

# 钠离子电池关键材料研究及工程化探索进展

## 一、概述

随着新能源技术的迅猛发展，钠离子电池作为一种新型的可充电电池技术，近年来备受关注。钠离子电池以其低成本、高安全性、良好的环境适应性等特点，在能源存储领域展现出巨大的应用潜力。特别是在大规模储能系统、低速电动车、分布式电源等领域，钠离子电池有望成为锂离子电池的有力补充。

钠离子电池的关键材料研究是推动其技术发展的核心。正极材料、负极材料、电解液以及隔膜等关键材料的性能优化和创新，直接关系到钠离子电池的能量密度、循环寿命、安全性等关键指标。国内外研究者围绕这些关键材料展开了大量的研究，取得了一系列重要进展。

在工程化探索方面，钠离子电池的制备工艺、生产线建设以及成本控制等问题是制约其商业化应用的关键因素。针对这些问题，研究者们不断优化生产工艺，提升生产效率，降低生产成本，推动钠离子电池的产业化进程。

本文将对钠离子电池关键材料的研究进展以及工程化探索的最新成果进行综述，旨在为读者提供一份全面而深入的钠离子电池技术发展现状报告，并展望其未来的发展趋势和应用前景。

## 1. 钠离子电池的背景和重要性

钠离子电池作为一种新型的储能技术，近年来在能源领域引起了广泛关注。其背景源于全球对可再生能源和电动交通工具的日益增长的需求，以及对可持续、高效、安全的储能系统的迫切追求。与此同时，传统的锂离子电池虽然已广泛应用于各类电子设备中，但受限于锂资源的稀缺性和价格波动，其大规模应用的可持续性受到挑战。寻找一种可替代的、资源丰富的储能技术显得尤为重要。

钠离子电池的重要性在于其独特的优势和巨大的应用潜力。钠元素在地壳中储量丰富，分布广泛，因此钠离子电池的原材料成本相对较低，有利于降低储能系统的整体成本。钠离子电池具有较高的能量密度和功率密度，能够满足电动交通工具和可再生能源系统对储能设备的高性能要求。钠离子电池还具有良好的热稳定性和安全性，能够有效避免因电池过热或短路而引发的安全事故。

随着科技的不断进步和工程化探索的深入，钠离子电池的关键材料研究也取得了显著进展。正极材料、负极材料、电解液等关键组件的性能不断提升，为钠离子电池的商业化应用奠定了坚实基础。未来，随着材料科学、电池制造技术和应用领域的不断发展，钠离子电池有望在能源储存和电动交通等领域发挥更大的作用，推动能源结构的转型和可持续发展。

## 2. 钠离子电池的原理和特点

钠离子电池（Sodiumion batteries, SIBs）作为一种新兴的电能存储技术，因其资源丰富、成本较低以及对环境友好等特点，受到了广泛关注。钠离子电池的工作原理与锂离子电池类似，都是基于离子在正负极材料之间的嵌入和脱嵌过程来实现电能的存储与释放。

钠离子电池由正极、负极、电解质和隔膜等部分组成。在充电过程中，外部电源对电池进行供电，驱动钠离子从负极材料中脱嵌，并通过电解质迁移到正极材料中嵌入。在放电过程中，钠离子则从正极材料中脱嵌，迁移回负极材料中嵌入。这一过程伴随着电子从外部电路流过，从而完成电能的存储与释放。

（1）资源优势：钠元素在地壳中的储量丰富，分布广泛，有利于降低电池成本，提高经济效益。

（2）成本优势：钠离子电池的正极材料、负极材料和电解质等原材料价格较低，有利于降低电池整体成本。

（3）环境友好：钠离子电池在生产和回收过程中对环境影响较小，有利于实现可持续发展。

（4）安全性较高：钠离子电池在过充、过放、短路等极端条件下具有较高的安全性，有利于提高电池的使用寿命。

钠离子电池在能量密度、循环性能等方面与锂离子电池相比仍有较大差距。为了提高钠离子电池的性能，研究者们致力于开发高性能的正极材料、负极材料、电解质和隔膜等关键材料，并探索工程化应用。

本论文将重点介绍钠离子电池关键材料的研究进展，并探讨工程化探索过程中的挑战和机遇。

### 3. 钠离子电池在能源存储领域的应用前景

随着全球能源需求的不断增长和环境保护要求的提高，可再生能源的存储和利用成为当今世界面临的重大挑战。钠离子电池作为一种具有成本效益和环境友好性的电化学储能技术，其在能源存储领域的应用前景备受关注。

可再生能源，如风能和太阳能，由于其间歇性和不稳定性，需要有效的储能系统以确保能源的稳定供应。钠离子电池因其较高的能量密度、较低的成本和较好的循环稳定性，被认为是可再生能源储能的理想选择。通过钠离子电池的储能，可以有效平抑可再生能源的波动，提高能源利用效率。

钠离子电池在大规模电网储能领域具有巨大的应用潜力。与传统的铅酸电池和锂离子电池相比，钠离子电池在成本上具有明显优势，特别是在电网调峰、调频和备用电源等方面。钠离子电池的环境友好

性也是其在大规模储能应用中的优势之一。

钠离子电池在移动电源和电动交通工具领域也显示出良好的应用前景。随着电动汽车和移动设备的普及，对高能量密度、低成本和长寿命电池的需求日益增长。钠离子电池作为一种潜在的替代品，其研究和发展对于推动电动汽车和移动设备的普及具有重要意义。

尽管钠离子电池在能源存储领域具有广阔的应用前景，但其商业化应用仍面临一些挑战。钠离子电池的能量密度和循环稳定性仍有待提高。钠离子电池的关键材料和生产工艺需要进一步优化，以降低成本并提高电池性能。钠离子电池的安全性和环境适应性也是需要关注的问题。

随着材料科学和电化学技术的进步，以及全球对可持续能源解决方案的追求，钠离子电池的研究和开发正迎来新的机遇。通过跨学科合作和科技创新，有望克服上述挑战，推动钠离子电池在能源存储领域的广泛应用。

钠离子电池在能源存储领域具有巨大的应用潜力和市场前景。随着技术的不断进步和成本的进一步降低，钠离子电池有望在未来成为推动可再生能源利用和实现低碳经济的重要力量。

## 二、钠离子电池关键材料的研究进展

随着全球能源结构转型和可再生能源利用的快速发展，钠离子电池以其独特的资源优势、成本效益和潜在性能提升，逐渐崭露头角成为下一代储能技术的有力竞争者。而钠离子电池的性能提升与关键材料的研究进展息息相关。

正极材料作为钠离子电池的能量来源，其性能直接影响到电池的整体表现。近年来，研究者们围绕氧化物、磷酸盐、硫化物等正极材料进行了大量探索。例如，钠离子掺杂氧化锰和磷酸铁锂等新型材料因其良好的电化学性能和稳定性，受到广泛关注。这些材料不仅具有较高的能量密度，而且能够在充放电过程中保持结构的稳定性，从而提高电池的循环寿命。

负极材料作为钠离子电池的电荷储存场所，其性能同样至关重要。碳材料因其高比表面积、良好的导电性和化学稳定性，成为钠离子电池负极的理想选择。研究者们通过优化碳材料的结构和制备工艺，提高其储钠性能和循环稳定性。同时，金属钠作为潜在的负极材料，也在研究中展现出较高的能量密度和可逆性。

电解液作为钠离子电池中离子传输的媒介，其性能对电池的性能同样具有重要影响。近年来，有机电解液和固态电解液的研究取得了显著进展。有机电解液具有优良的离子传导性能和较低的成本，而固态电解液则具有更高的安全性和更长的循环寿命。研究者们通过优化

电解液的组成和配方,提高了钠离子电池的离子传输速率和能量密度。



除了以上关键材料外，钠离子电池的隔膜、集流体等辅助材料也在研究中不断优化。这些辅助材料的性能提升，同样有助于钠离子电池整体性能的提升。

钠离子电池关键材料的研究进展取得了显著成果，为钠离子电池的商业化应用奠定了坚实基础。仍需要进一步深入研究材料的制备工艺、结构优化和性能提升等方面，以推动钠离子电池技术的快速发展和广泛应用。

## 1. 正极材料

正极材料是钠离子电池中最为关键的部分，它直接决定了电池的能量密度、功率性能以及循环稳定性。近年来，随着能源存储需求的不断增长，钠离子电池因其原材料丰富、成本较低等优点，受到了广泛关注。在正极材料的研究中，主要分为两大类：层状氧化物和聚阴离子化合物。

层状氧化物正极材料具有高的理论比容量和良好的电导率，是钠离子电池研究的热点之一。 $\text{Na}_x\text{MO}_2$ （M 过渡金属）材料因其较高的工作电压和较好的循环性能而被广泛研究。这类材料在充放电过程中容易发生层状结构的转变，导致循环稳定性下降。为了改善这一问题，研究者们通过元素掺杂、结构调控等手段，试图稳定其层状结构，提高其循环性能。

聚阴离子化合物正极材料，如磷酸盐、硅酸盐等，以其良好的结构稳定性和较高的安全性能，也受到了研究者的青睐。这类材料通常具有三维网络结构，能够提供更多的离子传输通道，从而具有较高的离子导电性和良好的循环稳定性。聚阴离子化合物的导电性较差，限制了其功率性能的提升。研究者们通过碳包覆、金属掺杂等手段，试图提高其电子导电性，从而提升其整体性能。

为了进一步提高钠离子电池的性能，研究者们还致力于开发新型正极材料，如普鲁士蓝类似物、有机正极材料等。这些材料具有独特的结构和性质，有望为钠离子电池的性能提升带来新的突破。

正极材料的研究是钠离子电池领域的核心问题之一。通过不断的材料创新和性能优化，有望推动钠离子电池在能源存储领域的广泛应用。

#### **a. 层状氧化物**

在《钠离子电池关键材料研究及工程化探索进展》这篇文章中，层状氧化物作为钠离子电池的关键正极材料之一，具有非常重要的地位。层状氧化物因其独特的结构特性，如较高的钠离子扩散系数、良好的电化学稳定性和较高的比容量，被认为是极具潜力的正极材料。

层状氧化物通常具有  $\text{NaMO}_2$  (M 为过渡金属) 的结构, 其中 M 层和氧层交替排列, 形成层状结构。这种结构有利于钠离子的嵌入和脱出, 从而实现充放电过程。通过调整 M 层的元素种类和比例, 可以优化层状氧化物的电化学性能。

层状氧化物的合成方法多样, 包括高温固相法、溶胶凝胶法、水热法等。这些方法在合成过程中能够精确控制材料的微观结构和形貌, 从而影响其电化学性能。

层状氧化物的电化学性能受多种因素影响, 包括晶体结构、元素掺杂、形貌等。通过优化这些因素, 可以提高层状氧化物的循环稳定性、倍率性能和能量密度。

工程化探索主要集中在提高层状氧化物的生产效率、降低成本以及改善其电化学性能。这包括开发大规模合成工艺、优化材料配方和结构设计, 以及提升电池的整体性能。

尽管层状氧化物在钠离子电池中展现出优异的性能, 但仍面临一些挑战, 如循环稳定性、安全性和大规模生产等。未来的研究将集中在解决这些问题, 并进一步优化层状氧化物的性能, 以推动钠离子电池的商业化应用。

## **b. 晶格结构材料**

在钠离子电池的研究中, 晶格结构材料扮演着至关重要的角色。

这类材料的主要功能是为钠离子的嵌入和脱出提供一个稳定的框架，同时保持电极结构的完整性。晶格结构材料的选取和设计直接影响到电池的循环稳定性、能量密度和功率密度等关键性能指标。

对于正极材料而言，晶格结构需要具备良好的钠离子扩散通道。这通常意味着材料应具有开放式的结构，如层状、隧道状或框架状结构。例如，层状氧化物如  $\text{NaFeO}_2$  及其衍生物，由于其较高的钠离子扩散系数和良好的结构稳定性，被广泛研究作为正极材料。隧道结构材料如  $\text{Na}_{44}\text{MnO}_2$  也展现出优异的循环性能。

负极材料的晶格结构同样重要。理想的负极材料应具有良好的电子导电性和离子导电性，以及足够的比容量。碳基材料，如硬碳和软碳，因其较高的比容量和良好的循环稳定性，成为负极材料的优选。合金类材料如 Sn、Sb 及其化合物，也因其较高的理论比容量而受到关注。这些材料的体积膨胀问题限制了其应用，因此研究者们正在探索通过晶格结构调整来缓解这一问题。

在工程化探索方面，研究者们通过体相掺杂、表面修饰、纳米化等策略，优化晶格结构材料的电化学性能。例如，通过掺杂其他元素，可以在不破坏主体结构的前提下，调节晶格参数，提高材料的稳定性和导电性。表面修饰则可以改善材料的界面性质，降低电荷转移阻抗，提升整体性能。纳米化处理则可以增加材料的比表面积，提供更多的活性位点，从而提升电池的功率密度。

晶格结构材料的研究和工程化探索是钠离子电池领域的关键课题。通过深入理解材料的晶格特性，结合巧妙的材料设计和改性策略，可以显著提升钠离子电池的综合性能，为其商业化应用奠定坚实基础。

### c. 聚阴离子化合物

聚阴离子化合物作为一类重要的钠离子电池正极材料，因其较高的工作电压、良好的循环稳定性和优异的安全性能而受到广泛关注。这类材料通常由过渡金属元素和聚阴离子基团组成，其中聚阴离子基团如硫酸根（SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>）、磷酸根（PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>）和氟磷酸根（VF<sub>6</sub><sup>-</sup>）等，能够提供丰富的离子传输通道，并有效缓冲体积膨胀，从而提升材料的结构稳定性和电化学性能。

在聚阴离子化合物的研究中，掺杂和改性是提升其电化学性能的重要手段。通过掺杂其他元素，如锂、镁、铝等，可以优化材料的电子结构和钠离子扩散路径，从而提高其比容量和循环稳定性。通过表面改性，如包覆碳层或金属氧化物层，可以增强材料的导电性和稳定性，进一步提升其电化学性能。

近年来，研究人员在聚阴离子化合物的研究中取得了显著进展。例如，磷酸铁钠（ $\text{NaFePO}_4$ ）作为聚阴离子化合物的一种，因其较高的能量密度和良好的循环性能而备受关注。通过优化合成工艺和掺杂策略，研究人员成功提高了磷酸铁钠的比容量和倍率性能。氟磷酸钒钠（ $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ ）也是聚阴离子化合物中的一种重要材料，其良好的热稳定性和较高的工作电压使其在钠离子电池领域具有广阔的应用前景。

聚阴离子化合物在钠离子电池中的应用仍面临一些挑战。例如，其通常较低的电导率和钠离子扩散速率限制了其高倍率性能的实现。进一步优化材料的微观结构和电子导电性，以及开发新型高效的聚阴离子化合物，是未来研究的重点方向。

聚阴离子化合物作为钠离子电池的关键材料之一，具有广阔的应用前景。通过不断的材料优化和改性，有望实现其在高性能钠离子电池中的应用，为我国能源存储技术的进步和发展做出贡献。

#### d. 有机材料

**优势** 有机材料在钠离子电池中的应用因其低成本、环境友好性和可调性而备受关注。它们通常具有良好的电化学性能和较高的理论容量。

**挑战** 尽管有机材料具有潜力，但它们在循环稳定性和电导率方

面仍面临挑战。有机材料的化学稳定性通常低于无机材料。

新型有机电极材料的开发 近年来，研究者们致力于开发具有高稳定性和高容量的新型有机电极材料。这些材料包括导电聚合物、有机小分子等。

性能优化 通过化学修饰和结构设计，研究者们正在提高有机电极材料的电化学性能，如循环稳定性和倍率性能。



**固态有机电解质** 固态有机电解质因其高安全性和良好的界面性能而受到关注。研究者们正在探索不同的聚合物和复合物以提高其离子导电性和机械强度。

**液态有机电解质** 液态有机电解质的研究主要集中在提高其电化学稳定窗口和离子导电性。新型添加剂和溶剂的探索是这一领域的关键。

**全有机钠离子电池** 全有机钠离子电池的研究为电池工程化提供了新的方向。这些电池结合了有机电极和有机电解质，展现了独特的设计灵活性和可持续性。

**产业化挑战** 尽管有机材料在实验室研究中显示出潜力，但它们在产业化过程中仍面临诸多挑战，如大规模生产、成本控制和长期稳定性。

**跨学科研究** 有机材料的研究需要跨学科的合作，包括化学、材料科学和电化学。

**创新与突破** 随着新材料的发现和技术的进步，有机材料在钠离子电池中的应用有望实现重大突破。

## 2. 负极材料

钠离子电池的负极材料在决定电池性能上起着至关重要的作用。近年来，科研人员在负极材料的研发上取得了显著进展，为钠离子电池的工程化应用奠定了坚实的基础。

碳基材料因其良好的导电性、稳定性和成本效益，成为钠离子电池负极材料的热门选择。硬碳材料因其较高的比容量和循环稳定性，被广泛研究。研究人员通过优化制备工艺和碳源选择，不断提高硬碳材料的电化学性能。软碳和石墨化碳也因其独特的性质在钠离子电池中展现出潜力，尽管其比容量相对较低，但通过纳米化、掺杂等手段可有效提升其性能。

合金类负极材料因其高理论比容量而备受关注。锡基、锑基和磷基合金是其中最具代表性的材料。合金类负极材料在充放电过程中易发生体积膨胀和粉化，导致循环性能下降。为解决这一问题，科研人员通过纳米化、复合化等方法，改善合金材料的结构稳定性，提高其电化学性能。

除了碳基和合金类负极材料外，还有一些新型负极材料如钛基氧化物、硫化物等也在钠离子电池中展现出一定的应用潜力。这些材料具有独特的晶体结构和电化学性质，为钠离子电池的性能提升提供了新的可能。

在负极材料的工程化探索方面，科研人员致力于提高材料的制备效率、降低成本并优化生产工艺。通过开发新型前驱体、优化热处理工艺等手段，实现了负极材料的大规模制备和性能优化。研究人员还关注负极材料与电解液的匹配问题，通过优化电解液配方和添加剂选择，提高钠离子电池的整体性能。

钠离子电池负极材料的研究取得了显著进展，但仍面临诸多挑战。未来，科研人员将继续深入探索新型负极材料及其工程化应用，为钠离子电池的商业化发展贡献力量。

#### **a. 碳材料**

钠离子电池作为一种新型储能技术，近年来在能源领域引起了广泛关注。作为钠离子电池的重要组成部分，关键材料的研究与工程化进展直接影响着电池的性能和成本。碳材料在钠离子电池中扮演着举足轻重的角色。

碳材料以其优异的导电性、稳定性和成本效益，在钠离子电池领域具有广阔的应用前景。在负极材料中，硬碳因其高比容量和低嵌钠电位而被广泛研究。通过优化制备工艺和调控微观结构，研究者们已成功提升了硬碳材料的电化学性能。软碳材料也因其良好的循环稳定性和倍率性能而受到关注。

在正极材料中，碳材料同样发挥着重要作用。例如，通过掺杂、

包覆等手段，碳材料能够有效提升正极材料的导电性和结构稳定性。

碳材料还可作为导电添加剂，提高钠离子电池的整体导电性能。

除了作为电极材料外，碳材料还在钠离子电池的电解质和隔膜中发挥着重要作用。通过改性碳材料，可以优化电解质的离子传导性能和隔膜的离子选择性透过性能，从而提高钠离子电池的整体性能。

在工程化探索方面，碳材料的制备工艺和成本控制是关键。研究者们正致力于开发高效、环保的碳材料制备方法，以降低生产成本并提高生产效率。同时，通过优化电池结构和工艺参数，进一步推动钠离子电池的商业化应用。

碳材料在钠离子电池关键材料研究中具有重要地位。通过不断深入研究碳材料的性能优化和工程化制备技术，有望为钠离子电池的发展带来新的突破。

## **b. 金属合金**

金属合金作为钠离子电池的关键材料之一，近年来受到了广泛关注。合金类负极材料因其较高的理论比容量和较低的成本而备受青睐。这类材料在充放电过程中与钠发生合金化反应，从而实现钠离子的储存与释放。

目前，研究较多的合金类负极材料主要包括锡（Sn）基合金、锗（Ge）基合金、硅（Si）基合金等。锡基合金因其较高的比容量和适中的工作电压被认为是极具潜力的钠离子电池负极材料。锡基合金在充放电过程中较大的体积膨胀（可达 300 以上）会导致电极结构的破坏和电化学性能的迅速衰减，这限制了其商业化应用。为了解决这一问题，研究者们采用了多种策略，如制备纳米结构的锡基合金、设计复合材料以及表面修饰等，以改善其循环稳定性和倍率性能。

锗基合金和硅基合金同样具有较高的比容量，但它们在钠离子电池中的应用受到了成本和资源分布的限制。这些材料在合金化反应中也面临着体积膨胀和结构稳定性问题。

在工程化探索方面，研究者们正在努力优化合金类负极材料的制备工艺，以提高其电化学性能和降低成本。同时，通过材料复合和结构设计，旨在解决体积膨胀和循环稳定性问题，从而推动合金类负极材料在钠离子电池中的实际应用。

金属合金作为钠离子电池的关键材料，在提升能量密度和降低成本方面展现出巨大潜力。要实现其商业化应用，还需克服体积膨胀、循环稳定性等关键挑战。未来的研究将继续深化对合金类负极材料的理解，并探索更有效的改性策略和工程化解决方案。

### c. 氧化物

氧化物在钠离子电池中扮演着重要的角色,尤其是在正极材料中。氧化物正极材料因其较高的能量密度、良好的循环稳定性和较低的成本而受到广泛关注。目前研究较多的氧化物正极材料主要包括层状氧化物、尖晶石型氧化物和橄榄石型氧化物等。

层状氧化物是钠离子电池中研究最为广泛的正极材料之一。其典型的代表是  $\text{NaCoO}_2$ 。层状氧化物具有良好的电子导电性和离子扩散性，因此具有较高的充放电速率。通过元素掺杂和结构调控，可以进一步提高其电化学性能。例如，通过掺杂过渡金属元素（如 Mn、Fe、Ni 等）可以增加材料的比容量和循环稳定性。通过调控层状结构的层间距，可以改善钠离子的扩散性能，从而提高电池的速率性能。

尖晶石型氧化物也是钠离子电池中重要的正极材料之一。其典型的代表是  $\text{NaMn}_2\text{O}_4$ 。尖晶石型氧化物具有较高的电压和较好的循环稳定性，但其电子导电性和离子扩散性相对较差。为了改善其电化学性能，研究者们采取了多种策略，如元素掺杂、结构调控和表面修饰等。例如，通过掺杂过渡金属元素（如 Co、Ni、Fe 等）可以增加材料的比容量和循环稳定性。通过调控尖晶石结构的氧缺陷浓度，可以改善钠离子的扩散性能，从而提高电池的速率性能。

橄榄石型氧化物是一类具有较高能量密度的正极材料，其典型的代表是  $\text{NaFePO}_4$ 。橄榄石型氧化物具有良好的热稳定性和循环稳定性，但其电子导电性和离子扩散性较差。为了改善其电化学性能，研究者们采取了多种策略，如元素掺杂、结构调控和表面修饰等。例如，通过掺杂过渡金属元素（如 Mn、Ni、Co 等）可以增加材料的比容量和循环稳定性。通过调控橄榄石结构的钠离子通道大小，可以改善钠离



子的扩散性能，从而提高电池的速率性能。

氧化物正极材料在钠离子电池领域具有重要的研究意义和应用前景。通过元素掺杂、结构调控和表面修饰等策略，可以进一步提高其电化学性能，为钠离子电池的工程化应用提供更多的可能性。

#### d. 硅基材料

硅基材料作为钠离子电池的负极材料，因其较高的理论比容量、丰富的地球资源以及较低的成本而受到广泛关注。硅基材料的储钠机制主要是通过硅与钠离子之间的合金化反应实现。在放电过程中，硅与钠离子反应生成硅钠合金，而在充电过程中，硅钠合金则分解，释放出钠离子。这一过程伴随着较大的体积膨胀（可达 300 以上），导致电极材料在循环过程中易于粉化，从而影响电极的稳定性和循环寿命。

为了解决硅基材料在钠离子电池应用中的体积膨胀问题，研究人员进行了大量的改性研究。硅纳米化是一种有效的方法。通过制备硅纳米颗粒或硅纳米线，可以有效地缓解体积膨胀带来的应力，从而提高电极的循环稳定性。硅基材料的复合化也是改善其电化学性能的重要途径。将硅与碳材料（如石墨烯、碳纳米管等）复合，不仅可以提高电极的导电性，还可以通过碳材料的弹性缓冲作用，进一步缓解硅的体积膨胀问题。

除了硅纳米化和复合化，硅基材料的表面改性也是提高其电化学生性能的重要手段。通过在硅材料表面包覆一层稳定的导电层（如导电聚合物、金属化合物等），可以增强电极的导电性，同时保护硅材料在循环过程中免受电解液的侵蚀。

在工程化探索方面，硅基材料的制备工艺和成本控制是关键。目前，硅基材料的制备方法主要包括化学气相沉积、溶液法和高温热处理等。这些方法在制备过程中需要精确控制反应条件，以确保硅基材料的结构和性能。同时，降低制备成本、提高生产效率也是硅基材料工程化探索的重要方向。

硅基材料在钠离子电池领域具有巨大的应用潜力。通过材料改性和工程化探索，有望进一步提高硅基材料的电化学生性能，推动其在钠离子电池领域的实际应用。

### **3. 电解液**

电解液是钠离子电池中不可或缺的组成部分，它承担着在正负极之间传输离子，维持电荷平衡的重要作用。近年来，随着钠离子电池研究的深入，电解液的研究也取得了显著进展。本节将重点讨论钠离子电池电解液的最新研究动态和工程化探索进展。

目前，钠离子电池电解液的研究主要集中在有机电解液、无机电解液和离子液体三个方面。有机电解液因其较高的离子电导率和良好的界面相容性而受到广泛关注。研究表明，以碳酸酯类和醚类为溶剂的有机电解液体系具有较好的电化学稳定性，能够满足钠离子电池的使用要求。有机电解液的氧化稳定性和低温性能仍有待提高。

无机电解液主要包括熔融盐和离子液体。熔融盐具有较高的离子电导率和良好的电化学稳定性，但工作温度较高，限制了其在实际应用中的发展。离子液体具有较宽的电化学稳定窗口和良好的热稳定性，但其离子电导率相对较低，且成本较高，需要进一步研究和优化。

为了提高钠离子电池的性能，研究人员在电解液中添加了各种功能添加剂。例如，添加适量的氟代碳酸酯可以显著提高电解液的氧化稳定性和电化学稳定性。添加磷酸酯可以改善电解液的界面相容性和低温性能。还有一些研究者在电解液中添加了导电剂和成膜剂，以优化电极/电解液界面，提高电池的循环稳定性和倍率性能。

电解液的工程化探索是钠离子电池研究的一个重要方向。目前，研究人员主要通过优化电解液的配方和制备工艺，提高电解液的性能和降低成本。例如，通过分子设计和结构优化，开发出具有高离子电导率、宽电化学稳定窗口和良好界面相容性的电解液体系。通过改进电解液的制备工艺，提高电解液的纯度和稳定性，降低生产成本。

还有一些研究者致力于开发新型电解液添加剂和复合电解液体系，以进一步提高钠离子电池的性能。例如，将离子液体与有机溶剂混合，制备出具有良好综合性能的复合电解液在电解液中添加具有特定功能的纳米材料，如碳纳米管、石墨烯等，以改善电解液的性能。

电解液的研究和工程化探索取得了显著进展，但仍面临一些挑战，如提高电解液的氧化稳定性和低温性能，降低电解液的成本等。未来，随着研究的深入和技术的进步，相信电解液的性能将得到进一步提升，为钠离子电池的发展和應用提供有力支持。

#### a. 有机电解液

钠离子电池是一种新兴的储能技术，其工作原理与锂离子电池相似，但使用钠离子作为电荷载体。有机电解液是钠离子电池的重要组成部分之一，它作为离子传导介质，在电池充放电过程中起到关键作用。

有机电解液通常由有机溶剂和锂盐组成。有机溶剂可以是碳酸酯类化合物，如碳酸丙烯酯（PC）、碳酸乙烯酯（EC）和碳酸二乙酯（DEC）等。锂盐可以是六氟磷酸锂（LiPF<sub>6</sub>）、高氯酸锂（LiClO<sub>4</sub>）和四氟硼酸锂（LiBF<sub>4</sub>）等。

在钠离子电池中，由于钠离子的尺寸较大，需要选择合适的有机溶剂和锂盐来优化电解液的电化学性能。研究表明，使用具有较大介

电常数和较低粘度的有机溶剂，以及具有适当钠离子迁移数的锂盐，  
可以提高钠离子电池的循环稳定性和倍率性能。

有机电解液的安全性也是钠离子电池研究中的一个重要问题。由于钠离子电池在过充、过放或短路等滥用条件下可能发生热失控和燃烧等安全问题，因此需要开发具有良好热稳定性和化学稳定性的有机电解液体系。

## **b. 固态电解液**

固态电解液是钠离子电池的关键组成部分，它不仅充当离子传输的介质，而且对电池的安全性和长期稳定性起着决定性作用。近年来，随着对电池能量密度和安全性要求的不断提高，固态电解液的研究和开发成为了热点。

固态电解液主要分为两类：无机固态电解液和有机固态电解液。无机固态电解液包括氧化物、硫化物、磷酸盐等，它们通常具有高的离子导电性和良好的热稳定性。有机固态电解液则主要包括聚合物和复合物，它们的优势在于良好的柔韧性和加工性。

离子在固态电解液中的传输机制与传统的液态电解液有所不同。在固态电解液中，离子的传输主要依赖于晶格振动和空位跳跃。提高固态电解液的离子导电性需要优化其晶体结构和减少离子传输的能垒。

评价固态电解液的关键性能指标包括离子导电性、电化学稳定窗口、机械性能和界面兼容性。离子导电性是衡量固态电解液性能的最重要指标，它直接决定了电池的充放电速率。电化学稳定窗口则影响着电池的工作电压和能量密度。机械性能如柔韧性和强度，对于电池的加工和长期稳定性至关重要。界面兼容性则影响着电极与电解液之间的界面阻抗，进而影响电池的整体性能。

尽管固态电解液在理论上具有许多优势，但其工程化应用仍面临诸多挑战。例如，固态电解液的加工性通常较差，难以实现大规模生产。固态电解液与电极材料之间的界面问题也需要解决，以降低界面阻抗并提高电池的整体性能。

为了克服这些挑战，研究者们正在探索多种策略，包括开发新型固态电解液材料、优化电解液的加工工艺、改善电解液与电极材料的界面兼容性等。通过模拟和计算方法对固态电解液的设计和性能进行预测，也是推动其工程化应用的重要途径。

总而言之，固态电解液的研究和工程化探索是钠离子电池领域的关键课题。随着研究的深入和技术的进步，有望实现高性能、安全、长寿命的钠离子电池，为能源存储和转换提供更加有效的解决方案。

### c. 水系电解液

水系电解液作为钠离子电池的重要组成部分，因其低成本、环境



友好以及高安全性能而备受关注。近年来，研究人员在水系电解液的组成、性能优化以及与电极材料的兼容性方面取得了显著进展。

水系电解液的组成研究主要集中在电解质盐和添加剂的选择上。目前，常用的电解质盐包括 NaPFNaClO<sub>4</sub> 等，这些盐在水中具有良好的离子导电性。为了进一步提升电解液的电化学稳定性，研究人员通常会添加一些功能性添加剂，如硫酸钠、硼酸等，以改善电解液的界面性能和抑制电极材料的溶解。

水系电解液的性能优化主要涉及其离子导电性、电化学稳定窗口以及与电极材料的相容性。通过优化电解液的浓度、温度以及添加剂的种类和比例，可以有效提升电解液的离子导电性和电化学稳定窗口。同时，为了确保电解液与电极材料之间的好相容性，研究人员通常会对电极材料进行表面改性，如包覆、掺杂等，以增强其稳定性和电化学性能。

水系电解液在工程化探索方面也取得了重要进展。为了满足实际应用需求，研究人员致力于开发高性能、低成本的水系钠离子电池体系。通过优化电池结构设计、提升电池组装工艺以及改进电池管理系统，可以有效提升水系钠离子电池的能量密度、循环稳定性和安全性。同时，水系钠离子电池在规模化和工程化生产方面也取得了突破性进展，为实现其商业化应用奠定了基础。

水系电解液在钠离子电池领域的研究和工程化探索取得了显著进展。随着研究的深入和技术的进步，水系钠离子电池有望在能源存储和转换领域发挥重要作用，为推动能源结构转型和可持续发展做出贡献。

#### 4. 隔膜材料

隔膜材料在钠离子电池中起着至关重要的作用，它不仅分隔正负极材料，防止短路，还允许离子通过，维持电池的正常工作的。近年来，随着钠离子电池研究的深入，隔膜材料的研发也取得了显著进展。

隔膜材料的选择需要考虑多个因素，包括离子导电性、机械强度、化学稳定性以及成本等。目前常用的隔膜材料主要有聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）和它们的复合材料。这些材料具有良好的电化学稳定性和机械性能，但它们的离子导电性相对较低，这限制了电池的整体性能。

为了提高隔膜的离子导电性，研究者们开始探索新型的隔膜材料。例如，引入纳米填料如碳纳米管、石墨烯等，可以显著提高隔膜的导电性。开发具有三维多孔结构的隔膜也是提高离子传输效率的有效途径。

除了选择合适的隔膜材料外，对隔膜进行改性和优化也是提高电池性能的重要手段。例如，通过表面涂覆技术，可以在隔膜表面形成

一层离子导电的涂层，从而提高离子传输速率。通过调控隔膜的孔径和孔隙率，可以优化离子的传输路径，进一步提高电池的循环稳定性和安全性。

实验室规模的研究成果需要通过工程化探索才能实现工业化应用。在隔膜材料的工程化方面，研究者们致力于提高隔膜的生产效率、降低成本，并保证其在大规模生产中的性能稳定性。例如，开发连续化的生产技术和设备，优化隔膜的制备工艺，以及建立严格的质量控制体系，都是隔膜材料工程化探索的重要内容。

尽管隔膜材料的研究取得了一定的进展，但在高性能钠离子电池的应用中仍面临一些挑战。例如，如何进一步提高隔膜的离子导电性和机械强度，同时保持其良好的化学稳定性如何实现隔膜材料的大规模生产和成本控制以及如何保证隔膜在长期循环过程中的结构稳定性和安全性，都是未来研究需要解决的问题。

展望未来，随着材料科学和工程技术的不断发展，相信隔膜材料的研究将会取得更大的突破。通过不断优化和改进隔膜材料，将有助于推动钠离子电池在能源存储领域的广泛应用。

#### **a. 聚烯烃材料**

在钠离子电池的研究与工程化进程中，聚烯烃材料以其独特的物理和化学性质，为这一领域的发展注入了新的活力。聚烯烃，作为一类重要的高分子材料，具有优异的耐化学药品性、耐水性、机械强度以及电绝缘性等特点，使其在钠离子电池的电极材料、隔膜以及外包装等多个方面展现出广阔的应用前景。

在电极材料方面，聚烯烃因其良好的导电性和稳定性，常被用作电极材料的添加剂或基体。通过合理的配方设计和工艺优化，聚烯烃能够显著提高电极材料的导电性能和循环稳定性，从而提升钠离子电池的能量密度和循环寿命。聚烯烃还可与其他活性材料进行复合，制备出具有优异性能的复合电极材料，进一步拓展钠离子电池的应用范围。

在隔膜方面，聚烯烃隔膜具有优异的离子传导性能和机械强度，能够有效隔离正负极，防止电池内部短路。同时，聚烯烃隔膜还具有良好的热稳定性和化学稳定性，能够在高温和恶劣环境下保持稳定的性能。通过改进聚烯烃隔膜的制备工艺和表面处理技术，可以进一步提高其离子传导性能和浸润性，从而提升钠离子电池的整体性能。

在外包装方面，聚烯烃材料因其良好的耐候性和机械性能，常被用作钠离子电池的外包装材料。通过合理的结构设计和生产工艺，可以制备出具有优异密封性和抗压强度的钠离子电池外包装，保障电池在使用过程中的安全性和稳定性。

尽管聚烯烃材料在钠离子电池领域具有广泛的应用前景，但其在工程化过程中仍面临一些挑战。例如，如何进一步提高聚烯烃材料的导电性能和稳定性，以满足更高能量密度和更长循环寿命的钠离子电池需求如何降低聚烯烃材料的生产成本，以推动钠离子电池的商业化应用等。未来研究需要关注这些关键问题，通过深入研究和创新实践，推动聚烯烃材料在钠离子电池领域的进一步发展。

聚烯烃材料在钠离子电池的关键材料研究中发挥着重要作用。通过不断优化其性能和应用方式，可以推动钠离子电池技术的进步和工程化应用的实现。随着全球对可再生能源和储能技术的需求不断增长，钠离子电池作为一种潜力巨大的新型储能技术，其研究和应用前景将更加广阔。

## **b. 无机复合隔膜**

无机复合隔膜是钠离子电池关键材料研究的一个重要方向，它旨在通过将无机材料与常规隔膜材料复合，提高隔膜的机械强度、热稳定性和电化学稳定性，从而提升电池的整体性能。这种隔膜的设计和制备，通常涉及到对无机粒子的选择、表面改性、以及与隔膜基体的复合工艺。

**无机粒子的选择:** 无机粒子通常选择具有高热稳定性和良好电化学稳定性的材料，如氧化物、硅酸盐、磷酸盐等。这些材料能够有效

提高隔膜在高温环境下的稳定性,防止因温度升高导致的电池性能下降。



**表面改性:** 为了提高无机粒子与隔膜基体的相容性和结合力，通常需要对无机粒子进行表面改性。表面改性可以通过物理或化学方法实现，如表面涂覆、接枝改性等。改性后的无机粒子能够更均匀地分散在隔膜基体中，提高复合隔膜的均匀性和稳定性。

**复合工艺:** 无机粒子与隔膜基体的复合工艺对复合隔膜的性能有着重要影响。常见的复合工艺包括溶液共混、熔融共混、层层自组装等。这些工艺能够实现无机粒子在隔膜基体中的均匀分散，从而提高复合隔膜的整体性能。

无机复合隔膜的研究和开发，不仅能够提高钠离子电池的安全性能和循环稳定性，还能够推动钠离子电池在大型储能领域的应用。未来，随着材料科学和制备技术的不断发展，无机复合隔膜的性能将得到进一步提升，为钠离子电池的工程化应用提供更加坚实的材料基础。

### 三、钠离子电池关键材料的工程化探索

随着钠离子电池技术的不断成熟，其关键材料的工程化探索也逐渐成为研究热点。工程化探索旨在将实验室中的研究成果转化为实际可行的生产工艺，以满足大规模生产和应用的需求。

在正极材料方面，工程化探索主要集中在提高材料的比容量、循环稳定性以及降低成本等方面。研究者通过优化合成工艺、改进材料结构以及掺杂改性等手段，提高了正极材料的电化学性能。同时，为

了降低生产成本,研究者也在探索使用低成本原料和简化生产工艺的方法。

负极材料方面，工程化探索的重点在于提高材料的比容量和首次库伦效率，以及解决材料在充放电过程中的体积膨胀问题。研究者通过设计新型负极材料结构、优化制备工艺以及采用表面修饰等方法，提高了负极材料的电化学性能。研究者还在探索使用碳基材料、合金材料以及转化型材料等多种负极材料，以满足不同应用场景的需求。

电解液作为钠离子电池的重要组成部分，其工程化探索同样具有重要意义。研究者致力于开发具有高离子导电性、高化学稳定性以及低成本的电解液。通过优化电解液的组成和配方，研究者提高了钠离子电池的能量密度和循环寿命。同时，研究者还在探索使用固态电解质等新型电解液体系，以进一步提高钠离子电池的安全性和可靠性。

除了关键材料本身的工程化探索外，研究者还在关注材料制备过程中的环保问题和资源回收利用。通过采用绿色合成工艺、减少废弃物排放以及实现废旧电池的回收利用等措施，研究者致力于推动钠离子电池技术的可持续发展。

钠离子电池关键材料的工程化探索在推动钠离子电池技术的商业化进程中发挥着重要作用。未来随着研究的深入和技术的不断进步，相信钠离子电池将会在能源存储领域展现出更加广阔的应用前景。

## 1. 材料制备工艺的优化

钠离子电池作为一种有潜力的电化学储能系统，其关键材料的制备工艺对其性能和成本效益有着决定性的影响。在材料制备方面，优化工艺以提高材料的电化学性能、稳定性和成本效益是当前研究的热点之一。

正极材料的制备工艺优化是提高钠离子电池性能的关键。目前，层状氧化物、聚阴离子化合物和普鲁士蓝类似物是主要的正极材料。在制备这些材料时，控制晶体结构、形貌和尺寸对于提高其电化学性能至关重要。例如，通过溶胶凝胶法、水热合成法或共沉淀法等精细化工技术，可以实现对材料微观结构的精确调控，从而优化其电子传导性和离子扩散速率。

负极材料的制备工艺优化同样重要。硬碳和合金类材料是常见的负极材料。硬碳的制备通常涉及碳前驱体的选择和热处理条件的优化，以获得具有高比容量和良好循环稳定性的多孔结构。对于合金类材料，如锡基和硅基材料，通过控制纳米尺寸和形貌，可以显著提高其电化学性能和循环稳定性。

电解液的优化也是提升钠离子电池整体性能的关键。电解液的选择和配比直接影响到电池的离子传输和界面稳定性。通过研究不同电解液体系的物理化学性质，如离子导电性、电化学稳定窗口和界面相容性，可以开发出更适合钠离子电池的电解液。

在材料制备工艺的优化过程中,还需要考虑到规模化生产的需求。开发高效、可控且成本效益高的批量制备工艺是钠离子电池材料研究的重要方向。通过优化工艺参数,如温度、压力、反应时间和原料配比,可以实现材料性能的均一性和稳定性,从而满足大规模生产的需求。

钠离子电池关键材料的制备工艺优化是一个多因素、多步骤的过程,涉及材料科学、化学工程和电化学等多个领域的知识。通过不断的研究和探索,可以进一步提高钠离子电池的性能,推动其在能源存储领域的广泛应用。

#### **a. 纳米材料的制备**

钠离子电池的性能在很大程度上取决于其关键材料的微观结构和组成。在纳米尺度上,材料的物理和化学性质往往会发生显著变化,这些变化对于提高电池的比容量、循环稳定性和速率性能至关重要。纳米材料的制备成为钠离子电池研究中的一个关键环节。

目前,多种纳米材料制备技术已被应用于钠离子电池的关键材料,包括但不限于溶胶凝胶法、水热溶剂热法、微波辅助合成法、模板法和电化学沉积法。这些方法各有优势,能够实现对材料形貌、尺寸和结构的精确控制。

**溶胶凝胶法:** 这是一种广泛应用的纳米材料合成方法，通过控制前驱体的水解和缩合过程来制备具有均匀纳米尺寸的材料。这种方法的优势在于能够实现高纯度和良好均匀性的材料，适用于大规模生产。

**水热溶剂热法:** 这种方法在高温高压的条件下进行，能够促进前驱体的溶解和再结晶，从而形成纳米尺寸的材料。水热溶剂热法特别适用于制备形貌和尺寸可控的纳米材料。

**微波辅助合成法:** 微波辐射能够提供快速且均匀的加热，从而加速化学反应，提高产物的纯度和结晶度。这种方法适用于快速合成具有特定形貌的纳米材料。

**模板法:** 通过使用模板来引导材料的生长，可以实现对材料形貌和尺寸的精确控制。这种方法特别适用于制备具有特定孔道结构的纳米材料，这对于提高电极材料的表面积和电化学性能非常有利。

**电化学沉积法:** 通过电化学反应在电极表面直接沉积纳米材料，这种方法可以直接在电池结构中制备电极材料，有利于提高电极与电解液的接触性能。

在纳米材料的制备过程中，控制材料的形貌、尺寸和结构对于优化其电化学性能至关重要。还需要考虑材料的合成成本和可扩展性，以实现钠离子电池的大规模应用。未来的研究将继续探索更高效、更环保的纳米材料制备方法，以推动钠离子电池技术的进一步发展。

## b. 材料复合技术

在钠离子电池的关键材料研究中，材料复合技术正日益展现出其独特的优势和巨大的潜力。这种技术通过将不同性质的材料进行复合，旨在综合各组分材料的优点，克服单一材料的局限性，从而优化和提升钠离子电池的性能。

在正极材料方面，研究人员通过将具有高能量密度的材料与具有良好稳定性的材料进行复合，旨在提高钠离子电池的能量密度和循环寿命。例如，将氧化物、磷酸盐和硫化物等材料进行复合，可以综合利用它们的优点，实现钠离子电池性能的优化。通过引入纳米结构、多孔结构等设计，可以进一步提高复合正极材料的电化学性能。

在负极材料方面，材料复合技术同样发挥着重要作用。通过将碳材料与金属钠、金属氧化物等材料进行复合，可以提高负极材料的导电性、储钠能力和循环稳定性。同时，采用先进的复合工艺，如化学气相沉积、溶胶凝胶法等，可以实现对复合负极材料微观结构的精确控制，进一步提高其电化学性能。

值得注意的是，材料复合技术不仅可以应用于正负极材料的制备，还可以用于电解液的优化。通过将有机电解液与固态电解液进行复合，可以综合它们的优点，实现离子传输速率、电池成本、安全性等多方面的平衡。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/648002047067006071>