

生物酶基因改造促进环境友好型降解塑料循环利用的科学发展

张友根

(上海第一塑料机械厂, 上海 201201)

摘要: 生物酶基因改造促进环境友好型降解塑料循环利用的发展。本文深入研究了塑料降解生物酶的筛选和选择的科学发展; 研究了塑料降解生物酶的基因改造技术的科学发展; 研究了塑料降解酶合成生物技术科学发展研究; 分析了 AI 塑料降解生物酶技术的科学发展; 分析了塑料降解生物酶在环境友好型降解塑料中应用的科学发展; 阐述了新型塑料降解生物酶的开发与应用前景; 论述了塑料降解生物酶基因改造促进环境友好型降解塑料循环利用发展趋势和研究方向。本文指出塑料降解生物酶的发展, 不仅提升了酶在实际应用中的降解效率, 而且推动了环境友好型降解塑料循环利用。

关键词: 塑料降解; 生物酶; 人工智能; 基因改造; 科学发展

中图分类号: Q55, TQ320.9

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)01-0001-11

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.01.001

0 前言

利用生物酶进行塑料降解被视为一种促进环境友好型降解塑料循环利用的解决方案引起了广泛的关注。生物酶高效、选择性和环境友好等降解特性, 在塑料降解过程中展现出巨大潜力。生物酶在降解塑料过程中通过特定的活性位点与塑料分子中的化学键进行结合, 加速塑料分子的断裂和重组, 从而实现塑料的生物降解。酶的选择性和高效性使得它们能够在温和的条件下进行工作, 避免了传统化学塑料降解过程中可能产生的有毒副产物。因此, 塑料降解新型功能生物酶的开发及其在塑料循环经济中的战略角色的研究成为了促进环境友好型降解塑料循环利用的科学发展的重要议题。通过深入研究新型功能生物酶的特性、开发方法、工业应用及基因改造技术, 不仅能够推动塑料降解技术的进步, 还能够促进塑料循环经济的发展, 为实现环境可持续发展目标贡献力量。

本文深入研究了塑料降解生物酶的筛选和选择的科学发展; 研究了塑料降解生物酶的基因改造技术的科学发展; 研究了塑料降解酶合成生物技术科学发展研究; 分析了 AI 塑料降解生物酶技术的科学发展; 分析了塑料降解生物酶在环境友好型降解塑料中应用的科学发展; 阐述了新型塑料降解生物酶的开发与应用前景; 论述了塑料降解生物酶基因改造促进环境友好

型降解塑料循环利用发展趋势和研究方向。本文指出塑料降解生物酶的发展不仅提升了酶在实际应用中的效率, 对于推动环境友好型降解塑料循环利用具有重要意义。

本研究为塑料实现“零”污染, 提供创新解决参考。

1 塑料降解生物酶的筛选和选择的科学发展

酶的来源广泛且多样, 包括但不限于动物细胞组织液或分泌物、植物细胞组织液以及微生物发酵产物。微生物来源的酶因其稳定性、高效性和能大规模生产性而受到高度重视。筛选酶的过程通常涉及以下几个关键步骤: 首先, 从潜在的产酶微生物菌株中进行初步收集和分离, 这可以通过在实验室环境中培养不同种类的微生物来实现, 或者从自然环境中直接获取样本, 如土壤、海洋沉积物或森林地表。其次, 采用一系列筛选技术来鉴定具有目标酶活性的微生物。这些技术可能包括过滤、离心、沉淀或其他物理方法, 用于浓缩含有目标酶的样本。此外, 还可以利用分子生

作者简介: 张友根 (1947-), 男, 教授级高级工程师, 终身享受国务院政府特殊津贴, 主要从事塑料材料和工艺的相关研究, 已在国家期刊上发表论文多篇。

物学技术,如PCR(聚合酶链反应)或测序,来快速识别产酶微生物的特定基因序列。接着,通过酶活性测试来进一步筛选出具有高活性和特异性的酶。这通常包括底物特异性试验、pH值稳定性测试、温度耐受性分析等,以确保所选酶能够在实际应用条件下保持高效表现。最后,对筛选出的酶进行纯化和表征,以确定其结构、功能和稳定性。这一阶段可能需要使用层析技术、电泳或质谱等高级分析方法,以便更深入地理解酶的性质,并优化其生产和应用条件。整个酶的来源与筛选过程是一个迭代和优化的过程,旨在高效地获得性能优异、成本可控的酶产品,为后续的生物降解塑料合成学研究提供基础。

1.1 自然界中生物酶的筛选与选择的科学发展

酶筛选与选择是确保高效生物降解过程的关键。科学家们在自然界中发现了多类具有独特降解塑料性能的生物酶,这些酶在特定环境下表现出高效催化能力,对降解塑料具有重要作用。通过筛选具有较高活性和选择性的酶,针对性地选择或合成特定的生物酶,以满足不同环境下降解特定塑料的需求。

1.1.1 自然界中生物酶的筛选与选择的特征

自然界中生物酶的发现与筛选主要通过三种途径进行:从商品酶库中筛选、从已知菌种来源和菌种保藏中心筛选以及从自然界发现和筛选产酶微生物。首先,从商品酶库中筛选是一种高效的方法,研究人员可以访问到已经经过初步筛选和纯化的酶资源,这些酶资源库包含了各种生物来源的酶,为特定应用提供了广泛的候选酶选择。其次,从已知菌种来源筛选则依赖于对特定微生物菌株的深入研究,通过培养和分离具有特定酶活性的微生物,进一步进行酶活性鉴定和优化。最后,从自然界发现和筛选产酶微生物通常涉及野外采样、土壤或海洋等环境样本的收集,通过微生物组学和分子生物学技术来识别潜在的产酶微生物,随后进行酶活性测试以筛选出目标酶。这一过程往往需要结合现代生物信息学手段,如高通量测序和生物信息分析,以加速筛选过程并提高发现新酶的效率。通过这些方法,研究人员能够广泛探索生物酶的潜在来源,并针对特定的环境友好型降解塑料循环利用需求,筛选出具有高效催化性能的酶,从而推动相关技术的发展和應用。

1.1.2 自然界中塑料降解生物酶的类型和功能

塑料降解生物酶的种类及其对不同塑料的降解效果涵盖了多种生物催化剂,这些酶因其高效性和选择性在促进环境友好型降解塑料循环利用中扮演着关键角色。每种酶因其特定的结构和活性位点而展现出对特定塑料类型的选择性,这使得它们在不同降解条件下的应用成为可能。目前,自然界中发现的塑料降解生物酶主要有以下几大类酶:

(1) 脂肪酶

能够降解聚酯纤维(如PET)中的酯键,通过催化酯化反应将大分子聚酯分解成小分子酯或醇类,从而加速塑料降解过程。

(2) 蛋白酶

虽然主要作用于蛋白质结构,但在特定条件下也可能参与某些类型的塑料降解,例如通过降解塑料表面吸附的蛋白质残留物来间接影响塑料的物理性质。

(3) 纤维素酶

对于基于纤维素的降解塑料,如某些植物基聚合物,纤维素酶能够作用于纤维素链,促进其降解,从而有助于整体材料的分解。

(4) 淀粉酶

在处理以淀粉为基础的生物降解塑料时,淀粉酶能够催化淀粉分子的分解,将其转化为更易被微生物利用的小分子糖类,加速塑料的自然降解。通过精确筛选和优化这些酶的性能,研究人员能够针对不同塑料成分设计定制化的生物降解方案,有效提高塑料循环利用效率并减少环境负担。

1.2 塑料降解生物酶促降解的优化策略的科学发展

酶促降解的优化策略主要包括以下几个方面:首先,通过基因工程改造特定的酶,提高其对目标塑料成分的亲和力、催化效率以及稳定性。这包括设计和构建具有更高特异性和活性的新酶,或者对现有酶进行修饰,以增强其在特定条件下的功能。其次,开发适宜的酶反应的条件,如温度、pH值、溶解氧浓度等,以最大化酶的催化效率和产物收率。此外,通过引入辅助因子、稳定剂或表面活性剂来改善酶的性能和稳定性,延长酶的使用寿命。第三,探索和利用微生物共生体系,通过微生物代谢途径协同降解塑料,提高整体降解速率和效率。最后,开发连续化、自动化和集成化的酶促降解工艺,实现大规模、高效和经济的塑料降解处理,降低能源消耗和环境影响。这些策略旨在克服酶促降解过程中的限制因素,促进生物降解

塑料技术的成熟和广泛应用。

2 塑料降解生物酶的基因改造技术的科学发展

酶的基因工程改造在优化生物酶性能方面的重要作用。通过基因工程手段,科学家能够精确地修改酶的遗传编码,以增强其对特定塑料成分的识别能力和催化效率,或者使酶在极端条件如高温、高盐或酸碱条件下保持稳定活性,从而提高降解效率和扩大应用范围。通过基因工程技术,科学家可以对酶的结构进行精确修改,增强其对特定塑料分子的识别能力和催化效率,同时提高酶的稳定性和耐受性,延长其在复杂环境条件下的使用寿命。酶基因改造技术概述主要包括基因工程技术、蛋白质工程以及定向进化等方法。基因工程技术通过直接操作 DNA 序列,如定点突变、同源重组或 CRISPR-Cas 系统等手段,精确修改酶基因,以改变酶的性质、提高酶活性或增强其稳定性。蛋白质工程则侧重于在氨基酸水平上对酶进行设计和优化,通过改变酶的三维结构,从而影响酶的催化特性和功能。定向进化是一种模仿自然选择过程的人工选择方法,通过引入随机变异和选择压力,使得酶在特定环境下经过多代迭代,逐渐演化出更适应特定条件的特性。这些技术结合应用,能够显著提升酶的性能,使其在工业生产和环境治理等领域展现出更大的潜力。

2.1 塑料降解生物酶基因改的科学发展特征

基因改造技术概述涉及通过直接操作生物体的遗传物质来改变其遗传信息,旨在增强或引入新的功能。这一领域包括多种技术,如基因敲除、基因添加、基因编辑以及蛋白质表达调控等。通过使用 CRISPR-Cas9 系统、TALENs、ZFNs 等先进工具,科学家能够精确地定位并修改 DNA 序列,实现对特定基因的精准操作。基因改造不仅限于改变单个基因,还能用于调整多个基因的表达水平,甚至设计合成全新的基因组结构。

基因改造技术概述涉及通过直接操作生物体的遗传物质来改变其遗传信息,旨在增强或引入新的功能。这一领域包括多种技术,如基因敲除、基因添加、基因编辑以及蛋白质表达调控等。通过使用 CRISPR-Cas9 系统、TALENs、ZFNs 等先进工具,科学家能够精确地定位并修改 DNA 序列,实现对特定基因的精准操作。基因改造不仅限于改变单个基因,还能用

于调整多个基因的表达水平,甚至设计合成全新的基因组结构。这些技术在提高生物体抗逆境能力、增加产量、改善产品品质以及开发新型生物催化剂等方面展现出巨大的潜力。基因改造技术为生物科学提供了强大的工具箱,推动了从基础研究到实际应用的广泛进展。

2.1.1 塑料降解生物酶的基因改造策略

塑料降解酶基因改造的主要目标与策略旨在通过精确的遗传操作来增强或改变酶的特性和功能,以适应特定的应用需求。这些目标通常包括但不限于提高酶的稳定性、优化其催化活性、扩展其底物范围、延长作用时间以及增强其在极端条件下的性能。

策略上,科学家们采用多种方法,改造塑料降解生物酶的基因。此外,基因编辑技术,特别是 CRISPR-Cas 系统,因其高精度和灵活性,在酶基因改造中扮演着日益重要的角色。通过这些策略,研究人员能够定制酶的特性,使其更高效地参与环境友好型塑料的分解过程,从而促进可持续发展的环境保护策略。

(1) 定点突变

通过基因编辑技术(如 CRISPR-Cas9 系统)对酶基因进行定点突变,以优化酶的活性、选择性或稳定性。例如,可以设计突变以增加酶对特定塑料的亲合力或提高其在极端条件下的稳定性。

(2) 融合蛋白构建基因工程

增加蛋白质的稳定性、改变蛋白质的溶解性、提高表达水平、或是用于标记、追踪蛋白质在细胞内的定位等选择融合伙伴,设计融合结构。

(3) 氨基酸序列优化

基于结构生物学的数据库,设计和合成具有优化氨基酸序列的新酶,以增强其催化性能。这可能涉及改变酶的活性位点、稳定区域或底物结合区域。

(4) 酶改造工程

利用酶工程方法,对现有的酶进行改造,包括酶的嵌合体构建、酶的多酶系统设计、酶的化学修饰等,以提高酶的性能或扩展其功能。科学家通过基因工程改造微生物中的降解酶,提高其对特定塑料(如聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等)的降解效率。

(5) 理性改造设计

基于对酶催化机制的理解,进行理性设计,直接设计新的酶序列,使其具有特定的催化特性。这通常结合了结构生物学、分子模拟和理论化学的知识。

(6) 高通量筛选

使用高通量筛选技术,从大量的酶变体中快速筛选出具有最佳性能的酶。这可以结合生物信息学和机器学习算法,以提高筛选效率。

(7) 组合化学筛选

通过合成化学的方法,构建酶的类似物或衍生物,然后通过筛选确定最具活性的变体。这可以用于发现新的催化中心或底物结合模式。

(8) 迭代进化改造

使用进化的策略,如遗传算法或进化编程,来优化酶的性能。通过模拟自然选择过程,迭代地改进酶的性能,直到达到最优状态。

(9) 结构-功能集成改造

通过研究酶的结构与其催化活性之间的关系,指导酶的改造。这通常涉及X射线晶体学、核磁共振(NMR)和冷冻电子显微镜(cryo-EM)等结构生物学技术。

(10) 生物信息学预测筛选

利用生物信息学工具,预测特定氨基酸序列或结构变化对酶性能的影响。这可以加速筛选过程,并指导实验设计。

(11) 基因挖掘

通过基因组测序、宏基因组学等技术,科学家们可以从自然界中发现潜在的塑料降解酶基因。这些基因编码的酶通常存在于能够降解塑料的微生物中。

(12) 微生物筛选与优化

利用高通量筛选技术从自然环境中筛选具有塑料降解能力的微生物,并通过基因组学研究其代谢途径,优化微生物的生长条件和降解效率。科学家通过基因工程改造微生物中的降解酶,提高其对特定塑料(如聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等)的降解效率。例如,通过定向进化技术,可以设计出具有更高活性和稳定性的酶,以加速塑料降解过程。

(13) 集成降解

开发高效且适用范围广的生物酶对于克服多种塑料类型有效降解方法的挑战至关重要。针对不同的塑料类型,科学家们正在探索定制化的生物酶组合和优化的酶工程技术,以实现复杂混合物中各种塑料的高效降解。例如,通过基因工程手段改造现有的酶,增强其对特定塑料基材的亲合力和降解效率;或者开发新的酶系,专门针对传统降解技术难以处理的塑料,如聚碳酸酯、聚氯乙烯或高性能工程塑料。此外,研

究还集中在提高酶的稳定性、延长其在复杂环境条件下的作用时间,以及降低酶的消耗量,从而降低成本并提高整体降解效率。通过这些技术创新,旨在创建一个全面的、适应性强的生物降解系统,能够有效地将各种塑料废弃物转化为环境友好型产物,如有机肥料、生物燃料或可再利用的原料,最终实现塑料循环经济的可持续发展。

2.1.2 塑料降解生物酶的基因改造与应用的实际案例分析

塑料降解生物酶的基因改造与应用是近年来环保科技领域的一个热点,特别是在寻找可持续解决方案以减少塑料污染方面。塑料降解生物酶的基因改造与应用展现了生物技术在解决环境问题上的潜力。通过基因工程技术,科学家们持续开发出更加高效、选择性更强的酶,不仅提高了塑料的生物降解效率,还促进了生物基塑料的开发,为可持续发展的未来提供了重要支持。

特异降解塑料酶开发。天津大学的研究团队开发了一种名为IsPETase的酶,专门用于高效降解聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET),这是常见的塑料之一。通过基因工程改造,科学家们提高了这种酶的活性和稳定性,使其在环境条件下能更有效地分解PET,不仅为PET的生物降解提供了新途径,还为塑料废物的处理和循环利用提供了可能,减少了对环境的污染。

生物基塑料的开发。塑料降解生物酶的基因改造除了直接改造现有的生物降解酶,科学家们也在开发生物基塑料,这些塑料在使用后可以被微生物完全降解,开辟了塑料“零”污染的路径。

一些公司开始采用生物降解酶技术处理塑料废弃物,例如在废塑料清洗废水处理厂中使用这些酶来分解塑料微粒,在农业领域中使用生物降解塑料来减少土壤污染。

3 塑料降解酶合成生物学技术科学发展研究

塑料降解酶的合成生物学是近年来的一个热点领域,旨在通过生物技术手段开发高效降解塑料的酶类,以解决日益严重的塑料污染问题。这一领域的科学发展体现了跨学科合作和技术创新的重要作用。合成生物学是一个快速发展的交叉学科领域,它结合了生物化学、分子生物学、遗传学和工程学,旨在设计、构建和优化生物系统。研究者们利用化学合成方法,结

合生物降解机制，设计出了一系列具有特定结构和性能的生物降解塑料材料。

3.1 塑料降解酶合成生物学科学发展特征

合成生物学视角下的生物降解研究不仅关注材料的生物降解性能，还考虑其机械性能、热稳定性、成本效益以及与传统塑料的兼容性。随着对生物降解塑料性能要求的不断提高，合成生物学视角下的生物降解研究正朝着多功能化、高性能化和环保化方向发展，以满足现代社会对可持续发展材料的需求。

塑料降解酶在合成生物学中的开发是一个复杂但充满前景的过程，开发主要集中在通过生物技术手段，探索与其他技术的融合，如纳米技术、人工智能等，以增强酶的性能，提高技术的综合优势，设计和改造酶，使其能够高效地降解塑料，以应对塑料污染问题。

研究过程中，科学家们探索了不同类型的生物基单体如何通过聚合反应形成具有不同降解速率和最终产物的聚合物。此外，还涉及到对生物降解过程的深入理解，包括微生物的作用、酶的催化机制以及环境因素的影响。为了提高生物降解塑料的实用性，研究者们还致力于优化生产过程，降低能耗和成本，同时增强材料的生物相容性，以便在医疗、农业等领域有更广泛的应用。

3.2 塑料降解酶合成生物学科学发展策略

3.2.1 结构生物学与分子动力学模拟

利用 X 射线晶体学、核磁共振 (NMR) 和冷冻电镜等技术，研究酶的三维结构和催化机制，通过分子动力学模拟预测酶的动态行为，指导酶的开发和优化。

3.2.2 基因工程修改

利用基因工程技术，对发现的酶基因进行修改，包括定点突变、同源重组、RNA 编辑等，以提高酶的活性、选择性、稳定性或适应特定环境条件。天津大学尤生萍教授团队发现并优化了 IsPETase 酶，能够高效降解聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)，为塑料废弃物的生物降解提供了一种可能的解决方案。

3.2.3 开发高效的生物制造方法

通过发酵工程或细胞工厂生产酶，降低成本，提高产量。

3.2.4 生物反应器优化

优化生物反应器的操作条件，包括温度、pH 值、底物浓度和氧分压等，以最大化酶的催化效率。开发高效生物反应器，如固定化生物反应器、连续流动生物反应器等，以提高生物降解过程的效率和稳定性。

这些反应器可以更有效地控制反应条件，促进微生物的生长和降解活动。

3.2.5 环境应用开发

开发生物降解技术，用于处理塑料废弃物，如城市垃圾、海洋塑料污染等，改善环境质量。

3.2.6 创建自我修复和保护

利用合成生物学技术，还可以创建能自我修复或在不利环境下自我保护的酶，进一步提升其在实际应用中的稳定性和持久性。这些基因工程改造和合成生物学策略不仅提高了生物酶在降解塑料过程中的效能，也为开发新型、高效、环境友好的生物降解材料提供了可能，对于促进循环经济和减少环境污染具有重要意义。

3.2.7 系统生物学开发应用

研究生物体内的代谢网络和调控机制，设计出能够高效合成目标产物的生物系统。这包括对代谢途径的重构、添加或删除特定酶的步骤，以优化产物的生成。使用系统生物学工具，分析和预测生物系统的行为，以指导酶的定制设计。创建数学或计算机模型来模拟生物系统的动态行为，帮助预测不同酶组合的效果，从而优化生物反应器的设计和操作。

3.2.8 生物传感器和检测器的开发应用

开发基于酶的生物传感器和检测器，用于快速、灵敏地检测特定环境污染物分子的存在，如疾病标。利用酶的高特异性来识别和放大信号，从而实现高敏感度和选择性。

3.2.9 合成酶的创新

通过生物化学、组合化学和合成化学的方法，设计并合成自然界不存在的酶。这些酶可能具有独特的催化特性，如在极端条件下工作或非常规的催化反应。湖北大学生命科学学院的郭瑞庭教授团队发现，角质酶可以高效降解聚己内酯 (PBAT)，这是一种常见的生物基聚合物。这一发现扩展了酶降解塑料的范围，并为生物基塑料的回收提供了新思路。

3.2.10 酶集成模型的构建

创建数学或计算机模型来模拟生物系统的动态行为，帮助预测不同酶组合的效果，从而优化生物反应器的设计和操作。

3.2.11 重构代谢模型

通过实验数据和理论分析，构建、优化和验证生物体内代谢途径的数学模型。利用先验知识和实验数据，通过概率统计方法更新参数估计。利用模型预测

代谢产物的生成效率,设计新的生物合成途径。

3.3 塑料降解酶合成生物学改造和应用的实例及分析

定向进化是一种通过人工选择和遗传操作来加速自然选择过程的方法,它允许科学家们在短时间内优化酶的性能。合成生物学应用于定向化过程中,不仅加速了酶的优化过程,而且通过精准的基因操作,提高了酶对特定塑料的降解效率,为塑料废物的生物降解提供了新的途径。

通过集成生物降解酶和生物基塑料技术,合成生物学技术可以实现塑料废弃物的有效管理和资源的可持续利用,促进循环经济的发展。

3.4 塑料降解生物酶生物合成学科学发展面临挑战

基于酶的生物降解塑料合成学研究正处于快速发展的阶段,但仍面临多个关键的科研方向与技术瓶颈。需要深入探索不同类型的生物酶对特定塑料基质的降解效率与机理,以期开发出更加高效、专一性强的酶系组合,实现对复杂塑料混合物的有效分解。其次,研发具有高稳定性和重复使用性的酶制剂,以降低生产成本并提高工业应用的经济性,成为当前的一大挑战。此外,通过合成生物学手段设计和改造天然存在的或人工创造的酶,以增强其催化活性、耐热性、耐盐性等特性,也是未来科研的重点之一。需要深入探索不同类型的生物酶对特定塑料基质的降解效率与机理,以期开发出更加高效、专一性强的酶系组合,实现对复杂塑料混合物的有效分解。其次,研发具有高稳定性和重复使用性的酶制剂,以降低生产成本并提高工业应用的经济性,成为当前的一大挑战。此外,通过合成生物学手段设计和改造天然存在的或人工创造的酶,以增强其催化活性、耐热性、耐盐性等特性,也是未来科研的重点之一。此外,通过合成生物学手段设计和改造天然存在的或人工创造的酶,以增强其催化活性、耐热性、耐盐性等特性,也是未来科研的重点之一。

4 AI 塑料降解生物酶技术的科学发展

随着人工智能(AI)技术的发展,AI被用于加速酶的设计和优化过程。AI系统可以预测酶的结构、功能和性能,指导科学家们如何进行基因改造以提高酶的降解效率和稳定性。AI在塑料降解生物酶的开发过程中扮演着越来越重要的角色,AI辅助的酶设计不仅

加速了塑料降解生物降解酶的发现和优化,还使得科学家能够设计出更高效、更特异性的酶,为解决塑料污染提供了更多可能性,还为解决环境问题提供了新的解决方案。

4.1 AI 酶筛选与选择的科学发展特征

AI驱动的酶筛选与选择流程通常涉及数据收集、模型构建、预测分析以及验证优化四个主要阶段。首先,通过实验或数据库获取大量酶的物理化学性质、结构特征以及催化活性等信息,作为训练数据集。接着,利用机器学习或深度学习算法建立预测模型,如支持向量机(SVM)、随机森林(RF)或者神经网络(NN),以识别与高催化活性相关的关键参数。在预测分析阶段,模型将用于预测新酶或变异酶的性能,从而筛选出具有潜在高活性的候选酶。最后,通过实验验证和进一步优化来确认模型的预测准确性,并最终选定最佳酶候选者,这一过程结合了AI的高效筛选能力和传统实验方法的精确验证,显著提高了酶的开发效率和成功率。

4.2 AI 酶的设计与优化的科学发展策略

AI酶设计与优化涉及到多个学科的交叉融合,包括化学、生物学、计算机科学和人工智能等。AI在酶的设计与优化中的作用主要体现在通过深度学习、机器学习等人工智能算法,对大量酶结构数据进行分析,预测酶的三维结构、活性位点、稳定性等关键特性。AI能够加速酶的设计过程,通过模拟实验,快速筛选出具有理想性质的新酶候选体,甚至能够设计出自然界中不存在的酶分子。此外,AI还能优化酶的性能,如提高酶的催化效率、增强其对特定底物的选择性或改善其在复杂环境下的稳定性。这一过程不仅极大地缩短了传统酶研发的时间周期,还为开发高效、环保的生物催化剂提供了可能。

4.2.1 机器学习与深度学习

通过训练神经网络等模型,AI能够学习酶的结构与其催化活性之间的复杂关系,从而预测新的酶结构或优化现有酶的性能。例如,使用深度学习模型来预测酶的三维结构,或预测特定氨基酸序列如何影响酶的催化效率和稳定性。

4.2.2 计算化学与分子模拟

AI技术能够加速分子动力学模拟、量子化学计算和分子对接过程,帮助科学家们理解酶的催化机制,并设计出更高效的酶。

4.2.3 遗传算法与进化计算

通过模仿自然选择的过程, AI 可以演化出新的酶结构或序列, 不断优化其性能。

4.2.4 AI 设计创造新颖塑料降解特性的环境友好型酶

AI 系统可以通过学习现有的酶数据库、结构信息以及它们的功能特性, AI 算法能够从无到有设计全新的酶分子, 这包括预测酶的三维结构、序列和功能特性。AI 模型通过学习已知酶的结构-功能关系, 通过精确控制 AI 算法的参数、训练数据的质量和多样性, 以及后续的实验验证, 能够持续发现和设计出具有特定催化特性的新酶, 生成具有新颖特性的酶序列。这些序列可能具有以前未知的催化活性、更高的催化效率、更强的选择性、或者对特定环境条件的耐受性。

4.2.5 酶的设计与优化

AI 技术能够通过预测和模拟, 设计出具有特定功能的酶。例如, 通过机器学习算法分析大量已知酶的结构与功能数据, AI 可以预测新的酶结构, 或者对现有酶进行优化, 以提高其催化效率、选择性或稳定性。这种设计过程通常涉及从头设计、序列优化和结构预测等步骤。

4.2.6 酶的结构或序列的优化

通过 AI 算法, 可以优化酶的结构或序列, 以提高其对特定塑料的降解能力。AI 技术通过数据分析、预测和模拟能力, 大大加速了酶的设计和优化的过程, 优化酶的氨基酸序列, 以提高酶的活性、稳定性和选择性。通过 AI 算法, 优化酶的结构或序列, 以提高其对特定塑料的降解能力。这包括寻找能够快速降解常见塑料(如聚乙烯、聚丙烯)的酶, 或设计能够耐受塑料分解过程中产生极端条件的酶。AI 通过机器学习或深度学习算法, 可以从大量可能的序列组合中筛选出最优序列, 甚至预测特定突变对酶性能的影响。AI 模型可以预测潜在的酶序列, 这些序列具有特定的催化活性或结构特性。通过训练数据集(通常包含已知的酶序列及其功能属性), AI 能够学习并生成新的序列, 这些序列可能具有优化的催化效率、稳定性或底物特异性。AI 算法可以搜索庞大的序列空间, 找到优化后的序列, 这些序列在特定条件下表现出最佳的催化性能。这可能涉及调整序列以最小化副反应、提高热稳定性或增强与特定底物的亲和力。AI 迭代优化序列设计。AI 与实验结果进行交互式学习, 不断迭代优化过程, 逐渐改进序列设计。这种方法结合了 AI 的预

测能力与实验数据的反馈, 使得优化过程更加高效和精确。

4.2.7 AI 多目标优化酶

AI 可以同时考虑多个优化目标, 可以同时考虑多个目标参数(如活性、稳定性、选择性等)进行综合优化, 这是传统方法难以实现的, 通过多目标优化算法找到平衡点, 设计出同时满足多种要求的酶, 不仅加速了新酶的发现和开发过程, 还显著提高了酶的性能和实用性, 为生物技术和制药行业带来了革命性的变革。

4.2.8 AI 酶结构预测与设计

领域的应用正逐步深入各个生物酶技术领域, 推动了生物酶基础科学研究的进步, AI 能够加速酶的结构预测过程, 这对于理解酶的催化机制至关重要。通过结构引导的序列优化, AI 能够设计出具有理想结构的酶, 从而改善其催化性能。开发了一系列专门针对蛋白质结构预测的算法, 如 AlphaFold、RoseTTAFold 等, 这些算法利用 AI 技术, 能够预测蛋白质的三维结构, 甚至在某些情况下达到实验结构的准确性水平。AI 在酶结构预测领域的最新进展主要集中在提升预测的准确性和效率上, 特别是在蛋白质结构预测方面取得了显著成就。如晶泰科技与 IDEA 研究院、中科院天工所生物设计中心等, 通过合作和开源共享, 加速了 AI 在酶结构预测领域的应用和发展。

4.2.9 AI 和生物信息学

AI 通过深度学习模型, 从复杂的生物数据中学习, 使用机器学习算法分析大量数据, 预测酶的结构-功能关系, 指导酶的设计和优化过程预测酶的性能和催化机制, 甚至设计出全新的酶。- **深度学习** : 通过深度学习模型, 从复杂的生物数据中学习, 预测酶的性能和催化机制, 甚至设计出全新的酶。

4.2.10 活性预测与模拟

AI 模型可以预测酶在不同条件下的活性, 包括对底物的亲和力、催化效率和稳定性。这种预测能力对于指导实验设计和优化过程至关重要。与模拟 AI 技术如分子动力学模拟、量子化学计算等, 可以帮助科学家预测酶在特定环境或条件下的行为, 从而指导实验设计和优化过程。这不仅包括酶的催化活性预测, 也包括酶在不同条件下的稳定性、底物结合特性等。

4.2.11 跨模态数据整合

AI 系统可以整合蛋白质结构、序列、功能等多种类型的数据, 通过多模态学习, 提高预测精度。例如,

将蛋白质的序列信息与已知的结构信息相结合，能够更准确地预测未知蛋白质的结构。“AlphaFold”由DeepMind开发，是首个在大规模蛋白质结构预测任务中表现超越结构生物学实验方法的AI系统，准确预测了蛋白质结构

4.2.12 高通量筛选

传统上，发现新的生物降解酶，需要大量的实验筛选，而AI可以通过构建预测模型，对大量候选分子进行快速筛选，大大减少了实验工作量和时间成本。例如，通过深度学习算法分析酶的活性与结构之间的关系，AI可以预测哪些分子更有可能成为有效的生物降解酶。

4.2.13 设计特定功能新酶

AI设计新酶促进废塑料降解行业的创新和可持续发展。AI不仅可以预测现有酶的结构，通过优化酶的氨基酸序列，AI能够预测出具有期望催化活性的新酶结构。根据废塑料降解的需求，设计具有特定降解功能的新酶。2023年，人类首次利用AI从头设计出全新的酶，这标志着AI在酶的设计领域的一个重要里程碑。具有高特异性和高效催化性能的酶，为生物催化和工业应用开辟了新路径。

4.2.14 数据驱动的决策

AI通过分析现有酶数据库，找出可能对新酶设计有用的序列特征或结构元素，识别设计酶和优化酶开发过程中的模式和趋势，帮助研究人员做出更明智的设计决策。AI通过实验获取大量的塑料降解数据，包括不同类型的塑料、不同微生物产生的酶、酶的活性、降解速率、温度、pH值等因素的影响等，并通过AI技术进行分析，以识别关键因素和规律。数据驱动的决策支持系统整合了上述所有步骤的结果，为研究人员提供决策依据，使用机器学习或深度学习算法建立预测模型。系统可以基于当前的研究进展、成本效益分析、环境影响等因素，推荐最佳的酶的设计方向或优化策略，指导实验方向。

4.2.15 高效多酶系统集成设计

除了单个酶的优化，AI也被用于设计多酶系统，以协同降解复杂的塑料混合物。通过AI预测不同酶相互作用以及它们对不同塑料成分的降解效率，研究人员能够设计出高效的多酶系统。这些系统能够更全面地处理不同类型的塑料废物，提高整体的降解效率。

4.2.16 自动化与个性化

AI技术可以实现酶开发过程的自动化，通过自动

化平台快速执行实验，同时通过个性化算法优化实验参数，提高效率和成功率。

4.2.17 生物合成学

AI系统可以整合各种生物数据，通过数据挖掘和分析，提供酶的开发和优化决策支持。AI不仅加速了酶的发现和优化过程，还推动了生物技术的创新，为解决环境、健康和能源等领域的问题提供了新的解决方案。

4.3 AI塑料降解生物酶的基因改造与应用实际案例分析

David Baker的研究团队成功地应用AI从零开始设计出全新的酶结构，这一创新策略超越了传统的基于已知结构的改造方法。他们首先明确目标酶的功能需求，如经济性和环保性。设计开发“菌-酶”协同系统，实现了废弃塑料的100%的降解

高效催化特定化学反应，然后借助AI算法生成大量的候选酶结构模型。通过迭代优化，筛选出最有可能实现所需功能的结构，并最终通过实验验证其性能。这一过程不仅展示了AI在精确预测和设计复杂生物分子方面的潜力，也为快速开发具有特定特性的新型酶提供了可能，这些酶在废塑料生物降解、污染物清除等领域具有广泛应用前景。

AI加速酶基因的定向进化，通过模拟自然选择过程，快速优化酶的性能，从而提高其在特定环境条件下的适应性和效率。加州大学伯克利分校的研究人员利用AI技术优化了一种名为FAST-PETase的酶，AI通过模拟酶的结构与功能，预测了酶的活性位点和催化机制，进而指导了酶的定向进化，该酶能够显著提高对PET的降解效率。AI在加速酶基因的定向进化过程中发挥了重要作用，通过高通量筛选和机器学习算法，快速识别和筛选出具有高降解效率的酶变体。

在生物降解聚乙烯(PE)的研究中，科学家们通过筛选能够特异性降解PE的酶，发现了一种名为PE-DH的酶，该酶具有高效的PE降解能力。进一步酶的选择过程中，研究人员通过比较PE-DH与其他已知PE降解酶的降解效率、稳定性以及成本等因素，最终确定PE-DH为最优选择。此案例不仅展示了酶筛选与选择在特定应用中的重要性，也强调了综合考虑多种因素以实现最佳性能的重要性。通过这一系列的筛选与选择过程，科研人员能够针对性地开发出针对特定塑料类型的高效生物降解酶，为环保塑料回收与处理提供了有力的技术支持。

上面实际案例说明,这种结合 AI 的酶基因改造策略为解决环境问题提供了创新的技术途径,特别是在应对塑料污染、有机废物转化等方面展现出巨大潜力。AI 在塑料降解生物酶基因改造不仅加速了新酶的发现和优化过程,也为解决塑料污染问题提供了创新的技术路径。然而,这也需要跨学科的合作,包括生物工程、化学、环境科学和政策制定者的共同努力,以确保技术的可持续性和社会接受度。

5 塑料降解生物酶在环境友好型降解塑料中应用的科学发展

生物酶在环境友好型降解塑料中的应用是一个活跃且迅速发展的科学领域,旨在解决塑料污染问题,推动可持续发展。生物酶在环境友好型降解塑料中的应用正经历着从基础研究到工业应用的快速发展。通过持续的科技创新和跨学科合作,这一领域有望为解决全球塑料污染问题提供有效的解决方案,同时也推动了循环经济和可持续发展目标的实现

5.1 生物酶特异降解特性的应用

生物酶高效降解性能的应用开发。研究人员和工业界正积极探索生物酶高效降解废弃塑料的机理,开发具有针对性的生物酶,能够针对特定类型的塑料如聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯以及聚酯等进行有效降解,不仅减少了传统物理或化学回收方法产生的二次污染,并且显著提高了塑料回收的多种生物酶集成协同综合降解性能的应用开发。研究者成功筛选出多种塑料降解微生物,这些微生物通过协同作用,能够在不同的环境下实现对多种塑料废弃物的高效降解。这种多样性不仅拓宽了生物降解技术的应用范围,也促进了塑料废弃物处理的灵活性和适应性,为实现塑料循环经济提供了有力的支持。在实际应用层面,废弃塑料回收与生物降解技术的结合已经在多个行业得到了应用示范,包括但不限于包装材料、农业薄膜、纺织品和电子产品等。通过将生物酶融入到现有的回收工艺中,不仅可以提高塑料回收率,还能降低能源消耗和减少碳排放。这一领域的持续创新和发展,对于构建更加绿色、低碳的社会经济体系具有重要意义。

5.2 工业级生物降解塑料的生产流程

工业级生物降解塑料的生产流程通常从原料选择开始,主要使用可再生资源如淀粉、纤维素、糖类以及微生物发酵产生的聚合物等作为基础原料。首先,通过酶解或化学法将这些生物质转化为糖醇类物质,

如葡萄糖、甘露糖、戊糖等,这些糖醇是生产生物降解塑料的关键前体。接下来,这些糖醇经过化学反应聚合形成聚酯、聚酰胺或其他特定类型的生物基聚合物。例如,生产聚乳酸(PLA)时,乳酸通过缩聚反应形成线性聚合物链。在生产聚羟基脂肪酸酯(PHA)时,不同的生长条件可以导致不同类型的 PHA 聚合物的合成。为了提高生产效率和降低成本,现代生物降解塑料生产还会采用先进的生物技术,包括基因工程技术,以优化微生物的代谢路径,增加目标聚合物的产量和纯度。此外,一些工艺可能会涉及溶剂萃取、结晶、干燥等步骤,以确保最终产品的物理性能符合工业应用的需求。最后,进行质量控制和性能测试,确保生物降解塑料符合相关标准,如分解速度、力学性能、热稳定性和化学稳定性等。这一系列过程旨在生产出既环保又具有工业实用性,能够替代传统石油基塑料的生物降解塑料。

5.3 生物降解塑料在包装行业的应用

生物降解塑料在包装行业的应用日益受到关注,其在满足环保需求的同时,也推动了循环经济的发展。这类塑料因其能够在自然环境中被微生物分解的特点,成为替代传统塑料的理想选择,特别是在食品和消费品包装领域。它们通常采用玉米淀粉、聚乳酸(PLA)、聚羟基脂肪酸酯(PHA)等天然原料生产,具有良好的生物相容性和堆肥性。在食品包装中,生物降解塑料广泛用于各种类型的包装材料,如袋装、瓶装和容器,以减少对环境的影响。它们不仅能够有效保护食品免受外部因素的损害,还能够通过生物降解过程减少废弃物对土壤和水源的污染。此外,随着消费者对可持续产品的需求增加,生物降解塑料包装成为吸引环保意识强的消费者的策略之一。在消费品包装方面,生物降解塑料同样发挥着重要作用,从日常用品到电子产品包装,都可见其身影。这些应用不仅有助于减少塑料垃圾的产生,还能促进绿色供应链的建立,鼓励生产商采用更环保的包装材料和技术。随着技术的进步和成本的降低,生物降解塑料在包装行业的应用有望进一步扩大,成为实现可持续发展目标的重要工具。

5.4 生物酶在塑料废弃物处理过程中的应用

生物酶应用于塑料废弃物处理的过程中,它们发挥着关键作用,特别是在加速分解难以自然降解的塑料,如聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)等。通过选择性地识别和降解特定类型的聚合物键,生物酶能够显著

提高塑料废弃物的生物降解效率。例如，纤维素酶和半纤维素酶可以有效地分解淀粉基塑料，而脂肪酶则可能有助于降解含脂质的塑料。此外，利用基因工程技术改造的高效生物酶不仅增强了降解能力，还提高了酶的稳定性和活性，延长了其在复杂环境中的作用时间。在塑料废弃物处理设施中，生物酶的应用通常涉及预处理阶段，旨在软化或分解塑料表面，使其更易于进一步物理或化学分解。这不仅可以提高后续机械分离或热解过程的效率，还可以通过生物堆肥化过程将塑料分解为可被土壤微生物利用的营养物质，从而实现资源的循环利用。同时，生物酶的加入减少了传统处理方法（如焚烧或填埋）产生的有害副产品，降低了环境污染风险，促进了更加环保的废弃物管理策略。总之，生物酶在塑料废弃物处理中的应用展示了其作为清洁、可持续解决方案的潜力，为解决全球塑料污染问题提供了新的途径。随着技术的进步和成本的降低，生物酶的应用有望在未来得到更广泛的应用，成为推动循环经济和实现可持续发展目标的重要工具。

6 新型塑料降解生物酶的开发与应用前景

新型塑料降解生物酶的开发与应用前景将紧密围绕技术创新与市场需求的驱动，展现出广阔的发展空间与潜力。随着合成生物学、基因编辑技术以及人工智能等前沿科技的不断进步，科学家们正在探索如何设计、合成或改造具有特定功能的新一代生物酶，以满足更加严格、高效且环保的降解需求。这些新型生物酶不但能够更快速、更彻底地分解多种类型的塑料，还可能具备更高的选择性，只针对特定类型的塑料进行降解，从而减少资源浪费，提高循环利用效率。此外，通过优化生物酶的结构与功能，研究人员有望开发出在极端条件下也能保持稳定活性的酶，这将极大地拓展生物酶在不同环境条件下的应用范围，包括但不限于工业废水处理、土壤污染修复等领域。同时，生物酶的高效降解性能将有助于解决塑料微粒在海洋、土壤等自然环境中的积累问题，对于维护生态平衡、保护生物多样性具有重要意义。随着全球对可持续发展和环境保护的关注日益增加，市场需求对于环境友好型生物降解材料的需求也将持续增长。这将促使生物酶得产业加速发展，推动相关技术的商业化进程，形成从原料生产到终端消费的完整循环经济链。因此，

新型生物酶的研发与应用前景不仅限于降解塑料领域，还将在食品加工、医药、能源等多个行业展现出巨大的潜力和价值，成为推动绿色经济和社会可持续发展的重要力量。

7 塑料降解生物酶基因改造促进环境友好型降解塑料循环利用发展趋势和研究方向

酶基因改造的最新进展与挑战包括利用先进基因编辑技术如 CRISPR-Cas 系统实现精确酶功能调控与增强，以及通过合成生物学策略构建具有新型催化特性的酶分子。研究人员正致力于开发可调节酶活性的可编程酶，以适应特定的反应条件或提高催化效率。

发展趋势与建议方面，预计未来的研究将侧重于优化和提高新型功能生物酶的催化效率、选择性和稳定性，以适应更广泛和复杂的塑料降解需求。同时，基因改造技术将在酶的性能提升上扮演关键角色，通过定向进化、合成生物学等方法，创造出具有更高活性、耐热性、抗酸碱性以及特定底物选择性的酶。此外，研发能够同时降解多种塑料类型的多功能酶也将成为重要方向，以应对复杂多样的塑料废弃物。在工业应用层面，将探索新型生物酶的工业化生产方式，降低生产成本，提高生产效率，并解决规模化应用过程中遇到的技术瓶颈。同时，增强酶的储存稳定性，延长其使用寿命，以及开发高效的酶活化、回收和再生技术，以实现酶的可持续循环使用，是提高生物降解工艺经济性和环境友好性的关键。政策制定者和行业领导者应加强对生物降解技术和酶法处理塑料废弃物的投入和支持，推动相关法规和标准的制定，鼓励创新和投资，加速新型功能生物酶技术的商业化进程。此外，加强跨学科合作，整合材料科学、生物工程、环境科学等多个领域的知识，将有助于全面解决塑料污染问题，促进塑料循环经济的健康发展。

未来研究方向主要体现在以下几个方面：首先，在新型功能生物酶的开发过程中，目前仍然存在筛选效率低、稳定性不足以及成本控制困难等问题，这些因素限制了其在大规模工业化生产中的应用。其次，在基因改造技术的应用上，尽管已经取得了一定的进展，但仍面临基因编辑精度、安全性以及伦理道德等深层次的挑战。此外，针对特定类型塑料的高效降解酶的发现和优化仍然是一个亟待解决的问题。未来的研究方向包括但不限于：进一步优化筛选和培养条件

以提高新型生物酶的产量和稳定性；探索更加高效、安全且具有针对性的基因编辑方法，以增强酶的特异性与活性；加强对不同塑料种类降解机理的研究，以开发出更多针对特定塑料的高效生物酶；同时，需要加强跨学科合作，结合材料科学、环境科学以及经济学等领域的知识，探讨生物酶在塑料循环经济中的综合应用策略，以期实现经济、环境和社会效益的最大化。

8 结论

塑料降解生物酶的发展不仅提升了酶在实际应用中的效率，对于推动环境友好型降解塑料循环利用具有重要意义。义生物酶在促进环境友好型降解塑料循环

利用中的关键作用，不仅揭示了其在降解塑料过程中的机理与实际应用案例，还探讨了当前面临的挑战与未来的展望。

生物酶降解废塑料为一种绿色、高效、可持续的解决方案，在推动塑料循环经济方面具有巨大潜力。然而，要实现其广泛且有效的应用，仍需解决一系列技术、经济、法规与社会层面的挑战。鼓励科技创新，加速新型生物酶的开发与应用，提高其性能与降低成本。增强消费者环保意识，促进市场对环保产品的需求，形成良性循环，共同推动生物酶技术在环境友好型降解塑料循环利用领域的广泛应用，为实现塑料“零”污染、塑料资源循环利用“零”废弃的目标做出贡献。

Biological enzyme genetic modification promotes the scientific development of environmentally friendly degradation plastic recycling

Zhang Yougen

(Shanghai First Plastic Machinery Factory, Shanghai 201201, China)

Abstract: Genetic modification of biological enzymes promotes the recycling of environmentally friendly degradable plastics. This article delves into the scientific development of screening and selection of plastic degrading enzymes; The scientific development of genetic modification technology for plastic degrading enzymes has been studied; Research on the scientific development of synthetic biology technology for plastic degrading enzymes; Analyzed the scientific development of AI plastic degradation enzyme technology; Analyzed the scientific development of the application of plastic degrading enzymes in environmentally friendly degradation of plastics; Elaborated on the development and application prospects of new plastic degrading biological enzymes; This paper discusses the development trend and research direction of promoting environmentally friendly degradation of plastic recycling through genetic modification of plastic degrading enzymes. This article points out that the development of plastic degrading enzymes not only improves the degradation efficiency of enzymes in practical applications, but also promotes the environmentally friendly recycling of degradable plastics.

Key words: plastic degradation; biological enzymes; artificial intelligence; genetic modification; scientific development

(R-03)

