文章编号:1007 - 4252(2023)05 - 0005 - 311　　DOI: 10.20027/j.gncq.2023.0045

碳纳米管在半导体储能领域的研究进展

杨志伟[1*]
(1.吉林工业职业技术学院 智能制造学院,吉林省 吉林市 132013)

摘要:碳纳米管(CNTs)作为引人注目的纳米材料,在半导体储能领域展现出巨大潜力。本文综述了 CNTs 的制备方法、电化学性质以及在储能器件中的应用,包括化学气相沉积、电弧放电、溶液法等多种制备途径。CNTs 表现出卓越的导电性和化学稳定性,为储能器件设计提供理想基础,在超级电容器、锂电池、光伏发电领域的关键作用,可作为电极材料和导电添加剂,提升器件性能和循环稳定性。该研究为新一代能源存储技术的发展提供了有力启示,有望在超级电容器能量密度提升、锂电池快速充放电、光伏发电效率提高等方面发挥重要作用。

关键词:碳纳米管;纳米材料;半导体储能;电化学
中图分类号:TM23　　**文献标识码**:A

Research Progress of Carbon Nanotubes in Semiconductor Energy Storage Field

YANG Zhiwei[1*]
(1.School Of Intelligent Manufacturing, Jilin Vocational College of Industry and Technology, JiLin 132013, China)

Abstract: Carbon nanotubes (CNTs), as striking nanomaterials, have shown enormous potential in the field of semiconductor energy storage. This article reviews the preparation methods, electrochemical properties, and applications of CNTs in energy storage devices, including various preparation methods such as chemical vapor deposition, arc discharge, and solution method. CNTs exhibit excellent conductivity and chemical stability, providing an ideal foundation for energy storage device design. The key role of CNTs in the fields of supercapacitors, lithium batteries, and photovoltaic power generation was discussed, which can serve as electrode materials and conductive additives to improve device performance and cycling stability. This study provides strong insights for the development of new generation energy storage technologies, and is expected to play an important role in improving the energy density of supercapacitors, rapid charging and discharging of lithium batteries, and improving the efficiency of photovoltaic power generation.

Key Words: Carbon nanotubes; Nanomaterials; Semiconductor energy storage; electrochemistry

收稿日期:2023-12-29;　　**修订日期**:2024-01-08
基金项目:2024 年度吉林省教育厅科学研究项目“新型自加热复合纳米压印膜的制备及应用”(JJKH20241130KJ)
作者简介:杨志伟,男,助教,硕士研究生,研究方向:半导体纳米材料,E-mail:yangzhw2014@ lzu.edu.cn

0 引言

在当今世界,可再生能源的重要性日益凸显,太阳能和风能等可再生能源的广泛应用正在推动我们朝着更可持续的能源未来迈进[1]。然而,这些可再生能源具有不稳定性和间歇性的特点,基于此,需要高效、可持续的能源储存技术来平衡供需之间的差异[2]。半导体储能技术在这一领域崭露头角,其卓越的性能特点,成为了一种备受瞩目的新兴储能方法[3]。而碳纳米管,作为一种独特的纳米材料[4],引发了广泛的研究兴趣,因其在半导体储能领域的广泛应用前景[5]。

一、能源储存的紧迫性

随着全球人口的增加和经济的发展,对能源的需求不断增加,气候变化和环境问题引发了对可再生能源的强烈需求[6]。可再生能源,如太阳能[7]和风能[8],不仅可以减少对有限化石燃料的依赖,还可以降低温室气体排放,缓解气候变化。然而,这些可再生能源的可变性和不可预测性,使得能源供应不断波动,从而引发了能源储存的紧迫性需求。

能源储存是一项至关重要的技术,可以解决可再生能源的波动性问题[9]。它允许将多余的能源储存起来有助于平衡能源供需,确保能源的连续供应,并提高电力网络的稳定性。然而,传统的储能技术,如水力储能[10]和化学电池[11],存在一些限制,包括地理依赖性、有害物质的使用以及有限的能量密度。因此,寻找更高效、可持续的能源储存方法成为了当今能源领域的热点问题。

二、半导体储能技术的崛起

半导体储能技术作为一种新兴的储能方法,正逐渐受到广泛关注。同传统电池技术相比,半导体储能具有多个引人注目的特点[3]。半导体储能器件具有更高的能量密度意味着它们能够存储更多的能量,拥有相对更小的体积[12]。这些器件通常具有更长的循环寿命,可以进行数千次的充放电循环而不损失性能。这对于减少设备更换和维护成本非常重要。半导体储能技术通常使用环保的材料,减少了对环境的负面影响。最重要的是,半导体储能技术可以实现快速的充放电过程,从而为高功率应用提供支持,如电动汽车[13]和电网储能[14]。

半导体储能技术的发展主要包括超级电容器[15]、锂离子电池[16]和光伏电池[17]等领域。这些应用领域不仅涵盖了电力存储,还包括了电动交通、便携式电子设备和可再生能源的集成。半导体储能技术的成功与否,部分取决于所使用的材料。在该领域,碳纳米管作为一种前沿纳米材料[18],为半导体储能技术提供了新的机遇。

三、碳纳米管的独特性

碳纳米管是碳原子以一定的结晶方式排列而成的纳米管状结构[19],它们具有一系列独特的性质,使其成为半导体储能领域的理想材料。碳纳米管具有出色的电导率[20],是传统碳材料的数倍,这有助于实现高效的电荷传输和储存。优异的机械强度[21],可以承受高应力环境下的工作,同时保持结构的稳定性。CNTs 还表现出卓越的化学稳定性,不易受到腐蚀和氧化的影响,这对于提高材料的寿命至关重要。CNTs 的表面积相对较大,有助于提高储能器件的能量密度[22]。

随着社会对可再生能源和可持续发展的不断追求,半导体储能技术及其在碳纳米管应用的研究将持续处于科技前沿。可预见的是碳纳米管的优异特性可能会推动半导体储能技术朝着更高效、更可靠的方向发展。我们期待看到更多关于碳纳米管在储能领域应用的创新性研究,特别是在提高能源密度、循环稳定性和充放电效率等方面。为实现商业化应用,还需要解决碳纳米管的大规模生产和成本问题。随着技术的不断优化和市场的逐步成熟,碳纳米管在半导体储能领域的应用将更加广泛,推动我们走向一个能源更加高效和可持续的未来[23]。

1 碳纳米管的制备方法

碳纳米管是一种具有独特性质的纳米材料,自从 1991 年 Iijima Sumio 首次报道以来,就因其在多个领域内的潜在应用而引起了广泛关注[24]。碳纳米管具有优异的机械、电学、热学和化学性能,这些特性使它们在纳米技术[25]、材料科学[26]、电子学[27]、能源储存和许多其他领域都显示出巨大的潜力。为了充分利用碳纳米管的这些独特性质,研究人员开发了多种方法来制备不同类型的碳纳米管,以下我们将详细探讨几种主要的制备方法。

1.1　化学气相沉积

化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition,CVD)是最常用于制备碳纳米管的方法之一,因其可以在相对较低的成本上规模化生产高质量的碳纳米管。这个过程通常包括将碳源气体(如甲烷、乙炔等)在催化剂(如铁、镍或钴粒子)的作用下,在高温条件下分解,从而在催化剂表面生长碳纳米管,如图 1 所示[28][29]。CVD 法的优点包括:①可控的管径和壁数,通过调整工艺参数(如温度、气体流量和催化剂)可以精确控制;②可以在不同类型的衬底上生长碳纳米管,包括硅片、金属或石墨等;③适合大规模生产。同时,CVD 法也存在一些局限性,如需要高温(通常在 700℃以上),这可能会限制其在某些应用中的使用,生成的碳纳米管可能包含杂质,需要后续处理步骤来提纯。

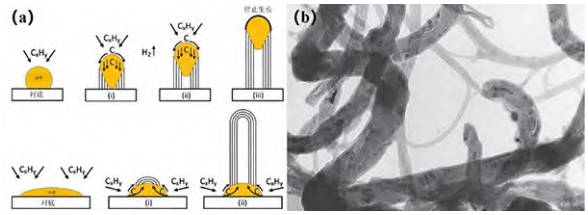

图 1　(a)化学气相沉积法制备 CNTs 原理图,(b)为多壁碳纳米管 TEM 图片

1.2　电弧放电法

电弧放电法是最早用于制备碳纳米管的方法之一,涉及使用电弧蒸发石墨电极,在惰性气氛或真空中,在石墨电极之间形成电弧,产生高温,从而在冷却的石墨表面形成碳纳米管[30],具体如图 2 所示。这种方法的主要优点是可以产生结构均一,质量高的单壁碳纳米管(SWCNTs)[31]。然而,电弧放电法也有缺点,主要包括:①高能耗,需要大量电力;②产量较低,不适合大规模生产;③碳纳米管中杂质含量较高,需要复杂的纯化过程。

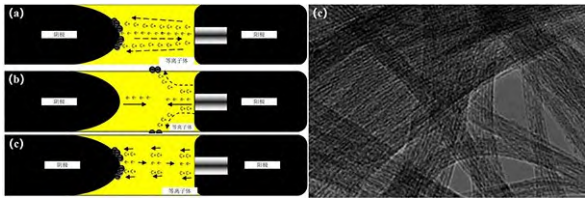

图 2　(a)电弧放电法制备 CNTs 原理图,(b)碳纳米管 TEM 图片

1.3　激光烧蚀法

激光烧蚀是另一种制备高质量碳纳米管的方法,通过使用强激光束蒸发含有合适催化剂的石墨靶材料[32],具体如图 3 所示。激光烧蚀通常在高温惰性气氛中进行,生成的碳蒸汽冷凝并在催化剂颗粒上形成碳纳米管。激光烧蚀法的优点是产生的碳纳米管具有较少的结构缺陷和较高的纯度。然而,这种方法成本高昂,产量有限,这限制了其在工业规模生产中的应用[33]。

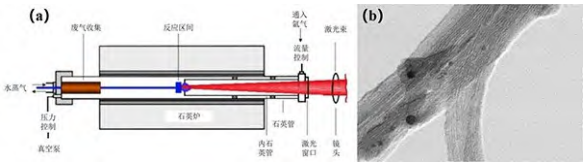

图 3　激光烧蚀法制备 CNTs 原理图,(b)单壁碳纳米管 TEM 图片

1.4　化学溶液法

这类方法包括利用有机金属化合物和其他碳前体通过化学反应在溶液中形成碳纳米管。这些方法通常成本较低,但它们可能会产生结构不均一且纯度较低的碳纳米管。化学溶液法的一个典型例子是湿化学合成,这涉及到使用金属催化剂和碳含量高的有机溶剂。优点是易于控制和大规模生产,缺点是需要后续的纯化步骤来消除残留的催化剂和其他杂质[34]。

1.5　未来的方向和挑战

未来的研究和开发将集中在提高碳纳米管质量和一致性、减少生产成本、提高规模化生产的可行性以及解决环境和健康安全问题。同时,对碳纳米管的表面改性、功能化以及在复合材料中的应用也是研究的重要方向。这些进展将为碳纳米管在能源存储、电子器件、复合材料[35]、生物医学[36]等领域的应用打开新的大门。通过不断优化现有的制备方法和开发新技术,碳纳米管的质量、性能和应用范围预计将得到进一步扩展。在未来,碳纳米管有望在许多高科技领域中发挥关键作用,推动这些领域的创新和发展。

2　电化学性质

碳纳米管是一种新型的一维纳米材料,其独特

的电化学性质为其在世界范围内的研究和应用提供了巨大的潜力。根据所形成的结构,碳纳米管可以分为单壁碳纳米管(Single-Walled Carbon Nanotubes, SWCNTs)和多壁碳纳米管(Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)。碳纳米管的优异电化学特性主要得益于其特殊的结构和成键方式。CNTs 在电化学领域的独特性质主要源于其结构和电子特性。它们的高比表面积提供了更多的活性位点[37],增加了电化学反应的效率,其纳米级尺寸使得它们能在纳米级别上与电解质相互作用。CNTs 的一维纳米结构为电荷提供了高效的传输通道,降低了电荷进入和离开的阻力,提高了电荷的迁移率。同时,CNTs 的碳原子以 sp^2 杂化的方式形成连续的 π-共轭体系,π-轨道的电子可以在碳纳米管上自由移动,这使得碳纳米管具有良好的导电性。CNTs 的化学惰性使其在高电压或高温等恶劣电化学环境中保持稳定,在电催化作用方面,碳纳米管可以作为催化剂或催化剂载体,加速如氧还原反应(ORR)或氢进化反应(HER)等电化学反应[38]。在电荷储存机制方面,它们在超级电容器中通过在电极表面形成电化学双电层来储存电荷,而在电池中,它们可以作为活性材料的组成部分,通过嵌入或脱嵌离子(如锂离子)来储存电荷[39]。在实际应用中,碳纳米管因其高比表面积和优异的电导性,在电化学传感器中被广泛使用,用于检测各种化学物质,如气体、生物分子等。CNTs 在提高超级电容器和锂离子电池的能量和功率密度方面也发挥着重要作用。综上,碳纳米管的结构和电子特性使其在电催化、能量存储和传感器应用中表现出色。

在电化学领域,碳纳米管的应用非常广泛,包括超级电容器、电池、传感器、生物电化学器件以及能源转化器件[40]等。在超级电容器中,材料的电化学性质对器件的储能性能影响巨大,碳纳米管因其高的比表面积、出色的导电性和良好的化学稳定性被广泛用于超级电容器的电极材料[41][42]。在此基础上,通过改变碳纳米管的形状、尺寸以及传输方式,可以进一步提高超级电容器的电化学性能。在锂离子电池领域,碳纳米管的电化学性质使其成为理想的阳极材料。相较于传统的碳材料,碳纳米管更加稳定,能提供更高的比容量和良好的充放电稳定性[43]。CNTs 作为电化学传感器有显著的优点,其电化学氧化还原性质可以增强传感器的灵敏度,还可以与各种化学分子,包括有机分子和无机离子,产生很强的作用力从而提高了传感器对分子的选择性。

3 碳纳米管材料的应用领域

在现代科技迅速发展的时代,储能和转换技术的进步日益成为关键所在。从移动设备的日常需求到对可再生能源的全球追求,对高效、持久和环保的能源技术的需求是迫切的。在这一背景下,超级电容器、锂离子电池和光伏电池成为了能源研究的三个关键领域。而碳纳米管,这种独特的纳米材料,正逐渐展现其在这三个领域中的巨大潜力[44]。它的优越性质为储能技术的未来提供了新的方向,为我们的能源未来开辟了新的道路。

3.1 超级电容器

3.1.1 超级电容器储能机理

超级电容器,又被称为超级电容或电化学双层电容器是一种特殊的电容器,其储能机理主要基于电荷在电极/电解质界面的电化学双层中的累积[45]。同传统的电池相比,超级电容器拥有更快的充放电速度,更长的循环寿命,但其能量密度相对较低,具体原理如图 4 所示[46]。基于此,为了提高超级电容器的能量密度,研究者们不断在寻找更优越的电极材料。碳纳米管(CNTs)由于其独特的纳米结构和优异的电化学性质,成为超级电容器研究领域的热门材料。

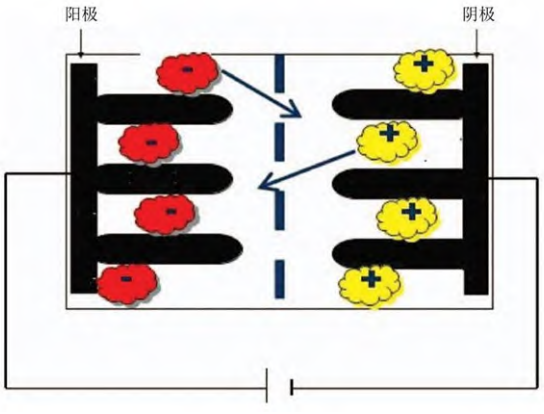

图 4 超级电容器工作原理图

3.1.2 碳纳米管材料性能优势

碳纳米管材料应用在超级电容器应用上具备如下性能优势,①高比表面积,一维纳米结构使其具有极高的比表面积,这为在单位体积内储能提供了巨大的可能性,具有高比表面积的电极材料能容纳更多的电荷,从而在同样的体积下,增加更多的储能量;②良好的电导率,碳纳米管具有连续的 π-共轭体系,这一结构确保了它们在电子传输中的优异性能;③化学稳定性,碳纳米管(CNTs)展现出优异的化学稳定性,这使得它们能够在多种电解质环境下保持稳定,在超级电容器中,电解质起着媒介的作用,允许离子在电极之间移动,完成充放电过程,保持稳定的电解质环境对于超级电容器的性能和寿命至关重要;④机械强度,卓越机械强度是超级电容器技术中的一个重要优势,CNTs 由碳原子构成,其结构中碳-碳键的强度和稳定性使其成具备卓越的耐久性和韧性[47]。

3.1.3 碳纳米管在超级电容器领域的应用趋势

碳纳米管(CNTs)在超级电容器中的应用主要得益于其高比表面积和卓越的导电性,这些特性使它们在提高超级电容器的能量密度和功率密度方面具有显著优势。相较于传统的活性炭或其他碳材料,碳纳米管展现出更好的电化学稳定性和更低的内阻,这意味着在高频充放电过程中能维持更好的性能。目前,碳纳米管超级电容器在电动汽车和便携式电子设备中的应用正逐渐增多[48]。未来发展趋势集中在如何通过结构和组合材料的创新来进一步提高能量密度,以及如何降低成本以实现更广泛的商业应用。例如,通过与其他材料如石墨烯[49]、导电聚合物[50]结合,或者改进纳米管的结构,有望进一步提升超级电容器的整体性能。

3.2　锂离子电池

3.2.1 锂离子电池储能机理

锂离子电池作为现代社会最为广泛使用的储能设备,因其高的能量密度、长的循环寿命和较低的自放电率而被广泛应用,具体储能机理如图 5 所示。但随着移动电子产品和电动汽车的持续发展,对锂离子电池的性能提出了更高的要求,尤其是在储能容量、循环稳定性和充放电速率方面。为此,研究者们不断在寻找和研究新的电极材料。碳纳米管(CNTs)作为新型纳米材料,在锂离子电池领域得到了广泛关注[51]。

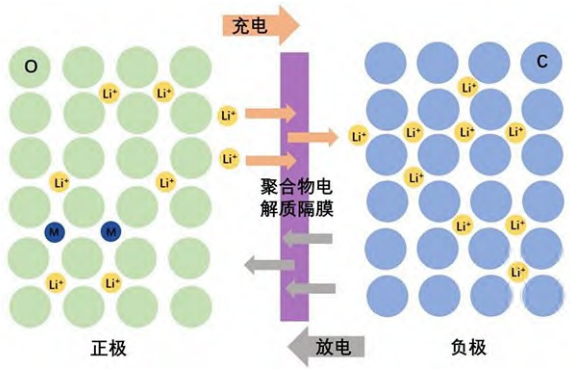

图 5　锂离子电池工作原理图

3.2.2 碳纳米管材料性能优势

碳纳米管材料应用在锂离子电池来提升其性能,具体的应用:①阳极材料的添加剂,传统的锂离子电池使用石墨作为阳极材料,但在充电和放电循环中,锂离子的插入和脱出会引起石墨体积膨胀和收缩,导致电极结构的疲劳、裂纹和损坏,最终降低了电池的循环稳定性和寿命,CNTs 因其纳米尺寸和卓越的弹性而成为一种理想的添加剂,它们的纳米结构赋予了 CNTs 出色的表面积,使其能够提供更多的电荷存储位点;②导电网络,其卓越的电导性能,被广泛用作导电网络来增强电极材料的电导性;③复合阳极材料,充分利用 CNTs 的卓越导电性和结构稳定性,与其他阳极活性物质如硅、锂硫化合物等相结合,形成新型的复合阳极材料,从而改善电池的性能;④固体电解质的骨架,碳纳米管(CNTs)被认为是一种有前景的固态电解质骨架材料,可用于增强固体电解质的机械强度和离子导电性[52]。

3.1.3 碳纳米管在锂离子电池领域的应用趋势

碳纳米管(CNTs)在锂离子电池中的应用,主要是作为电极材料的一部分,提高电池的导电性和结构稳定性。由于碳纳米管的高电导率和优良的机械性能,它们被广泛用于电极材料,特别是作为负极材料[53]的添加剂,以增强电极的导电网络,改善电池的循环稳定性和充放电性能。与传统的碳材料相比,CNTs 展现出更高的电化学活性和更好的耐久性。

目前,碳纳米管在提高锂离子电池能量密度和延长其循环寿命方面发挥着重要作用。未来的研究和发展趋势集中在进一步优化 CNTs 的结构和组合,以达到更高的能量密度和更长的稳定循环寿命。例如,通过与新型纳米材料的复合,或者通过表面改

性来提高其与活性物质的相容性,有望进一步提升锂离子电池的性能。同时,环境友好和成本效益的生产方法也是当前研究的热点,以促进这种材料在商业锂离子电池中的应用。

3.3 光伏电池

3.3.1 碳纳米管在光伏电池领域的应用

可再生能源的需求日益增长,光伏电池作为一种清洁、可再生的能源,逐渐受到人们的青睐。为了提升光伏电池的性能,研究人员不断在寻求新的材料和技术。碳纳米管的光电性质为光伏电池的设计提供了新的思路[54]。碳纳米管具有强大的光电转换能力,可广泛应用于光伏电池的制造中。下面将具体解析碳纳米管在光伏电池上的应用:①电极材料,可以提高电池的光电转换效率、增加光吸收能力、良好的稳定性、可塑性;②光吸收材料,CNTs 的能带结构是其独特之处,这取决于其直径和螺距,这种结构特性为其在光伏电池中的应用提供了重要优势,允许对特定波段的光吸收进行调整,以最大程度地提高光电能量转化效率。③纳米透明导电膜[55],其可以提高电池的电导性、光透过性、灵活性和可塑性、可再生能源发展、环保优势,具体如图 6 所示;④复合材料的应用,CNTs 与有机或无机材料的复合是光伏电池领域的重要研究方向,因为这种复合材料结合了各种材料的优势,提高了电池性能和稳定性;⑤电解质补充剂,CNTs 提高电解质的电导性、光电子注入效率、电解质的稳定性、多功能性。

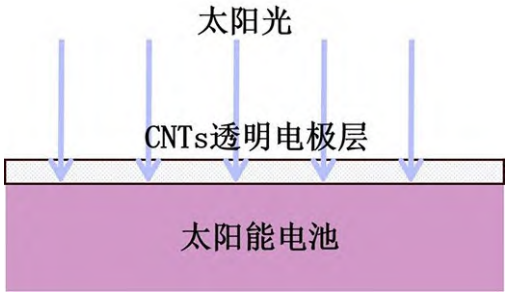

图 6 透明电极在光伏电池应用结构示意图

3.3.1 碳纳米管在光伏电池领域的性能优势及前景

碳纳米管(CNTs)是一种出色的纳米尺度光电材料,对光伏电池性能的提升产生关键影响[56]。因其特殊的光学、电学性质,CNTs 在光伏电池上的应用,如散射层、导电层等,越来越受到青睐。与传统的光伏材料相比,CNTs 具有出色的导电性、高光吸收率和优异的耐久性,可以提升电池的效率和稳定性[57]。当前,CNTs 主要应用于光散射层以及电极的导电层,因其可以有效提升光电转换效率,并改善电池寿命。未来发展趋势则集中在如何有选择地调控碳纳米管的性质以适应不同类型的光伏电池。例如,通过化学修饰或掺杂,使 CNTs 更好的匹配各种半导体材料,提升电池吸光能力[58]和电荷传输效率。此外,开发简洁、环保、低成本的 CNTs 制备方法,也是推动其在光伏领域广泛应用的关键方向。虽然挑战仍大,但 CNTs 在光伏领域的应用于研究充满了潜力和机会。

4 总结与展望

碳纳米管在半导体储能领域的研究取得了重大突破,其独特的结构和卓越的电学性能使其成为下一代半导体储能器件的理想材料。碳纳米管具有高电导性、优异的电子传输性能以及出色的光学特性,这些特点使其在超级电容器、锂离子电池、燃料电池等储能技术中大放异彩。研究者们不断深化对碳纳米管的理解,利用其巨大表面积和可调控的电学性质,改进电池和超级电容器的性能。通过结合碳纳米管与其他材料,如硫、钙钛矿、有机小分子等,已经实现了显著的性能提升,包括提高电池的光电转换效率、电导性、稳定性和可靠性。

未来,随着对碳纳米管材料的研究不断深入,同时基于碳元素的低成本,有望为能源存储技术的发展带来新机遇。碳纳米管的出色特性为储能设备的设计和性能提升提供了广泛的可能性,其与当前主流半导体材料硅为同一主族性能可以完成材料替代以及其他导电材料不具有的兼容性,因此有助于解决日益紧迫的能源和环境挑战。碳纳米管在半导体储能领域的前景令人充满期待,有望推动未来能源存储技术的创新和发展。

参考文献:

[1] Olabi A G, Abdelkareem M A. Renewable energy and climate change[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 158: 112111.

[2] Vakulchuk R, Overland I, Scholten D. Renewable energy and geopolitics: A review[J]. Renewable and sustainable

energy reviews, 2020, 122: 109547.
[3] Yuan C, Zhou Y, Zhu Y, et al. Polymer/molecular semiconductor all-organic composites for high-temperature dielectric energy storage[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 3919.
[4] Rathinavel S, Priyadharshini K, Panda D. A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application[J]. Materials Science and Engineering: B, 2021, 268: 115095.
[5] Dillon A C. Carbon nanotubes for photoconversion and electrical energy storage[J]. Chemical reviews, 2010, 110(11): 6856-6872.
[6] Shahbaz M, Raghutla C, Chittedi K R, et al. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from the renewable energy country attractive index[J]. Energy, 2020, 207: 118162.
[7] Kannan N, Vakeesan D. Solar energy for future world:-A review[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 62: 1092-1105.
[8] Leung D Y C, Yang Y. Wind energy development and its environmental impact: A review[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2012, 16(1): 1031-1039.
[9] Liang C, Umar M, Ma F, et al. Climate policy uncertainty and world renewable energy index volatility forecasting[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 182: 121810.
[10] Hu Z W, Wang H Y. Feasibility study of energy storage using hydraulic fracturing in shale formations[J]. Applied Energy, 2024, 354: 122251.
[11] Takahashi Y, Yamashita T, Takamatsu D, et al. Nanoscale kinetic imaging of lithium ion secondary battery materials using scanning electrochemical cell microscopy[J]. Chemical Communications, 2020, 56(65): 9324-9327.
[12] Pomerantseva E, Bonaccorso F, Feng X, et al. Energy storage: The future enabled by nanomaterials[J]. Science, 2019, 366(6468): eaan8285.
[13] Harper G, Sommerville R, Kendrick E, et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles[J]. nature, 2019, 575(7781): 75-86.
[14] Hirsh H S, Li Y, Tan D H S, et al. Sodium-ion batteries paving the way for grid energy storage[J]. Advanced Energy Materials, 2020, 10(32): 2001274.
[15] Naoi K, Naoi W, Aoyagi S, et al. New generation "nanohybrid supercapacitor"[J]. Accounts of chemical research, 2013, 46(5): 1075-1083.
[16] Li M, Lu J, Chen Z, et al. 30 years of lithium-ion batteries[J]. Advanced Materials, 2018, 30(33): 1800561.
[17] Cui Y, Hong L, Hou J. Organic photovoltaic cells for indoor applications: opportunities and challenges[J]. ACS applied materials & interfaces, 2020, 12(35): 38815-38828.
[18] Sun L, Wang X, Wang Y, et al. Roles of carbon nanotubes in novel energy storage devices[J]. Carbon, 2017, 122: 462-474.
[19] Li X, Zhou J, Zhang J, et al. Bamboo-like nitrogen-doped carbon nanotube forests as durable metal-free catalysts for self-powered flexible Li - CO2 batteries[J]. Advanced Materials, 2019, 31(39): 1903852.
[20] Zhang S, Ma Y, Suresh L, et al. Carbon nanotube reinforced strong carbon matrix composites[J]. ACS nano, 2020, 14(8): 9282-9319.
[21] Merneedi A, Natrayan L, Kaliappan S, et al. Experimental investigation on mechanical properties of carbon nanotube-reinforced epoxy composites for automobile application[J]. Journal of Nanomaterials, 2021, 2021: 1-7.
[22] Robertson J. Realistic applications of CNTs[J]. Materials today, 2004, 7(10): 46-52.
[23] Kongkanand A, Kamat P V. Electron storage in single wall carbon nanotubes. Fermi level equilibration in semiconductor - SWCNT suspensions[J]. ACS nano, 2007, 1(1): 13-21.
[24] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon[J]. nature, 1991, 354(6348): 56-58.
[25] Shoukat R, Khan M I. Carbon nanotubes: a review on properties, synthesis methods and applications in micro and nanotechnology[J]. Microsystem Technologies, 2021: 1-10.
[26] Nikolic M V, Milovanovic V, Vasiljevic Z Z, et al. Semiconductor gas sensors: Materials, technology, design, and application[J]. Sensors, 2020, 20(22): 6694.
[27] Peng L M, Zhang Z, Qiu C. Carbon nanotube digital electronics[J]. Nature Electronics, 2019, 2(11): 499-505.
[28] Kumar M, Ando Y. Chemical vapor deposition of carbon nanotubes: a review on growthmechanism and mass production[J]. Journal of nanoscience and nanotechnology, 2010, 10(6): 3739-3758.
[29] Yu Hai Wang, Zhe Dai, Chao Yue Zhang, Guo Wen Sun, Zhong Wei Lu, Xiu Ping Gao, Geng Zhi Sun, Wei Lan, Zhen Xing Zhang, Xiao Jun Pan, Investigation into performance enhancements of Li-S batteries via oxygen-containing functional groups on activated multi-walled carbon

nanotubes using Fourier transform infrared spectroscopy, Current Applied Physics 20 (2020) 1049-1057

[30] Arora N, Sharma N N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review[J]. Diamond and related materials, 2014, 50: 135-150.

[31] Almarasy A A, Hayasaki T, Abiko Y, et al. Comparison of characteristics of single-walled carbon nanotubes obtained by super-growth CVD and improved-arc discharge methods pertaining to interfacial film formation and nanohybridization with polymers[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 615: 126221.

[32] Forsythe R C, Cox C P, Wilsey M K, et al. Pulsed laser in liquids made nanomaterials for catalysis[J]. Chemical Reviews, 2021, 121(13): 7568-7637.

[33] Chrzanowska J, Hoffman J, Małolepszy A, et al. Synthesis of carbon nanotubes by the laser ablation method: Effect of laser wavelength[J]. physica status solidi (b), 2015, 252 (8): 1860-1867.

[34] Girma H G, Park K H, Ji D, et al. Room-Temperature Hydrogen Sensor with High Sensitivity and Selectivity using Chemically Immobilized Monolayer Single-Walled Carbon Nanotubes[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33 (18): 2213381.

[35] Chen G, Su Y, Jiang D, et al. An experimental and numerical investigation on a paraffin wax/graphene oxide/carbon nanotubes composite material for solar thermal storage applications[J]. Applied Energy, 2020, 264: 114786.

[36] Saliev T. The advances in biomedical applications of carbon nanotubes[J]. C, 2019, 5(2): 29.

[37] Wang Z, Zhang X, Liu X, et al. High specific surface area bimodal porous carbon derived from biomass reed flowers for high performance lithium-sulfur batteries[J]. Journal of colloid and interface science, 2020, 569: 22-33.

[38] Su J, Musgrave III C B, Song Y, et al. Strain enhances the activity of molecular electrocatalysts via carbon nanotube supports[J]. Nature Catalysis, 2023, 6(9): 818-828.

[39] Wu K, Xu G, Pan D, et al. Red phosphorus confined in MOF-derived N-doped carbon-based composite polyhedrons on carbon nanotubes for high-areal-capacity lithium storage[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 385: 123456.

[40] Tabassum H, Mahmood A, Zhu B, et al. Recent advances in confining metal-based nanoparticles into carbon nanotubes for electrochemical energy conversion and storage devices[J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12 (10): 2924-2956.

[41] Yi T F, Chang H, Wei T T, et al. Approaching high-performance electrode materials of ZnCo2S4 nanoparticle wrapped carbon nanotubes for supercapacitors[J]. Journal of Materiomics, 2021, 7(3): 563-576.

[42] Zhai Z, Zhang L, Du T, et al. A review of carbon materials for supercapacitors[J]. Materials & Design, 2022: 111017.

[43] Pumera M. The electrochemistry of carbon nanotubes: fundamentals and applications[J]. Chemistry - A European Journal, 2009, 15(20): 4970-4978.

[44] Rathinavel S, Priyadharshini K, Panda D. A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application[J]. Materials Scienceand Engineering: B, 2021, 268: 115095.

[45] Pour G B, Ashourifar H, Aval L F, et al. CNTs-Supercapacitors: A Review of Electrode Nanocomposites Based on CNTs, Graphene, Metals, and Polymers[J]. Symmetry, 2023, 15(6): 1179.

[46] Fisher R A, Watt M R, Ready W J. Functionalized carbon nanotube supercapacitor electrodes: a review on pseudocapacitive materials[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2013, 2(10): M3170.

[47] Tang J. Carbon nanotube-based flexible electronics[J]. Flexible, Wearable, and Stretchable Electronics, 2020: 137-156.

[48] Lee M E, Kim G, et al. Hybrid nano flake-like vanadium diselenide combined on multi-walled carbon nanotube as a binder-free electrode for sodium-ion batteries[J]. Materials, 2023, 16(3): 1253.

[49] Tiwari S K, Sahoo S, Wang N, et al. Graphene research and their outputs: Status and prospect[J]. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2020, 5(1): 10-29.

[50] Tiwari S K, Sahoo S, Wang N, et al. Graphene research and their outputs: Status and prospect[J]. Journal of Science: Advanced Materials and Devices, 2020, 5(1): 10-29.

[51] Huang J, Jiang Z. The preparation and characterization of Li4Ti5O12/carbon nano-tubes for lithium ion battery[J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(26): 7756-7759.

[52] Hou C, Wang B, Murugadoss V, et al. Recent advances in Co3O4 as anode materials for high-performance lithium-ion batteries[J]. Engineered Science, 2020, 11(5): 19-30.

[53] Hei P, Luo S, Wei K, et al. P4Nb2O15@ CNTs: a new type of niobium phosphate compositing carbon nanotube used as anode material for high-rate lithium storage[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 9(1): 216-223.

[54] Yang L, Wang S, Zeng Q, et al. Efficient photovoltage multiplication in carbon nanotubes[J]. Nature Photonics, 2011, 5(11): 672-676.

[55] 杨志伟.三维基底表面碳基透明电极的研究现状及展望[J].功能材料与器件学报,2023,29(04):229-237.

[56] Wieland L, Li H, Rust C, et al. Carbon nanotubes for photovoltaics: from lab to industry[J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11(3): 2002880.

[57] Iqbal J, Numan A, Rafique S, et al. High performance supercapattery incorporating ternary nanocomposite of multiwalled carbon nanotubes decorated with Co3O4 nanograins and silver nanoparticles as electrode material[J]. Electrochimica Acta, 2018, 278: 72-82.

[58] Peng X, Ma J, Zhou Z, et al. Molecular assembly of carbon nitride-based composite membranes for photocatalytic sterilization and wound healing[J]. Chemical Science, 2023, 14(16): 4319-4327.