



中国建筑材料联合会
China Building Materials Federation



ENERGY FOUNDATION
能源基金会

支持水泥行业碳达峰、碳中和标准体系建设-六项行业标准的制定研究

Support the Construction of Standard System for
Cement Industry to Achieve Carbon Peaking and
Carbon Neutrality - Research on the Formulation of Six
Industrial Standards

中国建筑材料联合会

2023.5.26

China Building Materials Federation

May 26, 2023

关于作者

周丽玮，教授级高工，现任中国建筑材料联合会副秘书长兼标准质量部主任，主要负责建材行业标准化、质量管理和计量管理工作。

联系方式：010-57811079，zlw@cbminfo.com

致谢

本研究由中国建筑材料联合会统筹撰写，由能源基金会（美国）北京办事处提供资金支持。

本研究是【能源基金会工业项目/工作组下的课题】。

在本项目研究过程中，研究团队得到了建材行业骨干单位的大力支持，包括：华新水泥股份有限公司、北京国建联信认证中心有限公司、安徽海螺水泥股份有限公司、中国建筑材料科学研究总院有限公司等，在此向他们表示诚挚感谢。

研究团队同时感谢以下专家在项目研究过程中作出的贡献：

徐永模	中国混凝土与水泥制品协会
李叶青	华新水泥股份有限公司
戴彦德	国家发改委能源研究所
武庆涛	建材工业质量认证管理中心
蔡玉良	中国水泥协会
狄东仁	中材国际研究总院
龚先政	北京工业大学
何捷	中国建筑材料科学研究总院有限公司
刘晨	中国建筑材料科学研究总院有限公司
何光明	北京建筑材料检验研究院股份有限公司
余学飞	中国建材检验认证集团安徽有限公司

目 录

一、项目概况.....	4
(一) 政策背景	4
(二) 行业背景	6
(三) 项目主要研究内容、目的和意义	7
(四) 项目完成情况	10
二、低碳标准化现状.....	11
(一) 国内外低碳标准化现状	11
(二) 水泥行业低碳标准化现状	12
(三) 六项行业标准国内外情况	15
三、主要研究内容.....	20
(一) 《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》	20
(二) 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥窑烟气碳捕集项目》	24
(三) 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目》	28
(四) 《低碳产品评价技术规范 通用硅酸盐水泥》	31
(五) 《水泥制品养护固碳技术规范》	37
(六) 《建材产品生命周期评价技术通则》	46
四、标准预期效益分析.....	54
(一) 《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》	54
(二) 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥窑烟气碳捕集项目》	55
(三) 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目》	56
(四) 《低碳产品评价技术规范 通用硅酸盐水泥》	57
(五) 《水泥制品养护固碳技术规范》	58
(六) 《建材产品生命周期评价技术通则》	59
五、总结及下一步计划.....	60
(一) 总结	60
(二) 下一步计划	62

一、项目概况

（一）政策背景

习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布中国力争于 2030 年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。为推进国家“双碳”目标的顺利实现，党中央、国务院作出了一系列重要部署。

《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》明确提出，要建立健全碳达峰、碳中和标准计量体系。加快完善地区、行业、企业、产品等碳排放核查核算报告标准，建立统一规范的碳核算体系。制定重点行业和产品温室气体排放标准，完善低碳产品标准标识制度。推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用。

《国家标准化发展纲要》提出，建立健全碳达峰、碳中和标准。加快节能标准更新升级，抓紧修订一批能耗限额、产品设备能效强制性国家标准，提升重点产品能耗限额要求，扩大能耗限额标准覆盖范围，完善能源核算、检测认证、评估、审计等配套标准。加快完善地区、行业、企业、产品等碳排放核查核算标准。制定重点行业和产品温室气体排放标准，完善低碳产品标准标识制度。完善可再生能源标准，研究制定生态碳汇、碳捕集利用与封存标准。实施碳达峰、碳中和标准化提升工程。

国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》提出，建立统一规范的碳排放统计核算体系。加强碳排放统计核算能力建设，深化核算方法研究，加快建立统一规范的碳排放统计核算体系。建立健全碳排放计量体系。健全法律法规标准。完善工业绿色低碳标准体系。建立重点企业碳排放核算、报告、核查等标准，探索建立重点产品全生命周期碳足迹标准。积极参与国际能效、低碳等标准制定修订，加强国际标准协调。

2021年12月14日，国家标准委、工信部等十部委联合印发了《“十四五”推动高质量发展的国家标准体系建设规划》，在建设碳达峰、碳中和标准领域国家标准体系中提出，加快制定温室气体排放核算、报告和核查，温室气体减排效果评估、温室气体管理信息披露方面的标准。推动碳排放管理体系、碳足迹、碳汇、碳中和、碳排放权交易、气候投融资等重点标准制定。完善碳捕集利用与封存、低碳技术评价等标准，发挥标准对碳前沿技术的引领和规范作用。

实现碳达峰、碳中和，是中国实现可持续发展、高质量发展的内在要求，也是推动构建人类命运共同体的必然选择。在此背景下，采取有效措施推动水泥行业节能降碳改造升级，实现绿色低碳转型，对建材行业提前实现碳达峰，助力国家总体实现碳达峰碳中和目标，构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互

促进的新发展格局具有重要意义。

（二）行业背景

中国是水泥生产与消费大国，目前全国水泥企业数量超过3000家，其中含熟料生产的水泥生产企业约1/3，水泥粉磨站企业约2/3，此外还有十余家水泥配置站。全国熟料实际总产能20.2亿吨，水泥产能38.30亿吨。2021年全国水泥累计产量23.63亿吨。目前水泥工业能源消耗总量为2亿余吨，在2020年水泥工业CO₂排放约为12.3亿吨，占全国CO₂排放大约10%。

水泥行业碳排放分为直接排放和间接排放，直接排放包括燃料燃烧排放和生产过程（碳酸盐分解）排放两部分；间接排放包括水泥生产环节中的电力消耗、以及发电、供热和运输等非生产环节的能耗所折合的CO₂排放。水泥行业CO₂排放主要源于熟料生产过程，其中碳酸盐分解所排放的CO₂，约占碳排放总量的60%；燃料燃烧产生的CO₂，约占排放总量的35%；电力消耗间接产生的CO₂，约占排放总量的5%。目前水泥行业的燃料结构以煤为主，煤炭占水泥生产所消耗能源的85%左右。面对上述问题，我会推动并加强包括政策研究、科技创新、标准质量等系列工作，在国家发改委、工信部、生态环境部等政府部门的领导下，先后组织完成了《建材行业碳达峰实施方案》《重点行业/领域（水泥）国家碳达峰行动方案》、水泥平板玻璃建筑陶瓷卫生陶瓷等四个重

点产业《节能降碳改造升级实施方案》等的编制工作。上述相关研究表明，促进水泥行业低碳转型和实现双碳目标须采取一系列创新措施，包括全面开展水泥生产过程能效提升行动，大力推进原/燃料替代、CCUS 等突破性技术，以及研发和应用低碳水泥产品。

标准对于规范引导行业的发展具有关键作用。此前，在促进产业节能环保和绿色制造方面，先后发布和实施了水泥单位产品能耗限额、能源管理体系实施指南、水泥生产企业能源计量器具配备和管理要求、绿色工厂评价等标准，为行业转型升级提供了标准化支撑。

目前，建材行业骨干企业围绕低碳技术装备和工艺、低碳产品方面开展了一系列攻关和示范，但由于缺少标准化技术规范的支持和驱动，特别是在窑炉尾气 CO₂ 利用、高比例燃料替代以及水泥窑炉烟气二氧化碳捕集与纯化催化转化利用方面，以及对项目节能降碳量评估与水泥的低碳产品评价方法等方面，不利于先进技术的推广应用及促进行业的绿色低碳转型。因此，亟需开展相应的标准研究，包括节能降碳技术的减碳量评估、低碳产品评价，以及开发和推广新型技术装备的技术规范等，从而为水泥及建材行业提前实现碳达峰碳中和提供有力支撑。

（三）项目主要研究内容、目的和意义

1. 项目主要研究内容

《支持水泥行业碳达峰、碳中和系列标准建设一六项行业标准的制定研究》项目中，在能源基金会支持下开展细致的研究工作并最终提出征求意见稿，具体包括《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥窑烟气碳捕集项目》《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目》《低碳产品评价技术规范 通用硅酸盐水泥》《水泥制品养护固碳技术规范》和《建材产品生命周期评价技术通则》。

2. 项目研究目的和意义

通过开展本研究，加快完善建材工业水泥领域低碳标准体系，全面提升水泥行业绿色低碳、节能减排水平，用更高的标准引领水泥企业转型升级，支撑中国水泥行业2023年前率先实现碳达峰。

(1) 完善水泥行业低碳标准体系，引领建材工业绿色低碳发展。水泥制造因其工艺特点，碳排放约占建材工业排放总量的70%，是建材行业碳排放重点领域。在碳达峰碳中和的目标背景下，中国水泥行业低碳技术创新步伐加快，新产品不断涌现，不仅消纳了大量的垃圾与固体废弃物，而且能源和原材料消耗逐年下降，社会效益十分显著。但低碳新技术、新工艺、新产品和碳排放核算、核查、减排效果评估方法等标准缺失，通过开展本研

究，能加快完善水泥行业低碳标准体系，搭建好全面引领建材工业绿色低碳发展的标准化顶层设计。

(2) 推动水泥行业科技成果标准化，促进低碳技术工艺推广应用。中国开展碳捕集、利用和封存技术相对较早，但主要用于石化、煤炭等领域，2018年中国水泥行业通过技术攻关，成功建立全球首个水泥窑碳捕集纯化示范项目，实现了5万吨/年的CO₂捕集纯化目标，该示范项目为中国水泥行业绿色低碳发展提供了关键技术路径。通过开展本研究，用标准化手段推动水泥行业碳捕集技术、固碳技术的推广应用，将有助于充分发挥低碳标准的规范和引领作用，促进水泥企业末端降碳技术推广应用，实现绿色低碳发展。

(3) 解决项目层面碳减排量统计核算方法标准缺失问题，规范碳排放统计核算体系建设。中国建材工业目前仅有GB/T 32151.8-2015《温室气体排放核算与报告要求 第8部分：水泥生产企业》等4项现行国家标准，没有针对碳捕集、燃料替代等降碳项目的碳减排量统计核算标准。通过开展本研究，针对水泥行业碳捕集、燃料替代等降碳项目提出科学的碳减排量统计核算方法标准，提高低碳项目减排效率，为中国加速建立健全统一规范的碳排放统计核算制度提供了关键依据，也是支撑“双碳”目标实现的坚实基础。

(4) 开展低碳产品评价，推动水泥企业绿色低碳转型。为促进低碳经济的发展，鼓励企业生产低碳产品和提供低碳服务，越来越多的国家在相关机构的支持和倡导下，评估和披露产品生命周期内的碳排放环境行为，向产品授予碳标志，开展低碳产品认证。目前，已有英国、德国、日本、韩国等十几个国家开展低碳产品认证，中国在低碳产品评价认证方面的工作刚起步，建材行业还没有低碳产品相关标准。通过开展本研究，针对建材行业水泥这类典型的高碳值的产品，以产品生命周期理念提出低碳产品评价标准，为低碳水泥产品认证工作提供依据，促进低碳水泥产品的推广应用，完善碳排放标准体系。

(四) 项目完成情况

截至 2023 年 3 月 31 日，中国建筑材料联合会已按照项目任务要求全部完成。其中，完成《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》等 5 项行业标准的征求意见稿和《建材产品生命周期评价技术通则》的报批稿。

表 1 项目完成情况表

序号	标准名称	标准类型	完成情况
1	水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范	行标	完成征求意见稿
2	基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥窑烟气碳捕集项目	行标	完成征求意见稿
3	基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目	行标	完成征求意见稿

4	低碳产品评价技术规范 通用硅酸盐水泥	行标	完成征求意见稿
5	水泥制品养护固碳技术规范	行标	完成征求意见稿
6	建材产品生命周期评价技术通则	行标	完成报批稿

二、低碳标准化现状

（一）国内外低碳标准化现状

标准是实现碳达峰、碳中和不可或缺的技术基础。截至 2022 年底，国际范围内，应对气候变化的标准已经覆盖了能源管理、环境管理、循环经济、建筑、交通等众多行业，ISO 发布的相关标准达到 1100 余项，主要用作支撑各国节能降碳减污工作。在能源领域，IEC 发布了 1700 多项标准，涉及电工电气、汽轮机、光伏、风电、智能电网、海洋航空运输、燃料电池等领域。

在中国，《碳达峰碳中和标准体系建设指南》的体系框架将“双碳”标准划分为基础通用、碳减排、碳清除和市场化机制等大类，截至 2023 年 6 月，已发布国家标准超过 1000 项，行业标准 700 余项，涵盖了石油、煤炭、化工、建筑、交通等行业。

“双碳”标准的实施与构建因参与主体多、涉及领域广，覆盖范围大，使其成为一项长期、系统、复杂的工作。目前中国“双碳”标准体系建设处在从小到大、从点到面、从普遍适用性质的通则标准向多行业、多环节适用性具体标准发展的关键时期，离全面支撑“双碳”目标的实现尚有差距。

（二）水泥行业低碳标准化现状

国际上，目前提出的低碳标准或规范文件的范围适用于所有实体和个人以及标的物，尚无专门针对水泥行业/产品的低碳标准或文件。与水泥行业相关的有：

序号	标准名称	标准号/文件名称	备注
1	组织层面上对温室气体排放和清除的量化和报告的规范性指南	ISO 14064-1	ISO 14064 系列标准——核算温室气体排放量的统一标准，国际标准化组织于2006年发布，2018年、2019年修订
2	项目层面上温室气体排放减量和清除增量的量化、监测和报告的规范性指南	ISO 14064-2	
3	温室气体申明审定和核查的规范性指南	ISO 14064-3	
4	商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范	PAS 2050:2011	英国标准协会于2011年发布
5	温室气体核算体系：企业核算与报告标准	GHG Protocol	世界资源组织和世界可持续发展工商理事会于2009年发布修订稿、2012年发布最终版
6	温室气体-产品碳足迹-量化要求及指南	ISO 14067-1	国际标准化组织于2013年发布
7	温室气体-产品碳足迹-沟通/标识	ISO 14067-2	
8	碳中和声明规范	PAS 2060: 2010	英国标准协会于2010年推出
9	碳中和及相关声明实现温室气体中和的要求与原则	ISO 14068	国际标准化组织于2020年启动

十四五之前，中国水泥行业在政策引导下，是以节能减排、资源综合利用为重点发展方向，在此期间，水泥行业低碳标准化工作主要依托课题研究等形式推进，加上国家层面的低碳标准体系缺失，并未成体系开展标准化研究，因此进展较慢，仅形成了

2 项国家标准和 3 项团体标准，具体如下：

表 2 建材行业现有低碳标准汇总表

序号	标准名称	标准号/计划号	标准类型
1	温室气体排放核算与报告要求 第 8 部分：水泥生产企业	GB/T 32151.8-2015	国标
2	基于项目的温室气体减排量评估技术规范 生产水泥熟料的原料替代项目	GB/T 33756-2017	国标
3	硅酸盐水泥熟料单位产品碳排放限值	T/CBMF 41—2018	团标
4	建材行业碳排放管理体系实施指南 水泥企业	T/CBMF 54—2019	团标
5	建材行业低碳企业评价技术要求 水泥行业	T/CBMF 57—2019	团标

十四五是中国高质量发展的关键时期，也是水泥行业实现绿色低碳发展的重要窗口期。随着各项“双碳”政策的不断出台以及《碳达峰碳中和标准体系建设指南》《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南（2023 版）》（征求意见稿）的提出，中国水泥行业低碳标准化工作迎来了快速发展，多项标准计划得到了批复，主要涉及核算与核查、技术与装备、管理与评价三类：

表 4 水泥行业低碳标准计划汇总表

序号	计划号	项目名称
1	2021-1774T-JC	基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目
2	2021-1775T-JC	基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥窑烟气碳捕集项目
3	2021-1783T-JC	水泥制造碳排放核查技术规范
4	2021-1785T-JC	水泥熟料替代原料应用技术规范 电石渣
5	2021-1786T-JC	水泥熟料替代原料应用技术规范 煤矸石

序号	计划号	项目名称
6	2021-1787T-JC	水泥制品养护固碳技术规范
7	2021-1788T-JC	水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范
8	2021-1789T-JC	水泥窑协同处置技术规范 生活垃圾预处理可燃物
9	2021-1790T-JC	水泥窑用生活垃圾预处理可燃物制备技术规范
10	2021-1791T-JC	无机纤维及制品固体废物分类管理细则
11	2021-1792T-JC	钢渣脱硫副产石膏在水泥企业应用技术规范
12	2021-1793T-JC	建材行业固定源二氧化碳排放在线监测技术要求
13	2021-1794T-JC	低碳产品评价技术规范通用硅酸盐水泥
14	2022-2037T-JC	铁铝酸盐水泥在海洋工程中应用技术规范

工业和信息化部、国家发展和改革委员会、生态环境部、住房和城乡建设部等四部门近日联合印发《建材行业碳达峰实施方案》中明确了行业发展的五大重点任务（强化总量控制、推动原料替代、转换用能结构、加快绿色创新、推动绿色制造）。在**总量控制方面**，主要是要发挥政策引导作用，加快水泥行业落后产能退出、产能置换、错峰生产等。在**推动原料替代方面**，水泥行业降碳潜力巨大（据统计，生产过程排放约占建材行业 CO₂ 排放总量的 50%以上，中国水泥熟料利用系数 0.5-0.65，美国等区域 0.8 以上），主要包括开发低碳水泥新品种的推广应用、加快提升固废利用水平和加快发展新型低碳胶凝材料等，目前受技术成熟度、原材料产地依赖性大等影响，更多处于研究阶段。在**转换用能结构方面**，主要包括加大替代燃料利用、加快清洁绿色能源应用、提高能源利用效率水平等。国内外水泥企业在替代燃料利

用技术相对较为成熟，拉豪、海德堡、西麦斯等国际知名企业部分窑线热量替代率超过 50%，国内代表企业华新水泥平均 TSR 超 17%，旗下黄石工厂 TSR 超过 40%、重庆地维工厂 TSR 约 95%。目前中国水泥行业使用替代燃料技术的生产线占比约 18%（近 300 条），据测算水泥窑协同处置的燃料热能利用效率约 70%（垃圾燃烧发电小于 25%），通过转换用能结构降碳潜力巨大。在加快绿色创新方面，包括研发重大关键低碳技术、推广节能降碳技术装备、数字化转型，其中关于重大关键低碳技术，建材行业发布了《水泥行业碳减排技术指南》，主要涵盖能效提升、原燃料替代、低碳水泥和碳捕集封存等技术，并给出各项技术的降碳预期效果，为水泥企业开展节能降碳技术改造提供参考。在推动绿色制造方面，包括构建高效清洁生产体系、绿色低碳产品体系、加快绿色低碳产品生产和应用。

通过上述分析，优先完善本项目中涉及的 6 项替代燃料、烟气二氧化碳捕集、养护固碳、低碳产品评价等标准，加快行业实现转换用能结构、绿色创新和绿色制造等任务，更符合当前实际，对促进水泥行业实现低碳可持续发展意义重大。

（三）六项行业标准国内外情况

1. 《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》

目前，在水泥行业碳捕集方面国际上的标准有 ISO/TR 27922-2021 Carbon dioxide capture. Overview of carbon dioxide capture technologies in the cement industry (CO₂ 捕集-水泥工业 CO₂ 捕集技术概述)，该标准概述了正在开发应用的各种碳捕集技术（化学吸收法、富氧/全氧燃烧、直接分离法、变压吸附法和钙循环法等等），简要介绍了在水泥行业具有潜在应用价值的 CO₂ 捕集技术，不涉及 CO₂ 运输、储存和利用等实操层面的技术内容。《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》是目前中国水泥行业唯一的碳捕集标准，是基于中国水泥行业应用 CCUS 技术现状的基础上编制的，内容上与 ISO/TR 27922-2021 协调一致，主要对 CCUS 系统和工艺技术内容进行了细致规定，更具有可操作性及可复制、可推广价值。

2. 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥窑烟气碳捕集项目》和《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目》

目前，国际上关于基于项目层面的碳排放核算规范有 WRI/WBCSD 联合发布的 The GHG Protocol for Project Accounting（温室气体专案减量议定书）、ISO 14064-2:2019 Greenhouse gases-Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and

reporting of greenhouse gas (温室气体 第 2 部分:项目层面上对温室气体排放和清除的量化与报告的规范及指南), 上述规范规定了项目层面上温室气体 (GHG) 减排或清除增加活动量化、检测和报告的原则、GHG 项目的说明以及对 GHG 项目的要求, 阐述了 GHG 项目相关的信息, 包括项目在策划和实施 2 个阶段的不同要求, 尚无专门针对水泥行业的项目减排量评估规范。国内关于水泥的项目减排量评估规范有 GB/T 33760-2017 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 通用要求》和 GB/T 33756-2017 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的原料替代项目》。其中 GB/T 33760-2017 是参考 ISO 14064-2 制定的, 内容上协调一致。GB/T 33756-2017 与本项目中的《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥窑烟气碳捕集项目》、《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目》等 3 个标准是依据中国水泥具体技术项目, 在 GB/T 33760-2017 的基础上制定的, 制定原则与 ISO 14064-2。区别在于 ISO 14064-2 和 GB/T 33760-2017 是属于通用标准, 仅对项目减排量评价提出了共性要求, 对于水泥行业具体项目减排量评价边界、减排量计算方法、数据核算/监测要求等没有具体规范。

3. 《低碳产品评价技术规范 通用硅酸盐水泥》

国际上尚无低碳产品评价技术规范标准，但是在低碳产品认证方面已经开展了系列工作。国外开展低碳产品认证，普遍采用第三方认证机构实施评价，权威的认可机构对认证机构的能力进行审核和监督、政府和社会采信认证结果的机制，评价过程依据的是产品碳足迹，生命周期中单位产品碳排放量低于一定数值，将会给予碳标签、碳等级或碳得分（各国家、各领域形式不同）。其中产品碳足迹核算采用的是 PAS 2060《碳中和证明规范》ISO 14067 Greenhouse gases-Carbon footprint of products - Specification and guidance at the product category level（温室气体 碳足迹 产品类别规范与指南）。《低碳产品评价技术规范 通用硅酸盐水泥》中单位产品碳排放也是采用生命周期理念核算水泥在原材料获取、生产阶段的碳排放量，核算方法与国际一致，具体指标等级确定是依据中国水泥行业实际。

4. 《水泥制品养护固碳技术规范》

目前利用混凝土固化 CO₂ 技术在各国都有一定的尝试和应用，但经查询，国际上没有水泥制品养护固碳相关标准规范，主要原因有两方面，一是该技术成本较高，二是头部企业将技术转化为专利，导致推广应用存在一定困难。《水泥制品养护固碳技术规范》是基于中国建材企业当前的产业化情况制定的，兼顾了已经成熟的各类养护固碳技术制定而成的。

5. 《建材产品生命周期评价技术通则》

产品生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是量化评价产品生产消费全过程的资源效率与环境影响的国际标准方法, 目前国际上标准有 ISO 14040 Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework (环境管理 生命周期评估 原则和框架) 与 EN 15804 《建筑工程的可持续性—环境产品声明—建筑产品类别的核心规则》。中国 GB/T 24040-2008 《环境管理 生命周期评价 原则与框架》等同采用 ISO 14040。ISO 14040 为各行业和各种产品的绿色发展提供了科学、规范的分析方法, 近年来在国内外得到广泛重视。由于建材产品种类繁多, 生命周期各阶段存在较大区别, 《建材产品生命周期评价技术通则》在 GB/T 24040-2008 基础上, 依据建材产品特点, 提出了适用于建材产品的生命周期评价方法, 标准制定原则和内容与 ISO 14040 协调一致, 相比 EN 15804 有以下创新: (1) 划分了建材产品原料与能源获取 (A1-A3)、产品生产 (B1-B2)、产品销售 (C)、施工和使用 (D1-D3)、生命周期末端 (E1-E4) 五个生命周期阶段; (2) 同时考虑了节能类建材产品、产能类建材产品的生命周期评价, 给出了常见建材产品从摇篮到大门 (A1-B2)、从摇篮到坟墓 (A1-E4) 等的功能单位定义示例, 使

标准具有可参考性、可操作性；（3）给出了详细的现场数据、背景数据收集表示例，便于开展建材产品生命周期评价。

三、主要研究内容

（一）《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》

作为资源能源依赖性的水泥行业，即使绿电发展到能够足以替代化石能源，但仍然会产生大量的二氧化碳排放，研究指出，水泥行业通过采取其他常规减排方案后，仍将有 48% 的碳排放量剩余。据行业估算，依据现有先进技术水平，水泥企业在全生产过程 CO₂ 极致排放量为 290kg. CO₂/t. ce 左右。因此水泥行业要实现碳中和，需要大力开展固碳技术研究。目前，碳捕集纯化技术可以捕集大量的尾气排放中的二氧化碳，也被认为是未来大规模减少温室气体排放、减缓全球变暖可行的技术之一。该标准是以安徽海螺水泥股份公司白马山水泥厂世界首条 CO₂ 捕集示范项目为依托开展制定的，以指导水泥企业建设碳捕集项目，进一步推广应用碳捕集技术，规范碳捕集技术的推广应用和项目的建设运行管理，为全国乃至全球水泥行业 CO₂ 捕集利用提供引领示范作用。

标准中规定了水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范的系统工艺与装备、安全与职业卫生、运行与维护管理、项目建设及验收等内容，其中系统工艺与装备是标准的核心内容。

1. 明确水泥窑烟气二氧化碳捕集的系统要求

(1) 系统构成

水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化装置主要包括烟气预处理系统、CO₂吸收系统、CO₂解吸及吸收剂再生系统、CO₂纯化系统、CO₂储存系统。

(2) 系统性能

水泥窑烟气具有气体处理量大、CO₂分压低、杂质含量较高等特点，目前从水泥窑烟气中分离 CO₂ 的技术主要有化学吸收法、物理吸收法、膜分离法、吸附分离法、低温分离法等技术。研究表明，针对水泥窑烟气，化学吸收法是分离方法中经济性最好的一种方法，同时通过调研发现，国内外已建成的烟气二氧化碳捕集装置均采用化学吸收法，故选用化学吸收法。

标准规定的化学吸收法主要适用于 CO₂ 浓度为 $\geq 15\%$ 的水泥窑烟气，若采用 CO₂ 浓度 $< 15\%$ 的水泥窑烟气，经济性将下降。对于引入富氧燃烧技术的水泥窑烟气可考虑采用变压吸附等方法，降低捕集成本。

目前中国建材行业唯一的安徽海螺水泥股份有限公司白马山水泥厂，建成的年捕集量为 5 万吨的水泥窑烟气二氧化碳捕集装置，长期运行过程中，捕集系统能耗约为 3.5 GJ/tCO₂。为了保证该关键指标的先进性，故此处捕集系统能耗指标定为 3.5GJ/tCO₂。

同时，纯化系统能耗指标设定为 $0.7\text{GJ}/\text{tCO}_2$ 也是在长期运行过程中确定的。

2. 规范了水泥窑烟气二氧化碳捕集的系统工艺与装备

系统工艺与装备部分对二氧化碳捕集与纯化系统中每个子系统进行描述，同时对压力容器、塔式容器、换热器、阀门等设备的设计和材质进行了规定，以保证设备和系统的质量。

(1) 一般要求

选用的化学吸收剂应具备 CO_2 吸收能力较强、吸收速率快、腐蚀性小、不易降解、不易发泡，能够回收利用等。通过对化学吸收剂各方面性能特点进行约束，最大程度上降低吸收剂能耗。

(2) 烟气预处理系统

烟气预处理系统包括引风机、水洗脱硫塔、烟气降温水洗泵、脱硫泵、脱硫水洗泵、脱硫液配制罐、硫化物中和回收反应罐、脱硫液再生循环泵、降温水洗罐、塔顶烟气水洗罐、脱硫液罐等。

(3) 二氧化碳吸收系统

CO_2 吸收系统的核心是吸收塔。为避免 CO_2 吸收剂受气体中硫化物、氮氧化物、氯化物等影响导致失去活性，所以进入吸收塔的烟气必须符合相关规定。

塔器按其结构可分为两大类：板式塔和填料塔。当前在选择塔型时，主要考虑的重点往往是处理能力和分离效率，对于烟气

吸收解吸过程而言，由于物理吸收过程效率较低，且烟气及吸收溶液均有一定的腐蚀性，因此更宜选择填料塔。目前国内及国际上建造的几套烟气二氧化碳捕集装置中，吸收塔和再生塔均选用的是填料塔，因此，塔器选用时推荐填料塔。

(4) CO₂解吸及吸收剂再生系统

吸收剂再生系统核心是溶液解吸塔。由于整个过程解吸塔塔顶温度较高，因此应在塔顶出口管道设置温度检测及高低温报警。为避免塔顶带出更多水分，增大系统能耗，再生塔一般采用微正压操作。

(5) CO₂纯化系统

CO₂纯化系统的作用是将解吸塔排出 CO₂ 气体进行压缩、干燥、脱硫、吸附、精馏、冷却、液化、储存，使 CO₂ 达到工业级、食品级或其他要求。一般解吸塔出来的气体应排空一段时间，检测到 CO₂ 纯度大于 95% 以上时才能进入到 CO₂ 纯化系统。

CO₂ 净化包括脱硫系统、干燥系统、吸附系统。对于脱硫过程，必须用固体脱硫剂将其吸附净化才能达标。对于干燥过程，必须用大吸附量高选择性的固体吸附剂才能吸附达标。对于吸附过程，要用专用固体吸附剂把这些微量杂质全部吸附除尽。

(6) 二氧化碳储存系统

CO₂ 储存过程，对于小于 250m³ 的双层罐，其内胆应用整体电炉加热消除金属热加工过程产生的内应力。当液体储罐体积大于 250m³ 时，大体积整体消除应力的电炉建造困难，一般都用球罐储存 CO₂ 液态产品，材质常用 16MnDR。当体积大于 2000m³ 以上时，采用 16MnDR 所设计的罐壁很厚很重，球罐大都换成机械强度更高的 07MnNiVDR（调质）材质制作，便于减小壁厚进而减轻罐体重量。低温液体储罐内液体的充装系数不能大于 0.9，罐顶要留有气态空间，便于充装槽车时能够和车顶气体进行压力平衡，保证装车过程顺畅。

（7）系统参数检测与过程控制

碳捕集与纯化系统应设置自动检测及控制系统。有毒气体应符合国家现行标准规定。操作者应遵守检测规定，遇到参数异常情况及时进行工艺调控，保证碳捕集系统正常稳定运行。此外，该标准还对系统的热工参数、服务器配置、热工保护系统应遵循的原则等进行了详细描述。

（二）《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥窑烟气碳捕集项目》

通过原料替代方式减少的 CO₂ 排放量十分有限，碳捕集技术是目前水泥行业唯一能进行大量深度脱碳的减排技术，且通过碳捕集得到 CO₂ 进行纯化处理，还可作为资源循环利用，因此碳捕

集技术未来将在水泥行业产生巨大的减排效果。研究建立一套适用于企业、区域及行业尺度的基于水泥窑烟气碳捕集项目的二氧化碳减排评价技术规范，制定可操作强、适用面较广的水泥窑烟气碳捕集项目二氧化碳减排评价标准，将有助于各利益相关方更深入地了解水泥窑烟气捕集项目的预期效果，提升企业应用降碳技术积极性。

该标准按照 GB/T 33760-2017 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 通用要求》规定的原则、要求与方法，提出了水泥窑烟气碳捕集项目二氧化碳减排量评估的边界、基准线情景以及减排量评估方法与监测要求。

1. 确定项目边界识别及基准线情况

该标准参考有关文献，并结合前期调研情况，确定了项目边界及基准线情景。

项目边界：应包括与水泥窑碳捕集项目有关的和受水泥窑碳捕集项目影响的设备、设施（系统）或组织等。

基准线情景确定：对于改建项目，该标准设定的基准线情景为改建前的水泥熟料生产线。对于新建水泥窑烟气碳捕集项目，该标准设定的基准线情景为项目所在地（省级行政区内）采用行业主流技术的水泥熟料生产线，且未采用烟气碳捕集项目。

2. 提出减排量评估方法

GB/T 33760-2017《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 通用要求》中，规定应根据项目类型和温室气体源的特点，选择适用的评估方法（如已发布的国家标准、指南等技术性文件或已备案的国家温室气体自愿减排方法学），分别对项目 and 基准线情景下的每个温室气体源中的每一种温室气体在一定时期内的排放量进行计算，汇总得到项目排放量和基准线排放量。

目前碳捕集技术在水泥行业应用较少，还处于研究阶段，工程应用还处于试点阶段，双碳目标后，国家多项政策中都提到要推进规模化碳捕集利用与封存技术研发、示范和产业化应用。针对发展中的水泥窑碳捕集项目，目前还没有对项目实际减排量进行评估的相应的技术依据，考虑到未来水泥窑碳捕集项目发展趋势，该标准为水泥窑碳捕集项目二氧化碳减排量评估提供技术支撑，该标准目前选择核算法作为评估减排量的方法，鉴于这是第一个水泥窑碳捕集项目减排量评估标准，且水泥窑碳捕集技术还不成熟，因此，核算法是目前阶段最直接且最便于实施和推广应用的方法。

鉴于以上两方面原因，该标准在减排量评估方法中采用了核算法，但 CO₂ 在线监测设备已在电厂试点应用，水泥行业还未应用，暂时无法验证，因此项目可依据核算法对减排量进行评估，

后期如 CO₂ 在线监测设备在水泥行业已推广应用，可考虑修订标准增加监测法。

该标准采用核算法对水泥窑烟气碳捕集项目减排量进行评估。

核算法：根据现场调研情况，白马山水泥厂目前碳捕集量采用计量器具进行计量，考虑到碳捕集项目还处于试点阶段，未来其他碳捕集项目捕集工艺及吸收剂选择的不确定性，以及标准应具有适应性和可推广性，该标准中核算法考虑配合计量器具进行核算。

二氧化碳捕集系统较复杂，主要流程为窑尾烟气通过引风机进入脱硫水洗塔，脱硫处理后进入吸收塔。吸收塔内的有机胺溶液对烟气中 CO₂ 进行选择吸收，生成不稳定的化合物。剩余烟气通过分水罐后排向大气。有机胺溶液进入解吸塔中利用窑尾发电产生蒸汽对溶液加热解析，得到纯度较高的 CO₂。纯度较高的 CO₂ 气体通过净化、冷凝、压缩、干燥等工艺最后变为液态 CO₂，经过精馏塔后在成品罐中收集。捕集过程中使用到的能源为电力和余热发电蒸汽。收集到的 CO₂ 通过入成品罐的管道流量计进行计量，同时出厂的 CO₂ 产品通过地磅秤重复核。

3. 规范监测要求

水泥窑烟气碳捕集项目二氧化碳减排量评估的监测程序制定应按照 GB/T 33760-2017 中 5.10 执行。

测量仪器/表精度应满足相关要求，定期检定和校准，检定和校准机构应具有测量仪器/表检定资质，检定和校准相关要求应按照国家相关计量检定规程执行。

在项目实施中，项目业主应按照规定实施监测准则和程序，通过各类测量仪器/表的监测获得 CO₂ 排放数据，记录、汇编和分析有关数据，并对数据存档，保证测量管理体系符合质量和规范要求。

（三）《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目》

节能降碳已经成为全球共识，欧洲水泥协会在 2020 年 5 月 12 日发布新的低碳路线图，强调在从水泥延伸到混凝土的完整价值链上实现 2050 年水泥工业的净零排放。其中，在熟料减碳环节中，替代燃料带来的 CO₂ 减排比例最大，到 2030 年占熟料碳减排量的 49%，到 2050 年占熟料碳减排量的 44%。随着中国双碳目标的宣言及一系列顶层政策文件、行业“十四五”规划的陆续出台，国内水泥窑正加速由传统的协同处置过渡到替代燃料的大量使用。以城市固体废弃物、工业废弃物及副产物、生物质为原料，经适当预处理后制备成目前全国水泥窑协同处置线比例已达 22%，但水泥窑平均 TSR 还不到 5%，而目前行业先进生产线已实现 40%TSR，吨熟料 730kgCO₂ 的排放水平。

中国水泥企业正在积极布局和发展替代燃料利用项目，由于现有方法学使用效力较低，亟待科学评估企业采用水泥窑燃料替代项目减排量的效果，补充全国碳排放权交易体系的抵消机制、部分纳入管控的重点排放单位自主减排和建设项目环境影响评价中的碳排放评价。

该标准按照 GB/T 33760-2017 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 通用要求》规定的原则、要求与方法，提出了水泥窑燃料替代项目二氧化碳减排量评估的边界、基准线情景以及减排量评估方法与监测要求。

1. 确定项目边界识别及基准线情况

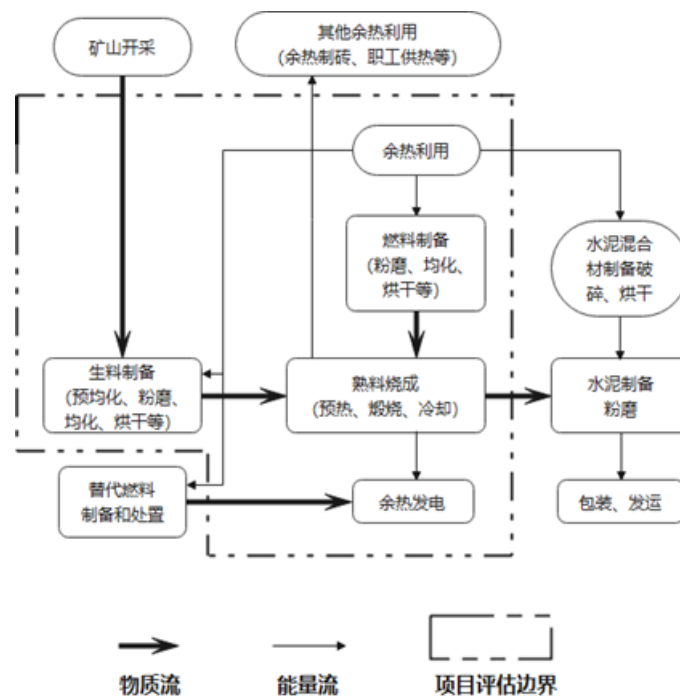


图1 项目评估边界示意图

该标准充分考虑现有标准体系、编制目的，考虑生产水泥熟料过程中应用替代燃料项目后，对水泥熟料生产环节 CO₂ 的主要减排项目，参照《水泥生产企业温室气体排放报告补充数据表》排放源，确定了项目边界及基准线情景。

项目边界：应包括与水泥窑燃料替代项目有关的和受水泥窑燃料替代项目影响的设备、设施（系统）或组织等。具体来说，项目核算边界从原燃料进入生产厂区开始，包括水泥熟料的原燃料及生料制备、熟料烧成，熟料到熟料库顶为止，不包括厂区内辅助生产系统以及附属生产系统，不包含项目工厂内的替代燃料制备和处置发生电力和/或项目活动消耗的化石燃料的排放量。

基准线情景确定：对于改建项目，该标准设定的基准线情景为改建前的水泥熟料生产线，宜使用改造前的核查报告。对于新建水泥窑燃料替代项目，该标准设定的基准线情景为项目所在地采用行业主流技术的水泥熟料生产线，且未采用燃料替代项目，能源消耗宜对应 GB16780 熟料单位产品综合煤耗 2 级指标。

2. 提出减排量评估方法

清洁发展机制（CDM）中的《Partial substitution of fossil fuels in cement or quicklime manufacture CM-070-V01》已被国家发改委转化为《CM-070-V01 水泥或者生石灰生产中利用替代燃料或低碳燃料 部分替代化石燃料》方法学。不同

于 CDM 是将欠发达地区减碳项目签发的减排量用于发达国家履行其承诺的强制减排义务，根据《碳排放权交易管理办法》（试行）中第二十九条：“用于抵消的国家核证自愿减排量，不得来自纳入全国碳排放权交易市场配额管理的减排项目。”因此，水泥行业中被替代的化石燃料所带来的碳减排无法再次用于抵消的国家核证自愿减排量。另外，阻止生物质废弃物处理或无控燃烧而避免的甲烷排放量大，但生物质废弃物种类繁多、缺乏数据基础，难以通过监测的方法确定 CO₂ 减排量。

考虑到现阶段监测法难以扣除使用替代燃料和协同处置废弃物产生的碳排放（碳中性），为减少不确定性，该标准采用核算法对水泥窑燃料替代项目减排量进行评估。

核算法：减排量计算与基准线排放量相比，项目减少的 CO₂ 排放量即为该项目的减排量。一定时期内因减排项目产生的减排量。

（四）《低碳产品评价技术规范 通用硅酸盐水泥》

低碳产品是指与同类产品或者相同功能的产品相比，碳排放量值符合相关低碳产品评价标准或者技术规范要求的产品。国际上，2006 年起英国碳信托开展了“碳削减标志计划”，试点计算了几十种产品的碳足迹。2008 年英国正式发布 PAS 2050《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》，此规范主要基于

LCA 方法制定，计算企业到消费者 B2C 产品的碳足迹时需要包含产品的整个生命周期，企业到企业 B2B 产品碳足迹是指产品运到另一个制造商时截止。2013 年，国际标准化组织发布了 ISO/TS 14067:2013《产品碳足迹量化和沟通的要求和指南》，也是基于生命周期评价进行碳足迹的计算，但在系统边界设定与 PAS 2050 有所不同，允许忽略一些次要工艺，并需依据各方研究结果选定截断准则。此文件中特别提到如果碳足迹评估的目的是要与消费者沟通，其计算应包括生命周期的所有阶段；而对于内部应用（如内部业务、供应链优化与设计支持），也可量化产品生命周期的部分阶段。

2013 年 2 月，中国发布《低碳产品认证管理暂行办法》（2015 年 11 月 1 日废止，同时出台了《节能低碳产品认证管理办法》）为低碳产品认证提供了规范化、统一化的框架性要求，对于不同产品类别的具体认证模式在低碳产品认证规则中规定。第一批纳入认证体系的硅酸盐水泥、平板玻璃、铝合金建筑型材和中小型三相异步电动机等 4 类产品在低碳认证技术规范和相关实施规则中，主要都是针对制造，以简化低碳产品认证的工作。这与国外普遍采用的全生命周期评价的低碳产品认证评价方法存在着显著不同，忽略了原材料、分销和零售以及废弃和回收等过程。

为强化与国际通用低碳标准的衔接，兼顾可操作性、数据准确性和成本等现实情况，该标准的核算边界包括水泥产品生命周期中的原材料获取和生产制造两大阶段，为水泥低碳产品认证提供依据。对于水泥产品生命周期中销售、使用等环节将作为水泥产品下游砂浆或混凝土等产品生产应用过程中的考量因素。

1. 规定通用硅酸盐水泥低碳产品评价边界

核算边界包括：

(1) 原料与能源获取阶段（A1-A3）。A1，产品制造所需原料（如石灰石、粘土等）开采、加工过程，以及替代原料的预处理过程；A2，能源（如煤、电力、柴油等）的开采、加工过程，替代燃料的预处理过程；A3，运输至工厂阶段：原料、能源到工厂的运输过程。

(2) 产品生产阶段（B1-B2）。B1，水泥（熟料）产品制造从原料进厂到产品产出的过程；B2，原料、能源在场内的运输过程。

功能单位：以“生产 1t 水泥熟料”或“生产 1t 水泥产品”作为低碳产品评价的功能单位。

统计周期：低碳产品评价的数据应基于可计量的统计期进行统计，通常为最近的一个自然年，特殊情况下可为最近的连续 12 个月。

通用硅酸盐水泥和通用水泥熟料低碳产品评价所涉及的温室气体类型包含二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）。

2. 确定硅酸盐熟料低碳产品限额等级

标准调研分析了 2021 年的 45 家熟料生产企业，总熟料产量约 1.23 亿 t（占中国熟料产能的 7%），按照熟料产量占比进行排放量分析统计。

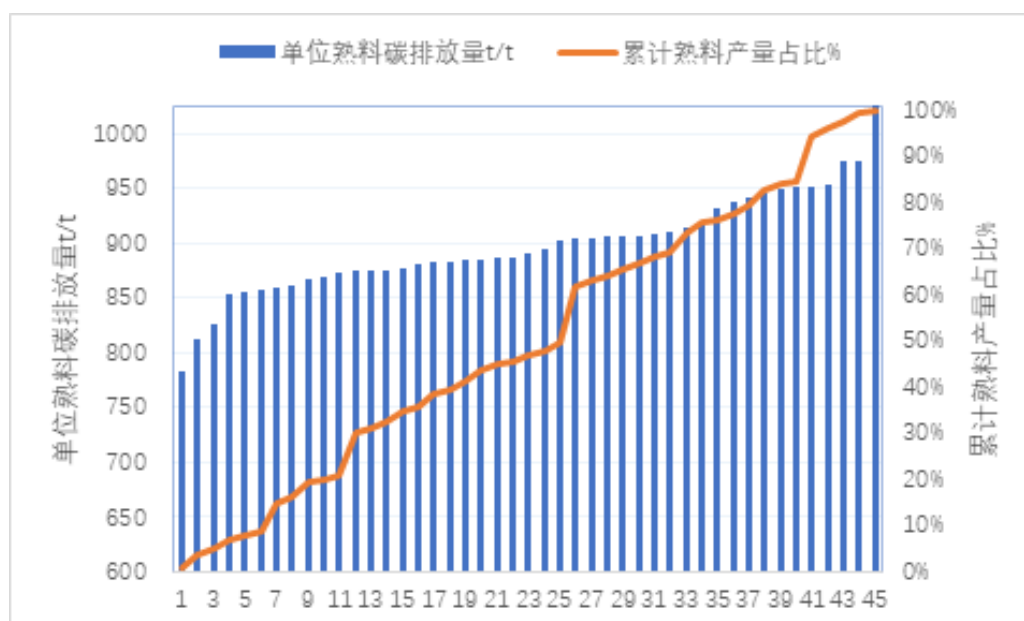


图2 45家水泥熟料生产企业2021年碳排放强度

熟料等级限值采用调研的 45 家熟料企业数据分析获得的 5% 的单位熟料碳排放量作为 1 级限值，20% 的单位熟料碳排放量作为 2 级限值，50% 的单位熟料碳排放量作为 3 级限值。以此数据作为水泥熟料单位产品碳排放限值的依据。

表 3 硅酸盐水泥熟料低碳产品限额等级 单位：kgCO₂ eq./t 熟料

产品类别	单位	1 级	2 级	3 级
通用硅酸盐水泥熟料	kgCO ₂ eq./t 熟料	≤850	≤870	≤902

3. 确定硅酸盐水泥低碳产品限额等级

在水泥产品碳排放限额值计算过程中，需要考虑生产水泥产品的原材料获取（除熟料外）和原燃料运输产生的碳排放。

通过对调研企业数据分析，在含有熟料线的水泥产品 34 家企业 P.042.5 水泥原材料获取（除熟料外）的碳排放占比在 0.08%-4.02%范围内，见图 3。独立水泥粉磨生产 7 家企业的 P.042.5 水泥产品原材料获取（除熟料外）的排放占比在 0.29%-3.90%范围内，见图 4。原材料获取（除熟料外）的碳排放修正系数选取两种情况的中间值 1%。原燃料运输的排放占比在 0.01%-1.74%范围内，见图 5，独立水泥粉磨生产 7 家企业的 P.042.5 水泥产品原燃料运输的排放占比在 0.64%—2.66%范围内。

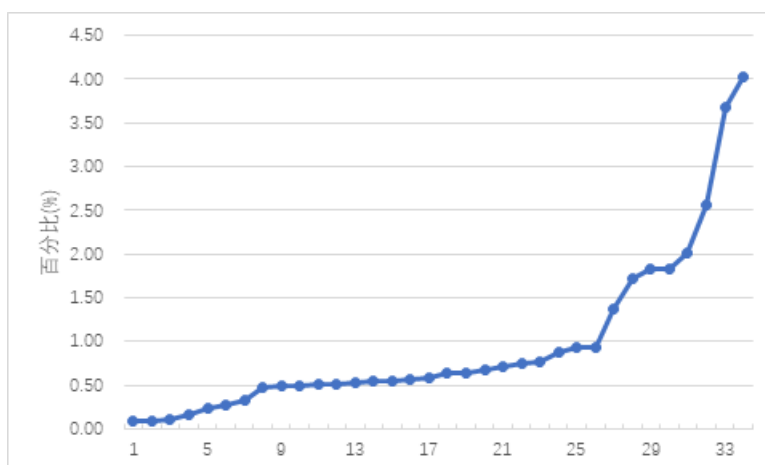


图 3 含有熟料线的水泥产品原材料获取（除熟料外）排放占比

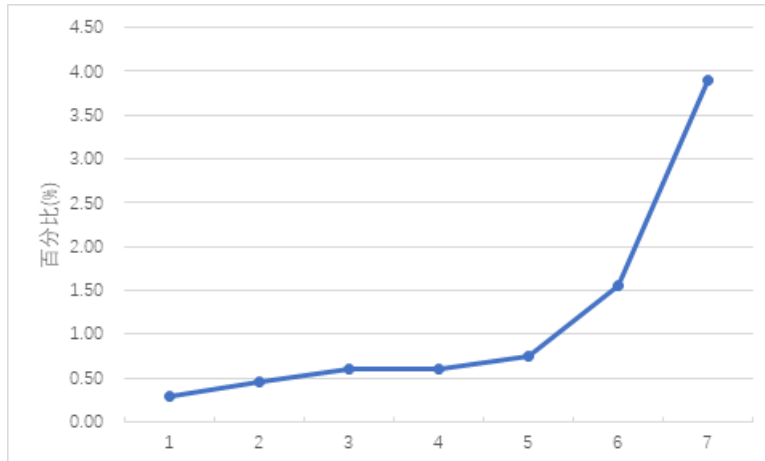


图4 独立水泥粉磨生产企业的水泥产品原材料获取（除熟料外）排放占比

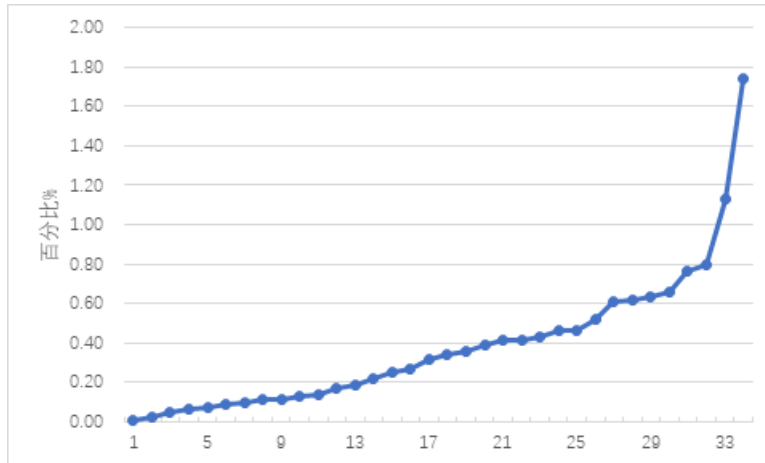


图5 含有熟料线的水泥产品原燃料运输排放占比

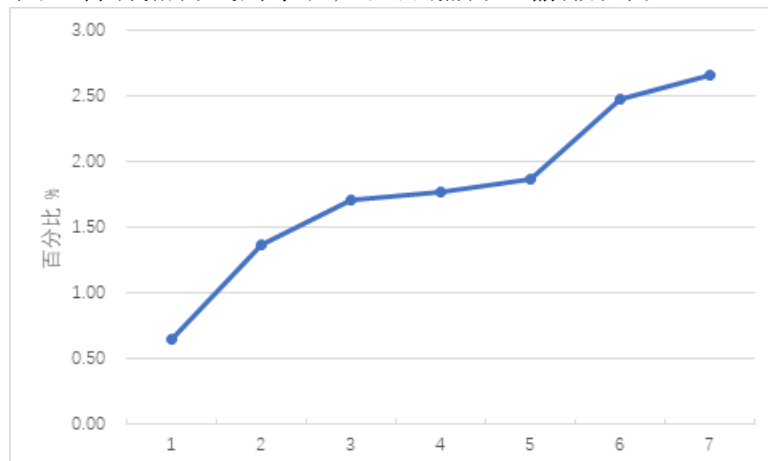


图6 独立水泥粉磨生产企业的水泥产品原燃料运输的排放占比

表4 通用硅酸盐水泥低碳产品限额等级 单位: kgCO₂ eq./t 水泥

产品类别	代号	混合材 (%)	强度等级	1 级	2 级	3 级
硅酸盐水泥	P·I	0	62.5 (R)	≤865	≤887	≤923

	P·II	≤5	52.5 (R)	≤844	≤865	≤900
			42.5 (R)	≤809	≤830	≤863
普通硅酸盐水泥	P·O	>5 且 ≤20	52.5 (R)	≤765	≤785	≤817
			42.5 (R)	≤713	≤732	≤762
矿渣硅酸盐水泥	P·S·A	>20 且 ≤50	52.5 (R)	≤670	≤688	≤716
			42.5 (R)	≤540	≤555	≤578
			32.5 (R)	≤410	≤421	≤440
矿渣硅酸盐水泥	P·S·B	>50 且 ≤70	52.5 (R)	≤453	≤466	≤486
			42.5 (R)	≤367	≤377	≤394
			32.5 (R)	≤280	≤288	≤302
火山灰硅酸盐水泥	P·P	>20 且 ≤40	52.5 (R)	≤670	≤688	≤716
			42.5 (R)	≤583	≤599	≤624
			32.5 (R)	≤497	≤510	≤532
粉煤灰硅酸盐水泥	P·F	>20 且 ≤40	52.5 (R)	≤670	≤688	≤716
			42.5 (R)	≤583	≤599	≤624
			32.5 (R)	≤497	≤510	≤532
复合硅酸盐水泥	P·C	>20 且 ≤50	52.5 (R)	≤670	≤688	≤716
			42.5 (R)	≤497	≤510	≤532

(五)《水泥制品养护固碳技术规范》

上述内容提到，水泥行业通过采取其他常规减排方案后，仍将有 48% 的碳排放量剩余。末端碳捕集及利用是水泥行业实现碳中和的必经之路。虽然中国水泥企业已实现了水泥窑烟气二氧化碳捕集技术应用，但当前水泥窑应用 CCUS 项目存在技术不成熟，运行成本高，捕集后的二氧化碳应用范围较窄等现实问题，以至于各大水泥企业积极探索创建 CCUS 项目作为技术储备，而并未全面推广应用。因此，开发新的低成本固碳利用技术意义重大。

20 世纪 70 年代首次发现 CO₂ 能与水泥中硅酸钙快速反应开始，水泥制品矿化养护固碳技术的研发和应用受到了国内外广泛关注。

经过半个世纪的发展，CO₂矿化养护混凝土技术工艺、设备得到了显著进步，目前已在国内广泛应用。加拿大 Carbon Cure 公司已在全球 400 多个工厂安装二氧化碳注入预拌混凝土设备，并且已在 20 个项目上进行了应用。日本政府在 2020 年 12 月制定的“绿色增长战略”中将固碳作为政策支援的重点领域，并将鹿岛建设株式会社的混凝土“CO₂-SUICOM”指定为吸收和固化 CO₂ 的代表性技术之一。国内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，河南强耐新材股份有限公司利用 CO₂ 矿化养护蒸压砖开展万吨级工业试验，中国建材总院河南兴安 CO₂ 矿化制备墙体材料中试，中国能建——浙江兰溪二氧化碳捕集与矿化利用 1.5 万吨 CO₂ 集成示范项目。

该标准将综合当前各类水泥制品养护固碳技术，明确 CO₂ 养护技术的范围和分类，确定关键技术要求和管理要求，最终形成能够引领行业绿色低碳发展的标准规范。

1. 规定原材料特性要求

根据水泥制品生产工艺和养护固碳工艺过程，该标准规定了胶凝材料、集料、外加剂、纤维、拌合水、养护用 CO₂ 气体 6 种原材料。重点介绍胶凝材料、养护用 CO₂ 气体。

(1) 胶凝材料。养护固碳反应是将 CO_2 与钙镁基材料反应生成矿化产物，其关键是利用胶凝材料及骨料中的碱性组分，包括未水化的硅酸二钙、硅酸三钙、水化产物等在一定条件下进行碳酸化反应。除了水泥外，多种工业固废也具有一定胶凝活性和固碳潜力。此外， C_3S_2 、CS 等非常规硅酸盐水泥具有 CO_2 矿化活性而不具备水化活性，可以参与固碳养护水泥制品的生产过程，因此该标准涉及的胶凝材料包括普通硅酸盐水泥、非常规硅酸盐水泥、工业固废等，执行现有标准的技术要求。

(2) 养护用 CO_2 气体。目前，工业 CO_2 有液体 CO_2 和高纯 CO_2 等，是矿化养护技术实验室和中试研究的主要 CO_2 来源，该标准规定其也可以用于水泥制品养护固碳技术，所用的工业 CO_2 应符合 GB/T 6052《工业液体二氧化碳和》GB/T 23938《高纯二氧化碳》标准相关要求。

2. 一般要求

主要针对养护用 CO_2 气体接入设施、贮存设施、预处理设施、厂内输送设施、固碳设施、循环利用设施 6 个方面。

(1) 二氧化碳气体接入设施

对 CO_2 气体接入养护装置提出要求。在水泥制品矿化养护过程中，要实现压力调节、压力调节、快速切断、压力测量、气体测量、汽化调节等自动控制措施，同时具备手动操作功能。

根据养护池和养护釜内制品和气体的进出方向，本部分规定养护池内养护用 CO₂ 气体接入宜配备泵力、气力或机械传输带输送装置，并与制品进出方向一致；蒸压釜内养护用 CO₂ 气体接入宜在蒸压釜适当位置开设接入口。

(2) 二氧化碳气体贮存设施

对 CO₂ 进入水泥制品生产企业后的贮存提出要求，并根据养护用 CO₂ 的不同来源提出了不同的贮存要求。

(3) 二氧化碳气体预处理设施

对养护用 CO₂ 气体进入养护装置前在不满足要求时应采取的预处理措施提出要求。应根据养护用 CO₂ 气体特性及养护固碳工艺要求确定预处理工艺流程和实施。采用气化后的工业液体 CO₂ 作为气源时，宜进行换热处理使养护用 CO₂ 气体达到环境温度后再通入养护釜或养护池。

(4) 二氧化碳气体厂内输送设施

对养护用 CO₂ 气体在厂内的运输提出要求，水泥制品收到养护用 CO₂ 气体后，应根据生产工艺配备密闭性能良好的输送设备，确保 CO₂ 气体在装卸场所、贮存场所、预处理区域和接入区域的转运和输送；转运输送路线应远离办公和生活服务设施，输送设备所用材料应满足防腐要求，设置相关的安全警告标识。

(5) 二氧化碳气体固碳设施

水泥制品养护固碳设施可采用现有养护池或蒸压釜，经改造后使其满足矿化养护条件，现有设备应符合 JC/T 720 规定的要求及相关的设计要求；改造后的设施应经相关部门验收和登记。针对新建的水泥制品养护固碳设施，应在设施设计和建造过程中，全面考虑材质选择、进出气端口、气流流量控制、气体检测安全控制等要求。

(6) 二氧化碳气体循环利用设施

对当养护固碳反应后排出的 CO_2 浓度较高的情况下提出要求。当采用经富集处理后的 CO_2 和高浓度 CO_2 （包括高 CO_2 浓度工业烟气、气化处理的液体 CO_2 和高纯 CO_2 ）作为气源时，反应后的 CO_2 浓度依然较高时，应采用循环风机将反应后的气体收集后重新返回反应系统。

(7) 排放要求

对养护固碳技术的废气、废水排放进行规定。当采用工业烟气作为养护用 CO_2 时，通常是采用持续进气—排气的方式，在整个矿化反应过程中，出口排出的 CO_2 浓度会随着碳化反应速率发生波动，在反应初期碳化速率较快，出口 CO_2 浓度会降至 5%~10%（入口 CO_2 浓度 25%）；随着养护时间的推进，碳化反应速率逐渐减慢，养护固碳设施排出废气中 CO_2 浓度可以达到 20%左右。

3. 固碳工艺过程技术要求

根据该标准的技术边界，技术要求增加的内容主要与 CO₂ 从准入评估、接收与分析、贮存运输、预处理、养护到循环的各流程技术要求。主要关注的内容包括：气体中 CO₂ 含量、气体杂质成分、安全管理、养护温度、养护湿度、环境质量等。

(1) 养护用二氧化碳气体准入评估

对养护用 CO₂ 气体进入水泥制品生产企业前的准入评估进行要求，未知特性和未经鉴定的不明性质气体禁止作为养护用 CO₂。

(2) 养护用二氧化碳气体接收与分析

对养护用 CO₂ 运输到水泥制品企业时的检查和检验提出要求。首先是通过表观和气味初步判断收到的气体与合同标注的类别的一致性，如出现不一致或破损或泄露，应立即与产气单位、运输单位和相关负责人联系，若无法确定气体特性，应拒绝接收；对进场后的 CO₂ 气体，应进行取样分析，进一步判定气体特性与合同的一致性；水泥制品养护固碳生产企业应对各养护用 CO₂ 气体产生单位的相关信息进行定期的统计分析，评估其管理的能力和养护用 CO₂ 气体的稳定性，并根据评估情况适当减少检验频次。

(3) 养护用二氧化碳气体贮存运输技术要求

养护用 CO₂ 气体应与水泥制品生产企业内常规原料、燃料和产品分开贮存，禁止共用同一贮存设施，贮存设施的操作运行和

管理应满足《危险化学品安全管理条例》和《压力容器安全技术监察规程》中的相关要求。

(4) 养护用二氧化碳气体预处理技术要求

基于该标准 5.1.3 的相关要求，对进厂的养护用 CO_2 进行相应的预处理应根据入厂养护用 CO_2 气体的特性和养护固碳工艺的要求，按照水泥制品养护固碳生产方案，对含 CO_2 工业烟气进行干燥、汽化、换热等预处理。

(5) 养护固碳工艺技术要求

对水泥制品养护固碳过程中的技术提出要求，包括对养护用 CO_2 气体的含水量、氧含量、 CO_2 、 H_2S 和其他污染物进行监测，单位产品能源消耗限额应按照 GB 38263 执行。

(6) 养护用二氧化碳气体循环技术要求

当采用经富集处理后的 CO_2 和高浓度 CO_2 （包括高浓度工业烟气、气化处理的液体 CO_2 和高纯 CO_2 ）作为气源，且水泥制品的固碳量低于接入系统的 CO_2 时，易出现反应釜/反应池排出的 CO_2 浓度仍然较高，若直接排放不利于行业的碳减排。因此该标准提出该情况下宜采用养护用 CO_2 气体的循环利用技术，利用循环风机将固碳反应排出的高浓度 CO_2 返回到养护系统进行下一轮养护反应，或将其余符合该标准中 4.6 要求的养护用 CO_2 气体进行混合

后引入反应系统。为确保养护固碳反应效果，混合后的 CO₂ 浓度与条该标准的款 4.6 保持一致。

4. 制品性能指标要求

(1) 水泥制品产品性能技术要求

水泥制品养护固碳技术是在水泥制品生产基础上引入了 CO₂，其形成的产品性能应符合相应产品的技术指标要求。

(2) 水泥制品固碳技术要求

水泥制品固碳技术要求规定了单位产品固碳量和胶凝材料固碳率两个技术指标，其中单位产品固碳量是指每吨水泥制品固化的 CO₂ 的质量，胶凝材料固碳率是指单位水泥制品固化的 CO₂ 的质量与所含胶凝材料质量之比。综合考虑不同胶凝材料固碳能力差别（典型胶凝材料理论固碳率如表 2 所示），以及该技术在实验室和工业应用的相关数据，该标准规定了分级认定方式，将固碳等级分为 5 级，每级对应不同固碳量和固碳率，要求每一级别同时满足对应的产品固碳率和单位水泥制品胶凝材料固碳率的数值要求。其中 5 级最高，单位产品固碳量 50kg/t—产品，胶凝材料固碳率 $\geq 10\%$ 。

表 2 典型胶凝材料理论固碳率

种类	组成及其质量分数/%									Steinour 理论 固碳率/%
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	其他	
粉煤灰 1* ^[18]	35.44	17.40	7.15	26.45	5.73	2.34	1.90	0.53	3.06	28.92
粉煤灰 2* ^[18]	53.97	20.45	5.62	12.71	2.84	0.52	0.57	1.11	2.21	14.64
粉煤灰 3* ^[21]	54.39	23.65	3.90	11.30	1.17	—	2.91	0.75	1.93	14.98
水泥 1* ^[21]	19.80	4.90	2.00	63.10	2.00	3.80	0.85	—	3.55	50.83
水泥 2* ^[21]	18.00	3.41	4.02	66.50	3.48	3.16	—	1.02	0.41	55.22
水泥 3* ^[26]	14.20	8.60	3.20	54.90	1.20	2.60	0.20	0.80	14.3	44.01
氨氧精炼炉渣 (AODS) ^[27]	25.80	12.00	11.30	34.40	6.21	6.56	1.80	0.78	1.15	33.46
粒化高炉矿渣 (GBFS) ^[27]	30.70	12.70	0.43	47.00	3.93	3.43	—	0.59	1.22	39.85
碱性氧气转炉渣 (BOFS) ^[29]	14.76	3.44	21.69	47.61	6.59	0.32	—	—	5.59	44.39

5. 固碳量和固碳率的试验方法

养护固碳水泥制品的固碳量和固碳率是评价其低碳性能的关键指标，目前国内外已有多个研究机构开展了相关研究，已报道的评价方法主要有增重法、热重分析法、碳元素分析法、气体计量法等。增重法是大多数研究和示范工程中普遍采用的固碳量评价方法，固碳样品的增重包括吸收的水和 CO₂ 两大部分，水泥的水化反应以及碳化反应均可导致样品化学结合水量的大幅度变化，需要测量蒸发水的质量才能得到较为准确的固碳量。在实验室研究中，通常通过直接测试养护釜整体的质量变化或利用吸水纸收集养护釜内壁蒸发水的方法获得蒸发水质量，但在工业生产中较难实现。因此，该标准拟采用同规格平行样品增重法进行两个指标的试验和核算。

热重分析法是利用热重分析仪测量样品的热重曲线，通过计算局部 CO₂ 质量损失率计算样品固碳量。在工业生产中，水泥制品在釜内呈堆叠状态，不同位置的固碳量也会有一定差异，且该

方法需要采用精密仪器，操作复杂、分析时间长，因此，热重分析法和碳元素分析法更适用于实验室研究。

气体计量法是通过测量养护固碳过程中的 CO₂ 消耗量来计算样品的固碳量。该方法的难点在于气体具有可压缩性，需要对反应器内部温度和压力进行精准测量才能获得较为准确的消耗量。在工业生产时若采用窑炉烟气作为养护气源时，会进一步增加测量的难度。也是下一步研究工作的重点。

（六）《建材产品生命周期评价技术通则》

生命周期评价（LCA）是量化评价产品生产消费全过程的资源效率与环境影响的国际标准方法（ISO 14040，GB/T 24040），注重于研究产品系统在生态健康、人类健康和资源消耗领域内的环境影响，不涉及经济和社会方面的影响。为了建立规范、统一的 LCA 评价体系，保证 LCA 结果的可信度与可比性，ISO 14025 进一步提出了制定各类产品 LCA 评价细则（Product Category Rules, PCR），这也是规范产品碳足迹、水足迹计算的基础。由于国外 PCR 工作开展的较早，因此 PCR 较完善、EPD 认证体系丰富、业务体系更为成熟，国内 LCA 起步晚，整体 PCR 数量少、PCR 不完善、EPD 认证体系少、企业—咨询机构—认证机构互联互通的业务链条不成熟。该标准规定的建材产品生命周期评价体系框架与 ISO 14040、ISO 14044 和 GB/T 24040 保持一致，规定了建

材产品科学的生命周期评价步骤，包括目标和范围的确定、生命周期清单分析、生命周期影响评价和生命周期解释等，旨在科学量化产品资源环境绩效，提高各类建材产品开展绿色、低碳等评价分析的可比性，促进国外各类认证体系互认，减少贸易壁垒。

1. 评价目的和范围的确定

生命周期评价方法的实施框架习惯以 1990 年 SETAC（国际环境毒理学与化学学会）研讨会上确定的三角形模型为基础。生命周期评价的四个主要实施阶段包括目的与范围的确定、生命周期清单分析、生命周期影响评价和环境改善评价。如图 7 所示，范围界定、数据收集和评价结果的描述都必须与实现预定的目的相一致。

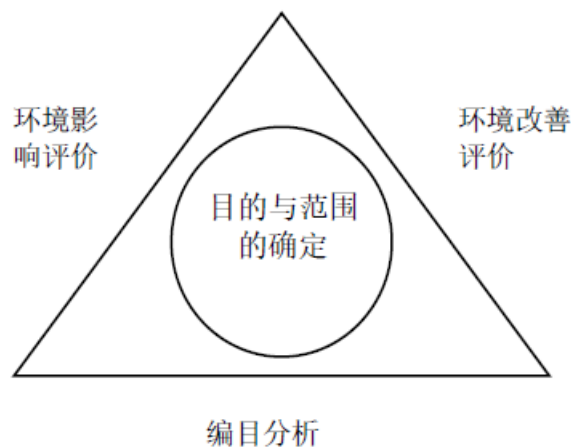


图7 SETAC三角形模型

随着生命周期评价方法的进一步发展，整体技术框架又有了新的表述形式。图 8 所示为 1997 年 ISO 14040 标准定义的技术框架，包含目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释等

4 个组成部分。SETAC 在 1991 年提出生命周期评价的技术框架与 ISO 14040 《环境管理—生命周期评价—原则与框架》中无规定的技术框架存在差异。

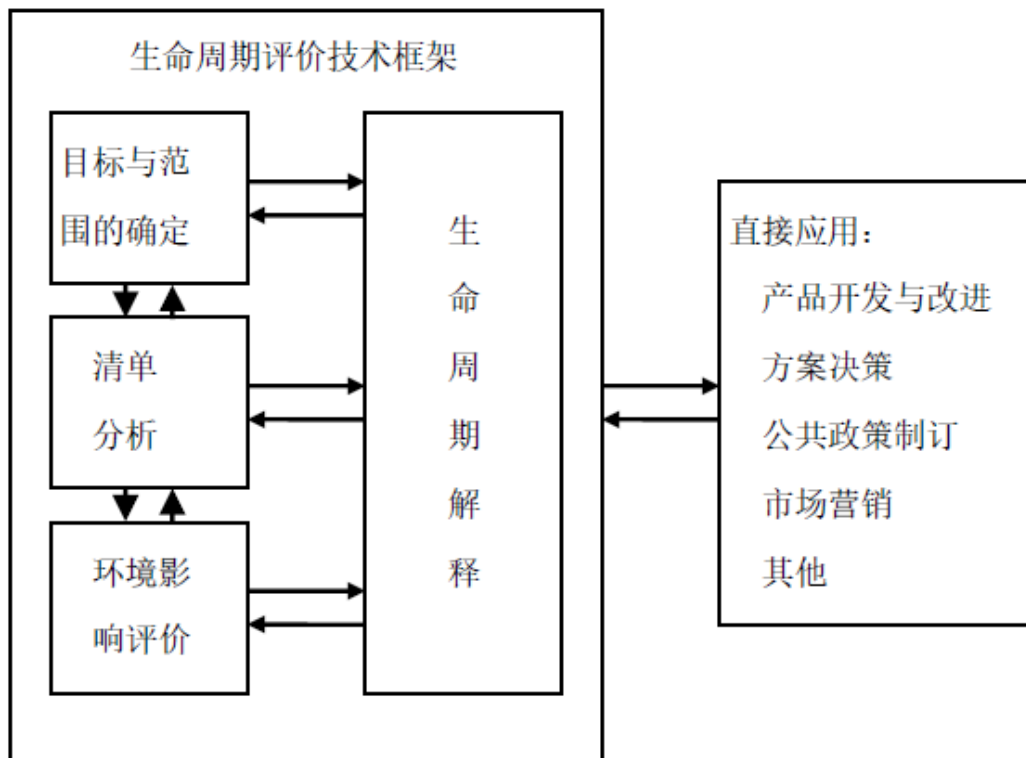


图8 生命周期评价技术框架

目的与范围的确定是生命周期评价中的第一步，也是至为重要的一步，其重要性在于它决定为何要进行某项生命周期评价（包括对其结果的应用意图），并表述所要研究的系统和数据类型。因此，目的与范围的确定和生命周期清单分析发展相对比较完善。

LCA 研究目的中须明确陈述其应用意图，开展该项研究的理由以及它的使用对象，即研究结果的接收者或预期交流对象。

根据为评价所确定的目标，LCA 可能非常综合，也可能非常粗略。LCA 的范围应该根据需要达到的既定目标来确定。应妥善规定研究范围，以保证研究的广度、深度和详尽程度与之相符，并足以适应所确定的研究目的。LCA 本身是一个反复的过程，在研究过程中，可能由于收集到新的信息而要对研究范围加以修正。

在确定生命周期评价研究范围时需要分析的因素主要有：研究范围的修改及论证、功能、功能单位、系统边界、数据类型、输入输出初步选择准则、数据质量要求等。

因此，该标准按照 GB/T 24044-2008《环境管理 生命周期评价 要求与指南》中 4.2 的要求确定建材产品生命周期评价的目的和范围。

(1) 目的

GB/T 24040《环境管理 生命周期评价 原则与框架》中要求，研究目的中须明确陈述其应用意图，开展该项研究的理由以及它的使用对象。

研究范围依据目的确定，需要分析的因素主要有：研究范围的修改及论证、功能、功能单位、系统边界、数据类型、输入输出初步选择准则、数据质量要求等。

(2) 功能单位

由于 LCA 方法是一种基于定量计算的评价方法，所以产品系统各方面情况的描述就需要以一定的功能为基准，这便是功能单位的选取。功能单位是对产品系统输出功能的量度，关系到环境清单数据的具体数值。在目的与范围确定阶段，如何选取适当的功能单位是一个至关重要的问题，其基本作用是为有关的输入和输出提供参照基准，以保证 LCA 结果的可比性。在评估不同系统时，LCA 结果的可比性是必不可少的，否则无法在同一基础上进行比较。

因此，该标准规定了功能单位的选择应与研究目的和范围保持一致，为输入和输出数据的归一化提供基准。应根据具体建材产品和行业系统性能等特点，定义可量化、可测算、具有统计意义的功能单位。如：可依据研究目的和范围将水泥产品功能单位定义为 1t 水泥熟料或生产 1t 水泥熟料。

(3) 系统边界

生命周期阶段的划分来源于生命周期的定义，生命周期指产品从自然中来再回到自然中去的全部过程，即从“摇篮到坟墓”（from cradle to grave）的整个生命周期各阶段的总和，具体包括从自然中获取最初的资源、能源，经过开采、原材料加工、产品生产、包装运输、产品销售、产品使用、再使用以及产品废弃处置等过程。因此，完整意义上的生命周期阶段应该包括产品

的全生命周期，对于建材产品而已，包括原料与能源获取阶段、产品生产阶段、产品的施工和使用阶段以及报废阶段。

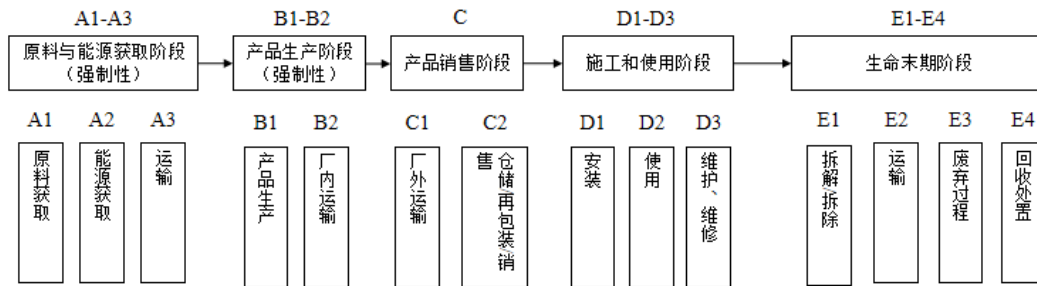


图9 建材产品全生命周期评价的系统边界

其中，建材产品的生命周期阶段至少应涵盖原料与能源获取阶段（A1-A3）、产品生产阶段（B1-B2）。

2. 生命周期清单分析

(1) 数据确认

在数据收集过程中必须检查数据的有效性。有效性的确认可包括建立物质和能量平衡和（或）进行排放因子的比较分析。

因此该标准规定，在生命周期评价的过程中，通过物料平衡、能量平衡、与历史数据和相近工艺数据对比等方式，确认数据的准确性与合理性。对于异常数据，应分析原因，予以替换，替换的数据应满足数据质量要求。

(2) 数据计算

在数据收集与确认完成后，以统一的功能单位作为产品系统所有单元过程中物质（能量）流的共同基础，利用收集的数据计算并进行建材产品的生命周期清单分析。计算程序如下：

数据与单元过程数据的关联：对每个单元过程确定适当的基准流，并定量计算单元过程的输入和输出数据；

数据与功能单位数据的关联：将各个单元过程的输入输出数据转换为每功能单位的原材料消耗、能源消耗和环境排放；

数据合并：将所有以功能单位为基准的单元过程数据进行合并，形成产品生命周期清单。

（3）分配

生命周期清单分析有赖于将产品系统中的单元过程以简单的物质流或能量流相联系。实际上，只产出单一产品，或者其原材料输入与输出仅体现为一种线性关系的工业过程极为少见。大部分工业过程都是产出多种产品，并将中间产品和弃置的产品通过再循环用作原材料。当环境负荷要用其中一种或部分产品来表征时，就产生了输入输出数据如何在多个产品或多个系统之间分配的问题。

该标准规定了应依据 GB/T 24044-2008 中 4.3.4 的要求将物流、能量流和环境排放分配到各个产品。在评价过程中涉及的共生产品清单分配方法应在产品生命周期评价报告中予以明确说明。

建材产品分配程序宜优先采用质量分配法，若质量分配法不可行，则可采用经济价值分配法。对于闭环里循环使用的共生产品，不需要分配。如：水泥生产过程中余热发电系统产生的电力。

3. 生命周期影响评价

生命周期影响评价是生命周期评价的第三个阶段，是其中理解和评价产品系统潜在环境影响的大小和重要性的阶段。

(1) 影响类型、类型参数和特征化模型的选择

生命周期影响评价过程中，需要辨识与选择环境影响类型、相关类型参数与特征化模型、类型终点及与其相关的生命周期清单分析结果。环境影响类型的选择既可以与传统类型相一致，如温室效应、酸雨、资源消耗等，也可以由决策者根据实际需要代表性的特殊问题来确定影响类型。

因此该标准规定，应根据研究目的和范围选择类型参数和影响评价方法，并明确阐述和书面说明所用的影响评价方法。

(2) 基本步骤

该标准规定建材产品开展生命周期评价应符合 GB/T 24044-2008 中 4.4 的相关要求，可按照以下基本步骤：将产品生命周期清单结果划分到特定的影响类型中；进行类型参数和特征化因子的选择或计算；形成一种或几种影响类型的产品生命周期评价指

标结果；适用时可按照 GB/T 24044-2008 的要求进行归一化、分组和加权。

特征化过程是将利用不同影响类型的参数结果来共同展现产品系统的生命周期影响评价特征，其计算过程包括将利用特征化因子将生命周期清单分析结果换算成通用单位，并把同一影响类型的换算结果累加，得到量化的指标结果。通过对不同建材产品前期调研、计算，确认大宗建材产品环境影响占比突出的环境影响类型较为固定，因此该标准规定建材产品生命周期影响评价的影响类型至少应包括：全球变暖、化石能源耗竭、颗粒物形成、矿产资源耗竭、酸化等。

（3）附加环境信息

除该标准该部分中要求的指标外，附加环境信息应在相应产品生命周期评价技术规范中予以罗列，且应在产品生命周期评价报告中描述。附加环境信息包括但不限于建材产品在使用过程中对环境造成较大影响的性能指标。如水泥生产过程中的危废处理量、陶瓷砖产品的放射性等。

四、标准预期效益分析

（一）《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》

水泥生产过程中排出的烟气中的 CO₂ 的浓度在 20%-30%，必须要把 CO₂ 浓度提纯到 95% 以上才能实现捕捉、填埋或利用，这就导

致了水泥行业 CO₂ 捕集成本高（超过 300 元/吨）。当前碳交易成本为 55.50-59.00 元/吨，因此目前水泥龙头企业积极部署创建碳捕集生产线，并作为技术储备和示范应用，而中小型水泥企业更倾向于碳交易而不是应用碳捕集技术。该标准的制定将长期引领和规范中国水泥企业应用碳捕集技术，现已推动了青州中联、福建龙鳞、金隅北水环保科技等水泥企业创建 CO₂ 捕集纯化项目，合计捕集能力超过 40 万吨/年，同时多个水泥企业 CCUS 项目正在备案中。鉴于中国基础设施建设高峰已过，混凝土和水泥的消费量势必将降低，水泥行业已基本实现了碳达峰，因此对于 2030 年前实现碳达峰目标的紧迫性降低，水泥企业更倾向于开发可再生能源电力资源、氢能、生物质能等降碳的潜力，预计 2030 年前，该标准将主要指导各主要水泥企业开展碳捕集示范应用，而不是全行业推广应用；2030 年~2060 年，随着国内水泥产量进一步下降、碳捕集成本降低和碳交易成本增加、碳封存技术和二氧化碳应用场景更成熟，水泥企业应用碳捕集技术的积极性将有所提高，预计 2060 年，水泥行业每年将有 1 亿吨左右的二氧化碳捕集、封存和利用，碳捕集技术在水泥企业将实现常态化应用。该标准是当前中国水泥行业唯一指导企业应用碳捕集技术的文件，对中国水泥行业实现双碳目标具有重要意义。

（二）《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 水泥窑

烟气碳捕集项目》

该标准是中国第一本针对水泥窑烟气碳捕集项目二氧化碳减排量评估技术的行业标准，技术指标和计算方法充分结合了国家现行相关标准的技术规定，同时充分考虑从业企业水平的差异性，将推动水泥企业精准计算利用烟气碳捕集技术带来的碳减排量，作为下一步水泥行业全面开展碳交易的计算依据之一。从长期看，该标准的建立有助于强化企业对水泥行业深度脱碳发展意识，进一步促进 CCUS 技术在水泥行业的推广应用，降低 CO₂ 排放量，进而缓解温室效应，同时还对推动建立健全二氧化碳减排量评估体系，增强相关企业对二氧化碳减排量的核算、报告、监测、核查等意识，提高统计监测和计量能力，为未来再生资源行业参与碳排放交易、碳税、碳配额、碳足迹、开展国际比对等工作提供技术支撑。

（三）《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目》

应用替代燃料降低煤炭使用或提高煤炭燃烧效率的技术在各行业中都受到了重视，水泥行业以可燃废弃物替代天然化石燃料，作为水泥窑熟料生产，以实现绿色低碳发展。研究表明，水泥生产中使用 40% 的替代燃料，可实现 100kgCO₂/t 熟料的降碳效果。因此该技术在国内外得到了广泛应用，德国和荷兰的热替代率

(TSR) 分别达到了 70%和 90%，英国为 50%以上，中国水泥窑协同处置线比例已达 22%，平均 TSR 不到 5%。国外知名水泥企业以应用替代燃料作为主要降碳手段之一，拉法基豪瑞将 TSR 提升至 37%作为 2030 年集团目标，海德堡水泥提出到 2030 年实现 TSR44%的目标，国内的华新、红狮、海螺、中建材、华润、金圆、台泥、葛洲坝等大中型水泥企业已陆续开展水泥窑燃料替代项目，其中华新水泥部分工厂已实现 40%的 TSR，吨熟料 730kgCO₂ 的排放水平，正在攻关创建 100%的 TSR 示范线（2027 年）。国内水泥窑线正在加速由传统的协同处置过渡到替代燃料的大量利用。该标准是中国第一项针对水泥窑燃料替代项目二氧化碳减排量评估技术的行业标准，对加快推动中国水泥行业大比例燃料替代技术的发展有重要意义，中长期来看，该标准将促进中国水泥在 2030 年实现 10%的 TSR 目标，减少排放 26kgCO₂/t 水泥，2050 年达到 70%以上，为水泥行业实现源头降碳提供有效支撑，具有较好的社会和经济效益。

（四）《低碳产品评价技术规范 通用硅酸盐水泥》

《2030 年前碳达峰行动方案》提出要推广绿色低碳产品，完善绿色产品认证与标识制度。当前中国低碳产品评价认证仍依据的是《节能低碳产品认证管理办法》，前文提到，该方法针对的是企业边界，对于水泥产品单位产品碳排放量仅考虑了生产制造

阶段，跟国际普遍采用的生命周期评价方法存在显著差异。该标准与 ISO/TS 14067 和 PAS 2050 保持一致，直接解决了国内外水泥低碳产品评价体系不统一的问题，增强了水泥产品碳排放信息的可比性，同时有助于企业分析自身碳排放水平、及时调整自身战略部署。此外，该标准技术指标是充分考量了当前行业水平确定的，通过标准的实施，将直接引领企业降低单位产品碳排放，以每吨熟料降低 20kgCO₂eq. 为例，估算 18 亿吨熟料产能年可减少的碳排放为 0.36 亿吨 CO₂eq. 可显著降低水泥的碳排放。

（五）《水泥制品养护固碳技术规范》

末端捕集、封存和利用技术将在中长期都会作为中国水泥以及其他高碳排放企业实现零碳目标的重要技术路径。目前被捕集的 CO₂ 有多种应用途径，从应用结果来看，包括碳清除、碳抵消和碳增长 3 大类。碳清除应用场景：利用 CO₂ 矿化养护混凝土和以 CO₂ 作为植物气肥促进农作物生长等，直接消除该部分利用 CO₂；碳抵消应用场景：以 CO₂ 作为生产原料替代原有含碳原料制备产品或燃料，如生产碳酸饮料、塑料、生物质燃料等，该方式能减少含碳原料的使用，但最终随着饮料消耗、塑料焚烧和燃料燃烧，仍会排放 CO₂；碳增长应用场景：利用 CO₂ 气体挤压效应提高岩层中的化石能源采集率，最终带来化石能源的用量提高。综上，利用 CO₂ 矿化养护混凝土和以 CO₂ 作为植物气肥促进农作物生长等方

式，消除捕集的 CO₂，是真正实现碳清除的有效方式。该标准的制定将为企业开展养护固碳工程建设提供指导，其中规定的水泥制品养护固碳技术对各种 CO₂ 浓度都具有很好的应用场景，如水泥厂烟气中较低浓度的 CO₂ 也可直接用于强化骨料和养护制砖，无需纯化至 90%，因此该技术相较碳捕集技术成本较低，在各行业都具有较好的应用潜力。预计到 2025 年，中国利用养护固碳技术可实现每年清除近 6 万吨的 CO₂，并生产 6 亿块实心混凝土砖，满足工程建设的同时实现节能降碳，具有良好的效益。考虑到配筋混凝土中碱环境能有效延缓钢筋锈蚀，该养护固碳技术将中和混凝土的 OH⁻，因此该技术主要应用于非配筋混凝土，非配筋混凝土用量决定了该技术推广应用潜力，目前中国预制构件产能约 5000 万立方米，非配筋占比低于 40%，理论上每年可固化 CO₂ 约 140 万吨。

（六）《建材产品生命周期评价技术通则》

为了建立规范、统一的 LCA 评价体系，保证 LCA 结果的可信度与可比性，国外发达国家建立了严格产品生产生命周期评价技术规范（产品种类规则），产品覆盖面较广，这也支撑了环境足迹、碳足迹、水足迹及 EPD 认证等工作的开展。中国近几年开展了相关工作，但目前覆盖的产品类别较少，且不同 EPD 体系的产品种类规则存在差异，这不利于各类评价工作的开展和产品出口。

该标准的制定是指导建立建材行业的产品生命周期评价技术规范体系，为各类建材产品在同一尺度开展生命周期评价提供遵循，保证产品环境足迹、碳足迹、水足迹和 EPD 认证的结果可信及互认，该标准的发布将为企业应对趋势越来越明显的绿色低碳贸易壁垒，参与国内外市场竞争提供有力支撑，有助于促进中国建材产品走向国际市场，将会中国建材产品创造良好的品牌效应和经济效益。

五、总结及下一步计划

（一）总结

本项目与国家提出的“碳达峰碳中和”目标一脉相承。项目的实施进一步完善了水泥行业绿色低碳标准体系，提升中国建材工业绿色低碳发展水平，规范引导建材企业进一步实现低碳转型。

1. 以课题研究形式支持水泥行业低碳标准研制工作，完善建材行业低碳标准体系

基于水泥行业的绿色低碳转型需求，通过课题研究的方式，加强水泥行业低碳评价标准顶层设计，具体开展水泥行业节能降碳技术的减碳量评估、低碳产品评价以及新型技术装备标准等六项绿色低碳标准研究工作，加快完善水泥行业低碳标准体系，支撑水泥行业绿色低碳转型。

2. 加快水泥关键降碳技术工艺标准研制，支撑行业提前碳达峰

峰

本项目对水泥企业利用 CCUS、养护固碳等关键降碳技术成果开展了标准化工作，通过本项目研究，为相关技术在中国水泥行业推广应用提供了遵循和依据，有助于水泥企业技术创新、实施技术改造和实现末端降碳，推动水泥行业尽早实现碳达峰。

3. 聚焦水泥行业项目碳排放统计核算标准缺失问题，助力碳排放统计核算体系建设

目前水泥行业碳排放统计核算相关标准仅有 GB/T 32151.8-2015《温室气体排放核算与报告要求第 8 部分水泥生产企业》，远未形成国家、地区、行业等各层面统一规范的碳排放统计核算体系。通过本项目研究，在水泥企业建立 CCUS 和燃料替代项目提供碳排放计算方法，科学评估项目减碳量，对水泥行业进一步推广应用碳捕集、碳排放统计核算技术和加快建立统一规范的碳排放统计核算体系具有重要意义。

4. 首次开展水泥低碳产品标准研制，满足行业低碳发展需求

《低碳产品评价技术规范 通用硅酸盐水泥》是中国建材行业首个低碳产品评价标准，通过本项目研究，为水泥行业低碳产品评价认证提供依据，能引导水泥企业生产低碳产品，进而全面降低水泥行业碳排放量。

5. 加强建材工业碳达峰碳中和专项研究，推进专项标准研究

进度，充分发挥标准的规范引领作用

通过本项目研究，推进了 6 项水泥行业低碳标准化工作，项目的推进支撑了建材工业低碳标准体系的建立，完善了工业领域低碳标准体系，解决了水泥等重点领域碳排放核查核算、低碳技术与装备、低碳产品等标准缺失的问题，极大解决了标准配套问题，对系统推进水泥行业的绿色低碳标准化工作具有支撑意义。

（二）下一步计划

中国建筑材料联合会将充分结合中国水泥行业特点，继续做好本项目中 6 项低碳行业标准的制定工作，按时推进，尽快发布，同时强化水泥行业其他相关低碳标准制修订，扩大标准覆盖面，加强标准实施监督和能力建设，持续完善水泥行业低碳标准体系，切实发挥标准支撑和引领作用。

1. 继续开展水泥行业低碳系列标准的制修订工作

一是加快推进已立项的标准计划，推动水泥行业新技术、新产品推广应用和统一规范的碳排放统计核算体系的建立；二是将继续做好水泥行业低碳标准体系的顶层设计，加快制定绿色低碳标准，推动碳足迹、碳排放、碳减排等碳核查核算类，新型低碳技术与装备类以及低碳产品与企业评价、碳监测与计量设备与方法、碳报告声明与信息披露、碳数据管理、碳标签和资源综合利用协同降碳等低碳标准，指导建材行业低碳标准体系建设。

2. 加大标准宣贯推广力度

积极推进已立项标准的研制进度，并提前部署标准发布后的宣贯推广工作计划。将联合相关协会、标委会、认证评价检测机构、企业等积极推动标准的实施，一方面加大宣传力度，确保标准深入企业，指导企业对标进行绿色改造提升，挖掘节能减排潜力、明确绿色改造目标，提升产品绿色水平，推动建材工业绿色发展；另一方面加大推广力度，推进标准深入实施，推动建材行业实现绿色转型、高质量发展，同时加强标准实施效果分析，促进行业健康发展。

3. 加大低碳标准化人才培养力度

依托建材工业低碳标准化工作组，联合专业协会、高校、科研院所、企业，共同建立“产学研用”合作的人才培养体系，培养一批高端、复合型的低碳标准化人才，提升人才输出质量。

4. 营造低碳发展良好环境

搭建交流平台，加强建材工业低碳发展宣传，丰富低碳内涵，加强行业自律，积极发挥社会监督作用，不断凝聚社会共识，营造并自觉维护建材低碳发展氛围，促进绿色低碳理念传承发展。

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

中国建筑材料联合会

2023.5.26

China Building Materials Federation

May 26, 2023