

DOI: 10.7672/sgjs2024170077

“双碳”背景下我国绿色建造技术发展策略研究*

卢昱杰^{1,2}, 王娜¹, 朱彤³, 孙留存⁴, 肖绪文^{1,3}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中国建筑股份有限公司, 北京 100029; 4. 中国绿发投资集团有限公司, 北京 100020)

[摘要] 绿色建造是工程建设领域贯彻绿色化发展理念的具体体现,是实现我国“双碳”目标与高质量发展的关键手段。介绍了绿色建造的基本概念及其丰富内涵,依照低碳化、装配化、智能化、精益化4类绿色建造发展方向,阐述绿色低碳设计技术、绿色低碳建材、资源化利用、既有建筑改造等10项绿色建造关键技术发展现状,通过问卷调查与专家访谈,分析我国绿色建造关键技术发展在技术研究、资源投入、协同体系等方面的共性挑战,并在此基础上,提出加快重点技术研发推广、加大政策资金支持力度、加强理论与技术体系构建等方面的针对性对策建议。

[关键词] 绿色建造;低碳化;装配化;智能化;精益化

[中图分类号] TU201.5

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)17-0077-08

Research on Development Strategy of Green Construction Technologies in China Based on Carbon Peak and Carbon Neutrality Goals

LU Yujie^{1,2}, WANG Na¹, ZHU Tong³, SUN Liucun⁴, XIAO Xuwen^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. China State Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100029, China; 4. China Green Development Investment Group Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: Green construction embodies the concrete implementation of green development concepts within the field of engineering and construction, serving as a pivotal means to achieve China's 'dual carbon' targets and high-quality economic growth. This paper introduces the fundamental concept and rich connotations of green construction, following which it elucidates the current state of ten key green construction technologies organized under four main developmental directions, low-carbonization, prefabrication, intelligentization, and lean construction. These includes green low-carbon design techniques, eco-friendly building materials, resource recycling, and renovation of existing buildings. Through questionnaire surveys and expert interviews, the study analyzes common challenges faced by China in the development of green construction technologies across areas, such as technological research, resource allocation, collaborative systems. Based on these findings, this paper offers targeted policy recommendations including accelerating the R & D and promotion of key technologies, increasing policy and financial support, and strengthening the theoretical and technical framework for green construction.

Keywords: green construction; low-carbonization; prefabrication; intelligentization; lean construction

0 引言

面对我国城镇化和现代化快速发展的新形势,

资源与环境压力日益凸显,绿色化、“双碳”目标、高质量发展成为国家重大发展战略。建筑业是国民经济的支柱产业,2020年建筑业碳排放占全国总量的50%以上^[1],随着建造规模快速增长,城乡建设领域大量建设、大量消耗、大量排放的粗放式建设方式与高质量发展要求之间的矛盾愈加突出。为应对能源短缺与环境污染问题,英美等发达国家与

* 国家自然科学基金面上项目(52078374);中国工程院咨询项目:绿色建造发展战略研究(2022-XZ-21);住房和城乡建设部软科学研究项目(2022-R-040)

[作者简介] 卢昱杰,教授,E-mail:lu6@tongji.edu.cn

[收稿日期] 2024-06-01

地区相继明确建筑业刚性减排目标,不断推广与普及绿色建筑、零碳建筑、可持续建造等绿色化实践理念,通过法规制定、技术创新、工程示范等方式促进建筑业节能减排^[2]。我国工程建设绿色化发展相比于发达国家起步较晚,亟待将绿色发展理念贯穿于建设工程全生命期,重点提升建造技术创新水平,坚持交付绿色工程产品,加快推动建筑业碳减排,助力实现碳达峰、碳中和目标。

建造是基于建筑全生命周期的工程立项策划、工程设计与工程施工的总称。建造阶段的碳排放量虽占比不高,但该阶段的绿色设计、绿色选材对降低建筑全生命周期碳排放至关重要。近年来,国内外学者围绕工程建造绿色化技术开展一系列研究。部分学者^[3-6]提出将废弃混凝土、砖块、渣土、防水卷材等进行资源化利用,提高建筑固废资源化利用率。Wu 等^[7]建立联合太阳能电池与建筑综合规划设计的建筑光伏系统,并提出建筑光伏一体化技术应用建议。Liu 等^[8]开发模块化网格系统,以支持住宅建筑标准化设计。Liu 等^[9]基于模拟退火遗传算法,智能优化构件装配顺序,指导现场装配式施工过程。Pan 等^[10]分析 2 766 篇文献计量,分析 BIM-AI 融合技术在建造管理中的价值。Schimanski 等^[11]提出基于 BIM-精益建造效应的施工生产管理系统,以改进与整合当前施工管理技术。Zhang 等^[12]通过案例分析,发现绿色化技术研发与应用阶段显著脱节,技术投入产出效率低。当前针对建设工程绿色化的研究以降低能耗、提升施工效率等应用点为主,对建造阶段绿色化理论、关键技术等方面缺乏系统认知,也未提出明确发展路径。

本文在阐述绿色建造内涵的基础上,结合文献与问卷调研方式量化相关指标,并对建设方、总承包商、政府、高校等 50 余家单位进行座谈调研,深化与明确我国绿色建造技术的发展现状和面临的挑战。

1) 问卷调研

截至 2023 年 7 月,回收纸质版问卷共计 66 份,有效问卷 60 份(见表 1),其中超过半数受访者拥有 15 年以上工作经验,大多是企业中高层管理人员,尽管绝对数量上问卷样本较少,但被调查样本已基本涵盖绿色建造领域的多元背景,能够反映总体特征,且单份问卷具有较高的信息价值,符合研究问题的实际需求。

2) 座谈调研

共开展 11 次座谈调研,其主题涉及绿色建造的

定义与内涵、关键技术推广、试点示范、政策建议等方面,通过座谈调研印证问卷结果的一致性,并进一步验证深化定量研究得到的初步结论。

表 1 问卷回收结果

Table 1 Results of questionnaire recovery

类别	选项	数量	比例/%
年龄/岁	25~35	13	21.67
	36~45	27	45
	>45	20	33.33
工作 年限/年	1~5	8	13.33
	6~10	10	16.67
	11~15	12	20
	16~20	5	8.33
	>20	25	41.67
管理层级	高层(决策)管理人员	16	26.67
	中层管理人员	28	46.67
	基层管理人员	13	21.67
	技术与生产人员	3	5
企业类型	中央管理企业	13	21.67
	国有企业	38	63.33
	民营企业	2	3.33
	三资企业	2	3.33
	事业单位	1	1.67
主营项目 目类型	行政机构	4	6.67
	居住建筑	42	70
	工业建筑及其构筑物工程	29	48.33
	商业、体育建筑等公共建筑	33	55
	道路与桥梁工程基础设施	21	35
	除道路和桥梁以外的基础设施	10	16.67
	其他	6	10

本文绿色建造技术研究结论基于文献、问卷、访谈调研 3 方面工作共同构建。最终得到绿色建造关键技术体系、技术推广应用制约因素等内容,提出适合我国国情的绿色建造技术发展重点任务与建议。

1 绿色建造概述

绿色建造是按照绿色发展要求,着眼于建筑全生命周期,通过科学管理和技术创新,采用有利于节约资源、保护环境、减少碳排放、提高效率、保障品质的建造方式,实现人与自然和谐共生的建造活动^[13-15]。绿色建筑是绿色建造的目标产品,绿色建造是绿色建筑的物化过程。低碳建造作为绿色建造内涵的外延,更强调减少建造过程中化石能源使用、能耗、二氧化碳排放。

绿色建造的发展离不开技术与协同能力的融合,本文重点对绿色建造技术发展概况进行梳理总结(见图 1),聚焦 10 项绿色建造重点技术的应用现状与挑战,对绿色建造技术未来发展进行展望。

推进绿色建造是工程建设领域践行绿色发展理念的具体体现,是减少碳排放、助力实现“双碳”目标的有效方式,是为人民群众建好房子的重要举

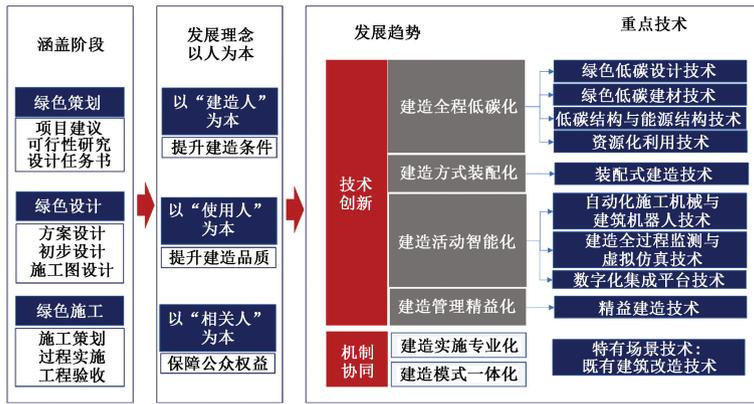


图1 绿色建造发展概述

Fig. 1 Overview of green construction development

措,是推动建筑业转型升级与高质量发展的抓手,是培育新质生产力、发展绿色生产力的新动能,是提升“中国建造”国际竞争力与影响力的必要途径。

2 绿色建造领域技术进展

围绕绿色建造核心内涵,构建绿色建造技术创新体系,对工程建设绿色发展与经济效益的双效提升起关键作用。基于对访谈调研与问卷调研中技术类问题的分析,绿色建造领域的关键技术主要包括低碳化建造技术、装配化建造技术、智能化建造技术、精益化建造技术4个方面。通过不断创新与运用先进的绿色建造技术改造传统工程建造流程,推进绿色建造工作,推动建筑业高质量发展。

2.1 绿色低碳设计技术

随着国家“双碳”目标持续贯彻与国民生态意识不断加强,低碳技术成为工程建设领域关键的减碳方法,低碳化建造技术的核心在于将可持续发展理念融入整个建设过程^[16],包括绿色低碳设计技术、绿色低碳建材技术、低碳结构与能源结构技术、资源化利用技术,通过新建建筑的绿色化建造、既有建筑节能改造等方式,减少建筑固化碳、拆除碳、运行碳,实现低碳化目标。

绿色低碳设计技术可以从源头上控制建筑在全生命周期的碳排放和能源消耗^[17],该技术要求工程项目初期便明确建造低碳化目标、统筹建筑全生命周期的低碳化实施方案。在绿色低碳设计方面,我国要求新建建筑严格执行GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》,同时,GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》强制要求建设项目设计文件需包含建筑碳排放计算报告^[18],并提出建筑行业首个碳排放强度的强制性指标,在设计评审阶段便纳入碳减排理念,加强建筑师在设计过程中充分考虑低碳要素,满足低碳设计要求^[19]。建筑低

碳设计理念从针对建筑设备单体低碳设计转变为面向建造全过程的低碳设计,建筑方案从节能建筑向零能耗、零碳建筑方向转变^[15]。

2.2 绿色低碳建材技术

绿色建材^[20]具备高性能、环保等特征,选用钢铁、水泥等绿色建材,提高建筑质量的同时,还能显著减少建造材料用量。近年来,我国绿色建材生产规模、质量效益、推广应用率不断提升,但绿色建材仍处于发展初期,其全生命周期的绿色低碳与智能制造水平尚需进一步提升,相关技术和工艺还不具备良好的经济性,工程选用和市场消费力尚显不足。同时,国际市场对建材提出更高低碳要求,欧盟碳边境调节机制(俗称碳关税)已完成立法程序,钢铁、水泥都涵盖其中,我国需进一步加快提升钢铁、水泥等建材企业的降碳水平,以提升绿色建材国际市场竞争能力。为此,我国建立了全国绿色建材采信应用数据库^[21],发布推广技术和产品目录^[22],2023年12月,工业和信息化部等10部门联合发布《绿色建材产业高质量发展实施方案》(工信部联原〔2023〕261号),在产业集群、示范工程、采购政策、产品认证等方面制定绿色建材发展目标。

2.3 低碳结构与能源结构技术

低碳结构与能源结构是基于低碳、节能等技术与传统建筑结构的组合结构。其中,低碳结构有装配式外围护结构、新型装配式钢混组合框架结构体系、预制交叉层压木结构、3D打印结构、木-石结构等,基于高强钢、预应力、低碳环保材料等开发的低碳结构具备更加突出的结构性能,同时能够有效减轻环境负担。能源结构包含能源桩、能源地下连续墙、能源隧道、能源综合管廊等^[23],兼具承载及换热功能,节约结构空间的同时,能够高效利用地热能等可再生清洁能源。这类技术研究尚有欠缺,工程

应用场景与典型案例有限,应依托低碳结构与能源结构研究应用背景,深化结构形式分析、结构能效与环境价值等技术因素的可行性研究,为实际工程应用提供理论支持。

2.4 资源化利用技术

资源化利用技术,如建筑垃圾资源化处理技术、城市废弃地再利用技术、材料可循环周转技术、隧道防超挖技术、免模板少支撑技术等,以节能、节地、节水、节材等技术为先,实现资源减量化,同时加强清洁能源开发与替换,并利用再生混凝土等技术不断提高建筑垃圾等固废的再利用水平。近10年来随着GB/T 50905—2014《建筑工程绿色施工规范》的贯彻,建设项目采取多种措施,以实现“四节一环保”,全面推进绿色施工。但建筑施工中大量模板脚手架等非主体周转材料循环次数较少,损耗率为10%~30%。同时,建筑材料转换为最终建筑产品过程中,有1%~3%的损耗率,以上两者损耗在工地上大多转化为建筑垃圾。目前我国每年产生的建筑垃圾达20亿t,约占城市固体废弃物总量的40%,建筑垃圾污染和垃圾围城问题日益严重。我国建筑垃圾普遍采取堆放、掩埋方式进行处理,其综合利用率<5%,远远低于欧盟(90%)、日本(97%)、韩国(97%)等发达国家和地区^[24],在发达国家,建筑垃圾是重要的再生资源。总体来看,我国资源节约与高效利用技术还处于起步阶段,面临产生量巨大、资源化利用认识不到位、处理水平不高、产业链不健全等问题,需突破多重困境,减少固废产生,将建筑垃圾转换为绿色能源。

2.5 装配式建造技术

装配式建造是通过工业化方法在工厂制造构件、配件、部件等工业产品,在工程现场通过机械化、信息化等技术手段,按不同要求进行组合和安装,建成特定建筑产品的建造方式。建造装配化可最大限度减少施工现场工作量,降低全生命周期碳排放,是以人为本、改变落后作业的施工方式,突破建筑业人力资源短缺的有效方法,也是推动我国经济发展新型工业化的内在需求。

装配式建造技术发展重点包括标准化设计、装配式施工、一体化装修等关键技术。设计阶段关键技术包括装配式建筑多专业一体化集成设计技术(如工业化建筑围护结构与主体结构、建筑设备系统和内装系统一体化等协同设计)、预制构件少规格多组合的标准化设计方法、针对钢结构三板(楼板、内墙板和外墙板)问题的预制构件研发。施工阶段关键技术包括现场建筑构件与部品部件的实

测实量、自动化定位、虚拟拼装等辅助安装技术或设备,如利用三维扫描仪实现构件测量,结合BIM与逆向工程拟合扫描模型与理论模型,以实现结构单元整体数字预拼装。此外,建筑工业化成套技术还包括全装修交付、人居模块化等土建装修一体化方法。虽然装配式建造产品环境友好、缩短工期优势明显,但现阶段装配式构件标准化、规模化程度较低,非标准化设计使预制构件成本大幅度增加,常用的PC混凝土装配式建筑的建安成本比传统现浇工法成本增加10%~15%^[25],效益优势不明显,装配式建造技术难以落地。

2.6 自动化施工机械与建筑机器人技术

据麦肯锡全球研究院统计,在22个行业中,建筑业的数字化指标排名倒数第2,建筑信息化投入仅占总产值的0.08%。随着人工智能技术在建筑工程领域不断发展与应用,以BIM为代表的智能化建造技术有效加强工程建设全生命周期的管理,为跨专业、跨阶段间的协同作业提供数据基础,降低各单位间的协作成本^[18],推动工程建造工业化、服务化和平台化变革。智能化建造技术的最终目的是交付以以人为本、智能化的绿色可持续工程产品与服务,绿色建造的实现过程需要智能化、数字化建造技术支撑。智慧建筑、智慧社区、智慧城市本质上符合绿色可持续发展内涵。智能化建造技术体系包括自动化施工机械与建筑机器人技术、建造全过程监测与虚拟仿真技术、数字化集成平台技术。

超高层建筑、隧道等复杂工程建设场景普遍存在劳动强度大、安全风险高、作业环境差等痛点,自动化施工机械与建筑机器人的应用能够替代危、繁、脏、重作业,将工人从繁重的体力劳动中解放出来,安全、高效地进行建筑施工作业。自动化施工机械是在传统工程机械基础上,融合多信息感知、故障诊断、高精度定位导航等要素的施工机械,包括超高层建筑智能化施工装备集成平台(空中造楼机)、地下工程施工盾构机、桥梁施工自动化架桥机等。建筑机器人是用于建设工程的特种作业机器人,目标在于有效替代人工,进行安全、高效、精确的建筑部品部件生产和施工作业,包括实测量机器人、焊接机器人、砌筑机器人、抹灰机器人、喷涂机器人、地坪机器人、钢筋绑扎机器人、3D打印机器人、现场巡检机器人等。目前,我国在架桥机、造楼机等自动化施工机械与建筑机器人方面取得显著进展,但业界主要聚焦于单一用途的自动化施工机械与建筑机器人技术研发,装备集群的智能协同一体化作业、智能调度与优化控制研究相对欠缺,技

术智能化程度不高,抗干扰性差,难以满足现场条件复杂的施工需求。

2.7 建造全过程监测与虚拟仿真技术

利用物联网、云计算、BIM 等技术进行建造全过程监测与虚拟仿真,是保证安全、经济、高效建造的关键,全过程监测技术通过图像识别、物联网等方式实时监测施工机械、材料、固废、水电、噪声以及碳排放情况,并对高处作业、电气作业、爆破作业等施工现场进行安全隐患感知。虚拟仿真技术包括施工力学仿真、基于 BIM 的施工工艺模拟、构件虚拟拼装、临时设施规划等,提前暴露建造过程中可能出现的问题,实现一次成功,降低建造成本。目前全过程监测技术多局限于局部静态监测,存在缺乏整体性动态评估、多源监测数据可扩展性弱、数据挖掘能力不足、虚拟仿真技术成本普遍较高、人机交互能力不足、实时数据传输效率低、多维数据转换困难等问题。

2.8 数字化集成平台技术

数字化集成平台是加快“数字住建”、推进工程建设项目全生命周期数字化管理的新功能,驱动工程项目全过程目标管理、质量管理、进度管理、安全管理、合同管理和成本管理同步实施。数字化集成平台包含工程项目三维模型、融合设计、造价、采购、施工、合同等多维度的管理信息,以及工程建造碳排放信息、多部门业务信息等,为项目低碳运营提供基础数据保障,确保项目建造全过程绿色低碳发展。现有数字化集成平台主要关注智慧工地层面,如劳务实名制、PM2.5 监测等人员、环境信息管理,尚未具备自主建模、分析决策的能力,难以在进度安排、安全预警等建造过程管控多方面提供科学、实时的管理和控制建议。

2.9 精益建造技术

麦肯锡《建筑业生产力报告》结果显示:98%的全球工程项目存在成本超支或工期延误问题,成本平均增加 80%,工期平均延误 20 个月^[26]。精益建造作为新型建筑工程管理概念模式,被视为解决建筑业生产粗放、效率低下、高浪费问题的利刃^[27],江苏省住房和城乡建设厅在《江苏建造 2025 行动纲要》中提出大力推广精益建造,促进行业健康可持续发展的理念。精益建造是将精益理念和建筑特征相结合,面向建筑全生命周期,持续减少和消除浪费、最大限度满足顾客需求的建造方式。

精益建造技术目标是追求更高的生产率、更好的产品质量、更优的建造价值,实现过程要求流程标准化、生产系统化和产品质量零缺陷化。精益建

造方法包括目标价值交付(TVD)、末位计划者系统(LPS)、6S 管理体系、可视化管理、集成项目交付(IPD)等。目标价值交付技术通过设计与施工管理驱动加强目标约束。末位计划者系统作为进度计划与控制的系统性方法,加强参与方协作,特别适用于装配式建筑施工的精细化进度管理,减少不确定性。6S 管理体系(分类(sort)、排序(set in order)、清洁(shine)、规范(standardize)、维持(sustain)、安全(security))作为处理与维护工程现场组织效率的可视化管理工具,极大地改善施工管理效率。基于 BIM 可视化技术,通过空间管理、进度跟踪、质量验证等方式,提高设计准确度、减少施工变更、简化各方向沟通。这类精益建造技术在工程项目管理中的应用,极大地优化安全、质量、成本、进度等要素的管理效率。但相比于国外精益建造发展,我国在精益建造技术中的应用尚处于初级阶段,极少有总承包商实施较小颗粒度的模块化管理,多数项目管理人员欠缺施工现场精益建造指导能力。

2.10 既有建筑改造技术

全国存量建筑中仍有近 40% 为非节能建筑,既有公共建筑中使用时间>20 年的建筑占比>30%,大量老旧居住建筑围护结构差、设备老旧效率低、运行维护管理缺失,导致我国建筑全生命周期能耗在全国能源消费总量中的占比居高不下。城市更新、既有建筑综合改造作为国家“十四五”规划的明确任务,相比于新建建筑,推进既有建筑改造将是城镇化与城市建设领域的重要发展方向,在此将既有建筑改造重点技术作为单独模块进行分析。既有建筑改造将转变城市开发建设方式,与建筑业高质量发展、可持续发展、以人为本、环境友好等理念保持一致。既有建筑改造技术包括功能提升类技术与能源替代类技术。

针对既有建筑结构、管线等功能退化问题,通过绿色改造技术,降低对周围环境的影响,保障建筑结构安全性,优化建筑功能空间^[28]。功能提升类技术包含建筑部品部件易安装、易维修、易替换技术,既有建筑围护结构保温防水与耐久性能整体提升技术,既有建筑主体结构抗震加固技术,低扰动非开挖施工技术,管道原位增强修复技术、老旧小区智慧化改造技术,基于城区功能提升改造的更新潜力评测与决策技术等。

建筑部门当前的电气化率>40%^[29],虽然是终端电气化率最高的部门,但仍具有巨大提升潜力,为实现 55% 以上的电气化目标^[30],建筑电气化技术

应大幅度减少二氧化碳和污染物排放,即面向既有建筑减少或避免天然气等一次能源在建筑终端供冷供热中的消耗,采用太阳能、风能和其他零碳电力来源供电产能。能源替代类典型技术有建筑光伏一体化技术,应用分布式光伏发电模式,将太阳能电池发电的功能系统集成至屋顶、立面和建筑附属物,打造构件型和建材型太阳能光伏建筑;通过炊事、生活热水、采暖电气化等技术,使用电能替代建筑领域的煤炭、石油、天然气能源,推进全面电气化。

相比于新建建筑,既有建筑原始建造数据缺失严重,改造前信息获取难、信息可追溯性差,同时,低影响、低污染、低能耗等既有建筑改造技术难点多、不够成熟,难以进一步推进既有建筑规模化改造^[31]。

3 我国绿色建造技术发展面临的挑战

随着可持续发展、节能建筑、绿色施工、低碳建造、绿色建造等理念不断深入与工程实践,我国在绿色建造领域取得一定成果。但面对建筑产业绿色化转型升级需求,对标全球发达国家绿色建造的发展态势^[32],围绕我国“双碳”战略下的建筑业碳减排目标,我国绿色建造技术仍面临诸多挑战。

1) 资源化利用、装配式等绿色建造技术薄弱

装配式建筑构件与部品部件的通用性差、固废资源化利用率低、绿色建材应用率不高,既有建筑电气化水平仍有较大提高空间、节能改造效能提升水平有限。一方面,绿色建造技术仍处于面上的一般性研究,缺乏围绕资源和能源高效利用等专题性的深入研究,绿色化、装配化、智能化等水平与发达国家水平相比存在差距,在绿色建造关键技术领域的研究相对滞后。另一方面,绿色建造相关技术与工艺还未具备良好的经济性,尚未形成成熟的产业链,建筑行业减碳压力巨大。由于我国工程建造多以达到国家标准为要求,技术研发缺少创新动力与标准引领,亟待加强新一代绿色建造技术研发,突破新能源、资源化利用、装配式等绿色建造技术的研究瓶颈。

2) 研发资源匮乏及资金、人才等资源不足

企业与政府均面临技术研发资金不足的困难,缺乏技术创新资金激励,无法持续保证绿色建造技术研发效率。绿色建造领域技术人才短缺严重,创新型、复合型、实用型人才缺口明显,一线操作工人的工匠型人才不足,技能工人不固定、能力不强,阻碍绿色建造新质生产力培育与产业发展。绿色建造技术资源分配不均衡,我国建筑规模总量大,各

地区气候条件、经济发展水平、政策扶持力度、绿色化水平存在显著差异,资源投入区域差异大,经济发达与落后地区的绿色建造科技创新能力差距明显,需因地制宜、打破地域限制,促使绿色建造技术产生的节能降碳效益辐射到不同区域,形成良性循环。

3) 一体化协同程度较低,缺乏技术体系支撑

绿色建造技术以单体化应用堆砌为主,鲜少考虑技术集成的协同效应,如单一用途的智能化施工技术协作能力相对欠缺、抗干扰性差,难以满足复杂现场条件下的协作施工需求,同时设计阶段的节能单体设计缺少多目标优化与全局协同性考虑,难以完全发挥绿色设计的源头减碳优势。绿色建造技术在立项、设计、施工环节的应用相互独立,缺乏一体化协同管控机制,技术落实效果不佳,难以实现全生命周期绿色化。绿色建造技术体系尚不完善,除绿色建造技术本身,其功能框架、数据框架、碳排放核算评价方法等技术架构因素仍不完善,尚未形成完整的数据链与技术支持体系,缺乏系统性技术创新思维,难以有效推广与执行绿色建造技术实践。

4 结语

绿色建造技术发展需要具备创新性、系统性、战略性思维,需明确“以人为本”建造理念,从重点技术研发、多种资源投入、技术体系完善等方面对绿色建造技术发展全方面赋能,以新质生产力发展理念推动建筑业高科技、高效能、高质量发展,逐步形成绿色、低碳、循环的建设发展方式。

1) 加快绿色建造重点技术研发推广

支持低碳化、智能化等绿色建造新一代技术研发,持续推进城乡绿色建筑、装配化、废弃物再生利用,加大对建筑光伏发电、超低能耗建筑构配件、高防火性能外墙保温系统、住区气改电等关键技术研究,推动可靠技术工艺及产品设备集成应用。推动绿色建造管理体系认证,定期征集、发布绿色建造的典型与标杆案例,强化工程项目绿色建造示范,以点带面加速绿色建造在全国范围内实施。加快制定覆盖立项、设计、施工过程的国家级绿色建筑标准,强化法规标准支撑,引领新旧建筑标准逐步提高到超低能耗水平。加速研发成果转化,加快绿色建造成熟技术产品规模化生产,形成具有竞争力的绿色建造产业链,并培育绿色建造产业领军企业。

2) 加大政策资金支持与人才培养力度

完善实施有利于绿色建造的财税、金融、投资、价格等政策,加大中央资金对绿色建造的支持力

度,鼓励绿色建造应用与相关产业发展。提升科研投入力度,设立绿色建造“十五五”重点研发项目和国家自然科学基金重大项目,吸引更多科研机构与学者投身绿色建造的基础性、前瞻性研究中,集中力量突破制约绿色建造发展的关键技术瓶颈,孕育具有自主知识产权的绿色建造先进技术。全方位推行绿色建造教育,将绿色化发展理念贯穿普通教育全过程,设立“绿色建造学”学科,制订“产学研”联动培养方案,加强绿色建造新技能培训,加速复合型、应用型和技能型人才培养,并进一步加速建立工程项目管理层与劳动层紧密结合的一体化实施团队。

3) 加强绿色建造理论与技术体系构建

强化低碳化、标准化设计引领作用,打造以 BIM 为核心、面向全产业链的一体化绿色建造技术生态,加强设计信息在不同专业间的流转与协同,使立项策划、建筑设计、项目施工管理协同向绿色化迈进。重视技术集成,鼓励企业面向新建建筑与既有建筑的实际施工场景,有机组合现有单项绿色建造技术,形成新工艺生产方式,从根本上变革建筑业生产逻辑。围绕绿色建造核心内涵,建立涵盖建筑垃圾资源化利用、低碳结构、建筑光伏发电等绿色建造重点典型产品的技术体系,分类分级建立短板技术攻关库、长板技术储备库及先进技术推广库,并建立完善建筑碳排放核算标准体系,统一核算口径,量化绿色建造技术应用成效,构建科学化、系统化、标准化的技术体系,以支撑绿色建造产业科技创新。

参考文献:

[1] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[J]. 建筑,2023(2):57-69.
Research report on building energy consumption and carbon emission in China (2022) [J]. Construction and architecture, 2023(2):57-69.

[2] 中国建筑业协会绿色建造与智能建筑分会. 绿色建造发展报告——绿色建造引领城乡建设转型升级[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2022.
Green Construction and Intelligent Building Branch of China Construction Industry Association. Green construction development report-green construction leads the transformation and upgrading of urban and rural construction [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.

[3] XIAO J Z, SHEN J Y, BAI M Y, et al. Reuse of construction spoil in China: Current status and future opportunities [J]. Journal of cleaner production, 2021, 290: 125742.

[4] LIU Q, SINGHA A, XIAO J Z, et al. Workability and mechanical properties of mortar containing recycled sand from aerated concrete blocks and sintered clay bricks [J]. Resources,

conservation and recycling, 2020, 157: 104728.

- [5] DANG J T, HAO L K, XIAO J Z, et al. Utilization of excavated soil and sewage sludge for green lightweight aggregate and evaluation of its influence on concrete properties [J]. Journal of cleaner production, 2023, 390: 136061.
- [6] 肖建庄,俞才华,肖绪文,等. 废弃防水卷材资源化基本问题与发展路径研究[J]. 中国工程科学,2023,25(5):210-221.
XIAO J Z, YU C H, XIAO X W, et al. Fundamental problems and development paths for reclamation of waste waterproof membranes[J]. Strategic study of CAE, 2023, 25(5):210-221.
- [7] WU X, YANG C, HAN W, et al. Integrated design of solar photovoltaic power generation technology and building construction based on the Internet of Things [J]. Alexandria engineering journal, 2022, 61(4): 2775-2786.
- [8] LIU C, SONG Y, LI R, et al. Three-level modular grid system for sustainable construction of industrialized residential buildings: A case study in China[J]. Journal of cleaner production, 2023, 395: 136379.
- [9] LIU C, ZHANG F, ZHANG H, et al. Optimization of assembly sequence of building components based on simulated annealing genetic algorithm[J]. Alexandria engineering journal, 2023, 62(5): 257-268.
- [10] PAN Y, ZHANG L. Integrating BIM and AI for smart construction management: Current status and future directions [J]. Archives of computational methods in engineering, 2023, 30(2): 1081-1110.
- [11] SCHIMANSKI C P, PRADHAN N L, CHALTSEV D, et al. Integrating BIM with lean construction approach: Functional requirements and production management software [J]. Automation in construction, 2021, 132: 103969.
- [12] ZHANG J, OUYANG Y, BALLESTEROS-PÉREZ P, et al. Understanding the impact of environmental regulations on green technology innovation efficiency in the construction industry[J]. Sustainable cities and society, 2021, 65: 102647.
- [13] 住房和城乡建设部办公厅. 绿色建造技术导则(试行)[R/OL]. (2021-03-16)[2024-03-16]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefaui/qtwj/202204/t20220415_2679036.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical guidelines on green construction (trial) [R/OL]. (2021-03-16)[2024-03-16]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefaui/qtwj/202204/t20220415_2679036.html.
- [14] 中国建筑股份有限公司. 建筑工程绿色建造评价标准:T/CCIAT 0048—2022[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2022.
China State Construction Engineering Co. Evaluation criteria for green construction of building projects: T/CCIAT 0048—2022 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [15] “绿色建造发展战略研究”项目组. 绿色建造发展战略研究报告[R/OL]. (2023-08-18)[2024-06-18]. http://www.cae.cn/cae/html/main/col84/2022-08/18/202208181429-19535508488_1.html.
Project Team of the Study on Green Construction Development Strategy. Research report on green construction development strategy [R/OL]. (2023-08-18)[2024-06-18]. http://www.cae.cn/cae/html/main/col84/2022-08/18/202208181429-19535508488_1.html.

- cae. cn/cae/html/main/col84/2022-08/18/20220818142919535508488_1.html.
- [16] 杨帆. 绿色节能背景下房屋建筑施工技术应用中的创新性[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(26):139-141.
YANG F. Innovativeness in application of house building construction technology under background of green energy saving [J]. Theoretical research in urban construction, 2023(26):139-141.
- [17] 吴泽洲, 黄浩全, 陈湘生, 等. “双碳”目标下建筑业低碳转型对策研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5):202-209.
WU Z Z, HUANG H Q, CHEN X S, et al. Countermeasures for low-carbon transformation of construction industry in China toward the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Strategic study of CAE, 2023, 25(5):202-209.
- [18] 李辛, 关瑞玲. 数字化技术带来碳市场发展新思路[J]. 环境经济, 2022(15):64-69.
LI X, GUAN R L. Digital technology brings new ideas for carbon market development [J]. Environmental economy, 2022(15):64-69.
- [19] 北京中建协认证中心有限公司, 中碳数字实验室. 中国建筑行业碳达峰碳中和研究报告(2022) [R/OL]. (2022-04-15) [2024-06-11]. www.jccchina.com/UserFiles/upload/file/20230324/20230324093145556.pdf.
Beijing CCAA Certification Center Co., China Carbon Digital Lab. Carbon peak and carbon neutral research report on China's construction industry (2022) [R/OL]. (2022-04-15) [2024-06-11]. www.jccchina.com/UserFiles/upload/file/20230324/20230324093145556.pdf.
- [20] 住房和城乡建设部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 等. 建材行业碳达峰实施方案(工信部联原[2022]149号) [R]. (2022-11-02) [2024-06-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/08/content_5725353.htm.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Implementation program of peak carbon achievement in building materials industry (MIIT Lianyuan [2022] No. 149) [R]. (2022-11-02) [2024-06-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-11/08/content_5725353.htm.
- [21] 市场监管总局办公厅, 住房和城乡建设部办公厅, 工业和信息化部办公厅. 关于印发绿色建材产品认证实施方案的通知(市监认证[2019]61号) [R]. (2019-10-25) [2024-05-25]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-11/08/content_5450047.htm.
General Office of the General Administration of Market Supervision, General Office of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development, General Office of the Ministry of Industry and Information Technology. Notice on the issuance of green building materials product certification implementation program (Municipal Supervision Certification [2019] No. 61) [R]. (2019-10-25) [2024-05-25]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-11/08/content_5450047.htm.
- [22] 工业和信息化部. 建材工业鼓励推广应用的技术和产品目录(2023年本) [R]. (2023-04-11) [2024-05-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/26/content_5753232.htm.
Ministry of Industry and Information Technology. Product catalog of technologies and products encouraged for promotion and application in building materials industry (2023 edition) [R]. (2023-04-11) [2024-05-11]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/26/content_5753232.htm.
- [23] 温继伟, 侯珺洸, 刘星宏, 等. 能源地下结构研究及应用进展[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10):119-130.
WEN J W, HOU J L, LIU X H, et al. Research and application progress of energy underground structures [J]. Coal geology & exploration, 2022, 50(10):119-130.
- [24] 钱芳芳, 孙文彬. 建筑垃圾资源化利用现状及发展对策研究[J]. 低碳世界, 2023, 13(2):16-18.
QIAN F F, SUN W B. Research on status quo and development countermeasures of resource utilization of construction waste [J]. Low carbon world, 2023, 13(2):16-18.
- [25] 北京中建协认证中心有限公司, 北京建工建筑产业化投资建设发展有限公司. 2022 中国建筑行业装配式建筑发展研究报告 [R/OL]. (2022-12-01) [2024-06-04]. <http://www.vzkoo.com/document/202306049283092e9ce3f44d94e6282a.html>.
Beijing CCAA Certification Center Co., Beijing Construction Engineering Building Industrialization Investment and Construction Development Co. 2022 China construction industry assembly building development research report [R/OL]. (2022-12-01) [2024-06-04]. <http://www.vzkoo.com/document/202306049283092e9ce3f44d94e6282a.html>.
- [26] CHANGALI S, MOHAMMAD A, NIEUWLAND M V. The construction productivity imperative [R]. (2015-06-02) [2024-03-15]. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-construction-productivity-imperative#/>.
- [27] 杨杰, 程大煜. 精益建造视角下建设安全管理探究[J]. 建筑经济, 2019, 40(8):60-64.
YANG J, CHENG D Y. Research on construction safety management from perspective of lean construction [J]. Construction economy, 2019, 40(8):60-64.
- [28] 上海维固工程实业有限公司, 上海建筑设计研究院有限公司. 既有住宅建筑功能改造技术规范: JGJ/T 390—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Shanghai Weigu Engineering Industrial Co., Ltd. Shanghai Architectural Design and Research Institute Co., Ltd. Technical code for the retrofitting of existing residential building on using funtion : JGJ/T 390—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [29] 舒印彪, 谢典, 赵良, 等. 碳中和目标下我国再电气化研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3):195-204.
SHU Y B, XIE D, ZHAO L, et al. Re-electrification in China under carbon neutrality goal [J]. Strategic study of CAE, 2022, 24(3):195-204.

- LI T Y, WEI J W, ZHANG S Y, et al. Earthquake damage criteria of wooden structure with two parameters and earthquake response evaluation for wooden tower in Yingxian County [J]. Journal of building structures, 2004, 25(2): 91-98.
- [25] 薛建阳, 赵鸿铁, 张鹏程. 中国古建筑木结构模型的振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 6-11.
- XUE J Y, ZHAO H T, ZHANG P C. Shaking table test study on wooden structure models of ancient Chinese buildings [J]. China civil engineering journal, 2004, 37(6): 6-11.
- [26] XUE J Y, MA L L, DONG X Y, et al. Investigation on the behaviors of dougong sets in historic timber structures [J]. Advances in structural engineering, 2020, 23(3): 485-496.
- [27] SHI X W, CHEN Y F, CHEN J Y, et al. Experimental assessment on the hysteretic behavior of a full-scale traditional Chinese timber structure using a synchronous loading technique [J]. Advances in materials science and engineering, 2018, 2018(1): 1-15.
- [28] NIU Q F, WAN J, LI T Y, et al. Hysteretic behavior of traditional Chinese timber frames under cyclic lateral loads [J]. Materials testing, 2018, 60(4): 378-386.
- [29] MENG X J, YANG Q S, WEI J W, et al. Experimental investigation on the lateral structural performance of a traditional Chinese pre-Ming dynasty timber structure based on half-scale pseudo-static tests [J]. Engineering structures, 2018, 167: 582-591.
- [30] CHEN J Y, LI T Y, YANG Q S, et al. Degradation laws of hysteretic behaviour for historical timber buildings based on pseudo-static tests [J]. Engineering structures, 2018, 156: 480-489.
- [31] 周乾, 闫维明, 关宏志, 等. 故宫太和殿抗震性能研究 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 487-494.
- ZHOU Q, YAN W M, GUAN H Z, et al. Research on seismic performance of the Hall of Supreme Harmony in the Forbidden City [J]. Journal of Fuzhou University (natural science edition), 2013, 41(4): 487-494.
- [32] WU Y J, SONG X B, VENTURA C, et al. Rocking effect on seismic response of a multi-story traditional timber pagoda model [J]. Engineering structures, 2020, 209: 110009.
- [33] 陆伟东, 姜伟波, 张坤, 等. 含耗能雀替的榫卯节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(11): 213-221.
- LU W D, JIANG W B, ZHANG K, et al. Experimental study on seismic performance of mortise and tenon joints with energy dissipation [J]. Journal of building structures, 2021, 42(11): 213-221.
- [34] 贺欢. 我国文物建筑保护修复方法与技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- HE H. Research on methods and techniques of conservation and restoration for cultural relics in China [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [35] 周乾, 闫维明, 张博. CFRP 布加固古建筑木构架抗震试验 [J]. 山东建筑大学学报, 2011, 26(4): 327-333, 347.
- ZHOU Q, YAN W M, ZHANG B. Seismic test of ancient wooden frame reinforced by CFRP cloth [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2011, 26(4): 327-333, 347.
- [36] ZHOU Q, YAN W M. Experimental study on aseismic behaviors of Chinese ancient tenon-mortise joint strengthened by CFRP [J]. Journal of Southeast University, 2011, 27(2): 192-195.
- [37] 李爱群, 周坤朋, 王崇臣, 等. 中国古建筑木结构修复加固技术分析与发展 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 195-206.
- LI A Q, ZHOU K P, WANG C C, et al. Analysis and prospect of restoration and reinforcement techniques for ancient wooden structures in China [J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2019, 49(1): 195-206.
- [38] HE J X, LIU K, XIE L L, et al. Experimental and numerical studies on influences of wedge reinforcement on seismic performance of loose penetrated mortise-tenon joints [J]. Journal of building engineering, 2024: 91109610.
- [39] 郑建国, 徐建, 钱春宇, 等. 古建筑抗震与振动控制若干关键技术研究 [J]. 土木工程学报, 2023, 56(1): 1-17.
- ZHENG J G, XU J, QIAN C Y, et al. Research on some key technologies of earthquake resistance and vibration control of ancient buildings [J]. China civil engineering journal, 2023, 56(1): 1-17.
- [40] 张锡成, 胡成明, 吴晨伟, 等. 形状记忆合金丝加固古建筑木结构直榫节点抗震性能研究 [J]. 工程力学, 2022, 39(4): 164-176.
- ZHANG X C, HU C M, WU C W, et al. Study on seismic performance of straight tenon joints reinforced by shape memory alloy wire in ancient wooden structures [J]. Engineering mechanics, 2022, 39(4): 164-176.

(上接第84页)

- [30] 国家发展和改革委员会, 住房和城乡建设部. 加快推动建筑领域节能降碳工作方案(国办函〔2024〕20号) [R/OL]. (2024-03-12) [2024-03-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content_6939606.htm.
- National Development and Reform Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Work program to accelerate the promotion of energy conservation and carbon reduction in the construction sector (State Council Letter〔2024〕No. 20) [R/OL]. (2024-03-12) [2024-03-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/202403/content_6939606.htm.
- [31] 陆非. 既有建筑改造发展现状与工程质量管理水平提升分析 [J]. 绿色建筑, 2021, 13(2): 14-17.
- LU F. Existing building renovation development and engineering quality management optimization [J]. Green building, 2021, 13(2): 14-17.
- [32] 卢昱杰, 刘缘诚, 王娜, 等. 国外绿色建造发展经验与启示 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2024(4): 13-19.
- LU Y J, LIU Y C, WANG N, et al. Experience and enlightenment of green construction development in foreign countries [J]. Green construction and intelligent building, 2024(4): 13-19.