



中国建筑材料联合会
绿色低碳建材分会
China Building Materials Federation
Green & Low Carbon Branch



中国混凝土与水泥制品协会
预拌混凝土分会



建筑材料碳标签
Building Materials Carbon Label

2025低碳混凝土发展报告



2025年6月6日发布



中国建筑材料联合会
绿色低碳建材分会
China Building Materials Federation
Green & Low Carbon Branch

中国建筑材料联合会绿色低碳建材分会

中国建筑材料联合会绿色低碳建材分会（简称绿色低碳建材分会）成立于2016年，是中国建筑材料联合会为积极应对绿色发展挑战，寻求建材行业可持续发展解决方案而成立的专业性分会。

绿色低碳建材分会深度参与建材行业绿色制造、ESG、节能降碳、绿色低碳建材体系建设，通过标准研究、能力培训以及技术服务等方式支持企业不断提升绿色制造水平，增强企业可持续发展话语权，持续探索建材行业绿色低碳高质量发展解决方案。



中国混凝土与水泥制品协会
预拌混凝土分会

中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会

中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会（简称预拌混凝土分会）成立于2009年，是由全国预拌混凝土生产企业、科研、设计、高校、工程应用单位及相关的社会团体组成。

分会的宗旨是维护会员单位和行业利益，为会员、行业和政府、社会提供服务。组织全国从事预拌混凝土及相关产品的生产、流通、应用，致力于促进预拌混凝土行业在节能、环保、资源综合利用等方面的产业升级和技术进步，保证建设工程的质量安全与效益，促进会员单位的交流与协作，全面提高市场竞争力，引领、服务行业向绿色环保、智能化和数字化转型升级。

前 言

气候变化已成为人类面临的重大挑战，《巴黎协定》明确要求将全球温升控制在1.5℃以内，需在2050年左右实现净零排放。建筑业作为全球最大的材料消耗和碳排放行业之一，贡献了约34%的全球碳排放，其中建材生产和施工阶段占比18%。混凝土作为最主要的建筑材料，其核心原料水泥的生产占全球CO₂排放的7%，是仅次于电力和钢铁的第三大碳排放行业。

从全球范围来看，混凝土的市场需求呈现多元化和区域不平衡的特点。随着我国经济发展的转向，混凝土行业整体面临较大经营压力，技术创新、绿色低碳正成为推动产业升级的核心趋势。

碳足迹作为衡量混凝土全生命周期碳排放的核心指标，是支撑混凝土行业低碳转型的量化评估工具。混凝土产业链横跨水泥等原材料以及建筑施工等下游行业，应对碳足迹核算过程中的数据碎片化、边界模糊等挑战，有利于补全产业链企业碳足迹管理体系拼图，发掘混凝土价值链节能降碳潜力。

如果说碳足迹核算是产品碳排放管理的第一步，那么通过分级等手段对产品碳足迹水平进行评价，则是有效管理企业减排目标，引导建立低碳消费市场的更高要求。产品碳足迹分级管理作为推动低碳经济发展的可落地举措，连接国家自主贡献目标与企业绿色转型，并有效满足消费者对低碳产品的差异化需求。通过政策引导与市场驱动的双重作用，深度融入绿色采购、绿色消费、绿色金融等领域的应用，将有利于形成协同减排的强大合力。



中国建筑材料联合会
绿色低碳建材分会
China Building Materials Federation
Green & Low Carbon Branch



中国混凝土与水泥制品协会
预拌混凝土分会



建筑材料碳标签
Building Materials Carbon Label



国建联信认证中心
GUOJIAN LIANXIN CERTIFICATION CENTER

作者

中国建筑材料联合会绿色低碳建材分会

张 晋

马 晓

杨思宇(实习)

中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会

师海霞

贾 嘉

致谢

感谢国建联信认证中心对本报告发布给予的支持。

联系方式

如对本报告有相关意见或建议,欢迎通过以下方式联系我们。

中国建筑材料联合会绿色低碳建材分会

联系人:张 晋

办公电话:010-57811411

办公邮箱:glb@cbmf.org

<http://glb.cbmf.org>

目 录

1 混凝土行业发展概况	1
1.1 产业规模	1
1.2 技术创新引领混凝土行业变革	2
1.3 政策推动混凝土行业低碳转型加速化	3
1.4 低碳混凝土发展关键路径	4
2 混凝土的生产与创新	6
2.1 混凝土的重要基准：配比与性能	6
2.2 创新混凝土生产工艺	8
3 建立透明度：预拌混凝土的碳足迹研究	10
3.1 碳足迹背景与发展	11
3.1.1 碳足迹的基本概念	11
3.1.2 标准与数据：量化产品碳足迹的重要基础	12
3.2 预拌混凝土碳足迹核算的产品系统边界	14
3.3 预拌混凝土碳足迹的核算	16
3.3.1 水泥碳足迹	16
3.3.2 预拌混凝土碳足迹	20
3.4 碳足迹核算的行动与挑战	23
4 明确目标：低碳混凝土的评价	24
4.1 碳足迹分级管理政策进展	25

4.2 国外低碳混凝土分级评价方法介绍	26
4.2.1 联合国工业发展组织(UNIDO):工业深度脱碳倡议(IDDI)	26
4.2.2 英国:低碳混凝土组织(LCCG)	28
4.2.3 澳大利亚:材料与隐含碳领导者联盟(MECLA)	29
4.3 我国预拌混凝土产品碳足迹分级研究	30
5 开始行动:低碳混凝土应用展望	32
5.1 国家自主贡献目标支持气候雄心	32
5.2 低碳产品精准锚定减排方向	33

1 混凝土行业发展概况

从全球范围来看，混凝土的市场需求呈现多元化和区域不平衡的特点。在亚洲、非洲和拉丁美洲等新兴经济体，基础设施、住房建设的需求旺盛，推动了混凝土市场的快速增长。在发达国家，市场需求则更多地集中在高端建筑项目和绿色建筑领域。随着我国经济发展的转向，混凝土行业整体面临较大经营压力，技术创新、绿色低碳正成为推动产业升级的核心趋势。

1.1 产业规模

在城市化进程与基建需求的推动下，2024年全球混凝土市场规模达到3323.3亿美元，产量约为120亿立方米。发展中国家依旧是市场增长的主要力量，而发达国家则加快了低碳转型的步伐，使得全球混凝土市场呈现出“总量趋稳、双轨并行”的显著特征。

印度、东南亚、非洲等发展中市场的混凝土需求保持较高增速。印度城镇化率不足35%，混凝土需求年增长率保持在8%~9%¹，但由于技术相对落后，其碳排放强度高于全球平均水平；印尼2024年上半年水泥消费量达2802万吨，同比增长2.2%²，政府的经济适用房计划进一步推动了需求增长，据预测，东南亚水泥市场年增长率将达7.63%³；非洲地区基础设施投资需求旺盛，尼日利亚、南非等国的混凝土市场年增长率预计可达5%~7%⁴。

低碳引导北美、欧盟等发达市场对混凝土的需求转向。欧盟地区混凝土市场规模约600亿美元⁵，受碳边境调节机制（CBAM）的倒逼，行业减排压力增大，低碳混凝土占比已达25%⁶；北美地区的3D打印混凝土市场发展迅猛，预计到2031年市场规模将达18.9亿美元⁷。

我国预拌混凝土行业当前正处于下行周期，行业整体面临较大经营压力。2024年，全国预拌混凝土产量为24.91亿立方米，较2021年峰值减少8亿立方米，行业产值约8500亿元，同比降幅超40%。房地产开发与基础设施投资是预拌混凝土的主要下游市场。2024年，国内房地产开发投资同比增速下降10.2%，新开工面积同比下降23%，是影响混凝土需求放缓的主要因素；与此同时，基建、交通、水利等投资同比增长约4.5%，支撑混凝土行业的部分需求。

1 中国水泥网《印度水泥需求向好，成本结构持续改善》。

2 中国水泥网《2024年印尼水泥市场运行情况》。

3 IMARC Group《东南亚水泥市场报告》。

4 中国建材信息总网《中资水泥、建材企业打开非洲基建新蓝海》。

5 QYResearch《全球混凝土建筑材料市场报告》。

6 欧盟委员会《碳边境调节机制（CBAM）实施细则》。

7 Mordor Intelligence《3D打印混凝土市场报告》。

1.2 技术创新引领混凝土行业变革

提升生产效率和产品质量，满足多元化使用场景，是混凝土行业当前技术创新的主要方向。

1) 高性能化

高性能混凝土（High-Performance Concrete, HPC）以“高耐久、高韧性、高适配性”为核心特征，通过材料创新与结构优化，不仅突破了传统混凝土的性能边界，更推动混凝土企业从“材料供应商”向“结构解决方案服务商”升级。

超高性能混凝土（Ultra-High Performance Concrete, UHPC）是混凝土高性能化的发展形态。通过低水胶比设计、多级颗粒紧密堆积技术与纤维增强工艺，构建由纳米级胶凝基质、亚微米级硅灰颗粒、毫米级骨料组成的致密微观结构，并借助钢纤维或有机纤维的桥接作用抑制裂缝扩展，最终形成兼具超高强度与高耐久性的胶凝体系。

在力学性能维度，UHPC的抗压强度普遍超过120MPa，约为普通C30混凝土的4~6倍；抗折强度达20~25MPa，较传统混凝土提升5~8倍，且具备显著的应变硬化特性，受弯破坏时呈现韧性断裂特征而非脆性破坏。

耐久性能方面，UHPC通过极低的孔隙率，实现极低的吸水率和优异抗渗性能，可有效抵御氯盐侵蚀、冻融循环、硫酸盐化学腐蚀等多重劣化作用，显著提高服役寿命。

桐乡市180米超高混塔项目：全球首个UHPC 150塔筒，年上网电量超5亿千瓦时，碳减排量达40万吨⁸；

富翅门大桥：国际首座采用UHPC湿接缝技术的跨海大桥，通过高应变强化型UHPC材料，实现预制构件拼接效率提升，大幅缩短工期，获2024年中国土木工程詹天佑奖⁹；

厦门白鹭西塔266米主塔楼：采用“一泵到顶”技术，C80混凝土泵送高度达240.4米，通过优化管路布置与超高压泵，提升泵送效率，降低裂缝发生率¹⁰。

2) 预制化

混凝土的预制化是建筑工业化体系整合的重要组成部分，也是装配式建筑发展的重要基础，引领行业从“劳动密集型”向“技术密集型”升级。预制化转型重塑了混凝土行业的生产范式，通过“设计—生产—装配”全流程数字化，将传统现场作业转化为工业化生

8 浙江政务服务网《这个“桐乡造”，全球首个》。

9 同济大学新闻网《同济大学为国际首座采用超高性能混凝土湿接缝技术的跨海大桥—富翅门大桥通车保驾护航》。

10 今日头条《240.4米！混凝土一泵到顶！》。

产，在提升构件精度控制，减小施工误差的同时，显著提升建造效率25%~30%。

住建部《装配式建筑可复制可推广技术体系和产品目录（第一批）》（建办标函〔2025〕47号）的发布，标志着我国预制混凝土构件进入规模化应用新阶段。国务院《“十四五”建筑业发展规划》明确要求，2025年装配式建筑占新建建筑比例达30%，其中政府投资项目全面采用装配式建造。预计到2030年，装配式混凝土建筑市场渗透率将突破50%，推动建筑业碳排放强度下降30%。

深圳长圳公共住房项目：全国最大装配式保障房项目，总建筑面积115万平方米，采用预制承重墙、叠合板等构件，现场用工减少50%，施工周期大幅缩短，获评“国家智能建造试点项目”¹¹；

雄安新区近零能耗建筑示范区：集成预制保温外墙板、预应力叠合楼板等技术，项目整体节能率达63%，入选住建部“被动式超低能耗建筑示范工程”¹²。

3) 智能化

新一代信息技术的应用，在提升混凝土生产效率与质量控制水平，优化供应链管理，提高施工安全性等方面有着广泛的应用场景。通过部署物联网传感器、工业机器人及智能管理系统，混凝土生产可以实现从原材料采购、配比设计到成品运输的全流程数据贯通；特种智能装备的研发应用，则有效解决了传统施工中的高危场景与精度控制难题。

1.3 政策推动混凝土行业低碳转型加速化

气候变化已成为人类面临的重大挑战，《巴黎协定》明确要求将全球温升控制在1.5℃以内，需在2050年左右实现净零排放。建筑业作为全球最大的材料消耗和碳排放行业之一，贡献了约34%的全球碳排放，其中建材生产和施工阶段占比18%¹³。混凝土作为最主要的建筑材料，其核心原料水泥的生产占全球CO₂排放的7%¹⁴，是仅次于电力和钢铁的第三大碳排放行业。

欧盟《建筑产品法规》（EU CPR）明确提出水泥等建筑产品需要进行全生命周期碳核算，并大力推动“永久碳存储”技术的应用；美国借助《通胀削减法案》（IRA），为低碳混凝土企业提供税收抵免优惠，同时为3D打印建筑项目提供联邦资金支持；印度政府推

11 国务院国有资产监督管理委员会《全国最大规模装配式公共住房项目交付入住》。

12 中国雄安《雄安新区城乡建设绿色发展领导小组关于印发《雄安新区近零能耗建筑核心示范区建设实施方案》的通知》。

13 联合国环境规划署（UNEP）、全球建筑与施工联盟（GlobalABC）。2024-2025年全球建筑与施工状况报告。

14 华碳院.全球水泥行业碳排放研究报告。

出《国家基础设施管道计划》，2024年基建投资高达1.3万亿美元，有力地推动了低碳混凝土技术的应用。

我国是全球最大的水泥和混凝土生产国，国务院《2030年前碳达峰行动方案》首次将“低碳混凝土”列入重点发展方向，要求加强新型胶凝材料、低碳混凝土的研发应用，推动建材行业碳达峰。

低碳政策导向正在倒逼行业必须从高能耗、高排放模式向低碳转型。生态环境部2024年印发《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》。2025年3月，国家认监委发布《产品碳足迹标识认证通用实施规则（试行）》，明确产品碳足迹认证的通用要求。现行国家标准《绿色建筑评价标准》（GB/T 50378—2019）中根据绿色建材应用比例对绿色建筑进行划分，三星级要求绿色建材使用比例不低于30%。

1.4 低碳混凝土发展关键路径

混凝土的低碳化贯穿从上游水泥生产到下游建设建造的全价值链，同时促进固废综合利用等循环经济领域的发展。上下游的协同减碳也必将是实现混凝土低碳化的关键路径。

1) 低碳胶凝材料发展

水泥等胶凝材料是混凝土碳足迹的主要来源，水泥生产过程中石灰石煅烧和燃料燃烧产生大量CO₂，这部分排放占据混凝土碳排放的80%以上。硅酸盐水泥生产过程中的CO₂排放超60%来自碳酸盐分解，难以通过单纯的能源脱碳路径实现碳排放的完全消除。因此，降低传统胶凝材料用量与开发低碳胶凝材料是低碳混凝土生产的首要任务。辅助胶凝材料（Supplementary Cementitious Materials, SCMs）是指在混凝土或水泥制品中，部分替代水泥以改善性能、降低成本或实现低碳化的一类材料，可实现30%~50%的水泥替代，有效降低混凝土碳排放20%~40%；粉煤灰、矿渣等掺合料已普遍用于混凝土的生产，碱激发胶凝材料、低碳熟料配方等低碳水泥技术也已进入试点阶段。

碱激发材料通过碱激发剂促使原料中的硅铝酸盐玻璃体或结晶相溶解、重组，生成类似天然沸石或地质聚合物的三维网络结构，进而具备胶结、硬化及承载能力，形成具有胶凝性能的新型材料。欧盟积极推动碱激发材料的应用落地，计划在2030年前制定统一标准。相比传统硅酸盐水泥，碱激发材料碳排放可降低50%以上¹⁵。美国、加拿大等国的部分科研机构和企业也在加大对碱激发胶凝材料的研发投入，一些小型试点项目验证了其在实际工程中的可行性。

15 欧盟联合研究中心，碱激发胶凝材料碳排放评估报告。

2) 工业固废利用

砂石骨料作为混凝土的主要原料，全球年消耗量已过亿吨，利用尾矿砂、废弃混凝土、建筑垃圾等固废经破碎、筛分、清洗等工艺制成再生骨料替代天然砂，在有效降低尾矿处置与固废填埋压力的同时，实现了混凝土全生命周期碳排放的降低。全球范围内，混凝土行业已成为工业固废消纳量最大的领域之一，工业固废在混凝土中的平均掺量已提升至15%¹⁶。

欧盟《建筑产品法规》明确要求混凝土中再生骨料占比不得低于25%。德国、荷兰等国的许多混凝土搅拌站建立了完善的废弃物回收系统，将废弃混凝土破碎、筛分后重新用于混凝土生产。

对于混凝土中掺合料的使用，我国在《普通混凝土配合比设计规程》（JGJ 55—2011）中明确规定了粉煤灰、粒化高炉矿渣粉等矿物掺合料的最大掺量限制，并在《矿物掺合料应用技术规范》（GB/T 51003—2014）中对矿物掺合料的技术要求进行规定，以保证混凝土的性能要求。

粉煤灰是燃煤电厂中煤粉燃烧后，从烟气中收集的细灰颗粒。矿渣粉是高炉炼铁过程中产生的熔融矿渣经冷却后形成的玻璃态物质。二者都是主要的大宗固体废弃物，并在现有工程项目中广泛应用。三峡工程在混凝土中使用了高掺量的粉煤灰，其中大坝混凝土中粉煤灰掺量约为40%¹⁷，三峡工程最终使用了约176.24万吨粉煤灰。

3) 混凝土矿化固碳

在混凝土的生产、养护等过程中，通过矿化反应将CO₂转化为碳酸盐矿物相实现固碳封存，是近期低碳混凝土研究的热点方向之一。矿化反应的过程通过主动将CO₂与混凝土中的钙/镁硅酸盐或工业废料反应，生成稳定的碳酸盐矿物。在固定CO₂的同时，矿化产物填充混凝土孔隙，降低孔隙率，有助于改善混凝土的抗渗性等性能。相比于混凝土使用过程中的自然碳化过程，人工矿化固碳通过控制反应速度与深度、优化设计等方法，可有效避免因碱性降低而导致的耐久性问题。

矿化固碳是碳捕集、利用与封存技术（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）在混凝土行业的典型应用。根据《中国碳捕集利用与封存年度报告（2023）》显示，2030年CCUS减排需求将增至4.08亿吨。混凝土矿化将成为我国CCUS发展、探索的重要组成部分。

豪瑞（Holcim）和海德堡（Heidelberg）等行业巨头正在积极试点“直接空气捕获+混

¹⁶ 世界经济论坛 水泥行业脱碳路径白皮书。

¹⁷ 陈文耀，李文伟. 三峡工程高性能大坝混凝土配合比设计技术措施，水利学报。

凝土固化”技术，国际能源署（IEA）在《水泥2022》中指出，当前行业平均水平为每吨混凝土封存CO₂约20~30公斤。

4）低碳技术溢价的市场接受

尽管混凝土行业的技术创新最初聚焦于性能提升，但这些技术客观上形成了显著的降碳价值。如UHPC通过延长结构寿命和减少水泥用量，可降低全生命周期碳排放。国际能源署（IEA）《全球能源与二氧化碳现状报告》指出，混凝土技术创新需年均降低碳强度3%，才能满足2050年净零排放目标。

低碳化对混凝土初期生产成本的影响因技术路径而异。采用矿物掺合料替代水泥可能导致成本增加，但通过固废利用和工艺优化可以实现综合成本的降低，这取决于市场的需求与矿物掺合料的品质。这意味着低碳溢价的分担需依赖政策引导与市场创新。英国建筑研究院（BRE）绿色建筑评估体系 BREEAM 已将混凝土碳足迹纳入评估报告，我国的国家标准《绿色建筑评价标准》（GB/T 50378—2019）虽未强制，但通过加分项鼓励使用低碳混凝土。随着水泥纳入碳交易市场，这些政策与标准将推动下游优先选择低碳产品，形成“低碳溢价”市场机制。

2 混凝土的生产与创新

广义的混凝土是由胶凝材料（如水泥）、骨料（如砂、石）、水，以及可能加入的外加剂和掺合料按一定比例混合，经搅拌、成型、养护硬化而成的人造石材。以水泥为胶凝材料，以砂、石为骨料的普通混凝土是目前在工程建设领域应用最广泛的一类混凝土。此外，包括沥青混凝土、聚合物混凝土等特殊领域混凝土材料也在不断发展。普通混凝土的规模化应用奠定了行业基础，而超高性能混凝土（UHPC）、自密实混凝土（SCC）等创新产品通过材料性能突破，已在重大工程中实现结构效能与寿命的双重提升。

2.1 混凝土的重要基准：配比与性能

混凝土生产需要依据相应标准规定的成分要求与配比，并满足性能要求。

我国的《预拌混凝土》（GB/T 14902）、《混凝土质量控制标准》（GB 50164）以及美国的《预拌混凝土标准规范》（ASTM C94）以材料成分构成及规定性测试为导向，规定混凝土生产的原材料质量、配合比设计、生产控制和质量检验等环节。

欧盟《混凝土—规格、性能、生产和合格评定》（EN 206）在成分限制的前提下，同时引入性能要求，允许更大的灵活性以满足具体工程需求。其规定了混凝土的原材料要求、新拌和硬化混凝土的性能验证、配合比设计、生产控制程序以及符合性评估。为全面

展现全球混凝土行业的规范体系，以预拌混凝土为例，系统梳理并呈现各国混凝土相关标准及要求（详见表1）。

表 1 各国混凝土相关标准及要求（以预拌混凝土为例）

国家/地区	标准	适用范围	成分要求	性能要求
美国	ASTM C94/C94M-23: 预拌混凝土	预拌混凝土的生产、运输与交付	水泥: C150/C150M (波特兰水泥)、C595/C595M (混合水泥) 骨料: C33/C33M (普通骨料) 或 C330/C330M (轻骨料) 外加剂: C494/C494M (化学外加剂)、C260/C260M (引气剂) 掺合料: C618 (粉煤灰)、C989 (矿渣粉)	坍落度: 按设计要求 (通常 75~200mm) 含气量: 2%~8% (根据抗冻性调整) 抗压强度: ≥设计值 (28天龄期) 密度: C138/C138M 测定, 偏差≤3%
欧盟	EN 206:2013+A2:2021: 混凝土—规范、性能、生产与合格评定	所有结构混凝土	水泥: EN 197-1 (CEM I-V类, 如 CEM I ≥95% 熟料, CEM III 含 65%~80% 矿渣) 骨料: EN 12620 (含泥量≤3%, 碱活性控制) 水胶比: ≤0.45 (冻融环境), ≤0.60 (普通)	强度等级: C12/15 至 C90/105 (立方体/圆柱体抗压强度) 耐久性: 抗冻 (含气量 ≥4%)、抗氯离子渗透 (电通量≤2000C) 工作性: 坍落度 50~220mm, 扩展度≥500mm (自密实) 寿命: 设计寿命≥100年
中国	GB 55008—2021混凝土结构通用规范	所有混凝土结构	水泥: 通用硅酸盐水泥 (GB 175) 水胶比: ≤0.60 (普通环境), ≤0.45 (冻融/氯盐环境) 最低胶凝材料: 240kg/m ³ (暴露环境) 骨料: 含泥量≤3% (砂)、≤1% (石, C60及以上)	强度: 立方体抗压≥设计值 (C15-C100) 耐久性: 保护层≥20mm (室内), ≥40mm (露天); 冻融循环≥100次 (D100) 裂缝: 最大宽度≤0.3mm (室内), ≤0.2mm (露天)
	GB/T 14902—2012预拌混凝土	预拌混凝土生产、运输	水泥: PO·42.5及以上 (GB 175) 骨料: 连续级配, 最大粒径≤40mm (GB/T 14685) 外加剂: 减水率≥8% (GB 8076), 含气量±1.5%设计值 粉煤灰: II级及以上 (GB/T 1596)	坍落度: 100~220mm (允许偏差±20mm) 强度: 28天≥设计值, 标准差≤4.5MPa (C30及以下) 含气量: 3.0%~5.5% (抗冻混凝土)

基于表1中的标准可以发现，对于混凝土产品而言，标准的核心是成分组成、性能、方法。

对比混凝土的各项指标，各国相关标准亦存在部分差异，如表2所示。中国标准针对水泥细度、各成分含量、骨料石粉流动度等制定分级指标，直接关联耐久性。高性能混凝土收缩率、电通量等指标优于欧美同类标准，反映国内对早期开裂和氯盐腐蚀的重视。国内形成“基础标准（GB 50164）+高性能专项（GB/T 41054）+设计规范（GB 50010）”的三层架构，覆盖从生产到施工全链条，区别于欧美的单一标准体系。此外，国内外均鼓励固废利用，国内通过GB/T 41054等标准鼓励粉煤灰、矿渣粉掺用，但掺量上限低于欧美，更注重安全性验证。未来需进一步推动国内外标准互认，加快新型材料和低碳技术的标准制

定，支撑混凝土行业向“高性能、低排放、可持续”转型。

表 2 国内外部分混凝土相关指标差异摘录

指标类型		美国ASTM/欧洲EN	中国标准
成分	水泥	ASTM无明确比表面积上限 EN通过水泥类型自然控制低热 C ₃ A仅在耐久性条款间接限制（如EN 206要求抗硫酸盐水泥C ₃ A≤5%）	强制限制比表面积≤360m ² /kg 对各成分含量进行规定
	骨料	ASTM C33仅规定含泥量≤3%，无石粉流动度比要求 EN 12620按粒形系数分级，无石粉MB值细分	机制砂石粉含量分级控制 JG/T 568规定高性能骨料I级标准
	掺合料	ASTM C618允许粉煤灰掺量≤50% EN 197-1混合材总掺量≤95%	GB/T 41054对不同掺合料在不同条件下的掺量进行规定
性能	耐久性	ASTM C666快速冻融≥300次（与中国D300等效） EN 206新增100年寿命设计，电通量≤2000C（与中国S6级相当）	抗冻D300（海工），电通量≤1000C（GB/T 41054） 收缩率≤0.04%（高性能）
	施工性	ASTM C1611要求扩展度≥600mm，T50≤2s EN 206附录B允许扩展度550~800mm	自密实扩展度≥500mm（GB/T 41054）
强度测试		圆柱体抗压（如ACI C30=20.7MPa圆柱体，对应中国C25-C30立方体） EN 采用圆柱体 / 立方体双指标（C30/37）	立方体抗压强度（C30-C115）

2.2 创新混凝土生产工艺

混凝土作为全球用量最大的人造材料，广泛应用于建筑、基础设施、交通等领域。在建筑工程领域，住宅、商业建筑的梁、板、柱结构构成混凝土的主要使用场景，占混凝土总用量的40%以上；在基础设施领域，混凝土广泛应用于桥梁、隧道、水利工程；在交通领域，混凝土常用于高铁无砟轨道以及高速公路路面。得益于混凝土稳定、防水、耐腐蚀、防辐射等优势，部分特殊功能混凝土还用于核电、海洋工程等领域。高性能混凝土、自密实混凝土等产品的不断创新以及新型外加剂的研发，正支持行业向高端化、低碳化深入探索。

1) 高性能混凝土的研发与应用

高性能混凝土（HPC）泛指在强度、耐久性、工作性或其他特定性能上显著优于普通混凝土的混凝土，通过材料优化和工艺创新，HPC在强度、耐久性、工作性等方面显著优于常规混凝土。按功能特性划分，HPC可细分为抗冻融HPC、低收缩/微膨胀HPC、纤维增强HPC、自密实HPC等类别。

基于HPC的发展，超高性能混凝土（UHPC）强调需满足超高强度、高耐久性、韧性和致密微观结构。UHPC与常规混凝土相比，抗压强度≥150MPa，耐久性提升5倍以上，可替代钢材用于复杂结构。2022年全球UHPC市场规模为4.36亿美元，预计2030年

达9.07亿美元，年复合增长率10.1%¹⁸。普通混凝土、HPC、UHPC在组成与性能方面的差异如表3所示。

表3 普通混凝土、HPC、UHPC在组成与性能方面的差异

指标	普通混凝土	HPC	UHPC
骨料及粒径	粒径5~40mm的粗骨料为主，细骨料占30%~40%	粗骨料粒径≤25mm，细骨料占比提升至40%~50%，部分HPC剔除粗骨料	完全剔除粗骨料，仅使用粒径≤0.6mm的石英砂细骨料，通过多级配石英砂实现密实填充
胶凝材料组成	水泥配合少量粉煤灰或矿渣粉等矿物掺合料	水泥配合硅灰、粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，总掺量20%~50%，胶凝材料用量400~600kg/m ³	水泥配合硅灰与石英粉，胶凝材料用量≥700kg/m ³ ，硅灰占胶凝材料20%~30%
水泥	250~400kg/m ³	350~500kg/m ³ C60以上高强HPC可达500~600kg/m ³	700~1000kg/m ³
矿物掺合料	粉煤灰或矿渣粉，掺量≤20%	硅灰(5%~10%)、粉煤灰(10%~30%)、矿渣粉(20%~50%)，复合掺合料总掺量≤50%	硅灰(230~320kg/m ³)、石英粉(0~230kg/m ³)，部分配方添加粉煤灰微珠以优化工作性
水胶比	0.40~0.60	0.25~0.35	0.14~0.20
外加剂	普通减水剂(减水率8%~12%)，引气剂(含气量4%~8%)	高效减水剂(聚羧酸系，减水率≥25%)，部分添加缓凝剂或膨胀剂	高效减水剂(粉体聚羧酸，减水率≥30%)配合粘度改性剂，含气量2%~4%
纤维类型及掺量	通常不添加纤维，特殊需求可掺少量合成纤维，体积掺量≤0.5%	非必需，部分HPC添加合成纤维，体积掺量0.1%~0.3%以改善韧性	必需钢纤维，体积掺量1%~2%，150~190kg/m ³ 或复合有机纤维，抗拉强度≥2600MPa
性能	分类别	高强度：抗压强度通常≥50MPa；高耐久性；抗氯离子渗透、抗冻融循环等性能；良好工作性：坍落度可达180~250mm，满足泵送、浇筑等施工要求；体积稳定性：减少收缩和徐变，适用于大跨度、超高层建筑等对变形敏感的结构	超高强度：抗压强度≥150MPa；低孔隙率；卓越耐久性：抗冻融循环次数>3000次，寿命可达200年以上；高韧性：纤维增强使其抗拉强度达5~10MPa

港珠澳大桥海底隧道管节：作为全球最大规模自密实混凝土（SCC）沉管隧道，由33节巨型沉管组成，每节沉管长180米、宽38米、高11.4米，单节重量达8万吨。采用C45自密实高性能混凝土，抗渗等级P12，确保结构密实性和耐久性。

北京大兴国际机场跑道工程：采用C50级补偿收缩HPC，实现无裂缝施工。满足超长无缝结构（单条跑道长度超4000米）、严苛温差（年温差达70℃）及高耐久性要求（设计寿命30年）。

上海大歌剧院：国内首例UHPC大规模单独受力构件实现应用，悬挑楼梯梁截面仅725mm，抗压强度达180MPa。

18 Verified Market Research. 2024, UHPC Market Size, Share & Trends Analysis Report.

2) 外加剂技术

外加剂通过化学调控混凝土凝结硬化过程中的物理化学进程优化胶凝材料性能。按照其作用不同，不同类型外加剂可有效改善混凝土的工作性能，增强力学性能、耐久性等，混凝土的分类如图1所示。

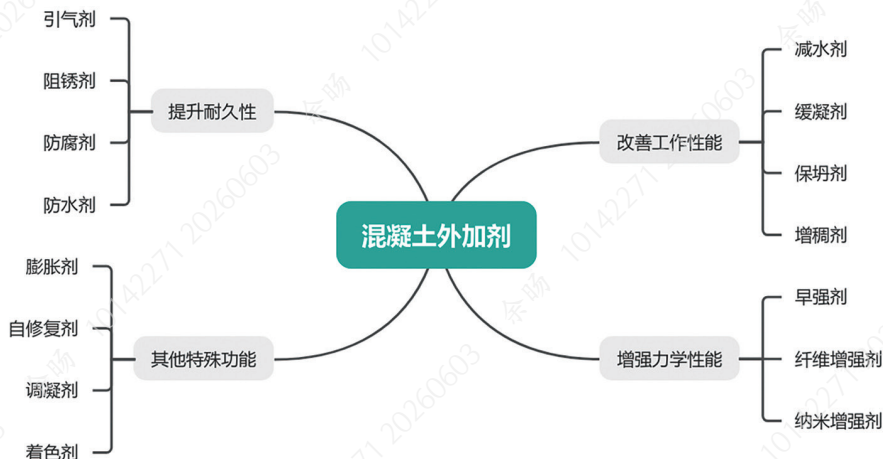


图1 混凝土外加剂类别示意

在各类混凝土外加剂中，应用最广泛、用量最大的是减水剂，其市场份额占比超过50%，几乎成为现代混凝土（尤其是高性能混凝土）的必备组分。减水剂通过梳型分子结构的位阻效应，可实现25%~30%的减水率，减少水泥用量，进而降低混凝土CO₂排放。2023年全球聚羧酸系（PC）减水剂市场规模约429亿元人民币，占混凝土用高性能外加剂的65%~70%¹⁹。中国作为全球最大市场，PC减水剂规模达200亿元，占国内高性能外加剂的92%²⁰。

3 建立透明度：预拌混凝土的碳足迹研究

碳足迹作为衡量混凝土全生命周期碳排放的核心指标，是支撑混凝土行业低碳转型的量化评估工具。混凝土产业链横跨水泥等原材料以及建筑施工等下游行业，解决碳足迹核算过程中的数据碎片化、边界模糊等挑战，有利于补全产业链企业碳足迹管理体系拼图，发掘混凝土价值链节能降碳潜力。预拌混凝土作为混凝土行业内相对大宗且一致性较高的产品，研究其碳足迹核算具有典型性。

¹⁹ 环洋市场咨询，2023。

²⁰ 中国报告大厅，2024。

3.1 碳足迹背景与发展

3.1.1 碳足迹的基本概念

随着我国“双碳”战略的持续深化，产品碳足迹近两年成为继碳交易之后政策与市场关注的又一焦点。2024年，我国碳足迹相关政策与标准密集出台：

■ 生态环境部等十五部委联合印发《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》（环气候〔2024〕30号），明确构建碳足迹管理体系的总体要求、主要目标、重点任务及保障措施。

■ 修改采用ISO 14067的国家标准GB/T 24067《温室气体 产品碳足迹量化要求和指南》正式发布，填补了国内产品碳足迹量化标准的重要空白，为相关工作提供了统一的技术规范。

■ 国家市场监督管理总局启动产品碳足迹认证试点，在全国25个省、自治区、直辖市，针对水泥、锂电池、光伏、钢铁、电解铝、纺织品、电子电器、轮胎、磷铵、木制品等10类重点产品开展碳足迹认证，将政策与标准转化为实际行动，助力产业绿色低碳转型。

按GB/T 24067的相关定义²¹，产品碳足迹是指产品系统中的温室气体排放量和温室气体清除量之和，以二氧化碳当量表示，并基于气候变化这一单一环境影响类型进行生命周期评价。理解这一定义中的几个关键概念，是有效管理碳足迹的基础：

■ 产品系统：是指拥有基本流和产品流，同时具有一种或多种特定功能，并能模拟产品生命周期的单元过程的集合。其中，基本流是指取自环境，进入所研究系统之前没有经过人为转化的物质或能量，或者是离开所研究系统，进入环境之后不再进行人为转化的物质或能量。产品流是指产品从其他产品系统进入到本产品系统或离开本产品系统而进入其他产品系统。

■ 温室气体清除量：是指在特定时段内从大气中清除的温室气体总量。产品碳足迹是产品系统中的温室气体排放量与温室气体清除量之和。

■ 环境影响类型：是指所关注的环境问题的分类。碳足迹所研究的环境影响类型是气候变化（Climate Change），其指标称为全球变暖潜势（Global Warming Potential, GWP）。

■ 生命周期评价：是指一个产品系统在其整个生命周期内的输入、输出和潜在环境影响的汇编与评估。其中，生命周期是指产品相关的连续且相互连接的阶段，包括原材料获取或从自然资源中生成原材料至生命末期处理。

21 GB/T 24067—2024 温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南.

3.1.2 标准与数据：量化产品碳足迹的重要基础

鉴于不同产品系统间的差异，在核算具体产品的碳足迹时需要针对产品种类制定具体规则，也即产品种类规则（PCR）与产品碳足迹-产品种类规则（CFP-PCR）；此外，生命周期评价过程需要大量底层数据支持，数据库成为能够科学、准确核算产品碳足迹结果的重要基础。

1) 碳足迹核算标准

产品碳足迹核算可以直接使用PCR，也可以专门制定CFP-PCR。国际上，欧盟在生命周期研究方面处于领先地位，其发布的《建筑工程的可持续性—环境产品声明—混凝土和混凝土结构的产品种类规则》（BS EN 16757），是目前国际上针对混凝土产品广泛应用的PCR文件，为全球混凝土产品碳足迹核算提供了重要参考。

随着产品碳足迹管理体系建设工作的深入推进，国内产品碳足迹标准的研制工作正在全面提速。工信部发布了《工业产品碳足迹核算规则团体标准推荐清单（第一批）》，涵盖15项碳足迹标准；生态环境部也推出《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 平板玻璃》（征求意见稿）等5项碳足迹核算标准。同时，国家标准《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 水泥》等一批标准正处于研制阶段。针对混凝土产品，中国建筑材料联合会在2024年启动的建筑材料碳标签项目中，首批发布了包括混凝土产品在内的17项CFP-PCR。相比欧盟出台的EN 16757标准，中国建筑材料联合会发布的《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 预拌混凝土》（T/CBMTF 289—2024）只规定温室气体一类环境影响类型，且不对使用阶段的碳化清除以及回收过程的分配进行具体要求，两项标准主要内容的对比，如表4所示。

表 4 预拌混凝土碳足迹核算标准对比

发布机构	标准编号	标准名称	主要内容
英国标准化协会	BS EN 16757:2022	建筑工程的可持续性—环境产品声明—混凝土和混凝土结构的产品种类规则	基于EN 15804标准制定的混凝土产品PCR，旨在规范混凝土及构件的全生命周期环境影响评估与环保产品声明（EPD）。规定了应涵盖的EPD类型及生命周期阶段、生命周期清单（LCI）、生命周期影响评价（LCIA）、生产链上多产出过程的分配程序、再利用和回收的分配程序以及在编制环境产品声明时所使用的的数据质量要求。提供了试用阶段确定参考使用寿命（RSL）的指导意义/具体规则；给出了建立默认情景的指导意义；给出了混凝土构件默认功能单位的指导意义。
中国建筑材料联合会	T/CBMTF 289—2024	温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 预拌混凝土	基于ISO 14067标准制定的混凝土产品CFP-PCR。规定了预拌混凝土产品碳足迹的量化目的、量化范围、生命周期清单（LCI）、生命周期影响评价（LCIA）、结果解释、鉴定性评审、可比性、绩效追踪以及报告等内容。

2) 生命周期数据库的开发与应用

对产品开展碳足迹核算需要生命周期数据支撑，通常会使用到两种类型的数据：初级数据（primary data）与次级数据（secondary data）：

■ 初级数据是直接与被评估的产品或服务相关的数据，通常包括产品或服务的生产、使用和废弃处理等阶段的直接能源消耗、物料消耗和排放等信息，初级数据通常需要通过实地调查或从特定的企业或组织获取；

■ 次级数据是与被评估的产品或服务间接相关的数据，例如用于生产产品的能源或原材料的生产、加工和运输等，次级数据通常通过调用各种公共或商业LCA/碳足迹数据库获得。

在产品开展生命周期评价或碳足迹核算的过程中，尽量使用初级数据是保证数据质量与结果准确性的关键。不过，由于数据可得性的限制（比如在采购水泥时，混凝土企业难以要求供应商必须提供其产品碳足迹数据），造成使用次级数据是不可避免的，数据库的

表 5 国内外生命周期/碳足迹数据库示例

数据库名称	发布机构	数据库特点
Ecoinvent	瑞士Ecoinvent开发的商业数据库	数据主要源于统计资料以及技术文献。包含欧洲及世界多国超过20000多个活动的数据集。涵盖农业和畜牧业、建筑和建筑、化工和塑料、能源等众多工业部门。是国际LCA领域使用最广泛的数据库之一。
ELCD	由欧盟资助，欧盟研究总署（JRC）牵头联合欧洲各行业协会进行研究的商业数据库	涵盖欧盟300多种大宗能源、原材料、运输的汇总LCI数据集，数据主要来源于欧盟企业真实数据。可为在欧洲生产、使用、废弃的产品的LCA研究与分析提供数据支持，是欧盟环境总署和成员国政府机构指定的基础数据库之一。
GaBi	德国Thinkstep公司开发的商业数据库	原始数据主要来源与其合作的公司、协会和公共机构。最新数据库包括了世界各国和各行业的17000条汇总过程数据集。涵盖建筑与施工、化学品和材料、消费品、教育、电子与信息通信技术等16个行业。
ICE	Circular ecology开发的建筑隐含碳公开数据库	基于文献创建，包含200多种材质的数据，分为砖、水泥、混凝土、玻璃等30多个主要材质类别。
中国生命周期核心数据库（CLCD-China）	由四川大学和亿科环境共同开发的中国本地化商业数据库	数据来自行业统计与文献，数据库数据采集以次级数据为主，初级数据为辅。包括国内600多个大宗的能源、原材料、运输的清单数据集。代表中国市场平均水平。
中国产品全生命周期温室气体排放系数库（CPCD）	由中国城市温室气体工作组和公众环境研究中心及合作伙伴开发的公开数据库	以ISO14067的基本原则和方法整理的温室气体因子数据库。数据基于公开文献的收集、整理、分析、评估和再计算。覆盖建筑和建筑服务，金融和租赁服务，金属制品、机械和设备等各行业门类。
中国材料生命周期清单数据库材料环境负荷基础数据库（Sino-Center）	由北京工业大学开发的材料领域数据库	通过与主要工业、行业协会密切合作，以及材料生产企业的密切配合和支持，开发的面向材料生产流程的各类材料及能源生产、交通运输等公用系统的编目清单数据库。已积累并持续更新材料生命周期分析基础数据10余万条，数据库包含公用系统，典型材料（钢铁、建筑材料、有色金属、高分子材料、联接材料）等70多个我国材料LCA数据集产品。

使用可以极大地降低企业开展产品生命周期评价/产品碳足迹核算的门槛（即不需要完整的调查整个供应链）。在这种情况下，为了提高生命周期评价/产品碳足迹核算的准确性和可信度，需要保证次级数据的数据质量，即选取的数据库需要尽可能的贴合特定产品的实际生产情况。

当前国内外生命周期评价通常选用的有两类数据库，一类是以碳足迹排放因子为主体的碳排放因子数据集合；另一类是以单元过程和生命周期清单（LCI）数据集为主体的LCI数据库，国内外常用的生命周期/碳足迹数据库示例，如表5所示。

3.2 预拌混凝土碳足迹核算的产品系统边界

预拌混凝土作为混凝土行业内相对基础且大宗的产品，其碳足迹核算具有典型性。从全生命周期的角度，预拌混凝土生命周期可划分为原材料获取、原材料运输、生产制造、产品运输、施工（泵送、浇筑等）、使用维护及废弃处理等单元过程。《建筑工程的可持续性—环境产品声明—混凝土和混凝土构件的产品种类规则》（EN 16757）遵循《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》（EN 15804）的规定，从建筑全生命周期的角度对建材产品的生命周期的阶段进行了划分（如图2所示），分别为生产阶段（A1—A3）、施工阶段（A4—A5）、使用阶段（B1—B7）、废弃阶段（C1—C4）、产品回收再利用和能量回收阶段（D）。EN 16757按照不同的单元过程给出了五种混凝土生

建筑工程评估信息																	
建筑工程生命周期信息															建筑工程生命周期以外的补充资料		
A1—A3 生产阶段			A4—A5 施工过程阶段		B1—B7 使用阶段							C1—C4 废弃阶段			D 利益和损失超越了系统边界		
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	再利 用，恢 复，回 收， 潜 力	
原材料供应	运输	制造	运输	建设安装工程	使用	维护	修复	更换	翻新	营运能源使用	营运水使用	解构拆除	运输	废物处理	清理		
强制	强制	强制										强制	强制	强制	强制	强制性的	
强制	强制	强制	可选	可选	可选	可选	可选	可选	可选	可选	可选	强制	强制	强制	强制	强制性的	
强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制	强制性的	
强制	强制	强制															
强制	强制	强制	可选	可选													

图 2 预拌混凝土全生命周期阶段图（参考En 16757）

命周期核算模型。

参考EN 16757以及T/CBMTF 289—2024，通常预拌混凝土产品碳足迹核算的系统边界至少应涵盖原料获取、产品生产以及运输阶段（“从摇篮到大门”²²），这三个单元过程也是建筑全生命周期“隐含碳”的核算系统边界。

1) 生产阶段（A1–A3）

生产阶段是混凝土碳足迹核算的重点。涵盖原材料/能源获取过程、运输过程和产品生产过程等三个主要过程，包括提供所有材料、产品和能源，以及废物处理直至废物终结状态或在产品阶段处置最终残留物：

■ 原材料/能源获取过程主要涵盖水泥、骨料（砂、石）、外加剂、水、替代胶凝材料等关键原材料的开采与加工；电、柴油、天然气等能源产品的提取、精炼过程。

■ 运输过程涉及将原材料和能源从开采地或生产地运至生产工厂的过程以及原料、能源、中间产品、产品、副产品或废弃物等在工厂内部运输的过程。

■ 产品生产过程包括原材料储存、上料、搅拌、下料等过程，以及各阶段所产生的废（污）水、废弃物处理与运输相关过程。

2) 施工过程阶段（A4–A5）

施工过程阶段主要包括运输至工地的过程和建设过程，包括在施工过程中提供所有材料、产品和能源，以及废物处理，直至废物终结状态或最终残留物的处置：

■ 运输至工地的过程主要包括产品以及其他辅助材料出厂后运输至交付地点的过程。

■ 建设过程涵盖预拌混凝土产品泵送、浇筑至施工部位的过程以及产品振捣以及后期养护过程。

3) 使用阶段（B1–B7）

使用阶段是从预拌混凝土服役开始，到预拌混凝土所在系统废弃后终止，包括所有材料、产品的提供和运输，相关的能源和水的使用，以及在这部分使用阶段的废弃物处理，直至废弃物的最终状态或最终残留物的处置。通常混凝土在使用阶段不涉及温室气体排放，通过固碳作用所实现的碳清除量则可采用适宜的方法给予量化。

4) 废弃阶段（C1–C4）

废弃阶段主要包括将混凝土从建筑物或构筑物的主体结构拆解/拆除的过程、将废弃产品运输至再利用或废弃处置场所的过程，以及将废弃产品进行破碎、回收的过程或将废

²² BS EN 16757:2022 建筑工程的可持续性—环境产品声明—混凝土和混凝土结构的产品种类规则。

弃产品进行填埋等方式处理的过程，包括所有运输、所用材料、产品以及相关能源和水的使

5) 系统边界外的效益和负荷 (D)

该阶段属于混凝土的系统边界之外，主要是核算混凝土的再利用、回收和/或再循环的潜力，以净影响和净效益表示。

3.3 预拌混凝土碳足迹的核算

在建筑全生命周期“隐含碳”核算体系中，预拌混凝土碳足迹的核算至关重要。从“摇篮到大门”的核算边界来看，预拌混凝土产品的碳足迹构成具有显著特征：其80%~95%的碳排放来自原材料生产环节，而水泥作为最主要的原材料，在其中占据核心地位。进一步拆解发现，水泥碳足迹的近90%左右源自熟料及上游原料获取阶段。由此可见，水泥碳足迹水平在很大程度上直接决定了预拌混凝土整体碳足迹规模，把握这一关键环节对于精准核算和有效控制预拌混凝土碳排放具有重要意义。

3.3.1 水泥碳足迹

在混凝土材料体系中，水泥作为最主要的胶凝材料，不仅是混凝土性能形成的核心要素，更是建筑领域温室气体排放的关键来源。作为典型的工业产品系统，水泥生命周期评价研究已在全球范围内形成广泛共识与丰富成果，国内外围绕水泥产品碳足迹核算建立了系统的标准体系。

欧盟《水泥和建筑石灰 环境产品声明 补充EN 15804的产品类别规则》(EN 16908)通过规范环境产品声明 (EPD) 编制要求，为水泥碳足迹核算提供了统一的技术框架。

国内相关主管部门与行业组织协同推进标准体系建设：工业和信息化部在《工业产品碳足迹核算规则团体标准推荐清单 (第一批)》中采信《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 水泥》(T/CBMF 277—2024)，明确了国内水泥碳足迹核算的规范性方法；同时，生态环境部发布《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 通用硅酸盐水泥 (征求意见稿)》，通过构建国家环境标准，进一步完善了我国水泥产品碳核算的技术规范，为行业低碳转型提供标准化支撑。

1) 水泥的制造过程

水泥的制造过程主要包括生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨三大核心工序，整体可概括为“两磨一烧”。首先，生料制备阶段需将石灰石、黏土、铁矿石及煤等原料破碎并预均化，通过干法或湿法工艺粉磨成成分均匀的生料粉 (干法采用闭路系统，湿法则通过生料浆输送)。随后，熟料煅烧阶段将生料送入回转窑或立窑，在1300℃~1500℃高温下煅烧，

通过固相反应和液相反应生成以硅酸钙为主的熟料，此过程常结合预分解技术提升热效率。最后，水泥粉磨阶段将熟料与石膏、混合材料等按比例混合后二次粉磨至适宜细度，形成成品水泥，再经散装或包装储存运输。整个过程涉及原料破碎、均化、高温煅烧及精细粉磨，兼具高能耗与复杂工艺控制的特点。图3是从采石场到调度的水泥制造过程（从摇篮到大门阶段）的示意图。

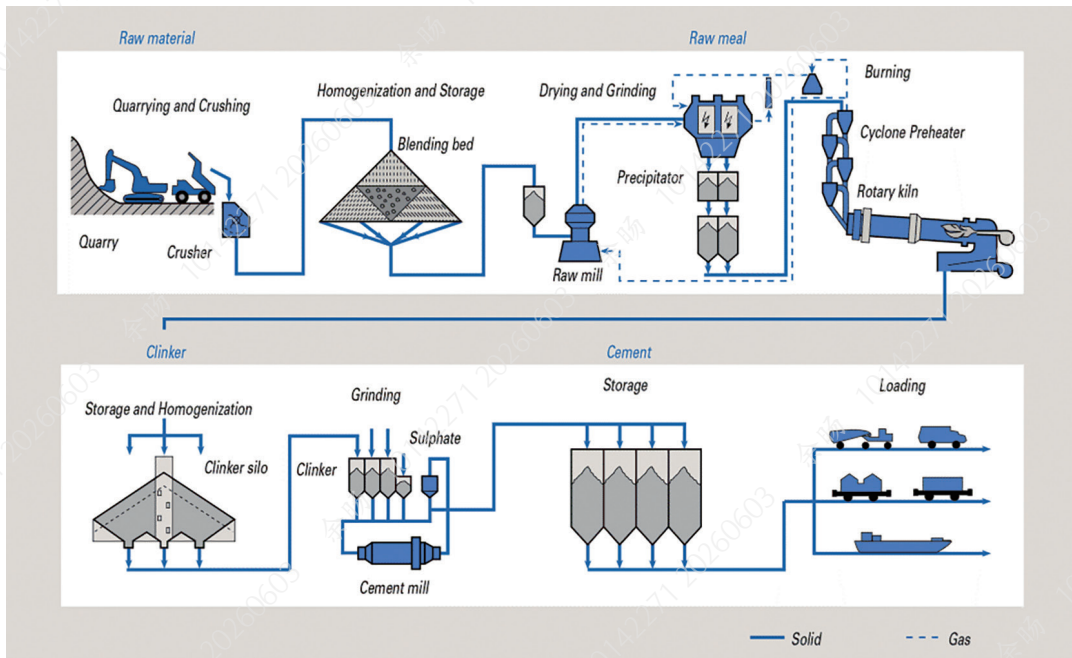


图3 从摇篮到大门阶段的水泥制造过程示意图

2) 普通硅酸盐水泥的组成

普通硅酸盐水泥（代号P·O）主要由硅酸盐水泥熟料（核心胶凝组分）、5%~20%的混合材料（包括活性材料，如粒化高炉矿渣、火山灰、粉煤灰，或非活性材料如石灰石、砂岩）以及适量石膏（通常3%~5%，用于调节凝结时间）经磨细混合制成。其组成中，熟料提供硅酸钙等主要胶凝矿物（如硅酸三钙、硅酸二钙），混合材料通过活性反应补充强度或调节性能，石膏则抑制熟料中铝酸三钙的快速水化，确保水泥凝结时间符合标准（初凝 ≥ 45 分钟，终凝 ≤ 10 小时）。

3) 生命周期评价（LCA）

■ 声明单位：声明单位是用来量化产品碳足迹的基准单位。对于水泥产品来说，通常为“生产1t某品种、某强度等级的水泥产品”，如生产1t P·O 42.5水泥。

■ 系统边界：采用“摇篮到大门”的核算边界，系统边界图如图4所示。

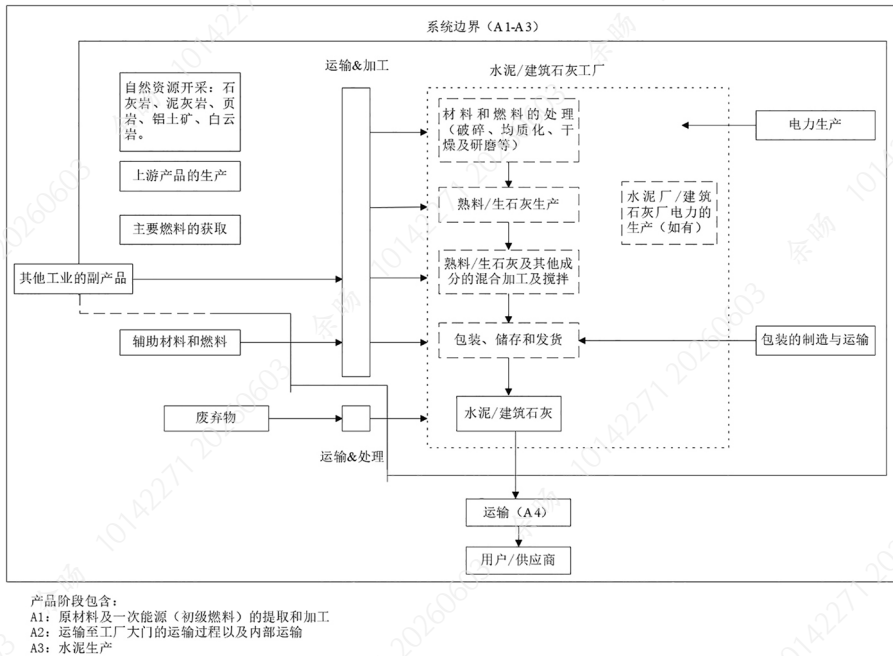


图4 水泥碳足迹核算系统边界（A1-A3）

■ 数据采集：通常，熟料的温室气体排放因子应采用初级数据，矿渣、脱硫石膏等无经济价值固废原料获取阶段的温室气体排放因子往往按0统计。

■ 取舍规则：取舍规则即碳足迹计算过程中可以忽略的单元过程。遵循GB/T 24067的规定，如单项物质（能量）流或单元过程对产品碳足迹的贡献不超过1%可予以忽略，但所有忽略的物质（能量）流与单元过程对产品碳足迹的贡献总和不得超过5%。

■ 分配：在系统边界设置或数据采集时，若发现至少有一个单元过程的输入和输出包含多个产品，则需要分配。对于水泥产品而言，分配往往发生在生产不同标号水泥产品时，应优先采集细分单元过程避免数据分配，如优先采集各设施、各时间段数据；若数据分配无法避免，则应使用质量进行分配，如熟料产量、不同品种水泥产量；对于闭环里循环使用的共生产品，不需要分配，如余热发电不需要分配。

4) 碳足迹结果

水泥依据用途性能可分为三大类，分别为通用水泥、特种水泥和专用水泥，其中通用水泥是工程应用最多的水泥品类。图5展示了北京市典型水泥企业通用水泥产品摇篮到大门的碳足迹分布情况²³。可以看出在水泥生产中，熟料煅烧阶段的碳排放贡献最大，占

23 姜德义，苍大强，关生林，等.北京典型水泥企业生产过程环境负荷评价，武汉理工大学学报.

比80.33%；其次是原料开采和水泥粉磨阶段，分别贡献了10.22%和5.46%；生料粉磨、煤粉制备、原料预均化和生料均化阶段碳排放贡献较小，依次为2.68%、1.04%、0.16%和0.11%。

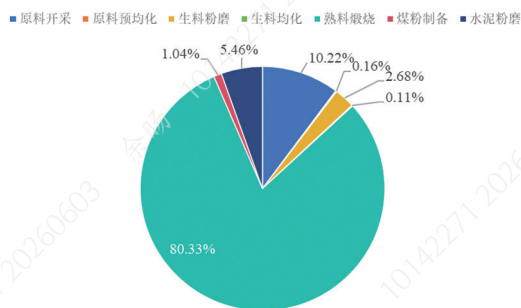


图5 水泥生产阶段碳排放贡献分布

不同类型水泥由于熟料的使用量差别，其碳足迹结果差异明显。表6展示了在Ecoinvent数据库中不同类别水泥产品生产的碳足迹结果，可以看出，采用不同混合材料的水泥的碳足迹结果相差较大，可达近三倍。复合硅酸盐水泥的碳足迹最低，无任何混合组分的硅酸盐水泥碳足迹最高，掺加混合材料的水泥产品碳足迹显著低于无任何混合组分的硅酸盐水泥，且随着混合材料的掺量越高，其碳排放越低，主要原因在于混合材料的增加，降低了水泥熟料的使用量。

表6 Ecoinvent数据库中不同类别水泥产品生产的碳足迹

水泥细类	混合材料含量	碳足迹kgCO ₂ eq	Ecoinvent数据地理代表性
复合硅酸盐水泥	高炉矿渣和其他替代成分；31%~50%	322.43	欧洲域外 (ROW)
矿渣硅酸盐水泥	高炉矿渣；40%~70%	458.01	欧洲域外 (ROW)
火山灰硅酸盐水泥	火山灰；15%~50%	613.53	欧洲域外 (ROW)
粉煤灰硅酸盐水泥	粉煤灰；21%~35%	629.94	欧洲域外 (ROW)
普通硅酸盐水泥	石灰石；6%~20%	768.23	欧洲域外 (ROW)
硅酸盐水泥	无混合材料	892.98	欧洲域外 (ROW)

生态环境部建设的国家温室气体排放因子数据库（第一版）于2025年1月正式上线，因子库建设遵循“广泛征集、共建共享、循序渐进、科学实用”原则。目前，因子库中数据部分来源于调研、实测等获取的本地化因子，部分来源于政府间气候变化专门委员会（IPCC）等国际缺省排放因子。该数据库同时配套核算工具，国家温室气体排放因子数据库（第一版）部分温室气体排放因子如表7所示。

表 7 国家温室气体排放因子数据库(第一版)部分温室气体排放因子

因子名称	排放源类别	因子	单位	数据来源
电力	电力消费	0.5568	KgCO ₂ /kWh	生态环境部、国家统计局
硅酸盐水泥熟料	生产过程	0.528	tCO ₂ /t熟料	行业协会
平板玻璃	生产过程	92.98	tCO ₂ /万重量箱	行业协会
碳酸钙	碳化吸收	0.44	tCO ₂ /tCaCO ₃	理论值

3.3.2 预拌混凝土碳足迹

按隐含碳边界核算时,原料获取阶段的碳足迹是混凝土碳足迹的主要来源,其中水泥占比超过85%,骨料占比5%左右。

1) 预拌混凝土的制造过程

预拌混凝土的生产工艺流程是一个高度系统化的过程,涵盖原材料准备、精确配料、强制搅拌等主要环节。原材料准备阶段需对水泥、砂、石子、掺合料(如粉煤灰)及外加剂进行质量检测与分类储存,其中砂石需清洗至含泥量 $\leq 3\%$,水泥采用密闭筒仓存储以避免受潮。

配料与投料通过计算机控制系统按设计配合比精准称量,砂石经皮带输送至搅拌机,水泥、掺合料通过螺旋输送机计量,液态外加剂则由计量泵注入,全程误差控制在 $\pm 1\%$ 以内。强制式搅拌阶段,搅拌机搅拌时间3~5分钟,确保浆体均匀包裹骨料,特殊混凝土(如自密实混凝土)需延长至6分钟。

2) 预拌混凝土的组成

预拌混凝土原材料体系由水泥、骨料、矿物掺合料、外加剂及拌合用水五大关键组分构成。从各组分体积占比分析,骨料在混凝土结构中占据主导地位,约占总体积的70%;拌合用水占比约14%,对混凝土的工作性能及凝结硬化过程起到关键作用;水泥与矿物掺合料共同构成胶凝材料体系,二者合计占比约10%,直接影响混凝土的强度与耐久性;外加剂虽仅占总体积的2%,却能显著改善混凝土的流变性能与施工特性;此外,混凝土内部孔隙中空气含量约为4%,该部分气体对混凝土的抗冻性及收缩性能具有重要影响。各组分以特定比例协同作用,共同决定预拌混凝土的物理力学性能与工程适用性。

3) 生命周期评价(LCA)

■ 声明单位:预拌混凝土产品碳足迹量化的声明单位为“1m³某品种、某强度等级的预拌混凝土产品”,如1m³C40预拌混凝土。

■ 系统边界：预拌混凝土从“摇篮到大门”的核算系统边界如图6所示。

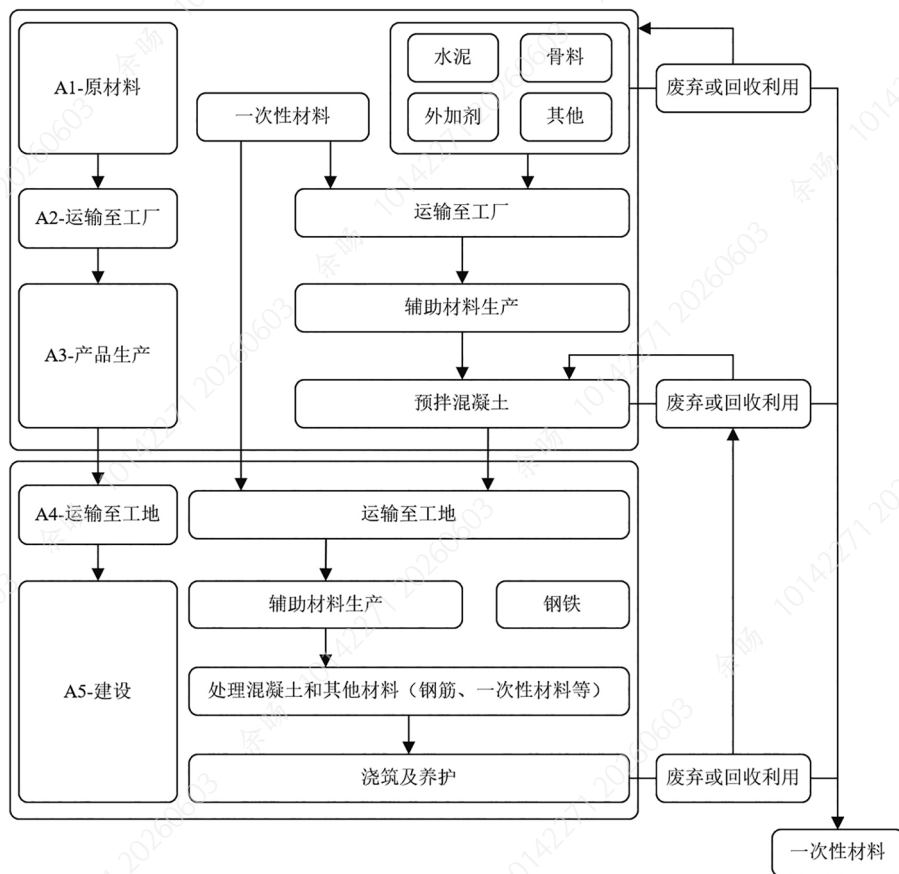


图 6 预拌混凝土的系统边界图

■ 数据采集：由于水泥是混凝土中碳足迹的主要来源，因此在计算混凝土碳足迹过程中，水泥应尽量采用上游水泥产品的碳足迹实测数据也即初级数据；矿粉、粉煤灰等无经济价值矿物掺合料的温室气体排放因子可按0处理（对于粉煤灰等固体废物的碳排放数据处理因其经济价值考量而存在争议）。

■ 取舍规则：同样遵循GB/T 24067的规定，如单项物质（能量）流或单元过程对产品碳足迹的贡献不超过1%可予以忽略，但所有忽略的物质（能量）流与单元过程对产品碳足迹的贡献总和不得超过5%。

■ 分配：对于生命周期评价来说，最优先的情况是采集细分单元过程避免数据分配，不过由于混凝土生产企业往往会使用同一生产线生产多种强度等级的产品，要求企业分别计量存在现实困难。因此，使用如预拌混凝土的产量、或者各强度等级预拌混凝土的产量等进行分配是常规方法。

4) 碳足迹结果

图7展示了英国绿色建筑理事会低碳混凝土组织（LCCG）测算的设计强度为C25/30的结构混凝土在A1至A3阶段的典型碳排放分布²⁴。该数据是基于理论配合比计算得出，并使用了来自碳与能源数据库（The Inventory of Carbon and Energy, ICE）的碳排放因子背景数据，总碳排放量为286kgCO₂e/m³。

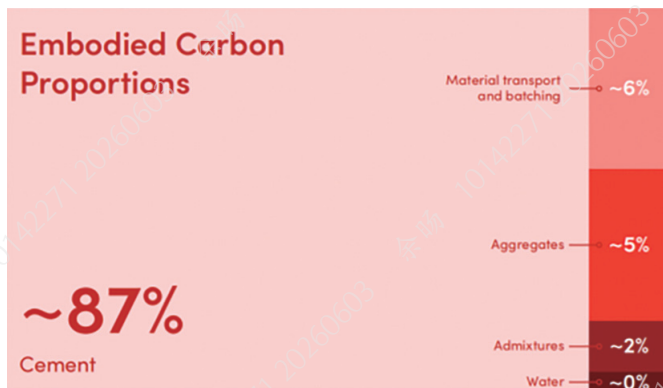


图7 典型混凝土产品碳足迹占比示意

可以看出“从摇篮到大门”的生命周期阶段中，虽然水泥作为混凝土的核心胶凝材料成分占比不到10%，但其碳足迹占比高达87%；骨料（砂、石等）的碳足迹占比约为5%；材料运输与产品生产也就是混凝土企业运营控制的环节合计贡献6%的碳足迹；外加剂虽用量较少，但因生产工艺复杂，碳足迹占比约为2%；拌合水的碳足迹占比最小，通常拌合水为河水、湖水、地下水等直接来自自然环境的水资源时，拌合水的碳足迹近乎为0，当拌合水为来自市政管网的自来水时，拌合水的碳足迹占比低于1%。

2024年，中国建筑材料联合会绿色低碳建材分会与中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会组织首届预拌混凝土碳足迹大赛。以1m³预拌混凝土产品为声明单位，覆盖C15~C60强度等级，对国内70余家预拌混凝土生产企业提交的产品进行碳足迹核算，结果分布如图8所示。

随着混凝土强度等级的上升，碳足迹整体呈递增趋势。不过，同一强度等级下，在不同配合比以及水泥等关键原材料碳足迹差异的作用下，不同企业的产品碳足迹结果差距同样明显。以C30强度等级为例，最优水平的产品碳足迹可低于200kgCO₂/m³，相比最差表现产品的碳排放低30%。由此也可看出，低碳混凝土的发展潜力巨大。

24 LCCG, Low Carbon Concrete Routemap.

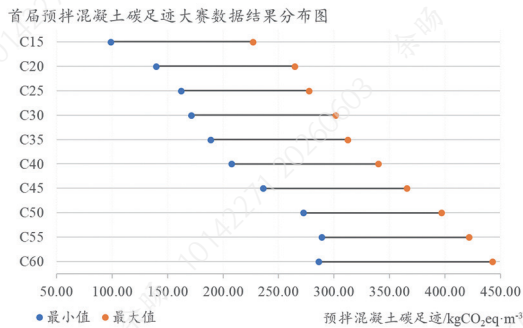


图 8 首届预拌混凝土碳足迹大赛结果分布图

3.4 碳足迹核算的行动与挑战

1) 加快构建反映中国实际的产品碳足迹因子数据库

生命周期数据的积累与处理是一项长期且系统的工程。目前，我国尚未建立起受到国内外广泛认可的碳足迹因子数据库。生态环境部牵头建设的国家温室气体排放因子数据库已于近期发布了首批因子，在覆盖范围以及数据格式等方面还在持续完善；其他商业数据库以及公开数据库，由于依赖国内外文献等数据来源，或多或少面临数据透明度以及数据可靠性等瓶颈问题。也正是由于这些问题的存在，造成国内外数据库间的难以有效连通，国内企业和第三方机构在开展碳足迹核算时普遍采用Ecoinvent、GaBi等国外数据库提供的因子数据，以增强核算结果的国际认可度。

然而，国际数据库中我国相关数据又存在数据量少、年份久远、溯源性较差、代表性不足等问题，如Ecoinvent、GaBi数据库目前分别约有23000和20000条数据，其中中国数据不足5%。由此造成国内相当数量的产品碳足迹报告数据质量无法满足使用要求。

建立产品生命周期数据库，需整合企业、行业、研究机构等多方资源，形成协同创新合力。基于统一的碳足迹核算标准，开展典型产品碳足迹核算工作，实现产品类别核算的规范化与标准化是其基础。注重与国际数据体系的互通互融，则是提升我国产品碳足迹国际认可度与可比性的关键。

2) 拓展碳足迹应用场景

当前，国内产品碳足迹的应用场景建设尚在起步阶段，大部分用于外贸出口、绿色认证等领域。预拌混凝土碳足迹和碳标签的应用场景往往局限于绿色建材认证，产品碳足迹与政府绿色采购、绿色金融、消费品碳标识、碳普惠等政策机制的衔接途径尚未完全打通，缺乏有效的约束和激励措施，导致相关市场主体欠缺参与碳足迹管理的积极性。

随着碳足迹管理体系建设的持续完善，碳足迹的应用场景有望大大拓宽。通过在政府

绿色采购需求标准中优先纳入已出台碳足迹核算国家或行业标准、数据基础较好、碳足迹可比性强的产品，逐步扩大碳足迹在绿色采购中的应用范围将有助于碳足迹相关政策在企业的下沉；鼓励金融机构将碳足迹纳入授信条件，出台碳足迹挂钩金融产品，形成以需求带动供给的发展格局，将有助于提升企业开展碳足迹核算和管理的内在积极性。同时，水泥等混凝土上游原材料已经纳入碳足迹认证试点，预计将有效提升企业获取上游数据的便捷性与可靠性。

西麦斯（CEMEX）是一家成立于1906年的全球建筑材料公司，总部位于墨西哥。2021年，由西麦斯开发的、行业首个低碳水泥与混凝土品牌Vertua正式上市。Vertua碳中和混凝土通过替代胶凝材料、优化配合比设计以及CCUS等技术，相比传统混凝土可将CO₂排放量降低30%~70%，剩余30%的CO₂可通过其他方式抵消、中和。当前，Vertua产品已占到西麦斯水泥总销量的63%和混凝土总销量的55%²⁵，成为西麦斯可持续发展战略的重要竞争力。

3) 融入气候变化合作

混凝土对CO₂的吸收与固定作用，对气候变化发挥积极作用，正在逐渐得到国际社会的认可与采信。目前，包括政府间气候变化专门委员会（IPCC）在内的相关机构与行业组织，正在积极研究混凝土碳化过程的二氧化碳因子。自愿碳标准（VCS）等碳信用机制也已经开发了混凝土固碳核算的方法学体系，混凝土生产以及使用过程所实现的固碳量有机会通过碳信用机制出售，将有效承托生产企业的低碳溢价。

加拿大CarbonCure公司在混凝土搅拌过程中注入回收的工业CO₂，通过矿化反应每立方米混凝土可固定20~30kgCO₂，在减少水泥用量的同时，可提升混凝土抗压强度约10%。截至2023年，通过碳信用平台Verra认证的CarbonCure项目累计产生超50万吨CO₂当量碳信用²⁶，并被微软等众多企业购买用以抵消排放量。

4 明确目标：低碳混凝土的评价

如果说碳足迹核算是产品碳排放管理的第一步，那么通过分级等手段对产品碳足迹水平进行评价，则是有效管理企业减排目标，引导建立低碳消费市场的更高追求。我国在能效、水效等领域已有长期的分级管理实践经验，“指标量化、等级划分、动态管理”是指

25 Cemex 2024 Integrated Report.

26 CarbonCure Achieves Milestone 500,000 Metric Tons of CO₂ Savings.

标分级的共性特征。

混凝土是基于成分与性能标准界定的产品，强度、耐久性等指标会根据项目要求变化，特殊的施工需求还可能会对混凝土性能提出特定要求，季节性和温度模式也会对产品配比设计产生影响，上述因素是对混凝土设定碳足迹量化基线和目标面临的主要挑战。探索低碳混凝土的评价方法，需要明确规则与范围，提高数据透明度。全球范围内，针对预拌混凝土产品已有诸多碳足迹分级规则出台，部分国际组织成立了针对低碳混凝土采购的倡议，为国内推动相应规则的建立与发展提供了借鉴与参考。

4.1 碳足迹分级管理政策进展

产品碳足迹分级管理制度是产品碳足迹管理体系的重要制度组成部分。将产品根据碳足迹数值划分为不同等级（如1级、2级、3级等），并实施差异化措施，可为低碳产品建立应用场景，解决“怎么用”的问题。

欧盟委员会《电池与废电池法规》（EU 2023/1542）²⁷中规定投放欧盟市场的电池应标明电池产品全生命周期碳排放数据，并声明该电池型号对应的生产工厂的碳足迹性能等级。欧盟委员会将根据市场上电池碳足迹声明的值分布，识别出具有意义的性能类别，其中类别A为最佳类别，具有最低的碳足迹生命周期影响，类别B至F依次递增，反映不同碳足迹水平。

我国产品碳足迹分级管理制度建立尚处于探索起步阶段，《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》提出了建立碳足迹分级管理制度的主要目标和主要任务（见表8），明确了产品碳足迹分级管理制度建立的时间节点和建设节奏。

表 8 我国产品碳足迹分级管理制度建立的主要目标和主要任务

主要任务	建立产品碳足迹分级管理制度。政府部门探索开展重点行业和细分领域的产品碳足迹分级评定和管理工作。鼓励企业参照相关标准和要求开展自身和供应链碳足迹评价，推动企业挖掘减碳潜力、优化供应链管理、提升产品低碳竞争力。
主要目标	到2027年，产品碳足迹分级管理制度初步建立，重点产品碳足迹规则国际衔接取得积极进展；到2030年，产品碳足迹分级管理制度全面建立，产品碳足迹应用环境持续优化拓展。

先行者联盟（First Movers Coalition, FMC）成立于2021年的COP 26会议期间，由美国与世界经济论坛（WEF）共同发起。该联盟旨在通过产业领头羊的集体购买力，创造刺激低碳新技术的投资环境与市场，促使不易减碳的产业早日脱碳。FMC创始会员共34个，包括马士基、空中巴士、亚马逊、苹果、波音等知名企业，现有会员数量102家，共涉及铝、航

27 Regulation (Eu) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023.

空、二氧化碳去除、水泥和混凝土、化学品、航运、钢铁、卡车运输等八个具体领域的采购。2022年11月启动“水泥与混凝土”领域的采购承诺²⁸，成员承诺每年采购10%的低碳混凝土与水泥，表9展示了其划定的混凝土的低碳采购基准。

表 9 先行者联盟划定的混凝土低碳基准

规定的抗压强度 (psi)	规定的抗压强度 (MPa)	隐含碳 (kgCO ₂ e/m ³)
0-2500	0-17.24	70
2501-3000	17.25-20.68	78
3001-4000	20.69-27.58	96
4001-5000	27.59-34.47	117
5001-6000	34.48-41.37	124
6001-8000	41.38-55.16	144
8001-10000	55.17-68.95	164
10001-12000+	68.96-82.74+	184

4.2 国外低碳混凝土分级评价方法介绍

在全球建筑行业低碳转型的浪潮下，建立预拌混凝土隐含碳评估基准，已成为各国推动建筑全产业链绿色升级的关键举措。按照评级基准是否变化，评价方法可分为静态分级基准与动态分级基准两类。其中，静态分级基准在不同时间、不同市场、不同地区和不同用途之间保持不变。动态分级基准也叫市场基准，会随着市场上销售的混凝土的隐含碳的变化而变化，因对数据要求更高，该方法仅适用于有隐含碳数据来源的市场。

4.2.1 联合国工业发展组织 (UNIDO)：工业深度脱碳倡议 (IDDI)

工业深度脱碳倡议 (Industrial Deep Decarbonization Initiative, IDDI) 是在联合国工业发展组织 (UNIDO) 协调下，2021年6月，在全球29个成员国的清洁能源部长会议 (CEM) 中，由英国和印度主导成立的一个由公共和私人组织组成的全球联盟，旨在通过系统性国际合作与创新政策设计，推动钢铁、水泥/混凝土等高碳强度行业的深度脱碳，提振包括钢铁、水泥和混凝土在内的低碳排放材料市场，助力全球实现《巴黎协定》温控目标。

目前，IDDI的主要成员包括英国、印度、加拿大、德国、日本、沙特阿拉伯、瑞典、阿拉伯联合酋长国、美国以及世界经济论坛 (WEF) 等。

IDDI的主要目标之一是为低碳和近零排放的水泥、混凝土和钢材制定一致的定义。IDDI采用了国际能源署 (IEA) 对低碳和近零排放水泥及粗钢的定义为基础，与全球水泥

²⁸ First Movers Coalition Cement And Concrete Commitment, WEF.

与混凝土协会（Global Cement and Concrete Association, GCCA）合作创建一套低碳混凝土的定义²⁹，如图9所示。

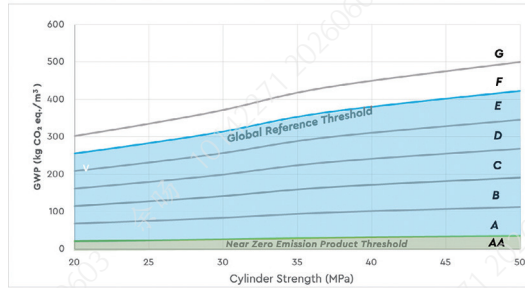


图9 低碳及近零排放混凝土的全球定义

1) 强度等级范围：C20、C25、C30、C35、C40、C50。

2) 碳足迹核算：为了与全球阈值进行比较，需要根据环境产品声明（EPD）方法计算混凝土产品的全球变暖潜值即碳足迹，具体规则如下：

■ 核算依据：EN 15804 + A2，EN 16908以及EN 16757。

■ 背景数据库：Ecoinvent。

■ 系统边界：从摇篮到大门（A1—A3阶段）。

3) 基准方法：静态分级基准。混凝土产品的全球定义包含7个等级，即从G级到A级，碳足迹逐步降低，直至达到近零排放等级，其中E级上限为全球参考阈值，A级下限为近零排放阈值，G级，没有上限，涵盖所有未包含在A至F级中的混凝土产品，C20~C50等六种强度等级的混凝土各等级的上限值如表10所示。

表 10 低碳及近零排放混凝土的全球定义——列表形式 (kgCO₂eq/m³)

	混凝土强度等级 (MPa)					
	20	25	30	35	40	50
F等级上限	302	335	372	418	450	500
E等级上限	255	283	4	353	380	422
D等级上限	208	231	256	288	310	345
C等级上限	161	79	99	224	241	268
B等级上限	15	127	141	59	171	190
A等级上限	8	5	83	94	101	113
近零排放产品	21	23	26	29	32	6

29 GCCA Policy Numerical Definitions for Low Carbon and Near Zero Emissions Concrete, GCCA.

4) 应用场景：适用于全国各个国家，但是如果某个特定国家计算环境产品声明（EPD）的方式与用于确定全球阈值的方式不同，需要进行归一化处理。归一化是将计算全球阈值转换为反映当地标准、数据库、范围和废弃物排放核算的本地分级值。

4.2.2 英国：低碳混凝土组织（LCCG）

英国绿色建筑委员会召集的低碳混凝土组织（Low Carbon Concrete Group, LCCG）由混凝土、水泥、施工以及学术界、用户方等领域专业人士组成，旨在推动英国混凝土行业的脱碳。LCCG基准³⁰是基于英国市场的混凝土隐含碳进行的分级，首次出现在2022年由英国土木工程师学会（ICE）发布的《低碳混凝土路线图》中。作为一个动态基准体系，LCCG基准保持每年一次的定期更新调整，截至2025年5月，该基准已完成3次更新迭代。通过持续更新，LCCG基准能够更好地反映市场变化与行业发展趋势。

1) 强度等级范围：C6/8、C8/10、C12/15、C16/20、C20/25、C25/30、C28/35、C30/37、C32/40、C35/45、C40/50、C45/55、C50/60、C55/67、C60/75、C70/85、C80/95等28种强度等级。

2) 核算依据：EN 15804:2012+A2, EN 16757。

3) 系统边界：从摇篮到大门（A1—A3阶段）。

4) 基准方法：2024版LCCG基准由英国矿产协会（MPA）混凝土中心代表LCCG发布，分级所依据的隐含碳数据主要基于MPA成员2023年度在英国生产的混凝土，也包括与非MPA成员生产的混凝土相关的数据。2024版LCCG分级³¹基准如图10所示，其中，LCCG-5代表的混凝土隐含碳处于市场最高的20%水平（红星标记），而LCCG-1代表的隐含碳处于市场最低的20%水平（蓝星标记）。

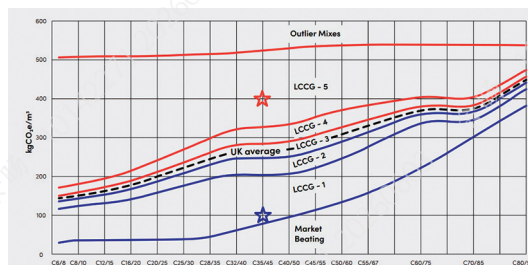


图 10 2024版的LCCG基准

30 Classification methodology for embodied carbon of concrete, LCCG, July 2024.

31 Embodied carbon of concrete – Market Benchmark, The 2024 update of the Low Carbon Concrete Group Market Benchmark, based on 2023 data.

的建筑嵌入式碳计算器（EC3），该工具通过整合经第三方验证的环境产品声明（EPD），确保了数据来源的科学性与可追溯性。2019—2023年澳大利亚8种强度的混凝土的隐含碳百分位分布如表11所示。

表 11 2019~2023年澳大利亚EPD统计数据

EPD数据范围的统计信息	混凝土强度 (MPa) & 隐含碳 (kgCO ₂ eq/m ³)							
	20	25	32	40	50	65	80	100
最大值	313	350	374	467	516	608	529	575
75%百分位	211	244	270	329	410	471	472	528
中间值-50%百分位	199	218	246	302	349	379	429	465
25%百分位	177	198	224	264	320	357	422	441
最小值	136	149	155	193	168	251	381	383

3) 局限性：未考虑实现低碳混凝土的各种区域因素和地区差异，也未考虑不同的混凝土应用类型或混凝土类型对碳排放的影响，例如预应力、预制、桩基等。

4) 应用场景：分级方案的核心功能是作为行业隐含碳可视化工具，帮助采购方、设计单位及施工企业快速识别不同强度等级混凝土的隐含碳水平，推动低碳产品在项目招投标、材料选型中的优先应用，从而形成“标准引导采购—采购倒逼减排”的市场机制。

4.3 我国预拌混凝土产品碳足迹分级研究

2025年，作为建筑材料碳标签项目的一部分，中国建筑材料联合会绿色低碳建材分会与中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会合作启动预拌混凝土产品的碳足迹分级试点项目。基于前期混凝土碳足迹种类规则、数据库的工作基础，立项《预拌混凝土 低碳分级及评价方法》以及《固碳混凝土生产过程温室气体利用与储存 量化方法与要求》两项标准，同时，结合2023—2024年预拌混凝土行业碳足迹大赛结果划设形成预拌混凝土碳足迹分级基准试点。

1) 强度等级范围：考虑下游市场的应用，分级研究以1m³普通混凝土为单位，依据强度等级进行产品单元的划分，覆盖C15至C60强度等级。

2) 碳足迹核算

■ 核算依据：建筑材料碳标签《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 预拌混凝土》。

■ 数据要求：为提升数据透明度，原材料获取阶段水泥、骨料应使用上游供应商所提供的建筑材料碳标签或EPD披露数据，其他次级数据可按核算规则规定进行使用。

■ 系统边界：从摇篮到大门（A1—A3阶段）

3) 基准方法：分级基准的设定采用动态基准法和静态基准法相结合的思路，参考国外分级思路，结合国内实践经验，将预拌混凝土低碳等级分为1级、2级和3级，如图12所示。其中1级为最高等级，对应的碳足迹最低，代表行业低碳标杆水平，2级和3级对应的碳足迹则依次递增，3级代表行业低碳基准水平，2级代表行业良好水平。分级将定期根据最新行业数据调整基准值，有效应对技术进步和市场变化。

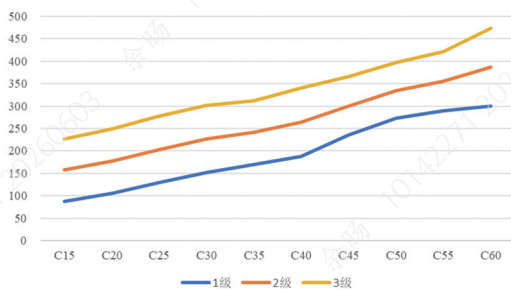


图 12 低碳混凝土分级范围 (单位: kgCO₂/m³)

4) 数据来源：考虑到国内混凝土生产的区域性差异以及成分差异，分级基准设定的基础数据来源于首届预拌混凝土碳足迹大赛的70余家参赛单位，其总产值占行业规模近50%，在混凝土碳足迹计算过程中，所采用的水泥碳足迹数据均源自上游水泥企业初级数据，从数据源头保障了计算结果的科学性与精准度。在确保数据具备广泛代表性的同时，有效控制数据不确定性在合理范围内。各等级低碳混凝土分级基准值数据如表12所示。

表 12 低碳混凝土分级基准值数据 (kgCO₂/m³)

强度等级	1级	2级	3级
C15	88	157	227
C20	105	177	249
C25	129	203	277
C30	151	226	301
C35	170	241	312
C40	187	264	340
C45	236	301	365
C50	272	335	397
C55	289	355	422
C60	300	387	474

5) 局限性：与英国、澳大利亚分级方案相似，这一分级基准为简化操作与方便比较，仅以强度等级指标划分，未充分考虑耐久性、区域分布、环境影响类别、应用场景等因素的影响。因此导致分级体系在全面性上存在一定局限。未来随着碳足迹的研究的深入和行

业标准的完善，这种局限性有望逐步得到克服。

6) 应用场景：中国建筑材料联合会绿色低碳建材分会与中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会正在策划扩大低碳混凝土合作领域，将低碳混凝土分级方案用于低碳混凝土认定、低碳采购、绿色建造等领域。

5 开始行动：低碳混凝土应用展望

5.1 国家自主贡献目标支持气候雄心

作为《巴黎协定》的核心内容之一，国家自主贡献目标体现了缔约国减少排放和适应气候变化影响的努力。联合国环境署（UNEP）在2024年10月发布的《2024年排放差距报告》中指出，各国必须在下一轮国家自主贡献中共同承诺，到2030年将温室气体年排放量减少42%，到2035年减少57%，并迅速采取行动来支持这一目标，否则《巴黎协定》的1.5°C目标将在几年内化为泡影³³。

从目前的趋势来看，1.5°C目标的达成已经越来越困难，我们面临着来自政策、商业、技术等各方面的重重阻碍，开始行动或许无法保证目标的实现，但不做尝试则100%会导致失败。

在2025年气候和公正转型领导人峰会上，习近平主席宣布将在联合国气候变化贝伦大会前宣布覆盖全经济范围、包括所有温室气体的2035年国家自主贡献目标。这一宣示展现了中国在全球气候治理中的领导力和责任担当。中国不仅是绿色发展的坚定行动派和重要贡献者，还通过实际行动推动全球气候治理进程。

2023年，全球温室气体排放量创下571亿吨二氧化碳当量的新纪录，比2022年增加了1.3%。能源部门仍是全球最大的排放源，达到了151亿吨二氧化碳当量，其次是交通运输（84亿吨二氧化碳当量）、农业（65亿吨二氧化碳当量）和工业（65亿吨二氧化碳当量）。

下一轮国家自主贡献为各国投入减排目标与计划提供潜力与机会，根据UNEP的评估，各领域到2035年技术经济减排潜力可达到410亿吨二氧化碳当量/年，如图13所示。从2021年到2050年期间，实现净零过渡的全球增量投资估计为0.9万亿至2.1万亿美元每年，虽然金额巨大，但是与接近110万亿美元的全球经济和金融市场规模相比，仍是可控的。

33 联合国环境规划署 2024年排放差距报告：停止空谈，言辞与现实之间存在巨大鸿沟，各国制定全新气候承诺。

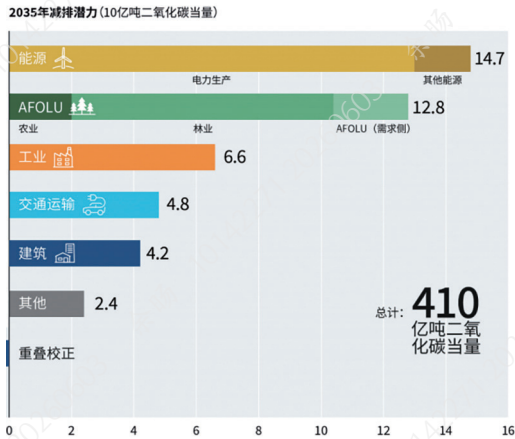


图 13 各部门2035年减排潜力评估

5.2 低碳产品精准锚定减排方向

产品碳足迹分级管理作为推动低碳经济发展的可落地举措，连接国家自主贡献目标与企业绿色转型，并有效满足消费者对低碳产品的差异化需求。通过政策引导与市场驱动的双重作用，深度融入绿色采购、绿色消费、绿色金融等领域的应用，将有利于形成协同减排的强大合力。

1) 驱动企业绿色技术创新

产品碳足迹分级管理能够精准量化不同产品的全生命周期碳排放水平，为企业制定精细化减排策略提供坚实的数据支撑。通过系统化的低碳分级评估，企业不仅能够全面掌握产品在原料采购、生产加工、运输销售各环节的碳排放特征，还能通过行业对标，明确自身产品在市场竞争中的定位。同时，以分级管理为纽带，还能有效串联供应链上下游企业，推动全产业链的低碳化升级。

2) 培育低碳采购、消费市场

碳足迹分级管理通过直观的量化标识，将产品碳排放信息转化为消费者易于理解的可视化数据，降低碳排放信息传播的知识门槛，显著提升采购、消费决策的便利性。传统制造业企业围绕低碳、绿色等标签形成新的品牌定位，提升自身市场竞争力的同时，也将推动全社会形成低碳生活新风尚。

建筑材料碳标签项目将于2025年正式发布产品低碳分级标签规则，为市场提供低碳产品基准，建筑材料低碳分级标签如图14所示。

3) 引导绿色低碳投融资

以低碳产品为牵引，能够充分发挥市场机制的导向作用，吸引社会资本向绿色产业领

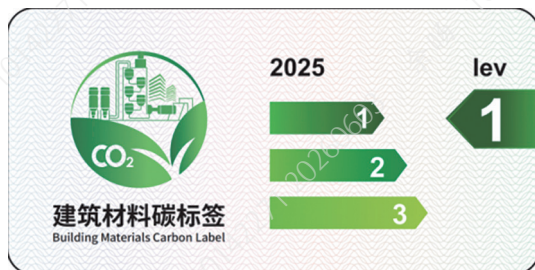


图 14 建筑材料低碳分级标签

域集聚。这种资源优化配置模式，不仅能够提升负责任投资规模，实现资源利用效率的最大化，还能发挥加速淘汰落后高碳产能，推动产业结构深度调整的间接作用。

2022年，华新水泥股份有限公司在上交所成功发行全国水泥行业和华东地区首单低碳转型挂钩公司债券。本期低碳转型挂钩债券选择华新水泥单位熟料碳排放量为关键绩效目标，并以2024年底单位熟料碳排放量降至829.63kgCO₂/t为目标，设置票面利率调整机制，将基础期限最后一个计息年度的票面利率与该目标实现程度挂钩，进一步促进公司实现低碳转型目标。本期债券发行规模9亿元，分两个品种发行。品种一发行规模5亿元，期限为3年期，票面利率2.99%；品种二发行规模4亿元，期限为5年期，票面利率3.39%。双品种债券均创水泥行业同期限公司债券发行利率最低。

欢迎访问建筑材料碳标签公共服务平台



<http://ecolabel.greenjc.cn/>

可信·可比·可用

低碳混凝土系列标准征集参编单位:

- 《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范·混凝土固碳项目》
- 《预拌混凝土·低碳分级及评价方法》

请联系: 010-57811304