

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.155



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



生物建造体系与展望

刘汉龙

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:人类在地球上繁衍生息,建设了无数用于生存的栖息地。从远古时代用来遮风挡雨的简易建筑物,到如今的大厦林立、高铁纵横,土木工程建造技术经历了多个时代的更迭。随着全球气候变化和生态环境问题日益严峻,传统工程建造中高耗能、高排放、高污染及废弃材料难分解的问题阻碍了双碳发展战略的实施和工程建造技术的进步,土木工程建造技术转型迫在眉睫。基于土木工程建造技术发展现状和技术转型需求,提出生物建造的概念,并阐述了生物建造的内涵,构建了生物建造体系,围绕微生物建造、植物建造、动物建造和仿生建造4个类别,从生物建造理论、技术、材料、装备、检验检测和工程案例等方面进行了详细阐述,并展望了生物建造的发展前景。

关键词:生物建造;工程建造;微生物建造;植物建造;动物建造;仿生建造

中图分类号:TU74 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)04-0001-22

Biogenic construction: System and perspectives

LIU Hanlong

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Humanity has inhabited and proliferated on the earth, constructing countless habitats. From rudimentary shelters used by ancient civilizations to today's skyscrapers and high-speed railways, civil engineering has undergone technological changes across multiple epochs. With the increasingly challenges posed by global climate change and ecological issues, the characteristics associated with traditional engineering construction such as, high energy consumption, emissions, pollution, and non-degradable solid waste, are gradually becoming incompatible with the demands for today's construction. These include carbon neutrality, sustainability and recyclable. A transformation of civil engineering is inevitable. This article proposes the concept of "biogenic construction". It is a system comprising four areas: microbial construction, plant construction, animal construction, and bioinspired construction. Each of the four areas is explained in terms of biogenic construction theory, technology, materials, equipment, processes, inspection, and testing. Some specific cases are also used to explain the concepts and applications. The perspectives of biogenic construction are also discussed.

Keywords: biogenic construction; engineering construction; microbial construction; plant construction; animal construction; bio-inspiration construction

收稿日期:2023-11-13

基金项目:重庆英才计划优秀科学家项目(cstc2021ycjhbzxm0051)

作者简介:刘汉龙(1964-),男,中国工程院院士,教授,博士生导师,主要从事环境岩土力学与防灾减灾工程研究, E-mail: hliuhhu@163.com。

Received: 2023-11-13

Foundation item: Chongqing Talents Program Outstanding Scientist Project (No. cstc2021ycjhbzxm0051)

Author brief: LIU Hanlong (1964-), academician of Chinese Academy of Engineering, professor, doctoral supervisor, main research interests: environmental geomechanics and disaster prevention engineering, E-mail: hliuhhu@163.com.

土木工程最早可以追溯到古代文明时期,然而,对于“土木工程”的确切定义并没有确凿的起源。历史上,人们一直在进行各种形式的土木工程施工活动,但直到近代,这一概念才逐渐被系统地界定和定义。

人类早期栖息于天然洞穴或人造洞穴,或以石头、泥土和木头为主要材料搭建简易建筑物,并利用木材或者岩石堆砌成简易栅栏,此时期的建筑物为原生态建筑,基本无碳排放,但空间较小,抵抗灾难的能力较差。此阶段可以称为第1代土木工程施工建造。距今约5000年前,人类掌握了烧制砖瓦的技术^[1],开始使用泥土制作成砖块、瓦片形状,并将其晾干,然后烧制成硬化的砖块、瓦片。这些砖瓦被用于建造城墙、宫殿、寺庙和其他重要建筑,自此工程施工建造进入使用砖瓦建造时期。这个时期的建筑物结构性能得到提升,但仍存在空间、强度和功能上的不足。此阶段可归于第2代土木工程施工建造。19世纪初,英国人 Joseph Aspdin 发明了新型水硬性胶凝材料^[2],混凝土开始被大量应用于建筑领域,结合炼钢技术和蒸汽机械的迅猛发展,土木建筑行业进入第3代土木工程施工建造阶段。此时期的建筑物呈现超高层、大跨度、高强度的特点,具备了现代建筑物的基本特性。但由于生产水泥混凝土制品会产生大量的二氧化碳,对环境影响较大。近年来,随着人工智能和数字孪生技术的发展,数据驱动下计算力学和智能建造技术在土木工程领域成为新的生产力。智能建造是利用先进的信息技术、传感技术、机器人技术等手段,实现建筑施工过程的自动化、数字化、智能化的一种建造方式^[3],可称为第4代土木工程施工建造。智能建造技术的发展能促进工程施工建造效率和精度的提升,进而降低工程成本,减少能源消耗,也能提升工程安全性,但在建筑材料方面,智能建造技术没有彻底解决水泥高排放和废弃材料难分解的问题。

土木工程的高速发展与科技水平的进步密切相关,并推动工程建设质量和规模取得质的飞跃。然而,土木工程的发展造成地球上的“混凝土森林”成为第一大无法生物降解物质,加剧了全球变暖、土壤和水资源污染。例如,全球混凝土年用量超过140亿 m^3 ^[4],每年产生的建筑垃圾超过23亿 t ^[5],每年生产水泥造成的二氧化碳排放超过24亿 t ^[6]。除了少部分用于地基填料,大部分建筑垃圾仍堆放于地表,大量侵占其他物种的生存空间,建筑垃圾析出的污染物通过雨水和河流迁移,破坏生态环境。目前,智能建造技术能够解决工程建设的效率问题,但如何促进土木工程施工建造与自然和生态之间的平

衡,实现土木工程施工建造与生态系统和谐共生,是未来工程施工建造亟待解决的关键课题。

1 生物建造的内涵

土木工程施工建造与生态自然和谐共生是当今社会发展的必然趋势。在土木工程施工建造中,应以可持续发展理念为指导,最大限度地减少对自然资源的消耗和破坏。通过科学规划和设计,致力于实现工程项目与周围生态环境的融合,保护生态系统的完整性和稳定性。《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》指出,要坚持“绿色发展,和谐共生”的建设理念。《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和国务院《2030年前碳达峰行动方案》明确了城乡建设领域降低碳排放的任务要求。由此可见,实现下一代土木工程施工建造发展的核心是“绿色生态”与“低碳”。

生物建造是围绕土木工程施工建造与生态自然和谐共生的理念,倡导低碳与高效的新一代土木工程施工建造方式。生物建造可译为 bioconstruction 或 biogenic construction,曾被用于指代生物基建筑材料或珊瑚修复,然而全面系统地定义生物建造的内涵还未有报道。自然界生物,包括微生物、植物、动物,能够给予土木工程施工建造足够灵感。代表性的有:微生物方面,近年来矿化微生物被应用于岩土生态加固、制备生物混凝土和混凝土裂隙自修复,具有替代水泥产品的潜力;植物方面,几千年前的利用木材榫卯结构进行工程施工建造;竹子强重比高^[7]、质量轻,可用作结构支撑或者墙体加筋,常用于建筑施工;动物方面,珊瑚通过分泌钙质物质,在海底形成坚固的珊瑚礁结构,不仅为海洋生物提供了栖息地,还有助于减缓海浪冲击,保护沿岸地区免受海洋侵蚀,被誉为海洋中的工程师;仿生建造方面,考虑到仿生建造是模仿生物的结构、功能和行为进行的工程施工建造模式,是前三者的延伸,因此将仿生建造也归类于生物建造。仿生建造能使建筑和施工设备更有效地适应环境、提高效率、降低能耗和资源消耗。总体而言,生物建造是以生物为载体进行工程建设,或以生物为基础研发新材料、新装备和新工艺的新型工程施工建造模式,主要代表为微生物建造、植物建造、动物建造和仿生建造,具有绿色、低碳及与自然相融等典型特征。

2 生物建造体系

生物建造的理念和设计思路是,在实现建造功能的基础上,从微生物、植物,以及动物的行为中汲取灵感,以“绿色低碳”和“自然相融”为基本原则,

促进土木工程建造和环境发展的和谐统一。围绕微生物建造、植物建造、动物建造和仿生建造 4 个方

向,从理论、技术、材料、装备、检验检测等方面,初步构建了生物建造技术体系,如图 1 所示。

生物建造体系				
方向 类别 体系	微生物建造	植物建造	动物建造	仿生建造
理论	微生物矿化理论 微生物固化理论	生物力学 复合材料理论 根土复合力学	珊瑚成礁理论 动物建造基础理论	结构仿生理论 材料仿生理论
技术	微生物注浆技术 微生物土加固技术 微生物混凝土技术	植物本体建造技术 植物加筋技术 植物脲酶加固技术	动物驯化技术 定点培育技术 动物生成建材技术	仿生结构建造技术 仿生岩土施工技术
材料	微生物矿化材料 胶结固化与填充掺剂	天然植物材料 植物加筋材料 植物基改性材料	天然动物建造材料 动物生成建筑材料 动物基改性材料	仿生结构材料 仿生胶凝材料
装备	微生物土加固装备 微生物混凝土制备装备	植物建造装备 植物基材料生产设备	珊瑚成礁装备 动物建造装备	仿生结构建造装备 仿生岩土建造装备
检验检测	加固实时监测 均匀性检测 强度检测	结构安全检测 复合材料强度检测	珊瑚成礁质量检测 动物建造强度检测	结构安全检测 仿生强度检测

图 1 生物建造体系

Fig. 1 System of biogenic construction

地球生物主要由微生物、植物和动物构成,生物建造技术以 3 种生物类别划分,同时,仿生建造在生物本体之外融合了 3 种生物的技术优势。4 种生物建造研究方向可归纳为:

1)微生物建造:利用微生物代谢产生的尿酶等活性物质及微生物代谢周围微环境,通过控制微生物的生长、代谢行为,开发绿色低碳建筑材料,从而形成一种新型建造技术。这种技术结合了生物学、化学、材料学和建筑学等多个领域的知识,可以用于生产环保、可持续的建筑材料,如生物水泥、微生物土和自愈合混凝土等。

2)植物建造:利用植物生长特性和植物材料来实现建筑结构、加固、装饰和功能的新型建造技术。这种技术将植物作为建筑材料或设计元素,结合了植物的生态友好性、可再生性和美学特点。

3)动物建造:利用动物的新陈代谢产物或者借助动物行为,进行建筑或建筑材料的创造而形成的一种新的建造技术。尽管对这种技术的研究和应用相对较少,但自然界中一些动物的建筑行为和身体结构的确为土木工程建造提供了一些启示,为人类的建筑实践提供了新的思路。

4)仿生建造:利用生物学原理和从自然界中生物结构、功能等得到的启发,设计和构建建筑物的新型建造技术。这种技术将生物学与工程学相结合,通过模仿生物体的结构、形态、功能和行为,创造出具有优异性能的建筑结构、材料和系统。

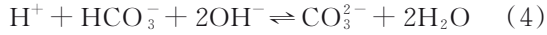
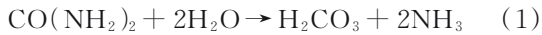
3 微生物建造

微生物建造是一种利用微生物生产特定生物材料的方法,以加强和改善建筑材料的性能和功能。通过引入特定微生物菌株,在适宜的环境条件下诱导生成无机矿物、生物胶、生物纤维等材料,然后将其应用于建筑结构加固、土壤固化、环境治理等领域。这项技术具有可持续性和环保性,能降低对传统高碳材料的依赖,减少对环境的影响。同时,由于微生物建造材料具有环境相容性和可持续性,因此在一些特殊环境下具有广泛的应用前景,为工程建设和环境改善提供了新的解决方案。

3.1 微生物矿化理论

常见的微生物矿化技术原理包括尿素水解、硫酸盐还原和铁盐还原等,这些过程都有助于在土壤中形成稳定的矿物质桥接,从而增强其力学性能。目前,基于尿素水解反应的微生物矿化技术被广泛研究,特别是利用自然界中普遍存在的脲酶菌。脲酶菌是一种无毒且稳定的高效产脲酶嗜碱性细菌,被认为是已知产脲酶活性最高的微生物之一,其脲酶基因的表达量可达细胞干重的 1%。添加高效脲酶菌可显著催化尿素水解(其速率相对自然水解提高约 10^{14} 倍^[8]),反应生成氨气和碳酸,同时提高水溶液环境的 pH 值,在高碱性环境下发生碳平衡和氨平衡反应,生成的氢氧根离子与碳酸氢根离子进一步结合,生成碳酸根离子,通过外界添加可溶性钙源(如氯化钙、醋酸钙、乳酸钙等),碳酸根离子可与

钙离子反应生成碳酸钙沉淀,反应过程如式(1)~式(5)所示^[9]。



微生物矿化理论涉及多物理场理论和本构理论。多物理场理论主要指微生物行为动力学、尿素沉淀与水解反应以及物质传输过程等。细菌的行为动力学包括细菌的生长衰亡行为、趋化行为及运移行为。尿素沉淀与水解反应速率受脲酶活性和溶液饱和度影响较大,可用一阶线性模型、尿素水解方程等理论公式简化表示。生物-化学-水力模型是目前使用较多的能反应生物矿化的多物理场模型,涉及动量守恒的流场方程、质量守恒的化学场方程、细菌悬浮和附着的生物场方程、反应速率的水解和沉淀方程以及应力场的本构方程等^[10]。

3.2 微生物土固化理论

微生物矿化反应过程中产生的碳酸盐沉积物对加固材料的工程特性具有显著影响。研究发现^[11],碳酸钙在土体中有两种极端沉积模式:一种是均匀分布在土颗粒表面,另一种则主要沉积在颗粒接触点之间。进一步的SEM和X- μ CT观测表明,碳酸钙的实际沉积状态是这两种模式之间的动态平衡^[12]。如图2所示,碳酸钙沉积模式主要包括3种:1)胶结模式,即碳酸钙沉积在砂土颗粒接触点,增强了颗粒间的胶结作用;2)填充模式,即碳酸钙填充在土体颗粒间的孔隙中,能有效减小孔隙率;3)涂层模式,即碳酸钙晶体沉积在土体颗粒表面,增加了颗粒的粗糙度和不规则性。另外,还有包含以上3种模式的混合模式。随着矿化反应的进行,孔隙间的碳酸钙沉积物与土体表面的沉积物逐渐形成互联,有效地桥接土体颗粒,产生强化的胶结

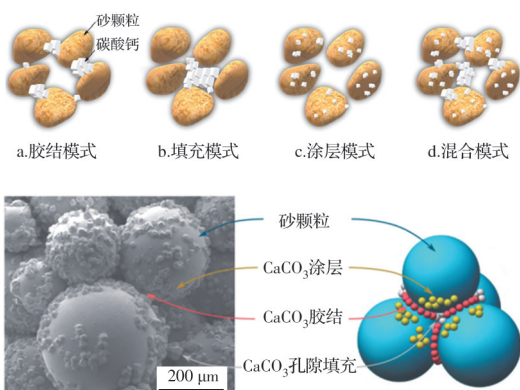


图2 微生物固化沉积模式^[13]

Fig. 2 Deposition model of microbial reinforcement^[13]

作用,其引发的密实和胶结效应是土体工程特性改善的关键,前者能有效降低固化体的渗透性,后者能显著增强固化体的力学强度。Wu等^[13]发现弱胶结土呈现弥漫性破坏,同时发生胶结断裂和磨损。中到强的胶结土显示出局部失效,其主要机制从胶结断裂转变为磨损,产生大量的孔隙填充细粒,如图2所示。

3.3 微生物固化土技术

微生物固化技术在土体加固与改良方面具有巨大潜力,其主要优势集中在以下几点:1)微生物浆液与反应液均具有低黏性与优良的流动性,因而可以在自重渗流或低压注浆作用下填充岩土体内部微孔隙与裂隙,实现非扰动加固原状土;2)细菌尺寸较小,可以穿透土壤中的微小孔隙进行活动;3)微生物矿化产物多为碳酸盐矿物,其与岩土体材料之间相容性较好,对环境的影响较小;4)采用微生物原位激发技术,即向土壤中加入营养液,激活土壤中的微生物,选育出所需菌种具有较强的环境适应性;5)微生物能在混凝土裂缝形成后自动“修补”裂缝。

针对微生物固化土的力学性能,研究者们开展了广泛研究。通过对不同颗粒尺寸及级配特性的无黏性土进行微生物加固处理,使土体获得足够的黏结强度。研究表明,在不同粒径分类下,无侧限抗压强度(UCS)与碳酸钙含量呈正相关^[14]。大部分研究中的碳酸钙含量均未超过32%,且在某些研究中,微生物加固试样的抗压强度甚至超过了10 MPa^[10],已能满足大多数工程应用的要求。针对加固土体的液化风险,研究者采用动三轴试验与振动台试验等评估加固土体在动态荷载作用下的强度与变形特性。经过微生物加固后的钙质砂试样具有更大的循环剪切阻力,动强度得到显著提高,抗液化性能得到明显改善^[15]。在渗透性控制方面,微生物固化土亦表现出显著优势。在微生物处理过程中,碳酸钙的沉积作用填补了土壤颗粒间的微小空隙,有效减少了水流通过土体的途径。利用这一特性,研究者已成功将砂土加固为低渗透层,其渗透率从 10^{-4} m/s降至 10^{-7} m/s^[16]。这些研究表明,由于其低黏度和低压力的注浆特性,微生物注浆技术可以作为传统水泥灌浆的有效替代方法,并已逐渐被应用于堤坝防渗^[17]、沟渠加固^[18]以及深部岩石裂缝修复^[19]等领域。

3.4 微生物土3D打印

近年来,3D打印技术因其显著简化材料生产工艺、缩短制备周期以及提供更大设计自由度和打印复杂几何形状的能力而受到广泛关注^[20]。基于生物

矿化产物卓越的机械性能和独特的反应机理,研究人员^[21]开发了一种自动化3D打印技术,将基于微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)与3D打印技术相结合,用于“生物打印”土体和岩石结构,如图3所示。在这一过程中,将具有脲酶活性的碳酸钙粉末与石英砂混合并打印沉积成三维结构,随后将该结构通过胶结溶液处理,其抗压强度与低等级混凝土相当,同时克服了微生物矿化过程中碳酸钙沉淀分布不均匀的问题。此外,研究者还开发了一种可打印的“生物墨水”,由装载巴氏芽孢杆菌的明胶基微凝胶制成^[22],如图4所示。这种生物墨水能够实现MICP固化反应,将包含矿化菌似凝胶的物质转变为硬质、能承载的材料。微凝胶能被精确打印成所需形状,并通过在支架中沉积碳酸钙来增强其结构完整性。

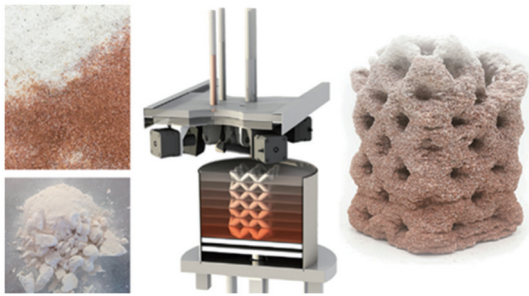


图3 生物矿化3D打印^[21]

Fig. 3 3D-printing of biomimetic structures^[21]

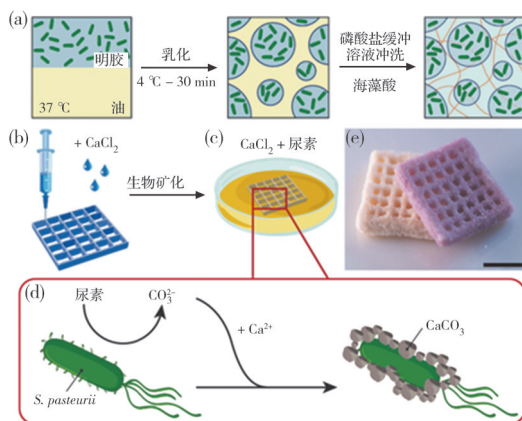


图4 “生物墨水”3D打印试件^[22]

Fig. 4 3D printing part using bio-ink^[22]

MICP与3D打印的结合是生物技术与先进制造技术的融合,当前该领域还处于探索阶段,研究人员正在努力优化生物反应的效率,提高结构的均匀性,以及扩展生产规模。尽管面临诸多挑战,但这一领域的进展不仅展示了一种减少建筑材料碳排放的可行策略,还为传统建筑材料提供了一种有前景的替代方案,为可持续建筑材料的创新和发展提供了新的思路。

3.5 微生物混凝土技术

在传统建筑材料中,混凝土由于其出色的机械性能和经济效益而被广泛使用,但其抗拉强度较低,对环境的敏感性导致其易出现裂缝,进而影响结构的完整性和安全性。常见的修复技术,如注入环氧树脂或水泥浆,虽然能暂时修复裂缝,但多数缺乏长期适应性,且在成本和环境影响方面表现不佳。由MICP发展而来的微生物自修复混凝土是一种创新型材料,它充分利用了微生物在特定条件下的生理活动来诱导碳酸钙的形成,从而实现混凝土裂缝的自动修复^[23-24]。这种材料的开发,不仅提升了混凝土结构的耐久性,还有效降低了维护和修复混凝土的经济成本。由于混凝土的固有碱性环境,通常选择能耐受高pH值的细菌,如巴氏芽孢杆菌(*Sporosarcina pasteurii*),以适应并有效工作于混凝土的碱性条件中。在制备自修复混凝土的过程中,除了传统的水泥、砂和水之外,还需引入这些细菌或其孢子以及必要的反应液(如尿素和钙源)。这些组分混合后,在混凝土硬化过程中构建出适合微生物生存的微环境。当混凝土出现裂缝时,外部氧气和水分的渗透会引起内部微环境的变化(例如pH值和湿度的变动),从而触发这些微生物的活性,促使其产生碳酸钙并逐步填补裂缝,恢复结构的完整性。这一过程不仅增强了混凝土的自愈能力,也提高了其耐久性和功能性。

3.6 工程案例

1) 微生物岛礁地基加固

在复杂地质环境下的人工吹填岛礁中,研究者通过交替倾倒微生物溶液和反应液进行钙质砂地基现场加固处理,通过自重渗流对钙质砂地基内部进行强化。表面贯入强度测试显示,4次加固后地基强度普遍提升,如图5所示。

2) 微生物边坡加固

Xiao等^[26]通过反复喷洒微生物菌液和反应液将



图5 岛礁地基加固^[25]

Fig. 5 Reinforcement of island foundation^[25]

微生物加固技术引入到土质边坡表面加固,如图 6 所示。在进行 0、3、6、12 次微生物处理后,对坡面进行 175 mm/h 的人工降雨试验,结果显示,随着处理次数的增加,碳酸钙含量增加,坡面对降雨的响应时间延长,湿润锋速度减慢,表面贯入阻力亦有所增加,表明微生物加固有效改变了土质边坡受降雨影响的侵蚀模式。



图 6 边坡微生物加固试验^[26]

Fig. 6 Microbially reinforced slope^[26]

3) 微生物防渗加固

Blauw 等^[27]在奥地利 Greifenstein 水电站的土坝上进行了生物防渗试验,如图 7 所示。结果表明,处理后的土体渗透系数显著降低,最高可降低两个数量级,且土样的平均强度增加了约 13%,表明微生物固结技术不仅能有效防渗,还能增强土体结构。

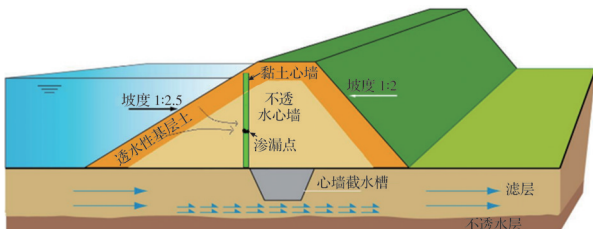


图 7 微生物修复奥地利格莱芬施泰因大坝横截面示意图^[27]

Fig. 7 Schematic cross-section of microbial remediation of the Greifenstein Dam in Austria^[27]

4) 微生物文物修复

与其他有机/无机修复材料相比,微生物加固方法修复的试样具有较好的强度、较小的色差和稳定的耐候性,并具有操作简单高效、塑形时效适宜、绿色无毒、环保性强等优点。刘汉龙等^[28]针对石质文物和骨质文物开展微生物加固修复,取得了较好的应用效果,如图 8、图 9 所示。微生物矿化修复技术开辟了文物修复的一条新路径。

5) 混凝土微生物自修复

Du 等^[30]开展了混凝土微生物自愈工程实践,与普通混凝土墙相比,微生物混凝土在有效治愈裂缝并减少裂缝数量,以及裂缝的平均长度、宽度和深度等方面取得了较好的应用效果,如图 10 所示。



图 8 微生物加固修复后的红井纪念碑^[28]

Fig. 8 Microbial repair for Hongjing monument^[28]

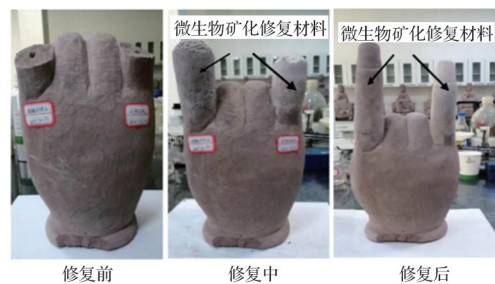


图 9 微生物修复石质佛指^[29]

Fig. 9 Microbial repair for status of rocky Buddha's fingers^[29]

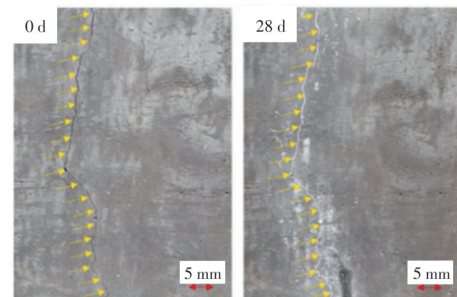


图 10 微生物混凝土自愈合^[30]

Fig. 10 Microbial self-healing concrete^[30]

6) 其他方面

微生物矿化技术除被应用于工程建造外,细菌菌丝和微藻类同样可应用于建筑体的构建。商务公司 MOGU 已经开始售卖由菌丝制成的建筑装饰材料,如墙砖和地板砖等。世界上第一座蘑菇砖塔于 2014 年在美国建成,如图 11 所示。

4 植物建造

植物建造在土木工程领域的应用展现了对可持续发展和生态友好建筑的追求。植物建造不仅将植物作为建筑物的装饰元素,更是将其融入建筑结构、材料和设计中,发挥其独特的生态功能和环境适应性。植物建造技术在土木工程中的应用不仅拓展了建筑设计的可能性,还为实现生态、节能、

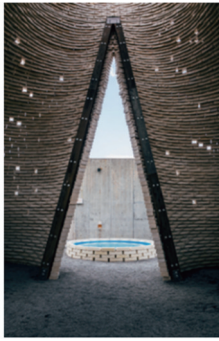


图11 世界第一座用蘑菇砖建成的建筑物^[31]

Fig. 11 The first architecture using mushroom brick^[31]

环保的建筑目标提供了重要路径。

4.1 植物建造理论

植物建造理论涉及生物力学、结构优化理论、复合材料理论、生物仿生学等理论,具有理论和概念相互交叉融合的特点,支撑植物材料在工程建造领域的应用。

植物建造中涉及的生物力学包括植物材料,如植物纤维的多尺度结构力学行为和植物不同尺度的水力运移机制,分别可为植物基纤维复合增强材料以及植物-土壤水力传输提供理论指导。结构优化理论涉及设计和改进植物材料的建筑结构,以使其在给定约束条件下达到最佳性能的方法和原理,主要涉及拓扑优化、形状优化、材料优化等。结构优化理论通常与数值模拟和计算机辅助设计工具结合使用,以快速评估不同设计方案的性能,并找到最优解。植物复合材料理论可考虑材料的组分特性、结构特性、界面特性等,通过植物组织中不同成分的结合方式、相互作用,以及协同工作的模式,从而形成具有特定性能和功能的复合建筑材料结构。Liu等^[32]总结了植物体内多尺度结构的生物力学特性及其对抗旱性能的影响,并研究了微流体、细胞弹性和分子热动力学特性在植物抗旱性方面的作用表现。戴靖沛等^[33]将根土复合体视为天然纤维增强复合材料,并根据均匀化理论提出了根土复合体的数值计算模型,从理论方面对植物根系土壤增强效果进行了分析。

根系固土理论研究内容主要涉及根土复合力学理论、植物生长机理、生态修复机理,包括土壤理化特性和重金属吸附性等^[34]。程洪等^[35]总结出根系与土体之间的力学作用机制,主要包括复合体的自重力、根系的吸附力,以及根土之间的相互作用力。Van Genuchten等^[36]、Wu^[37]、Schwarz等^[38]提出了根土复合体的本构模型和水力计算模型,奠定了根土复合体的理论力学基础。试验方面,植物种类对根系固土的效果影响较大,主要受根系长度、埋深、根径粗细程度等影响。学者们认为,随着根长的减小,

抗拉强度会下降,根系含水率呈现同样的规律,但根径的增加会影响含水率与抗拉强度之间的关系^[39]。土体的抗剪强度会随根系量的增加先增大后减小,存在一个最优值,强度的提高主要由黏聚力增大导致。植物根系对土体起到加筋作用,因此,根土复合体可认为是一种由植物根系和土组成的三维复合材料,通过加筋理论同样可以对根土复合体的力学特性进行解释^[32]。根系固土中非饱和土的水力与根系加筋耦合作用对植被边坡土体的稳定性具有重要作用。吴宏伟等^[40]修正了考虑植物根系形状的植被非饱和边坡孔隙水压解析方程,并提出了考虑水力作用和植物根系加筋作用的非饱和植被边坡安全系数,为不同植被边坡稳定性设计提供了理论基础。

4.2 植物建造材料

1) 天然植物材料

作为天然建筑材料,几千年来木材和竹子一直被用作建筑物的结构和装饰材料。这种源自自然、简单而又可靠的材料,以其优质的结构性能和多样化的装饰效果,成为建筑领域中不可或缺的一部分。木材作为建筑材料的历史可以追溯到人类文明的早期,在当时,人们就开始利用树木建造简单的住所和结构,如木屋、木桥等。木材的天然来源、易加工性和良好的结构强度,使其成为古代建筑的首选材料之一。竹子的轻质、坚韧、柔韧和可再生的特性,使其成了古代东亚建筑的主要材料之一^[41]。随着时间的推移,木材和竹子作为建筑材料的应用并未减弱,反而在现代建筑中得到了新的发展和创造。尽管现代建筑材料的种类繁多,但木材和竹子因其独特的性能和环保的优势,仍然受到重视。在当代建筑中,木结构建筑、竹结构建筑和木竹混合结构建筑等形式层出不穷,成为可持续建筑和绿色建筑的重要组成部分^[42]。

植物加筋材料是一种以植物纤维为主的加强建筑材料,其将植物纤维与其他材料相结合,形成一种具有较高强度和耐久性的复合材料,可用于建筑结构和工程项目中^[43]。植物加筋材料不仅具有优良的机械性能,还具有环保、可再生和低碳的特点,符合当今社会对于可持续建筑和绿色发展的追求。植物纤维,如竹子、麻、棉等,具有良好的拉伸强度和耐磨性,可以有效增强材料的抗拉、抗弯和抗冲击性能。植物加筋材料具有良好的环保性能,与金属、玻璃纤维等传统合成材料相比,其具有可再生性和生物降解性,不会对环境造成污染或危害^[44]。

2) 植物基改性建筑材料

植物基改性建筑材料是指以植物为原料或来

源,通过一定的加工方式,如化学处理、热处理等,生产得到的建筑材料,具有环保、可再生、低碳排放等共性,在建筑行业中受到越来越多的关注和应用^[45]。与传统的石油基合成材料相比,植物基建筑材料生产过程中不会产生有害气体和废弃物,从而减少了对环境的污染和破坏^[46]。除了环保、可再生和低排放等共性特点之外,植物基建筑材料还具有一系列的优良性能和广泛的应用前景。例如,具有良好的机械性能、隔热保温性能、吸音隔音性能等,在建筑结构、装修装饰、保温隔热、土壤改良等方面都应用广泛^[47]。在当前全球建设绿色建筑和可持续建筑的背景下,植物基改性建筑材料将会成为建筑行业的重要发展方向和主流趋势。

通过将生物油代替部分沥青形成混合物,生物沥青具备代替传统化石沥青的潜力^[48]。生物油可通过植物材料,如稻壳等,快速热裂解或者水热液化的方式制备,与化石沥青具有较高的相容性,能够填充沥青的间隙,与老化沥青结合,起到修复再生的作用^[49]。同时,生物沥青对化石沥青的耐久性和抗冻性起到优化作用,但耐高温性较差^[50]。生物沥青在土木工程领域有着广泛的应用前景,不仅可以满足路面建筑材料的需求,还能促进环境友好型的工程材料发展。木质素改性沥青是一种环保型植物基建筑材料。木质素是植物细胞壁的主要成分之一,主要来源于木材或植物纤维,可从造纸和乙醇生产的废弃物中得到^[51]。在道路建设中,木质素沥青被应用于路面的铺设和修复,能代替传统化石沥青,并具有提高道路耐久性和承载力的能力^[52]。

硅藻土是一种由硅藻遗骸组成的天然材料,主要成分为二氧化硅,其具有多孔性、吸水性强、化学稳定性好等特点。在土木工程中,作为一种多功能材料,硅藻土被广泛应用于多个领域,包括建筑隔声、土壤改良、水处理、制备胶凝材料等^[53]。在建筑内部,可以将硅藻土板材或墙面涂料等材料应用于隔声墙、天花板等位置,有效地吸收和隔离声音,提高建筑的声学环境质量^[54]。与传统的隔声材料相比,硅藻土具有环保、无毒、无污染等优点。硅藻土中含有丰富的微量元素和矿物质,对土壤有着良好的改良作用。在工程中,人们常将硅藻土与土壤混合使用,用于改良土壤的结构和性质。硅藻土可以改善土壤的通气性和保水性,增加土壤的肥力,改善植物的生长环境和地基土的工程性质^[55]。此外,硅藻土具有良好的吸附性能,可以吸附水中的有机物、重金属和细菌等有害物质,起到净化水质的作用^[56]。

生物炭是一种新型的环保降碳材料,由固废通

过无氧或者限氧热解的方式制备。由于制备过程中氧气参与反应有限,避免了二氧化碳的生成量,能够实现碳固定的作用^[57]。同时,热解过程的副产物如焦油等能够作为燃料进行回收利用^[58]。生物炭的原材料包括农作物秸秆、废弃木材等,常被以焚烧的方式进行销毁,据统计,每年因焚烧农作物秸秆产生的碳排放总量约为 4.77×10^7 t^[50]。因此,以热解方式对固废进行资源化利用,既能起到降碳减排的作用,又能获得具有较高功能属性的生物炭,对环境保护起到积极的促进作用。在土木工程领域,作为一种多功能材料,生物炭具有广阔的应用前景。生物炭具有丰富的孔隙结构和高比表面积,能增加土壤的通气性、保水性和肥力,改善土壤的物理结构和化学性质^[59]。生物炭具有良好的吸附和解吸性能,能吸附水中的有机物、重金属、农药残留等有害物质,起到净化水质的作用^[60-61]。生物炭还能与水泥、石灰、沥青等常用建筑材料混合使用,用于制备新型建筑材料,如生物炭混凝土、生物炭砖、生物炭沥青等^[62]。这些新型建筑材料具有轻质、保温、隔声、吸湿调湿等特点,适用于建筑物的结构、装饰和环保等领域,为土木工程材料提供了更多的选择和可能性。

4.3 植物建造技术

1) 植物源脲酶矿化加固技术

与微生物加固技术的原理相似,植物源脲酶诱导碳酸钙沉淀加固技术(EICP)是从植物材料中提取脲酶,常见的如大豆和刀豆等^[63]。具体方式为将大豆或者其他种子磨成粉并充分混合在水中,通过离心提纯取得含有较高浓度的脲酶溶液,与尿素和钙离子溶液混合后即可生成碳酸钙沉淀。碳酸钙沉淀能够填充土壤孔隙,胶结土颗粒,实现土体加固的作用。与MICP相比,EICP具有较高的环境适应性,能够在MICP加固条件无法保障的情况下使用,如EICP加固不需要氧气,且脲酶分子尺寸很小,在细粒土加固和微裂隙封堵方面具有更好的应用效果^[64]。然而,由于缺少细菌作为成核位点,EICP加固的均匀性可能较差^[65]。目前,国内外学者开展了大量EICP加固土体试验研究,从不同尺度分析了EICP加固土体的加固机理和技术路线,取得了丰富的研究成果。Cui等^[66]提出使用单相低pH的方法进行土体加固,在这种方法中,将 $\text{pH} = 6.5$ 的脲酶溶液与尿素、氯化钙混合而成的EICP溶液注入土壤。试验结果表明,与常规两相EICP法相比,单相低pH法能显著提高钙的转化效率和砂样中碳酸钙分布的均匀性。此外,单相低pH法处理砂的无侧限抗压强度远高于两相法处理砂的无侧

限抗压强度,而且由于注入次数少,单相低pH法也更简单、更有效。Zhang等^[67]针对海岸线的砂土坡进行了EICP加固并开展了水槽冲蚀试验,试验结果表明,EICP能有效提高砂坡的表面强度和抗侵蚀能力。Miao等^[68]利用EICP技术在腾格里沙漠乌马公路两侧进行了6万m²的现场固沙试验,现场应用效果表明,EICP能有效提高沙漠沙表面的稳定性,从而提高抗风蚀能力,并且能促进沙漠表面植物的生长。可见,EICP技术可作为一种绿色和低碳技术用于土体加固,是植物建造方面的代表性新技术之一,具有较高的发展潜力。

2)植物加筋技术

植物加筋技术主要指利用植物纤维对土体的加筋作用,以提高土体的整体稳定性。常见的植物纤维有剑麻纤维、棕榈纤维、水稻小麦秸秆纤维等。一定掺量的植物纤维能增大土体的黏聚力、强度和内摩擦角,提升土体的工程性质。目前,植物加筋技术已应用于边坡、挡墙、路基等工程加固中,取得了较好的应用效果。植物纤维能提升土体的抗压和抗剪强度。张心语^[69]探究了油菜籽壳、花生壳和黄豆壳对土体的加筋作用,发现不同种类的植物壳最优掺量有所区别,分别在0.3%和0.8%达到无侧限和直剪强度的最大值。李丽华等^[70]探究了水稻秸秆加筋土的力学特性和植生特性,发现当秸秆纤维掺量小于0.3%时,掺量的增加会促进秸秆与土颗粒之间的接触面积,能增加土体的密实度,从而实现土体强度的提高。当纤维掺量大于0.3%时,秸秆和秸秆之间的接触面积会随着掺量的增加而提高,从而弱化了土体的强度。植物纤维能提高土体的动强度。Kafodya等^[71]探究了剑麻纤维对土体动力特性的影响。25 mm长度的剑麻纤维含量小于0.5%时,土的剪切模量呈增长趋势,当纤维掺量大于0.5%时,土体内部孔隙增加导致土体刚度降低。植物纤维的增加增大了土体的阻尼比,并减小了土体永久变形。此外,水分含量对植物纤维加固土的力学特性有显著影响。植物纤维的多孔结构对水分十分敏感,较高的土体孔隙率会与纤维耦合形成渗水通道,降低加固土的强度^[72]。因此,高的土体密实度对确保植物纤维加筋土的强度十分重要。植物加筋挡墙是植物加筋土工程应用的典型代表,主要形式包括土工格栅包加筋土挡墙和绿色加筋格宾挡墙。通过将土工格栅包叠成墙体,包内填充种植土,可快速形成绿化效果,格栅包通常使用麻布袋材质,不易老化。绿色加筋格宾挡墙是利用钢筋形成墙体,通过在墙内种植植物,形成墙体的绿

化和植物根系的辅助加固作用。以上两种方法利用了植物根系的加筋作用,将根系看作纤维,植物的生长能够不断加深加筋效果,不断提高加筋墙体的稳定性,是土体绿色加固技术的代表^[73]。

4.4 工程案例

1)木竹结构

木结构建筑曾经是主流建筑形式。随着工业革命的到来,钢铁和混凝土等新材料的广泛应用,木结构建筑逐渐被取代,陷入了衰落。然而,随着环境保护意识的增强和对可持续建筑的需求,木结构建筑重新受到重视,开始复兴。现代木结构建筑不仅在设计理念上更加创新,还利用了先进的建筑技术和工程方法,如计算机辅助设计、数字化制造等。现代木结构建筑既注重建筑的功能性和实用性,又追求建筑的艺术性和环保性,成了建筑领域的重要发展方向。典型的现代木结构代表之一是瑞典的Skellefteå文化中心(Skellefteå Cultural Centre),如图12所示。该建筑采用了大量的木结构,建筑外观简洁现代,内部空间采用了大面积的木质元素,包括木梁、木柱、木地板等,营造出温馨、舒适的氛围。建筑采用了多层次的木结构,形成了多样化的空间布局,满足了不同功能和活动的需求。

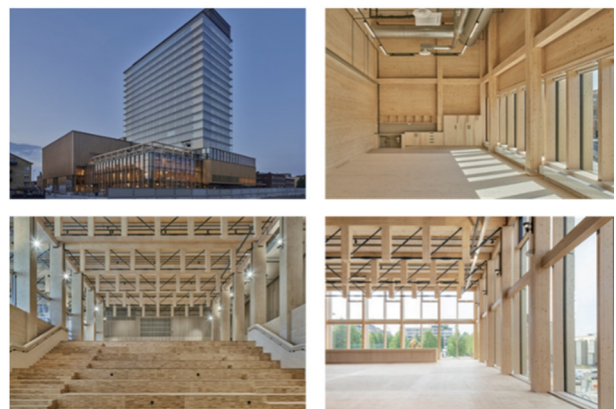


图12 瑞典Skellefteå文化中心木结构^[74]

Fig. 12 Wood structure of Skellefteå culture centre in Sweden^[74]

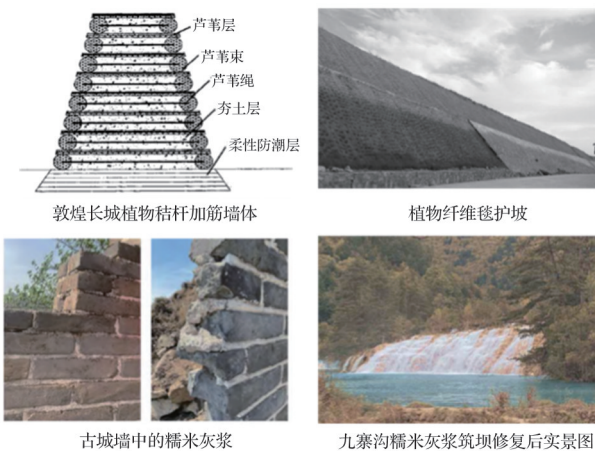
竹结构与木结构的发展史相似,但因竹子地域性分布的特点,竹结构建筑在高纬度地区比较少见。中国具有代表性的竹结构建筑物有苗族吊脚楼和傣族竹楼。可以通过计算分析等手段实现现代竹结构建筑更加复杂的结构,如印度尼西亚巴厘岛的竹制体育馆,越南Cuc Phuong国家公园内的竹顶餐厅,如图13所示。

2)植物纤维和胶黏剂

早在几千年前,中国敦煌汉长城中以芦苇等植物作为加筋材料嵌入夯土墙内,实现增强城墙本体

图 13 典型的竹子结构^[75-78]Fig. 13 Typical structure of bamboo structure^[75-78]

结构性的作用。植物纤维在岩土工程中具有很好的工程应用前景,最为典型的是植物纤维毯^[79]。植物纤维毯是一种利用植物纤维制成的覆盖材料,常用于土壤保护、植被恢复和生态修复等领域,具有生物降解性和环保性。此外,除了植物纤维在建筑工程中的应用,植物基黏合剂同样在人类建筑史上发挥了不可替代的作用,最为典型的应用为糯米灰浆^[80]。糯米灰浆又称为中国古代水泥,是将糯米煮烂与石灰混合,形成一种天然的黏合剂。糯米浆中的支链淀粉与石灰发生交联反应,使得粘结更为牢固。长城城墙、福建土楼等古代建筑物都使用了糯米浆作为建筑材料,建筑体几百年依旧大致保存完整。糯米浆在现代工程中仍得到应用,如汶川地震后九寨沟景区的修复就使用了大量的糯米灰浆代替水泥^[81],实现了环境保护的要求,如图 14 所示。

图 14 植物纤维和胶黏剂在工程中的应用^[82-85]Fig. 14 Plant based fibre and glue for engineering application^[82-85]

3) 生物炭、硅藻土和生物沥青

在土壤改良、植物生长促进、水体污染治理、土壤稳定化和生态修复等方面,学者们利用生物炭开

展了现场工程应用。Cui等^[86]通过两年的现场试验发现,生物炭在重金属污染稻田铬吸收控制方面具有良好的应用效果,水稻的铬吸收率下降50%以上。Guo等^[87]利用花生壳生物炭对一垃圾填埋场上覆土体进行改良,3年的试验发现,通过生物炭改良,植物根系密度提高了100%,强降雨后生物炭和植物根系协同作用土壤基质吸力同样提高了100%,如图 15 所示。朱健等^[88]发现,硅藻土能够稳定土壤中的Cd,稳定率在57%左右。蔡德龙等^[89]发现硅肥的施加能够提升苹果产量10%左右。刘珺等^[90]发现,掺量为2%、硅藻土焙烧温度为800℃条件下,水泥基材料的抗压强度能提高28%。硅藻土隔热砖也成为较为成熟的产品,如图 16 所示。有学者^[91]认为硅藻土改善水泥基强度的机理在于其较高的保水能力能延长水泥水化反应时间,使得水化反应更为充分。生物沥青可通过将生物油混入石油沥青进行制备,植物秸秆的液化产物与石油沥青具有较高的相容性^[92]。据荷兰瓦赫宁根大学推算,使用木质素沥青能使路面建设产生的碳排放降低70%^[93],如图 16 所示。生物沥青已在荷兰、比利时等国家的多个道路得到应用。

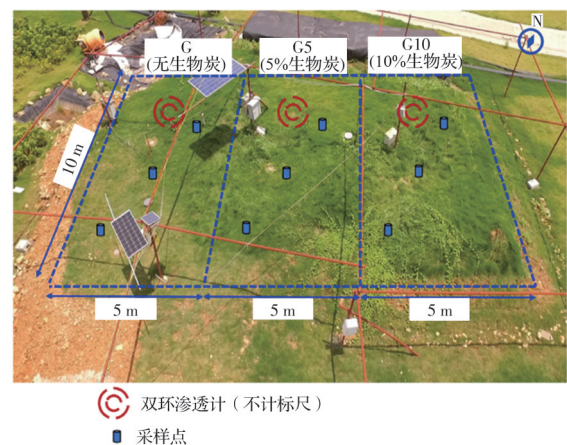


图 15 生物炭修复深圳垃圾填埋场上覆土壤现场试验^[87]
Fig. 15 Field test of biochar remediation of overlying soil in Shenzhen landfill^[87]

5 动物建造

动物建造是利用动物体内的材料或动物行为进行工程建造或者生产建筑材料的一种建造技术。动物建造可以分为动物本体的建造行为和利用动物材料进行建造。在历史上,人类利用动物进行生产生活的做法非常普遍,涵盖了多个方面,包括农业和工业等领域。自然界中,动物本体具有一定的建造能力,可称之为动物建筑家。蚯蚓和船蛆等能在土壤、木头内钻孔打洞,蚂蚁通过分泌纤维素与多肽寡糖物质结合砂子、泥土来建造巢穴等^[97]。自

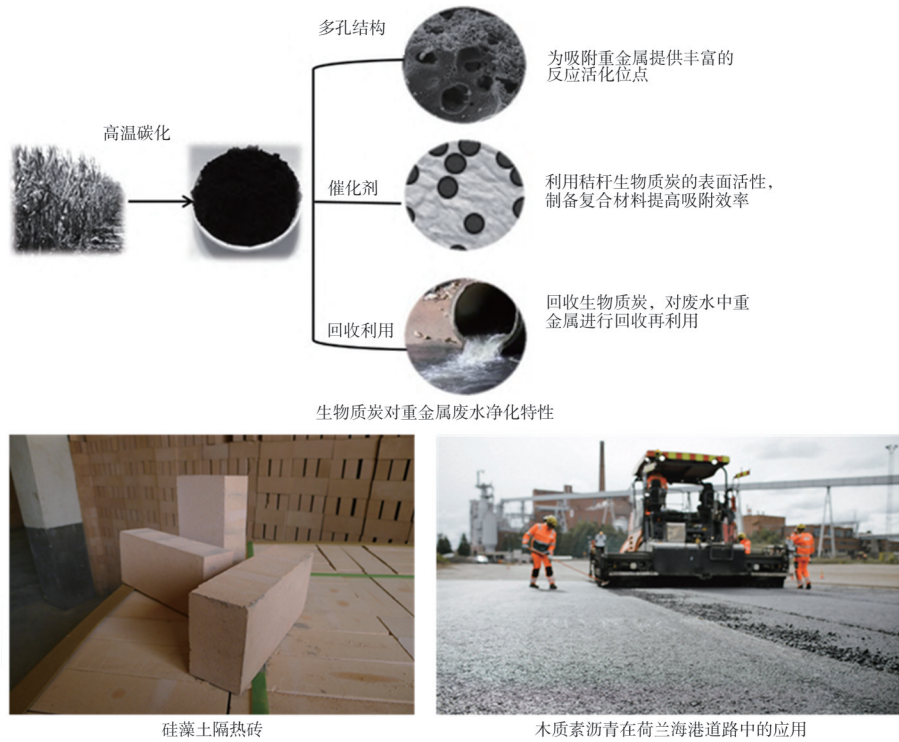


图 16 生物炭、硅藻土和生物沥青的工程应用^[94-96]
 Fig. 16 Engineering application of biochar, diatomite and bioasphalt^[94-96]

自然界众多精巧的动物建造方案中,只有少数可被人类直接利用,笔者主要探讨与人类工程建造直接相关的动物建造技术,从动物本体建造技术和动物源建筑材料出发,搭建动物建造方向的结构体系。

5.1 动物本体建造

珊瑚岛礁是动物建造体被人类使用的代表性案例。珊瑚岛礁是由珊瑚虫骨骼堆积而成的石灰岩结构,是海洋中重要的生态系统之一。它们不仅为海洋生物提供栖息地,也保护海岸线免受侵蚀。天然珊瑚礁是人工填岛的绝佳位置,为人工岛提供稳定的基础,通过将海底土(如珊瑚砂等)吹填至指定天然珊瑚岛礁而形成人工珊瑚岛。

珊瑚岛礁的形成是一个缓慢而复杂的过程,需要数千甚至数万年的时间。它主要经历以下几个阶段^[98]:1)珊瑚虫分泌碳酸钙,形成骨骼,这些骨骼相互联结,形成珊瑚礁;2)随着珊瑚虫的不断繁殖和死亡,它们的骨骼逐渐堆积,珊瑚礁逐渐扩大,珊瑚礁的生长速度很慢,每年通常只有几厘米;3)珊瑚礁会随着海平面的变化、地震、火山活动等因素而不断演化,例如,当海平面上升时,珊瑚礁会向上生长,形成环礁或堡礁;当海平面下降时,珊瑚礁会暴露在空气中,形成陆地。然而,填海造岛可能对珊瑚礁生态系统造成严重破坏,对周边海洋生物群落和生态平衡产生负面影响。

同样是在海洋,“牡蛎护堤”是人类利用动物建造的典型案例之一^[99]。“牡蛎护堤”是一种生态工程

措施,旨在利用牡蛎养殖来保护海岸免受海浪侵蚀和风暴潮的影响。其利用牡蛎的生长习性和贝壳的结构特点,将牡蛎人工种植在海岸线附近水域,形成一个类似于天然堤坝的结构。牡蛎的贝壳可以附着并固定沉积物,形成牢固的岩礁,从而减缓海浪的冲击力,保护沿岸地区免受海水侵蚀。此外,牡蛎养殖还能改善水质,提供生态栖息地,并促进海洋生物多样性。牡蛎护堤已经在一些地方得到了广泛应用,特别是在需要加强海岸保护和生态恢复的地区。这种生态工程措施在维护海岸生态系统平衡和保护沿岸社区方面发挥了重要作用。

5.2 动物源建筑材料

动物源建筑材料指的是来源于动物本体的、可用于人类建造的天然材料,如动物毛发、皮革、骨骼、尿液,甚至是血液等。历史上建筑技术不发达时期,人类曾使用动物骨骼作为建筑体的结构材料。爱斯基摩人(也称为因纽特人)生活在北极地区,过去常常使用鲸鱼骨来搭建房屋^[100]。在这种房屋建造中,鲸鱼骨是一种非常重要的结构材料。鲸鱼骨通常来源于已经死亡的鲸鱼,爱斯基摩人会将这些骨骼收集起来,然后用它们来搭建房屋的框架。动物的毛发可作为加筋材料。在古代欧洲,特别是在北欧和东欧地区,人们常常使用马毛作为填充材料来增加建筑物的保温性能^[101]。随着科技的进步和建筑材料的发展,使用马毛作为墙体材料的

做法逐渐减少。现代建筑中,人们更倾向于使用更加先进的隔热材料和绝缘材料,如聚苯板、玻璃棉等,来提高建筑物的保温性能和舒适度^[102]。此外,动物皮革是古时人类常用的建筑材料,经常用于制作帐篷和遮阳篷,特别是在游牧民族和沙漠地区。动物皮革具有良好的柔韧性和耐久性,能提供防风、防水和遮阳的功能。生蚝作为常见的贝类生物,也有用作建筑材料的历史,明代陈懋仁的《泉南杂志》和宋应星的《天工开物》都有使用蚝灰作为建筑胶结材料的做法。

5.3 工程案例

中国南海西沙市分布着大量珊瑚岛礁,如图 17 所示。吴佳庆等^[103]对永兴岛岩心进行了化学分析,岩心成分主要为骨架灰岩和生物碎屑,且珊瑚礁的成分较为单一,大部分为碳酸盐类方解石,极少部分的生物化石中发现了文石,研究成果反映了珊瑚

礁的成岩机理。



图 17 西沙珊瑚岛^[104]

Fig. 17 Coral island in Xisha^[104]

泉州洛阳桥是中国福建省泉州市一座历史悠久的古桥,建于唐代,距今已有千余年的历史。在桥墩加固方面,使用了牡蛎等特殊材料,使得桥墩更加坚固。在福建泉州和广东珠三角地区有使用蚝壳作为墙体材料的习惯,如图 18 所示。



○牡蛎

○洛阳桥的桥基部位养殖了大量的牡蛎

○营固着生活的牡蛎

图 18 福建洛阳桥牡蛎固基^[105]

Fig. 18 Oyster foundation protection for Luoyang Bridge in Fujian^[105]

人类历史上,有使用尿液作为建筑黏合剂的记载,如在乌兹别克斯坦 Khoja Zaynuddin 清真寺的墙体内发现了尿液的成分^[106]。近年来,随着生物诱导碳酸钙胶结技术的发展,尿液中的尿素可作为生产要素之一用于制作微生物砖块。此外,欧洲空间研究与技术中心正试验将尿液作为月球建造中的胶结材料,如图 19 所示,含有 3% 重量尿液的 3D 打印体强度能达到 10 MPa 以上,为月球建造工程材料提供了全新思路^[107]。根据《天工开物》记载,古代城

墙建造中会将猪血混入砂浆中,以提高砂浆的抗水性。Dinç-Şengönül 等^[108]验证了混入动物血的石灰砂浆具有较高的抗冻融性。可见,在人类工程建造中,动物材料一直是不可或缺的一部分,在未来建造中仍可发挥作用。

6 仿生建造

仿生建造是运用生物界中发现的机理和规律来解决实际复杂工程问题的综合性交叉建造模式。仿生建造的主要研究思路是提出生物学或者物理模型并应用于工程建造。仿生建造技术主要涉及形态仿生、结构仿生、功能仿生、材料仿生、控制仿生等。伴随着城市化进程的推进,人们对高层建筑和地下空间的需求日益增长,对坚固的土木建筑材料、高效的开挖方法、精确的测试仪器以及创新的土木工程理论和技术的的需求也与日俱增。通过研究自然界中生物的强化和增韧、憎水和憎冰、摩擦各向异性以及钻探和挖掘过程中的脱附减阻等现



图 19 尿液作为胶结剂的月壤 3D 打印构件^[107]

Fig. 19 Lunar soil 3D printed components using urine as cement^[107]

象^[109],并模仿生物的外部形态、结构特征或运动机理,也可以为土木工程创新和可持续发展提供新思路、新原理和创新理论。

6.1 仿生建造理论

仿生建造是将生物学原理和自然系统中的设计理念应用到工程建造领域的一种方法,是一个学科交叉复杂的研究方向,涉及生物结构与功能理论、生物材料与材料科学理论、生物力学理论、信号与控制理论、材料和结构力学理论等^[110]。如生物结构与功能理论是生物学中的一个核心理论,指的是生物体内部结构与其功能之间的关系^[111]。生物体结构与功能的密切关系使其能适应生存环境。例如,鸟类的翅膀结构适合飞行,鱼类的鳃结构适合在水中呼吸。对生物结构与功能的深入理解为仿生建造提供了重要的基础。通过模仿生物体的结构与功能,人类能设计出各种新型的建筑结构、建筑材料和建造技术。

6.2 仿生建造技术

仿生建造技术是一种融合了生物学原理和工程学方法的创新技术,旨在通过模仿自然界的生物系统,设计和构建具有更高效、更环保和更智能特性的工程技术。仿生建造技术可分为仿生结构构件和仿生构筑物。

仿生结构汲取了生物界独特的设计灵感,可以将其应用于技术创新和工程设计中。通过深入研究生物系统的精密结构和功能,如昆虫的翅膀、植物的结构、动物的运动方式等。仿生结构的美妙之处在于,它不仅仅是单纯地模仿自然,更是通过理解生物系统的原理和机制,创造出新的解决方案。如由竹子结构仿生研发的吸能薄壁钢管,相较于等直径钢管,具有更高的吸能性,更轻的重量,能够节省钢材使用量^[112]。仿生构筑物是指建筑物整体设计上受到生物系统、生物结构或生物过程的启发而设计的建筑。这种建筑的设计可能从自然界中的生物体形态、行为、结构等方面获取灵感,并将其应用于建筑的设计和功能上。仿生构筑物可能整体上具有生物体的形态、结构或特征,或者在功能性上模仿生物体的生态系统。壳体建筑是典型的仿生建筑物,通过将建筑物的形貌设计成仿龟壳、贝壳甚至蛋壳等形式。壳体建筑通常采用曲线形态,其外观通常呈现出流畅的曲线和连续的表面,能够实现高度的结构效率和承载能力^[113]。与传统建筑结构相比,壳体建筑通常具有较高的自支撑性,即其结构能够在不需要大量支撑柱或梁的情况下实现跨度较大的空间覆盖。竹子结构也是一种力学性能优异的建筑形式,每段节杆受力弯曲变形的能

力基本一致,是一种近似的“等强度杆”^[114]。利用这种优良的力学特性,设计了台北101大厦、吉隆坡双子塔等著名建筑。

6.3 仿生建造材料

仿生建造材料是通过模仿生物系统的结构、功能和性能来设计和生产的建筑材料。这种材料的设计灵感源自大自然,利用生物体内的机制和特征,以创新的方式解决建造领域的挑战。仿生建造材料已经成为建筑工程领域的一项重要创新,如荷叶表面有一层超疏水材料,使得水流聚股流下,冲洗淤泥。在超高分辨率显微镜下可以清晰看到,荷叶表面上有许多微小的“小山包”,灰尘、雨水等降落在这种结构的叶面上后,隔着一层极薄的空气,只能同叶面上“山包”的凸顶形成几个点接触。仿生混凝土通过模仿“荷叶效应”设计理念,以实现“透气不透水”的功能^[115]。为了克服海水的高流动性,海洋无脊椎动物能够将自己附着在水中的各种物体上。这种附着与其生理功能密切相关,如蜕皮和生物矿化,它们使用的黏合剂是一种天然生物分子材料,在大多数情况下是蛋白复合物。受此启发,科研人员研发了含多巴和多巴类似物的共聚物仿生黏合剂,其强度能达到商用胶水强度^[116]。

6.4 仿生建造装备

在建筑工程领域,随着科技的不断进步和人们对可持续发展的追求,仿生建造装备正逐渐成为关注的焦点。通过仿生学原理的运用,研究人员致力于设计和优化工程设备,以提高施工效率、降低能源消耗、减少对环境的影响,并增强设备的适应性和稳定性。仿生建造设备借鉴了动物和植物在自然进化中某方面获得的先天优势,并将这种优势整合进工程建造装备中。这种趋势不仅在技术层面上推动了施工行业的发展,也引领着建筑工程向更加可持续和智能化的方向迈进。如地下工程中,人们通过借鉴洞穴动物的运动和生活方式研发了地下开挖装备,工程效率得到提升。通过借鉴甲壳类生物的耐磨特性,研究人员研发了具有自修复性的仿生钻探设备,工程设备的耐久性得到提升,工程造价降低^[117]。目前岩土工程钻孔取样需要大型设备施工,且需要耗费大量人力。通过模仿蛭子等生物的掘进行为,有学者研发了自动掘进机器人,其具有小巧灵活、能实现快速挖掘的潜力^[118]。

6.5 工程案例

1) 仿蚁巢、蜂巢建筑

形态仿生建筑主要以自然界的生物形态或生物住所形态为灵感设计而成,如北京鸟巢体育馆是以鸟巢结构为原型进行设计,印度莲花寺灵感来源

于莲花的形貌。白蚁巢结构具有较好的通风降温能力,基于此建造了津巴布韦首都东门购物与办公中心大楼,如图 20 所示。六边形是最优质的拓扑结构,自然界中蜜蜂蜂巢就是以六边形为单元结构体建造而成。以此为启发,阿卜杜拉国王石油研究中心以六边形棱柱为结构构成了晶格系统,实现了材料用量的优化并与自然环境相协调,如图 21 所示。

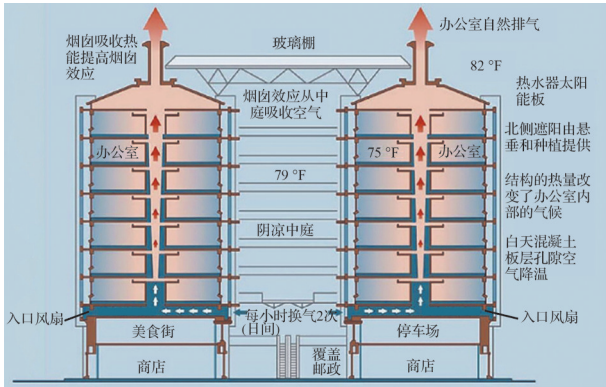


图 20 津巴布韦首都的仿蚁巢建筑^[119]

Fig. 20 Ant-nest-biomimic building in Zimbabwe's capital^[119]



图 21 阿卜杜拉国王石油研究中心^[120]

Fig. 21 King Abdullah Petroleum Research Center^[120]

2) 仿生超疏水材料与仿生胶结剂

考虑到荷叶表面结构超疏水特性的工程应用价值,众多科学家开展了荷叶相关的仿生研究,促进了人造超疏水材料的诞生。作为一种新型功能材料,超疏水材料可以应用于金属、木材和混凝土等材料表面,保护物质结构,因此得以在土木工程领域广泛应用,如混凝土路面、堤坝和文物保护等方面,如图 22 所示。

蚂蚁、沙堡蠕虫等生物通过分泌凝胶类物质进行巢穴搭建,基于此类天然生物黏性物质,学者们提出并设计了仿生胶水类产品。如 Xu 等^[122]通过将正负多糖类和蛋白质类生物聚合物混合,制备了具有高黏度的生物黏合剂,此类生物黏合剂可作为环境友好型建筑材料用于未来绿色生物建造。作为仿生材料设计研究中的热点,贝壳珍珠母是一种

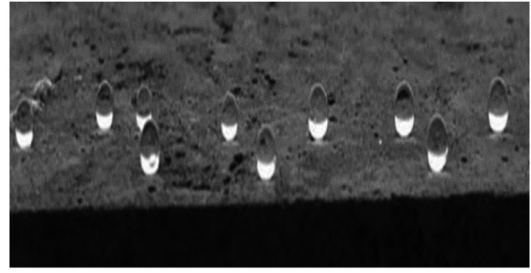


图 22 超疏水混凝土表面^[121]

Fig. 22 Superhydrophobic concrete surface^[121]

片状陶瓷材料,具有超强的断裂韧性,比脆性文石的断裂韧性高出几个数量级。微观尺度上,它具有砌墙式的砖泥结构,其中“砖”是碳酸钙薄片,“泥”是几丁质等有机物。

3) 仿生盾构机、仿生挖掘机和仿生钻头

盾构机是模仿船蛆掘进过程的典型施工装备。在钻孔过程中,船蛆自身能够分泌出一种黏液,这种黏液会形成薄薄的石灰质的白色管子,将其柔软的身体保护起来,避免在钻洞过程中与木材摩擦而导致受伤,如图 23 所示。受此启发,盾构机通过刀盘的刀片将岩石或者土削下来,从入口进入排土系统,经过内部管道运输到隧道外,并将管片拼成支撑结构,不仅可以保护施工人员,也能防止塌方,如图 24 所示。



图 23 船蛆及其外壳^[123]

Fig. 23 Shipworm and its shell^[123]

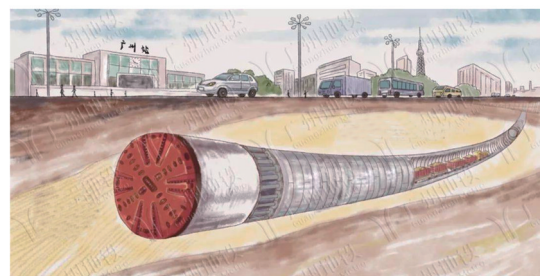


图 24 盾构机施工示意图^[124]

Fig. 24 Schematic diagram of shield machine construction^[124]

通过模仿蛭子特异的钻孔机制,麻省理工学院设计出了一款新式挖掘机械——Roboclam^[125],如图

25 所示。研究发现,蛭子的足不停地在泥潭中进行伸缩运动,将疏松介质局部流化,能降低 90% 的能耗。仿生研制的原型机 Roboclam 是一种简单的水下挖掘机,其由一个带两个气动活塞的控制平台组成,与大西洋刀蛭用它的足来上下移动贝壳不同的是,Roboclam 通过一个更简单的机械装置——气动活塞来模仿蛭子壳的运动,使周围的风化层局部流化,然后上下移动驱动末端执行器。末端执行器密封在橡胶套里,长为 9.97 cm,宽为 1.52 cm,其掘进速度与生物相当,能产生与成年蛭子相同的收缩位移,通过双锚原理和流化作用挖掘,能以 0.8 cm/s 的挖掘速度挖至 20 m 的深度。

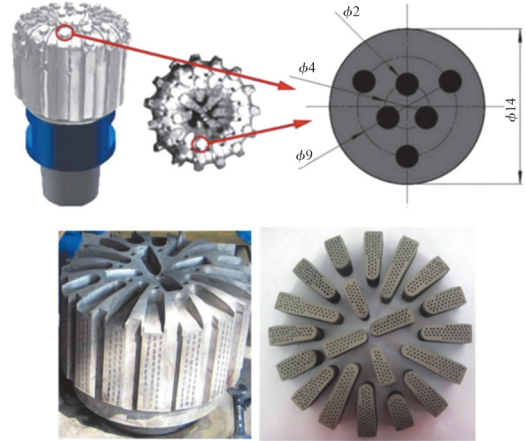


图 26 仿生耦合孕镶金刚石钻头^[126-127]

Fig. 26 Bionic coupling impregnated diamond drill bit^[126-127]

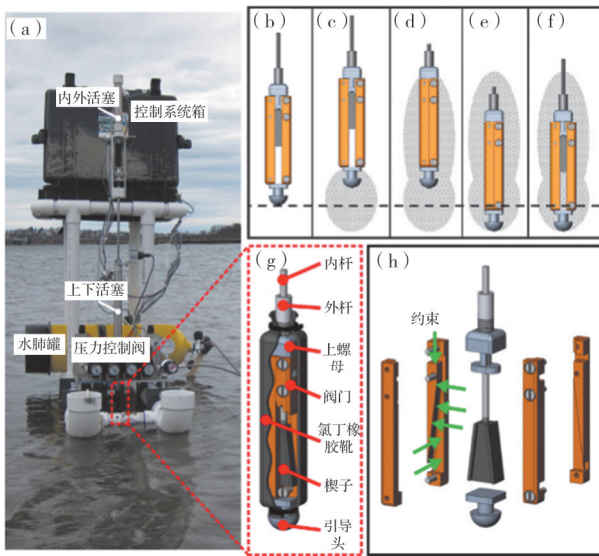


图 25 Roboclam 掘进过程示意图^[125]

Fig. 25 Schematic diagram of Roboclam excavation process^[125]

王照智^[126]、孙友宏等^[127]研发了仿生耦合孕镶金刚石钻头,该钻头具有磨屑捕集、自润滑、减黏脱附等诸多增益特性,能够提高岩土体开挖的效率和降低开挖成本,如图 26 所示。

7 生物建造展望

当今社会,人们对土木建筑行业的未来充满期待与探索的欲望。随着科技的不断进步和人类对环境的日益重视,作为一种新的建造理念,生物建造正逐渐崭露头角,成为未来土木工程建造的一大发展趋势。它将生物多样性、可再生性、高效性和生态友好性融入建筑设计和建造过程中,旨在创造更加健康、环保和可持续的工程建造环境。生物建造可以在建筑理论、材料、技术及装备的选择上提供更多元化的可能性。传统建筑材料,如混凝土等往往存在资源消耗大、能源消耗高、污染严重且难以降解等难题,而生物建造则可以利用生物质材料,如微生物、植物、动物材料等,这些材料天然环

保、可再生、易于获取,能够降低工程建造对于自然资源的依赖,减少对于环境的影响。

生物建造有望推动建筑的生态化和智能化发展,其不仅关注建筑材料的可持续性,还注重工程建设与自然环境的融合。通过结合生物学原理,可以设计出具有自洁、自修、自保护等特性的建筑,使建筑更加适应周围环境的变化。同时,生物建造也能促进建筑与智能技术的结合,打造智能生态建筑,实现能源高效、智能管理、人性化、生态化的目标。智能建造技术,如 3D 打印、人工智能、物联网等已经在建筑领域得到广泛应用,而生物建造则为这些技术提供了更加丰富的应用场景和可能性。例如,利用智能建造技术和生物建造原理,可以为月球等地球外人类栖息地的建设提供全新的建设思路。

生物建造是一个全新的概念,为未来第五代土木工程建造提出了新的方向。然而生物建造理论、技术、材料、装备和检测检验方法等还需要进行深入系统的研究。笔者仅做了初步探索,希望能够抛砖引玉,引起同行的高度关注,共同开展研究,以推动土木行业向着更加生态化和可持续化的方向迈进,为人类创造出更加美好、健康、可持续的建筑环境。

致谢:在本文成稿过程中,重庆大学微生物岩土创新团队进行了深入探讨并给予了充分建议,谨表诚挚谢意。

参考文献

[1] YANG Y C, YU S Y, ZHU Y Z, et al. The making of fired clay bricks in China some 5000 years ago [J]. Archaeometry, 2014, 56(2): 220-227.
[2] HALSTEAD P E. The early history of Portland cement

- [J]. Transactions of the Newcomen Society, 1961, 34 (1): 37-54.
- [3] 周绪红. 智能建造关键技术研究[J]. 工程建设标准化, 2023(9): 55-57.
ZHOU X H. Research on key technologies of intelligent construction [J]. Standardization of Engineering Construction, 2023(9): 55-57. (in Chinese)
- [4] Global Cement and Concrete Association. GCCA Cement Industry Progress Report 2023. [R/OL]. https://gccassociation.org/wp-content/uploads/2023/11/GCCA_Cement_Industry_Progress_Report_2023.pdf
- [5] UNEP. Global Waste Management Outlook 2024. [R/OL]. <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>
- [6] International Energy Agency. Energy technology perspectives 2020[R/OL]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>.
- [7] 张志, 宋波, 祁俊峰, 等. 仿竹子结构八重桁架点阵结构设计及增材制造[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(12): 34-40.
ZHANG Z, SONG B, QI J F, et al. Designing and additive manufacturing of bamboo-imitated octet-truss lattice structure [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(12): 34-40. (in Chinese)
- [8] BLAKELEY R L, ZERNER B. Jack bean urease: The first nickel enzyme [J]. Journal of Molecular Catalysis, 1984, 23(2/3): 263-292.
- [9] DE MUYNCK W, DE BELIE N, VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 118-136.
- [10] 刘汉龙, 赵常, 肖杨. 微生物矿化反应原理、沉积与破坏机制及理论: 研究进展与挑战[J/OL]. 岩土工程学报. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/32.1124.tu.20230601.2133.011.html>.
LIU H L, ZHAO C, XIAO Y. Reaction principle, deposition and failure mechanisms and theory of biomineralization: progress and challenges [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/32.1124.tu.20230601.2133.011.html>. (in Chinese)
- [11] DEJONG J T, MORTENSEN B M, MARTINEZ B C, et al. Bio-mediated soil improvement [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 197-210.
- [12] DADDA A, GEINDREAU C, EMERIAULT F, et al. Characterization of contact properties in biocemented sand using 3D X-ray micro-tomography [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(3): 597-613.
- [13] WU H R, WU W, LIANG W J, et al. 3D DEM modeling of biocemented sand with fines as cementing agents [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2023, 47(2): 212-240.
- [14] XIAO Y, HE X, ZAMAN M, et al. Review of strength improvements of biocemented soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(11): 03122001.
- [15] XIAO P, LIU H L, XIAO Y, et al. Liquefaction resistance of bio-cemented calcareous sand [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 107: 9-19.
- [16] CHU J, IVANOV V, STABNIKOV V, et al. Microbial method for construction of an aquaculture pond in sand [M]//Bio- and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering. ICE Publishing, 2014: 215-219.
- [17] 刘璐, 沈扬, 刘汉龙, 等. 微生物胶结在防治堤坝破坏中的应用研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3410-3416.
LIU L, SHEN Y, LIU H L, et al. Application of bio-cement in erosion control of levees [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3410-3416. (in Chinese)
- [18] GAO Y F, TANG X Y, CHU J, et al. Microbially induced calcite precipitation for seepage control in sandy soil [J]. Geomicrobiology Journal, 2019, 36(4): 366-375.
- [19] CUTHBERT M O, MCMILLAN L A, HANDLEY-SIDHU S, et al. A field and modeling study of fractured rock permeability reduction using microbially induced calcite precipitation [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(23): 13637-13643.
- [20] ARRIETA-ESCOBAR J A, DERRIEN D, OUVRARD S, et al. 3D printing: An emerging opportunity for soil science [J]. Geoderma, 2020, 378: 114588.
- [21] NETHING C, SMIRNOVA M, GRÖNING J A D, et al. A method for 3D printing bio-cemented spatial structures using sand and urease active calcium carbonate powder [J]. Materials & Design, 2020, 195: 109032.
- [22] HIRSCH M, LUCHERINI L, ZHAO R, et al. 3D printing of living structural biocomposites [J]. Materials Today, 2023, 62: 21-32.
- [23] 钱春香, 冯建航, 苏依林. 微生物诱导碳酸钙提高水泥基材料的早期力学性能及自修复效果[J]. 材料导报, 2019, 33(12): 1983-1988.
QIAN C X, FENG J H, SU Y L. Microbially induced calcium carbonate precipitation improves the early-age mechanical performance and self-healing effect of cement-based materials [J]. Materials Reports, 2019, 33 (12): 1983-1988. (in Chinese)
- [24] RAMACHANDRAN S K, RAMAKRISHNAN V, BANG S S. Remediation of concrete using microorganisms [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(1): 3-9.
- [25] 刘汉龙, 马国梁, 肖杨, 等. 微生物加固岛礁地基现场

- 试验研究[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 26-31.
- LIU H L, MA G L, XIAO Y, et al. In situ experimental research on calcareous foundation stabilization using MICP technique on the reclaimed coral reef islands [J]. *Journal of Ground Improvement*, 2019, 1(1): 26-31. (in Chinese)
- [26] XIAO Y, ZHOU W, SHI J Q, et al. Erosion of biotreated field-scale slopes under rainfalls [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(3): 04022030.
- [27] BLAUW M, LAMBERT J W M, LATIL M N. Biosealing: A method for in situ sealing of leakages [C]// *Ground Improvement Technologies and Case Histories*. December 9-11, 2009. Singapore. Singapore: Research Publishing Services, 2009: 125-130.
- [28] 重庆日报. 重大微生物岩土文物保护修复技术让瑞金井纪念碑“修复如新”. [EB/OL]. (2023-11-09) [2023-11-12]. <https://wap.cqrb.cn/xcq/NewsDetail?classId=10&classId=10&newsId=1678097&id=1678097>. DailyChongqing. Protection and restoration technology of major microbial geotechnical cultural relics makes Ruijin Hongjing Monument “restored like new” [EB/OL]. (2023-11-09) [2023-11-12]. <https://wap.cqrb.cn/xcq/NewsDetail?classId=10&classId=10&newsId=1678097&id=1678097>. (in Chinese)
- [29] 刘汉龙, 韩绍康, 陈卉丽, 等. 潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(6): 219-220.
- LIU H L, HAN S K, CHEN H L, et al. Microbial reinforcement and repair method of sandstone grottoes in humid environment [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(6): 219-220. (in Chinese)
- [30] DU W X, QIAN C X, XIE Y D. Demonstration application of microbial self-healing concrete in sidewall of underground engineering: A case study [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63: 105512.
- [31] ArchDaily. Hy-Fi, The Organic Mushroom-Brick Tower Opens At MoMA's PS1 Courtyard. [EB/OL] (2014-06-27) [2023-11-12]. <https://www.archdaily.com/521266/hy-fi-the-organic-mushroom-brick-tower-opens-at-moma-s-ps1-courtyard>.
- [32] LIU S B, LIU H, JIAO J J, et al. Biomechanics in plant resistance to drought [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 36(5): 1142-1157.
- [33] 戴靖沛, 黄建坤, 陈丽华, 等. 基于均匀化理论的根土复合体三维本构关系[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 76-83.
- DAI J P, HUANG J K, CHEN L H, et al. Three-dimensional constitutive relation of the root-soil composite using homogenization theory [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(13): 76-83. (in Chinese)
- [34] 谢祥荣, 陈正发, 朱贞彦, 等. 根土复合体力学效应及其模型构建研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2): 13-28, 196.
- XIE X R, CHEN Z F, ZHU Z Y, et al. Research progress and prospect of mechanical effects and model construction of root-soil complex [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 13-28, 196. (in Chinese)
- [35] 程洪, 颜传盛, 李建庆, 等. 草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 62-65.
- CHENG H, YAN C S, LI J Q, et al. An experimental study on mechanic performance and mechanism of soil-reinforcement by herb root system [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1): 62-65. (in Chinese)
- [36] GENUCHTEN M, NIELSEN D R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils [J]. *Annales Geophysicae*, 1985, 3: 615-627.
- [37] WU T H. Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(3): 259-274.
- [38] SCHWARZ M, COHEN D, OR D. Pullout tests of root analogs and natural root bundles in soil: experiments and modeling [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F2): F02007.
- [39] 梁桑, 刘亚斌, 石川, 等. 黄土区不同龄期灌木柠条锦鸡儿根系的分布特征及其固土护坡效果[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 114-124.
- LIANG S, LIU Y B, SHI C, et al. Evaluating soil conservation from root distribution of Caragana Korshinskii Kom in the Loess Region of Xining Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(15): 114-124. (in Chinese)
- [40] 吴宏伟, 周超, 张帅, 等. 状态相关非饱和土力学理论及应用[J]. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53(10): 1728-1746.
- NG C W W, ZHOU C, ZHANG S, et al. State-dependent theory for unsaturated soil and its applications [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2023, 53(10): 1728-1746. (in Chinese)
- [41] 潘春见, 邓璇. 竹楼·竹城·竹宫与瓯骆王宫构想: 中国—东南亚壮泰族群干栏建筑研究之一[J]. *广西民族研究*, 2015(6): 102-109.
- PAN C J, DENG X. Bamboo building, bamboo town, bamboo palace and the proposition of the ou Luo Palace: Part I of the studies of the stilt style architecture of the Kam-Tai ethnic groups in China and southeast Asia [J].

- Guangxi Ethnic Studies, 2015(6): 102-109. (in Chinese)
- [42] 李静萍. 竹建筑的可持续利用与现代结构创新研究[J]. 建筑与文化, 2023(11): 56-58.
LI J P. Research on the sustainable utilization of bamboo architecture and modern structural innovation [J]. Architecture & Culture, 2023(11): 56-58. (in Chinese)
- [43] 郭宜杭, 李黎, 杨晨欣, 等. 植物纤维增强混凝土研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(10): 3347-3358.
GUO Y H, LI L, YANG C X, et al. Research progress of plant fiber reinforced concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(10): 3347-3358. (in Chinese)
- [44] 易兰兰, 朱俊红, 程文杰, 等. 植物纤维的降解机制及菌酶协同发酵应用[J]. 动物营养学报, 2024, 36(3): 1361-1374.
YI L L, ZHU J H, CHENG W J, et al. Degradation mechanism of plant fiber and application of synergistic fermentation of bacteria and enzymes [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(3): 1361-1374. (in Chinese)
- [45] AMIN M N, AHMAD W, KHAN K, et al. A comprehensive review of types, properties, treatment methods and application of plant fibers in construction and building materials [J]. Materials, 2022, 15(12): 4362.
- [46] ORSINI F, MARRONE P. Approaches for a low-carbon production of building materials: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 118380.
- [47] VO L T T, NAVARD P. Treatments of plant biomass for cementitious building materials: A review [J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 161-176.
- [48] 汪海年, 高俊锋, 尤占平, 等. 路用生物沥青研究进展[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(7): 55-60.
WANG H N, GAO J F, YOU Z P, et al. Advances in bio-binder application on road pavement [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(7): 55-60. (in Chinese)
- [49] 徐宁, 汪海年, 陈玉, 等. 基于分子动力学的生物沥青相容性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 65-72.
XU N, WANG H N, CHEN Y, et al. Research on the compatibility of bio-asphalt based on molecular dynamics [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(5): 65-72. (in Chinese)
- [50] LUO D, KHATER A, YUE Y, et al. The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: A review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 377-387.
- [51] 李学凡, 唐新德, 郭海超, 等. 木质素沥青乳化剂研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(Sup2): 577-580.
LI X F, TANG X D, GUO H C, et al. Research progress of lignin asphalt emulsifier [J]. Materials Reports, 2023, 37(Sup2): 577-580. (in Chinese)
- [52] AL-SABAEI A M, NAPIAH M B, SUTANTO M H, et al. A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: Coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 249: 119357.
- [53] 赵其仁, 李林蓓. 硅藻土开发应用及其进展[J]. 化工矿产地质, 2005, 27(2): 96-102.
ZHAO Q R, LI L B. The application and exploitation of diatomite and its evolution [J]. Geology of Chemical Minerals, 2005, 27(2): 96-102. (in Chinese)
- [54] DENIZ V. Comparison with some porous materials and the effects of powder filling on breakage parameters of diatomite in dry ball milling [J]. Particulate Science and Technology, 2011, 29(5): 428-440.
- [55] 张义, 朱吉颖, 张聪, 等. 硅藻土在环境领域的研究和应用[J]. 生态环境学报, 2022, 31(12): 2441-2448.
ZHANG Y, ZHU J Y, ZHANG C, et al. Research and application of diatomite in the field of eco-environment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(12): 2441-2448. (in Chinese)
- [56] 史明明, 刘美艳, 曾佑林, 等. 硅藻土和膨润土对重金属离子 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 及 Cd^{2+} 的吸附特性[J]. 环境化学, 2012, 31(2): 162-167.
SHI M M, LIU M Y, ZENG Y L, et al. Study on adsorption of Zn^{2+} , Pb^{2+} and Cd^{2+} on diatomite and bentonite [J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(2): 162-167. (in Chinese)
- [57] 李飞跃, 汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧碳排放量及转化生物炭固碳量的估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 1-7.
LI F Y, WANG J F. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 1-7. (in Chinese)
- [58] 孔丝纺, 姚兴成, 张江勇, 等. 生物质炭的特性及其应用的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 716-723.
KONG S F, YAO X C, ZHANG J Y, et al. Review of characteristics of biochar and research progress of its applications [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4): 716-723. (in Chinese)
- [59] 王丽渊, 丁松爽, 刘国顺. 生物质炭土壤改良效应研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2014(3): 1-6.
WANG L Y, DING S S, LIU G S. Progress of the research on biochars' influence on soil reclamation [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(3): 1-6. (in Chinese)

- [60] 李保强, 刘钧, 李瑞阳, 等. 生物质炭的制备及其在能源与环境领域中的应用[J]. 生物质化学工程, 2012, 46(1): 34-38.
LI B Q, LIU J, LI R Y, et al. Biochars preparation and its applications in energy and environment field [J]. Biomass Chemical Engineering, 2012, 46(1): 34-38. (in Chinese)
- [61] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2075-2081.
LI J X, WU L C, ZHANG J, et al. Research progresses in remediation of heavy metal contaminated soils by biochar [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(12): 2075-2081. (in Chinese)
- [62] SENADHEERA S S, GUPTA S, KUA H W, et al. Application of biochar in concrete: A review [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 143: 105204.
- [63] XU K, HUANG M, LIU Z J, et al. Mechanical properties and disintegration behavior of EICP-reinforced sea sand subjected to drying-wetting cycles [J]. Biogeotechnics, 2023, 1(1): 100019.
- [64] ZHANG J W, YIN Y, SHI W P, et al. Strength and uniformity of EICP-treated sand under multi-factor coupling effects [J]. Biogeotechnics, 2023, 1(1): 100007.
- [65] NAFISI A, MONTTOYA B M, EVANS T M. Shear strength envelopes of biocemented sands with varying particle size and cementation level [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(3): 04020002.
- [66] CUI M J, LAI H J, HOANG T, et al. One-phase-low-pH enzyme induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(2): 481-489.
- [67] ZHANG S X, LIU Z Y, LI Z Y, et al. Experimental study on the reinforcement mechanism and wave thumping resistance of EICP reinforced sand slopes [J]. Biogeotechnics, 2023, 1(4): 100041.
- [68] MIAO L C, WANG H X, SUN X H, et al. Effect analysis of biomineralization for solidifying desert sands [J]. Biogeotechnics, 2024, 2(1): 100065.
- [69] 张心语. 植物壳加筋土的工程特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
ZHANG X Y. Research on the engineering characteristics of plant shell reinforced soil [D]. Xi'an: Changan University, 2022. (in Chinese)
- [70] 李丽华, 范城彬, 白玉霞, 等. 稻秸秆加筋土力学特性与植生性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(Sup1): 64-74.
LI L H, FAN C B, BAI Y X, et al. Experimental study on mechanical properties and vegetative properties of rice straw reinforced soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(Sup1): 64-74. (in Chinese)
- [71] KAFODYA I, OKONTA F. Cyclic and post-cyclic shear behaviours of natural fibre reinforced soil [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2019: 1-10.
- [72] BORDOLOI S, HUSSAIN R, GARG A, et al. Infiltration characteristics of natural fiber reinforced soil [J]. Transportation Geotechnics, 2017, 12: 37-44.
- [73] 刘泽. 生态型加筋土挡墙动静力学特性试验研究与数值分析[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
LIU Z. Test study and numerical analysis on the static and dynamic characteristics of eco-reinforced earth retaining wall [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [74] PintosPaula. Sara Kulturhus 中心 / White Arkitekter. [EB/OL]. (2021-08-23) [2023-11-12]. <https://www.archdaily.cn/cn/967116/sara-kulturhuszhong-xin-white-arkitekter>.
PintosPaula. Sara Kulturhus Center / White Arkitekter [EB/OL]. (2021-08-23) [2023-11-12]. <https://www.archdaily.cn/cn/967116/sara-kulturhuszhong-xin-white-arkitekter>.(in Chinese)
- [75] 杨大禹. 云南少数民族住屋: 形式与文化研究[M]. 天津: 天津大学出版社, 1997.
YANG D Y. A study on housing forms of Yunnan's minority nationalities and cultures [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1997. (in Chinese)
- [76] 肖云, 白平院, 陈广付. 走进苗族吊脚楼 领略传统民居之美[J]. 文化产业, 2024(6): 13-15.
XIAO Y, BAI P Y, CHEN G F. Walking into Miao Diaojiao building and appreciating the beauty of traditional dwellings [J]. Culture Industry, 2024(6): 13-15. (in Chinese)
- [77] AbdelHana. 最小结构最大空间, 竹装置“弧” / IBUKU. [EB/OL]. (2021-07-05) [2023-11-12]. <https://www.archdaily.cn/cn/964290/lu-se-xue-xiao-de-mo-hu-ibuku>.(in Chinese)
AbdelHana. The Arc at Green School / IBUKU [EB/OL]. (2021-07-05) [2023-11-12]. <https://www.archdaily.cn/cn/964290/lu-se-xue-xiao-de-mo-hu-ibuku>.(in Chinese)
- [78] OkiHiroyuki. 竹之翼/Vo Trong Nghia [EB/OL]. (2015-03-13) [2023-11-12]. <https://www.archdaily.cn/cn/763696/zhu-zhi-yi-vo-trong-nghia>.
OkiHiroyuki. Bamboo Wing / VTN Architects [EB/OL]. (2015-03-13) [2023-11-12]. <https://www.archdaily.cn/cn/763696/zhu-zhi-yi-vo-trong-nghia>.(in Chinese)
- [79] 李宏钧, 孔亚平, 张岩. 植物纤维毯生态防护效益研究述评[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3): 146-154.
LI H J, KONG Y P, ZHANG Y. A review of geotextiles ecological protection technology [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(3): 146-154. (in Chinese)

- [80] 杨富巍, 张秉坚, 曾余瑶, 等. 传统糯米灰浆科学原理及其现代应用的探索性研究[J]. 故宫博物院院刊, 2008(5): 105-114, 159.
YANG F W, ZHANG B J, ZENG Y Y, et al. Exploratory research on the scientific nature and application of traditional sticky rice mortar [J]. Palace Museum Journal, 2008(5): 105-114, 159. (in Chinese)
- [81] 范明明, 裴向军, 杜杰, 等. 改性糯米灰浆的室内研究及在九寨沟钙华地质裂缝修复中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 183-190.
FAN M M, PEI X J, DU J, et al. A laboratory study of modified glutinous rice mortar and its application to repair travertine geological cracks in Jiuzhaigou [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 183-190. (in Chinese)
- [82] 刘琨, 石玉成, 卢育霞, 等. 玉门关段汉长城墙体结构抗震性能研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 47-52.
LIU K, SHI Y C, LU Y X, et al. Study on seismic performance of a wall construction for the Yumenguan Great Wall in Han Dynasty [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(1): 47-52. (in Chinese)
- [83] 张炜. 关于植物纤维毯边坡防护的实施与研究[C]// 中国公路学会养护与管理分会第十二届学术年会论文集. 杭州, 2022: 258-263.
ZHANG W. Implementation and research of plant fiber blanket slope protection [C]// Proceedings of the 12th Annual Conference of Maintenance and Management Branch of China Highway Society, 2022: 258-263. (in Chinese)
- [84] 单思寒, 张瑞峰, 王琴, 等. 北京延庆和怀柔明代长城灰浆微结构剖析对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(9): 3047-3058.
SHAN S H, ZHANG R F, WANG Q, et al. Structural analysis and comparison of the Ming dynasty great wall mortar in Beijing Yanqing and Huairou [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(9): 3047-3058. (in Chinese)
- [85] 裴向军, 王光辉, 杜杰, 等. 基于OUV的世界自然遗产地灾后保育修复技术研究: 以九寨沟火花海为例[C]// 中国环境科学学会2021年科学技术年会论文集(三). 天津, 2021: 18-23.
PEI X J, WANG G H, DU J, et al. Research on post-disaster conservation and restoration technology of world natural heritage sites based on OUV-taking Jiuzhaigou Spark Sea as an example [C]// Chinese Society for Environmental Sciences Proceedings of the 2021 Science and Technology Annual Conference (3). Tianjin, 2021: 18-23. (in Chinese)
- [86] CUI L Q, LI L Q, ZHANG A F, et al. Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil: A two-year field experiment [J]. BioResources, 2011, 6(3): 2605-2618.
- [87] GUO H W, CHARLES WANG WAIN G, NI J J, et al. Three-year field study on grass growth and soil hydrological properties in biochar-amended soil [J/OL]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.08.025>.
- [88] 朱健, 王平, 李科林, 等. 硅藻土对污染土壤中铅的固定效果及机制的研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(14): 240-245.
ZHU J, WANG P, LI K L, et al. Fixation effects and mechanisms of diatomite on Pb in contaminated soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(14): 240-245. (in Chinese)
- [89] 蔡德龙, 钱发军, 邓挺, 等. 硅肥对苹果生长产量及品质影响的研究[J]. 地域研究与开发, 1995, 14(2): 64-66.
CAI D L, QIAN F J, DENG T, et al. Effect of silicon fertilizer on growth, yield and quality of apple [J]. Areal Research and Development, 1995, 14(2): 64-66. (in Chinese)
- [90] 刘珺, 耿永娟, 李绍纯, 等. 焙烧硅藻土对水泥基材料力学性能的影响[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(5): 82-87, 116.
LIU J, GENG Y J, LI S C, et al. Effect of roasting diatomite on mechanical properties of cement-based materials [J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(5): 82-87, 116. (in Chinese)
- [91] 代楠, 张育新, 李凯霖, 等. 硅藻土在胶凝材料领域的应用进展[J]. 材料导报, 2022, 36(14): 145-153.
DAI N, ZHANG Y X, LI K L, et al. Application of diatomite in cementitious materials [J]. Materials Reports, 2022, 36(14): 145-153. (in Chinese)
- [92] 丁湛, 赵浚凯, 蒋修明, 等. 基于秸秆液化的生物沥青制备工艺及其性能分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(1): 6-10.
DING Z, ZHAO J K, JIANG X M, et al. Preparation technology and performance analysis of bio-asphalt based on straw liquefaction [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(1): 6-10. (in Chinese)
- [93] 瓦大中国办公室. 生物基柏油: 木质素替代50%沥青, 减少高达70%碳排放[EB/OL]. (2022-10-10) [2023-11-12]. <https://www.wur.nl/cn/news/sheng-wu-ji-bai-you-mu-zhi-su-ti-dai50li-qing-jian-shao-gao-da70tan-pai-fang.htm>.
Wageningen University China Office. Bio-based asphalt: Lignin replaces 50% of asphalt, reducing carbon emissions by up to 70% [EB/OL]. (2022-10-10) [2023-11-12]. <https://www.wur.nl/cn/news/sheng-wu-ji-bai-you-mu-zhi-su-ti-dai50li-qing-jian-shao-gao-da70tan-pai-fang.htm>. (in Chinese)
- [94] 赵雪, 赵欣鑫, 赵佐平, 等. 秸秆生物质炭处理重金属

- 废水研究现状及展望[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(1): 31-39.
- ZHAO X, ZHAO X X, ZHAO Z P, et al. Treatment of heavy metal wastewater by straw biochar: current knowledge and future perspectives [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2024, 19(1): 31-39. (in Chinese)
- [95] 巩义市福泰耐火材料厂. 硅藻土隔热耐火砖. [EB/OL]. (2019-04-09) [2023-11-12]. <http://www.gynhz.com/gsxw/979.html>.
- Gongyi Futai Refractory Materials Factory. Diatomite insulating refractory bricks. [EB/OL]. (2019-04-09) [2023-11-12]. <http://www.gynhz.com/gsxw/979.html>. (in Chinese)
- [96] EnsoStora. Suomessa testataan puupohjaista sideainetta asfaltissa. [EB/OL]. (2022-01-02) [2023-11-12]. <https://www.storaenso.com/fi-fi/newsroom/news/2022/9/testing-bio-asphalt-in-finland>.
- [97] 龚天鑫, 石峰, 孙明宇. 基于建筑仿生学的白蚁巢穴建造智慧研究[J]. 当代建筑, 2023(9): 27-31.
- GONG T X, SHI F, SUN M Y. Analysis of termite nest construction intelligent based on architectural bionics [J]. *Contemporary Architecture*, 2023(9): 27-31. (in Chinese)
- [98] STODDART D R, STEERS J A. The nature and origin of coral reef islands[M]//*Biology and Geology of Coral Reefs*. Amsterdam: Elsevier, 1977: 59-105.
- [99] MORRIS R L, BILKOVIC D M, BOSWELL M K, et al. The application of oyster reefs in shoreline protection: Are we over-engineering for an ecosystem engineer? [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 56(7): 1703-1711.
- [100] SAVELLE J M, HABU J. A processual investigation of a Thule whale bone house, Somerset Island, Arctic Canada [J]. *Arctic Anthropology*, 2004, 41(2): 204-221.
- [101] AHMED A, QAYOUM A, MIR F Q. Investigation of the thermal behavior of the natural insulation materials for low temperature regions [J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 26: 100849.
- [102] 顾天舒, 谢连玉, 陈革. 建筑节能与墙体保温[J]. 工程力学, 2006, 23(Sup2): 167-184.
- GU T S, XIE L Y, CHEN G. Building energy saving and wall insulation [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(Sup2): 167-184. (in Chinese)
- [103] 吴佳庆, 刘刚, 韩孝辉, 等. 珊瑚礁的成岩作用: 来自南海永兴岛珊瑚礁的原位地球化学研究[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(1): 31-44.
- WU J Q, LIU G, HAN X H, et al. Diagenesis of coral reefs: An in situ geochemical study of coral reefs at the Yongxing Island, South China Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(1): 31-44. (in Chinese)
- [104] 李晓敏. 南海西沙群岛珊瑚岛礁高分遥感监测与动态研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- LI X M. High-resolution remote sensing monitoring and dynamics of coral islands and reefs in the Xisha Islands, South China Sea [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021. (in Chinese)
- [105] 刘毅. 建筑中的贝类智慧[J]. 知识就是力量, 2021(10): 56-59.
- LIU Y. Shellfish wisdom in architecture [J]. *Knowledge Is Power*, 2021(10): 56-59. (in Chinese)
- [106] CHAMBERLAIN P, DREWELLO R, KORN L, et al. Construction of the Khoja Zaynuddin mosque: Use of animal glue modified with urine [J]. *Archaeometry*, 2011, 53(4): 830-841.
- [107] PILEHVAR S, ARNHOF M, PAMIES R, et al. Utilization of urea as an accessible superplasticizer on the moon for lunar geopolymer mixtures [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119177.
- [108] DINÇ -ŞENGÖNÜL B, YÜZER N, BOYLU S, et al. Utilization of waste animal blood as an additive in hydraulic lime-based mortars [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 400: 132909.
- [109] 仇文岗, 何祥嵘, 刘汉龙, 等. 仿生土木工程研究进展与展望[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20230417.0836.002.html>.
- ZHANG W G, HE X R, LIU H L, et al. Research progress and prospect of bionic civil engineering [J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20230417.0836.002.html>. (in Chinese)
- [110] 史晓君. 基于蜻蜓翅膀的温室结构仿生设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- SHI X J. Studies on greenhouse structural bionic design based on dragonfly wings [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [111] DICKINSON M H. Bionics: Biological insight into mechanical design [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(25): 14208-14209.
- [112] SONG J F, XU S C, WANG H X, et al. Bionic design and multi-objective optimization for variable wall thickness tube inspired bamboo structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 125: 76-88.
- [113] MOINI R. Perspectives in architected infrastructure materials [J]. *RILEM Technical Letters*, 2024, 8: 125-140.
- [114] 孙宁, 张立彬. 竹子的力学特性[J]. 力学与实践, 1997, 19(3): 78-80.
- SUN N, ZHANG L B. Mechanical properties of bamboo [J]. *Mechanics in Engineering*, 1997, 19(3): 78-80. (in Chinese)

- [115] LIU P, GAO Y N, WANG F Z, et al. Superhydrophobic and self-cleaning behavior of Portland cement with lotus-leaf-like microstructure [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 775-785.
- [116] LI Q, SONG W, LI J H, et al. Bioinspired super-strong aqueous synthetic tissue adhesives [J]. *Matter*, 2022, 5(3): 933-956.
- [117] GAO K, SUN Y H, GAO R F, et al. Application and prospect of bionic non-smooth theory in drilling engineering [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(4): 519-541.
- [118] HUANG S C, TAO J L. Penetrating in granular materials: effects of penetrator dynamics [C]// *Geotechnical Frontiers 2017*. Orlando, Florida. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2017: 604-613.
- [119] PearceMick. Of Termites and Architecture. [EB/OL]. [2023-11-12]. <https://www.mickpearce.com/biomimicry.html>.
- [120] ArchDaily. 阿卜杜拉国王石油研发中心/扎哈·哈迪德事务所 [EB/OL]. (2017-10-27) [2023-11-12]. <https://www.archdaily.cn/cn/882427/a-bu-du-la-guo-wang-shi-you-yan-fa-zhong-xin-zaha-hadid-architects>. ArchDaily. King Abdullah Petroleum Studies and Research Centre / Zaha Hadid Architects [EB/OL]. (2017-10-27) [2023-11-12]. <https://www.archdaily.cn/cn/882427/a-bu-du-la-guo-wang-shi-you-yan-fa-zhong-xin-zaha-hadid-architects>. (in Chinese)
- [121] 高英力, 李学坤, 黄亮, 等. 超疏水仿生水泥路面防覆冰设计及模型试验 [J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(10): 3288-3294.
- GAO Y L, LI X K, HUANG L, et al. Anti-icing design and model test of super hydrophobic and bionic cement pavement [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(10): 3288-3294. (in Chinese)
- [122] XU X T, CHEN Z Y, WAN X Z, et al. Colonial sandcastle-inspired low-carbon building materials [J]. *Matter*, 2023, 6(11): 3864-3876.
- [123] DISTEL D L, ALTAMIA M A, LIN Z J, et al. Discovery of chemoautotrophic symbiosis in the giant shipworm *Kuphus polythalamia* (Bivalvia: Teredinidae) extends wooden-steps theory [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(18): E3652-E3658.
- [124] 广州市地下铁道总公司. 地铁是怎样建成的 [M]. 广州: 新世纪出版社, 2014.
- Guangzhou Metro Corporation. How the subway was built [M]. Guangzhou: New Century Press, 2014. (in Chinese)
- [125] WINTER A G, V, DEITS R L H, et al. Razor clam to RoboClam: Burrowing drag reduction mechanisms and their robotic adaptation [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(3): 036009.
- [126] 王照智. 仿生耦合孕镶金刚石钻头耐磨增效机理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- WANG Z Z. Study on the mechanism of wear resistance and efficiency increase of bionic coupling impregnated diamond bit [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [127] 孙友宏, 刘大军, 高科, 等. 新型耦合仿生孕镶金刚石石油钻头的研制 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2013, 43(6): 1566-1573.
- SUN Y H, LIU D J, GAO K, et al. Development of coupling bionics impregnated diamond bit [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(6): 1566-1573. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)