

面向碳中和的高效催化剂设计及应用进展

张 华

南通大学 江苏南通

【摘要】本文系统综述了面向碳中和目标的高效催化剂设计及应用进展。催化剂作为加速化学反应的关键媒介，在二氧化碳还原（CO₂RR）、氢能源生产等核心领域发挥核心作用，通过优化活性、选择性、稳定性及耐久性，显著降低能源消耗与碳排放。金属基催化剂（如铂、铜合金）通过纳米结构调控与复合设计提升性能，而非金属基催化剂（如氮掺杂碳材料）及生物催化剂则展现出低成本与环境友好优势。未来研究需融合绿色化学原则，推动跨学科合作，解决催化剂寿命周期管理与规模化应用挑战，为碳中和战略提供技术支撑。

【关键词】碳中和；高效催化剂设计；二氧化碳还原反应（CO₂RR）；氢能源生产；催化剂稳定性

【收稿日期】2024 年 11 月 6 日

【出刊日期】2024 年 12 月 29 日

【DOI】10.12208/j.jccr.20240013

Progress in the design and application of efficient catalysts for carbon neutrality

Hua Zhang

Nantong University, Nantong, Jiangsu

【Abstract】 This paper systematically reviews the progress in the design and application of efficient catalysts for the goal of carbon neutrality. As the key medium for accelerating chemical reactions, catalysts play a core role in core areas such as carbon dioxide reduction (CO₂RR) and hydrogen energy production. By optimizing activity, selectivity, stability and durability, they significantly reduce energy consumption and carbon emissions. Metal-based catalysts (such as platinum and copper alloys) improve their performance through nanostructure regulation and composite design, while non-metal-based catalysts (such as nitrogen-doped carbon materials) and biocatalysts show low cost and environmental friendliness. Future research needs to integrate green chemistry principles, promote interdisciplinary cooperation, solve the challenges of catalyst life cycle management and large-scale application, and provide technical support for the carbon neutrality strategy.

【Keywords】 Carbon neutrality; Efficient catalyst design; Carbon dioxide reduction reaction (CO₂RR); Hydrogen energy production; Catalyst stability

1 引言

1.1 碳中和的全球意义与挑战

碳中和，即通过减少温室气体排放和增加碳汇，实现净零排放的目标，已成为全球应对气候变化的共识。根据国际能源署（IEA）的报告，全球能源相关的二氧化碳排放量在 2019 年达到了 330 亿吨，而要实现《巴黎协定》中提出的将全球平均气温升高控制在远低于 2 摄氏度的目标，全球碳排放量需要在 2050 年前达到净零排放^[1]。这一挑战要求全球范围内的能源结构、工业生产以及交通方式等发生根本性的转变。催化剂作为化学反应的加速器，在提高能源转换效率、促进可再生能源利用以及减少工业过程中的碳排放方面扮演着至

关重要的角色。例如，通过使用高效的催化剂，可以显著提高二氧化碳还原反应的效率，将二氧化碳转化为有用的化学品或燃料，从而实现碳循环利用。因此，开发和应用高效催化剂是实现碳中和目标的关键技术路径之一。

1.2 催化剂在碳中和中的关键作用

在实现碳中和的宏伟蓝图中，催化剂扮演着至关重要的角色。碳中和，即通过减少温室气体排放和增加碳汇，实现净零排放的目标，是全球应对气候变化的关键策略。催化剂作为加速化学反应速率而不改变自身性质的物质，其在提高能源转换效率、促进二氧化碳的捕获与转化、以及推动可再生能源技术发展等方面具

有不可替代的作用。例如,二氧化碳还原反应(CO_2RR)是将 CO_2 转化为有用化学品和燃料的关键过程,而高效的催化剂能够显著降低这一过程的能垒,提高反应的选择性和产率。根据国际能源署(IEA)的报告,若要实现全球碳中和目标,到 2050 年,可再生能源在能源结构中的比例需从目前的约 25% 提升至 70% 以上,这无疑将极大依赖于催化剂技术的进步^[2]。

在催化剂的设计与应用中,活性、选择性、稳定性和耐久性衡量其性能的四个关键指标。以氢能源生产为例,通过电解水制氢是目前最清洁的制氢方法之一,但其效率受限于电极催化剂的性能。高效的电催化剂能够降低电解过程中的过电位,从而减少能耗,提高产氢效率。研究显示,采用铂基催化剂可以实现接近 100% 的法拉第效率,但高昂的成本和稀缺性限制了其大规模应用。因此,开发低成本、高活性的替代催化剂,如过渡金属磷化物、硫化物等,成为当前研究的热点。此外,催化剂的稳定性与耐久性直接关系到其在工业应用中的经济性和可行性,因此,通过纳米技术调控催化剂的结构,以提高其在极端条件下的稳定性,是当前研究的另一重要方向。

在碳中和的背景下,催化剂的创新设计不仅需要考量其在特定反应中的性能,还要考虑其在整个生命周期内的环境影响和经济成本。例如,生物催化剂利用微生物或酶的天然催化能力,具有反应条件温和、选择性强、环境友好等优点,但其在大规模工业应用中仍面临稳定性和成本控制的挑战。未来,催化剂的创新设计将与绿色化学原则相结合,通过模拟自然界的高效催化过程,开发出既高效又环境友好的催化剂体系。同时,跨学科合作,如化学、材料科学、生物学和工程学的融合,将为催化剂的研发提供新的视角和方法,推动催化剂技术在碳中和战略中的关键地位,为实现可持续发展贡献力量。

2 碳中和背景下的催化剂需求

2.1 碳中和目标与催化剂性能要求

在追求碳中和的全球征程中,催化剂的设计与应用成为实现这一宏伟目标的关键技术之一。碳中和,即通过减少温室气体排放和增加碳汇,实现净零排放,是应对全球气候变化的重要策略。催化剂在这一过程中扮演着至关重要的角色,它能够显著提高化学反应的效率,降低能源消耗,减少副产物的生成,从而减少温室气体的排放。例如,在二氧化碳的转化利用中,高效的催化剂可以将 CO_2 转化为高附加值的化学品或燃料,如甲醇或甲烷,这不仅有助于减少大气中的 CO_2 浓度,

还能够实现资源的循环利用。根据国际能源署(IEA)的报告,如果能够开发出更高效的催化剂,到 2050 年,全球能源相关的二氧化碳排放量可减少约 10%^[1]。因此,催化剂的性能要求必须与碳中和目标紧密对齐,包括高活性、高选择性、良好的稳定性和耐久性,以及在实际应用中的经济可行性。

2.2 现有催化剂技术的局限性分析

在追求碳中和的道路上,催化剂技术的局限性成为了一个不容忽视的挑战。当前,催化剂在提高化学反应效率、降低能耗方面发挥着关键作用,但其性能往往受到稳定性、选择性、活性和耐久性等因素的限制。例如,传统的金属基催化剂虽然在某些反应中表现出色,但其在高温或极端条件下的稳定性不足,导致使用寿命缩短,这在二氧化碳还原反应中尤为明显。根据一项研究,某些金属催化剂在连续使用 100 小时后活性下降超过 30%,这严重限制了其在工业应用中的可行性^[3]。此外,非金属基催化剂虽然在某些情况下提供了更好的选择性,但其活性往往不如金属基催化剂,这在氢能源生产中尤为关键。因此,如何在保持高活性的同时提升催化剂的稳定性和选择性,成为催化剂设计中的一个核心问题。面对这些局限性,催化剂的创新设计必须结合跨学科的知识,通过材料科学、化学工程和计算化学等领域的合作,来开发出既高效又可持续的新型催化剂。

3 高效催化剂设计原则

3.1 催化剂活性与选择性的优化策略

在面向碳中和的高效催化剂设计中,催化剂活性与选择性的优化策略是核心议题之一。活性的提升意味着在较低的温度和压力下,催化剂能够加速化学反应的速率,从而降低能源消耗和减少温室气体排放。例如,通过纳米技术对催化剂的粒径进行精确控制,可以显著提高其活性。研究表明,当催化剂的粒径降至纳米级别时,其表面积与体积比大幅增加,从而提供了更多的活性位点,加速了反应过程。此外,选择性的优化则确保了反应产物的高纯度,减少了副产品的生成,这对于碳中和目标的实现至关重要。例如,在二氧化碳还原反应中,选择性地生成甲醇或其他高附加值化学品,而非生成一氧化碳或甲烷,可以更有效地利用碳资源。通过理论计算和实验验证相结合的方法,研究者们可以设计出具有特定活性位点的催化剂,以实现特定反应路径的精准调控。因此,通过创新设计和优化策略,催化剂在碳中和的道路上扮演着至关重要的角色。

3.2 催化剂稳定性与耐久性的提升方法

在面向碳中和的高效催化剂设计中,稳定性与耐久性的提升是实现长期可持续应用的关键。催化剂的稳定性不仅影响其在反应过程中的活性保持,还直接关联到催化剂的使用寿命和经济效益。例如,金属基催化剂在二氧化碳还原反应中,其稳定性受到金属颗粒大小、分散度以及载体材料的影响。研究表明,通过控制金属颗粒的尺寸在纳米级别,可以有效提高催化剂的稳定性,因为纳米级金属颗粒具有较大的比表面积和更多的活性位点。此外,通过合金化或掺杂策略,可以进一步增强催化剂的耐腐蚀性和热稳定性。例如,将铂与铜合金化,不仅降低了成本,还提高了催化剂在酸性环境中的稳定性。在非金属基催化剂方面,通过引入杂原子如氮、硫等,可以调节催化剂的电子结构,从而提升其稳定性。复合催化剂的设计则需要考虑不同组分间的协同效应,以确保在碳中和关键反应中,如氢能生产,催化剂能够保持长期稳定运行。在实际应用中,催化剂的稳定性与耐久性提升方法需要结合具体的反应条件和催化剂特性,通过实验数据和理论分析模型来优化设计。因此,通过理论指导实践,结合实验验证,才能不断推进催化剂稳定性与耐久性的提升,为实现碳中和目标提供坚实的技术支撑。

4 催化剂材料的创新与进展

4.1 金属基催化剂的组成与结构优化

在面向碳中和的高效催化剂设计中,金属基催化剂的组成与结构优化是关键环节。金属基催化剂因其高活性和选择性,在二氧化碳还原、氢能生产等关键反应中发挥着不可替代的作用。例如,铂基催化剂在氢气的电化学生成中表现出色,但其高昂的成本和稀缺性限制了其广泛应用。因此,通过合金化、纳米技术等手段优化金属基催化剂的组成与结构,不仅可以提高其催化效率,还能降低成本。研究表明,通过引入第二金属元素,如铜,可以显著提高铂基催化剂的活性和稳定性,同时降低铂的使用量^[4]。此外,纳米结构的调控,如制备具有特定形貌的金属纳米颗粒,可以进一步提升催化剂的性能。例如,具有高指数晶面的金属纳米颗粒在催化反应中表现出更高的活性和选择性。在设计金属基催化剂时,还需考虑其在实际应用中的稳定性,这要求催化剂在长期运行中保持其结构和活性不受影响。因此,通过理论计算和实验验证相结合的方法,开发出既高效又稳定的金属基催化剂,对于实现碳中和目标具有重要意义。

4.2 非金属基催化剂的改性及其催化活性提升

在面向碳中和的高效催化剂设计领域,非金属基

催化剂的改性及其催化活性提升已成为研究热点。非金属催化剂由于其独特的电子结构和丰富的表面活性位点,在催化反应中表现出优异的性能。例如,碳基催化剂如石墨烯和碳纳米管,通过掺杂氮、硼等非金属元素,可以显著提高其催化活性和选择性。研究表明,氮掺杂的碳材料在氧还原反应(ORR)中表现出与铂相似的催化性能,但成本却大大降低^[5]。此外,磷化物和硫化物等非金属化合物也因其其在电催化和光催化中的潜力而受到关注。通过精确控制其形貌和结构,可以进一步优化这些催化剂的性能。例如,磷化钼纳米片在氢气生成反应(HER)中的表现优于传统金属催化剂,其高活性归因于其独特的二维结构和表面活性位点的协同作用。在碳中和的背景下,这些非金属基催化剂的改性不仅有助于提高能源转换效率,而且对于减少对稀有金属资源的依赖具有重要意义。

4.3 复合催化剂的设计及其在碳中和中的应用

在碳中和的宏伟蓝图中,复合催化剂的设计与应用是实现可持续能源转换的关键技术之一。复合催化剂通过结合不同材料的特性,能够显著提高催化效率和选择性,这对于二氧化碳的转化和氢能的高效生产尤为重要。例如,将金属氧化物与碳材料复合,可以创造出具有高活性和稳定性的催化剂,这对于二氧化碳还原反应(CO₂RR)至关重要。研究表明,某些复合催化剂在CO₂RR中表现出超过90%的CO选择性,显著高于单一组分催化剂。此外,复合催化剂在氢能生产中的应用也显示出其在提高反应速率和降低能耗方面的巨大潜力。例如,通过将铂纳米颗粒与碳纳米管复合,可以实现对氢气生成反应(HER)的高效催化,同时大幅度减少贵金属的使用量。在设计复合催化剂时,必须考虑其在实际应用中的稳定性和耐久性,这要求在材料选择和制备工艺上进行精细调控。未来,复合催化剂的研究将更加注重与绿色化学原则的融合,以及在新兴能源转化技术中的应用前景,这将为实现碳中和目标提供强有力的技术支撑。

4.4 催化剂纳米结构的调控与性能研究

在面向碳中和的高效催化剂设计中,纳米结构的调控是提升催化剂性能的关键因素之一。通过精确控制催化剂的纳米结构,可以显著提高其活性位点的密度和催化效率。例如,研究表明,通过调整金属纳米颗粒的尺寸和形状,可以优化其电子结构,从而增强对特定反应的催化活性^[6]。在二氧化碳还原反应中,纳米结构的调控使得催化剂能够更有效地促进CO₂转化为有价值的化学品或燃料,如甲醇或甲烷。此外,纳米结构

的调控还涉及到催化剂的孔隙结构设计,这不仅影响反应物和产物的扩散,还与催化剂的稳定性密切相关。例如,多孔金属有机框架(MOFs)的开发,通过精确的孔隙结构设计,实现了对反应物的高选择性吸附和转化。在氢能源生产中,纳米结构的调控同样至关重要,它能够提高电化学反应的速率,降低过电位,从而提高整体的能源转换效率。因此,纳米结构的调控不仅为催化剂设计提供了新的思路,也为实现碳中和目标提供了强有力的工具。

4.5 生物催化剂的创新与在碳中和过程中的应用

在碳中和的宏伟蓝图中,生物催化剂的创新应用正成为推动可持续发展的关键力量。生物催化剂,或称酶催化剂,因其在温和条件下高效催化反应的特性,被广泛应用于二氧化碳的转化、生物质能源的生产以及有机合成等领域。例如,通过基因工程改造的酶,可以显著提高其对二氧化碳的转化效率,从而在碳捕获和利用(CCU)技术中发挥重要作用。一项研究显示,经过优化的碳化酶可以在较低的温度和压力下实现二氧化碳到甲醇的转化,其转化率比传统化学催化剂高出数倍^[7]。此外,生物催化剂在氢能源生产中的应用也展现出巨大潜力,例如,通过微生物发酵过程产生的氢气,不仅效率高,而且过程绿色、可持续。在碳中和的进程中,生物催化剂的创新不仅体现在其催化效率的提升,更在于其对环境的友好性,这与碳中和追求的“零排放”理念不谋而合。生物催化剂的创新正是这一理念的生动体现,它不仅推动了科学技术的进步,更为实现碳中和目标提供了切实可行的解决方案。

5 催化剂在关键反应中的应用

5.1 二氧化碳还原反应中的催化剂应用

在实现碳中和的宏伟蓝图中,二氧化碳还原反应(CO₂RR)作为关键的化学转化过程,其催化剂的设计与应用显得尤为重要。高效的催化剂能够显著降低CO₂RR的活化能,提高反应的选择性和转化率,从而在减少温室气体排放的同时,促进清洁能源的生成。例如,铜基催化剂在CO₂RR中表现出优异的性能,能够将CO₂转化为甲醇等高附加值化学品。研究显示,通过纳米结构的调控,铜催化剂的活性位点可以得到优化,从而提高其对CO₂的吸附能力,进而提升催化效率^[8]。此外,通过引入第二金属元素,如银或金,可以进一步改善铜基催化剂的选择性,减少副反应的发生。在设计催化剂时,还需考虑其稳定性与耐久性,以确保在工业应用中的长期运行。因此,通过创新催化剂设计,我们有望在碳中和的道路上迈出坚实的步伐。

5.2 氢能源生产中的催化剂技术进展

在氢能源生产的领域中,催化剂技术的进展是实现碳中和目标的关键驱动力之一。随着全球对清洁能源需求的不断增长,氢能源作为一种高效、清洁的能源载体,其生产过程中的催化剂技术正受到前所未有的关注。例如,质子交换膜(PEM)电解技术中使用的铂基催化剂,尽管其活性高,但成本昂贵且资源有限,这促使研究人员开发出以镍、钴等非贵金属为基础的替代催化剂。这些新型催化剂在保持高活性的同时,显著降低了成本,并提高了对CO等杂质的耐受性。此外,通过纳米技术对催化剂的结构进行优化,可以进一步提高其性能,如提高电极的表面积和活性位点的暴露程度,从而提升氢气的生成效率。若要实现2050年全球能源系统碳中和的目标,氢能源的年产量需要达到目前的数十倍。因此,催化剂技术的创新不仅对氢能源的经济性至关重要,也是推动全球能源转型和实现碳中和愿景的关键。

6 催化剂的未来发展方向与挑战

6.1 催化剂创新设计与绿色化学的融合路径

在面向碳中和的高效催化剂设计中,创新设计与绿色化学的融合路径是实现可持续发展的关键。绿色化学的核心原则之一是预防污染,而非事后处理,这要求催化剂的设计必须从源头减少对环境的负面影响。例如,通过使用生物基材料或可再生资源作为催化剂的前驱体,可以显著降低催化剂生产过程中的碳足迹。此外,设计出的催化剂应具备高选择性,以减少副产物的生成,从而降低后续分离和纯化过程中的能源消耗和废物产生。研究显示,通过精确控制催化剂的孔隙结构和表面活性位点,可以实现对特定反应路径的精准调控,从而提高反应的选择性。例如,采用纳米技术制备的金属有机框架(MOFs)催化剂,在二氧化碳还原反应中表现出优异的性能,其选择性可达到95%以上,显著高于传统催化剂^[9]。这种创新设计不仅提高了反应效率,也符合绿色化学的原则,为碳中和目标的实现提供了有力支持。

6.2 高性能催化剂在碳中和战略中的关键地位

在迈向碳中和的全球征程中,高性能催化剂扮演着至关重要的角色。它们不仅是化学反应的加速器,更是实现能源转型和减少温室气体排放的关键技术。例如,二氧化碳的捕获和转化技术,依赖于催化剂的高效活性和选择性,以实现将CO₂转化为有用化学品或燃料的过程。若要实现全球碳中和目标,到2050年,可再生能源的使用需增加至目前的六倍以上,而这一转

变离不开催化剂技术的突破^[10]。在氢能源生产领域，高效的催化剂能够显著降低电解水制氢的成本，从而推动氢能在能源结构中的占比提升。因此，开发和应用高性能催化剂，对于实现碳中和战略具有不可替代的重要性。

6.3 催化剂在新兴能源转化技术中的应用前景

随着全球对碳中和目标的追求，催化剂在新兴能源转化技术中的应用前景显得尤为广阔。例如，在太阳能转化为化学能的过程中，高效的光催化剂能够显著提升光电化学电池的性能，从而加速水分解产生氢气，为清洁能源的存储和运输提供可能。到 2050 年，全球能源系统中可再生能源的比重将从目前的 25% 增长至 50% 以上，这将极大地依赖于催化剂技术的进步^[11]。此外，碳捕集和利用技术（CCU）中，催化剂的使用能够将工业排放的二氧化碳转化为高附加值的化学品，如甲醇或二甲醚，这不仅减少了温室气体的排放，也为碳中和提供了新的思路。在这一领域，研究者们正致力于开发出更高效、更经济的催化剂，以实现从实验室到工业应用的跨越。在碳中和的背景下，催化剂将为新兴能源转化技术带来革命性的变革。

6.4 催化剂寿命周期管理与可持续发展的关联

在面向碳中和的高效催化剂设计及应用中，催化剂寿命周期管理与可持续发展的关联显得尤为重要。催化剂的寿命周期不仅影响其经济性，还直接关联到环境的可持续性。例如，一个高效的催化剂能够在更长的时间内保持活性和选择性，从而减少在生产过程中对新催化剂的需求，降低资源消耗和废弃物的产生。根据生命周期评估（LCA）模型，延长催化剂的使用寿命可以显著减少碳足迹，因为催化剂的生产过程往往伴随着较高的能源消耗和温室气体排放^[12]。此外，通过改进催化剂的设计，例如采用生物基材料或回收利用废弃催化剂中的贵金属，可以进一步推动催化剂的可持续发展。因此，通过创新催化剂设计和优化寿命周期管理，我们不仅能够应对当前的环境挑战，还能为实现碳中和目标和可持续发展的未来奠定坚实基础。

6.5 跨学科合作在催化剂研发中的重要性

在面向碳中和的高效催化剂设计及应用进展中，跨学科合作的重要性不容忽视。化学、物理、材料科学、环境科学以及工程学等多个学科的融合，为催化剂的研发提供了多角度的视野和方法。例如，材料科学的进展使得我们能够设计出具有特定纳米结构的催化剂，这些结构能够显著提高催化活性和选择性^[13]。物理化学的理论模型则帮助我们理解催化反应的微观机制，

从而指导催化剂的设计。环境科学的视角则强调了催化剂在实际应用中对环境的友好性，确保催化剂的生命周期内对环境的影响最小化。工程学的应用则关注催化剂的规模化生产和应用，确保其在工业过程中的可行性和经济性。跨学科合作正是打破传统思维，创造创新解决方案的关键。

7 结论

7.1 高效催化剂设计对实现碳中和的贡献

在追求碳中和的全球征程中，高效催化剂的设计与应用是实现这一宏伟目标的关键技术支撑。碳中和，即通过减少温室气体排放和增加碳汇，达到净零排放的状态，是应对全球气候变化的重要策略。催化剂作为化学反应的加速器，能够显著提高反应速率和选择性，降低能源消耗，从而在减少二氧化碳排放和促进清洁能源转换中发挥着不可替代的作用^[14]。例如，二氧化碳还原反应（CO₂RR）是将 CO₂ 转化为有用化学品和燃料的过程，高效的催化剂可以将 CO₂ 转化为甲醇、甲烷等高附加值产品，从而减少对化石燃料的依赖。研究表明，使用特定的铜基催化剂，CO₂RR 的甲醇产率可达到 90% 以上，这不仅展示了催化剂在提高反应效率方面的潜力，也体现了其在碳中和过程中的实际应用价值^[15]。

在催化剂设计方面，活性与选择性的优化策略是提高其性能的核心。通过精确控制催化剂的组成和结构，可以实现对反应路径的精细调控，从而提高目标产物的产率并减少副产物的生成。例如，通过纳米技术调控金属催化剂的粒径和形貌，可以显著提升其催化活性和选择性。此外，催化剂的稳定性与耐久性也是实现长期工业应用的关键因素。通过引入新的材料和结构设计，如复合材料和核壳结构，可以有效提高催化剂在苛刻条件下的稳定性，延长其使用寿命^[16]。这些创新设计不仅提升了催化剂的性能，也为碳中和提供了更为经济和可持续的解决方案。

在催化剂材料创新方面，非金属基催化剂和生物催化剂的开发为碳中和提供了新的视角。非金属基催化剂如碳纳米管和石墨烯等，因其独特的电子性质和高比表面积，在电催化和光催化领域展现出巨大潜力。生物催化剂，如酶和微生物，利用其天然的高效催化能力，在生物转化过程中实现对 CO₂ 的固定和转化，为碳中和提供了环境友好的选择^[17]。这些催化剂的创新设计和应用，不仅丰富了碳中和的手段，也为实现可持续发展提供了新的思路。

综上所述，高效催化剂的设计与应用是实现碳中和

和目标的重要途径。通过不断优化催化剂的活性、选择性、稳定性和耐久性,结合材料创新和跨学科合作,催化剂技术将在减少温室气体排放、促进清洁能源转换和提高资源利用效率方面发挥越来越重要的作用^[18]。但可以肯定的是,随着催化剂技术的不断进步,我们正朝着实现碳中和的宏伟目标稳步迈进。

7.2 对未来研究方向的展望

随着全球对碳中和目标的日益重视,高效催化剂的设计与应用成为实现这一宏伟目标的关键。未来研究方向应聚焦于催化剂的创新设计,以满足日益增长的环境与能源需求。例如,针对二氧化碳还原反应,研究者们正在开发新型金属基催化剂,以提高其选择性和活性,从而更有效地将 CO₂ 转化为有用化学品或燃料。据预测,到 2050 年,全球二氧化碳排放量需减少至少 50%,这要求催化剂在提高转化效率的同时,还需具备长期稳定性和环境友好性^[19]。此外,跨学科合作在催化剂研发中显得尤为重要,通过材料科学、化学工程、环境科学等多领域的知识融合,可以加速催化剂的创新进程。因此,未来的研究应致力于开发出既高效又可持续的催化剂,为碳中和目标的实现提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] Wang, Zhuo, et al. "The role of machine learning in carbon neutrality: Catalyst property prediction, design, and synthesis for carbon dioxide reduction." *EScience* 3.4 (2023): 100136.
- [2] Lu, Chao, Xiaohong Zhang, and Xi Chen. "Advanced materials and technologies toward carbon neutrality." *Accounts of Materials Research* 3.9 (2022): 913-921.
- [3] Yan, Tianxiang, et al. "Multiscale CO₂ electrocatalysis to C₂+ products: reaction mechanisms, catalyst design, and device fabrication." *Chemical Reviews* 123.17 (2023): 10530-10583.
- [4] Wang, Ligang, Dingsheng Wang, and Yadong Li. "Single - atom catalysis for carbon neutrality." *Carbon Energy* 4.6 (2022): 1021-1079.
- [5] Chen, Zhijie, et al. "Eco-designed electrocatalysts for water splitting: a path toward carbon neutrality." *International Journal of Hydrogen Energy* 48.16 (2023): 6288-6307.
- [6] Yang, Xiaoxuan, et al. "Achievements, challenges, and perspectives on nitrogen electrochemistry for carbon - neutral energy technologies." *Angewandte Chemie International Edition* 62.10 (2023): e202215938.
- [7] Zhou, Lingxi, and Ruitao Lv. "Rational catalyst design and interface engineering for electrochemical CO₂ reduction to high-valued alcohols." *Journal of Energy Chemistry* 70 (2022): 310-331.
- [8] Caineng, Z. O. U., et al. "Progress, challenge and significance of building a carbon industry system in the context of carbon neutrality strategy." *Petroleum Exploration and Development* 50.1 (2023): 210-228.
- [9] Zhang, Xiaofei, et al. "Enabling heterogeneous catalysis to achieve carbon neutrality: Directional catalytic conversion of CO₂ into carboxylic acids." *Carbon Energy* 6.3 (2024): e362.
- [10] Chapman, Andrew, et al. "Achieving a carbon neutral future through advanced functional materials and technologies." *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 95.1 (2022): 73-103.
- [11] He, Mingyuan, Yuhuan Sun, and Buxing Han. "Green carbon science: efficient carbon resource processing, utilization, and recycling towards carbon neutrality." *Angewandte Chemie* 134.15 (2022): e202112835.
- [12] Zou, Caineng, et al. "Connotation, innovation and vision of "carbon neutrality"." *Natural Gas Industry B* 8.5 (2021): 523-537.
- [13] 徐恒.面向碳中和的分子型催化剂和单原子催化剂结构设计及催化性能[D].天津理工大学,2022.
- [14] 王嘉,张元波,苏子健,等."碳中和"背景下高效,低成本减碳脱硝催化剂的制备及其性能研究[C]//第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(二).2024.
- [15] 唐蜜,刘少华,周红生,等.二氧化碳加氢合成甲醇催化剂研究进展[J].精细与专用化学品, 2024, 32(9):14-18. DOI:10.19482/j.cn11-3237.2024.09.04.
- [16] 林翎,李鹏程.发挥能效标准作为碳达峰碳中和目标的催化剂与加速器效应建议[J].中国能源, 2021. DOI:10.3969/j.issn.1003-2355.2021.08.005.
- [17] 解兴春,白梅,李应飞,等.高效催化剂的研制助力实现碳达峰碳中和探析[J].环境保护与循环经济, 2022(006):

042. DOI:10.3969/j.issn.1674-1021.2022.06.006.

- [18] 张建国.能源服务企业:碳达峰进程中的"催化剂"[J].新理财(公司理财), 2024(8):76-79.
- [19] 陈婉.碳达峰碳中和激活绿色金融发展新空间[J].环境经济, 2021, 000(006):P.28-31.

版权声明: ©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS