



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119841296 A

(43) 申请公布日 2025. 04. 18

(21) 申请号 202411955671.3

(22) 申请日 2024.12.28

(71) 申请人 大连融科储能集团股份有限公司

地址 116450 辽宁省大连市花园口经济区  
迎春街20-10号

(72) 发明人 卢言明 李宗麟 王锴华 钟天奇  
韩星 陈嘉诺 赵唤

(51) Int. Cl.

C01B 25/45 (2006.01)

H01M 4/58 (2010.01)

H01M 10/054 (2010.01)

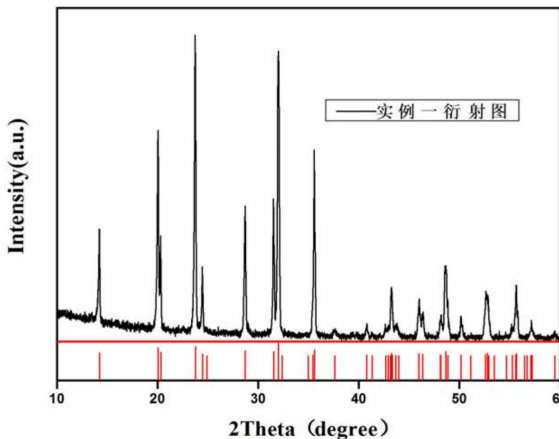
权利要求书1页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠、其制备方法及应用

(57) 摘要

本发明提供一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠、其制备方法及应用,镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法包括以下步骤:按照元素配比分别称取钒源、磷源、钠源、镁源、钛源和铝源,混合于去离子水中,并加入还原剂混合得到混合溶液;采用喷雾干燥对混合溶液进行前处理,制备得到前驱体;将前驱体置于高温炉中,在惰性气氛下先在350-500°C预烧2-4h,后在800-950°C煅烧6-12h;煅烧后经研磨、筛分制备得到镁钛铝掺杂磷酸钒钠。本发明将镁、钛、铝元素引入磷酸钒钠的晶格结构中,形成具有优异电化学性能的复合材料。镁钛铝掺杂磷酸钒钠不仅继承了磷酸钒钠原有的稳定性优势,还在能量密度、倍率性能和循环稳定性等方面得到了显著提升。



1. 一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠,其特征在于,其通式为 $\text{Na}_3\text{V}_{2-x}\text{Mg}_{x/4}\text{Ti}_{x/4}\text{Al}_{x/2}(\text{PO}_4)_3$ ,其中, $0.1 \leq x \leq 0.5$ 。
2. 一种权利要求1所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法,其特征在于,包括以下步骤:  
步骤1、原料混合  
按照通式中元素配比分别称取钒源、磷源、钠源、镁源、钛源和铝源,混合于去离子水中,并加入还原剂混合得到混合溶液;  
步骤2、前驱体制备  
采用喷雾干燥对混合溶液进行前处理,制备得到前驱体;  
步骤3、煅烧处理  
将前驱体置于高温炉中,在惰性气氛保护下进行煅烧:先在350-500°C预烧结2-4h,后在800-950°C煅烧6-12h;  
步骤4、后处理  
煅烧后经研磨、筛分制备得到镁钛铝掺杂磷酸钒钠。
3. 根据权利要求2所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法,其特征在于,步骤1所述钒源为 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{NH}_4\text{VPO}_4$ 、 $\text{V}_2\text{O}_4$ 、 $\text{V}_2\text{O}_3$ 和 $(\text{NH}_4)_2\text{V}_6\text{O}_{16}$ 中的一种或多种;  
和/或,所述磷源为 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{H}_3\text{PO}_4$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ 和 $\text{NH}_4\text{VPO}_4$ 中的一种或多种;  
和/或,所述钠源为 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{NaOH}$ 和 $\text{NaHCO}_3$ 中的一种或多种;  
和/或,所述镁源为 $\text{MgO}$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{MgCO}_3$ 和 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 中的一种或多种;  
和/或,所述钛源为 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{TiCl}_4$ 和 $\text{H}_2\text{TiO}_3$ 中的一种或多种;  
和/或,所述铝源为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{AlCl}_3$ 和 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 中的一种或多种。
4. 根据权利要求2所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法,其特征在于,步骤1所述混合溶液中固含量为35-55%。
5. 根据权利要求2所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法,其特征在于,步骤1中还原剂为柠檬酸、抗坏血酸中的一种或多种。
6. 根据权利要求2所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法,其特征在于,步骤1中还原剂的加入量为5wt%-12wt%。
7. 根据权利要求2所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法,其特征在于,步骤2所述喷雾干燥条件为:喷雾进口温度180°C-220°C,出口温度80°C-120°C,流量20-40rpm,压力0.2-0.5Mpa。
8. 根据权利要求2所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法,其特征在于,步骤3所述惰性气氛为氮气、氩气中的一种或多种。
9. 根据权利要求2所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法,其特征在于,步骤4所述筛分采用300目筛网。
10. 一种权利要求1所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠在钠离子电池正极材料领域的应用。

## 一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠、其制备方法及应用

### 技术领域

[0001] 本发明涉及磷酸钒钠技术,尤其涉及一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠、其制备方法及应用。

### 背景技术

[0002] 随着全球能源结构的转型和电动汽车、大规模储能系统等新兴产业的快速发展,对高性能储能材料的需求日益迫切。磷酸钒钠(NVP)作为一种潜在的钠离子电池正极材料,因其结构稳定性和安全性而受到广泛关注。然而,其较低的能量密度和倍率性能限制了其商业化应用。在传统的磷酸钒钠的合成中往往采用单元素进行掺杂合成,例如Mg、Ti、Nb等,但往往受限于单一包覆的局限性,例如在循环过程中副反应的增加、结构的稳定性难以达到预期、因包覆导致的晶胞过生长等问题。所以在单一包覆的基础上,我们会考虑掺杂元素间的协同效应,进一步优化掺杂效果,提高磷酸钒钠的可实用性。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的在于,针对现有磷酸钒钠能量密度低和倍率性能不佳的问题,提出一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠,将镁(Mg)、钛(Ti)、铝(Al)多元素引入磷酸钒钠的晶格结构中,对磷酸钒钠进行协同改性优化,以提高其电化学性能,特别是能量密度和倍率性能,同时保持其结构稳定性和安全性,满足更广泛的应用需求。

[0004] 需要注意的是,在本发明中,除非另有规定,涉及组成限定和描述的“包括”的具体含义,既包含了开放式的“包括”、“包含”等及其类似含义,也包含了封闭式的“由…组成”、“由…构成”等及其类似含义。

[0005] 为实现上述目的,本发明采用的技术方案是:一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠,其通式为 $\text{Na}_3\text{V}_{2-x}\text{Mg}_{x/4}\text{Ti}_{x/4}\text{Al}_{x/2}(\text{PO}_4)_3$ ,其中, $0.1 \leq x \leq 0.5$ 。

[0006] 进一步地,所述镁、钛、铝的掺杂量不超过总金属离子摩尔量的10%,优选为2-4%。

[0007] 进一步地,所述镁钛铝掺杂磷酸钒钠粒径: $0.8\mu\text{m} \leq D_{50} \leq 10\mu\text{m}$ 。

[0008] 本发明的另一个目的还公开了一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠的制备方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤1、原料混合

[0010] 按照通式中元素配比分别称取钒源、磷源、钠源、镁源、钛源和铝源,混合于去离子水中,并加入还原剂混合得到混合溶液;

[0011] 步骤2、前驱体制备

[0012] 采用喷雾干燥对混合溶液进行前处理,制备得到前驱体;

[0013] 步骤3、煅烧处理

[0014] 将前驱体置于高温炉中,在惰性气氛保护下进行煅烧,煅烧使原料之间发生化学反应,形成稳定的磷酸钒钠基复合材料;先在350-500°C预烧结2-4h,保证在煅烧过程中的

还原反应,后在800-950°C煅烧6-12h;

[0015] 步骤4、后处理

[0016] 煅烧后经研磨、筛分制备得到镁钛铝掺杂磷酸钒钠。

[0017] 进一步地,步骤1所述元素配比为V:P:Na:Mg:Ti:Al=2-x:3:3:x/4:x/4:x/2,其中x取值范围为 $0.1 \leq x \leq 0.5$ 。

[0018] 进一步地,步骤1所述钒源为五氧化二钒 $V_2O_5$ 、 $NH_4VO_3$ 、 $V_2O_4$ 、 $V_2O_3$ 和 $(NH_4)_2V_6O_{16}$ 中的一种或多种,优选为五氧化二钒 $V_2O_5$ 。

[0019] 进一步地,步骤1所述磷源为磷酸二氢铵 $NH_4H_2PO_4$ 、 $H_3PO_4$ 、 $P_2O_5$ 、 $(NH_4)_3PO_4$ 和 $NH_4VPO_4$ 中的一种或多种,优选为磷酸二氢铵 $NH_4H_2PO_4$ 。

[0020] 进一步地,步骤1所述钠源为碳酸钠 $Na_2CO_3$ 、NaCl、NaOH和 $NaHCO_3$ 中的一种或多种,优选为碳酸钠 $Na_2CO_3$ 。

[0021] 进一步地,步骤1所述镁源为氧化镁 $MgO$ 、 $Mg(OH)_2$ 、 $MgCO_3$ 和 $Mg(NO_3)_2$ 中的一种或多种,优选为氧化镁 $MgO$ 。

[0022] 进一步地,步骤1所述钛源为二氧化钛 $TiO_2$ 、 $TiCl_4$ 和 $H_2TiO_3$ 中的一种或多种,优选为二氧化钛 $TiO_2$ 。

[0023] 进一步地,步骤1所述铝源为氧化铝 $Al_2O_3$ 、 $Al(OH)_3$ 、 $AlCl_3$ 和 $Al(NO_3)_3$ 中的一种或多种,优选为氧化铝 $Al_2O_3$ 。

[0024] 进一步地,步骤1所述混合溶液中固含量为35-55%。如无特殊说明本发明中,%均为质量百分含量。

[0025] 进一步地,步骤1所述还原剂为柠檬酸、抗坏血酸中的一种或多种。

[0026] 进一步地,步骤1所述还原剂的加入量为5wt%-12wt%,优选为6wt%-10wt%。

[0027] 本发明还原剂的加入既可以在溶液中起到还原性的作用,抑制钒源的氧化,促进钒源的还原,还可以起到络合剂的作用,加快溶液中前驱体的合成,促进溶液中反应的进行。

[0028] 进一步地,步骤2所述喷雾干燥条件为:喷雾进口温度180°C-220°C,出口温度80°C-120°C,流量20-40rpm,压力0.2-0.5Mpa。

[0029] 进一步地,步骤3所述惰性气氛为氮气、氩气中的一种或多种。惰性气氛能防止材料在高温下氧化,保证合成过程的顺利进行。

[0030] 进一步地,步骤3所述煅烧条件优选为:先在400-500°C预烧结3-4h,后在800-850°C煅烧8-12h。合理的煅烧条件能控制材料的结晶度和相纯度,对材料的结构和性能有重要影响。

[0031] 进一步地,步骤4所述筛分采用300目筛网。

[0032] 本发明的另一个目的还公开了一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠在钠离子电池正极材料领域的应用。

[0033] 本发明镁钛铝掺杂磷酸钒钠、其制备方法及应用,与现有技术相比较具有以下优点:

[0034] 本发明通过精确控制原料配比和合成工艺条件,将镁、钛、铝元素以原位掺杂的方式掺杂进磷酸钒钠的晶格结构中,形成具有优异电化学性能的复合材料。该复合材料不仅继承了磷酸钒钠原有的稳定性优势,还在能量密度、倍率性能和循环稳定性等方面得到了

显著提升。

[0035] Mg掺杂能够改变正极材料的晶体结构和电子性质,形成更稳定的结构。这种结构上的变化有助于减少材料在充放电过程中的体积变化,提高材料的结构稳定性。在掺杂占位位于晶体结构表面的过渡金属位时,Mg掺杂还能抑制正极材料中的不利副反应和结构相变。这些副反应和相变通常会导致材料性能的衰退和电池寿命的缩短。Mg元素的加入可以通过改变材料的微观结构和电子性质,来抑制这些有害过程的发生。

[0036] Ti掺杂能够优化正极材料的微观结构,使得钠离子在材料中的扩散更加顺畅,从而提高电池的倍率性能。同样Ti掺杂有助于抑制正极材料在充放电过程中的结构退化和副反应,从而提高电池的循环稳定性。Al掺杂可以在正极材料中引入缺陷或新的电子态,改善材料的电子导电性,有助于提高电池的倍率性能,使电池能够更快地充放电。当Al与其他元素(如Ti)共掺杂时,可以产生协同作用,进一步提升正极材料的性能。

[0037] 通过铝元素掺杂带来的协同效应,加入Mg元素和Ti元素的进行优化。Mg源加入提高了钠离子的传输间距,Ti源掺杂在Mg、Al掺杂后在内部空位缺陷的基础上优化结构稳定性,Al源有利于进一步优化材料的倍率和循环性能,通过多元素掺杂的协同效应构建的NVP具有进一步的应用价值。本发明通过多元素间的协同效应,优化晶体结构,维系晶体结构的稳定性,且提高材料的本征电导率,提高材料的充放电性能。

[0038] 综上,本发明镁钛铝掺杂磷酸钒钠在保持磷酸钒钠原有的结构稳定性和安全性的同时,具有能量密度高和倍率性能佳的优点,能满足高性能储能需求。在电动汽车、储能电网、便携式电子设备领域具有良好的应用前景和大规模推广潜力。

## 附图说明

[0039] 图1为实例1镁钛铝掺杂磷酸钒钠的XRD图谱。

[0040] 图2为实例1镁钛铝掺杂磷酸钒钠扫描电子显微镜(SEM)图像一。

[0041] 图3为实例1镁钛铝掺杂磷酸钒钠扫描电子显微镜(SEM)图像二。

## 具体实施方式

[0042] 以下,结合实施例对本发明进一步说明。以下所记载的技术特征的说明基于本发明的代表性的实施方案、具体例子而进行,但本发明不限于这些实施方案、具体例子。需要说明的是:

[0043] 如无特殊声明,本说明书中所使用的单位均为国际标准单位,并且本发明中出现的数值,数值范围,均应当理解为包含了工业生产中所不可避免的系统性误差。

[0044] 本说明书中,使用“数值A~数值B”表示的数值范围是指包含端点数值A、B的范围。

[0045] 本说明书中,使用“以上”或“以下”表示的数值范围是指包含本数的数值范围。

[0046] 本说明书中,使用“可以”表示的含义包括了进行某种处理以及不进行某种处理两方面的含义。

[0047] 本说明书中,使用“任选”或“任选的”表示某些物质、组分、执行步骤、施加条件等因素使用或者不使用。

[0048] 本说明书中,使用“常温”、“室温”时,其温度可以是15-25℃。

[0049] 本说明书中,所用试剂或仪器未注明生产厂商者,均为可以通过市购获得的常规

产品。

[0050] 如无特殊说明,本说明书中%均为质量百分含量。

[0051] 实施例1

[0052] 本实施例公开了一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠,其制备方法如下:

[0053] 步骤1、原料混合:按摩尔比V:P:Na:Mg:Ti:Al=1.94:3:3:0.015:0.015:0.03,称取五氧化二钒 $V_2O_5$ 、磷酸二氢铵 $NH_4H_2PO_4$ 、碳酸钠 $Na_2CO_3$ 、氧化镁MgO、二氧化钛 $TiO_2$ 和氧化铝 $Al_2O_3$ 作为原料,将原料混合于去离子水中(固含量40wt%),加入8wt%的柠檬酸作为还原剂,并在80°C下搅拌均匀。

[0054] 步骤2、前驱体制备:随后将溶液行喷雾干燥,进口温度200°C,出口温度80°C,流量20rpm,压力0.3Mpa,以形成磷酸钒钠的前驱体。

[0055] 步骤3、煅烧处理:将前驱体粉末置于马弗炉中,在氮气保护下,以5°C/min的升温速率升至450°C,并保持此温度煅烧4小时,确保前驱体充分进行还原,后以5°C/min升温至800°C,并保持12h。确保原料充分反应并形成稳定的磷酸钒钠基复合材料。

[0056] 步骤4、后处理:将煅烧后的产物自然冷却至室温,随后进行研磨和300目筛网过筛处理,得到粒径均匀的镁钛铝掺杂磷酸钒钠。

[0057] 实施例2

[0058] 本实施例公开了一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠,其制备方法如下:

[0059] 步骤1、原料混合:按照摩尔比V:P:Na:Mg:Ti:Al=1.9:3:3:0.025:0.025:0.05,称取五氧化二钒 $V_2O_5$ 、磷酸二氢铵 $NH_4H_2PO_4$ 、碳酸钠 $Na_2CO_3$ 、氧化镁MgO、二氧化钛 $TiO_2$ 和氧化铝 $Al_2O_3$ 作为原料,将原料混合于去离子水中(固含量40wt%),加入8wt%的柠檬酸作为还原剂,并在80°C下搅拌均匀。

[0060] 步骤2、前驱体制备:随后将溶液行喷雾干燥,进口温度200°C,出口温度80°C,流量20rpm,压力0.3Mpa,以形成磷酸钒钠的前驱体。

[0061] 步骤3、煅烧处理:将前驱体粉末置于马弗炉中,在氮气保护下,以5°C/min的升温速率升至450°C,并保持此温度煅烧4小时,确保前驱体充分进行还原,后以5°C/min升温至800°C,并保持12h。确保原料充分反应并形成稳定的磷酸钒钠基复合材料。

[0062] 步骤4、后处理:将煅烧后的产物自然冷却至室温,随后进行研磨和300目筛网过筛处理,得到粒径均匀的镁钛铝掺杂磷酸钒钠。

[0063] 实施例3

[0064] 本实施例公开了一种镁钛铝掺杂磷酸钒钠,其制备方法如下:

[0065] 步骤1、原料混合:按照摩尔比V:P:Na:Mg:Ti:Al=1.88:3:3:0.03:0.03:0.06,称取五氧化二钒 $V_2O_5$ 、磷酸二氢铵 $NH_4H_2PO_4$ 、碳酸钠 $Na_2CO_3$ 、氧化镁MgO、二氧化钛 $TiO_2$ 和氧化铝 $Al_2O_3$ 作为原料,将原料混合于去离子水中(固含量40wt%),加入8wt%的柠檬酸作为还原剂,并在80°C下搅拌均匀。

[0066] 步骤2、前驱体制备:随后将溶液行喷雾干燥,进口温度200°C,出口温度80°C,流量20rpm,压力0.3Mpa,以形成磷酸钒钠的前驱体。

[0067] 步骤3、煅烧处理:将前驱体粉末置于马弗炉中,在氮气保护下,以5°C/min的升温速率升至450°C,并保持此温度煅烧4小时,确保前驱体充分进行还原,后以5°C/min升温至800°C,并保持12h。确保原料充分反应并形成稳定的磷酸钒钠基复合材料。

[0068] 步骤4、后处理:将煅烧后的产物自然冷却至室温,随后进行研磨和300目筛网过筛处理,得到粒径均匀的镁钛铝掺杂磷酸钒钠。

[0069] 对照例1

[0070] 本对照例公开了一种磷酸钒钠,其制备方法如下:

[0071] 原料配比:按照摩尔比V:P:Na=2:3:3,称取五氧化二钒 $V_2O_5$ 、磷酸二氢铵 $NH_4H_2PO_4$ 、碳酸钠( $Na_2CO_3$ )作为原料。

[0072] 前驱体制备:将称取的原料混合于去离子水中,加入8wt%的柠檬酸作为还原剂,并在80°C下搅拌均匀。随后将溶胶进行喷雾干燥,进口温度200°C,出口温度80°C,流量20rpm,压力0.3Mpa。以形成磷酸钒钠的前驱体。

[0073] 煅烧处理:将前驱体粉末置于马弗炉中,在氮气保护下,以5°C/min的升温速率升至450°C,并保持此温度煅烧4小时,确保前驱体充分进行还原,后以5°C/min升温至800°C,并保持12h。确保原料充分反应并形成稳定的磷酸钒钠基复合材料。

[0074] 后处理:将煅烧后的产物自然冷却至室温,随后进行研磨和300目筛网过筛处理,得到粒径均匀的镁钛铝多元素掺杂磷酸钒钠材料。

[0075] 对照例2(单元素元素掺杂实验)

[0076] 本对照例公开了一种镁掺杂磷酸钒钠,其制备方法如下:

[0077] 步骤1、原料混合:按照摩尔比V:P:Na:Mg=1.9:3:3:0.1,称取五氧化二钒 $V_2O_5$ 、磷酸二氢铵 $NH_4H_2PO_4$ 、碳酸钠 $Na_2CO_3$ 、氧化镁MgO/二氧化钛 $TiO_2$ /氧化铝 $Al_2O_3$ 作为原料。将原料混合于去离子水中,加入8wt%的柠檬酸作为还原剂,并在80°C下搅拌均匀。

[0078] 步骤2、前驱体制备:随后将溶液进行喷雾干燥,进口温度200°C,出口温度80°C,流量20rpm,压力0.3Mpa,以形成磷酸钒钠的前驱体。

[0079] 步骤3、煅烧处理:将前驱体粉末置于马弗炉中,在氮气保护下,以5°C/min的升温速率升至450°C,并保持此温度煅烧4小时,确保前驱体充分进行还原,后以5°C/min升温至800°C,并保持12h。确保原料充分反应并形成稳定的磷酸钒钠基复合材料。

[0080] 后处理:将煅烧后的产物自然冷却至室温,随后进行研磨和300目筛网过筛处理,得到粒径均匀的镁/钛/铝单元素掺杂磷酸钒钠材料。

[0081] 对照例3(双元素协同掺杂实验)

[0082] 本实施例公开了一种镁钛掺杂磷酸钒钠,其制备方法如下:

[0083] 步骤1、原料混合:按照摩尔比V:P:Na:Mg:Ti=1.9:3:3:0.05:0.05,称取五氧化二钒 $V_2O_5$ 、磷酸二氢铵 $NH_4H_2PO_4$ 、碳酸钠 $Na_2CO_3$ 、氧化镁MgO、二氧化钛 $TiO_2$ 和氧化铝 $Al_2O_3$ 作为原料。将原料混合于去离子水中,加入8wt%的柠檬酸作为还原剂,并在80°C下搅拌均匀。

[0084] 步骤2、前驱体制备:随后将溶液进行喷雾干燥,进口温度200°C,出口温度80°C,流量20rpm,压力0.3Mpa。以形成磷酸钒钠的前驱体。

[0085] 步骤3、煅烧处理:将前驱体粉末置于马弗炉中,在氮气保护下,以5°C/min的升温速率升至450°C,并保持此温度煅烧4小时,确保前驱体充分进行还原,后以5°C/min升温至800°C,并保持12h。确保原料充分反应并形成稳定的磷酸钒钠基复合材料。

[0086] 步骤4、后处理:将煅烧后的产物自然冷却至室温,随后进行研磨和300目筛网过筛处理,得到粒径均匀的(镁钛/镁铝/钛铝)元素掺杂磷酸钒钠材料。

[0087] 分别对实施例1-3的镁钛铝掺杂磷酸钒钠和对比例1-3的磷酸钒钠进行电化学性

能测试,包括循环伏安测试、充放电测试、倍率性能测试等,以评估其能量密度、倍率性能和循环稳定性。同时,通过X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)等手段对材料的结构和形貌进行表征。

[0088] 测试结果如下:

[0089] 循环稳定性:将实施例1合成的镁钛铝掺杂磷酸钒钠组装成钠离子电池正极,进行充放电循环测试。在0.1C倍率下,初始放电比容量为112.24mAh/g,经过200次循环后,容量保持率为95%,展现出优异的循环稳定性。

[0090] 能量密度:相比对比例1未掺杂的磷酸钒钠材料,本实施例1合成的镁钛铝掺杂磷酸钒钠在相同测试条件下,能量密度提升了约3.5%,达到了更高的储能水平。

[0091] 倍率性能:在1C、2C、5C等不同倍率下进行充放电测试,结果显示实施例1镁钛铝掺杂磷酸钒钠在高倍率下仍能保持良好的放电性能,特别是在5C倍率下,放电比容量仍保持在初始值的90.77%以上,展现出优异的倍率性能。

[0092] 图1为实例1镁钛铝掺杂磷酸钒钠的XRD图谱,展示其晶体结构特征。展示了镁钛铝多元素掺杂磷酸钒钠材料的晶体结构,通过对比标准图谱,确认了材料的物相纯度。由图可见经过镁钛铝多元素掺杂后的磷酸钒钠的相对衍射峰的强度与位置基本保持一致,可见经过多元素掺杂后的样品并未改变材料的相纯度,保持着良好的晶体结构。

[0093] 图2为实例1镁钛铝掺杂磷酸钒钠扫描电子显微镜(SEM)图像一,图3为实例1镁钛铝掺杂磷酸钒钠扫描电子显微镜(SEM)图像二。扫描电镜展示了镁钛铝多元素掺杂的磷酸钒钠经过喷雾构造了良好的球形度,可见经过掺杂后的样品颗粒分布均匀,且具有良好的粒度。良好的一致性有利于电化学性能的提升,且掺杂后的样品的碳包覆效果更好,让材料具有优异的粉末电阻率。

[0094] 表1充放电循环表格

电池名称(采取3组电池数据取平均值)	首效	0.1C 放电比容量 mAh/g	0.2C 放电比容量 mAh/g	5C 放电比容量 mAh/g	5C200 圈后放电比容量 mAh/g
实施例 1	97.40	112.24	110.5	102.04	100.99
实施例 2	96.88	110.52	109.10	100.43	98.55
实施例 3	96.90	107.40	106.67	99.43	96.85
对照例 1	96.46	108.22	107.48	98.75	95.36
对照例 2	96.78	108.54	108.17	98.71	95.98
对照例 3	96.85	109.46	108.53	99.67	97.20

[0096] 表1充放电循环表格,直观展示了材料在循环测试中的容量保持情况。

[0097] 根据充放电表格可知,经过多元素掺杂的镁钛铝掺杂磷酸钒钠相较于未掺杂的磷酸钒钠无论从首效、以及大倍率下的容量保持率均有所提升。但值得注意的是,随着多元素掺杂的含量不断提升,由钒氧化还原所提供的活性物质的量也在逐步下降,这导致了活性钠所提供的放电比容量有所下降。所以在进行多元素掺杂磷酸钒钠的相关实验中,应注意掺杂元素的含量,避免因过量引发的材料比容量的降低。

[0098] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

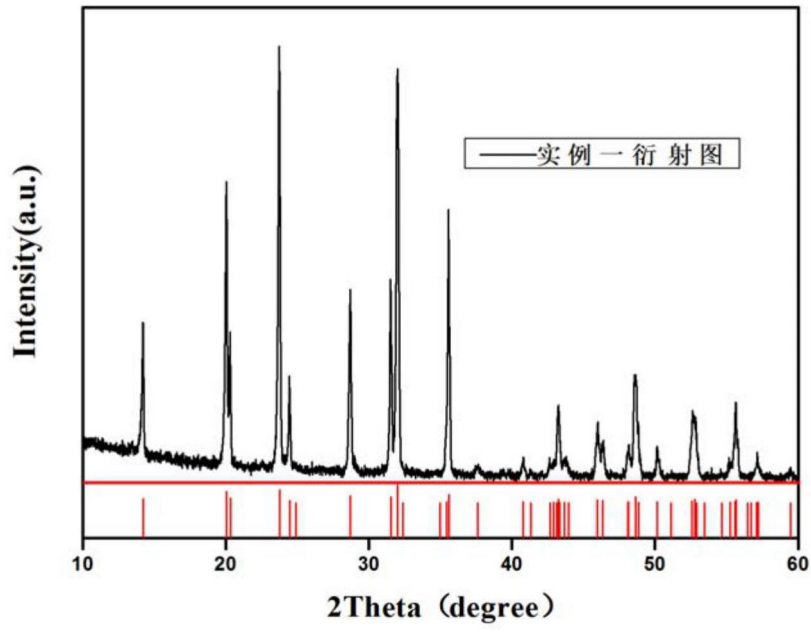


图1

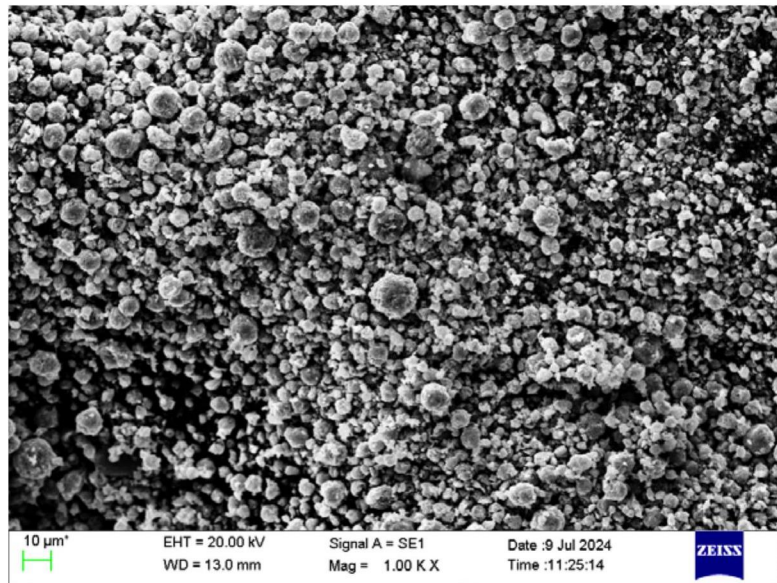


图2

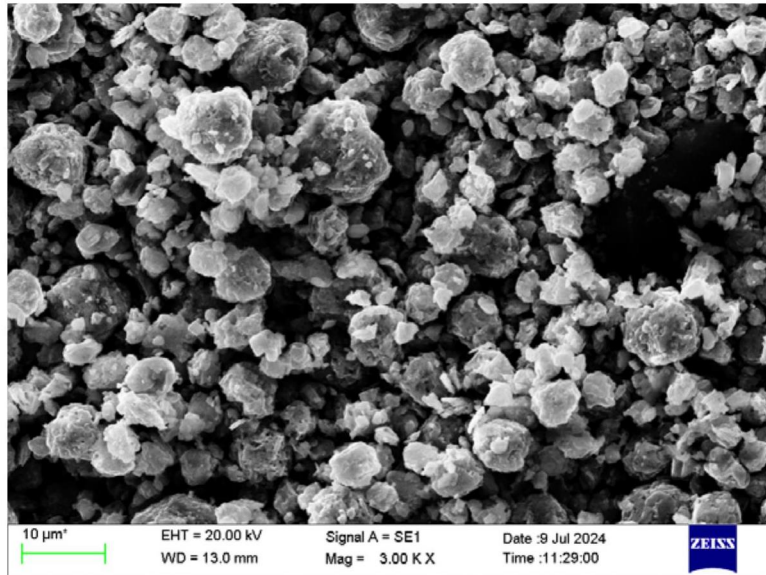


图3