

《基于项目的二氧化碳减排量评估技术
规范 水泥制品行业养护固碳项目》
征求意见稿编制说明

标准编制组

二零二五年九月

目 录

| | |
|---|----|
| 1 工作简况 | 1 |
| 1.1. 任务来源 | 1 |
| 1.2. 背景和意义 | 1 |
| 1.3. 主要参加单位和工作组成员 | 2 |
| 1.4. 主要工作过程 | 2 |
| 2 标准编制原则和主要内容 | 3 |
| 2.1. 编制原则 | 3 |
| 2.2. 主要内容 | 3 |
| 3 主要试验（或验证）情况分析 | 11 |
| 3.1. 固碳量测算方法 | 11 |
| 3.2. 应用案例 | 1 |
| 4 标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明 | 8 |
| 5 产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效益等情况 | 8 |
| 6 采用国际标准和国外先进标准情况 | 9 |
| 7 与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性 | 9 |
| 8 重大分歧意见的处理经过和依据 | 9 |
| 9 标准性质的建议说明 | 9 |
| 10 贯彻标准的要求和措施建议 | 10 |
| 11 废止现行相关标准的建议 | 10 |
| 12 其它应予说明的事项 | 10 |

《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥制品行业 养护固碳项目》标准编制说明

1 工作简况

1.1. 任务来源

《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥制品行业养护固碳项目》行业标准 2024 年 12 月由工业和信息化部批准立项(项目计划号 2024-1904T-JC), 归口单位为建材工业综合标准化技术委员会。编制任务由中国建筑材料科学研究总院有限公司负责牵头组织。立项文件见《工业和信息化部办公厅关于印发 2024 年第六批行业标准修订计划的通知》(工信厅科函〔2024〕503 号)。

1.2. 背景和意义

养护固碳技术作为一种 CO₂ 转化利用技术, 是建材行业降低碳排放, 实现碳中和的重要技术途径之一, 近年来, 养护固碳技术在工业应用方面也取得了较大的进展, 建成了工业烟气矿化养护混凝土砖、CO₂ 压力矿化养护硅酸钙板、碳矿化养护混凝土砌块等多条中试线和示范生产线, 如华新武穴的水泥窑烟气碳矿化制备固碳砖生产线, 河南强耐建设的碳矿化养护蒸压砖万吨级工业应用, 以及武汉建材院正在建设的大幅面板材产业化生产线成套技术应用推广, 标志着该技术已具备产业化条件。然而, 由于缺乏规范的减排量评估方法, 不同项目间的减排效果难以横向比较, 影响了技术的进一步推广和市场认可度。本标准正是基于这一需求, 提出水泥制品养护固碳项目碳减排量评价方法, 为技术的推广应用提供规范性, 使各项目的碳减排量具备可比性。

本标准的制定旨在建立科学、统一的减排量评估体系, 规范项目边界界定、监测方法选择和核算流程实施等关键技术要求。通过填补该领域标准空白, 将为水泥制品养护固碳技术的推广应用提供重要技术支撑, 促进碳减排量的规范化核算和市场化交易, 推动建材行业绿色低碳转型, 助力实现国家"双碳"战略目标。同时, 标准实施还将为相关企业参与碳交易市场提供可靠依据, 提升行业绿色竞争力。

1.3. 主要参加单位和工作组成员

本标准的牵头单位为中国建筑材料科学研究总院有限公司。参与编制单位包括苏州混凝土水泥制品研究院有限公司、中国标准化研究院、清华大学、同济大学、中南大学、河南理工大学、华新水泥股份有限公司、华润水泥控股有限公司、中国建筑第五工程局有限公司等。

牵头单位负责标准草拟、研究工作组织实施、标准研究讨论、标准征求意见稿编制，并组织标准参与单位共同参与工作方案、试验方法、主要修改点、关键技术指标、标准基本框架以及标准文件的研究讨论，组织多家单位进行试验样品征集与制备，进行比对试验。

表 1 主/参编单位任务分工

| 单位名称 | 负责人/参与人 | 工作分工 |
|------------------|------------|--------------------------------------|
| 中国建筑材料科学研究总院有限公司 | 鄧 晓 房晶瑞 | 标准编制工作的总体指导、组织实施、标准框架确定，标准文本及编制说明起草。 |
| 苏州混凝土水泥制品研究院有限公司 | 薛万银 骆静静 | 负责水泥制品行业背景调研和试验验证 |
| 河南理工大学 | 管学茂 朱建平 | 水泥制品养护固碳项目调研和固碳量评估 |
| 中南大学 | 元 强 张苏辉 | |
| 华新水泥股份有限公司 | 田建平 | |
| 华润水泥控股有限公司 | 林永权 张 宾 | |
| 注：单位排名和署名不分前后 | | |

1.4. 主要工作过程

本标准在建材工业综合标准化技术委员会统一协调管理下，由中国建筑材料科学研究总院有限公司负责牵头组织各参编单位共同编制完成。标准编制工作组的主要工作过程如下：

- 2024 年 12 月 31 日，工信部下达标准制定项目的通知，标准编制组成立。
- 2025 年 1 月~3 月，标准负责人联络邀请各优势单位共同制定本标准，形成标准编制组，完成标准草案。

- 2025 年 4 月 16 日，召开标准启动会暨第一次工作会，明确标准编制工作分工及进度安排。与会专家建议撰写两个版本，即基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范、水泥制品行业养护固碳项目固碳量核算方法。
- 2025 年 5 月-7 月，组织各单位分析技术应用典型案例、归纳总结资料调研、对比失重法和重量法两种核算方法。
- 2025 年 7 月 14 日，召开标准征求意见稿论证会。

2 标准编制原则和主要内容

2.1. 编制原则

本标准的编制原则是依据 GB/T 1.1-2020 给出的原则和有关标准、政策法规进行编制的。制定本标准时充分考虑最新技术水平和当前市场情况，认真分析所涉及领域的标准化需求，充分体现行业进步和发展趋势，符合国家产业政策，推动行业技术水平提高。标准文本格式、条款主要是根据 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》进行编制。

- ① 一致性原则。每个文件内或分为部分的文件各部分之间，其结构以及要素的表述保持一致。
- ② 协调性原则。起草的文件与现行有效的文件之间相互协调，避免重复和不必要的差异。
- ③ 易用性原则。文件内容的表述便于直接应用，并且易于被其他文件引用或剪裁使用。
- ④ 成熟性原则。标准须进行充分技术论证或试验验证，应依据充分，理论正确，验证可信，确保技术成熟性、可靠性。
- ⑤ 指标合理性原则。标准中的指标应具有明确的针对性、实用性和现实性。
- ⑥ 代表性和先进性原则。标准必须能够满足各类资源化利用的基本性能要求，同时能够引导相关领域对材料的改进、完善，进而有利于行业的持续进步。

2.2. 主要内容

2.2.1. 适用范围

根据养护工艺的不同，二氧化碳矿化养护工艺可分为常压养护和压力养护两

种，其区别主要在于养护过程中是否进行带压碳矿化。目前，华新水泥武穴项目采用的是常压养护技术，即将水泥窑尾气连续通入碳矿化养护釜（蒸压釜）进行样品养护的技术；河南强耐则采用的压力养护技术，即将工业二氧化碳进行热交换后通入养护釜的技术，在一定压力下进行样品的养护。因此，本标准包含了常压和压力养护固碳两种工艺路线。

水泥制品是以水泥为主要胶结材料制作的产品，水泥制品行业是以水泥基胶凝材料为基材经深加工制成工业产品的行业，涉及的产业领域包括：城乡房屋建筑工程、农业排灌工程、水利工程、能源工程、交通工程、道路桥梁工程、通讯工程、市政工程等。根据我国国民经济行业分类，水泥制品行业包括以下范围：3121 水泥制品制造、3122 混凝土结构构件、3123 石棉水泥制品、3129 其它水泥制品（指玻璃纤维增强水泥制品，以及其它未列明的水泥制品）。考虑混凝土碳矿化对钢筋混凝土结构的危害，选择纤维水泥制品、轻质水泥制品、水泥基砌块（砖）等无钢筋水泥制品进行研究。

目前标准编制组通过网络查询、电话咨询及网络研讨等方式，收集整理 3 家（华新武穴、河南强耐、中盐安徽红四方）固碳技术应用情况及 1 家（华润贵港）拟开展应用项目的最新进展。同时，根据标准研制内容，编制完成《<基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥制品行业养护固碳项目>标准调查提问清单》，明确标准研制关键点及关键报批材料（标准研究报告），并梳理该报告的框架和关键内容。根据标准研究报告框架，组织 12 家合作单位共同完成水泥制品行业工艺/产品/能耗/资源消耗量的统计分析、体积密度/胶凝材料/预养护工艺/固碳养护工艺/固碳量测算方法这 5 个方面对固碳性能影响的文献综述；组织 12 家合作单位进行实验室标准样品、小试/示范标准样品的原材料选择、成型方式、试体大小、固碳工艺等方面的研讨。

本文件适用于指导水泥制品生产企业基于水泥制品行业养护固碳项目的二氧化碳减排量评估。

2.2.2. 规范性引用文件

本标准目前共引用了 3 个国家及行业标准，主要涉及水泥材料术语定义、减排量评估方法等方面。具体引用情况如下：

(1) GB 175 通用硅酸盐水泥

引用该标准内容作为水泥材料相关术语的依据。

(2) GB/T 21372 硅酸盐水泥熟料

引用该标准内容作为水泥材料相关术语的依据。

(3) GB/T 33760 基于项目的温室气体减排量评估技术规范 通用要求

引用该标准内容作为水泥制品养护固碳项目二氧化碳减排量评估的监测程序制定的依据。

2.2.3. 术语和定义

本标准目前共涉及到 4 条术语和定义。

(1) 基准线情景：基准线情景是需要首先界定的术语，以明确标准的参照对象。根据本标准的适用范围，将“基准线情景”定义为“用来提供参照的，在不实施碳减排项目情景下可能发生的假定情景。”

(2) 二氧化碳减排量：经计算得到的一定时期内项目所产生的二氧化碳排放量与基准线情景的排放量相比较的减少量。

(3) 固碳技术：利用硅酸钙、氢氧化钙等可碳化组分与二氧化碳反应的特性生成碳酸盐的特性，将二氧化碳固化到建材产品中的技术。

(4) 水泥制品行业养护固碳：以二氧化碳为主要养护介质，通过碳酸化反应加速水泥制品养护并实现二氧化碳固化的工艺过程。

2.2.4. 二氧化碳减排量评估内容

(1) 项目边界

本标准基于“过程控制”和“减排责任主体”原则，将项目边界明确限定为与水泥制品养护固碳直接相关的工艺系统，具体涵盖二氧化碳气体处理全系统（包括贮存、输送和循环装置）、水泥制品预处理工艺以及碳化养护核心设备等关键环节；这一边界设定既完整包含了养护固碳过程的所有碳排放源和碳汇单元，又排除了原材料生产运输等上游环节和产品仓储销售等下游环节，通过图 1 所示的系统边界示意图予以直观呈现，确保减排量评估聚焦于企业可直接控制的养护固碳工艺过程，既符合国际通行的碳足迹核算边界划分原则，又兼顾了水泥制品行业的生产实际，为准确量化养护固碳技术的减排效益提供了清晰的评估范围。

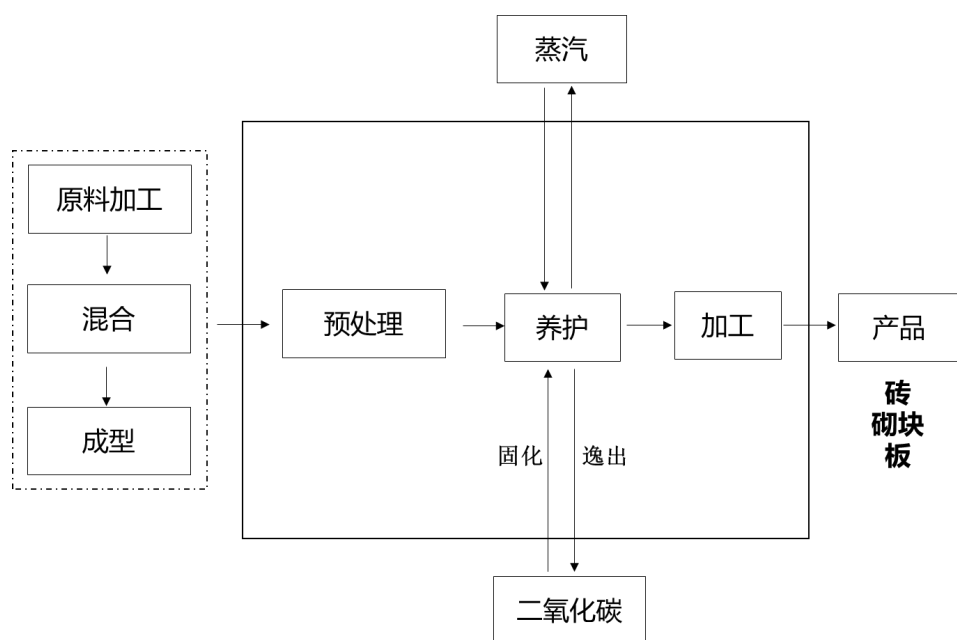


图 1 项目边界示意图

（2）基准线情景的确定

本标准通过表 2 系统规定了不同类型项目的基准线情景确定规则，其中改造项目以改造前实际采用的水泥制品常规养护工艺作为基准线，新建项目则以行业或所在地区普遍采用的水泥制品常规养护工艺作为基准线。这种差异化设定充分考虑了项目实际情况，既保证了改造前后工艺的可比性，又确保了新建项目基准线的行业代表性。基准线情景的确定严格遵循“保守性”和“代表性”原则，仅考虑常规蒸汽/蒸压养护工艺，不包括其他特殊或实验性工艺，以此客观反映采用 CO₂ 养护技术所带来的真实减排效益。这一规定既符合国际通行的基准线设定准则，又充分结合了我国水泥制品行业的发展现状，为项目减排量的科学核算提供了明确依据。

表 2 项目类型与基准线情景

| 项目类型 | 基准线情景 |
|------|------------------------------|
| 改造项目 | 采用改造前的水泥制品养护工艺 |
| 新建项目 | 行业内（或该地区）所采用的主流工艺或国家政策所要求的工艺 |

（3）减排量评估方法

1) 减排量计算

本标准通过公式(1)建立了水泥制品养护固碳项目减排量的基本计算模型,该公式科学界定了项目减排量(ER)为基准线排放量(BE)减去项目排放量(PE),再加上项目情境下水泥制品养护过程中实现的二氧化碳固定量(FC),采用吨二氧化碳(tCO_2)作为统一计量单位。这一计算方法的设定严格遵循温室气体减排量核算的通行准则,既考虑了水泥制品生产过程中采用 CO_2 养护技术所实现的直接固碳效益,又纳入了项目运行可能产生的新增排放因素,确保减排量核算结果的准确性和完整性。公式中各参数的边界范围与项目系统边界保持一致,基准线排放量(BE)对应常规养护工艺的碳排放,项目排放量(PE)则涵盖 CO_2 养护全过程的净排放,通过这种对比计算方法,能够真实反映技术革新带来的碳减排效果,为行业低碳转型提供量化依据。

2) 二氧化碳排放量计算

4.3.2.1 条款规定了水泥制品生产过程中基准线情景和项目情景二氧化碳排放量的计算方法。

主要包含五个组成部分:1)水泥消耗排放,基于实际消耗的水泥种类及数量,依据熟料比和燃料类型选用相应排放因子;2)燃料燃烧排放,基于实际消耗的化石燃料种类及数量,采用国家主管部门发布的排放因子计算;3)电力消耗排放,采用区域电网最新排放因子计算净购入电力对应的排放量;4)热力消耗排放,依据热力来源类型选用相应排放因子;5)余热回收减排量,需提供余热利用系统的实际运行监测数据。所有活动水平数据应来源于企业计量台账,排放因子优先采用官方发布数据。

排放量计算应采用保守性原则,确保核算结果的可比性和准确性。所有计算参数和假设应详细记录并可供核查,排放因子更新时应及时调整计算方法。

4.3.2.2 条款明确了水泥制品养护过程中所用水泥产生的二氧化碳排放量计算方法。该方法采用水泥消耗量与排放因子相乘的基本方法,具体说明如下:

(1)水泥消耗量(MC)应采用企业物料计量系统记录的实际水泥用量,若使用不同类型水泥,需单独标注类型及用量,计量单位统一为吨(t)。数据应来源于水泥入库、出库及消耗的原始记录,并保存至少5年备查。

(2)排放因子($EF_{\text{水泥}}$)采用国家主管部门最新发布的水泥行业碳排放基准值或缺省排放因子。该因子定期更新,企业应确保使用最新公布的数值进行计算。当地方生态环境部门或行业协会发布更细化的区域/工艺排放因子时,经主管部

门认可后可采用地方或企业特定排放因子。

4.3.2.3 条款明确了水泥制品养护过程中化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量计算方法。该方法采用活动水平数据与排放因子相结合的计算方式，具体说明如下：

(1) 活动水平数据 (AD_i) 应采用企业实际消耗的各类化石燃料（如天然气、燃油、燃煤等）的净消耗量，计量单位统一转换为吉焦 (GJ)。燃料消耗数据应来源于企业能源计量系统，并保留原始采购凭证和消耗记录。对于固体和液体燃料，需根据燃料低位发热量进行能量换算；气体燃料应按照标准状态 (101.325kPa, 20℃) 下的体积流量进行计量。

(2) 排放因子 (EF_i) 应采用国家最新发布的《省级温室气体清单编制指南》或《企业温室气体排放核算方法与报告指南》中提供的默认值。在特殊情况下使用实测排放因子时，需说明测试方法和依据，并提供相关检测报告。对于混合燃料，应按燃料组分加权计算综合排放因子。

(3) 计算过程应考虑燃料燃烧的完整性，默认燃烧效率按 100% 计算。若企业采用特殊燃烧技术（如低氮燃烧）导致燃烧效率变化，需提供第三方验证报告并相应调整排放因子。

所有计算数据应保证可追溯性，燃料消耗记录至少保存 5 年备查。当燃料类型或来源发生重大变化时，应及时更新排放因子数据。

4.3.2.4 条款规定了水泥制品养护过程中外购电力产生的二氧化碳排放量计算方法。该计算采用电力消耗量与排放因子相乘的基本方法，具体说明如下：

(1) 电力消耗量 ($AD_{\text{电力}}$) 应采用企业电能计量系统记录的养护系统实际用电量，计量单位统一为兆瓦时 (MW·h)。数据应来源于电力计量表具的原始记录，并保存至少 5 年备查。对于与其他生产系统共用的电力设备，应按实际负荷比例或运行时间进行合理分摊。

(2) 排放因子 ($EF_{\text{电力}}$) 采用国家主管部门最新发布的全国电网年平均供电排放因子。该因子每年更新一次，企业应确保使用最新公布的数值进行计算。当地方生态环境部门发布更细化的区域电网排放因子时，经主管部门认可后可采用区域因子。

(3) 特殊电力来源处理：

通过市场化交易购入的非化石能源电力（如绿证交易电力），其排放因子按零计算，但需提供有效的购电合同和交易凭证；

企业自建光伏发电、风电等可再生能源发电设施所供电量，排放因子按零计算，需提供发电量计量记录；

企业自备电厂供电应单独核算燃料燃烧排放，不计入本条款计算范围。

计算时应确保电力消耗数据与排放因子在时间维度上保持一致，原则上采用年度匹配方式。当企业用电结构发生重大变化时，应及时向主管部门报告并调整计算方法。

4.3.2.5 条款规定了水泥制品养护过程中外购热力或余热回收产生的二氧化碳排放量计算方法，具体说明如下：

（1）热力消耗量（ $AD_{\text{热力}}$ ）应采用企业热力计量系统记录的养护系统实际用热量，计量单位统一为吉焦（GJ）。数据应来源于蒸汽或热水计量表具的原始记录，并保存至少 5 年备查。对于与其他生产系统共用的热力管网，应按实际用热量或使用时间进行合理分摊。

（2）排放因子（ $EF_{\text{热力}}$ ）的确定遵循以下优先顺序：

首选供热单位提供的实测排放因子，需附第三方检测报告；

若无实测数据，可采用本标准推荐的缺省值 $0.11 \text{ tCO}_2/\text{GJ}$ ；

对于余热回收利用部分，排放因子按零计算，但需提供余热来源及利用效率的证明材料。

（3）特殊情形处理：

当热力来自生物质燃料时，排放因子按零计算；

对于热电联产供热，应按能源输入比例分摊碳排放；

自备锅炉供热应单独核算燃料燃烧排放，不计入本条款计算范围。

计算时应确保热力消耗数据与供热来源相匹配，当供热方式或热源结构发生重大变化时，应及时更新排放因子数据。所有热力计量仪表应定期校准，确保数据准确性。

3) 水泥制品固碳量计算

4.3.3.1 条款规定了水泥制品在养护周期内通过碳化反应固定二氧化碳当量的具体计算方法。该计算基于两个关键参数：批次水泥制品固碳率（ Fm_i ）、批次水泥制品中水泥和掺合料总量（ M_i ）。

固碳率 (Fm_i) 的测定需遵循附录 A 规定的标准方法, 对于不同配比或养护条件的水泥制品, 应分别测定其固碳率。水泥制品中水泥和掺合料总量 (M_i) 应采用生产投料系统的计量数据, 计量误差应控制在 $\pm 0.5\%$ 以内。不同养护条件(常压养护、压力养护等) 应分别测定固碳率; 计算结果应保留至小数点后三位; 所有原始数据需保存至少 5 年备查。对于特殊配方产品, 应在计算结果中予以特别说明, 并提供第三方验证报告。

2.2.5. 监测及数据质量管理

(1) 监测要求

本标准明确规定水泥制品养护固碳项目二氧化碳减排量评估的监测程序应严格遵循 GB/T 33760-2017《基于项目的温室气体减排量评估技术规范》第 5.10 条款的要求执行, 重点要求所有测量仪器/仪表必须满足精度标准, 并定期由具备资质的检定机构按照国家计量检定规程进行校准和检定; 项目实施过程中, 项目业主必须规范执行监测准则和程序, 通过经认证的测量设备准确获取二氧化碳排放数据, 建立完善的数据记录、汇编、分析和存档制度, 确保整个测量管理体系的质量控制和规范运行, 这一要求的制定既符合国际通行的 MRV (可测量、可报告、可核查) 原则, 又充分考虑了水泥制品生产过程的特殊性, 为减排量评估提供了可靠的监测技术保障。

(2) 数据质量管理

为确保减排量评估结果的准确性和可靠性, 本标准要求建立完善的数据质量管理程序, 对项目及基准线情景相关数据实施全过程质量控制, 包括但不限于对数据采集、传输、处理等环节的不确定性进行系统评价, 并在减排量计算中采取有效措施尽可能降低不确定性影响; 具体实施中, 应定期对 CO_2 浓度监测仪、计量器具等设备进行维护校准并保存完整记录, 同时通过交叉校验 (如采用多设备比对或物料平衡核算等方法) 验证数据准确性, 识别潜在误差风险并制定相应改进方案, 从而确保监测数据的真实、准确、完整, 为减排量核算提供可靠的数据基础, 这一要求的制定参考了 ISO 14064-3 等国际标准关于数据质量管理的最佳实践, 并结合水泥制品养护固碳工艺特点进行了针对性调整。

2.2.6. 减排量评估报告编制

本标准明确规定了水泥制品养护固碳项目减排量评估报告的具体编制要求。

报告内容应当全面涵盖项目业主基本信息、项目实施目的与意义、项目规模及运行概况、工艺技术路线说明、基准线情景设定、监测方案与数据采集规范、报告覆盖时间段、二氧化碳排放与固碳量的量化分析（以吨二氧化碳当量为单位），以及相关数据不确定性的系统评估等九个关键组成部分。这些要求旨在确保项目减排量核算工作的规范性、数据完整性及结果可核查性，为后续的碳资产开发、碳市场交易以及绿色低碳产品认证等工作提供坚实的技术依据和标准化支撑。同时，通过统一报告格式和内容要求，可有效提升行业减排量评估工作的可比性和透明度，促进水泥制品行业低碳技术的规范化推广应用。

3 主要试验（或验证）情况分析

3.1. 固碳量测算方法

目前常用的固碳计算方法包括称重法、取样分析法、气体计量法、其中增重法又可分为直接称重法、养护釜整体称重法、蒸发水补偿法、饱和湿度法、以及烘至绝干法。

直接称重法以矿化养护前后试件的质量增加量作为该试件的固碳量。该方法操作简单，但缺少对碳酸化反应放热造成的内部游离水蒸发的质量补偿。

养护釜整体增重法以包含样品在内的养护釜整体在矿化养护前后的质量增加量作为试件的固碳量，因为蒸发水冷凝在养护釜内壁，因此无须进行额外补偿，但该方法不适用于大型工业养护装置。

蒸发水补偿法用吸水纸收集冷凝在内壁的蒸发水并测量吸水纸前后质量增加量，以试件本身的质量增加量和吸水纸质量增加量之和作为试件的固碳量。该方法仅适用于实验室及密闭养护系统，不适用于大型工业养护装置，不适用于CO₂流通养护工艺，因为流通气体会同时携带蒸发水，难以用吸水纸收集。

饱和湿度法通过将试件置于饱和湿度环境中以避免试件中游离水的蒸发，或将CO₂气体先鼓泡至盛水容器中再与试件接触，以矿化养护前后试件的质量增加量作为该试件的固碳量。该方法考虑了蒸发水的影响，但在加压矿化养护中较难获得饱和湿度环境。另外，饱和环境湿度对CO₂养护的影响机制目前尚不清楚，可能会影响气体的扩散过程。

此外，还有研究人员提出改进的增重法-烘至绝干法的固碳量评价方

法，其原理是在矿化反应过程中蒸发的水来自于试件中的游离水，可通过试件在 $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒重后的质量减少量，近似得到该试件中的游离水质量，并通过养护前后试件中游离水含量的差值估计蒸发水量，进而对直接增重法得到的固碳量进行补偿

取样分析法常使用热重分析仪或马弗炉加热来对样品中的 CO_2 质量损失进行测量。以局部的 CO_2 质量损失率代表该试件的固碳量占养护后试件总质量的比例。通常，在大约 450°C 出现 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的质量损失峰在 $550 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 出现碳酸钙晶态（主要为方解石，可能伴有少量文石或球霏石）的质量损失峰。需要注意的是，在大规模工业生产中，不仅在单个试件内部存在矿化反应程度的差异，在大型养护釜中多个试件堆叠的内外层同样存在差异。因此，用局部取样分析法得到的固碳量更适用于实验室研究，对工业产品的分析则需要考虑取样的均匀性和代表性，可采用提高取样量、多点取样来避免局部差异造成的不准确。

气体计量法通过测量 CO_2 气体在矿化养护过程中的消耗量获得试件的固碳量。该方法避免了增重法中对蒸发水补偿带来的误差，且不存在取样分析法的取样位置不同带来的误差，能够相对准确地对试件固碳量进行测量。值得注意的是，由于气体的可压缩性，在加压情况下，并不能完全按照理想气体状态方程计算，需查表得到 CO_2 气体在不同工况（压力、温度）下的压缩因子进行修正。由于压缩因子对压力较敏感，因此使用此方法需对反应器内部温度和压力进行精准测量。此外，设备冗余空间、吸附、逃逸可能会造成测算的固碳量高于实际值。

采用称重法和热失重法对不同样品固碳量进行对比检测，结果如表 3 所示。

表3 称重法和热失重法对比

| 制品 | 称重法 | | | | | 热失重法 | | | | | | | | |
|----|----------|----------|----------|-----------|--------|----------------------|----------------------|-------------|----------------|----------------------|----------------------|------------|----------------|--------|
| | ma-养护前质量 | mb-养护后制品 | mw-蒸发水质量 | m0-凝胶材料质量 | Fm-固碳率 | m1-碳化后 550 灼烧后质量包含坩埚 | m2-碳化后 950 灼烧后质量包含坩埚 | mbc-养护后试块质量 | mb0-养护后试块中胶材质量 | r1-碳化前 550 灼烧后质量包含坩埚 | r2-碳化前 950 灼烧后质量包含坩埚 | ma-养护前试块质量 | ma0-养护前试块中胶材质量 | Fm-固碳率 |
| 1 | 2456 | 2690 | 139 | 1738 | 21.46% | 2987 | 2510 | 2690 | 1738 | 2180 | 2120 | 2456 | 1738 | 23.99% |
| 2 | 2474 | 2661 | 140 | 1750 | 18.69% | 2961 | 2538 | 2661 | 1750 | 2187 | 2120 | 2474 | 1750 | 20.34% |
| 3 | 2503 | 2719 | 142 | 1771 | 20.21% | 3042 | 2561 | 2719 | 1771 | 2214 | 2135 | 2503 | 1771 | 22.70% |
| 4 | 2264 | 2454 | 128 | 1602 | 19.85% | 2758 | 2355 | 2454 | 1602 | 2044 | 1986 | 2264 | 1602 | 21.54% |
| 5 | 2319 | 2514 | 131 | 1641 | 19.87% | 2806 | 2381 | 2514 | 1641 | 2071 | 2006 | 2319 | 1641 | 21.94% |
| 6 | 2287 | 2533 | 71 | 1612 | 19.67% | 2847 | 2530 | 2533 | 1612 | 2530 | 2527 | 2287 | 1612 | 19.48% |
| 7 | 2275 | 2498 | 68 | 1604 | 18.14% | 2810 | 2519 | 2498 | 1604 | 2519 | 2515 | 2275 | 1604 | 17.89% |
| 8 | 2369 | 2471 | 69 | 1670 | 10.24% | 2778 | 2607 | 2471 | 1670 | 2607 | 2600 | 2369 | 1670 | 9.82% |
| 9 | 2271 | 2356 | 73 | 1601 | 9.87% | 2673 | 2515 | 2356 | 1601 | 2515 | 2509 | 2271 | 1601 | 9.49% |
| 10 | 2303 | 2399 | 68 | 1624 | 10.10% | 2709 | 2545 | 2399 | 1624 | 2545 | 2540 | 2303 | 1624 | 9.79% |
| 11 | 2312 | 2404 | 69 | 1630 | 9.88% | 2714 | 2553 | 2404 | 1630 | 2553 | 2551 | 2312 | 1630 | 9.75% |
| 12 | 2284 | 2347 | 66 | 1503 | 8.58% | 2656 | 2527 | 2347 | 1503 | 2527 | 2522 | 2284 | 1503 | 8.25% |
| 13 | 2207 | 2286 | 67 | 1452 | 10.06% | 2601 | 2455 | 2286 | 1452 | 2455 | 2448 | 2207 | 1452 | 9.57% |
| 14 | 2308 | 2401 | 70 | 1519 | 10.73% | 2713 | 2550 | 2401 | 1519 | 2550 | 2544 | 2308 | 1519 | 10.34% |
| 15 | 2426 | 2517 | 71 | 1596 | 10.15% | 2822 | 2660 | 2517 | 1596 | 2660 | 2657 | 2426 | 1596 | 9.96% |
| 16 | 2353 | 2449 | 67 | 1548 | 10.53% | 2755 | 2592 | 2449 | 1548 | 2592 | 2588 | 2353 | 1548 | 10.27% |
| 17 | 398 | 441 | 21 | 346 | 18.50% | 782 | 718 | 441 | 346 | 718 | 711 | 398 | 346 | 16.47% |
| 18 | 796 | 875 | 43 | 692 | 17.63% | 1179 | 1057 | 875 | 692 | 1057 | 1051 | 796 | 692 | 16.76% |
| 19 | 996 | 1119 | 54 | 866 | 20.44% | 1404 | 1227 | 1119 | 866 | 1227 | 1222 | 996 | 866 | 19.86% |
| 20 | 597 | 669 | 30 | 519 | 19.65% | 989 | 887 | 669 | 519 | 887 | 883 | 597 | 519 | 18.88% |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| 21 | 298 | 334 | 18 | 259 | 20.85% | 687 | 633 | 334 | 259 | 633 | 626 | 298 | 259 | 18.15% |
| 22 | 398 | 433 | 10 | 368 | 12.23% | 791 | 746 | 433 | 368 | 746 | 739 | 398 | 368 | 10.33% |
| 23 | 596 | 655 | 10 | 552 | 12.50% | 997 | 928 | 655 | 552 | 928 | 922 | 596 | 552 | 11.41% |
| 24 | 467 | 513 | 12 | 432 | 13.43% | 868 | 810 | 513 | 432 | 810 | 805 | 467 | 432 | 12.27% |
| 25 | 279 | 307 | 6 | 258 | 13.18% | 671 | 637 | 307 | 258 | 637 | 632 | 279 | 258 | 11.24% |

3.2. 应用案例

(1) 华新武穴固碳砖生产线

由华新水泥与湖南大学联合建设的水泥窑尾气固碳制砖生产线,是由原有的蒸压养护水泥砖生产线改造而成。运行结果表明,该生产线生产的固碳砖的平均抗压强度达到 15MPa 以上,满足国家相关标准的要求,且砖的强度会随龄期持续升高。该技术将水泥窑尾气制品化,采用水泥窑尾烟气固碳养护工艺取代传统粘土烧成制砖和混凝土灰砂砖工艺,解决了资源消耗、能耗及二氧化碳排放的问题,开发出水泥产业碳中和技术。以“二氧化碳传输-碳化养护-温度-后续水化”协同效应理论,开发出了水泥产业链上碳中和的技术。以年产 1 亿块蒸养砖生产线为例,每年利用 2.6 万吨二氧化碳,全国推广每年减碳将达到 5200 万吨。

在改固碳制砖生产线运行过程中采用称重法测算,即养护固碳前后产品的质量差作为 CO₂ 固化量,由此测算单位体积产品的固碳量。固碳量检测数据由华新武穴统计。共统计了 10 次测试,每次测试随机取 10 块碳矿化砖(取样范围覆盖内侧、外侧和不同层),结果如表 3 所示,碳矿化砖的固碳量大部分在 18.63-31.4kgCO₂/t 产品,固碳率为 7.45%-12.56%。

表 3 固碳砖养护固碳率(常压养护)

| | 序号 | 进釜前重量 g | 出釜后重量 g | 水泥质量 g | 固碳量 kgCO ₂ /t | 固碳率% |
|----------|-----|---------|---------|--------|--------------------------|------|
| 1# 测试 | 1 | 2752 | 2808 | 688 | 20.35 | 8.14 |
| | 2 | 2774 | 2826 | 694 | 18.75 | 7.50 |
| | 3 | 2797 | 2854 | 699 | 20.38 | 8.15 |
| | 4 | 2890 | 2957 | 723 | 23.18 | 9.27 |
| | 5 | 2995 | 3056 | 749 | 20.37 | 8.15 |
| | 6 | 2807 | 2866 | 702 | 21.02 | 8.41 |
| | 7 | 2902 | 2969 | 726 | 23.09 | 9.24 |
| | 8 | 3053 | 3120 | 763 | 21.95 | 8.78 |
| | 9 | 2969 | 3039 | 742 | 23.58 | 9.43 |
| | 10 | 2850 | 2920 | 713 | 24.56 | 9.82 |
| | 均值 | 2879 | 2942 | 720 | 21.74 | 8.70 |
| | 最大值 | 3053 | 3120 | 763 | 21.95 | 8.78 |
| | 最小值 | 2752 | 2808 | 688 | 20.35 | 8.14 |
| 2# 测试 | 1 | 2857 | 2920 | 714 | 22.05 | 8.82 |
| | 2 | 2906 | 2965 | 727 | 20.30 | 8.12 |
| | 3 | 2840 | 2899 | 710 | 20.77 | 8.31 |
| | 4 | 2831 | 2888 | 708 | 20.13 | 8.05 |
| | 5 | 2807 | 2866 | 702 | 21.02 | 8.41 |
| | 6 | 2721 | 2781 | 680 | 22.05 | 8.82 |
| | 7 | 2931 | 2998 | 733 | 22.86 | 9.14 |

| | | | | | | |
|----------|-----|--------|--------|-----|-------|-------|
| | 8 | 2790 | 2852 | 698 | 22.22 | 8.89 |
| | 9 | 2775 | 2831 | 694 | 20.18 | 8.07 |
| | 10 | 2815 | 2873 | 704 | 20.60 | 8.24 |
| | 均值 | 2827.3 | 2887.3 | 707 | 21.22 | 8.49 |
| | 最大值 | 2931 | 2998 | 733 | 22.86 | 9.14 |
| | 最小值 | 2721 | 2781 | 680 | 22.05 | 8.82 |
| 3# 测试 | 1 | 2752 | 2808 | 688 | 20.35 | 8.14 |
| | 2 | 2774 | 2826 | 694 | 18.75 | 7.50 |
| | 3 | 2797 | 2854 | 699 | 20.38 | 8.15 |
| | 4 | 2890 | 2957 | 723 | 23.18 | 9.27 |
| | 5 | 2995 | 3056 | 749 | 20.37 | 8.15 |
| | 6 | 2807 | 2866 | 702 | 21.02 | 8.41 |
| | 7 | 2902 | 2969 | 726 | 23.09 | 9.24 |
| | 8 | 3053 | 3120 | 763 | 21.95 | 8.78 |
| | 9 | 2969 | 3039 | 742 | 23.58 | 9.43 |
| | 10 | 2850 | 2920 | 713 | 24.56 | 9.82 |
| | 均值 | 2878.9 | 2941.5 | 720 | 21.74 | 8.70 |
| | 最大值 | 3053 | 3120 | 763 | 21.95 | 8.78 |
| | 最小值 | 2752 | 2808 | 688 | 20.35 | 8.14 |
| 4# 测试 | 1 | 2763 | 2826 | 691 | 22.80 | 9.12 |
| | 2 | 2680 | 2744 | 670 | 23.88 | 9.55 |
| | 3 | 2836 | 2899 | 709 | 22.21 | 8.89 |
| | 4 | 2814 | 2890 | 704 | 27.01 | 10.80 |
| | 5 | 2722 | 2797 | 681 | 27.55 | 11.02 |
| | 6 | 2732 | 2814 | 683 | 30.01 | 12.01 |
| | 7 | 2753 | 2826 | 688 | 26.52 | 10.61 |
| | 8 | 2770 | 2833 | 693 | 22.74 | 9.10 |
| | 9 | 2748 | 2808 | 687 | 21.83 | 8.73 |
| | 10 | 2764 | 2826 | 691 | 22.43 | 8.97 |
| | 均值 | 2758.2 | 2826.3 | 690 | 24.69 | 9.88 |
| | 最大值 | 2836 | 2899 | 709 | 22.21 | 8.89 |
| | 最小值 | 2680 | 2744 | 670 | 23.88 | 9.55 |
| 5# 测试 | 1 | 2729 | 2791 | 682 | 22.72 | 9.09 |
| | 2 | 2640 | 2698 | 660 | 21.97 | 8.79 |
| | 3 | 2612 | 2668 | 653 | 21.44 | 8.58 |
| | 4 | 2684 | 2747 | 671 | 23.47 | 9.39 |
| | 5 | 2615 | 2675 | 654 | 22.94 | 9.18 |
| | 6 | 2696 | 2755 | 674 | 21.88 | 8.75 |
| | 7 | 2681 | 2741 | 670 | 22.38 | 8.95 |
| | 8 | 2660 | 2719 | 665 | 22.18 | 8.87 |
| | 9 | 2660 | 2722 | 665 | 23.31 | 9.32 |
| | 10 | 2653 | 2712 | 663 | 22.24 | 8.90 |
| | 均值 | 2663 | 2722.8 | 666 | 22.46 | 8.98 |
| | 最大值 | 2729 | 2791 | 682 | 22.72 | 9.09 |
| | 最小值 | 2612 | 2668 | 653 | 21.44 | 8.58 |
| 6# 测 | 1 | 2608 | 2666 | 652 | 22.24 | 8.90 |
| | 2 | 2621 | 2680 | 655 | 22.51 | 9.00 |

| | | | | | | |
|----------|-----|--------|--------|-----|-------|-------|
| 试 | 3 | 2728 | 2783 | 682 | 20.16 | 8.06 |
| | 4 | 2684 | 2734 | 671 | 18.63 | 7.45 |
| | 5 | 2721 | 2783 | 680 | 22.79 | 9.11 |
| | 6 | 2759 | 2828 | 690 | 25.01 | 10.00 |
| | 7 | 2681 | 2742 | 670 | 22.75 | 9.10 |
| | 8 | 2608 | 2663 | 652 | 21.09 | 8.44 |
| | 9 | 2628 | 2689 | 657 | 23.21 | 9.28 |
| | 10 | 2565 | 2620 | 641 | 21.44 | 8.58 |
| | 均值 | 2660.3 | 2718.8 | 665 | 21.99 | 8.80 |
| | 最大值 | 2759 | 2828 | 690 | 25.01 | 10.00 |
| | 最小值 | 2565 | 2620 | 641 | 21.44 | 8.58 |
| 7# 测试 | 1 | 2766 | 2836 | 692 | 25.31 | 10.12 |
| | 2 | 2772 | 2843 | 693 | 25.61 | 10.25 |
| | 3 | 2713 | 2782 | 678 | 25.43 | 10.17 |
| | 4 | 2695 | 2766 | 674 | 26.35 | 10.54 |
| | 5 | 2695 | 2769 | 674 | 27.46 | 10.98 |
| | 6 | 2707 | 2767 | 677 | 22.16 | 8.87 |
| | 7 | 2711 | 2780 | 678 | 25.45 | 10.18 |
| | 8 | 2671 | 2731 | 668 | 22.46 | 8.99 |
| | 9 | 2694 | 2763 | 674 | 25.61 | 10.24 |
| | 10 | 2731 | 2803 | 683 | 26.36 | 10.55 |
| | 均值 | 2715.5 | 2784 | 679 | 25.23 | 10.09 |
| | 最大值 | 2772 | 2843 | 693 | 25.61 | 10.25 |
| | 最小值 | 2671 | 2731 | 668 | 22.46 | 8.99 |
| 8# 测试 | 1 | 2762 | 2818 | 691 | 20.28 | 8.11 |
| | 2 | 2711 | 2773 | 678 | 22.87 | 9.15 |
| | 3 | 2715 | 2777 | 679 | 22.84 | 9.13 |
| | 4 | 2741 | 2801 | 685 | 21.89 | 8.76 |
| | 5 | 2749 | 2813 | 687 | 23.28 | 9.31 |
| | 6 | 2737 | 2801 | 684 | 23.38 | 9.35 |
| | 7 | 2731 | 2789 | 683 | 21.24 | 8.50 |
| | 8 | 2720 | 2775 | 680 | 20.22 | 8.09 |
| | 9 | 2750 | 2806 | 688 | 20.36 | 8.15 |
| | 10 | 2723 | 2779 | 681 | 20.57 | 8.23 |
| | 均值 | 2733.9 | 2793.2 | 683 | 21.69 | 8.68 |
| | 最大值 | 2762 | 2818 | 691 | 20.28 | 8.11 |
| | 最小值 | 2711 | 2773 | 678 | 22.87 | 9.15 |
| 9# 测试 | 1 | 2707 | 2777 | 677 | 25.86 | 10.34 |
| | 2 | 2680 | 2746 | 670 | 24.63 | 9.85 |
| | 3 | 2682 | 2756 | 671 | 27.59 | 11.04 |
| | 4 | 2695 | 2768 | 674 | 27.09 | 10.83 |
| | 5 | 2696 | 2776 | 674 | 29.67 | 11.87 |
| | 6 | 2744 | 2821 | 686 | 28.06 | 11.22 |
| | 7 | 2771 | 2858 | 693 | 31.40 | 12.56 |
| | 8 | 2719 | 2797 | 680 | 28.69 | 11.47 |
| | 9 | 2665 | 2729 | 666 | 24.02 | 9.61 |
| | 10 | 2689 | 2762 | 672 | 27.15 | 10.86 |

| | | | | | | |
|-----------|-----|--------|--------|-----|-------|-------|
| | 均值 | 2704.8 | 2779 | 676 | 27.43 | 10.97 |
| | 最大值 | 2771 | 2858 | 693 | 31.40 | 12.56 |
| | 最小值 | 2665 | 2729 | 666 | 24.02 | 9.61 |
| 10# 测试 | 1 | 2703 | 2786 | 676 | 30.71 | 12.28 |
| | 2 | 2730 | 2810 | 683 | 29.30 | 11.72 |
| | 3 | 2760 | 2840 | 690 | 28.99 | 11.59 |
| | 4 | 2763 | 2840 | 691 | 27.87 | 11.15 |
| | 5 | 2765 | 2840 | 691 | 27.12 | 10.85 |
| | 6 | 2766 | 2848 | 692 | 29.65 | 11.86 |
| | 7 | 2781 | 2867 | 695 | 30.92 | 12.37 |
| | 8 | 2779 | 2860 | 695 | 29.15 | 11.66 |
| | 9 | 2755 | 2835 | 689 | 29.04 | 11.62 |
| | 10 | 2758 | 2837 | 690 | 28.64 | 11.46 |
| | 均值 | 2756 | 2836.3 | 689 | 29.14 | 11.65 |
| | 最大值 | 2781 | 2867 | 695 | 30.92 | 12.37 |
| | 最小值 | 2703 | 2786 | 676 | 30.71 | 12.28 |

编制组在生产线进行了分层取样，样品包括三面直接接触 CO₂ 气氛的；两面直接接触 CO₂ 气氛的；一面直接接触 CO₂ 气氛的和在内测无直接暴露面。经检测，失重法检测样品固碳率为 8.43%~12.24%，且与样品位置无明显的对应关系。

（2）压力养护中试线

在物料车间，原料（钢渣，炉渣，粉煤灰，电石渣和水泥）在控制配比后进行初始混合。填料在均化筒仓内静置使水分均匀化，尾端有强制搅拌机控制填料粒度<10mm。均化后的填料通过输送带输送到压砖车间，在车间由制砖机压制形成标准砖（240mm×115mm×53mm）。在 CO₂ 矿化养护之前，砌块应放置在预养护室大约 1 天。在 CO₂ 养护车间，养护周期为 8 小时。然后经过包装和 7 天的自然养护，成品砖出厂。养护过程所用二氧化碳为气化后的工业液体二氧化碳。

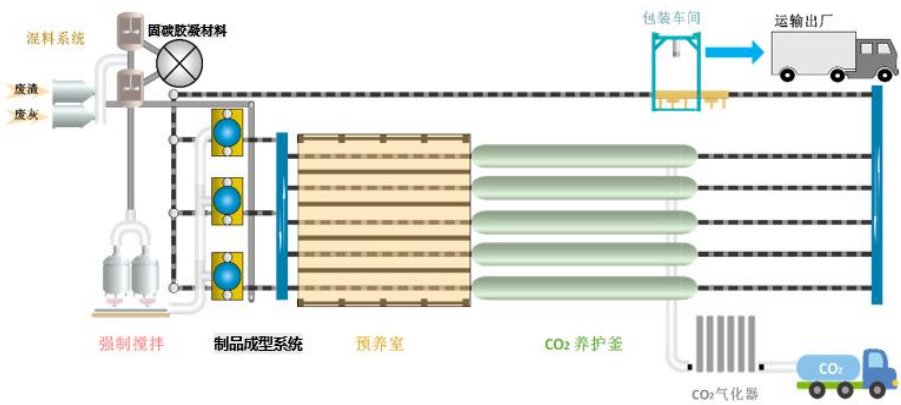


图 3 压力养护固碳工艺

压力固碳养护技术在河南焦作强耐和西安霖和科技开展中试试验,统计固碳砖和固碳加气砌块的固碳数据分别列于表 4 和表 5。由表 4 可知,碳矿化纯水泥砖的固碳率在 7.05%-43.00%;碳矿化钢渣砖的固碳率在 0.73%-9.16%;碳矿化建筑固废砖的固碳率在 11.00%-92.50%;碳矿化建筑钢渣+镁渣砖的固碳率在 1.64%-7.56%;碳矿化建筑钢渣+建筑固废砖的固碳率在 7.28%-85.75%。由表 5 可知,碳矿化钢渣加气砌块的固碳率为 10.72%;矿化粉煤灰加气砌块的固碳率为 7.88%-9.76%;碳矿化钢渣+电石渣加气砌块的固碳率为 5.62%-15.21%;碳矿化钢渣+粉煤灰加气砌块的固碳率为 11.33%;碳矿化镁渣+粉煤灰加气砌块的固碳率为 12.12%;碳矿化钢渣+镁渣加气砌块的固碳率为 21.35%;碳矿化粉煤灰+镁渣加气砌块的固碳率为 8.45%。

表 4 固碳砖养护固碳率（压力养护）

| 序号 | 固废类型 | 固废 1 质量占比 | 固废 2 质量占比 | 产品固 碳量 (kg/t) | 胶凝材料 质量占比 | 水泥材料 质量占比 | 固碳 率 % |
|----|------|--------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|-----------|
| 1 | 纯水泥 | | | 21.1 | 20.00% | | 10.55% |
| 2 | 纯水泥 | | | 21.1 | 20.00% | | 10.55% |
| 3 | 纯水泥 | | | 29.2 | 20.00% | | 14.61% |
| 4 | 纯水泥 | | | 17.2 | 20.00% | | 8.60% |
| 5 | 纯水泥 | | | 14.1 | 20.00% | | 7.05% |
| 6 | 钢渣 | 15.00% | | 7.7 | 30.00% | 15% | 2.58% |
| 7 | 钢渣 | 15.00% | | 16.1 | 30.00% | 15% | 5.35% |
| 8 | 钢渣 | 15.00% | | 2.9 | 30.00% | 15% | 0.95% |
| 9 | 钢渣 | 15.00% | | 27.5 | 30.00% | 15% | 9.16% |
| 10 | 钢渣 | 10.18% | | 2.7 | 20.36% | 10.18% | 1.33% |
| 11 | 钢渣 | 10.18% | | 13.6 | 20.36% | 10.18% | 6.68% |
| 12 | 钢渣 | 20.00% | | 13.1 | 40.00% | 20.00% | 3.28% |
| 13 | 钢渣 | 20.00% | | 4.8 | 40.00% | 20.00% | 1.20% |
| 14 | 钢渣 | 18.37% | | 6.3 | 27.56% | 9.19% | 2.29% |
| 15 | 钢渣 | 18.37% | | 2.0 | 27.56% | 9.19% | 0.73% |
| 16 | 钢渣 | 24.54% | | 8.1 | 36.74% | 12.2% | 2.20% |
| 17 | 钢渣 | 24.54% | | 6.2 | 36.74% | 12.2% | 1.69% |
| 18 | 钢渣 | 13.73% | | 5.7 | 27.46% | 13.73% | 2.08% |
| 19 | 钢渣 | 13.73% | | 6.7 | 27.46% | 13.73% | 2.44% |
| 20 | 钢渣 | 18.30% | | 11.3 | 36.60% | 18.30% | 3.09% |
| 21 | 钢渣 | 18.30% | | 9.7 | 36.60% | 18.30% | 2.65% |
| 22 | 钢渣 | 18.25% | | 10.1 | 27.38% | 9.13% | 3.69% |
| 23 | 钢渣 | 18.30% | | 9.5 | 36.60% | 18.3% | 2.59% |
| 24 | 钢渣 | 18.25% | | 6.5 | 27.38% | 9.13% | 2.38% |
| 25 | 钢渣 | 18.25% | | 11.6 | 27.38% | 9.13% | 4.22% |
| 26 | 钢渣 | 20.00% | | 27 | 30.00% | 10% | 9.00% |
| 27 | 钢渣 | 20.00% | | 13.3 | 30.00% | 10% | 4.43% |

| | | | | | | | |
|----|-------|--------|--------|-------|---------|--------|--------|
| 28 | 钢渣 | 20.00% | | 17.6 | 30.00% | 10% | 5.87% |
| 29 | 钢渣 | 20.00% | | 20.4 | 40.00% | 20% | 5.10% |
| 30 | 钢渣 | 20.00% | | 22 | 40.00% | 20% | 5.50% |
| 31 | 纯水泥 | / | | 52 | 25.00% | | 20.80% |
| 32 | 钢渣 | 20.00% | | 9.9 | 40.00% | 20% | 2.48% |
| 33 | 钢渣 | 20.00% | | 10.8 | 40.00% | 20% | 2.70% |
| 34 | 钢渣 | 26.64% | | 13.4 | 40.00% | 13.36% | 3.35% |
| 35 | 钢渣 | 26.64% | | 15.7 | 40.00% | 13.36% | 3.93% |
| 36 | 建筑固废 | 92.00% | | 9.6 | 8.00% | 8.00% | 12.00% |
| 37 | 建筑固废 | 92.00% | | 31.2 | 8.00% | 8.00% | 39.00% |
| 38 | 建筑固废 | 92.00% | | 26.6 | 8.00% | 8.00% | 33.25% |
| 39 | 建筑固废 | 92.00% | | 10.9 | 8.00% | 8.00% | 13.63% |
| 40 | 建筑固废 | 92.00% | | 16.2 | 8.00% | 8.00% | 20.25% |
| 41 | 建筑固废 | 92.00% | | 21.3 | 8.00% | 8.00% | 26.63% |
| 42 | 建筑固废 | 92.00% | | 32.4 | 8.00% | 8.00% | 40.50% |
| 43 | 建筑固废 | 92.00% | | 24.5 | 8.00% | 8.00% | 30.63% |
| 44 | 建筑固废 | 92.00% | | 21.4 | 8.00% | 8.00% | 26.75% |
| 45 | 建筑固废 | 92.00% | | 22.5 | 8.00% | 8.00% | 28.13% |
| 46 | 建筑固废 | 92.00% | | 24.5 | 8.00% | 8.00% | 30.63% |
| 47 | 建筑固废 | 92.00% | | 23 | 8.00% | 8.00% | 28.75% |
| 48 | 建筑固废 | 92.00% | | 11.70 | 8.00% | 8.00% | 14.63% |
| 49 | 建筑固废 | 92.00% | | 13.3 | 8.00% | 8.00% | 16.63% |
| 50 | 建筑固废 | 92.00% | | 13.1 | 8.00% | 8.00% | 16.38% |
| 51 | 建筑固废 | 92.00% | | 17.7 | 8.00% | 8.00% | 22.13% |
| 52 | 建筑固废 | 92.00% | | 13.3 | 8.00% | 8.00% | 16.63% |
| 53 | 建筑固废 | 92.00% | | 17.4 | 8.00% | 8.00% | 21.75% |
| 54 | 建筑固废 | 92.00% | | 21.2 | 8.00% | 8.00% | 26.50% |
| 55 | 建筑固废 | 92.00% | | 21.6 | 8.00% | 8.00% | 27.00% |
| 56 | 建筑固废 | 92.00% | | 17.9 | 8.00% | 8.00% | 22.38% |
| 57 | 建筑固废 | 92.00% | | 15.4 | 8.00% | 8.00% | 19.25% |
| 58 | 建筑固废 | 92.00% | | 15 | 8.00% | 8.00% | 18.75% |
| 59 | 建筑固废 | 92.00% | | 21.2 | 8.00% | 8.00% | 26.50% |
| 60 | 钢渣 | 20.00% | | 20.1 | 30.00% | 10% | 6.70% |
| 61 | 钢渣 | 20.00% | | 15.5 | 30.00% | 10% | 5.17% |
| 62 | 建筑固废 | 92.00% | | 110 | 100.00% | | 11.00% |
| 63 | 建筑固废 | 92.00% | | 217.5 | 100.00% | | 21.75% |
| 64 | 建筑固废 | 92.00% | | 168.8 | 100.00% | | 16.88% |
| 65 | 建筑固废 | 92.00% | | 147.5 | 100.00% | | 14.75% |
| 66 | 建筑固废 | 92.00% | | 192.5 | 100.00% | | 19.25% |
| 67 | 建筑固废 | 92.00% | | 311.3 | 100.00% | | 31.13% |
| 68 | 钢渣 | 30.00% | 60.00% | 33.52 | 40.00% | | 8.38% |
| 69 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 18.9 | 50.00% | | 3.78% |
| 70 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 32 | 50.00% | | 6.40% |
| 71 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 8.2 | 50.00% | | 1.64% |
| 72 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 27.8 | 50.00% | | 5.55% |
| 73 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 23.4 | 50.00% | | 4.68% |
| 74 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 29.6 | 50.00% | 10% | 5.92% |
| 75 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 20.9 | 50.00% | 10% | 4.18% |
| 76 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 31.6 | 50.00% | 10% | 6.32% |

| | | | | | | | |
|----|---------|--------|--------|------|--------|-----|--------|
| 77 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 37.8 | 50.00% | 10% | 7.56% |
| 78 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 21.5 | 50.00% | 10% | 4.30% |
| 79 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 25.2 | 50.00% | | 5.04% |
| 80 | 钢渣+建筑固废 | 30.00% | 60.00% | 343 | 40.00% | | 85.75% |
| 81 | 钢渣+建筑固废 | 30.00% | 60.00% | 288 | 40.00% | | 72.00% |
| 82 | 钢渣+建筑固废 | 30.00% | 60.00% | 29.1 | 40.00% | | 7.28% |
| 83 | 钢渣+建筑固废 | 42.00% | 50.00% | 43.9 | 40.00% | | 10.98% |
| 84 | 钢渣+建筑固废 | 37.00% | 55.00% | 36.5 | 45.00% | | 8.11% |
| 85 | 建筑固废 | 92.00% | | 74 | 8.00% | | 92.50% |
| 86 | 建筑固废 | 92.00% | | 66 | 8.00% | | 82.50% |
| 87 | 建筑固废 | 92.00% | | 32 | 8.00% | | 40.00% |
| 88 | 建筑固废 | 92.00% | | 63 | 8.00% | | 78.75% |
| 89 | 建筑固废 | 92.00% | | 25 | 8.00% | | 31.25% |
| 90 | 建筑固废 | 92.00% | | 47 | 8.00% | | 58.75% |
| 91 | 建筑固废 | 92.00% | | 18 | 8.00% | | 22.50% |
| 92 | 建筑固废 | 92.00% | | 24 | 8.00% | | 30.00% |
| 93 | 建筑固废 | 92.00% | | 22 | 8.00% | | 27.50% |

表 5 固废加气砌块养护固碳率（压力养护）

| 序号 | 固废类型 | 固废 1 质量占比 | 固废 2 质量占比 | 固碳量 | 胶凝材料 质量占比 | 水泥材料 质量占比 | 固碳率 % |
|----|--------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|----------|
| 1 | 钢渣 | 50% | | 89.0 | 83.00% | 33.00% | 10.72% |
| 2 | 钢渣 | 50% | | 89.0 | 83.00% | 33.00% | 10.72% |
| 3 | 钢渣 | 50% | | 89.0 | 83.00% | 33.00% | 10.72% |
| 4 | 钢渣 | 50% | | 89.0 | 83.00% | 33.00% | 10.72% |
| 5 | 粉煤灰 | 70% | | 67.0 | 85.00% | 15.00% | 7.88% |
| 6 | 粉煤灰 | 70% | | 67.0 | 85.00% | 15.00% | 7.88% |
| 7 | 粉煤灰 | 70% | | 67.0 | 85.00% | 15.00% | 7.88% |
| 8 | 粉煤灰 | 70% | | 67.0 | 85.00% | 15.00% | 7.88% |
| 9 | 粉煤灰 | 70% | | 67.0 | 85.00% | 15.00% | 7.88% |
| 10 | 粉煤灰 | 70% | | 67.0 | 85.00% | 15.00% | 7.88% |
| 11 | 粉煤灰 | 70% | | 83.0 | 85.00% | 15.00% | 9.76% |
| 12 | 粉煤灰 | 70% | | 83.0 | 85.00% | 15.00% | 9.76% |
| 13 | 粉煤灰 | 70% | | 83.0 | 85.00% | 15.00% | 9.76% |
| 14 | 粉煤灰 | 70% | | 83.0 | 85.00% | 15.00% | 9.76% |
| 15 | 粉煤灰 | 70% | | 83.0 | 85.00% | 15.00% | 9.76% |
| 16 | 粉煤灰 | 70% | | 83.0 | 85.00% | 15.00% | 9.76% |
| 17 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 111.0 | 73.00% | 35.00% | 15.21% |
| 18 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 111.0 | 73.00% | 35.00% | 15.21% |
| 19 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 111.0 | 73.00% | 35.00% | 15.21% |
| 20 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 111.0 | 73.00% | 35.00% | 15.21% |
| 21 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 111.0 | 73.00% | 35.00% | 15.21% |
| 22 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 111.0 | 73.00% | 35.00% | 15.21% |
| 23 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 41.0 | 73.00% | 35.00% | 5.62% |
| 24 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 41.0 | 73.00% | 35.00% | 5.62% |
| 25 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 41.0 | 73.00% | 35.00% | 5.62% |

| | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 26 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 41.0 | 73.00% | 35.00% | 5.62% |
| 27 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 41.0 | 73.00% | 35.00% | 5.62% |
| 28 | 钢渣+电石渣 | 30.00% | 8.00% | 41.0 | 73.00% | 35.00% | 5.62% |
| 29 | 钢渣+粉煤灰 | 33.00% | 20.00% | 94.0 | 83.00% | 30.00% | 11.33% |
| 30 | 钢渣+粉煤灰 | 33.00% | 20.00% | 94.0 | 83.00% | 30.00% | 11.33% |
| 31 | 钢渣+粉煤灰 | 33.00% | 20.00% | 94.0 | 83.00% | 30.00% | 11.33% |
| 32 | 镁渣+粉煤灰 | 40.00% | 15.00% | 103.0 | 85.00% | 30.00% | 12.12% |
| 33 | 镁渣+粉煤灰 | 40.00% | 15.00% | 103.0 | 85.00% | 30.00% | 12.12% |
| 34 | 镁渣+粉煤灰 | 40.00% | 15.00% | 103.0 | 85.00% | 30.00% | 12.12% |
| 35 | 镁渣+粉煤灰 | 40.00% | 15.00% | 103.0 | 85.00% | 30.00% | 12.12% |
| 36 | 镁渣+粉煤灰 | 40.00% | 15.00% | 103.0 | 85.00% | 30.00% | 12.12% |
| 37 | 镁渣+粉煤灰 | 40.00% | 15.00% | 103.0 | 85.00% | 30.00% | 12.12% |
| 38 | 镁渣+粉煤灰 | 40.00% | 15.00% | 103.0 | 85.00% | 30.00% | 12.12% |
| 39 | 镁渣+粉煤灰 | 40.00% | 15.00% | 103.0 | 85.00% | 30.00% | 12.12% |
| 40 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 134.5 | 63.00% | 23.00% | 21.35% |
| 41 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 134.5 | 63.00% | 23.00% | 21.35% |
| 42 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 134.5 | 63.00% | 23.00% | 21.35% |
| 43 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 134.5 | 63.00% | 23.00% | 21.35% |
| 44 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 134.5 | 63.00% | 23.00% | 21.35% |
| 45 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 134.5 | 63.00% | 23.00% | 21.35% |
| 46 | 钢渣+镁渣 | 30.00% | 10.00% | 134.5 | 63.00% | 23.00% | 21.35% |
| 47 | 粉煤灰+镁渣 | 40.00% | 20.00% | 71.8 | 85.00% | 25.00% | 8.45% |
| 48 | 粉煤灰+镁渣 | 40.00% | 20.00% | 71.8 | 85.00% | 25.00% | 8.45% |
| 49 | 粉煤灰+镁渣 | 40.00% | 20.00% | 71.8 | 85.00% | 25.00% | 8.45% |

4 标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明

本标准没有涉及到专利，因此无需说明。

5 产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效益等情况

从国内应用来看，已涌现多个典型：①华新水泥与湖南大学联合研发的“水泥窑烟气 CO₂ 吸碳制砖自动化生产线”在武穴工业园成功投产运行；②河南强耐新材股份有限公司利用碳矿化养护蒸压砖开展万吨级工业试验；③中国建材总院河南兴安碳矿化制备墙体材料中试；④中国能建-浙江兰溪二氧化碳捕集与碳矿化利用 1.5 万吨 CO₂ 集成示范项目；⑤霖和科技在西安建成碳矿化养护制品中试线；⑥京韵泰博新材料科技有限公司与武汉理工大学在滨州建立了万吨级二氧化碳直接利用工业实验示范工厂；⑦ 中国建材总院在德胜西南水泥建立水泥窑炉烟气 CO₂ 捕集矿化一体化中试线。国内典型项目通过养护固碳项目实施可实现每年近 6 万吨的温室气体固化，并生产近 6 亿块实心混凝土砖。

在“双碳”目标下，相关减排项目的推广速度和力度将大幅增长。据估算，1 立方米的混凝土砌块可固化 CO₂ 约 70kg，同时减少蒸汽养护耗能所排放的 CO₂。

以一条 3 万立方米/年预制构件厂为例，若采用碳矿化养护代替蒸汽养护，每年可固化 CO₂ 约 2100 吨；目前我国预制构件产能约 5000 万立方米，若实现 20% 的推广率，每年可固化 CO₂ 约 70 万吨。

6 采用国际标准和国外先进标准情况

无。

7 与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准完全执行我国现行的法律、法规和强制执行标准，全部符合行标的基本要求。

经查，涉及水泥制品的标准有约 100 项，如 JC/T 2126.1-2012《水泥制品工艺技术规范 第 1 部分：混凝土与钢筋混凝土排水管》、JC/T 2126.7-2012《水泥制品工艺技术规范 第 7 部分：硅酸钙板/纤维水泥板》GB/T 11968-2020《蒸压加气混凝土砌块》、GB/T 15762-2020《蒸压加气混凝土板》。涉及水泥制品行业养护固碳减排量评估的标准仅有本标准这 1 项。

经查，建材行业领域涉及温室气体减排量评估的标准有 23 项；涉及水泥制品行业养护固碳减排量评估的标准仅有本标准这 1 项。涉及项目级温室气体减排量评估的标准有 4 项，涉及企业级温室气体减排量评估的标准有 5 项，涉及产品级温室气体减排量评估的标准有 9 项。涉及行业级温室气体减排量评估的标准有 5 项，分别为《玻璃纤维单位产品碳排放限额》（制定中）等。

综上所述，本标准将依托现有国家、行业及地方标准体系，聚焦水泥制品养护固碳技术，将与上述标准从二氧化碳减排量评估方面共同构建我国建材制品养护固碳技术可管理、可追溯、可测量，可报告和可核查标准体系。

8 重大分歧意见的处理经过和依据

无。

9 标准性质的建议说明

我国标准化法规定，对不满足基础通用、需要与国家标准配套、需要在全国某个行业范围内统一的技术要求，可以制定行业标准。《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥制品行业养护固碳项目》标准中规定了范围、规范性引

用文件、术语和定义、二氧化碳减排量评估内容的项目边界、基准线情景的确定、减排量评估方法、监测及数据质量管理以及减排量评估报告编制相关规定等内容。本标准制定的目的是为广大水泥制品生产企业应用该技术提供规范化的指导，也为固碳水泥制品应用单位提供产品筛选和监督的依据，并为水泥制品行业节能降碳工艺升级改造提供方向性指引，其最终目的是保障水泥制品养护固碳技术应用规范和可持续发展，因此应为行业标准。

10 贯彻标准的要求和措施建议

（包括组织措施、技术措施、过度办法、实施日期等）

建议本标准在颁布半年后实施，原因在于：1、标准颁布后需要标准提出单位、标准归口单位、标准牵头单位和各省建材行业主管部门共同组织相关生产单位、应用单位、检测检验机构和监督管理部门进行标准的宣贯和培训，保证相关机构和部门了解标准要求，并贯彻执行。2、标准颁布后，生产单位、对水泥制品养护固碳技术标准化管理体系的建立需要时间进一步改进。3、标准颁布后，水泥制品生产厂家对原材料的辨识和评估，建立采购-保管-应用-培训等系列管理制度及管理档案，需要时间完善。

该标准实施主体为水泥制品生产企业和水泥制品应用企业，填补了固碳养护管理人员、水泥制品应用管理人员生产管理的空白，为行业质量监督管理部门例行工作提供管理依据和规范。

11 废止现行相关标准的建议

无。

12 其它应予说明的事项

无。