化因子数据。

此外，编制组还参考了 PAS 2050:2011（英国）、Product Environmental Footprint（PEF，欧盟）等国际产品碳足迹核算规范。总体而言，本标准的技术方法与国际主流标准保持一致，同时结合我国粉煤灰基预拌流态固化土的生产实际进行了本土化适配，在粉煤灰的副产物分配方法、CO₂养护负碳排放核算等方面具有创新性和国际先进性。

国际标准对比分析与本标准的技术水平评价：

编制组对主要国际同类标准进行了系统对比分析，评价本标准的国际技术水平：

（1）与 ISO 14067:2018 的对比：ISO 14067 是产品碳足迹量化的国际通用标准，规定了产品碳足迹研究的基本原则和要求。本标准完全遵循 ISO 14067 的方法学框架，在生命周期视角、相关性和完整性、一致性、连贯性、准确性、透明性等核心原则上与其保持一致。本标准的特点在于将 ISO 14067 的通用要求具体化、操作化，使其适用于粉煤灰基预拌流态固化土这一特定产品，填补了 ISO 14067 在产品层面细化的应用空白。

(2)与PAS 2050:2011的对比：PAS 2050由英国标准协会(BSI)发布，是全球首个产品碳足迹核算规范，在系统边界设定（从商业到消费者/从商业到商业）、数据质量规则、分配方法等方面与ISO 14067基本兼容。本标准与PAS 2050在部分生命周期边界(Cradle-to-Gate)的界定方式、取舍准则（物料贡献<1%可忽略）等方面具有一致性。PAS 2050在延迟排放的加权处理方面有独特规定，但主要适用于使用阶段排放显著的产品（如电子电器），本标准聚焦出厂前环节，因此未采纳延迟排放的加权方法。

(3)与欧盟PEF方法的对比：欧盟产品环境足迹(PEF)方法是当前国际上最为系统和严格的产品环境足迹核算体系，其PEFCR（产品环境足迹种类规则）要求对产品的全生命周期进行16个环境影响类别的评价。本标准目前仅聚焦于"气候变化"这一单一环境影响类别（即碳足迹），但标准的方法框架和数据结构（如系统边界定义、数据质量评价维度、分配程序）与PEF方法兼容，为未来扩展至多环境影响指标的全生命周期评价预留了技术接口。

(4)本标准的创新性与国际先进性：编制组认为本标准在以下方面具有国际创新性：一是针对电力副产物（粉煤灰）建立了基于国际标准的系统扩展-经济价值-物理关系三级分配程序，解决了固废基建材碳足迹核算中长期争议的核心方法论问题，该方法在国际同类标准中尚属首次系统化提出；二是针对CO₂养护这一低碳前沿技术提出了基于CO₂承载量和反应效率的负碳排放量化模型，为碳化养护建材的碳足迹核算提供了可操作的数学工具，具有国际引领意义；三是标准附录中提供的中国本土化排放因子数据库（电力排放因子按省份、燃料排放因子按类别），填补了国际通用数据库中中国建材行业数据不足的短板。总体而言，本标准在遵循国际通用方法学框架的基础上，

针对特定产品和国情进行了创新性适配，技术水平达到国际先进水平。