

合成生物学驱动的新材料创新研究

朱孟宇¹, 戈钧^{1,2,3*}, 黄海霞⁴, 张闾肆⁵

(1. 清华大学化学工程系 / 工业生物催化教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 绿色生物制造全国重点实验室, 北京 100084; 3. 清华大学合成与系统生物学研究中心, 北京 100084; 4. 中国石油天然气集团有限公司, 北京 100007; 5. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088)

摘要: 合成生物学作为一门新兴前沿交叉学科, 正逐渐成为驱动新材料绿色创新的关键引擎。合成生物学方法依托“设计-构建-测试-学习”(DBTL) 循环体系, 通过基因路线重构、代谢途径优化与高性能酶设计, 构建可预测、可调控的微生物细胞工厂, 为材料制造开辟了向生物基材料跨越的新路径。本文系统梳理了合成生物学赋能新材料的技术基础, 重点分析了微生物细胞工厂合成新材料的机理、生物合成的优势, 以及关键生物元件在新材料合成中的功能。在此基础上, 综述了合成生物学在生物基材料、智能与功能材料、材料循环与生物降解材料等领域的典型应用, 揭示了合成生物制造在材料绿色化和智能化转型中的重要作用。最后, 展望了该领域的未来发展趋势并提出发展建议。合成生物学驱动新材料创新需进一步加强多学科交叉融合、加速科技成果产业化转化、推进平台化与模块化开发策略, 从而为我国实现“双碳”目标与新材料产业的高质量发展提供科技支撑和战略保障。

关键词: 合成生物学; 微生物细胞工厂; 新材料; 生物基材料

中图分类号: O63 **文献标识码:** A

Synthetic Biology-Driven Innovation in Advanced Materials

Zhu Mengyu¹, Ge Jun^{1,2,3*}, Huang Haixia⁴, Zhang Hongsi⁵

(1. Key Lab of Industrial Biocatalysis, Ministry of Education/Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Green Biomanufacturing, Beijing 100084, China; 3. Center for Synthetic and Systems Biology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. China National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China; 5. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: Synthetic biology is emerging as a frontier interdisciplinary discipline that is increasingly regarded as a key driver of sustainable innovation in advanced materials. By leveraging the design-build-test-learn (DBTL) cycle and through genetic circuit reconstruction, metabolic pathway optimization, and enzyme engineering, predictable and programmable microbial cell factories are being created, enabling bio-based material production. This study summarizes the technological foundations that underpin synthetic biology in material innovation, with a focus on elucidating the mechanisms of novel material synthesis in microbial cell factories, the advantages of biosynthetic approaches, and the functional roles of key biological elements in material production. On this basis, it highlights representative applications in bio-based, smart, functional, and biodegradable materials, and discusses how synthetic

收稿日期: 2025-07-27; **修回日期:** 2025-09-05

通讯作者: *戈钧, 清华大学化学工程系教授, 研究方向为酶催化与合成生物制造; E-mail: junge@mail.tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国化工新材料绿色低碳发展战略研究”(2024-XBZD-09); 国家重点研发计划项目(2023YFA0913600); 国家自然科学基金项目(22425803)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

biomanufacturing is reshaping the green and intelligent transformation of the materials sector. Finally, it outlines future development trends and proposes development strategies. Future progress will rely on closer interdisciplinary integration, more rapid translation into industrial practice, and the development of platform-based and modular strategies, which together will support the carbon neutrality goals and the high-quality growth of the materials industry.

Keywords: synthetic biology; microbial cell factory; advanced materials; bio-based materials

一、前言

合成生物学是一门融合生命科学、工程技术与信息科学的交叉学科^[1]，通过标准化生物元件与模块化设计原则，对生物系统进行理性设计与定向改造，实现可预测、可编程的生物制造体系。合成生物学遵循“设计-构建-测试-学习”（DBTL）的闭环研究路径^[2,3]（见图1）。DBTL循环包括^[4]：基于预设工程目标开发初始微生物组设计或初代模型系统；构建微生物组；依据设定的功能指标进行性能测试，以评估设计-构建的解决方案是否达成预期目标；系统分析成功或失败的原因，将所获得的新知识反馈至后续的DBTL循环路径。随着基因编

辑技术、代谢调控及体外进化技术的不断发展，研究者已逐步建立起从基础生物元件到复杂细胞工厂的多层级技术体系。

狭义的合成生物学包括两大方向：一是基于“自上而下”的底盘细胞重构，通过基因线路重组赋予微生物非天然合成能力；二是“自下而上”地“创造生命”，实现体外人工生命系统的精准调控^[5]。广义的合成生物学研究还包括对生命有机体关键的创新应用，主要分为三个层面：天然代谢通路的定向优化与功能强化、基因组尺度的系统性重编程以及完整人工生命系统的全合成构建。

新材料产业作为支撑我国实现“双碳”战略目标的重要领域，已被纳入《“十四五”原材料工业

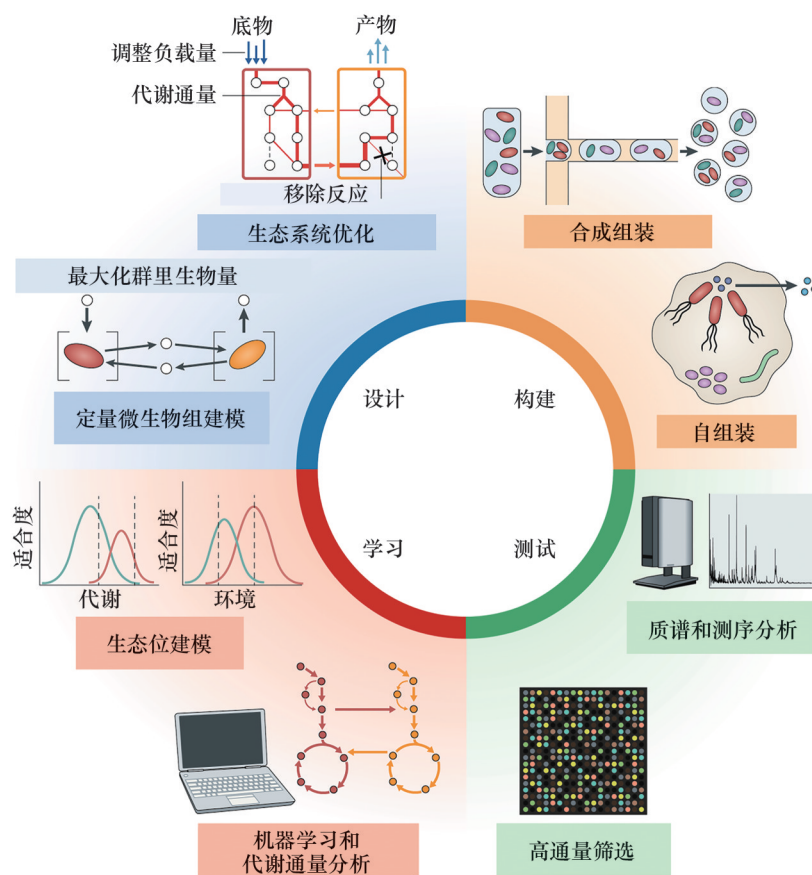


图1 DBTL循环示意图

发展规划》等国家顶层设计中。我国不断加强对新材料技术研发与产业化的政策支持，推动其在新能源、节能环保和生物基材料等领域的广泛应用。新材料通过提高能效、降低资源消耗、替代高污染材料等途径，推动可持续发展的进程。

合成生物学助力材料绿色转型。使用合成生物学技术对生物代谢途径进行工程化改造，构建微生物细胞工厂，高效合成多种高性能生物材料，如生物基材料、智能与功能型材料等^[6]。这不仅可以替代传统的基于石化资源的生产方式，减少碳排放，还具备良好的可循环性和环境友好性，符合我国“双碳”战略需求^[7,8]。随着我国对绿色低碳技术创新的持续投入，合成生物学有望在材料源头减碳、生产过程绿色化和产品终端可降解等方面发挥更加关键的作用，助力新材料产业实现高质量与可持续发展。

本文从合成生物学赋能新材料的技术基础出发，系统分析微生物细胞工厂构建、生物合成路径优化、关键酶/代谢途径/基因线路设计等核心技术在新材料合成中的应用机制，梳理合成生物学在生物基材料、智能与功能型材料以及材料循环和生物降解等典型场景中的应用，并结合绿色制造和低碳经济的发展趋势，展望合成生物学与人工智能(AI)、材料科学等多学科交叉融合的潜力及其产业转化路径，以期为我国合成生物学驱动的新材料研究提供科学参考。

二、合成生物学赋能新材料的技术基础

(一) 利用微生物细胞工厂进行材料合成

微生物细胞工厂是指经过合成生物学改造，具备定向合成目标化合物能力的工程菌株^[9]。其本质是将微生物作为精密的“生产车间”，通过整合合成生物学、代谢工程、系统生物学与生物过程工程等多学科方法，对菌株的遗传与代谢网络进行系统性优化，实现从可再生原料到高附加值产品的高效转化，具有广阔的市场应用潜力^[9-11]。微生物细胞工厂实现了利用葡萄糖、纤维素等可再生碳源，在温和的条件下高效合成目标产物^[12,13]。目前，研究人员广泛致力于对大量模式微生物的工程化改造，以构建高效稳定的细胞工厂^[14-16]。

随着全基因组代谢模型构建效率的提升、低成

本基因组测序技术的普及，以及成簇规律间隔短回文重复序列(CRISPR)等新型基因编辑技术的广泛应用，微生物代谢工程改造正变得更加经济与高效^[17-19]。基于计算机模拟的全基因组代谢模型已成为筛选生产菌株的重要工具。以大肠杆菌(*Escherichia coli*, *E. coli*)为例，通过系统性计算评估，该菌在异源酶表达条件下具备合成1777种非天然化合物的潜力，其中279种化合物具有良好的商业化前景^[20]。

微生物细胞工厂的开发与构建是一项复杂且周期较长的系统工程，早期主要依赖大量人力实验；随着高效实用工具方法的不断出现，细胞工厂的设计与迭代速度显著加快^[21]。在AI技术兴起的背景下，细胞工厂的构建与优化已不再局限于传统的生物技术手段，更需要借助具有强大模拟与计算能力的数字技术，从而大幅缩短研发周期并降低实验消耗^[9,22]。在生物技术与AI协同推进下，通过精准调控基因型-表型关系，可构建出适用于工业化生产的底盘细胞。新一代细胞工厂将表现出更优异的生物合成性能与更高水平的智能化特性。

(二) 生物酶、代谢途径与基因线路设计在新材料合成中的作用

生物酶、代谢途径与基因线路的设计是构建高效微生物细胞工厂的关键技术环节。通过对酶的定向改造、代谢网络的系统优化，以及动态可调控的基因表达线路的构建，可显著提升目标材料的合成效率、选择性与功能特异性，推动新材料制造从“经验驱动”向“设计驱动”转变。

生物酶作为催化反应的核心元件，在新材料前体的合成过程中发挥着关键作用^[23]。与化学催化剂相比，生物酶具有高度的底物专一性与反应选择性，能够在温和反应条件下高效催化复杂化合物的生成^[24]。代谢网络的系统优化是实现新材料生物合成的“中枢神经系统”。通过引入外源合成模块或重构内源代谢网络，可将碳代谢流精准导向目标产物，实现从可再生碳源到高附加值材料单体的高效转化^[25]。基因线路的设计与调控在代谢通路的精准表达和动态响应中发挥着关键作用^[9]。通过构建合成基因线路，能够实现多基因表达的时序控制、代谢稳态的反馈调节，以及细胞工厂整体性能的系统优化。

生物酶、代谢通路与基因线路共同构成了合成生物学赋能新材料合成的核心技术体系。通过三者的协同优化，不仅能够实现材料合成过程的高效性和精准调控，还能拓展产物多样性并增强功能可调性。随着底层生物元件的持续扩充与设计策略的不断迭代，该技术体系将在构建可持续、高性能、智能化的新材料方面发挥越来越重要的作用。

(三) 生物合成与传统石化路线的对比

在材料制造领域，传统石化路线长期以来一直是高分子材料的主要生产方式。然而，依赖石油、天然气等不可再生资源的化工路径，在可持续性、经济性 & 环境友好性方面正面临严峻挑战^[26,27]。

传统石化路线通常依赖高温高压条件下的催化反应，将石油、煤或天然气等化石原料转化为化工中间体和高分子材料^[27]。该过程通常伴随着大量温室气体排放、有机溶剂使用及有害副产物的生成^[28]。此外，由于原料供应日趋紧张和环境政策收紧，石化路线面临生产成本上升、环境压力增大与政策风险提高等多重制约。

相比之下，以合成生物学为核心的生物合成路径，依托可再生资源 and 温和的反应条件，正逐步成为新材料制备的重要新兴技术，并展现出显著的技术优势与发展潜力^[29-32]。生物合成路线以微生物细胞工厂为核心平台，利用葡萄糖、纤维素和水解淀粉等可再生碳源，通过代谢工程与合成生物学技术，实现生物物质的高值化利用^[33]。该过程通常在常温常压、近中性水相环境中进行^[34]，能耗显著降低，副产物少、过程清洁且安全性高，表现出良好的环境适应性和可持续性。

在能效与碳排放方面，生物合成路线具有天然优势，可通过生物转化直接构建产物碳骨架，避免了石化路线中繁杂的分步反应与多次能量转换，碳原子经济性显著提高。例如，蓝细菌细胞工厂可结合 CO₂ 固碳代谢路径^[35,36]，在特定条件下实现“碳负排放”生产，为实现碳中和目标提供关键技术支撑。

在经济性方面，石化路线因成熟的产业链与规模效应仍占据市场主流。但随着碳交易政策的推进和绿色税收机制的逐步建立，其环境外部成本将逐步显性化。尽管生物合成路线在短期内仍面临原料成本较高、产率偏低和规模化能力有限等挑战，但

随着底盘微生物的持续改良、高效酶催化元件的开发及发酵工艺的进步，其经济竞争力正在逐步提升。尤其是在高附加值材料和特定功能材料领域，生物合成已展现出显著优势。

三、合成生物学在新材料领域的典型应用

(一) 生物基材料

在全球“双碳”战略和可持续发展目标的驱动下，传统石化塑料所引发的资源消耗和环境污染等问题日益严峻，难以满足绿色制造与可持续发展的双重需求。生物基材料是指由可再生生物物质资源为原料制备的新型材料，其原料可以来源于农业和林业等行业废弃物或副产物，如甘蔗渣、竹纤维、秸秆等。这类材料具备可再生性与环境可持续性优势，不仅能减少对石油资源的依赖，还能在生产过程中显著降低温室气体排放。高性能生物基材料作为新一代功能结构材料，在力学性能、热稳定性、耐腐蚀性和加工适应性等方面已逐步实现对石化材料的替代。生物基材料市场正呈现快速增长态势，2023 年全球生物基复合材料市场规模约为 150 亿美元，并保持 15% 的年增长率，预计到 2030 年将达到约 300 亿美元^[37]。合成生物学通过微生物底盘改造、代谢通路重构和功能酶理性设计，为生物基材料的绿色制造与规模化应用提供了重要驱动力。

生物基聚酰胺是以可再生生物物质（如蓖麻油、纤维素、微生物发酵产物）为原料合成的高分子材料，可替代传统石油基聚酰胺^[38]。聚酰胺材料，特别是尼龙系列，凭借其优异的力学性能、耐磨性和热稳定性，被广泛应用于汽车和电子等高端制造领域^[39]。传统尼龙合成依赖石化原料，生产过程能耗高、碳排放量大。合成生物学的发展使得利用可再生资源合成尼龙单体成为可能，如通过微生物发酵制备己二酸（用于尼龙 6,6）和癸二酸（用于尼龙 6,10）等关键单体^[40]。研究人员开发了一种创新的“微生物发酵+光催化”级联反应策略^[41]：首先通过代谢工程改造谷氨酸棒杆菌（*Corynebacterium glutamicum*），将己二酸合成关键前体 L-2-氨基己二酸的产量提高 6.4 倍，达到 1.02 g/L；随后引入可见光驱动的光催化体系替代传统酶催化步骤。经 48 h 发酵，己二酸产量提升至 235 mg/L，实现了绿色低

碳生产,为生物基化学品合成提供了新思路。类似地,通过改造*E. coli*或柠檬酸杆菌(*Citrobacter*)中的脂肪酸代谢通路,也可实现己二酸的高效合成,再经化学聚合即可制成生物基尼龙。这类生物尼龙不仅性能可控,且在力学强度和耐高温性能上可与石油基尼龙媲美,部分性能甚至优于传统材料。借助合成生物学的模块化代谢设计,还可开发长链脂肪族尼龙、芳香族尼龙等多品类材料,拓展其在极端环境下的应用潜力。为提升材料降解性能,可在尼龙结构中引入酯键合成聚酯酰胺(PEAs)。该类聚合物兼具聚酯的生物降解性与聚酰胺的优良机械性能,在环保和高性能应用领域前景广阔。Chae等利用葡萄糖作为关键成分,采用*E. coli*细胞工厂,通过酶工程策略构建出由氨基酸单体组成PEA的新代谢途径,并在6.6 L生物反应器中完成分批发酵实验,验证了其工业化生产潜力^[42]。

合成橡胶是另一类重要的高性能材料,广泛应用于航空轮胎和高性能弹性体等领域^[43]。传统合成橡胶依赖石油裂解所得的异戊二烯、丁二烯等单体,存在碳足迹高和资源不可持续的问题。合成生物学为天然和合成橡胶的绿色升级提供了新的解决方案。通过对*E. coli*和铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)等微生物中关键酶系的合成路径进行设计与调控,可实现丁二烯、异戊二烯和法尼基焦磷酸等橡胶前体的生物合成。部分研究已借助聚合酶的表达与调控实现类天然橡胶聚合物的生物合成。Mori等^[44]通过将 α,β -不饱和二羧酸合成途径与*E. coli*中定制的阿魏酸脱羧酶相结合,构建了从葡萄糖生产丁二烯的人工代谢路径。Aldridge等^[45]对产甲烷菌乙酸甲烷八叠球菌(*Methanosarcina acetivorans*)进行工程改造,实现了异戊二烯的生物法合成。此类研究显著降低了对石油资源的依赖,助力“双碳”目标推进。此外,利用微生物生产异戊二烯并结合催化聚合工艺,已成功开发出生物基顺丁橡胶、生物基丁苯橡胶等多种合成橡胶材料^[46]。这类材料在力学性能和弹性保持性方面表现良好,同时减少了对石油资源的依赖,降低了合成过程中的碳排放与环境污染。

生物基可降解聚合物,如聚羟基脂肪酸酯(PHA)和聚乳酸(PLA)等,因其优良的环境降解性能和力学特性,成为替代石化塑料的理想选择,广泛应用于一次性制品、农业地膜和包装材料

等领域。合成生物学通过构建高效代谢途径,使这些材料的合成更具有目标性和灵活性,能够按需定制材料的结构。例如,PHA类材料是一种典型的生物基可降解塑料,是细菌在碳源过剩且营养缺乏条件下合成的,具备优异的可降解性和生物相容性,在生物医用材料、农业薄膜与食品包装等领域展现出广阔的商业化前景。合成生物学通过设计代谢通路,控制不同羟基脂肪酸单体在PHA中的比例,从而调控材料的热稳定性、柔韧性和结晶性^[47]。国内企业如北京微构工厂生物技术有限公司,是一家专注于PHA的生产企业,通过合成生物学技术优化改造高耐受性底盘细胞的代谢途径,实现了PHA的高效生产。

尽管高性能生物基材料在合成生物学推动下发展迅速,其工业化仍面临原料转化效率低、成本控制难度大和产业链不成熟等挑战。合成途径的高通量优化、底盘细胞抗逆性与毒物耐受性,均是实现产业化突破的关键环节。未来,随着国家“双碳”政策和绿色制造相关标准体系的逐步完善,生物基高性能材料的研发将进一步与AI辅助设计、材料计算模拟以及高端制备技术深度融合。合成生物学将在满足高端性能需求的同时,推动生产过程向低碳、绿色和可持续发展转型,为我国新材料产业发展提供坚实支撑。

(二) 智能与功能型材料

智能与功能型材料是一类能够感知外部环境信号,并通过改变自身物理化学特性作出精确响应的先进材料。这类材料不仅具备传统意义上对物理或化学刺激(如光、热、pH、电场)的响应行为,更拓展至与生物系统(如微生物、细胞、酶)进行交互和耦合,从而实现能量转换、环境修复、智能诊疗等功能,广泛应用于医疗诊断、生物工程、能源与环境监测等领域^[48-50]。随着功能集成度和应用环境复杂度的不断提升,依赖物理或化学手段构建的智能材料正面临着响应精度差、适应性低及制造过程不可持续等限制。合成生物学的兴起为智能材料的“活性化”和“可编程化”提供了全新思路^[51],推动了生物传感材料、微生物燃料电池材料等智能与功能型材料的快速发展。

合成生物学通过工程化改造微生物或细胞,使其能够识别特定化学物质、生理指标或环境信号,

并借助遗传调控元件将这些信号转化为荧光、颜色或电流等可检测输出，从而构建出高选择性、高响应性的生物传感材料^[52]。这类材料广泛应用于环境污染检测、食品安全分析及体内病理信号的精准识别^[53]。例如，工程化改造的 *E. coli* 可用于检测重金属离子、毒素或抗生素残留。通过理性设计基因线路，还可调控其检测阈值与灵敏度，实现多信号联合识别和逻辑响应^[54,55]。近年来，合成生物学还推动了“活体材料”的研究，即将生物传感细胞嵌入水凝胶或多孔支架中，构建具有可生长、可感应、可反馈能力的材料系统，为智能穿戴设备和疾病实时监测提供了基础平台^[56]。例如，将工程化细胞封装于微球中并编程响应肿瘤微环境中高乳酸信号，可自动释放抗肿瘤因子，显著提高治疗的靶向性并减少副作用^[57]。科研人员借助机器学习算法，构建了农残检测的定量预测模型，并基于胆碱酯酶与纳米酶开发出四通道集成传感器阵列，实现了对多种农药的一步快速识别与精确定量检测^[58]。以部分无序的弹性蛋白样多肽（ELP）作为基本构建单元，结合卷积神经网络与多尺度计算建模方法，实现了对其自组装行为的智能化从头设计；通过模拟预测获得性能最优的结构模型，并进一步利用合成生物学技术成功合成了具有可调自组装结构和可控相行为的ELP变体，其在药用注射剂和智能材料中展现出显著优势^[59]。Baker团队基于RXPdock和ProteinMPNN开发出一种全新的AI计算策略，成功设计出具有两个独立功能面的蛋白质纳米材料，解决了传统蛋白质纳米颗粒设计中的对称性限制问题，为精准医学和生物工程应用开辟了新的可能^[60]。

微生物燃料电池（MFC）为能源升级提供了创新解决方案，能够利用微生物的代谢将有机物中的化学能转化为电能^[61]。在大多数MFC中，电活性微生物附着于阳极表面参与形成复合电极材料，通过代谢氧化废水中的有机污染物，实现电子传递与电流生成，同时促进生物膜的维持与代谢活性^[62]。因此，MFC兼具发电与废水处理的双重功能。已有研究通过高通量测序与菌株驯化，筛选出一株具有高效电子传递能力的假单胞菌YS95，将其作为电活性生物膜的关键组分构建复合电极，进而开发出高效MFC系统；该系统用于精炼废水处理时，化学需氧量（COD）的去除率达到89.76%，最大输出

电压为347 mV，功率密度达到337 mW/m^{2[63]}。尽管MFC技术随合成生物学发展取得显著进展，但仍存在输出功率和能量密度低、稳定性差等问题。合成生物学为优化MFC性能提供了新途径，如通过理性设计微生物的电子传递路径，可有效提升其电子产生与传输效率。已有研究采用模块化工程策略和合成生物学技术，构建希瓦氏菌（*Shewanella oneidensis*）-碳纤维复合电极材料，通过在电极表面修饰细菌纤维素气凝胶和电聚合蒽醌，显著增强了细胞-电极界面的电子转移能力^[64]。该研究构建了异源核黄素合成与分泌途径，以增强黄素介导的跨膜电子传递；通过蛋白质工程策略优化外膜细胞色素表达，提高了直接接触基础上的电子传递效率；最终制备出细菌纤维素/电聚合蒽醌修饰的复合电极材料，进一步促进了界面电子转移。实验结果表明，工程化后的复合电极内阻降至42 Ω，仅为野生型的0.21%；最大功率密度达到（4286.6±202.1）mW/m²，提高了72.8倍。该复合电极在生物电能收集、Cr⁶⁺还原及CO₂还原等多种应用中均表现出优越性能。微生物参与构建的复合电极材料不仅实现了微生物代谢能向电能的转化，更构建了能源生产与环境污染治理协同推进的技术框架。

合成生物学的突出优势在于其对生物系统所具备的模块化、可预测与可编程的构建能力，使得智能与功能材料能够像电子电路一样，实现复杂功能的集成与精准调控^[65]。通过标准化基因元件的组合，不仅可以构建具有条件响应、逻辑判断、时间控制等功能材料系统，还能实现细胞行为（如趋化、分泌、代谢）与材料宏观性能（如颜色、形态、功能）之间的精准耦合^[66-68]。未来，“生物计算逻辑”与材料科学的深度融合将催生新一代“智能生命材料”^[69]，在生命医学、微型机器人、环境修复和极端环境探测等前沿领域展现出广阔的应用前景。然而，该领域的发展仍面临诸多生物工程方面的挑战：首先，微生物底盘细胞中的遗传回路复杂、规模庞大，遗传单元的组装通常会出现不可预测的功能失常，集成异源模块需要大量表征、设计与优化调试；其次，合成途径的动态调控机制尚未完全明晰，现有多尺度耦合调控工具在动态范围与灵敏度方面具有一定的局限性，难以实现基因表达与代谢流之间的精准协同，制约了材料合成生物学的发展^[70]；最后，在应用转化过程中，材料性能的

优化需在保持生物相容性的同时,显著提高其机械强度与热稳定性,以满足柔性电子和生物医学等领域的高端需求。“可编程制造”合成生物材料的未来发展,需要着力解决上述关键问题,从而推动其在资源替代、生物医疗及环境修复等领域的应用。合成生物学正在赋予材料前所未有的智能性和功能复杂度。通过遗传线路的精密设计、生物元件的模块组装以及与传统材料系统的融合,智能与功能型材料正向更高维度的可控性和适应性迈进。随着底层工具链的进一步完善和跨学科融合的不断深入,合成生物材料的“可编程制造”将成为推动新材料产业智能化、高性能化的重要路径。

(三) 材料循环与生物降解

在全球资源和环境压力日益严峻的背景下,推动材料的循环利用与高效降解已成为构建绿色低碳循环经济体系的重要任务。尤其是塑料污染问题日益加剧,这不仅严重破坏了生态环境,也对人类健康构成潜在威胁。合成生物学作为驱动新材料绿色转型的重要技术,正通过工程菌与功能酶的协同设计与应用,在材料循环与生物降解领域展现出巨大潜力。

酶促降解是实现材料绿色降解的重要途径,尤其是在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等聚合物的生物降解方面具有独特优势。例如,天然PET水解酶(如IsPETase)可在温和条件下断裂塑料高分子链,生成可回收利用的小分子单体^[71]。然而,天然PET水解酶普遍存在热稳定性差、催化效率低及降解不完全等问题。通过定向进化、半理性设计与理性设计等基因工程技术手段对PET水解酶进行改造,已成为提升其性能的有效策略。近年来,AI技术的快速发展极大推动了酶工程的进步。研究者融合机器学习算法与计算机辅助设计方法,对来源于细菌HR29的PET水解酶进行智能化改造,成功构建出催化活性更优的突变体TurboPETase,其能够在8 h内完全解聚高底物负载(200 g·kg⁻¹)的PET废弃物^[72];将来源于*Chitinolyticbacter meiyuanensis* SYBC-H1的几丁质结合结构域融合到PET降解酶ICCG的C端,成功将其PET降解活性提升了19.6%^[73];借助AI方法预测PET水解酶的关键局部结构,通过工程化氨基酸替换,设计出催化活性提高29倍的工程酶FAST-PETase^[74]。上述研究为酶法

降解塑料在工业化应用中的推广奠定了坚实基础。

在材料生物降解过程中,工程菌不仅能够表达降解酶参与材料分解,还可以将降解产物进一步转化为高值化合物。合成生物学通过代谢通路重构与优化,使微生物具备精准识别、协同分解与高效转化能力。研究者构建了NAD(H)自循环全细胞催化系统,该系统整合了氧化模块和羧化模块,并利用蛋白质工程提升关键酶催化效率,实现了糠醛一锅法高效合成2,5-呋喃二甲酸,最终收率达到35%^[75];此外,通过协同编排微生物群落的多种功能菌株,可以利用不同菌株的代谢分工与互补优势,有效克服单一菌株降解能力有限、代谢通路拥堵等瓶颈,为混合废塑料的降解与回收提供了新方案^[76]。利用合成生物学技术构建工程菌,耦合材料的生物降解和生物合成路径,可实现生物质高值化转化,推动化工行业的绿色低碳转型。

在“双碳”目标任务下,我国正不断加强材料绿色设计、污染治理与循环利用的协同发展。合成生物学所提供的绿色、可控、生物兼容的材料处理路径,与国家构建绿色循环发展体系的政策目标高度契合。通过降解酶的优化和工程菌的构建,合成生物学正在为材料全生命周期的环境问题提供系统化解决方案。

四、合成生物学驱动新材料创新发展趋势与发展建议

(一) 发展趋势

1. AI与合成生物学协同引领新材料创新

随着科技进步和复杂系统性问题的日益突出,合成生物学与新材料科学呈现出显著的多学科交叉融合的发展趋势。特别是在AI、数据科学、材料科学与工程、生物信息学等领域的技术突破,为新材料的设计、筛选、优化与产业转化提供了全新工具,极大地提升了研发效率与创新水平。

AI在合成生物学与材料科学中的应用主要体现在两大方面:一是辅助设计基因线路与代谢途径,提升生物合成效率与精准度;二是用于预测新型生物材料的结构-性能关系,实现高通量数据挖掘与理性设计。例如,AI方法可以依托大规模生物序列与结构数据库,预测蛋白质折叠结构与功能位点,从而加速功能蛋白质的筛选与定向进化过程。此

外，AI还被广泛应用于材料反应动力学模拟、生物基材料性能预测及材料组合优化等环节，使实验迭代过程更加高效和可控。与此同时，合成生物学通过引入模块化、生物编程和系统构建思想，使得材料的生物制造过程更加标准化、可预测。并与人工智能工具深度融合，推动材料研发从传统经验驱动向数据与模型驱动转型，逐步实现向智能制造的跨越。

2. 平台化与模块化协同发展

开放式平台与模块化设计的融合发展已经成为提升合成生物材料研发效率的关键路径。开放式平台打破传统研发的壁垒，通过构建标准化的生物元件库、代谢途径数据库和自动化测试平台，实现资源共享与功能快速重构，有效支撑新材料的快速迭代与优化。同时，模块化设计理念将复杂的合成路径解构为标准化、可替换的功能模块，增强系统的可预测性与适配性，为定制化、场景化的绿色材料开发提供了灵活手段。随着AI、大数据和自动化技术的深入融合，平台化与模块化策略正不断推动绿色合成材料从实验室走向产业化。

3. 从实验室向产业转化的协同推进

合成生物学在生物基新材料领域的研究成果日益丰富，正逐步改变多个行业的发展格局。以专注于生物制造的凯赛生物技术股份有限公司为例，该企业利用合成生物学技术改造微生物代谢途径，并优化发酵工艺条件，成功实现了生物基聚酰胺的规模化生产。然而，对于大部分新材料来说，实现从实验室到规模化应用的产业转化，仍面临诸多挑战。产业化路径的构建不仅依赖于核心技术的突破，还需在工程放大、标准体系建设、政策支持与商业模式等方面形成协同推进机制。

（二）发展建议

1. AI助力生物基新材料设计

传统合成生物学在新材料设计中更倾向于“经验驱动”和“实验试错”模式，在全局优化、高通量筛选和结构-关系的系统认知方面存在瓶颈。AI与新材料的融合不仅加速了生物基材料的发现，还将推动建立更加智能与高效的生物基材料理性设计和研发。未来可将AI深度融入DBTL循环，以显著加速新材料研发进程。借助机器学习驱动的预测性设计，加速获得具备目标性能的新材料；该方法需

与多尺度建模等较为成熟的计算设计策略协同发展。开发和采用更高层次的设计语言及工具，深化对复杂生物与材料系统的理解。进一步利用AI和数据分析等前沿技术，拓展新材料结构-功能关系的计算机模拟探索途径。推进AI、合成生物与材料科学的交叉融合，构建跨学科的集成平台与研究范式，打破传统学科壁垒，推动绿色制造、高性能材料等方面的技术突破。

2. 推动生物基新材料的产业化转化

合成路径的工程优化是实现规模化生产的技术基础。在实验室中构建的微生物细胞工厂往往具有较高的理论产率，但在工业条件下可能因底物转化率低、副产物积累或代谢负荷过重等问题，导致整体效率不理想。因此，需要通过代谢网络调控、底盘细胞优化和过程控制精细化等手段，提升其稳定性与可扩展性。同时，先进的生物反应器和高效的发酵工艺集成技术，是实现产业化放大不可或缺的关键环节。

建立标准化的DBTL闭环流程，有助于提升研发效率、实现模块化与自动化的规模拓展。构建标准化的基因路线、酶催化元件库和代谢通路模块库，配套建设高通量表征技术与数据智能分析平台，将大幅缩短从概念验证到中试乃至产业化应用的开发周期，为生物基新材料的快速迭代与转化提供体系化支撑。

政策引导与产业生态构建亦是不可或缺的因素。国家对生物制造、新材料和绿色低碳产业的政策支持，如《“十四五”生物经济发展规划》和“双碳”战略，为合成生物学成果的产业化提供了良好的宏观环境。科研机构与企业之间的协同创新机制、高风险投资支持以及知识产权保护体系的健全，将有助于推动技术成果从实验室走向市场。

生物基新材料产业化路径需以技术成熟度提升为核心，以标准体系构建为基础，以多方协同合作为保障，打通科研成果转化的“最后一公里”，实现科技成果经济价值的最大释放。

3. 构建科技伦理治理体系

随着合成生物学的快速发展和广泛应用，科技非理性使用带来潜在风险，生物安全与科技伦理问题日益成为社会关注的重点。在技术层面，需建立标准化的全周期生物安全监管与防控策略，涵盖从

工程菌株的生物遏制系统设计、应用场景规范到释放后追踪与溯源清除的全过程管理。在法律与政策层面,应构建具有适应性的动态法律调整机制,完善风险评估与治理体系,加强国际协作与信息共享,并提升公众参与和决策透明度,从而在促进合成生物技术创新的同时,切实保障公共健康与全球生态安全。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 27, 2025; **Revised date:** September 5, 2025

Corresponding author: Ge Jun is a professor from Department of Chemical Engineering, Tsinghua University. His major research fields include enzyme catalysis and synthetic biology. E-mail: junge@mail.tsinghua.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Green and Low-Carbon Development Strategies of Chemical New Materials in China” (2024-XBZD-09); National Key R&D Program of China (2023YFA0913600); National Natural Science Fund Project (22425803)

参考文献

- [1] Aldulijan I, Beal J, Billerbeck S, et al. Functional synthetic biology [J]. *Synthetic Biology*, 2023, 8(1): ysad006.
- [2] 崔金明, 张炳照, 马迎飞, 等. 合成生物学研究的工程化平台 [J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(11): 1249–1257.
Cui J M, Zhang B Z, Ma Y F, et al. Engineering platforms for synthetic biology research [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(11): 1249–1257.
- [3] Maini Rekdal V, van der Luijt C R B, Chen Y, et al. Edible mycelium bioengineered for enhanced nutritional value and sensory appeal using a modular synthetic biology toolkit [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 2099.
- [4] Lawson C E, Harcombe W R, Hatzenpichler R, et al. Common principles and best practices for engineering microbiomes [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2019, 17(12): 725–741.
- [5] 赵国屏. 合成生物学: 开启生命科学“会聚”研究新时代 [J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(11): 1135–1149.
Zhao G P. Synthetic biology: Unsealing the convergence era of life science research [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(11): 1135–1149.
- [6] Goshisht M K. Machine learning and deep learning in synthetic biology: Key architectures, applications, and challenges [J]. *ACS Omega*, 2024, 9(9): 9921–9945.
- [7] 陈国强, 吴赴清, 郑爽, 等. 我国生物制造底盘菌种现状、问题及对策 [J]. *中国科学院院刊*, 2025, 40(1): 2–13.
Chen G Q, Wu F Q, Zheng S, et al. Current status and applications of microbial chassis strains for Chinese biomanufacturing industry [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2025, 40(1): 2–13.
- [8] Jun Z, Shui Y, Yongfeng Z. Recent progress and prospects of synthetic biology [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2024, 37(6): 549–558.
- [9] Cho J S, Kim G B, Eun H, et al. Designing microbial cell factories for the production of chemicals [J]. *JACS Au*, 2022, 2(8): 1781–1799.
- [10] Yan X Y, He Q N, Geng B N, et al. Microbial cell factories in the bioeconomy era: From discovery to creation [J]. *Biodesign Research*, 2024, 6: 0052.
- [11] Wang Y Y, Liu L X, Jin Z X, et al. Microbial cell factories for green production of vitamins [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 661562.
- [12] Köpke M, Simpson S D. Pollution to products: Recycling of ‘above ground’ carbon by gas fermentation [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2020, 65: 180–189.
- [13] Rangel A E T, Gómez Ramírez J M, González Barrios A F. From industrial by-products to value-added compounds: The design of efficient microbial cell factories by coupling systems metabolic engineering and bioprocesses [J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2020, 14(6): 1228–1238.
- [14] Tang H T, Lin S M, Deng J L, et al. Engineering yeast for the *de novo* synthesis of jasmonates [J]. *Nature Synthesis*, 2024, 3(2): 224–235.
- [15] Singh K, Bunzel G, Graf B, et al. Reconstruction of a fatty acid synthesis cycle from acyl carrier protein and cofactor structural snapshots [J]. *Cell*, 2023, 186(23): 5054–5067.
- [16] Lee S Y, Kim H U, Chae T U, et al. A comprehensive metabolic map for production of bio-based chemicals [J]. *Nature Catalysis*, 2019, 2(1): 18–33.
- [17] Li Y F, Lin Z Q, Huang C, et al. Metabolic engineering of *Escherichia coli* using CRISPR-Cas9 mediated genome editing [J]. *Metabolic Engineering*, 2015, 31: 13–21.
- [18] Tong Y J, Charusanti P, Zhang L X, et al. CRISPR-Cas9 based engineering of actinomycetal genomes [J]. *ACS Synthetic Biology*, 2015, 4(9): 1020–1029.
- [19] Blin K, Pedersen L E, Weber T, et al. CRISPy-web: An online resource to design sgRNAs for CRISPR applications [J]. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 2016, 1(2): 118–121.
- [20] Zhang X L, Tervo C J, Reed J L. Metabolic assessment of *E. coli* as a biofactory for commercial products [J]. *Metabolic Engineering*, 2016, 35: 64–74.
- [21] Han Y H, Kim G, Seo S W. Programmable synthetic biology tools for developing microbial cell factories [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2023, 79: 102874.
- [22] Rok C, Dae J, Yang D, et al. Systems metabolic engineering strategies: Integrating systems and synthetic biology with metabolic engineering [J]. *Trends in Biotechnology*, 2019, 37(8): 817–837.
- [23] Madhavan A, Arun K B, Binod P, et al. Design of novel enzyme biocatalysts for industrial bioprocess: Harnessing the power of protein engineering, high throughput screening and synthetic biology [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 325: 124617.
- [24] 栾鹏仔, 冯玉晓, 卢滇楠, 等. 工业酶催化剂构建与反应过程强化新技术 [J]. *生物加工过程*, 2023, 21(5): 532–540.
Luan P Q, Feng Y X, Lu D N, et al. Construction of industrial enzyme catalysts and new technologies for strengthening reaction

- processes [J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2023, 21(5): 532–540.
- [25] Biz A, Proulx S, Xu Z Q, et al. Systems biology based metabolic engineering for non-natural chemicals [J]. Biotechnology Advances, 2019, 37(6): 107379.
- [26] Oosthoek J, Gills B K. Humanity at the crossroads: The globalization of environmental crisis [J]. globalization, 2005, 2(3): 283–291.
- [27] Anastas P, Eghbali N. Green chemistry: Principles and practice [J]. Chemical Society Reviews, 2010, 39(1): 301–312.
- [28] Song Y, Prather K L J. Strategies in engineering sustainable biochemical synthesis through microbial systems [J]. Current Opinion in Chemical Biology, 2024, 81: 102493.
- [29] Patra P, Das M, Kundu P, et al. Recent advances in systems and synthetic biology approaches for developing novel cell-factories in non-conventional yeasts [J]. Biotechnology Advances, 2021, 47: 107695.
- [30] Nazhand A, Durazzo A, Lucarini M, et al. Recent advances in metabolic engineering and synthetic biology for microbial production of isoprenoid-based biofuels: An overview [C]//Srivastana N, Srivastawa M, Mishra P K, et al. Bioprocessing for biofuel production. Singapore: Springer Singapore, 2021: 183–201.
- [31] Carbonell P, Currin A, Dunstan M, et al. SYNBIOCHEM—A SynBio foundry for the biosynthesis and sustainable production of fine and speciality chemicals [J]. Biochemical Society Transactions, 2016, 44(3): 675–677.
- [32] Baumschlager A, Khammash M. Synthetic biological approaches for optogenetics and tools for transcriptional light-control in bacteria [J]. Advanced Biology, 2021, 5(5): 2000256.
- [33] Alcalde M. Engineering the ligninolytic enzyme consortium [J]. Trends in Biotechnology, 2015, 33(3): 155–162.
- [34] Knorr D, Augustin M A. Food processing needs, advantages and misconceptions [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 108: 103–110.
- [35] Schulz-Mirbach H, Dronsella B, He H, et al. Creating new-to-nature carbon fixation: A guide [J]. Metabolic Engineering, 2024, 82: 12–28.
- [36] Treece T R, Gonzales J N, Pressley J R, et al. Synthetic biology approaches for improving chemical production in cyanobacteria [J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 869195.
- [37] 中国复合材料工业协会. 生物基复合材料: 行业现状与未来发展趋势 [R]. 北京: 中国复合材料工业协会, 2025. China Composite Materials Industry Association. Bio based composite materials: Industry status and future development trends [R]. Beijing: China Composite Materials Industry Association, 2025.
- [38] 张丽, 王帅. 生物基塑料发展热点及技术方向展望 [J]. 化学工业, 2024, 42(4): 20–31. Zhang L, Wang S. Development hotspots and technical directions outlook of bio-based plastics [J]. Chemical Industry, 2024, 42(4): 20–31.
- [39] Bhatia S K, Bhatia R K, Yang Y H. Biosynthesis of polyesters and polyamide building blocks using microbial fermentation and bio-transformation [J]. Reviews in Environmental Science and Bio-Technology, 2016, 15(4): 639–663.
- [40] Vardon D R, Rorrer N A, Salvachúa D, et al. *Cis, cis*-Muconic acid: Separation and catalysis to bio-adipic acid for nylon-6, 6 polymerization [J]. Green Chemistry, 2016, 18(11): 3397–3413.
- [41] Zhang Y, Yu S S, Wang M, et al. Process of a photobacterial cascade reaction for biobased adipic acid [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(22): 13643–13653.
- [42] Chae T U, Choi S Y, Ahn D H, et al. Biosynthesis of poly (ester amide)s in engineered *Escherichia coli* [J]. Nature Chemical Biology, 2025, 21(8): 1171–1181.
- [43] Boon Z H, Teo Y Y, Ang D T. Recent development of biodegradable synthetic rubbers and bio-based rubbers using sustainable materials from biological sources [J]. RSC Advances, 2022, 12(52): 34028–34052.
- [44] Mori Y, Noda S, Shirai T, et al. Direct 1,3-butadiene biosynthesis in *Escherichia coli* via a tailored ferulic acid decarboxylase mutant [J]. Nature Communications, 2021, 12: 2195.
- [45] Aldridge J, Carr S, Weber K A, et al. Anaerobic production of isoprene by engineered methanosarcina species Archaea [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2021, 87(6): e02417–20.
- [46] Burelo M, Martínez A, Hernández-Varela J D, et al. Recent developments in synthesis, properties, applications and recycling of bio-based elastomers [J]. Molecules, 2024, 29(2): 387.
- [47] Chen G Q. A microbial polyhydroxyalkanoates (PHA) based bio-and materials industry [J]. Chemical Society Reviews, 2009, 38(8): 2434–2446.
- [48] Nguyen P Q, Courchesne N D, Duraj-Thatte A, et al. Engineered living materials: Prospects and challenges for using biological systems to direct the assembly of smart materials [J]. Advanced Materials, 2018, 30(19): 1704847.
- [49] Vijayan P P, Puglia D. Biomimetic multifunctional materials: A review [J]. Emergent Materials, 2019, 2(4): 391–415.
- [50] Wegst U G K, Bai H, Saiz E, et al. Bioinspired structural materials [J]. Nature Materials, 2015, 14(1): 23–36.
- [51] Yao S S, Jin B, Liu Z M, et al. Biomineralization: From material tactics to biological strategy [J]. Advanced Materials, 2017, 29(14): 1605903.
- [52] Stein V, Alexandrov K. Synthetic protein switches: Design principles and applications [J]. Trends in Biotechnology, 2015, 33(2): 101–110.
- [53] Chen A Y, Zhong C, Lu T K. Engineering living functional materials [J]. ACS Synthetic Biology, 2015, 4(1): 8–11.
- [54] Shi K X, Radhakrishnan M, Dai X L, et al. Nema catalyzes trivalent organoarsenical oxidation and is regulated by the trivalent organoarsenical-selective transcriptional repressor NemR [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(9): 6485–6494.
- [55] Wang X, Hu K, Xu Q, et al. Immobilization of Cd using mixed *Enterobacter* and *comamonas* bacterial reagents in pot experiments with *Brassica rapa L* [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(24): 15731–15741.
- [56] Nguyen P Q, Soenksen L R, Donghia N M, et al. Wearable materials with embedded synthetic biology sensors for biomolecule detection [J]. Nature Biotechnology, 2021, 39(11): 1366–1374.
- [57] Kim I Y. Investigation of cell-based therapies employing microcapsules and microspheres: Encapsulation and controlled release [D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign (Doctoral

- dissertation), 2016.
- [58] Song D H, Zou Y T, Tian T, et al. Machine learning-assisted melamine-Cu nanozyme and cholinesterase integrated array for multi-category pesticide intelligent recognition [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2024, 266: 116747.
- [59] Laakko T, Korkealaakso A, Yildirim B F, et al. Accelerated engineering of ELP-based materials through hybrid biomimetic-de novo predictive molecular design [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(28): 2312299.
- [60] Rankovic S, Carr K D, Decarreau J, et al. Computational design of bifaceted protein nanomaterials [J]. *Nature Materials*, 2025: 1–9.
- [61] Mersinkova Y, Yemendzhiev H, Nenov V. Comparative study on the metabolic behaviour of anode biofilm in microbial fuel cell under different external resistance [J]. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2022, 36(1): 142–147.
- [62] Naaz T, Kumar A, Vempaty A, et al. Recent advances in biological approaches towards anode biofilm engineering for improvement of extracellular electron transfer in microbial fuel cells [J]. *Environmental Engineering Research*, 2023, 28(5): 220666.
- [63] Qi X Y, Liu R J, Cai T, et al. Harnessing electroactive microbial community for energy recovery from refining wastewater in microbial fuel cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 102: 874–886.
- [64] Liu Q J, Xu W L, Ding Q R, et al. Engineering shewanella oneidensis-carbon felt biohybrid electrode decorated with bacterial cellulose aerogel-electropolymerized anthraquinone to boost energy and chemicals production [J]. *Advanced Science*, 2024, 11(39): 2407599.
- [65] Tang T C, An B L, Huang Y Y, et al. Materials design by synthetic biology [J]. *Nature Reviews Materials*, 2021, 6(4): 332–350.
- [66] Kelly J R, Rubin A J, Davis J H, et al. Measuring the activity of BioBrick promoters using an *in vivo* reference standard [J]. *Journal of Biological Engineering*, 2009, 3: 4.
- [67] Gardner T S, Cantor C R, Collins J J. Construction of a genetic toggle switch in *Escherichia coli* [J]. *Nature*, 2000, 403(6767): 339–342.
- [68] Elowitz M B, Leibler S. A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators [J]. *Nature*, 2000, 403(6767): 335–338.
- [69] Moon T S, Lou C B, Tamsir A, et al. Genetic programs constructed from layered logic gates in single cells [J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 249–253.
- [70] 崔惠敬, 王帆, 李敬敬, 等. 材料合成生物学研究进展及展望 [J]. *中国科学基金*, 2025, 39(3): 432–440.
- Cui H J, Wang F, Li J J, et al. Progress and outlook of materials preparation *via* synthetic biology [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2025, 39(3): 432–440.
- [71] Joo S, Cho I J, Seo H, et al. Structural insight into molecular mechanism of poly(ethylene terephthalate) degradation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 382.
- [72] Cui Y L, Chen Y C, Sun J Y, et al. Computational redesign of a hydrolase for nearly complete PET depolymerization at industrially relevant high-solids loading [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 1417.
- [73] Xue R, Chen Y P, Rong H, et al. Fusion of chitin-binding domain from chitinolytic bacter *meiyuanensis* SYBC-H1 to the leaf-branch compost cutinase for enhanced PET hydrolysis [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 762854.
- [74] Lu H Y, Diaz D J, Czarnecki N J, et al. Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization [J]. *Nature*, 2022, 604(7907): 662–667.
- [75] Ma M Z, Wang Y J. NAD(H) self-recycling whole-cell biocatalysis for the production of furoic acid and 2,5-furandicarboxylic acid from furfural *via* CO₂ fixation [J]. *Green Chemistry*, 2025, 27(36): 10969–10973.
- [76] Qi X H, Ma Y, Chang H C, et al. Evaluation of PET degradation using artificial microbial consortia [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 778828.