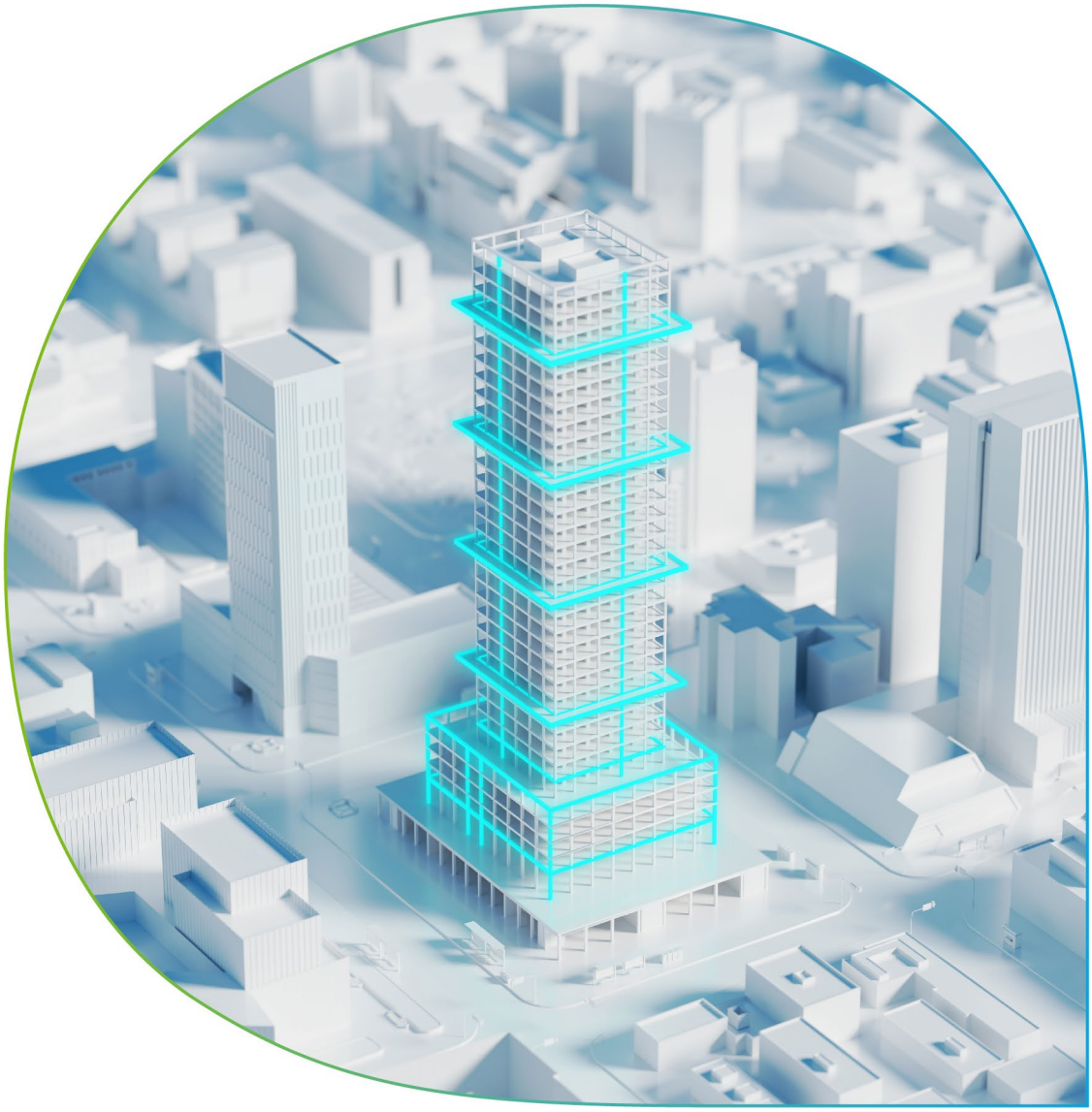
双碳战略下的先进建材转型白皮书

双碳新引擎：深挖“油转化”价值，共建低碳高质量基建生态

——沙特阿美助力中国新材料新质生产力发展

2026年9月



同濟大學 TONGJI UNIVERSITY | 21世纪经济报道 21st CENTURY BUSINESS HERALD | aramco 沙特阿美

双碳战略下的先进建材转型白皮书

双碳新引擎：深挖“油转化”价值，共建低碳高质量基建生态

—— 沙特阿美助力中国新材料新质生产力发展

编　　纂： 同济大学 姜旭　强旭红　舒悦　杨文漪　杨瑞昕
21 世纪经济报道 曹恩惠

统　　筹： 朱胜骏 赵凤玲

审　　校： 陈晶晶

设计统筹： 林军明 廖苑妮

设　　计： 陈国丽

【免责声明】

本白皮书所载内容（包括但不限于行业观察、技术观点、工程案例数据及测算分析），系由同济大学土木工程学院、及 21 世纪经济报道及沙特阿美（以下合称“出品方”）基于公开工程报告及 NEXCEL 项目资料，在特定工况条件与特定工程场景下整理而成，仅供行业交流与一般性参考，不构成任何决策依据或专业建议。鉴于实际应用中工况条件、施工工艺、材料状态及环境因素的差异性，出品方不对任何项目成果、性能指标或商业收益提供明示或暗示的保证，亦不对因采纳本白皮书内容而导致的任何直接或间接损失承担法律责任。

文中案例数据及设计寿命、碳减排等测算结果，仅反映特定项目实践情况，属估计值，不必然适用于其他场景。引用的第三方数据及观点（包括 IEA、UNEP 等机构发布信息）仅作说明用途，不代表出品方对其准确性或完整性的认可或背书。文中前瞻性陈述受多重不确定性因素影响，实际发展可能与之存在重大差异。本白皮书为多方联合出品，其中观点性内容不必然代表任何一方的官方立场或对外承诺。

前言

工业革命以来，碳氢资源作为主要能源载体，支撑了全球工业化与城镇化的高速发展，也累积了温室气体排放的长期气候风险。当前全球能源转型与产业升级进入深度交汇期，碳氢资源的利用方式正在发生根本性转变：从“燃烧驱动”的一次性能源利用，转向“结构构建”的长周期材料化固碳（即将碳元素固定于工程材料中）；从“燃料型炼厂”的单一生产模式，转向“材料型工厂”的全价值链布局。上述转变正在重塑全球石化产业的价值分配规则，也为基础设施领域的绿色低碳转型带来全链条材料解决方案。

面向高质量发展目标，材料产业需加快先进材料升级步伐、做强“油转化”价值链，筑牢新质生产力的材料基础。对中国而言，上述转变具备双重产业价值：

一方面，中国拥有全球规模最大的基建市场与最完整的工业生产体系。根据中国建筑节能协会数据，建筑与基建领域碳排放占全国能源相关碳排放近半数，是双碳目标落地的首要减排战场

另一方面，产业升级要求产业基础高级化、产业链现代化，新材料作为支撑高端制造、重大工程的战略性基础产业，是突破产业升级瓶颈的关键变量。

减排的刚性约束与产业升级的市场需求，在“先进石化基材料”这一交叉点形成历史性机遇：通过重构碳资源利用路径，中国可在持续推进工业化、城镇化进程的同时，同步实现碳减排与产业升级的双重发展目标。

从全球维度看，建筑与基建领域的减排压力同样突出。根据国际能源署（IEA）统计，建筑与基建领域是全球碳排放的主要来源之一，随着城市化进程推进，传统建材需求持续增长，减排压力进一步加剧。联合国环境规划署指出，把握绿色转型机遇需要各行业在标准制定、材料创新和规模化投资方面采取战略性、协同化行动。

作为领先的综合性能源与化工企业，沙特阿美通过“非金属材料创新中心”（NEXCEL）支持中国的“双碳”目标。该中心由沙特阿美与中国建材集团（CNBM）旗下的科技研发机构——中国建筑材料科学研究总院（CBMA）于 2022 年在北京共同创立。NEXCEL 作为一个联合平台，致力于技术部署、标准与指南制定、专业培训及国际交流，旨在加速非金属解决方案在中国建筑与基础设施领域的产业化应用。

本白皮书基于沙特阿美及非金属材料创新中心（NEXCEL）的全球工程实践数据，结合同济大学在土木工程与材料科学领域的学术积累，以及 21 世纪经济报道的产业观察，系统阐述先进石化基材料作

为高性能产业材料的技术路径与产业价值。研究遵循“机制阐释—效果验证—路径提出”的逻辑框架：一是结合我国石化产业自“十三五”以来的“减油增化”战略与沙特阿美“油转化”战略，阐释先进材料助力碳减排达到“十五五”规划目标的主要作用机制；二是通过 8 个覆盖全场景的标杆项目工程实践数据与测算分析，验证技术落地的可行性、经济合理性与环境价值；三是基于工程实践提出可落地的产业协同路径，供行业决策参考。所有数据均来自公开工程报告、权威发布及 NEXCEL 项目评估资料。

白皮书覆盖公共建筑、交通基建、海洋工程、轨道交通、产业转型、城市更新、公共设施、数字基建八大主要应用场景，8 个标杆项目的工程实践与设计验证表明：在已投运项目中，先进复合材料已展现出显著的性能优势与成本效益；基于材料性能参数与 LCA 模型测算，FRP 结构设计寿命可达 50 年以上[12]，在全生命周期成本与碳排放方面较传统方案具备明显优势。

基于相关工程数据，本白皮书形成三点关键行业观察：

一是材料范式正在转变。先进材料正在推动基建工程从“定期更换的消耗品逻辑”转向“长寿命结构件逻辑”，从被动防腐维护转向主动环境免疫，材料属性的升级正在重塑工程建设的底层逻辑。

二是全生命周期成本正在成为决策核心。随着碳市场扩容与碳足迹核算体系完善，传统“低价中标”模式的隐性成本逐步显性化，全生命周期评估（LCA）将成为工程材料选型的主要评价维度。

三是中沙产业合作具备独特价值。“油转化”并非石化企业单方面的转型，而是上游碳氢资源优势与下游基建市场需求的战略对接，中沙合作可打通全产业链，形成可向全球复制的绿色基建方案。

先进材料的规模化应用，既可为当代基础设施带来性能更优的工程方案，也可通过长周期材料固碳与资源循环利用，为未来基础设施体系的绿色低碳转型奠定坚实基础。

本白皮书旨在为行业决策者、工程技术人员与科研机构带来基于真实工程数据的决策参考，推动先进材料技术从示范应用走向规模推广，共同构建绿色、韧性、循环的高质量基础设施生态。

1 [Mateenbar. https://mateenbar.com/en-us/2024/12/11/jizan-flood-mitigation-channel]
2 [Aramco Life. https://www.aramcolife.com/en/publications/the-arabian-sun/articles/2022/week-09-articles/nonmetallics-and-nexcel]

目录

CONTENTS

前言 /02

第一章 战略背景：新材料产业发展的时代机遇 /05

1.1 产业升级：材料创新是高质量发展的关键底座 /06
1.2 双碳约束：基建领域是减排首要战场 /08
1.3 产业趋势："油转化"重构石化产业价值逻辑 /09
1.4 全球合作：中沙战略互补的创新机遇 /10
1.5 政策驱动：从理念倡导到刚性约束 /11
1.6 行业认知误区澄清 /12

第二章 价值重构：先进材料的系统性能优势 /13

2.1 材料转型：碳氢资源的价值升级 /14
2.2 技术破局：FRP 材料的突破性性能优势 /14
2.3 价值重构：从"被动维修"到"主动免疫"的效能升级 /16
2.4 工程建设的三大范式转移 /17

第三章 先进材料产业的五大发展趋势 /18

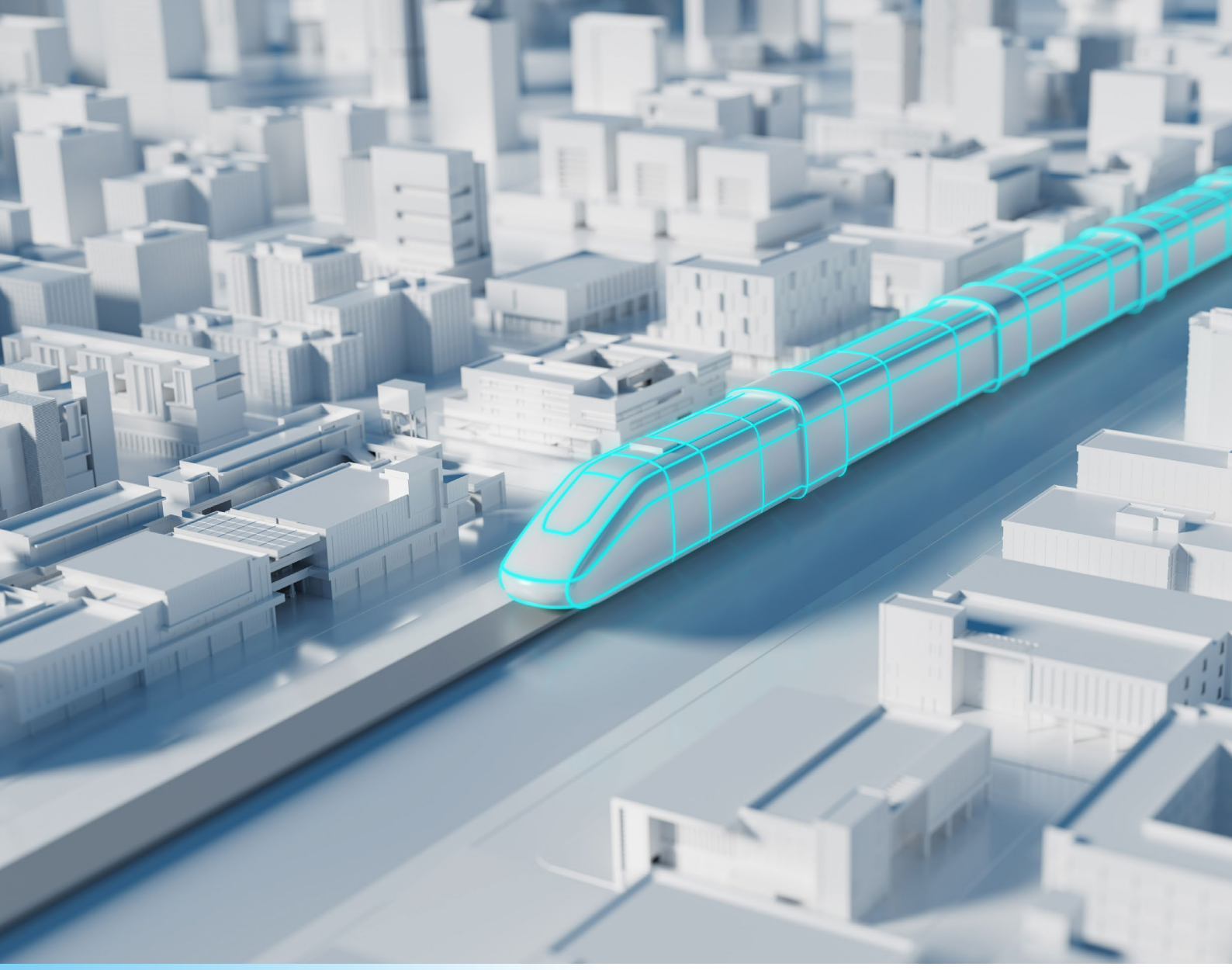
趋势一：AI 与数据驱动重塑材料研发范式 /19
趋势二：碳足迹核算从"可选项"变为"必选项" /20
趋势三：化学回收技术从实验室走向产业化 /21
趋势四：DFMA 一体化设计重塑工程建造模式 /22
趋势五：标准国际化与区域互认加速 /23

第四章 实践验证：八大标杆项目的价值验证 /24

案例一：创新驱动产业转型——上海石化大丝束碳纤维项目 /25
案例二：低碳体育场馆标杆——沙特阿美胡拜尔足球场项目 /26
案例三：固废高值化利用——宿迁再生塑料沥青道路项目 /27
案例四：海工防腐破局——越南丁安港 FRP 筋应用项目 /28
案例五：极致轻量化——轨道交通 FRP 与碳纤维应用 /29
案例六：建筑美学创新——福州万宝商圈 GFRP 自由曲面项目 /30
案例七：循环经济示范——沙特阿美北京东单篮球场改造项目 /31
案例八：非金属材料创新中心 NEXCEL 数字基建支撑——复合材料通信塔项目 /32

第五章 协同共建：打造开放共赢的产业生态 /34

5.1 产业协同的四大重要方向 /35
5.2 分主体行动建议 /35
5.3 发展展望 /36
关于沙特阿美 /37
关于中国建材集团（CNBM） /37
关于 NEXCEL 非金属材料创新中心 /37
关于同济大学土木工程学院 /37



第一章

战略背景：新材料产业发展的时代机遇

产业升级的关键是创新驱动的高质量发展，而材料创新是产业升级的底层支撑。本章从产业升级的内在要求、双碳目标的刚性约束、石化产业转型的供给能力、全球合作的战略机遇、政策体系的制度保障五个维度，系统分析先进石化基材料发展的时代背景与市场空间。

1.1 产业升级：材料创新是高质量发展的关键底座

本白皮书所指“先进石化基材料”，是以石油化工产品为主要原料，通过分子设计、复合改性等先进工艺制备的高性能材料，具备强度高、重量轻、耐腐蚀、寿命长、可设计等优异特性。其核心技术载体包括纤维增强聚合物（FRP）、高性能聚合物、特种功能材料等，广泛应用于建筑基建、能源装备、交通运输、海洋工程等领域。

从概念关系看，“先进石化基材料”是“新材料”产业的重要分支——“新材料”涵盖范围最广，包括金属、无机非金属、石化基等多个品类；“先进材料”强调性能的先进性与工程应用价值；而“先进石化基材料”特指以石化产品为原料、具备先进性能的材料品类，是“油转化”战略的核心产出方向。

中国经济进入新发展阶段，增长重心从“规模扩张”转向“质量提升”。高质量发展和新质生产力上升为国家战略方向，关键是以创新驱动、绿色高效和体系化升级重塑产业竞争力，在“十五五”期间加快形成可持续、可复制的先进产业能力。

在产业升级进程中，材料产业上升为支撑先进制造体系的根本基础。材料不仅是工业生产的基础投入要素，更直接决定了产品性能边界、工艺路径与全生命周期可靠性。从航空航天、汽车制造到建筑基建、能源装备，材料技术的高度决定了产业发展的上限。

进入质量效益提升的新阶段，材料的角色正在转变——从“被动配套”变为“决定上限的关键变量”。高端装备的精度上限，由材料性能决定；基础设施的碳排放下限，由材料碳足迹决定；重大工程的服役寿命，由材料耐久性决定。

终端产品的工艺优化与能效提升，边际收益已持续收窄，材料创新成为全产业链剩余空间最大的突破方向。

新阶段的材料创新具备鲜明的系统化特征：材料选择不再仅影响制造端的工艺流程和能源消耗，更决定了产品在整个服役周期内的耐久性、维护成本，以及报废阶段的回收利用效率。在此背景下，材料创新的内涵也发生了本质变化：不再仅追求更高强度、更轻量化、更耐久等传统性能指标，还需同时满足绿色低碳、全生命周期效率提升、可循环利用的多重要求。

全生命周期评估（LCA）与循环经济模型（CEM），上升为衡量材料方案先进性的主要标准。LCA将评估边界从初始采购成本，扩展至原料获取、生产制造、运输施工、使用维护、报废回收全流程，以综合碳排放和全周期成本为主要评价指标——在此框架下，即便一种材料初始采购价格更低，若需频繁维护、服役寿命短、回收困难，其全生命周期成本和碳排放反而更高，传统建材的“初始成本优势”需重

新审视。CEM 则将材料方案从线性消耗模式转向闭环循环模式：通过化学回收、可回收设计与再利用机制，推动碳原子从“原料—产品—废料”的一次性路径，转向“原料—产品—回收—原料”的循环路径，实现资源价值最大化利用。

在先进石化基材料之外，建筑与基建领域还有多条低碳材料技术路线协同发展。为呈现完整产业图景，本节概述五条主要路线（本白皮书以 FRP、高性能聚合物等石化基材料为重点）：

一是超高性能混凝土（UHPC）：基于最紧密堆积理论设计，抗压强度、断裂韧性与体积稳定性优异，标准养护条件下抗压强度远高于普通 C30-C50 混凝土（30-50MPa）[1]，适用于大跨度桥梁、预制构件与特种工程场景，可显著减小结构截面尺寸、减少材料用量。

二是纤维增强聚合物基复合材料（FRP）：由高性能连续纤维（碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维或玄武岩纤维）作为增强相、热固性 / 热塑性树脂作为基体相复合而成，比强度高、耐腐蚀性好、性能可定制，在结构加固、海工工程、轨道交通车体等领域广泛应用，可显著降低结构自重。

三是新型胶凝材料与低碳混凝土：包括地聚合物、碱激发胶凝材料等，通过大比例使用工业固废替代水泥熟料，可显著降低混凝土生产阶段碳排放；固碳混凝土、固碳胶凝材料等具备碳捕集与矿化固定能力的创新材料，更是从源头实现二氧化碳矿化固定的前沿方向，国内已实现工业化应用。

四是高性能防火隔热材料：耐火极限高、高温下结构稳定性好，可在火灾环境中维持结构完整性、有效阻隔热量传递，如高性能防火石膏板、气凝胶隔热材料、膨胀型防火涂料等，可显著提升建筑整体火灾安全水平，其中气凝胶材料导热系数远低于传统保温材料 [2]。

五是 3D 打印水泥基材料：基于增材制造技术，可实现复杂混凝土构件无模逐层成型，支持个性化结构设计与自由形态建造，施工效率高、模板消耗少、材料浪费低，目前国内已实现 3D 打印建筑的规模化示范应用 [3]。

国内外零能耗建筑与近零碳示范工程已充分验证，新材料的规模化应用可显著降低建筑全生命周期运维成本，有效带动全产业链绿色升级。2024 年全球新材料产业规模约 4.7 万亿美元 [4]，中国新材料行业总产值已达约 8.48 万亿元 [5]，中国已跃升为全球新材料技术创新与规模化应用的重要市场。交通运输部数据显示，“十四五”期间全国交通固定资产投资累计达 18.8 万亿元 [6]，拓展了先进材料应用的广阔市场空间。随着材料技术成熟度提升、规模化应用带来成本下降，先进低碳材料在基建领域的渗透率将进

1 [中建八局新材料官网 . https://tc.cscec.com/ywly/xcl]
2 [气凝胶知识科普（Aerogel Zone）https://aerogelzone.com/zh-CN/blog/aerogel-knowledge/aerogel-101-qa-15-must-know-facts-about-aerogelbeginners-guide-2025]
3 [人民日报海外版报道 . http://paper.people.com.cn/rmrbhwb/html/2019-11/15/content_1956032.htm]
4 [华经产业研究院《2025 年全球及中国新材料行业现状及趋势分析》. https://www.huaon.com/channel/trend/1072473.html]
5 [智研咨询《2025 年中国新材料行业相关政策、发展现状及趋势》. https://www.chyxx.com/industry/1224557.html]
6 [腾讯新闻 . https://view.inews.qq.com/a/20260722A056AG00]

入快速提升通道。

“中国对沙特阿美在亚洲乃至全球的业务增长具有重要战略意义。中沙能源合作正以技术创新和战略互信为支点，在传统能源合作的基础上，持续向多元跨界创新方向探索。”

——沙特阿美技术服务常务副总裁 韦尔·贾法里（Wail A. Al Jaafari）

全球新材料竞争格局正呈现“技术与资源并进”的新态势。一方面，巴斯夫、东丽等跨国企业凭借研发与专利优势，在全球新材料领域保持领先：碳纤维主梁风电叶片较玻璃纤维主梁可实现减重 20%-30%，同时可降低风机整体成本[7]。日本东丽等企业在高端碳纤维领域专利储备丰富，持续引领行业发展。另一方面，沙特阿美作为全球能源转型的领军企业，正通过前瞻性的非金属战略切入市场，依托独有的油转化”成本优势与全产业链整合能力，重塑高分子与复合材料的供应逻辑，发展成为打破现有技术壁垒、推动高性能材料规模化应用的重要力量。

“双碳”约束：基建领域是减排首要战场

中国是全球最大的发展中国家，当前碳排放总量位居全球前列。在持续控制碳排放总量的同时，中国对单位 GDP 能耗、碳排放强度等指标设定了严格的优化目标，展现了符合自身发展阶段的大国担当。

对中国而言，“双碳”目标有双重意义：既是推动高质量发展的内在要求，也是倒逼产业结构优化、技术升级、能效提升的重要牵引。

从全球排放结构看，根据国际能源署（IEA）统计，建筑运营能耗占全球终端能源消耗的 30%[8]，碳排放占全球能源相关排放总量的 26%。IEA 同时指出，随着全球城市化进程持续推进，建筑与基础设施对钢铁、水泥和铝等传统材料的需求将不断增长[9]，进一步加剧碳排放压力。

中国基建领域的减排任务尤为紧迫。根据中国建筑节能协会《中国城乡建设领域碳排放研究报告（2024 年版）》，2022 年中国建筑与建筑业建造碳排放达 51.3 亿吨 CO_2，占全国能源相关碳排放的 48.3%[10]。其中建筑运行碳排放较 2021 年增长 2.7%[11]，主要受城镇化率持续提升与建筑总面积增长影响，表明基建领域是双碳目标落地的重要减排战场。建筑全生命周期涵盖四个主要阶段：建材生产、建筑施工、

7 [Zoltek（东丽旗下碳纤维公司）官网. https://zoltek.com/news-updates/corporate/wind-turbine-blades-carbon-fiber-vs-glass]

8 [IEA Energy Efficiency Policy Toolkit— Buildings. https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-policy-toolkit/buildings]

9 [IEA《Material Efficiency in Clean Energy Transitions》（2019）. https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions]

10 [中国建筑节能协会《中国城乡建设领域碳排放研究报告（2024 年版）》. https://www.cabee.org/site/content/25289.html]

11 [新华网.《2024 中国城乡建设领域碳排放研究报告》. https://app.xinhuanet.com/news/article.html?articleId=22ad53b0a7baa4d165a46f4be78de830]

建筑运维与建筑拆除——从水泥、钢铁等高碳材料的生产运输，到施工现场的能源消耗，再到建筑使用期间的运维，以及最终的拆除与资源回收，建筑与基建行业贡献了中国近一半的能源相关碳排放。

传统建材体系正在形成持续的“碳负债”（即材料全生命周期累积碳排放，包含生产、维护、更换各环节产生的排放）。一方面，传统材料在生产阶段排放强度高；另一方面，服役期内因腐蚀、疲劳导致的频繁维修更换，还会持续产生新的碳排放。这种现象被称为“碳锁定效应”——一旦确定材料方案，未来半个世纪的碳排放轨迹即被基本锁定。

基建项目 50 年以上的设计寿命，决定了这种锁定具备极强的刚性，中期调整空间极为有限。

根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告（AR6），通过推动能效改造、可再生能源应用和热泵技术普及，建筑与基础设施行业具有重要的全球减排潜力。若能有效实施综合政策组合，全球既有和新建建筑有望在 2050 年接近净零温室气体排放[12]，此类减排措施兼具成本效益，也有助于提升建筑能源安全水平。

“总体来看，新型能源体系建设已进入主要阶段，石油石化行业必须主动融入其中，既要保障能源安全，又要引领绿色转型。脱碳进程不可逆转，这是全球共识。”

——中国石油化工集团有限公司原董事长 马永生

为实现建筑行业碳达峰与碳中和目标，需加强建筑产业链各环节协同：在建材生产环节，通过优化生产工艺、推广低碳替代原料、提升能源利用效率等方式削减碳排放；在拆除回收环节，推广新能源拆除设备，加强建筑废弃物分类处理与循环利用；在材料选择环节，优先选用全生命周期碳排放更低的方案，积极推广新型胶凝材料、低碳混凝土及 FRP 等新型建材，从源头减少传统材料用量，降低隐含碳排放。

建材的低碳化，离不开上游石化产业的供给侧结构性改革。

1.3 产业趋势：“油转化”重构石化产业价值逻辑

全球能源转型正在重塑石化产业的价值分配规则。随着新能源汽车普及和终端用能电气化，成品油需求进入长期下降通道，“减油增化”已成为石化行业的普遍共识；而“油转化”—— 将原油从燃料转化为高性能材料 —— 则是这一转型中最具价值增量的技术路径，正从行业共识发展为明确的产业方向，上升为石化企业转型的必由之路。产业政策明确提出严格控制炼油产能总量，引导炼化企业向“材料型工厂”转型，化工新材料自给率持续提升，高端材料自主可控空间广阔。目前全球新材料市场竞争激烈，高端化、低碳化、复合化成为主流发展方向。

12 [IPCC 第六次评估报告（AR6）第三工作组报告 Chapter 9: Buildings. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SOD_Chapter09.pdf]

“油转化”的本质，是重新定义碳的价值。在传统燃料路径下，碳燃烧后转化为 CO_2 排入大气，价值实现周期仅为数月；在材料路径下，碳通过聚合反应转化为高性能聚合物，固定于桥梁、港口、轨道交通等工程结构中，价值实现周期长达 50 年以上。上述转型有望同步应对两大行业痛点：既缓解了石化行业成品油需求达峰后的转型压力，也逐步补齐基建领域低碳材料供给不足的短板。

碳纤维作为先进石化基高端复合材料的关键组成，是支撑新质生产力发展、落实“十五五”规划新材料高端化布局、推动双碳目标落地的主要材料。碳纤维按原料可分为聚丙烯腈（PAN）基、沥青基和粘胶基三类，其中 PAN 基碳纤维因综合性能优异，已是绝对主导品类，2020 年全球产量占比高达 91%[13]。 其产业链以石油提炼的丙烯为原料，经丙烯腈单体制备、聚合、纺丝、氧化碳化等工序，最终形成含碳量超过 90% 的高性能纤维。行业研究显示，随着大丝束化与规模化生产，碳纤维生产成本仍有大幅下降空间。

中国大陆是全球碳纤维的主要需求市场，需求量占比达 55%，2017—2022 年需求量的全球占比从 28% 提升至 55%[14]，2013—2022 年需求量复合年均增长率达 13.4%，2022 年同比增长 19.3%，增速显著高于全球平均水平 [15]，国内产能达 6.34 万吨，占全球总产能 20.76 万吨的 31%，产能利用率从 2015 年的 10.5% 提升至 2020 年的 51.2%[16]，逐步接近国际先进水平。但中国碳纤维市场仍存在较高进口依赖：根据赛奥碳纤维统计，2021 年国内碳纤维需求中仅有 46.9% 由大陆产能满足，超过 50% 仍依赖进口。

面向“十五五”规划，《风能北京宣言 2.0》提出年新增风电装机不低于 120GW，到 2030 年中国风电累计装机容量达到 13 亿千瓦 [17]，而风电叶片正是碳纤维最关键的应用场景之一。碳纤维主梁风电叶片较玻璃纤维主梁可实现减重 20%—30%，同时降低风机整体成本 10% 以上，碳纤维的轻量化、高强度优势，可显著提升风电效率，降低风电产业碳足迹，契合双碳目标与新质生产力“高效、低碳”的核心要求。

“油转化”战略的落地，需要全球资源与中国市场的深度对接。

1.4 全球合作：中沙战略互补的创新机遇

“我们将推动沙特发展战略与中国高质量发展进程实现深度战略协同。”
——沙特阿拉伯能源大臣 阿卜杜勒阿齐兹·本·萨勒曼亲王

沙特 2016 年提出“2030 愿景”，旨在推动经济社会结构转型和科技现代化，计划 2060 年实现碳中

13 [东方财富《2023 年中国碳纤维行业报告》引用赛奥碳纤维数据 . https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202306121590855422_1.pdf]
14 [赛奥碳纤维统计数据，华经产业研究院引用 . https://m.huaon.com/channel/trend/904110.html]
15 [华经产业研究院 . https://m.huaon.com/channel/trend/904110.html]。2021 年中国首次超越美国，跃升为全球最大碳纤维生产国 [搜狐 . https://www.sohu.com/a/773283474_114835]
16 [证券时报引用赛奥碳纤维数据 . https://www.stcn.com/article/detail/772610.html]
17 [新华网 . http://www.news.cn/20251021/b20149986571491fb7cc91e1b5779278/c.html]

和，至 2030 年实现每年减排 2.78 亿吨二氧化碳，50% 的电力需求来自可再生能源；目前正在推进总装机容量 11.4GW 的新能源项目，这些项目是沙特实现 2030 年每年减排 2.78 亿吨二氧化碳目标的重要组成部分[18 19]，加速技术商业化落地。

沙特阿美作为全球最大的综合能源与化工企业之一，已探明石油储量约 2590 亿桶油当量[20]，从石油开采到储运的全流程均采取了高效 CO? 管控措施，是全球碳强度最低的原油之一。2020 年公司完成对沙特基础工业公司（SABIC）多数股权的收购（交易金额 691 亿美元）[21]，构建了从原油到先进材料的全产业链能力，SABIC 为 140 多个国家和地区的客户提供服务，产品涵盖化学品、通用及高性能塑料和农业营养素。

2022 年 12 月，中沙两国政府签署了共建“一带一路”倡议与“2030 愿景”对接实施方案[22]，聚焦基建、产能合作、能源转型等重点领域，为双方在新材料领域的深度合作搭建了制度平台。从产业互补性看，双方合作潜力显著：中国拥有全球最大的新材料市场和工程应用能力，在可再生能源技术与产业应用方面全球领先，风电、光伏装机容量持续位居世界第一；沙特拥有丰富的太阳能和风能资源，具备雄厚的资金实力和上游原料优势，双方在能源资源、产业市场、技术创新与低碳转型上具备高度战略互补性。

以沙特阿美为代表的全球领先石化企业与中国市场深度协同，有望共同打造跨国新材料创新与绿色低碳合作典范，为服务中国新质生产力发展、落实中国“十五五”规划、推动全球双碳目标实现与高质量可持续发展注入长期稳定动力。

1.5 政策驱动：从理念倡导到刚性约束

中国绿色低碳政策体系已完成从理念倡导到刚性约束的演进，为先进材料发展确立了清晰稳定的制度预期：

2005 年：“绿水青山就是金山银山”科学理念提出，确立了绿色发展的价值导向

2012 年：国务院印发《节能减排“十二五”规划》，要求到 2015 年全国万元 GDP 能耗下降到 0.869 吨标准煤，较 2010 年的 1.034 吨下降 16%，较 2005 年的 1.276 吨下降 32%23

18 [KAPSARC. https://apps.kapsarc.org/camp/assets/publications/Saudi Arabia Net Zero GHG Emissions by 2060–Transformation of the Electricity Sector.pdf]。沙特研发创新议程(RDIA)致力于加大研发投入，提升研发对GDP的贡献，吸引全球顶尖科研人才；阿卜杜拉国王科技大学（KAUST）已建立清洁能源研究平台，沙特阿美计划在未来 10 年向 KAUST 投入至多 1 亿美元研发资金

19 [KAUST. https://www.kaust.edu.sa/news/aramco–plans–100–million–funding–for–kaust–to–support–cutting–edge]

20 [财联社引用 Statista 数据 . https://www.cls.cn]

21 [沙特阿美官网 . https://china.aramco.com/zh–cn/news–media/global–news/2020/aramco–completes–its–acquisition–of–a–70–stake–in–sabic–from–the–public–investment–fund]

22 [中国常驻联合国代表团官网 . https://un.china–mission.gov.cn/chn/zgyw/202212/t20221209_10988250.htm]

23 [生态环境部官网 . https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/201605/t20160522_343416.shtml; 建设银行官网 . http://www.ccb.com/Info/50141435]

2020 年：双碳目标正式提出，将碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局

2021 年：《2030 年前碳达峰行动方案》印发，明确推动建材行业碳达峰，加快推广绿色建材

2024 年：党的二十届三中全会通过《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》，明确提出深化生态文明体制改革，完善绿色低碳发展机制

2025 年：《关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见》印发，推动碳市场从电力行业向建材、钢铁等高排放行业扩展，明确到 2027 年全国碳排放权交易市场基本覆盖工业领域主要排放行业，建材等行业正加快纳入碳交易体系 [24]。

政策信号已十分明确：低碳性能正从项目评价的“加分项”转变为市场准入的“门槛项”，全生命周期碳足迹将上升为工程招投标与材料采购的主要评价指标。碳市场扩容意味着传统高碳材料将面临日益增加的碳成本内部化压力，而先进低碳材料将获得市场溢价空间，政策刚性约束正在重塑材料产业的价值分配规则，成为“油转化”战略的制度性驱动力。先进低碳材料的规模化应用，已从行业自主选择转变为政策刚性要求。

1.6 行业认知误区澄清

基于本白皮书收录的工程实践数据，当前行业对先进材料的应用仍存在三个普遍认知误区，直接影响技术推广节奏：

误区一：“低碳材料必然增加建设成本”。该判断仅关注初始采购成本，未覆盖全生命周期成本。本白皮书收录的标杆项目数据显示，先进材料虽初始采购价高于传统材料，但凭借 50 年以上极低维护需求与显著延长的服役寿命，全生命周期成本反而更低，低碳与降本可同步实现。

误区二：“FRP 等先进材料仅适合海工、腐蚀环境等特殊场景”。随着材料成本下降与工程标准完善，FRP 的应用场景正在从特殊环境向主承力结构、普通建筑、市政工程等通用场景拓展。随着工程案例积累，2030 年前后 FRP 在通用基建场景的应用渗透率有望显著提升。

误区三：“双碳是企业的成本负担”。碳约束本质是推动产业升级的市场化机制，碳市场将传统材料的环境外部成本内部化，为先进低碳材料创造公平的市场竞争环境，率先布局低碳材料的企业有望获得长期成本优势与市场先机。

24 [生态环境部官网 . https://www.mee.gov.cn/zcwj/zyygwj/202508/t20250825_1126119.shtm]

第二章

价值重构：先进材料的系统性能优势

本章从价值逻辑、技术性能、全生命周期效益三个层面，系统阐述FRP等先进材料如何深度重构工程建设的价值创造逻辑，实现从“被动防腐维护”到“主动环境免疫”的效能升级。

2.1 材料转型：碳氢资源的价值升级

“NEXCEL 正在开展卓有成效的研究，致力于开发温室气体排放更低的材料，补充传统高排放强度材料的不足，尤其是在建筑与建造领域的应用。”

——沙特阿美总裁兼首席执行官 阿明·纳赛尔（Amin H. Nasser）[1]

沙特阿美系统推进能源转型、材料创新与移动出行三大战略框架，将先进材料作为应对气候挑战的核心技术路径。在高质量发展与新质生产力导向的转型进程中，“油转化”上升为根本支撑。以碳氢化合物为基础的先进材料，通过延长产品生命周期、提升强度重量比、减少材料损耗，可在生产与施工阶段有效降低综合碳排放，更可在服役阶段大幅减少维护需求，实现全生命周期的系统减排。石化产品提供的关键原料，为新一代材料开发奠定了基础，这些材料在风电、光伏、交通运输、储能设备及基建等能源转型主要领域不可或缺。

上述转型的核心是碳氢资源价值的重新发现：碳通过材料化利用，从温室气体排放源转变为支撑现代工业体系的关键资源。通过将碳氢资源转化为高性能聚合物材料，沙特阿美正在重新定义石化产业的价值边界，推动其从燃烧能源向高性能材料的跨越式转变。FRP 复合材料已在航空航天、土木建筑、能源装备等领域实现规模化应用；在轨道交通车体等场景，CFRP 可实现约 35% 的减重效果[2]。

这一转型需要产学研协同推进 —— 同济大学在土木工程与材料科学领域的学术积累，与沙特阿美的化工专长形成互补，共同推动低碳建材的研发与应用。先进材料的价值升级，最终要落到具体的技术性能上。FRP 作为先进石化基材料的核心载体，正是这一价值升级的典型代表。

2.2 技术破局：FRP 材料的突破性性能优势

纤维增强聚合物（FRP）是先进石化基材料的核心技术载体，由高性能连续纤维作为增强相、高分子树脂作为基体相复合而成，与传统金属材料相比，在密度、强度、耐腐蚀、碳足迹和设计寿命等主要指标上具备系统优势，从根本上改变了工程结构的设计逻辑。

1 [沙特阿美官网 . 沙特阿美和中国建筑材料科学研究总院宣布启动非金属材料创新中心（NEXCEL）. https://china.aramco.com/zh-cn/news-media/china-news/2021/aramco-and-china-building-materials-academy-announce-the-launch-of-nexcel]

2 [人民日报海外版 . 2018 年 1 月 8 日 02 版 . 全碳纤维复合材料地铁车体研制成功 . https://paper.people.com.cn/rmrbhwb/html/2018-01/08/content_1828272.htm]

性能指标	结构钢（Q355）	铝合金（6061）	CFRP[3]	GFRP	性能优势
密度（g/cm^3）	7.85[4]	2.7[5]	1.5–1.6[6]	1.8–2.0[7]	FRP密度为钢材1/4至1/5[8]
抗拉强度（MPa）	470–630[9]	205–310[7]	1500–3500[10]	500–1200[9]	CFRP强度为钢材2.4–7.4倍[11]
比强度（$MPa.cm^3/g$）	60–80	76–115	938–2333	250–667	CFRP比强度为钢材12–39倍
弹性模量（GPa）	206[12]	69[12]	120–250[11 8]	35–55	CFRP模量为铝合金1.7–3.6倍
耐腐蚀性能	差（易锈蚀）	中等（需阳极氧化）	优（耐腐蚀性优异）	优（耐腐蚀性优异）	显著降低腐蚀风险与全生命周期维护需求[13]
生产碳足迹（$kgCO_2/kg$）	1.7–2.1[14]	4.5–22[15]	20–30[16]	1.8–3.5[16]	GFRP碳足迹与钢材接近;CFRP生产碳足迹较高，其碳优势体现在使用阶段轻量化效益
设计寿命(年)	50(腐蚀环境下每5–15年需重新涂装,更换周期最短10–20年)[20]	50(中等腐蚀环境下需定期表面处理）	50–100[17]	50–100[18]	FRP全生命周期维护频次显著低于传统金属材料

3 [CP Composites 材料性能数据表 . https://acpcomposites.com/wp-content/uploads/2023/12/Mechanical-Properties-of-Carbon-Fiber-Composite-Materials.pdf; Performance Composites. https://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp]

4 [Engineering ToolBox《Metals and Alloys – Densities》(Steel 7850 kg/m3、Al 2712、6061 为 2720 kg/m3)：https://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html]

5 [MatWeb（ASM Material Data Sheet）. https://asm.matweb.com/search/specificmaterial.asp?bassnum=ma6061t6; Wikipedia 6061 aluminium alloy（T4 ≥ 210、T6 典型 310 MPa）：https://en.wikipedia.org/wiki/6061_aluminium_alloy

6 [Toray TORAYCA 产品页（碳纤维复合材料通行值，页面含全系列技术数据）https://www.toraycma.com/page.php?id=661]

7 [Reinforce Technology（GFRP 1,750–2,100 kg/m3）https://www.reinforcetechnology.com/post/frp-vs-steel-comparison-uk-infrastructure]

8 [Reinforce Technology（GFRP 密度仅为钢材 20–25%、轻 70–80%）https://www.reinforcetechnology.com/post/frp-vs-steel-comparison-uk-infrastructure]

9 [GB/T 1591–2018 原文表格（香港理工大学《高强度钢结构设计与建造指南》收录标准表，Q355 470~630 MPa）https://www.polyu.edu.hk/cnercsteel/-/media/department/cnercsteel/publication/professional-guide/hss-design-and-fabrication-guide-cn.pdf]

10 [Wikipedia CFRP（土木工程用 CFRP 极限抗拉约 3 GPa）+ Toray（纤维级 T300 3530 / T700S 4900 MPa）：https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-fiber_reinforced_polymer?、https://www.toraycma.com/page.php?id=661]

11 [Wikipedia CFRP（土木工程 CFRP 约 3 GPa，超低碳钢 10 倍级）https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon-fiber_reinforced_polymer]

12 [Engineering ToolBox《Young's Modulus》(结构钢 200、Al 69、CFRP 150 GPa)：https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html]

13 [Reinforce Technology（Corrosion Resistance 一节：钢需涂层且涂层需周期性重涂，FRP 本身耐腐蚀）：https://www.reinforcetechnology.com/post/frp-vs-steel-comparison-uk-infrastructure]

14 [PMC 学术论文（Suer et al., 2022）. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9430015]

15 [国际铝业协会（IAI）：2023 年全球平均 14.8 t CO2e/t，典型区间 4.5–22：https://international-aluminium.org/landing/aluminium-carbon-footprint-faqs/]

16 [Maiti et al. (2022) 开放获取综述（玻纤 1.4–2.95、环氧树脂 6.7 kg CO2e/kg）：https://eprints.soton.ac.uk/496158/1/Advanced_Sustainable_Systems_–_2022_–_Maiti_–_Sustainable_Fiber_Reinforced_Composites_A_Review.pdf; 可加挂 Al Omar et al. (2024)（GFRP 筋全生命周期 5.04 vs 钢筋 6.09 kg CO2e/kg）：https://www.mdpi.com/2071-1050/16/10/3899; 阿尔托大学技术文献库（汇总 ACI 440.2R 与 fib Bulletin 14 口径）：土木工程 CFRP 加固的推荐设计寿命 "Often 50–100 years for infrastructure applications"，依据 ACI 440.2R 和国际混凝土联合会 fib Bulletin 14 https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/4332d8c2-abc1-4d9f-a09c-f2facaaab0bd/content ；Degradation Mechanisms and Service Life Estimation of FRP. https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/research/reports/fdot-bdv34-977-05-rpt.pdf]

17 [Mateenbar 官网 . https://mateenbar.com/en-us/2024/12/11/jizan-flood-mitigation-channel; ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922001404]

18 [Ortiz et al. (2023), "FRP-Reinforced/Strengthened Concrete: State-of-the-Art Review on Durability and Mechanical Effects", Materials. ACI 440.11 设计规范中 GFRP 筋的环境折减系数 0.85，" was established assuming a service life of 75–100 years" https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10004140/]

FRP 的核心技术优势体现在四个维度：

一是轻质高强。FRP 密度仅为钢材的 1/4 至 1/5[19]。此特性使 FRP 在减重增效类工程场景中具备不可替代的优势，尤其适用于大跨度结构、桥梁加固与轨道交通车体。

二是耐腐蚀突破。FRP 具备优异耐腐蚀性，可显著降低海洋、高盐雾、化工等极端环境下的腐蚀风险。传统钢结构在腐蚀环境中通常每 5-15 年需重新涂装防护，整体更换周期最短仅 10-20 年[20]，而 FRP 结构设计寿命可达 50 年以上（部分场景可达 100 年）[21]，全生命周期维护成本显著降低。

三是碳足迹优势。GFRP 生产碳足迹与钢材处于相近区间；其全生命周期碳优势主要体现在服役阶段的耐久性免维护与长寿命效益；CFRP 生产阶段碳排放虽高于钢材[22]，但凭借轻量化带来的使用阶段减排，其全生命周期碳排放可显著低于传统金属方案。

四是设计寿命跃迁。FRP 结构设计寿命可达 50 年以上[23]，显著长于传统钢材在腐蚀环境下的维护与更换周期（每 5-15 年重新涂装、最短 10-20 年整体更换）[15]，大幅降低材料更换频次与全生命周期碳排放。此特性赋予 FRP 在基础设施领域显著的长期经济价值与环境价值。

2.3 价值重构：从“被动维修”到“主动免疫”的效能升级

建筑行业长期面临两大挑战——高昂的运维成本与高碳排放相互交织，构成制约行业可持续发展的主要问题。建筑在数十年的服役周期内，运维成本在全生命周期总成本中占比较高，这部分支出主要来自持续的能源消耗与频繁的维修需求，根源在于传统建筑材料在热工性能、耐久性、耐腐蚀与抗老化能力上的天然短板。

传统材料性能不足，在导致建筑能效偏低、能耗居高不下的同时，还易出现老化损伤，业主需持续投入资金进行维修、更换部件，进一步推高全生命周期整体成本。联合国环境规划署（UNEP）与中国

19 [composite-tech.com. https://composite-tech.com/2026/06/12/gfrp-rebar-vs-steel-rebar-numerical-comparison]，CFRP 抗拉强度达钢材的 2.4-7.4 倍，GFRP 抗拉强度可达钢材的 2 倍以上（视纤维类型、含量及工艺路线而定）但重量仅为其 1/4[ACP COMPOSITES. https://acpcomposites.com/wp-content/uploads/2023/12/Mechanical-Properties-of-Carbon-Fiber-Composite-Materials.pdf; ?CJM Steel Group. https://www.cjmsteelgroup.com/q355-steel-equivalent.html]

20 [Reinforce Technology, “FRP / GRP vs Steel: The Complete Comparison for UK Infrastructure Projects”, 2026-03 https://www.reinforcetechnology.com/post/frp-vs-steel-comparison-uk-infrastructure]

21 [Creative Composites Group. https://www.creativecompositesgroup.com/blog/frp-for-corrosion-resistance-and-low-maintenance]

22 [ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479723026816]

23 [Creative Composites Group. https://www.creativecompositesgroup.com/blog/frp-for-corrosion-resistance-and-low-maintenance]

建筑节能协会的数据已表明，建筑与建造行业是全球及中国碳排放的首要来源（详见第一章）。这种“高成本 + 高排放”的双重压力，既增加了行业运营负担，也直接制约双碳目标落地，亟须推动行业从“事后被动维修”的传统模式，转向“全生命周期性能保障”的主动模式。

新型材料凭借优异的耐久性、抗腐蚀性与热工性能，可直接减少建筑全生命周期内的维护频次与能源消耗，同时显著降低隐含碳排放压力。推广应用兼具优异力学性能与低碳属性的高性能绿色建材，已成为破解行业困境的有效路径。以上海建科徐汇科技园建科中心近零碳示范建筑为例，该项目凭借高性能围护结构与高效能系统设计，获得中国绿色建筑三星级、美国 LEED 铂金级、英国 BREEAM 首批近零碳等多项最高等级认证，并达到净零碳建筑认证目标[24]，印证了先进材料与近零碳技术协同的可行性。

基于现有工程数据与 LCA 模型推演，先进复合材料在基建关键场景的规模化应用有望显著降低行业碳排放与全生命周期运维成本。 上述转型不仅将提升中国在全球绿色建筑领域的竞争力，也将为基建高质量发展注入持续动力，推动双碳目标转化为经济社会可持续发展的强大引擎。先进材料的应用，使基础设施从“被动维修”的恶性循环转向“主动免疫”的良性循环——通过材料本身的长寿命、耐腐蚀与低碳属性，从源头减少维护频次与碳排放，实现全生命周期的价值升级。

2.4 工程建设的三大范式转移

基于本白皮书收录的工程实践，先进材料带来的并非简单的“以塑代钢”材料替换，而是工程建设底层逻辑的三大范式转变：

一是材料属性转变：从“定期更换的工程消耗品”转向“长寿命结构构件”。传统钢材及混凝土结构在腐蚀环境下需定期防腐、维修、更换，全生命周期持续产生成本和排放；FRP 等先进材料凭借优异耐腐蚀性，可大幅降低结构维护需求，改变了工程材料的性能预期。

二是决策逻辑转变：从“初始采购成本导向”转向“全生命周期成本效益导向”。传统低价中标模式本质是将建设阶段的成本转移至未来的运维阶段，随着碳市场建设推进，环境外部成本逐步内部化，全生命周期成本效益将上升为材料决策的主要评价维度。

三是产业逻辑转变：从线性开采—生产—废弃的线性模式，转向资源—产品—回收—再生的循环模式。先进材料通过化学回收技术可实现碳的循环利用，从源头减少建筑垃圾与资源消耗，推动工程建设领域循环经济落地。

24 [上海市国资委官网报道 . https://www.gzw.sh.gov.cn/shgzw_zxzx_gqdt/20231009/8e218255aa8d4d76bb99e993af3791c3.html]

第三章

先进材料产业的五大发展趋势

基于全球工程实践与技术演进轨迹，先进石化基材料产业正处于规模化应用的前夜。未来 5—10 年，五大趋势将共同重塑行业格局，推动先进材料从示范应用走向主流市场。

趋势一：AI 与数据驱动重塑材料研发范式

传统材料研发依赖经验试错，一种新材料从实验室发现到产业化应用平均需要 10—20 年，研发成本高、周期长。随着材料基因组工程与人工智能技术的突破，这一范式正在被改写。

美国 2011 年启动的“材料基因组计划”（Materials Genome Initiative, MGI）明确提出目标：将先进材料研发周期缩短一半以上、研发成本降低一半[1]。经过十余年发展，这一目标已在多个领域取得实质性进展。中国材料基因组工程同样将“缩短研发周期、降低研发成本”作为核心目标，提出五年内将先进材料研发周期缩短 60%、性能提升 30%[2]。深圳材料基因组大科学装置的高通量制备系统已实现单次实验产出 300 组样品数据，计算效率提升 200 倍[3]。

AI 的加入进一步加速了这一进程。通过机器学习、分子动力学模拟与高通量实验的结合，材料研发正从“实验试错”转向“数据驱动的逆向设计”—— 只需给定预期性能目标，AI 模型即可直接输出候选配方与工艺参数，大幅减少物理实验次数。

沙特阿美已在 AI 驱动的材料研发领域积极布局。2026 年 5 月，沙特阿美与英矽智能（Insilico Medicine）联合推出“Sanity Pipeline”AI 平台，用于加速金属有机框架（MOFs）等先进纳米材料的发现与优化，覆盖氢能存储、碳捕获、电池技术等清洁能源应用场景[4]。沙特阿美高管在第 19 届中东腐蚀大会上明确表示，AI 正在革命性地改变材料科学与工程，特别是在金属腐蚀防护与创新材料规模化开发方面[5]。

【行业观察】 材料研发正从“经验驱动”向“数据驱动”的第四范式转变。随着 AI 模型成熟度提升与材料数据库的完善，AI 辅助材料设计将成为头部企业的标配能力，新材料研发周期有望显著缩短，率先建立数据驱动研发体系的企业将获得技术代差优势。

1 [美国国家科学院 . NSF Efforts to Achieve the Nation's Vision for the Materials Genome Initiative. https://www.nationalacademies.org/read/26723/chapter/3]
2 [中国材料基因组计划行业研究报告 . https://www.docin.com/touch_new/preview_new.do?id=4925483155]
3 [深圳新闻网 . 深圳材料基因组大科学装置试运行一年多 . https://www.sznews.com/news/content/2026-04/20/content_32021375.htm]
4 [Insilico Medicine. Insilico Medicine and Saudi Aramco Introduce the “Sanity Pipeline” . https://insilico.com/news/f8il5i2j91-insilico-medicine-and-saudi-aramco-intro]
5 [Ajel News. Saudi Aramco Executives Underscore AI's Role in Advancing Materials Science. https://english.ajel.sa/business/saudi-aramco-executives-underscore-artificial-intelligences-role-in-advancing-materials-science-and-combating-corrosion]

趋势二：碳足迹核算从“可选项”变为“必选项”

当前，建材产品的碳足迹核算主要是企业自愿行为，标准不统一、数据质量参差不齐。但随着全球碳定价机制的快速推进，这一局面正在发生根本性改变。

从国际看，欧盟碳边境调节机制（CBAM）已于 2026 年 1 月 1 日正式进入实施阶段，首批覆盖钢铁、水泥、铝、化肥、电力、氢气六大高碳行业[6]。进口商须购买与产品隐含碳排放对应的 CBAM 证书，首次清缴定于 2027 年进行（覆盖 2026 年 1 月起的进口）[7]。更值得关注的是，欧盟委员会已于 2025 年 12 月提议，2028 年将 CBAM 覆盖范围扩围至钢铝密集型下游产品（如机械、汽车零部件等）[8]，碳定价的边界正在从原材料向制成品延伸。

从国内看，中国碳足迹管理体系建设正在加速。2024 年 5 月，生态环境部等 15 部门联合印发《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》，明确到 2027 年制定出台 100 个左右重点产品碳足迹核算规则标准、初步建立碳足迹管理体系，到 2030 年体系更加完善；此后重点产品核算规则加速落地，碳足迹正式进入“强制核算、统一标识、全面应用”的实施阶段[9]。截至 2025 年底，中国已发布电解铝、化学纤维、电子电器等 15 项产品碳足迹核算国家标准，以及钢铁、化工等细分领域超过 200 项团体标准[10]。建材领域，《温室气体产品碳足迹量化方法与要求 水泥》（GB/T 47635—2026）已正式发布，标志着建材行业标杆评价从“单一能效”向“能效 + 碳效”双维度扩展[11]。

对于先进材料企业而言，这既是挑战也是机遇。FRP 等低碳材料的全生命周期碳减排优势，需要通过标准化的碳足迹核算才能被市场量化认可，进而转化为真实的市场溢价。随着碳市场向建材行业扩容，传统高碳材料的环境外部成本将持续内部化，先进低碳材料的成本竞争力将进一步凸显。

【行业观察】 碳足迹正在从“加分项”变为“准入项”。未来 3—5 年，主要基建材料将逐步实现全链条碳足迹可追溯，碳标签有望成为政府投资项目招投标的重要评价指标，率先建立完整碳足迹核算体系的材料企业将获得市场先发优势。

6 [EPD Portal. CBAM and Building Materials. https://epdportal.org/cbam-building-materials/]
7 [欧盟官方：https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en]
8 [新浪财经 . CBAM 深度解析：高排放行业的加速转型契机 . https://finance.sina.com.cn/wm/2026-03-05/doc-inhpxfxr9886210.shtml]
9 [生态环境部《产品碳足迹管理体系建设进展报告（2025）》（2025-06-25）：https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202506/t20250625_1121882.shtml; https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6956112.htm]
10 [瑞欧科技 . 中国产品碳足迹管理体系建设进展报告 (2026) 发布 . https://www.reach24h.com/carbon-neutrality/industry-news/footprint-progress-report]
11 [工信部 . 专家解读之三：树立能效碳效标杆 纵深推动建材行业节能降碳绿色转型 . https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2026/art_b571b58f36f145f3813ce9b9dfb71610.html]

趋势三：化学回收技术从实验室走向产业化

复合材料回收是制约行业规模化发展的关键瓶颈。当前 FRP 等热固性复合材料的回收以物理粉碎为主——回收后作为填料再利用，性能下降明显，难以实现高值化利用。化学回收（热解、解聚、溶剂法等）虽可回收高价值纤维和树脂单体，但技术复杂度高、成本居高不下，长期停留在实验室阶段。

这一局面正在快速改变。近年来，全球多条技术路线持续取得突破：

催化溶剂分解法：在温和反应条件下实现环氧树脂选择性降解，回收碳纤维可保持超过 95% 的原始力学性能，催化剂本身可通过沉淀分离方式回收复用，进一步降低回收过程的化学成本与环境负担 [12]。

溶剂法 / 超临界流体法：通过选择性断裂树脂—纤维界面的化学键实现高效纤维回收，纤维性能保留率可达 90% 以上 [13]。

传统高温热解法：技术最成熟、产业化程度最高，但高温会造成纤维脆化，强度保留率通常不足 80%，且存在二次污染风险 [14]。

产业化进程也在加速。2026 年 7 月，宁夏万吨级退役风电叶片资源化回收项目完成全流程设备联调并投产，产线采用干法热解 + 静电分选工艺，纤维综合回收率达 95%，再生纤维可回用于风电、光伏制造 [15]。

NEXCEL 已将循环经济作为重点研发方向，其资助的宿迁再生塑料沥青道路项目，实现了废塑料从“低值处置”到“高性能应用”的转变，累计消纳废塑料 33.4 吨 [16]。NEXCEL 创新基金已累计资助 53 个项目，其中多个项目涉及废弃物资源化利用 [17]。

【行业观察】 化学回收技术正从实验室走向中试和产业化。随着技术路线成熟与规模效应显现，未来 3–5 年复合材料回收成本有望显著下降，“设计—使用—回收—再生”的闭环材料体系将从概念走向现实，为先进材料的规模化应用解除后顾之忧。

---

12 [ACS Sustainable Chemistry & Engineering. Making Carbon–Fiber Reinforced Epoxy–Amine Thermoset Composites More Circular through Chemical Recycling by Catalyzed Solvolysis. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.5c11689]

13 [Pi?ero–Hernanz et al. (2008). Chemical recycling of carbon fibre reinforced composites in supercritical fluids– Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X08000031]

14 [中国化工信息周刊 .《新能源退役潮来袭，化学溶解法解锁负碳循环新路径》. https://www.chemnews.com.cn/c/2026–08–04/779982.shtml]

15 [复材网（2026–07–04）：https://www.cnfrp.com/news/show–83077.html]。中国 FRP 回收市场中，热解法企业数量已占 27.6%，单厂年处理能力平均达 1.8 万吨 [豆丁网 .《2025 年中国纤维增强塑料 (FRP) 回收市场占有率及行业竞争格局分析报告》. https://www.docin.com/touch_new/preview_new.do?id=5019239909]

16 [新华网 .《废塑料变身基建材料！中沙企业合作绿色环保项目在江苏落地》. https://app.xinhuanet.com/news/article.html?articleId=efc01dd4b4b5f29b1975a75632f0b87f]

17 [中国一带一路网 .《废塑料变身基建材料！中沙企业合作绿色环保项目在江苏落地》. https://www.yidaiyilu.gov.cn/p/08INDMDM.html]

趋势四：DFMA 一体化设计重塑工程建造模式

传统工程建设中，材料选型、结构设计与施工工艺是三个相对独立的环节——设计师按规范选材料，施工方按图纸施工，各环节各自优化但整体未必最优。随着 BIM 技术普及与新材料性能边界拓展，这种割裂的设计模式正在被面向制造与装配的设计（Design for Manufacture and Assembly，DFMA）所取代。

DFMA 将材料性能、结构形式与施工工艺作为一个系统同步优化，从“先定结构再选材料”转向“材料与结构协同设计”。FRP 等先进材料的可设计性——纤维方向、树脂配方、截面形式均可定制——为一体化设计提供了技术基础。

多项研究和工程实践验证了 DFMA 模式的价值：

学术研究表明，引入 DFMA 原则可使设计阶段周期缩短 40%、生产错误减少 48[18]%。

Bryden Wood（2024）的项目数据显示，DFMA 模式可实现资本支出降低约 9.5%、项目工期缩短约 13%[19]。

行业实践中，深度应用 BIM 的模块化项目设计错漏碰缺率可降低 90%，显著减少施工阶段的返工浪费[20]。

加拿大英属哥伦比亚大学 Tallwood House 项目采用 DFMA 方法，建设速度比传统混凝土建筑快约 70%，同时成本更低[21]。

福州万宝商圈 GFRP 自由曲面项目，正是材料性能与建筑美学协同设计的典型案例——同济大学团队通过 BIM 全流程数字化管控，完成了 1,676 块形状完全不同的 GFRP 空间曲面板的精准加工与安装，从方案设计到竣工仅用时 5 个月 115。

【行业观察】 DFMA 一体化设计正从制造业向建筑与基建领域渗透。未来大型基建项目将普遍采用“材料－结构－施工”协同设计方法，通过系统优化实现全生命周期成本的显著降低与施工效率的大幅提升，这也对材料企业的技术服务能力提出了更高要求。

18 [ResearchGate. Design for manufacture and assembly in construction: a review. https://www.researchgate.net/publication/335635445_Design_for_manufacture_and_assembly_in_construction_a_review]
19 [Global Academic Star. Assessment of the Importance of DFMA Processes for Sustainable Construction. https://www.globalacademicstar.com/download/article/assessment-of-the-importance-of-design-for-manufacture-and-assembly-dfma-processes-for-sustainable-construction.pdf]
20 [豆丁网 . 2026 中国 EPC 模式下的模块化项目投资回报分析报告 . https://www.docin.com/p-4934359199.html]
21 [达索系统 . THE DESIGN AND CONSTRUCTION REVOLUTION WITH DFMA ON THE CLOUD. https://www.3ds.com/sites/default/files/2021-05/dfma-cloud-connect-design-fabrication.pdf]

趋势五：标准国际化与区域互认加速

标准是新材料规模化应用的基础设施。当前，各国 FRP 等先进建材标准体系相对独立，技术参数、测试方法、验收规范差异较大，形成了无形的市场壁垒，制约了技术的全球推广。

这一格局正在改变。国际标准化组织（ISO）持续完善 FRP 相关标准体系：ISO 10406-1:2025《混凝土用纤维增强聚合物（FRP）筋——试验方法第 1 部分：FRP 筋》于 2025 年 9 月发布第三版[22]；ISO 18319-1:2026《混凝土结构用纤维增强聚合物（FRP）—— 第 1 部分：FRP 片材规范》于 2026 年 1 月发布第二版[23]，为全球 FRP 应用提供了统一的技术语言。

中国标准的国际影响力也在快速提升。2025 年，中国在低碳能源、生物技术、人工智能等领域向 ISO、IEC 提出国际标准提案 505 项[24]；全年牵头制定并发布 ISO、IEC 国际标准达 285 项，“十四五”期间累计达 1079 项[25]。在复合材料领域，中国正推动海洋设施保护用复合材料等标准“走出去”，服务“一带一路”基础设施建设，进一步扩大提高中国标准的国际影响力[26]。

NEXCEL 在标准制定方面也发挥了积极作用，成立以来已制定行业及团体标准 9 项 68，为先进材料的工程应用提供了规范依据。越南丁安港、埃及通信塔等海外项目的工程实践，正在为国际标准制定提供来自中国和中东地区的实测数据。

【行业观察】 标准互认是先进材料“走出去”的前提。随着“一带一路”建设深入推进与中国标准国际化加速，亚太地区有望形成更趋统一的先进建材标准体系，具备标准制定能力与国际互认经验的企业，将在全球市场竞争中占据有利位置。

22 [ISO 官网 . ISO 10406−1:2025. https://www.iso.org/standard/84321.html]
23 [ISO 官网 . ISO 18319−1:2026. https://www.iso.org/standard/84322.html]
24 [国家标准化管理委员会 .《2025 年我国标准国际化工作取得积极进展》. https://www.sac.gov.cn/xw/bzhdt/art/2026/art_811a9e2829dc41339ae5f4c368347ee7.html]
25 [新浪财经 .《从被动遵循到主动引领 中国标准如何打通 " 一带一路 " 软联通？》. https://cj.sina.cn/article/norm_detail?froms=ttmp&url=https%3A%2F%2Ffinance.sina.com.cn%2Fjjxw%2F2026−07−04%2Fdoc−inifskft2439301.shtml%3Ffinpagefr%3Dttzz]
26 [全国标准信息公共服务平台 . https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=F29438B4F2264F9CE05397BE0A0AE5A1]

第四章

实践验证：八大标杆项目的价值验证

理论的价值需经工程实践检验。本章选取 8 个覆盖不同场景、不同地区、不同材料体系的标杆项目（以已投运项目为主，含在建及示范验证项目），通过“项目背景—行业痛点—技术方案—量化效益—示范意义—行业启示”的标准框架，以工程实践数据与测算分析验证先进材料的系统价值。

案例一：
创新驱动产业转型——上海石化大丝束碳纤维项目

项目背景：上海石化碳纤维项目是国家级战略项目，总投资约 35 亿元[1]，目标是突破高端碳纤维国外技术壁垒，是传统石化企业“油转化”转型的标杆实践。项目确立了“炼油向化工转、化工向材料转、材料向高端转、园区向生态转”的转型路径，2024 年公司 CO_2 排放总量 807.59 万吨[2]，同比下降 10.31%；排放强度 1.36 吨 / 万元，同比下降 7.48%[3]。

行业痛点：长期以来高端碳纤维技术集中在日本东丽、美国赫氏等少数企业手中，进口产品价格高昂，严重制约风电、轨道交通等高端产业发展，构成产业链主要堵点。如前文所述，国内碳纤维需求超过 50% 仍依赖进口，高端产品自主供给能力亟待提升。

技术方案：项目突破 48K 大丝束碳纤维聚合、纺丝及氧化碳化全流程工艺技术，自主研发的 60K 大丝束碳纤维为国内首创[4]，强度与抗变形能力较 48K 产品显著提升，性能达到国际先进水平。

量化效益：项目成果已在多领域规模化应用：CFRP 连续抽油杆已在国内多个油田实现规模化应用[5]，抽油效率与节电效果显著，形成可观直接经济效益；国产碳纤维首次应用于广州地铁 18 号线“湾区蓝”列车车头罩，实现轻量化应用；南京机场改扩建项目使用碳纤维编织布超 1 万平方米，对航站楼结构进行加固，提升了结构承载力[6]；2025 年与中车签订 48K 大丝束碳纤维供应合同[7]，用于大型风电叶片制造，支撑风电装备大型化发展。

项目实现了高端碳纤维国产化，大丝束碳纤维价格较早期进口产品显著下降。目前中国碳纤维运行产能占全球的比重持续提升，从根本上保障了产业链供应链安全。

示范意义：该项目印证了战略性投入与创新可打破技术壁垒，实现主要材料自主可控。传统石化企业通过“油转化”完全可在新材料领域形成全球竞争力，作为全球能源企业转型的可借鉴样本。从长期产业价值看，上海石化将持续聚焦下一代超高性能纤维、低成本制造工艺、智能复合材料的前沿探索，推动碳纤维与氢能、风电、高端制造等战略性新兴产业深度融合。本白皮书判断，沙特阿美可借鉴这一路径，发挥能源成本优势，在满足本土需求的基础上，逐步发展为区域碳纤维供应中心，在全球材料格局中占据有利位置，共同构建开放协同的产业生态，契合“十五五” 产业链协同与高质量发展的方向。

【行业启示】 *石化企业向材料转型是未来重要的产业发展方向，高端材料国产化的关键是通过规模化生产降低成本，只有材料成本降至下游应用可承受范围，才能真正实现大规模推广，带动整个产业升级。*

1 [证券时报 . https://www.stcn.com/article/detail/298947.html]
2 [POP 财经（2025 年 4 月）. https://www.popcj.com/depth/6813092504328152]
3 [上海石化 2024 年 ESG 报告（港交所披露）. https://www.hkexnews.hk/listedco/listconews/sehk/20250319/2025031901315_c.pdf]
4 [科技日报 . 2025 年 9 月 . https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-09/18/content_403030.html]
5 [chinacompositesexpo.com. https://www.chinacompositesexpo.com/m_cn/news.php?show=news_detail&news_id=4908]
6 [新闻晨报 – 周到 . https://static.zhoudaosh.com/files/cnews/2021/20210104/6136ADC0CA4B357C2EB208FEC74A57B05241368F897CE26775DA839D748FABFF/5.html]
7 [中新网 . https://www.sh.chinanews.com.cn/chanjing/2025-09-24/140378.shtml]

案例二：
低碳体育场馆标杆——沙特阿美胡拜尔足球场项目

项目背景：沙特阿美胡拜尔足球场位于沙特胡拜尔，设计容量 47,000 人[8]，严格按照 FIFA 标准建设，2026 年竣工后将作为阿尔 - 卡迪西亚足球俱乐部主场、2027 年亚洲杯核心场馆[9]，未来也有望成为 2034 年世界杯标志性赛场。场馆设计灵感源自胡拜尔海岸线的漩涡形态，是沙特“2030 愿景”的标志性项目，由沙特阿美与 ROSHN 集团联合开发[10]。体育场及周边总体规划占地面积约 80 万平方米[11]，涵盖训练场、停车场、运动跑道、公园、球迷区及零售商业等配套设施。

行业痛点：中东沿海高盐、高温、强紫外线环境下，传统钢筋混凝土结构腐蚀严重，场馆全生命周期维护成本高企；项目需在满足 FIFA 标准的同时，大幅降低全生命周期碳排放与维护成本。

技术方案：项目设计方案系统采用新型非金属材料——以火山灰质材料部分替代水泥，提高绿色混凝土使用比例；引入非金属聚合物模块化雨水调蓄池替代传统钢筋混凝土水池，具备长寿命、高承载与高储水孔隙率特性，上方土地可用于停车场、公园等公共设施；地面板设计采用 GFRP 筋替代传统钢筋，显著降低氯离子腐蚀风险；屋面系统最终选定铝制直立锁边金属屋面，配合多层保温构造限制热量传递、降低太阳辐射得热[12]；场馆配备集成冷却系统[13]，草坪采用 SIS Air 真空通风系统[14]，并利用自然采光设计降低照明能耗。项目由全球体育建筑设计领军企业 Populous 主持设计，国际工程咨询公司 Dar 负责详细设计与可持续策略，目标获得 LEED 和 Mostadam 绿色建筑认证，同时注重培育本土供应链，将国际先进技术与“沙特制造”战略深度结合[15]。

量化效益：模块化调蓄池在安装效率与综合成本上较传统混凝土水池具备明显优势；通过绿色混凝土、GFRP 筋等先进材料的组合应用，配合被动式节能设计（如自然遮阳、强化隔热）、主动式能效系统（如集成冷却系统）及需求响应管理，项目全生命周期碳排放、建设成本与维护成本较传统方案均有望显著降低，结构耐久性大幅增强。

8 [Aramco Stadium 官网 . https://www.aramcostadium.com]
9 [Coliseum-online 报道 . https://www.coliseum-online.com/aramco-global-supporter-of-saudi-arabia-afc-asian-cup-2027]
10 [ROSHN 官网新闻稿 . https://roshn.sa/news-and-events/press-releases/article-115]
11 [Populous 官网 . https://populous.com/showcases/aramco-stadium]
12 [Structure Magazine. https://www.structuremag.org/article/roof-system-selection-for-aramco-stadium]
13 [Saudi Gazette《Aramco breaks ground on 47,000-seat stadium in Al Khobar》(2024-07-31)，沙特阿美官方信息：场馆将配备集成冷却系统（integrated cooling systems）. https://saudigazette.com.sa/article/644584https://tc.cscec.com/ywly/xcl]
14 [SIS Pitches 官网新闻稿（2025 年）.SIS Air classic vacuum and ventilation system. https://www.sispitches.com/news/global-sports-pitches-leader-announces-major-project-in-saudi-arabia/https://tc.cscec.com/ywly/xcl]
15 [Pultron Composites《The Kingdom's First GFRP Rebar Facility》（2021 年 9 月）：“Saudi Aramco recently mandated the use of GFRP rebar in its engineering standards for reinforced concrete structures in highly corrosive environments”. https://pultron.com/insights/pultron-composite-news/mateenbar-in-saudi-2/https://tc.cscec.com/ywly/xcl]

示范意义：项目通过构建全球技术联盟，将国际先进技术与本土产业培育相结合，有望为高温气候地区可持续体育场建设树立新标准，为中东地区新材料应用标准制定提供工程依据，推动区域市场从技术使用者向规则制定者转变；建成后将成为全球绿色建造的实体标杆，构建从微观材料创新到宏观基建绿色转型的完整路径。

【行业启示】大型标志性项目是新技术推广的主要载体，通过高标准标杆项目验证技术、建立标准、培育本土供应链，可有效带动区域新材料应用，极端环境下的工程实践也是材料性能验证的真实场景。

案例三：
固废高值化利用——宿迁再生塑料沥青道路项目

项目背景：NEXCEL 在江苏宿迁落地的再生塑料沥青道路项目，位于宿迁市高雄路，总长 2 公里、路宽 6.4 米[16]，2024 年建成通车，是全球首条“再生塑料双掺沥青路面”示范道路，作为废塑料高值化利用的工程范本[17]。

行业痛点：中国年产生废塑料超过 6000 万吨，其中约 70% 采用填埋或焚烧处理[18]，环境压力较大；传统沥青路面高温稳定性不足，服役期内需定期大修维护，产生大量废旧沥青。废塑料回收长期面临技术瓶颈：物理回收易导致性能下降，化学回收成本较高，焚烧易产生有毒气体，难以实现循环利用。

技术方案：项目采用“双掺”技术配比——再生热塑性塑料替代 20% 沥青，再生热固性塑料替代 50% 填料，累计消纳废塑料 33.4 吨 52（其中再生热塑性塑料 9.8 吨、再生热固性塑料填料 23.6 吨[19]），开发了完整的现场拌合、摊铺、碾压施工工法与质量控制标准。再生塑料掺量大比例高于行业常规水平，实现了技术突破。

量化效益：通车以来的跟踪监测显示，道路高温稳定性、低温抗裂性与水稳定性较传统 SBS 改性沥青路面均有提升；沥青与填料成本分别降低 14.5% 和 41.4%52，沥青混合料综合成本降低 18.6%，碳排放减少 36%[20]。若在全国沥青路面铺设与公路维养中规模化推广，该技术可形成千万吨级的废塑料消纳能力，环境效益显著。

示范意义：该项目实现了废塑料从“低值处置”到“高性能应用”的转变，实现了“塑料循环 + 公路降碳”

16 [人民日报海外版 . https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202504/28/content_30071510.html]
17 [一带一路网 . https://www.yidaiyilu.gov.cn/p/08INDMDM.html]
18 [中国能源报 . 2023 年 3 月 . http://paper.people.com.cn/zgnybwap/html/2023-03/20/content_25972407.htm]
19 [NEXCEL 官网 . 2024 年 11 月 29 日 . http://www.non-metallic.net/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=321&id=293][NEXCEL 官网 . 2024 年 11 月 29 日 . http://www.non-metallic.net/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=321&id=293]
20 [人民日报 . https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202504/28/content_30071510.html]

双重效益，为全球塑料污染治理与交通基建绿色升级贡献了可推广的中国方案。在后续应用推广进程中，随着碳市场将建材纳入交易范围，再生塑料沥青的碳减排效益将转化为可量化的经济价值，进一步提升市场竞争力。

【行业启示】固废高值化利用的关键是实现环境效益与经济效益的统一，只有再生材料性能达到或超过原生材料、成本具备竞争力，循环经济技术才能从示范项目走向规模化应用。

案例四：海工防腐破局——越南丁安港 FRP 筋应用项目

项目背景：越南丁安港位于湄公河三角洲茶荣省[21]，是湄公河三角洲重要的港口设施。其码头工程采用 FRP 筋混凝土结构，由 NEXCEL 联合中国建筑材料科学研究总院研发实施。NEXCEL 是沙特阿美与中国建材集团以及中国建筑材料科学研究总院携手在亚洲设立的首个非金属材料创新中心，该港口项目是“一带一路”海工结构耐久性提升的示范实践。该技术成果在江苏灌西段海堤修复工程完成示范验证后，已应用于越南丁安港码头、阿曼巴尔卡州挡土墙等项目[22]，实现了从国内验证到海外推广的技术输出路径。

行业痛点：高氯离子海洋环境下，传统钢筋混凝土结构在服役期内极易因钢筋锈蚀出现顺筋开裂与保护层剥落，承载力逐步下降，全生命周期维护成本高昂，是海工结构的世界性难题。传统钢结构在海洋腐蚀环境中每 5—15 年即需重新涂装，15—20 年即可能面临大规模维修或更换 42[23]，形成“建设—腐蚀—修复”的恶性循环，造成社会资源的巨大浪费。海工领域的材料替代需求尤为迫切。

技术方案：NEXCEL 开发高性能 FRP 筋材，通过拉挤工艺与高强玻璃纤维复合制成，采用高分子物理改性及界面优化技术解决了 FRP 筋力学性能离散性问题，筋材抗拉强度达 800MPa 级[24]，达到 GFRP 筋行业通用高强规格水平。采用“以材防腐”技术路线，利用 FRP 耐腐蚀特性有效抑制氯离子侵蚀，显著降低电化学腐蚀风险，将海工结构耐久性从“被动涂层防护”提升至“主动长效防腐”阶段。项目团队将 FRP 筋重点部署于码头面层铺装与引桥结构等腐蚀风险高、维护难度大的关键部位，专门设计了 FRP 纵筋与箍筋配筋方案。沙特阿美已在企业工程标准中将 GFRP 筋纳入高腐蚀环境钢筋混凝土结构的应用规范。

沙特阿美吉赞防洪渠道项目亦规模化采用 GFRP 筋（IKK Mateenbar 商用 GFRP 配筋体系），属沙特阿美供应链体系内的独立工程实践[25]。

21 [theinvestor.vn. https://theinvestor.vn/high-expectations-for-seaport-development-in-mekong-delta-d7947.html]
22 [NEXCEL 官网 . http://www.non-metallic.net/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=327&id=315]
23 [Younis, A., Ebead, U. and Judd, S. (2018), “Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement”, Construction and Building Materials, 175: 135 - 144. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.183]
24 [Composite-tech.com. https://composite-tech.com/2026/06/12/gfrp-rebar-vs-steel-rebar-numerical-comparison; Vegnar GFRP. https://vegnargfrp.com/technical-specification]
25 [Mateenbar 官网（Jizan 项目）. https://mateenbar.com/en-us/2024/12/11/jizan-flood-mitigation-channel]

量化效益：FRP 筋密度仅为钢筋的 1/4[26]，运输与安装便捷，可缩短工期，降低运输与施工阶段的能耗与碳排放；结构设计使用年限不低于 50 年[27][28]，全生命周期内几乎无需大规模维修[29]，全生命周期成本与碳排放均可显著降低。该技术已在越南丁安港、越南拉赫港[30]、阿曼巴尔卡州等多个国家的海工项目中推广应用。

示范意义：该技术为“一带一路”海工项目提供了可复制的绿色解决方案，实现了工程韧性与低碳循环的协同优化，验证了“非金属配筋体系”[31]在提升海工结构耐久性方面的科学性与可行性。随着标准体系逐步完善，GFRP 筋技术将从海工场景向桥梁、道路等通用基建场景拓展。

【行业启示】海工等极端服役环境是先进材料的重要切入点，这类场景传统材料痛点突出、全生命周期成本账清晰，从极端场景切入建立工程信任，再逐步向通用场景拓展，是先进材料推广的有效路径。

案例五：极致轻量化——轨道交通 FRP 与碳纤维应用

项目背景：轨道交通是对减重与材料性能要求最为极致的应用场景之一。上海浦东高速磁浮示范线全长 30 公里，2002 年 12 月试运行[32]，2006 年正式投运，最高试验速度达 501km/h[33]，初期运营速度 430km/h[34]，已安全运营二十余年，是全球高速磁浮技术工程化应用的重要典范。中国时速 600 公里高速常导磁浮系统试验样车于 2020 年 6 月 21 日在同济大学嘉定校区 1.5 公里试验线成功试跑（低速动态验证），实现技术并跑[35]。本案例以上海磁浮所代表的极致轻量化需求为切入点，综合呈现 FRP 与碳纤维在全球轨道交通领域的代表性技术演进。

行业痛点：高速轨道交通对减重要求极高，列车减重可显著降低单位能耗，同时可减少轨道梁荷载、降低线路投资；传统铝合金车体进一步减重空间有限，焊接疲劳与全生命周期回收存在瓶颈，难以满足 600km/h 速度等级对极致轻量化的要求。

26 [Composite-tech.com（GFRP vs Steel Rebar Numerical Comparison）. https://composite-tech.com/2026/06/12/gfrp-rebar-vs-steel-rebar-numerical-comparison]
27 [Mateenbar 官网（Jizan 项目）. https://mateenbar.com/en-us/2024/12/11/jizan-flood-mitigation-channel]
28 [TetsRebarX（GFRP vs Steel Rebar Life-Cycle Analysis）. https://tetsrebarx.com/gfrp-vs-steel-rebar-cost-comparison-3]
29 [KK Mateenbar 官网 . https://ikkmateenbar.com/projects/jizan-channe l]
30 [NEXCEL 官网（走进非金属材料创新中心）. http://www.non-metallic.net/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=235&id=358]
31 [沙特阿美官网 . https://www.aramco.com/en/what-we-do/energy-innovation/nonmetallic-solutions]
32 [国资委官网 . http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n10248920/c13255636/content.html]
33 [广州市科技局 . http://kjj.gz.gov.cn/xydt/content/post_9730105.html]
34 [上海磁浮官网 . http://www.smtdc.com/cn/jszl3_1.html]
35 [中国中车官网（2020-06-24）：https://www.crrcgc.cc/sfgf/2020-06/24/article_764735F2405A449696BD6BC23E4FB98B.html; 同济大学新闻网（2021-07-23）：https://news.tongji.edu.cn/info/1003/78347.htm]

技术方案：FRP 是轨道交通轻量化的关键材料，近年来全球多个代表性项目持续推进其工程化应用。韩国铁路研究院（KRRI）开发了 GFRP 复合转向架[36]；英国 ELG Carbon Fibre 与哈德斯菲尔德大学铁道研究所联合开发的 CAFIBO 为全球首个碳纤维轨道车辆转向架，采用回收及富余碳纤维制造，于 2019 年 12 月发布并入台架试验阶段[37]；中国青岛 CETROVO 1.0 碳纤维地铁列车（“碳星快轨”）主要承重结构全面采用 CFRP，车体减重 25%、转向架构架减重 50%[38]。CFRP 的应用在减轻车体重量的同时提升了结构抗疲劳性能，延长了服役寿命。

量化效益：以 CETROVO“碳星快轨”为例（以下数据均对应该车型）——列车整车减重约 11% 81，运行能耗降低 7%，每列车每年可减少二氧化碳排放约 130 吨；更轻的车身使轮轨力降低 15% 以上，全寿命周期检修成本降低 22%，车辆减振降噪性能提升，乘坐更舒适[39]。

示范意义：：FRP 轻量化技术在实现列车节能的同时带来城市综合效益：更纤细的轨道梁减少城市空间占用，以优异的耐腐蚀性降低全周期维护成本，为高速轨道交通进一步轻量化提供了材料参照与工程验证，助力打造低噪声、高品质的绿色交通系统。从产业发展维度看，随着碳纤维国产化率提升、成本下降，CFRP 在轨道交通领域的应用将从示范走向规模化，中国中车与上海石化的大丝束碳纤维供应合同，标志着产业链协同创新进入新阶段。

【行业启示】高端装备对性能的极致要求是材料技术迭代的重要牵引力，高端领域的技术突破会逐步向通用领域外溢，带动整个材料产业的成本下降和技术成熟。

案例六：建筑美学创新——福州万宝商圈 GFRP 自由曲面项目

项目背景：福州万宝商圈[40]“福云”项目是国内首个全 GFRP 自由曲面建筑[41]，位于福州沿海高湿盐碱环境，由同济大学承担核心技术支撑。项目包含 2 座完全相同的自由曲面结构，南北对称分布；单座结构顶部标高 9.8m，整体呈外径 43m 的圆形，覆盖中部直径 25m 的下沉式广场，外立面各由 3 朵牵牛花造型的自由曲面构成，2017 年底建成投入使用。

36 [ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811005790]
37 [哈德斯菲尔德大学官网《World's first carbon fibre rail bogie unveiled on campus》（2019-12-11）：ELG Carbon Fibre 与哈德斯菲尔德大学铁道研究所联合发布全球首个碳纤维轨道车辆转向架样机（CAFIBO，采用回收及富余碳纤维制造）. https://www.hud.ac.uk/news/2019/december/carbon-fibre-rail-bogie-unveiled/https://www.industrysourcing.cn]
38 [科技日报 . https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-01/10/content_284753.html]
39 [中车官网 . https://www.crrcgc.cc/sfgf/2025-05/12/article_2025051216263650205.html]
40 [张其林， 赵宇超， 姜旭， 等 . 全玻璃纤维复材自由曲面外立面建筑的结构设计 [J]. 工业建筑， 2019, 49(9): 178-183. DOI: 10.13204/j.gyjz201909031. http://gyjz.ic-mag.com/cn/article/doi/10.13204/j.gyjz201909031]
41 [赵宇超， 姜旭， 张其林， 等 . 福州某商业广场 GFRP 自由曲面结构设计与施工 [J]. 施工技术， 2019, 48(14): 121-125. DOI: 10.7672/sgjs2019140121. https://doi.org/10.7672/sgjs2019140121]

行业痛点：项目最初拟采用膜结构找形，经论证，传统建筑材料用于此类极度扭曲曲面时造价与工期成本高昂——外立面最小曲率半径仅 79mm，对面板与檩条的加工精度要求极高；福州基本风压达 0.75kN/ m^2，需同时考虑风吸与风压的组合作用，沿海高湿盐碱环境对建材腐蚀影响大。

技术方案：同济大学团队提出 GFRP 层合板各向异性简化计算方法，将正交各向异性层合板简化为各向同性材料，在保证安全与精度的同时大幅提高计算效率；在 4kN/ m^2风吸与风压组合荷载下，面板应力远低于 60MPa 的破坏强度，设计由刚度而非强度控制——计算表明 4mm 厚即可满足幕墙规范要求，实际采用 8 层 ±45°交织玻璃纤维织物共 4.8mm 厚，留有充分安全余量；全部面板按不大于 2m×2m 的模数划分，兼顾加工、运输与安装效率，面板与檩条采用环氧结构胶胶结并辅以沉头铆钉连接。团队构建 BIM 全流程数字化管控体系，对 1,676 块形状完全不同的空间曲面板和 2,656 根非标空间檩条逐一编号建库，通过二维码扫码实现“生产—到场—安装”全过程追踪 115，保障复杂造型精准落地。GFRP 材料的可塑性使复杂曲面一体化成型具备条件。

量化效益：GFRP 密度仅为钢材的约 1/4，面板质量小，无需重型起重设备，两名工人乘高空作业车即可完成安装，连接边界实际误差约 5mm；轻盈的面板与檩条体系无需对原地下结构梁柱进行加固；项目从方案设计到最终竣工全程仅用时 5 个月，验证了 GFRP 在加工周期与施工便利性上的突出优势 115。

示范意义：项目实现了建筑美学创新与工程技术创新的协同，验证了 GFRP 在复杂异形建筑中的综合优势；团队围绕加工与施工申请了多项发明专利，形成可推广的技术体系。项目同时表明，GFRP 在沿海高湿盐碱环境中表现出优异耐腐蚀性，腐蚀风险显著降低，可显著降低全生命周期维护成本——既释放了建筑设计的自由度，也构成 GFRP 沿海环境耐久性的工程实证。

【行业启示】城市更新和公共建筑对美学与效率的双重要求，为先进材料打开了新的应用空间，GFRP 等材料在解决工程性能问题的同时释放了建筑设计的自由度，实现技术与艺术的统一。

案例七：循环经济示范——沙特阿美北京东单篮球场改造项目

项目背景：2024 年 11 月，沙特阿美联合中国男子篮球职业联赛（CBA）、沙特基础工业公司（SABIC）启动“投入新可能，球场改造计划”，北京东单体育中心作为首个改造场地正式竣工亮相 [42]。东单是全国街头篮球的“圣地”[43]，全年对社会开放，每天接待来宾近万人次 [44]，社会影响力显著。篮球场地数量超过 100 万个，位居全国各类体育场地前列 [45]，市场空间广阔。

42 [沙特阿美官网新闻稿 . https://china.aramco.com/zh-cn/news-media/china-news/2024/aramco-unveils-first-three-recycled-plastic-basketball-courts-in-beijing]
43 [北京东城区政府官网 . https://www.bjdch.gov.cn/ywdt/dcyw/202309/t20230906_3251652.html]
44 [百科“东单体育馆” . https://baike.baidu.com/item/ 东单体育馆 /3987281]
45 [中新网 . http://www.chinanews.com.cn/ty/2024/03-20/10183181.shtml]

行业痛点：传统聚氨酯运动地板服役寿命有限，报废后主要采用填埋处理，回收困难、VOC 排放高，环境负担较重；现有回收方式中，物理回收易导致性能下降，化学回收成本较高，焚烧易产生有毒气体，难以实现循环利用。运动场地材料的循环利用是城市更新与循环经济的交叉痛点。

技术方案：项目采用 SABIC TRUCIRCLE? 循环解决方案[46]，将回收塑料转化为具有权威认证的循环化合物[47]，以其为原料制造性能与原生塑料相当的运动地板，实现材料循环利用。地板由东京 / 巴黎奥组委 3X3 篮球地板独家供应商英利奥（Enlio）制造[48]，产品性能达到国际赛事标准，获 ISCC PLUS 可持续发展与碳认证[49]，使用多年后可完全回收再利用。该项目是跨价值链协同实践，整合了能源企业（沙特阿美）、化工材料企业（SABIC）、专业运动地板企业（英利奥）、城市公共空间运营方资源，体现了沙特阿美在循环经济领域从技术研发到终端应用的全链条整合能力。

量化效益：东单首期改造的三块场地以再生塑料高性能运动地板替代传统聚氨酯地板，实现废塑料高值化利用与材料闭环循环；2025 年 5 月沙特阿美与姚基金达成合作，计划 3 年内在全国新建或翻新超过 60 座社区篮球场及多功能运动场地，首座“投入新可能”焕新球场已在北京国贸揭幕[50]。

示范意义：公共球场作为开放城市空间，让公众通过日常运动直观感知循环经济价值，作为绿色理念传播的主要载体，实现了环境、社会与品牌效益的统一，作为城市公共空间绿色更新的可推广路径。在后续推广阶段，“投入新可能，球场改造计划”将从北京东单延伸至全国社区球场，带动再生材料在运动场地、市政设施等场景的持续应用。

【行业启示】循环经济技术的推广需要公众认知支撑，通过日常可接触的公共场景展示循环经济价值，是培育市场认知、推动技术落地的有效方式。

案例八：非金属材料创新中心 NEXCEL 数字基建支撑——复合材料通信塔项目

项目背景：中国铁塔站址规模已超过 210 万座[51]，通信塔是新型基础设施的重要组成部分。NEXCEL 联合哈尔滨玻璃钢研究院开发的复合材料通信塔，已在埃及等地实现工程应用，是 NEXCEL“通信及电

46 [SABIC 官网 . https://www.sabic.com/en/sustainability/sustainable-solutions/trucircle-portfolio-and-services]
47 [碳交易网 . http://www.tanjiaoyi.com/article-80168-1.html]
48 [商业管理网 . https://www.sino-manager.com/detail/9129]
49 [SABIC 官网 . https://www.sabic.com/en/reports/integrated-report-2024/business-performance/trucircle]
50 [中国日报 . https://ex.chinadaily.com.cn/exchange/partners/82/rss/channel/cn/columns/snl9a7/stories/WS68230941a310205377032e9a.html]
51 [上证报中国证券网《中国铁塔：210 万站址如何做大数字共享经济》（2025-06-20）；中国铁塔官网 . http://m.10jqka.com.cn/20250620/c669061093.shtml; https://www.china-tower.com]

力输送用复合材料格构塔”研发示范项目的标志性成果。

行业痛点：传统钢制通信塔自重大、山区运输困难，运输成本较高；沿海地区需频繁开展防腐维护，全生命周期维护成本显著。传统通信塔在偏远地区、沿海地区的运输安装与维护面临多重挑战。

技术方案：项目采用高度集成模块化设计，所有构件在工厂预制完成，现场仅需简单拼装即可完成施工，无需大型吊装设备。塔身采用桁架结构，通过金属连接件连接而成，主梁采用专利设计有效提升承载能力和抗风性能；采用聚氨酯树脂和玻璃纤维通过高效拉挤成型工艺制成，具备优异耐候性。复合材料替代钢材显著减少了制造过程中的碳排放，复合材料高效的机械化成型工艺可快速形成批量生产。

量化效益：埃及落地的 18 米通信塔整塔仅重 1.5 吨，较同高度金属铁塔减重 50%，占地面积 2.25 m^2、减少 30%，可抗 140km/h 风速，可承载 6 个 HXWXD 天线、1 个 MW 天线（直径 0.6m）、6 个 RRU，较铁塔承载数量更多，符合 ANSI/TIA 222-G 设计规范要求[52]，全寿命周期成本显著低于传统铁塔。据 NEXCEL 披露，该塔被埃及电信公司誉为“前所未有的技术创新”[53]。在后续国内广州的落地项目中，与同高度传统铁塔相比，复合材料塔在生产阶段可减少 43% 的碳排放[54]。

示范意义：复合材料通信塔技术可拓展至电力杆塔、智慧灯杆等多种城市场景，构成绿色数字基建的轻量化、低维护、长寿命系统解决方案，支撑十五五新型基础设施建设。随着技术成熟与产业配套完善，复合材料杆塔将从通信基建进一步拓展至电力输送、交通感知、能源互联、城市智慧基建等场景，从示范应用走向规模推广。

【行业启示】新基建领域没有传统材料的路径依赖，模块化、轻量化、低维护的先进材料特性与新基建部署需求高度匹配，有望率先实现规模化应用。

52 [NEXCEL 官网“哈玻院复合材料‘绿色信号塔台’落地埃及”. http://www.non-metallic.net/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=323&id=100]
53 [NEXCEL 官网“走进非金属材料创新中心”. http://www.non-metallic.net/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=235&id=358]
54 [NEXCEL 微信公众号《中心项目成果（十二）丨哈玻院复合材料信号塔落地广州》（2024-07-19）. https://mp.weixin.qq.com/s/KmmUjP1xBb2UIx54VrTI3A; https://tc.cscec.com/ywly/xcl]

第五章

协同共建：打造开放共赢的产业生态

标杆项目验证了技术可行性，但要实现从“点上示范”到“面上推广”的跨越，需全产业链协同，按照“标准先行—创新支撑—示范带动—生态共赢”的路径，共同构建健康可持续的产业生态。

5.1 产业协同的四大重要方向

一是标准体系共建。标准是规模化应用的基础。当前 FRP 等先进材料标准体系尚不完善，需政府、协会、高校、企业共同参与，加快制定覆盖生产、设计、施工、验收、运维全流程的标准规范，明确不同场景的性能要求与技术方法；针对主承力结构、海工工程等特殊场景补充专项标准，同时推动中国标准与国际标准对接，为技术“走出去”奠定基础。依托 NEXCEL 等开放创新平台，产学研用深度协同，围绕材料性能提升、成本降低、回收利用、长期耐久性等主要问题联合攻关。

二是技术创新共研。加快 AI、数字孪生等技术与材料技术融合，将先进材料研发周期显著缩短；建立开放共享的材料性能数据库与工程案例库，降低全行业应用门槛。沙特阿美与中国建筑材料科学研究总院共建的 NEXCEL 是该模式的典型代表，未来将持续整合能源企业技术优势、高校科研优势、工程企业施工优势与业主应用需求，完善“基础研究—技术开发—工程验证—标准制定—规模推广”的完整创新链。

三是示范项目共推。在交通、建筑、海工、新基建等重点领域组织实施示范工程，对采用先进低碳材料的项目给予碳减排激励；鼓励地方政府在城市更新、市政工程中优先应用先进材料，打造示范标杆；总结示范经验形成标准化方案向全行业推广。以 SABIC TRUCIRCLE? 解决方案和 NEXCEL 再生塑料沥青技术为代表，构建从废弃塑料回收到高性能材料再制造的完整产业闭环，推动循环经济规模化落地。

四是产业生态共赢。构建从上游原料、中游材料制造到下游工程应用、末端回收的完整产业链；支持龙头企业发挥带动作用，培育专精特新企业，形成大中小企业融通发展格局；建立健全材料回收体系，实现闭环循环；深化中沙国际合作，共同开拓全球绿色基建市场，从越南丁安港到埃及通信塔，再到“一带一路”共建项目，将中沙合作的技术方案向全球推广，实现产业发展与碳减排双赢。

5.2 分主体行动建议

基于产业发展现状，不同市场主体可结合自身定位，协同推动先进材料产业发展：

政府层面：加快完善先进材料标准体系，在政府投资项目中逐步推广全生命周期成本评价，对先进材料示范项目给予政策支持，为产业发展创造稳定的制度环境。

材料企业层面：从单一材料供应商向综合解决方案服务商转型，加大研发投入降低材料成本，积累长期性能数据，为工程应用奠定可靠技术支撑。

工程建设方层面：建立全生命周期成本核算能力，在海工、市政、新基建等场景开展先进材料试点

应用，积累工程经验，形成企业内部技术标准。

投资与金融机构层面：开发适配低碳材料项目的绿色金融产品，探索将材料碳足迹纳入项目评价体系，为先进材料应用配置多元化金融支持。

5.3 发展展望

绿色低碳转型是全人类的共同事业。沙特阿美作为全球领先的综合能源企业，正通过“油转化”战略为全球提供高性能低碳材料解决方案；同济大学作为中国土木工程与材料科学领域的顶尖高校，为技术创新提供学术支撑；NEXCEL 作为开放创新平台，正在汇聚全球资源推动先进材料从实验室走向工程现场、从中国走向世界。

从上海到胡拜尔，从宿迁到丁安港，从上海磁浮到福州商圈，从北京东单到埃及——一个个标杆项目正在将油转化的蓝图转化为现实。8 个标杆项目的工程实践数据与设计验证表明：在已投运项目中，先进材料已显著降低全生命周期成本；基于材料性能与 LCA 测算，FRP 结构设计寿命可达 50 年以上，在腐蚀环境下显著优于传统钢材。

基于现有产业趋势与工程实践，先进材料在基建领域的应用渗透率有望持续提升，全生命周期成本核算将逐步上升为工程决策的主要维度，中沙合作开发的绿色基建方案也将随着“一带一路”建设向更多国家推广。

各方有理由相信，在政产学研用的共同努力下，在中沙两国的开放合作下，先进材料必将成为新质生产力的主要载体，为中国乃至全球的绿色高质量发展注入持久动力。碳氢资源的价值升级——从“燃烧驱动”到“材料固碳”——正在重新定义全球石化产业与基建领域的价值规则，为绿色低碳转型贡献体系化材料解决方案。

关于沙特阿美

沙特阿美是一家世界领先的能源与化工公司。从保障原油稳定供应到研发新能源技术，公司始终致力于通过全方位的业务运营为社会创造价值。公司全球团队专注于提升资源的可靠性、可持续性和利用效率，为全球经济增长注入持久动力。详情请访问公司官网：

关于中国建材集团（CNBM）

中国建材集团有限公司（CNBM）是全球最大的综合性建筑材料生产商之一，连续入选《财富》世界 500 强。CNBM 致力于通过非金属材料产业推动低碳转型，依托其在低碳综合解决方案领域的深厚积累持续创新发展。旗下科技研发机构——中国建筑材料科学研究总院（CBMA），是中国最大的非金属材料研究机构，下设八个专业研究所、七个国家及行业重点实验室，以及 23 个全国标准化技术委员会。更多信息，请访问：www.cnbm.com.cn

关于 NEXCEL 非金属材料创新中心

NEXCEL 于 2022 年 1 月在北京由沙特阿美与中国建筑材料科学研究总院（CBMA，中国建材集团科技研发机构）联合创立。NEXCEL 是扩大并加速非金属材料技术在建筑领域推广应用的核心平台，业务涵盖联合研发、标准制定与推广、专业发展与认证，以及国际倡导与交流推广。更多信息，请访问：www.non-metallic.net。

关于同济大学土木工程学院

同济大学土木工程学院是中国最具声望的工科院系之一，也是结构与土木工程研究领域的全球顶级学术机构。学院在结构材料、防火减灾、桥梁与隧道工程及智慧基础设施等领域具有深厚积累，致力于推动学术研究与大型工程实践的紧密结合，并与全球产业界和学术机构建立了广泛合作关系，共同探索可持续、高韧性的绿色建造解决方案。更多信息，请访问：civileng.tongji.edu.cn