



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110945709 B

(45) 授权公告日 2023.08.15

(21) 申请号 201880048887.8

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

72002

专利代理人 蔡洪贵

(22) 申请日 2018.05.30

(51) Int.CI.

H01M 10/42 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

H01M 10/48 (2006.01)

申请公布号 CN 110945709 A

H01M 10/0525 (2010.01)

(43) 申请公布日 2020.03.31

G01N 29/00 (2006.01)

(30) 优先权数据

G01N 19/00 (2006.01)

62/512,616 2017.05.30 US

G01N 23/20 (2018.01)

62/634,098 2018.02.22 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

(56) 对比文件

2020.01.21

US 2007292760 A1, 2007.12.20

(86) PCT国际申请的申请数据

US 2013335094 A1, 2013.12.19

PCT/US2018/035039 2018.05.30

WO 2015023820 A2, 2015.02.19

(87) PCT国际申请的公布数据

CN 103187595 A, 2013.07.03

W02018/222658 EN 2018.12.06

JP 2012257367 A, 2012.12.27

(73) 专利权人 泰坦先进能源解决方案公司

JP 2017033825 A, 2017.02.09

地址 美国马萨诸塞

CN 103203550 A, 2013.07.17

(72) 发明人 S·墨菲 A·斯里达尔

US 2017005497 A1, 2017.01.05

V·Y-H·李 S·阿夫里克

审查员 熊跃

权利要求书3页 说明书31页 附图13页

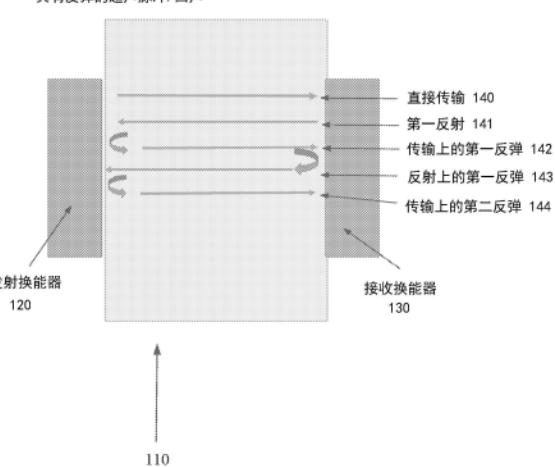
## (54) 发明名称

电池寿命估计和容量恢复

## (57) 摘要

本文描述了用于确定锂离子电池的SoC和SoH以及恢复锂离子电池的容量的方法和装置。一些实施例提供了包括被设计成测量锂离子电池的特性以便确定所述锂离子电池的SoC和SoH以及破坏锂离子电池内的SSEI层的超声换能器的方法和装置。还描述了用于确定SoC和SoH以及破坏SSEI层的几种其它方法。使用这些方法和装置可有利于估计锂离子电池的状态,以及恢复锂离子电池并增加其寿命。

100



1. 一种用于恢复锂离子电池的容量的装置,所述装置包括:

至少一个超声换能器,其相对于所述锂离子电池的一端布置且被配置成发射平行于所述锂离子电池的阳极和阴极的表面的第一超声,从而引起位于所述阳极和所述阴极之间的通道内的电解质远离所述至少一个超声换能器的流动,

其中,所述电解质的流动生成非侵入式地破坏所述锂离子电池的至少一个二次固体电解质中间相(SSEI)层的表面剪切力。

2. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述装置还包括控制器,所述控制器被联接到所述至少一个超声换能器,所述控制器被配置成控制所述至少一个超声换能器,从而在所述锂离子电池没有充电或放电时发射所述第一超声。

3. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述第一超声的至少一个频率等于所述至少一个 SSEI 层的分子键的共振频率。

4. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述第一超声被设计成在所述至少一个 SSEI 层的表面或内部引起气蚀。

5. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述第一超声被设计成激励所述锂离子电池的至少一个电解质中的一个或多个结构共振。

6. 根据权利要求1所述的装置,其中:

所述至少一个超声换能器包括声透镜,所述声透镜被配置成对来自所述至少一个超声换能器的超声进行聚焦;或者

所述至少一个超声换能器是至少一个凹形超声换能器。

7. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述装置还包括:

至少一个接收超声换能器,其被配置成接收和测量从所述锂离子电池反射的或穿过所述锂离子电池发射的第二超声;和

控制器,其被联接到所述至少一个超声换能器和所述至少一个接收超声换能器,

其中,所述控制器被配置成:

基于测量到的所述第二超声来确定所述锂离子电池的荷电状态的值和健康状态的值;

基于确定的所述荷电状态的值和所述健康状态的值来确定所述至少一个 SSEI 层的厚度。

8. 根据权利要求7所述的装置,其中,所述控制器还被配置成在所述至少一个接收超声换能器接收所述第二超声之前使所述锂离子电池循环通过一个充电/放电循环。

9. 根据权利要求1所述的装置,其中:

所述至少一个超声换能器被配置成:

在第一操作模式下,生成所述第一超声,所述第一超声引起所述电解质的流动,所述电解质的流动生成破坏所述至少一个 SSEI 层的所述表面剪切力,所述第一超声具有第一能量;以及

在第二操作模式下,生成具有第二能量的第二超声并检测来自所述锂离子电池的所述第二超声的反射,所述第二能量小于所述第一能量;以及

所述装置还包括控制器,所述控制器被配置成:

在所述第二操作模式期间基于由所述至少一个超声换能器检测到的所述第二超声来确定所述锂离子电池的荷电状态的值和健康状态的值;以及

基于确定的所述荷电状态的值和所述健康状态的值来确定所述SSEI层的厚度。

10. 根据权利要求9所述的装置,其中,所述控制器还被配置成在生成所述第二超声之前使所述锂离子电池循环通过一个充电/放电循环。

11. 根据权利要求1所述的装置,其中,所述至少一个超声换能器被配置成发射所述第一超声,从而在所述锂离子电池内生成高速声流。

12. 根据权利要求1所述的装置,其中,由于电解质解离和杂质,所述SSEI层被形成在所述锂离子电池内的所述阳极的表面上、固体电解质中间相(SEI)层上或阳极颗粒上。

13. 一种用于恢复锂离子电池的容量的方法,所述方法包括:

经由相对于所述锂离子电池的一端布置的至少一个超声换能器发射平行于所述锂离子电池的阳极和阴极的表面的第一超声,从而引起位于所述阳极和所述阴极之间的通道内的电解质远离所述至少一个超声换能器的流动,

其中,所述电解质的流动生成破坏所述锂离子电池的至少一个二次固体电解质中间相(SSEI)层的表面剪切力。

14. 根据权利要求13所述的方法,其中,在所述锂离子电池没有充电或放电时发射所述第一超声。

15. 根据权利要求13所述的方法,其中,所述第一超声的至少一个频率激励所述至少一个SSEI层的至少一个分子键的共振频率,使得通过激励使所述至少一个分子键破裂。

16. 根据权利要求13所述的方法,其中,所述第一超声引起所述至少一个SSEI层的表面或内部的气蚀。

17. 根据权利要求13所述的方法,其中,所述第一超声的至少一个频率激励所述锂离子电池的至少一个电极的一个或多个结构共振。

18. 根据权利要求13所述的方法,其中:

所述至少一个超声换能器包括声透镜,所述声透镜被配置成对来自所述至少一个超声换能器的超声进行聚焦;或者

所述至少一个超声换能器是至少一个凹形超声换能器。

19. 根据权利要求13所述的方法,其中所述方法还包括在发射所述第一超声之前:

经由至少一个接收超声换能器测量从所述锂离子电池反射的或通过所述锂离子电池发射的第二超声;

基于测量到的所述第二超声来确定所述锂离子电池的荷电状态的值和健康状态的值;以及

基于确定的所述荷电状态的值和所述健康状态的值来确定所述至少一个SSEI层的厚度。

20. 根据权利要求19所述的方法,其中,所述方法还包括在测量所述第二超声之前:使所述锂离子电池循环通过一个充电/放电循环。

21. 根据权利要求13所述的方法,其中,所述方法还包括在发射所述第一超声之前:经由所述至少一个超声换能器生成具有第二能量的第二超声;

经由所述至少一个超声换能器检测来自所述锂离子电池的所述第二超声的反射;

基于检测到的所述第二超声来确定所述锂离子电池的荷电状态的值和健康状态的值;以及

基于确定的所述荷电状态的值和所述健康状态的值来确定所述至少一个SSEI层的厚度，

其中,所述第二能量小于在发射期间所述第一超声的第一能量。

22.根据权利要求21所述的方法,其中,所述方法还包括在生成所述第二超声之前:使所述锂离子电池循环通过一个充电/放电循环。

23.根据权利要求13所述的方法,其中,发射所述第一超声在所述锂离子电池内生成高速声流。

24.根据权利要求13所述的方法,其中,由于电解质解离或杂质,所述至少一个SSEI层被形成在所述锂离子电池内的固体电解质中间相(SEI)层上或阳极颗粒上。

25.根据权利要求13所述的方法,其中,所述SSEI层被形成在所述阳极的表面上。

## 电池寿命估计和容量恢复

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2017年5月30日提交的序列号为65/512,616的美国临时专利申请和2018年2月22日提交的序列号为62/634,098的美国临时专利申请的优先权，两者的公开内容在此都通过引用以其整体并入。

[0003] 技术领域和背景技术

[0004] 可充电电池有多种化学成分，其中最主要的一种是锂离子电池系统。锂离子电池已经在便携式电子设备（手机、笔记本电脑、相机等）、电动车辆中得到了广泛应用，近年来，锂离子电池已作为电网级储存和备用电池。锂离子电池具有高体积和重量能量密度、高倍率性能、低日历老化、热稳定性以及成本下降。

### 发明内容

[0005] 在一个实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的荷电状态（SoC）和健康状态（SoH）的方法和装置，包括至少一个超声或音频换能器，其被配置成测量锂离子电池的物理特性和化学特性。

[0006] 在另一实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法和装置，包括至少一个加速度计、应变仪和/或电光传感器，其被配置成测量锂离子电池的响应于刺激的运动。

[0007] 在另一实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法和装置，包括使用声学和/或振动传感器来测量对声学刺激、透射声波和/或反射声波的表面响应。

[0008] 在另一实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法和装置，包括至少一个振荡器（shaker）和被配置成测量由于振荡器而引起的锂离子电池的运动的至少一个加速度计。

[0009] 在另一实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法和装置，包括测量锂离子电池的弯曲模量。

[0010] 在另一实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法和装置，包括测量锂离子电池的压缩模量。

[0011] 在另一实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法和装置，包括测量锂离子电池的厚度。

[0012] 在另一实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法和装置，包括利用硬度计测量设备来测量锂离子电池的表面的凹痕。

[0013] 在另一实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法和装置，包括测量锂离子电池的有效密度。

[0014] 在另一实施例中，提供了一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法和装置，包括测量发射到锂离子电池中的X射线的吸收和透射光谱。

[0015] 在另一实施例中，提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置，包括至少一个超声换能器，其被配置成以共振频率将至少一个超声波发射到锂离子电池中以破

坏SSEI层。该至少一个超声波可以被发射到锂离子电池的阳极/阴极或锂离子电池的SSEI层。

[0016] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括引入高强度超声以在锂离子电池中引起气蚀从而破坏SSEI层。

[0017] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括引入高强度超声以激励锂离子电池的各种共振结构,以在阳极/阴极中引起强烈的机械响应从而破坏SSEI层。

[0018] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括超声换能器的至少一个相控阵列,其被配置成发射超声波以在锂离子电池中相长地干涉从而破坏SSEI层。

[0019] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括用X射线照射SSEI层,其中X射线的能量被吸收到SSEI层中的有机材料的键中。

[0020] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括交流电源,该交流电源被配置成向锂离子电池供应交流电流以破坏SSEI层。

[0021] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括被配置成产生低阻抗条件的电路,类似于使锂离子电池受控短路以破坏SSEI层。

[0022] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括摇动件,其被配置成使锂离子电池绕枢轴点摇动以产生挤压膜从而破坏SSEI层。

[0023] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括产生离心运动引起的表面剪切应力,以便破坏SSEI层。

[0024] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括至少一个超声换能器,其被配置成在锂离子电池的阳极和阴极之间产生高速声流,以便破坏SSEI层。

[0025] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括控制电池的环境以便影响和破坏SSEI层的键。

[0026] 在另一实施例中,提供了一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的方法和装置,包括利用脉冲力(例如,热、机械和/或电)以便破坏SSEI层。

[0027] 在另一实施例中,提供了一种用于处理锂离子电池的方法和装置,其中处理锂离子电池包括确定锂离子电池的SoC和SoH以及破坏锂离子电池的SSEI层。

## 附图说明

[0028] 图1示出了其中使用超声换能器以确定锂离子电池的SoC和SoH的系统的实施例。

[0029] 图2示出了其中使用加速度计和应变仪测量电池的各种运动,以便确定锂离子电池的SoC和SoH的系统的实施例。

[0030] 图3示出了其中可以利用声照射来确定锂离子电池的SoC和SoH的系统的实施例。

[0031] 图4示出了其中可以利用振荡器来确定锂离子电池的SoC和SoH的系统的实施例。

[0032] 图5示出了其中可以测量弯曲模量以确定锂离子电池的SoC和SoH的系统的实施例。

[0033] 图6示出了其中可以测量压缩模量以确定锂离子电池的SoC和SoH的系统的实施

例。

[0034] 图7示出了其中可以测量锂离子电池的表面的静态模量以确定其SoC和SoH的系统的实施例。

[0035] 图8示出了其中可以测量锂离子电池的密度以确定其SoC和SoH的系统的实施例。

[0036] 图9示出了其中利用X射线来确定锂离子电池的SoC和SoH的系统的实施例。

[0037] 图10示出了其中可以利用高能超声来破坏锂离子电池的SSEI层的系统的实施例。

[0038] 图11示出了其中可以利用高能超声来引起气蚀以便破坏锂离子电池的SSEI层的系统的实施例。

[0039] 图12示出了其中可以将高能超声对准锂离子电池的结构以便破坏SSEI层的系统。

[0040] 图13示出了其中可以利用相控阵列超声来破坏锂离子电池的SSEI层的系统的实施例。

[0041] 图14示出了其中可以利用X射线来破坏锂离子电池的SSEI层的系统的实施例。

[0042] 图15示出了其中可以利用交流电来破坏锂离子电池的SSEI层的系统的实施例。

[0043] 图16示出了其中可以利用受控短路来破坏锂离子电池的SSEI层的系统的实施例。

[0044] 图17示出了其中可以利用挤压膜来破坏锂离子电池的SSEI层的系统的实施例。

[0045] 图18示出了其中可以利用离心运动引起的表面剪切旋转来破坏锂离子电池的SSEI层的系统的实施例。

[0046] 图19示出了其中可以利用高能超声来产生高速声流以便破坏锂离子电池的SSEI层的系统的实施例。

[0047] 图20示出了用于处理锂离子电池的示例过程的过程流程。

[0048] 图21示出了其中可以实现用于使用超声来处理锂离子电池的方法的系统的实施例。

[0049] 图22示出了在用于处理锂离子电池的系统中用于接收和分析信号的计算设备的实施例。

## 具体实施方式

[0050] 随着对数字和可再生技术取代碳基和模拟/机械/手动技术的需求,对电子能量存储(固定和便携)的依赖已成为现代世界运行的首要条件。在过去八十年中,电子能量存储已用于混合系统,但在最近十年中,它已发展成为所有能量存储的主要系统。这种发展是由移动设备(例如手机和笔记本电脑)的迅速出现和采用所带动的,现在电子能量存储继续发展到运输和工业行业。从技术上讲,这种转变是通过组件成本降低和锂离子电池的高能量密度,尤其是通过NMC(LiNiMnCo)结构实现的。随着运输和工业存储行业转向可再生系统,以受益于高体积和重量能量密度、高倍率性能、低日历老化、热稳定性以及成本下降,对锂离子电池的依赖变得至关重要。锂离子电池有几种化学成分,但主要化学成分基于NMC架构。这种架构的好处是要付出代价的,主要是因为正常使用后容量会下降,因而使电池成为易耗品。所有锂离子电池系统以及所有电池系统的另一个固有问题在于,确定真实准确的荷电状态(作为电池当前全部容量的一部分存储的瞬时电量,SoC)和健康状态(作为其原始容量循环寿命的一部分的剩余的电池当前容量。SoH与报废估计有关)很昂贵且困难。锂离子电池系统的这两个缺点减慢了锂离子电池作为能量存储系统的普遍和大规模采用。锂离

子电池运行的一些限制如下：

- [0051] a). 在正常运行期间可能没有经济可行的措施来准确估计SoH或SoC;
- [0052] b). 当前估计报废容量的措施可能既昂贵又麻烦;
- [0053] c). 由于常规电池管理系统(BMS)中的不准确性,可能会对电池运行范围实施过于保守的限制以防止过充和充电不足,所以用户只能使用电池总容量的60-70%;
- [0054] d). 大型电池场可能需要高水平的精度和控制(在模块和电池单元层级),以便使电压和容量不匹配的单元组成的整个系统均匀地老化。

[0055] 电池系统的日常运行需要准确、实时了解SoC,才能在整个充电范围内最大化系统容量。当前的BMS不准确,并且结合了经验估计(称为库仑计数)以及电阻和温度测量的组合。由于这种不准确性(约4%),当前BMS将电池的工作范围限制在总容量的较小部分,通常是实际范围的60-70%。专门设计这种限制以避免安全极限状态,因为安全极限状态可能会以各种方式导致电池损坏。

[0056] 通过SoH对确定电池剩余容量的报废估计进行量化。传统的SoH确定过程很昂贵(高端电子设备),并且非常耗时(8-12小时)。因而,许多电池被丢弃和回收利用,而不是被重新利用以获取其剩余的经济价值。

[0057] 锂离子电池由称为间隙化合物的化学化合物制成。电池的阴极可以是但不限于过渡金属氧化物(例如,镍锰钴氧化物、锂锰氧化物和磷酸铁锂)。电池的阳极可以是但不限于单层石墨(石墨烯)。

[0058] 在正常运行条件下,锂离子电池可能会在许多运行循环中以不同的速率退化。这可能是由于环境条件、制造不规则性、电池用户使用的可变性以及其它条件所致。因而,由于没有两个电池完全相同,因此难以准确地确定电池的真实状态。当前的电池管理系统无法应对这些变化,再加上测量不准确性,所以在测量电池状态时会继续累积并增加误差。

[0059] 准确评估锂离子电池状态的能力对于预测电池的性能和退化以及最终延长电池的使用寿命非常重要。电池性能可以用两个性能度量来描述:荷电状态(SoC)和健康状态(SoH)。

[0060] SoC可被定义在当前的电池循环中存储的瞬时电量与当前循环的总可用容量之比。例如,在放电循环期间:

$$[0061] SoC = 1 - \int \frac{idt}{C_n}$$

[0062] 其中为i(t)为随时间变化的瞬时放电电流,C<sub>n</sub>为当前循环的总可用容量。可从放电循环开始到当前时间进行积分。可替选地,作为代替,可使用电池的额定容量(工厂原始容量)作为C<sub>n</sub>,因为当前容量可能未知。额定容量由制造商给出,并且表示能够存储在电池中的最大电量。因而,电池的SoH(t)可被定义为时间t时的其当前总容量或Q(t)与额定工厂原始容量Q<sub>n</sub>之比:

$$[0063] SoH(t) = \frac{Q(t)}{Q_n}$$

[0064] 电池的SoH也可被定义为电池的当前循环的总可用容量与电池的初始循环的总可用容量之比。

[0065] 按常规,电池的SoC和SoH是通过基于实验室的电池单元循环建立的经验关系来确

定的。这些关系可能无法应对环境条件和/或使用特性。这些经验关系是BMS系统的基础。由于它们可能不是对实际用例的准确预测,因此BMS系统往往随着时间的推移而变得不准确。例如,SoH测量的不确定性可能高达40%。另一方面,如本文所述,机械、化学和/或物理性质的测量值可能与SoC和SoH相关联,因而提供对电池的SoC和SoH的快速且准确的测量。

[0066] 常规SoC和SoH测量的这种不准确性和不精确性迫使当前系统对电池使用施加过分保守的限制,以防止损坏电池。为此,允许电池运行的范围可能被限制,以避免使用范围的极端,因为常规方法不够精确,无法确定电池与其它安全方案的外边界有多接近。对电池的SoC和SoH的了解对于当前所有电池供电的电子系统都是必不可少的,因为这两个参数定义了整个系统的运行边界。发明人已经认识到并明白需要一种用于准确确定电池的SoC和SoH的非侵入式方法,因为这可以通过允许用户利用电池的全部范围和潜力来实现电池的最佳使用。

[0067] 在一些实施例中,至少一个超声换能器可用于测量穿过电池的超声信号(例如,短脉冲)的发射和/或来自电池的能量反射。这些信号的属性包含可允许测量电池的化学和机械状态的信息,这些信息可用于确定电池的SoC和SoH。使用至少第一超声换能器以特定的超声频率(例如,1MHz或更小,但是应明白,可以利用任何超声频率)向电池内发起信号,并且由至少第二换能器(针对穿透发射,在电池的另一侧,或者针对从电池结构反射的波和/或其边界或表面波,在电池的同一侧)和在第一换能器(用于反射)处接收的信号的测量值可提供四种一般类型的数据:(1)在第一换能器和第二换能器之间、或者在离开第一换能器和返回第一换能器(用于反射信号)之间的信号的飞行时间(TOF);(2)作为超声信号沿各种路径传播而引起的振幅和/或信号特征的变化(例如,波形形状);(3)所接收的信号相对于原始发射信号的相位变化。这四个数据区域中的每个区域都可能是由于电池内的化学和/或机械变化引起的。

[0068] 这些测量值可以单独或组合地提供确定电池状态变化所需的信息,诸如与离子向阳极传输有关的化学变化,其中这些量可以是例如密度、体积、剪切力和相关模量,和/或超声波或声(音频)波的波速的函数。这些量可以是施加到换能器的温度和压力的函数。这些测量值可以快速确定电池的SoC和SoH。单个或多个换能器和频率可以以短纯音或更多宽带信号的形式使用,例如啁啾(chirp)。在几个电池或同一电池上随时间推移对这些量的重复测量可用于创建参考数据集和/或在这些测量值与SoC和SoH之间建立定量的分析函数相关性。参考数据集和/或定量分析函数相关性可用于从将来的测量值中得出SoC和SoH。

[0069] 在发射的超声脉冲中具有足够的能量,除了穿透发射和反射的信号之外,还能够捕捉更高阶的信号(即反弹)。例如,当使用电池相反两侧的两个换能器时,“第一”反弹包括从第一换能器跨电池发射、跨电池从第二换能器反射回第一换能器、从第一换能器反射回并且被第二换能器接收的信号。该信号将横跨电池三次。两个超声换能器都能够观察到更高阶的反弹。这些信号将多次穿过电池,并且可能比直接信号更强烈地被这些穿过修改,并且可能包含有关电池状态的更多信息。

[0070] 例如,图1示出了其中使用超声换能器以确定锂离子电池的SoC和SoH的系统100的实施例。系统100可至少包括电池110、发射换能器120和接收换能器130。发射换能器120可被配置成向电池110发射至少一个超声波,例如直接发射波140。接收换能器130可以被配置成接收和测量直接发射波140。电池可以反射由发射换能器120发射的超声波。反射波可以

是例如第一反射波141，并且发射换能器120可以配置成接收和测量第一反射波141。超声波可以继续穿过电池并被电池反射，并且至少存在发射波上的第一反弹142、反射波上的第一反弹143以及发射波上的第二反弹144，以及进一步的反弹。发射换能器120和接收换能器130可被配置成接收和测量这些波。如上文讨论的，各种波(例如，直接发射波140、第一反射波141、发射波上的第一反弹142、反射波上的第一反弹143以及发射波上的第二反弹144)可能已经通过穿过电池不同的次数而被唯一地修改。通过测量这些波，可以确定电池110的SoC和SoH。

[0071] 在另一实施例中，可以使用至少一个加速度计和/或至少一个应变仪来测量由外部机械源引起的振动、加速度和任何其它运动，以便确定电池的SoC和SoH。加速度计可以被设计成在各种条件下操作并测量很大范围的加速度，从非常低的加速度(例如，毫微(nano)G)到非常高的加速度(例如，50K G)。在这样的实施例中，至少一个加速度计和/或至少一个应变仪或电光传感器(例如，激光多普勒测速仪或光纤干涉加速度计)可用于测量对电池上的经校准的力输入的振动响应，例如仪器化落锤。

[0072] 可以处理电池的机械特性以提供有关电池的SoC和SoH的信息。这些机械特性可以通过使用至少一个加速度计、至少一个应变仪和/或至少一个电光传感器测量对已知机械激励的振动响应来探测。激励设备可以是以下几种装置之一，例如电磁振荡器、仪器化落锤、经校准的弹簧加载脉冲探头(可包括机电触发器)、由电池周围环境条件产生的环境噪声(例如，手机发出的声音或超声音调)、声学或超声换能器或其它任何激励装置。发生激励的频率范围可以从大约10Hz到高达多个MHz。激励信号可以是窄带或宽带的，并且其波形可以被整形以优化预定的处理方法。激励设备、至少一个加速度计、至少一个应变仪和/或至少一个电光传感器可以同时或顺序地放置在电池上的一个或多个位置处。来自该至少一个加速度计、至少一个应变仪和/或至少一个电光传感器的至少一个输出可以被组合以形成可以被处理以形成用于探测电池内的特定深度或其表面的定向波束。在施加初始已知力的情况下，可以测量来自至少一个加速度计、至少一个应变仪和/或至少一个电光传感器的至少一个输出，以确定电池的机械特性和/或物理特性。然后可以将这些特性与电池的SoC和SoH相关联。具体地，可以有三种方式来分析来自至少一个加速度计和至少一个应变仪的至少一个输出。

[0073] 第一，可以测量从激励源到一个或多个加速度计、一个或多个应变仪和/或至少一个电光传感器的飞行时间。另外，可以测量激励信号在不同的加速度计、应变仪和/或电光传感器之间的到达时间之间的差。这些时间可以提供对电池内声音速度以及有效机械模量和密度的敏感度量，从而可以提供电池的SoC和SoH的敏感度量。可以通过各种方法来计算这些时间，包括测量波形中特征(例如，峰值)的到达时间、互相关技术、小波分析，以识别各种频率分量到达至少一个加速度计、至少一个应变仪和/或至少一个电光传感器的时间，以及副本处理，其可以识别高和低信噪比下的特定已知信号形状。信号可能不需要足够短的寿命以保持时间上的分离，因为这可以更常见地通过高频超声方法实现。

[0074] 第二，可以测量信号形状演变。由至少一个振动感测设备获得的信号可能由于信号在电池中的传播而变形。结果，信号的振幅、形状和相位可能会变化。信号的这些变化是电池的SoC和SoH的函数，可以通过互相关、小波分析和/或副本处理进行量化。

[0075] 第三，可以测量加速度，该加速度定义为已知力输入或其傅立叶变换与测得的加

速度(或其傅立叶变换)之比。该比值可以在靠近激励点的位置使用至少一个加速度计来测量,并且可以是电池表面的输入阻抗以及其它表面和内部特性的度量。

[0076] 例如,图2示出了系统200的实施例,其中使用加速度计、应变仪和/或至少一个电光传感器以测量电池的各种感应的运动,以便确定锂离子电池的SoC和SoH。系统200可以包括至少一个电池210、至少一个加速度计、应变仪和/或电光传感器220、基座230、振荡器240和仪器化落锤250。电池210可被配置成安装在基座230上。在一些实施例中,振荡器240可被配置成摇晃电池210,而仪器化落锤250可被配置成撞击电池210。至少一个加速度计或应变仪220可被配置成测量电池210的响应于被振荡器240摇晃和/或被仪器化落锤250撞击的运动。这些运动的度量可以是电池210的SoC和SoH的函数,并且因而可确定电池210的SoC和SoH。

[0077] 在另一实施例中,声照射可以用作锂离子电池上的激励力。声照射可以被用作以任意入射角对锂离子电池施加的激励力。可以通过使电池在空气中或将电池浸没在具有适当声学特性的另一种介质(例如水)中进行测量。在这样的实施例中,电池表面上的运动可以根据电池内部组件(例如,阳极和阴极)的模量和布置来响应。入射表面的响应或其它机械特征(例如,电池另一侧的振动响应)可以通过位于电池上的一个或更多位置处的至少一个加速度计、激光振动计、极化PVDF(聚偏二氟乙烯)应变仪或加速度计、厚度计、传统应变仪和/或电光传感器进行测量。声刺激可以包括连续波信号、短纯音、啁啾(chirp)、宽带噪声,和/或由能够将声波或超声波发射到电池表面的至少一个扬声器或至少一个换能器或振动计(振荡器)“广播”的脉冲。振动响应可以由从电池的前表面、从电池内的结构以及从电池的后表面反射的波组成。利用足够短的脉冲,这些分量可以在不同的时间到达接收器,这可以提供有关电池的各种结构的信息。频率范围可以从大约10Hz到高达多个MHz。

[0078] 由电池反射和/或穿过电池传输到周围的声学介质(例如,空气或水)中并在电池的入射侧和/或电池的另一侧接收的声波也可以被麦克风或可控麦克风阵列测量,或者如果在水下,则由水听器测量,以提供有关电池的机械特性及其SoC和SoH的信息。

[0079] 对于足够时间范围的入射信号,测得的振动和/或来自电池的反射波和发射波可能达到稳态状态,其中所有组件(例如,电池的前表面、电池内的结构以及电池的后表面)持续对测量的信号做出贡献(通过反射以及穿过电池边界和电池内层两者的传输)。瞬态响应和稳态响应都可能对每个组件的相对振幅和相位敏感。每个组件都可能是其组成部分的动态模量以及电池内的厚度和位置的函数,并且可能包含可能与电池的SoC和SoH有关的信息。传感器可以单独使用,也可以形成可控阵列,以将响应与电池内各种深度隔离开。

[0080] 例如,图3示出了系统300的实施例,其中可以利用声照射来测量锂离子电池的SoC和SoH。系统300可至少包括电池310、第一换能器320(例如,超声换能器)、第二换能器330、第一加速度计或振动传感器350以及第二加速度计或振动传感器360。第一换能器320或外部扬声器可以将入射的声波340发射到电池,该声波可以被从电池310部分地反射而作为声波341,并且可以部分地穿过电池310传输而作为透射声波342。第一换能器320可被配置成接收反射的声波341,第二换能器330可被配置成接收透射声波342。如所讨论的,电池310的表面可以对声波的激励做出反应。第一加速度计或振动传感器350可被配置成测量由于声波而导致的、电池310的在与第一换能器320相同的一侧上的表面的运动。第二加速度计或振动传感器360可以被配置成测量由于声波而导致的、电池310的在与第二换能器330相同

的一侧上的表面的运动。因此,可以确定电池310的SoC和SoH。

[0081] 在另一实施例中,电池可以在一侧安装在振动床(例如,振荡器)的顶部,并且测量电池的振动响应。该方法可以测量电池两侧的加速度之比。这可以提供动态压缩模量的度量,该度量可以是电池的SoC和SoH的函数。在一个实施例中,至少一个附加质量块可以安装在电池的与振荡器相反的一侧上。可以在电池的与振荡器相反的一侧上放置各种适当选择的质量块,并且可以产生“弹簧-质量块”共振,该共振可能在由电池的刚度和质量确定的共振频率(可能出现在音频范围内)下产生峰值响应。这可以作为频率的函数提供电池的动态压缩模量和损耗因数。如果与模量相关的损耗很大,则这些频率可能是温度的函数。这样,可以在一定温度范围内进行测量,这可以提供有关电池状态的其它信息。电池的运动可以通过加速度计、应变仪、激光测速仪或其它合适的装置进行测量。

[0082] 例如,图4示出了系统400的实施例,其中可以使用振动计或振荡器来测量锂离子电池的SoC和SoH。系统400可至少包括电池410、振动计或振荡器420、在振荡器420上或电池410上紧靠振荡器420的第一加速度计或其它振动传感器430,以及在电池410上或顶部质量块350的顶部上的第二加速度计或其它振动传感器440。电池410可以通过电池410的第一侧(更靠近第一加速度计430的一侧)安装在振荡器420上。振荡器420可被配置成摇动电池410。第一加速度计或振动传感器430可被配置成测量由于摇动而在电池410的第一侧引起的振动。第二加速度计或振动传感器440可被配置成测量由于摇动而在电池410的第二侧(更靠近第二加速度计440的一侧)引起的振动。在一些实施例中,顶部质量块450可以联接到电池410的第二侧。如所讨论的,测量摇动引起的电池410的运动可以帮助确定电池410的SoC和SoH。

[0083] 使用传输振动共振信息来确定电池的SoC和SoH的上述每种方法都可以单独使用,也可以任意组合使用。在一些实施例中,可以改变外部压力、外部温度、湿度和/或大气条件以增强测量的准确性。这些外部因素可能会影响电池的静态和动态模量。在改变这些外部因素的同时进行测量可以建立广泛的参考数据集,这可以提高SoC和SoC确定的准确性。

[0084] 在另一实施例中,可以通过测量电池的弯曲刚度来确定电池的SoC和SoH。电池随着其SoC和SoH的变化而可能发生的最突出的机械变化之一就是其刚度。这可以表现为电池的弯曲模量的明显变化。电池的刚度也可能会受到电池内部温度和压力的影响。可以通过下列方式来测量电池的弯曲模量:通过电池的端部安装电池;和测量安装点之间的响应于在垂直于电池平面的方向上的已知量的力的偏转。该测量可以是静态的(例如,通过施加恒定的力)或动态的(例如,通过施加谐波力)。可以使用许多仪器来测量静态和动态偏转,诸如LVDT(线性可变差动变压器)位移传感器、应变仪、加速度计、电光传感器或其它合适的装置。在测量电池的偏转并确定电池的弯曲模量时,可以确定电池的SoC和SoH。

[0085] 例如,图5示出了系统500的实施例,其中可以测量弯曲模量以确定锂离子电池的SoC和SoH。系统500可以至少包括电池510、安装件520a和520b以及外力530。电池510可以通过其端部与安装件520a和520b一起安装。外力530可以在垂直于电池510的平面的方向上施加,并且可以使电池在垂直于电池510的平面的方向上偏转。可以测量该偏转以便计算电池510的弯曲模量,因而确定电池510的SoC和SoH。

[0086] 在另一实施例中,可以通过测量电池的压缩性来确定电池的SoC和SoH。如前所述,电池的弯曲模量可能会随着电池的使用寿命而变化。可能类似地受到影响的另一模量是电

池的压缩性。电池的压缩性也可能会受到电池内部温度和压力的影响。在一些实施例中,仪器(例如,英斯特朗试验机(Instron))可以针对给定量的压缩力来测量电池的压缩。根据偏转,可以得出电池的压缩模量,并可以确定电池的SoC和SoH。

[0087] 例如,图6示出了系统600的实施例,其中可以测量压缩模量以确定锂离子电池的SoC和SoH。系统600可以至少包括电池610和施加的力620。施加的力620可以被施加到电池610的相反两侧,以便压缩电池610。在另一实施例中,电池610可以被放置在刚性表面上,并在其相反一侧上施加压缩力。由于施加的力620,电池610可以压缩到小于电池610的常规厚度(电池610在没有施加力的情况下)的厚度。可以测量压缩后的厚度,并且可以计算电池610的压缩模量。因而,可以确定电池610的SoC和SoH。

[0088] 在另一实施例中,可以通过测量电池的厚度来确定电池的SoC和SoH。由于锂离子嵌入电池阳极的晶体结构中,因此可以看到晶体的晶格参数发生了重大变化。取决于晶体结构内锂离子的存在和密度,这可能产生晶体的显著膨胀和/或收缩。该效果可以表现为电池厚度的变化,其中该效果的幅度可能由于例如电池的包装而受到对电池的约束程度的限制。通过在不同的已知SoC和SoH条件下测量和表征电池厚度的变化,可以建立参考数据集,该参考数据集可以通过测量电池厚度的变化而在将来准确地确定SoC和SoH。为了确定电池厚度的变化,可以实施至少一个应变仪(例如,LVDT传感器、PVDF应变仪、PZT(压电陶瓷)应变仪或光纤应变仪),但是本发明不限于此。至少一个应变仪可以放置在电池组的外包装上,或者放置在单个电池单元上。在其中实施光纤应变仪的实施例中,光纤应变仪可以包括附接到电池或其电池单元的外边界的光纤,并且可以用干涉仪测量应变。

[0089] 在另一实施例中,可以实施硬度计仪器以测量电池在其表面处的静态模量。在这样的实施例中,硬度计仪器可以包括可以压入电池以在电池表面产生凹痕的尖头压头,以及测量凹痕深度的量规。凹痕的深度可以是电池表面的静态模量的函数,并且可能由于电池内的机械、化学和/或物理变化而改变。通过在不同的已知SoC和SoH条件下测量压入电池表面的凹痕深度,可以建立参考数据集,该参考数据集可以通过测量压入到电池表面的凹痕深度而在将来准确地确定SoC和SoH。

[0090] 例如,图7示出了系统700的实施例,其中根据电池的表面变形来测量电池的静态模量以确定其SoC和SoH。系统700可以包括电池710和硬度计仪器720,其可以包括弹簧720a、压头720b和压力负载720c。硬度计仪器720可以被配置为使电池710的表面产生凹痕。硬度计仪器720还可被配置成测量压入电池710的表面中的凹痕的深度。如所讨论的,该压痕可以对应于电池710的SoC和SoH。因而,通过测量压痕的深度,可以确定电池710的SoC和SoH。

[0091] 在另一实施例中,可以将电池放置在已知体积、质量和密度的流体中,并且可以测量被置换的流体的量。随着锂离子电池的SoC和SoH改变,电池的尺寸和密度可能也会改变。当电池被放入流体中时,排出的流体量可能与电池的密度成比例。密度的这种测量可用于准确地确定电池的SoC和SoH。

[0092] 例如,图8示出了系统800的实施例,其中可以测量锂离子电池的密度以确定其SoC和SoH。系统800可以至少包括电池810、流体820和秤830。秤830可以被配置成测量电池810的浸没重量,因而测量电池810的平均密度。电池810可以被放置在流体820中,并且可以测量被电池810置换的流体820的量。因而,在测量了电池810的质量和体积之后,可以确定电

池810的密度。因而,可以确定电池的SoC和SoH。

[0093] 在另一个实施例中,可使用X射线表征电池内的材料的密度及其晶体结构。通过在不同的SoC和SoH条件下测量电池内的密度变化,可以建立参考数据集,该参考数据集可以通过使用X射线测量电池内的密度变化而在将来精确确定SoC和SoH。X射线可被用于透射、吸收和/或反向散射模式,单独使用或彼此结合以及与其它技术结合使用。

[0094] 例如,图9示出了系统900的实施例,其中使用X射线来确定电池的SoC和SoH。系统900可以包括电池910、多个X射线源920、至少一个第一检测器950以及至少一个第二检测器970。多个X射线源920可以被配置成发射X射线,例如,入射的X射线930。发射的X射线可以例如通过透射的X射线960而部分地穿过电池910,并且还可以例如通过反向散射的X射线940部分地从电池910反射。该至少一个第一检测器970可以被配置成接收和测量透射的X射线960。该至少一个第二检测器950可以被配置成接收和测量反向散射的X射线940。所发射的X射线的光谱可通过反射并通过电池910透射而改变,因而反向散射的X射线640和透射的X射线960的光谱可变化。通过测量反向散射的X射线640和透射的X射线960的光谱,可以确定电池910的SoC和SoH。

[0095] 本文描述了确定锂离子电池的SoC和SoH的各种方法。应理解,这些方法中的每一个都可以单独地或以任何组合地使用,以便准确地确定电池的SoC和SoH。

[0096] 除了SoC和SoH以外,电池状态的另一种度量是SoE(能量状态),它可以是电池中储存的总能量的度量。通过充/放电电流和瞬时电压乘积的积分计算得出的SoE是能够从电池提取出的功的直接度量。它可能与例如在电池处于给定充电状态下使用电池的汽车能够行驶的里程数更紧密相关。尽管本文所述的实施例涉及测量电池的SoC和SoH,但是应理解,所述的任何实施例也都可以用于测量电池的SoE。

[0097] 锂离子电池失效的原因有很多,但是寿命终止的最主要原因可能是容量的急剧下降。这种容量降低(也称为容量衰减)是每种锂离子电池化学成分所固有的。在1990年代后期,发现容量衰减和容量损失的主要原因是电池中二次固体电解质中间相(SSEI)层的堆积。在锂离子电池的正常运行循环中,由于组装过程中的电解质解离和杂质,SSEI层形成在通常的固体电解质中间相(SEI)层上方和阳极颗粒上。随着电池循环和热变化的发生,新分子可能会在SSEI层上形成。由于电池的离子传输特性,新分子可能迁移并在电池的电极上形成越来越不渗透的层。可以通过电池的SoH的降低来测量这种退化。

[0098] SSEI层的连续形成以及阳极和阴极的晶体结构内锂离子的嵌入和脱嵌可能会导致电池的机械、化学和物理特性发生变化。通过测量和量化这些变化中的任何一个或全部,可以得出电池的性能度量,包括SoH。

[0099] SSEI层是通过正常使用电池而形成的。它的厚度范围可以从10埃到1.5微米,可能在电池的电极上形成,并且可能在电池的整个生命周期中逐渐增长。电池的使用情况与外部因素(诸如温度)相结合可以确定SSEI层的形成速率。电池的高温和高C速率使用与SSEI层的较高增长之间可能存在直接相关性(C速率是指在充电/放电过程中消耗的电流与电池总容量的比值)。随着SSEI层厚度的增加,锂离子穿过活性物质位点(即进入或离开阳极或阴极)完成必要的电化学反应的能力的效率水平可能会下降,并且还可能阻止电池无法进行完全充电/放电。

[0100] SSEI层可以由复杂的长链烃和无机盐组成,诸如Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(碳酸锂)、Li<sub>2</sub>O(氧化锂)、

LiF(氟化锂)、LiOCO<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>(碳酸甲酯锂)、LiOCO<sub>2</sub>C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>(碳酸甲酯锂)、(CH<sub>2</sub>OCO<sub>2</sub>Li)<sub>2</sub>(二碳酸二亚乙酯二锂)以及(-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-O-)n(聚氧化乙烯)。由于这些化合物为弱极性,因此在这些化合物中可能存在偶极矩。

[0101] SSEI层中可能存在三种一般的分子间力:Keesom力、Debye力和London分散力。这三种力中的每一种都可能具有不同的相关强度,这可能取决于SSEI层的分子结构。以下等式可以描述如何计算SSEI层内Keesom力的贡献。

$$[0102] E = - \frac{(\alpha_{0,1}\mu_1^2 + \alpha_{0,2}\mu_2^2)}{(4\pi\epsilon_0)^2 r^6}$$

[0103] 在该等式中,E为两个粒子之间的分子间键的能量,μ<sub>1</sub>和μ<sub>2</sub>是两个粒子的偶极矩,κ是玻尔兹曼常数,T是温度,ε是介电常数,r是两个粒子之间的距离。

[0104] 以下等式可以描述如何计算SSEI层内的Debye力的贡献。

$$[0105] E = - \frac{3h}{2} \frac{v_1 v_2}{(v_1 + v_2)} \frac{\alpha_{0,1}\alpha_{0,2}}{(4\pi\epsilon_0)^2 r^6}$$

[0106] 在该等式中,E是两个粒子之间的分子间键的能量,μ<sub>1</sub>和μ<sub>2</sub>是两个粒子的偶极矩,α是极化率,ε是介电常数,r是两个粒子之间的距离。

[0107] 以下等式可以描述如何计算SSEI层中London分散力的贡献。

$$[0108] E = - \frac{3h}{2} \frac{v_1 v_2}{(v_1 + v_2)} \frac{\alpha_{0,1}\alpha_{0,2}}{(4\pi\epsilon_0)^2 r^6}$$

[0109] 在该等式中,E是两个粒子之间的分子间键的能量,v是电离电势,h是普朗克常数,α是极化率,ε是介电常数,r是两个粒子之间的距离。

[0110] 通过计算SSEI层中的粒子之间的键的能量,可以确定必须被引入到SSEI层的键中以破坏SSEI层的总能量。

[0111] 通过确定电池的SoC和SoH,可以确定SSEI层的厚度和离子在电池中的位置。电池的SoC和SoH与SSEI层的厚度之间可能存在直接关联。如所讨论的,SSEI层可抑制锂离子在电极中的颗粒内的晶体结构内外的移动,从而将离子基本捕捉在晶体结构内或防止离子进入晶体结构。这可以增加电池的应力,并可以使得提取或推动电池阳极中的离子所需的能量增加。去除SSEI层可使离子自由迁移并恢复电池容量。

[0112] 当锂离子电池的容量是其初始容量的80%时,可以视为已失效。去除锂离子电池的SSEI层的非侵入式方法可以将电池的容量恢复到其初始容量的97%。此外,SSEI层的重量可能小于电池中存在的整体电解质的1%。因而,被破坏的SSEI层可以分散在整体电解质内,这可以确保被破坏的SSEI层不会重新附着到电极上。

[0113] 理论上已经开发出许多方法来处理SSEI层并提高电池容量。然而,所有这些当前方法都是侵入性的,要求电池的活性材料暴露于环境。这立即导致活性材料的氧化和蒸发,并且不允许它们在电池中重新使用。

[0114] 发明人已经认识到并明白需要一种用于去除锂离子电池的SSEI层的非侵入性方法。可以定期施加这些操作以防止显著的SSEI层生长,或在已形成这种SSEI层后将其移除。本文描述了用于去除锂离子电池的SSEI层以恢复其部分或大部分容量的各种方法的实施例。

[0115] 可以通过利用热消融、气蚀、机械共振、X射线和/或电子干预来实现SSEI层的破

坏。在热消融中,可以通过将聚焦的超声能量施加到SSEI层而在SSEI层上引起局部热应力。局部热应力可能会导致SSEI层中的键解离。在气蚀中,所供应的能量可能会导致在SSEI层和电解质的界面处形成破坏性微气泡。通过控制入射能量,微气泡可爆炸并释放冲击波。这可以在SSEI层的键上引起严重的机械应力,从而引起破坏。在共振方法中,为超声波选择的频率可以匹配SSEI层中不同结构或分子的共振频率。共振频率是主体的固有振动频率。如果匹配该频率并提供恒定的振幅,则主体中的振动幅度可以不断增加,直到破裂。该方法可能要求表征SSEI层中存在的所有结构和分子的共振频率。X射线可用于直接破坏将SSEI材料保持在一起并保持在阳极上的化学键。电子干预可包括在电池上产生可控的低电子阻抗条件,以在组成组件和SSEI层上引起较大的破坏力。

[0116] 在一个实施例中,可以利用高能超声来破坏电池的SSEI层。由至少一个换能器以一种或多种频率产生并发射到电池中的高水平超声波可以破坏将SSEI层固定在适当位置的相对较弱的键。这可以机械地或通过热量加热过程使材料脱落。可以使用超声波脉冲(窄带或宽带)或连续波激励。

[0117] 在另一相关实施例中,可以利用特定频率的高能超声来破坏电池的SSEI层。SSEI层的键可能具有各种机械共振,如果在共振频率下经受能量,则可能会引起较大的运动。键的共振频率可以取决于许多参数,例如键中元素的电负性、键强度、键长度以及键角。以处于这些共振频率的高振幅超声(脉冲或连续波)照射可能会导致键以高振幅运动做出响应,这可能会通过机械力或热冲击而破坏键。由于电池中的其它结构可能具有不同的共振频率,因此它们可以不受到影响。

[0118] SSEI层的键的共振频率可以通过将样本SSEI材料暴露于一定频率范围的超声并监测运动幅度来确定。该监测可以通过激光干涉仪或其他合适的装置来完成。峰值响应会出现在键的共振频率处。SSEI层的样本可以从电池中提取,也可以出于这种测试目的而制造。

[0119] 例如,图10示出了系统1000的实施例,其中可以利用高能超声来破坏锂离子电池的SSEI层。系统1000可以至少包括电池1010(包括阴极1010a、阳极1010b、电解质1010c以及SSEI层1010d)和多个超声换能器1020。多个超声换能器1020可被配置成将高能量超声波发射到电池1010中。如所讨论的,超声波的频率可以处于SSEI层1010d的键的共振频率。这样,可以破坏SSEI层1010d而不会对电池1010的其他组件(例如,阴极1010a、阳极1010b和电解质1010c)产生不利影响。

[0120] 在另一个实施例中,高能超声可用于在电池的SSEI层中引起气蚀。如所讨论的,气蚀是由于高强度超声波产生的负压而在流体内产生小的空隙(气泡)。空隙的随后塌陷可能是非常剧烈的并且有局部破坏性。在精心控制的条件下,可能会在SSEI层的表面上产生气蚀空隙,从而使SSEI层脱落或破坏。

[0121] 例如,图11示出了系统1100的实施例,其中可以利用高能超声来引起气蚀以破坏锂离子电池的SSEI层。系统1100可以至少包括电池1110(包括阴极1110a、阳极1110b、电解质1110c以及SSEI层1110d)和多个超声换能器1120。多个超声换能器1120可以被配置成发射超声波进入电池1110,以便在SSEI层的表面或内部产生气蚀。这可能在SSEI层1110d中产生大的应力和/或空隙,导致SSEI层1110d塌陷和/或分散,因而破坏SSEI层1110d。

[0122] 在另一实施例中,可以利用高能超声来激励电池的各种结构。例如,可以将处于阳

极/阴极的共振频率的超声传输到电池中。这可能会导致阳极/阴极的强烈机械响应(例如,表面波或其它强烈振动),从而可以破坏SSEI层。可以使用连续波、短纯音、脉冲和/或啁啾。电池结构的共振频率可通过将一定频率和振幅范围的超声施加到代表性材料样品上并测量机械和电子阻抗响应来确定。

[0123] 例如,图12示出了系统1200,其中高能超声可以针对锂离子电池的共振结构以破坏SSEI层。系统1200可以至少包括电池1210(包括阳极1210a和阴极1210b)以及振动1220。振动1220的频率可以是阳极1210a或阴极1210b的共振频率。在图12中所示的示例中,振动1220被以阳极1210a的共振频率施加到阳极1210a。这可以在阳极1210a中引起强烈的机械响应,这可以破坏阳极1210a上的SSEI层。

[0124] 在另一实施例中,可以利用相控阵超声来破坏电池的SSEI层。相控阵超声可能能够在特定位置产生高超声水平。该方法可能需要多个换能器,这些换能器可以围绕电池定位和定向。这些换能器可以被组织成阵列,并且所产生的超声波可以被波束成形(以相长地/相消地干涉),以便将高能超声传递到电池内的一个或多个期望的空间体积或平面。由于此方法可以组合多个相对较低强度的波束以产生高声能的局部体积,因此所关注的体积外部的点可以不暴露于显著的超声中并且可以不受影响。高能超声可自我表现为热,并且由于SSEI层可能主要由有机碳氢化合物组成,因此热可能会破坏SSEI层的键。在这样的实施例中,超声波可以具有范围从大约500kHz到大约1THz的频率。

[0125] 可以通过在超声换能器之间设置预定的相移来实现将多个波束会聚在单个点上。这可以允许波束聚焦和波束转向同时发生。因而,可以布置每个超声换能器,使得从超声换能器发射的多个波形在预定位置相长地干涉。这可允许受控的相长和相消干涉,并且可以允许超声换能器在锂离子电池内部的特定区域上施加高能量,并且还保持锂离子电池的其它区域不变。例如,这还可以允许超声换能器利用多个低能波束,而不是单个高能波束。

[0126] 下列等式可以描述可以如何对相长干涉建模以便确定每个波形行进所需的路径长度。

$$R_1 - R_2 = n\lambda$$

[0128] 在该等式中,  $R_1$  和  $R_2$  表示两个不同波形的路径长度,  $\lambda$  表示波形的波长,  $n$  为整数。如果两个路径长度之间的差异为波形的波长的整数倍,则两个波形将相长地干涉。

[0129] 下列等式可以描述可以如何对相消干涉建模以便确定每个波形行进所需的路径长度。

$$R_1 - R_2 = \lambda/2 + n\lambda$$

[0131] 在该等式中,  $R_1$  和  $R_2$  表示两个不同波形的路径长度,  $\lambda$  表示波形的波长,  $n$  为整数。如果两个路径长度之间的差异比波形的波长的整数倍大半个波长,则两个波形将相消地干涉,由此产生低声强位置。

[0132] 通过使用多个低能量波束并将它们聚焦在特定区域上,可以使在预期聚焦区域以外的区域上引起的应力(热或机械)最小化。这也允许在预期聚焦区域上的更大强度的入射超声辐射。传递到预期聚焦区域的总能量可以是超声辐射的强度和暴露时间的函数。破坏锂离子电池的SSEI层所需的总能量可以大于或等于SSEI层内的分子间键和/或分子内键的键能量。

[0133] 例如,图13示出了系统1300的实施例,其中可以利用相控阵超声来破坏锂离子电

池的SSEI层。系统1300可以至少包括电池1310(包括阴极1310a、阳极1310b、电解质1310c以及SSEI层1310d)和多个超声换能器1320。多个超声换能器1320可以被配置成将超声波发射到电池1310中以破坏SSEI层1310d。如前所述,多个超声换能器1320可以被配置成使得从至少一个超声换能器1320发射的超声波相长地干涉,以仅在SSEI层1310d的位置处产生最强的强度。以这种方式,电池的其它组件(例如,阴极1310a、阳极1310b和电解质1310c)可以不受影响,并且SSEI层1310d可以被破坏。

[0134] 在其它实施例中,超声换能器可以利用声透镜(例如,聚苯乙烯、环氧树脂)或凹形换能器来聚焦超声能量。

[0135] 在另一实施例中,可以实施X射线以破坏SSEI层。X射线是一束高能光子,它能够破坏SSEI层的键。这可以在X射线束的能量高于破坏SSEI层的键所需的能量级别时实现。

[0136] 还可以选择某些波长的X射线来针对SSEI层的键的吸收特性。例如,可能存在键趋于吸收X射线能量的特定波长或一组波长。当键吸收能量时,键可能会弱化并最终断裂,由此使SSEI分子脱落。通过利用这些特定的波长,可以避免损坏电池内的其它材料。

[0137] 为了避免滥用和使用过多的辐射,可以通过使用表面等离子体共振(SPR)波将X射线引导到电池的预期区域(例如,阳极和阴极之间以及SSEI层的表面上)来优化这种方法。SPR是由入射电磁能量激发的负和正介电材料之间的界面处的导电元素的共振振荡。SPR是沿与材料界面平行的方向传播的非辐射电磁表面波。另外,SPR可以允许调节等离子体能量频率,以匹配SSEI材料的吸收波谱,从而优化入射的X射线的波长之间的匹配,由此优化它们的吸收和有效性以破坏SSEI层。对X射线能量的入射角的操纵还可提供优化吸收的手段。

[0138] 在一些实施例中,可以利用X射线吸收光谱法(XAS)来设计X射线系统,以选择性地去除锂离子电池中的SSEI层,同时保持锂离子电池中其它结构的完整性(例如,阳极、阴极、隔膜、电解质、囊袋、集电器等)。作为确定X射线吸收光谱的强大分析工具,XAS可以识别SSEI层吸收最大的波长,因而X射线系统可被调谐到这些波长。X射线可能会被吸收的可能性遵循比尔定律:

$$[\mu \cdot x] = \ln(I_0/I)$$

[0139] 在这种情况下,μ可以是吸收系数,x可以是材料的厚度,I<sub>0</sub>可以是入射在材料上的X射线的强度,I可以是透射过材料的X射线的强度。

[0140] 通常,暴露于X射线辐射可能以质量损失和/或材料化学结构变化的形式对材料造成损害。含有芳族基团的有机材料可能比无机材料对质量损失的抵抗力差。在锂离子电池中,电池的许多重要组件都是无机的,因而可能遭受的X射线辐射损害最小。相反,SSEI层可以是有机的,因而可能由于X射线辐射而遭受明显的质量损失。以这种方式,可以通过用X射线辐射去除SSEI层来恢复锂离子电池的容量。

[0141] 例如,结合图9,可以实现具有和不具有SPR的X射线以确定电池的SoC和SoH并破坏电池的SSEI层。图14示出了系统1400的实施例,其中采用了SPR概念。系统1400可以包括电池1410,电池1410包括形成由阳极和阴极1420组成的平面的电极(阳极和阴极)。系统1400还可以包括被配置成生成X射线1440的至少一个X射线管源1430。该至少一个X射线管源1430可以被配置成在电池1410的边缘处生成X射线1440,其中,X射线1440在电极1420之间进入电池1410并产生SPR驻波1470。电极1420之间的射线1440和SPR驻波1470的吸收可破坏并去除电池1410的SSEI层。系统1400还可包括至少一个检测器1460,其可被配置成接收和

测量穿透电池1410的透射的X射线1450,这可帮助监视过程。

[0143] 在另一实施例中,可以利用交流电来破坏电池的SSEI层。在阳极具有很强的共振机械响应的频率下向锂离子电池施加交流电可能会产生能够破坏SSEI层的表面波(或其它高振幅振动)。这也可能产生足够的热以破坏SSEI层。交流电流的期望频率可以通过将一定频率和振幅范围的电流施加于电池或代表性材料样本并测量机械和电子阻抗响应来确定。

[0144] 例如,图15示出了系统1500的实施例,其中可以利用交流电流来破坏锂离子电池的SSEI层。系统1500可以包括电池(至少包括阳极1510a和阴极1510b)和交流电源1520。交流电源1520可以连接到电池1510的阳极1510a和阴极1510b并驱动交流电流穿过电池1510。交流电源1520产生的交流电流的频率可以根据阳极1510a和阴极1510b的特性(例如,成分)进行选择。这会在电池1510中产生机械响应和/或热量,这可以破坏电池1510的SSEI层。

[0145] 在另一实施例中,可以使用“受控短路”来破坏电池的SSEI层。如所讨论的,在电池的正常操作中,锂离子试图在充电和放电期间进入和退出阳极和阴极的晶体结构。该过程发生的速率可以由流过电池的电流确定。通过迫使大电流流过电池,锂离子可被增加能量,因而可快速和/或强制移动以进入/退出阳极/阴极的晶体结构。这可能导致在阳极和SSEI层上产生强大的破坏性机械应力,电极或其它组件的内部压力升高和/或非常高的温度,其中任何一个都可能破坏SSEI层。在一个实施例中,可以通过临时地或周期性地跨越电池的端子施加相对低的阻抗负载来产生这种类型的大电流。通过选择电阻、电容和电感以及频率和施加持续时间的最佳组合,可以优化负载。在这样的实施例中,这可能在电池内产生大量的热,并且在过程期间可能需要冷却电池。

[0146] 例如,图16示出了系统1600的实施例,其中可以利用“受控短路”来破坏锂离子电池的SSEI层。系统1600可以包括至少一个电池1610(至少包括阳极1610a和阴极1610b),以及电路1620,电路1620被配置成以受控方式产生类似于电池1610的“短路”的状态。电路1620可以连接到电池1610的阳极1610a和阴极1610b,并且可以被配置成小心地接近短路。电路1620可以通过跨越阳极1610a和阴极1610b放置相对低的阻抗,并且迫使大电流流过电池1610来对电池“短路”。这可能会导致电池1610内的内部压力、温度和/或应力场增大,因而可以破坏电池1610的SSEI层。

[0147] 在另一实施例中,可利用挤压膜来破坏电池的SSEI层。挤压膜是平行于界定薄流体通道的表面(薄流体通道在该表面上产生非常高的剪切应力)的高振荡流体速度的产物。可以在由阳极、电解质和阴极形成的通道内产生挤压膜。这些表面的体积守恒的机械振动(例如,围绕靠近阳极几何中心的枢轴点进行摇摆运动)可能会在电解质上产生强大的力,从而驱动平行于板的振荡速度,进而会在表面边界层(SSEI层)上产生高剪切力。平行于表面所产生的速度可以在运动表面的竖直运动的速度上被放大,其放大倍数为运动表面的尺寸与表面之间的间隙的比率的因子。例如,对于在宽度为a的流体间隙上的长度为d的摇动板,平行于表面的速度可以是摇摆运动的速度的d/a倍大。阳极表面的高剪切力可以使SSEI层脱落。

[0148] 例如,图17示出了系统1700的实施例,其中可以利用挤压膜来破坏锂离子电池的SSEI层。系统1700可至少包括电池1710(至少包括阳极1710a、阴极1710b和SSEI层1710c)和板状外部摇动件1720。外部摇动件1720可被配置成通过绕穿过枢轴点1730的轴线(该轴线指向页面)的摇摆运动而将电池1710的内部电解质谐波驱动成大的谐波水平运动。这些水

平运动的速度可以是  $(d/a)v_0$ , 其中  $d$  是摇动件的长度,  $a$  是通道的厚度,  $v_0$  是摇动件端部的竖直运动的速度。这可能会在电池1710的阳极1710a和阴极1710b之间的通道中产生挤压膜, 并可能在阳极1710a和阴极1710b的表面上产生非常高的剪切应力。剪切应力可能足以破坏电池1710的SSEI层1710c。

[0149] 在另一实施例中, 可以利用离心运动引起的表面剪切旋转来破坏电池的SSEI层。扁平电池绕垂直于电池平面的轴线的离心运动引起的表面剪切旋转(连续(自旋)或振荡)可能会在电解质中产生与阳极和阴极表面平行的流体流。这些流体流可能会在表面上产生高剪切速率, 从而破坏SSEI层。流体流可以是周向的和径向的。径向流体流可能倾向于将被破坏的SSEI层的碎片冲向电池的外边缘。

[0150] 例如, 图18示出了系统1800的实施例, 其中可以利用离心运动引起的表面剪切来破坏锂离子电池的SSEI层。系统1800可至少包括电池1810(至少包括阳极1810a、阴极1810b以及SSEI层1810c)。系统1800可被配置成使得电池1810绕轴线1820旋转。轴线1820可以被定向为垂直于电池1810的平面, 可以穿过电池1810, 并且旋转可以是连续的或振荡的。以这种方式, 在阳极1810a和阴极1810b的表面上的电解质中可能会产生离心运动引起的表面剪切力, 并且其强度足以破坏电池1810的SSEI层1810c。

[0151] 在另一实施例中, 可以利用高能超声来产生平行于表面的高速声流。在存在高(非线性)超声场的情况下, 电解质可以进入稳定运动, 该运动通常可以在远离超声换能器的方向上进行。可以在狭窄的通道(例如, 由电池的阳极、电解质和阴极形成的通道)中产生高速, 并且可以产生足够的表面剪切力以破坏SSEI层。

[0152] 例如, 图19示出了系统1900的实施例, 其中可以利用高能超声来产生高速声流, 以便破坏锂离子电池的SSEI层。系统1900可至少包括电池1910(至少包括阳极1910a、阴极1910b、电解质1910c以及SSEI层1910d)和高强度超声换能器1920。高强度超声换能器1920可以被配置成发射平行于阳极1910a和阴极1910b的表面的高能超声。由高能超声换能器1920发射的超声波可以在电解质内引起足够高速度的流动, 以产生能够破坏电池1910的SSEI层1910d的高表面剪切力。可以使用不止一个这样的超声换能器在阳极表面上均匀地产生这些速度。

[0153] 在另一实施例中, 可以控制电池的环境以影响SSEI层的键。在炎热或寒冷条件下, 或者由于热冲击, SSEI层的键都可能被破坏。通过小心地施加热量或从电池中去除热量, 可能会破坏SSEI层的键。控制电池的环境可以有利地与破坏电池的SSEI层的任何其它所述方法结合使用。

[0154] 在另一实施例中, 可以利用脉冲力来破坏电池的SSEI层。例如, 可以将热、机械和/或电子冲击施加到电池上以破坏SSEI层。例如, 这些脉冲力可以通过快速加热或冷却电池、机械地冲击电池(例如, 用锤子击打电池)和/或将电脉冲施加到电池中而产生。

[0155] 本文描述了破坏锂离子电池的SSEI层的各种方法。应明白, 这些方法中的每一个都可以单独地或以任何组合使用, 以破坏锂离子电池的SSEI层。

[0156] 还应理解, 用于确定锂离子电池的SoC和SoH的每种方法以及用于破坏锂离子电池的SSEI层的每种方法可以是用于处理锂离子电池的更大过程的一部分。用于处理锂离子电池的方法可包括本文所述的用于确定锂离子电池的SoC和SoH的至少一种方法或方法的组合, 以及本文所述的用于破坏锂离子电池的SSEI层的至少一种方法或方法的组合。

[0157] 例如,图20示出了用于处理锂离子电池的示例过程的过程流程2000。在过程流程2000的一个实施例中,至少一个超声换能器(或者,可替选地为声音(音频范围)换能器)被用于确定电池的SoC和SoH以及破坏电池的SSEI层两者。然而,应理解,可以利用本文所述的用于确定锂离子电池的SoC和SoH的任何方法以及用于破坏电池的SSEI层的任何方法。

[0158] 在过程流程2000开始之前,可以将锂离子电池从其包装中取出并准备进行该程序。这可以提高耦合效率并减少至少一个超声换能器与锂离子电池的外部聚合物包装之间的衰减损耗。过程流程2000可包括步骤2010,其中锂离子电池循环通过一个充电/放电循环,并且可以确定当前的SoC和SoH。然后,过程流程2000可以包括步骤2020,其中可以基于SoC和SoH值来估计SSEI厚度。这可以通过访问数据库来完成,在该数据库中存储了与各种SoC和SoH值相对应的SSEI厚度。

[0159] 然后,过程流程2000可以包括步骤2030,其中以第一模式操作的至少一个超声换能器用于表征锂离子电池的电极上的SSEI层的能量和形貌。这可以通过使用不同入射角和频率的声波来解耦、隔离和可视化锂离子电池的多层来完成。可以将当前电池的这些扫描与不同电量的被扫描电池的数据库进行比较,不同电量与SSEI层的厚度和位置相关。该信息可以存储在数据库中,以用于以后的锂离子电池处理。

[0160] 过程流程2000可以包括步骤2040,其中,在准备破坏SSEI层的处理时,取决于特定电池的化学性质,对锂离子电池进行放电/充电。例如,在放电期间,锂离子可从电池的阳极行进到电池的阴极。对锂离子电池放电会使所有离子进入阴极,并可以防止由于在SSEI处理过程中施加能量而引起自发性和潜在有害反应的可能性。然后,过程流程2000可以包括步骤2050,其中,将锂离子电池的温度逐渐降低,可能降低至大约276K,以限制离子迁移和锂激励,并进一步防止SSEI破坏期间发生不良反应的可能性。该步骤还可以降低高度锂化的电解质和去锂化的电解质两者燃烧的风险。在一些实施例中,过程流程2000可以返回到步骤2040以确保所有锂离子已经移动到电池的阴极。

[0161] 然后,过程流程2000可以在步骤2050使用上述的一种或多种技术来执行SSEI破坏。然后,过程流程2000可以包括步骤2060,其中使温度恢复到298K。过程流程2000可以包括步骤2070,其中再次测量电池容量并且可以再次确定锂离子电池的SoC和SoH。如果电池的SoC和SoH足够,则过程流程2000可包括步骤2080,其中将锂离子电池返回到其包装,并且过程流程2000完成。

[0162] 在过程流程2000结束之后,锂离子电池可能已经恢复到其初始容量的很大一部分。在一些实施例中,锂离子电池可能已经恢复到其初始容量的大约97%。此时,电池容量的退化速率(即,SSEI层的形成速率)可以保持与其初始退化速率相同。在进行SSEI处理之后,电池容量的退化速率可能与制造电池时的速率相同,因为退化速率可不取决于SSEI层的状态。

[0163] 图21示出了系统2100的实施例,其中可以实现使用超声处理锂离子电池的方法。在系统2100中,使用至少一个超声换能器确定电池的SoC和SoH以及破坏电池的SSEI层。然而,应理解,在系统2100中可以使用用于确定锂离子电池的SoC和SoH的任何方法以及用于破坏电池的SSEI层的任何方法。

[0164] 在一些实施例中,超声系统2120可以包括至少一个超声换能器2130。该至少一个超声换能器2130可以产生超声波2140以处理锂离子电池2110的SSEI层。在一些实施例中,

该至少一个超声换能器2130可以在第一模式下操作以便扫描锂离子电池2110并确定锂离子电池2110的SoC和SoH。在第一模式下,该至少一个超声换能器2130可以产生相对低能量的超声波2140。该至少一个超声换能器2130可以检测超声波2140的反射。超声系统2120可以与计算设备2150通信,以便基于由该至少一个超声换能器2130检测到的反射的超声波而确定锂离子电池2110的SoC和SoH。计算设备2150可以与数据库2160通信,该数据库2160存储与锂离子电池2110有关的信息,包括使锂离子电池2110的SoC和SoH与反射的超声波相关的信息。数据库2160还可以包括与锂离子电池2110有关的制造信息。例如,对于特定的锂离子电池2110,数据库2160可以包含电池的序列号和电池中各个组件的位置。以这种方式,系统可能能够轻松地定位和表征锂离子电池2110的SSEI层。计算设备2150与数据库2160之间可以存在双向连接。

[0165] 在一些实施例中,该至少一个超声换能器2130可以在第二模式下操作,以便破坏锂离子电池2110的SSEI层。在第二模式下,该至少一个超声换能器2130可以产生比第一模式下更高能量的超声波2140。该至少一个超声换能器2130可以产生超声波2140,以便瞄准以第一模式表征的SSEI层。为此,该至少一个超声换能器2130可以产生超声波模式,该超声波模式在SSEI层中的某一位置处形成包含相长干涉的体积。

[0166] 在图21中所示的系统中,存在至少一个锂离子电池2110、超声系统2120中的至少一个超声换能器2130、至少一个计算设备2150以及至少一个数据库2160。应理解,该系统仅是例示说明性的,使用超声破坏锂离子电池单元/模块/电池组的SSEI层的系统的其它布置也是可能的。例如,超声系统2120可以一次处理多个锂离子电池2110。超声系统2120中可以存在多个超声换能器2130,并且它们可以被布置成有效地处理一个或多个锂离子电池2110。在这样的实施例中,超声换能器2130可以并行地操作并且一次处理几个锂离子电池。超声换能器2130能够操作以使得至少一个超声换能器2130在第一模式下操作,而至少一个超声换能器2130在第二模式下操作。

[0167] 在图21中所示的系统中,计算设备2150被示为外部计算设备。在这样的实施例中,超声系统2120可以连接到计算设备2150,使得两者可以通信和交换与锂离子电池2110有关的信息,以便表征和识别SSEI层。超声系统2120可以通过电线、无线地、通过双向总线或任何其它合适的连接而连接到计算设备2150。另外,可以有一个以上的计算设备2150,并且这些计算设备2150可以合并在超声系统2120中。数据库2160被示出为在计算设备2150外部的数据库,但是应理解,数据库2160也可以合并到计算设备2150中。

[0168] 图22示出了在用于处理锂离子电池的系统中用于接收和分析信号的计算设备的实施例。在一个实施例中,计算设备2200可以包括至少一个处理器2202和至少一个网络适配器2204。计算设备还可以包括计算机可读存储介质2206,其可以包括对准辅助设备模块2208、电流对准模块2210、正确对准模块2212、传感器模块2214的位置以及调整工具模块2216的影响。计算设备2200可以被设计成接收和分析来自利用本文所述的用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法的系统(例如,超声系统)的信号,以便表征和识别锂离子电池的SSEI层。

[0169] 可以以任何合适的方式来实现根据本文所述的原理进行操作的技术。上文的讨论中包括一系列流程图,其示出了确定锂离子电池的SoC和SoH并破坏锂离子电池的SSEI层的各种过程的步骤和动作。上述流程图的处理和决策方框代表了可被包含在执行这些各种过

程的算法中的步骤和动作。从这些过程中得出的算法可以实现为与一个或多个单用途或多用途处理器集成并指导其操作的软件,也可以实现为功能等效的电路,诸如数字信号处理(DSP)电路或专用集成电路(ASIC),或者可以以任何其它合适的方式实现。应明白,本文所包括的流程图未示出任何特定电路或任何特定编程语言或编程语言类型的语法或操作。相反,流程图示出了本领域技术人员可以用来制造电路或实现计算机软件算法以执行实现本文所述技术类型的特定设备的处理的功能信息。还应明白,除非本文另外指出,否则每个流程图中所述的步骤和/或动作的特定顺序都仅是可以实现的算法的例示说明,并且能够在本文所述的原理的多种实现方式和实施例中进行改变。

[0170] 因而,在一些实施例中,本文所述的技术可以体现为实施为软件的计算机可执行指令,包括作为应用程序软件、系统软件、固件、中间件、嵌入式代码或任何其它合适类型的计算机代码。可以使用多种合适的编程语言和/或编程或脚本工具中的任何一种来编写这样的计算机可执行指令,并且还可以将其编译为在框架或虚拟机上执行的可执行机器语言代码或中间代码。

[0171] 当本文所述的技术体现为计算机可执行指令时,这些计算机可执行指令可以以任何合适的方式实现,包括作为多个功能性工具(facility),每个功能性工具都提供一个或多个操作以完成根据这些技术操作的算法的执行。然而,“功能性工具”是实例化的,是计算机系统的结构组件,当与一个或多个计算机集成并由一个或多个计算机执行时,该功能性工具使一个或多个计算机执行特定的操作角色。功能性工具可以是软件元件的一部分或全部。例如,功能性工具可以被实现为过程的功能、或者作为离散的过程,或者作为任何其它合适的处理单元。如果本文所述的技术被实现为多个功能性工具,则每个功能性工具都可以以其自己的方式来实现;不是全部功能性工具都需要以相同方式实现。另外,这些功能性工具可以视需要并行和/或串行执行,并且可以使用它们正在其上执行的计算机上的共享存储器,使用消息传递协议或以任何其它适当的方式在彼此之间传递信息。

[0172] 通常,功能性工具包括执行特定任务或实现特定抽象数据类型的例程、程序、对象、组件、数据结构等。通常,功能性工具的功能可以根据需要在其运行的系统中进行组合或分布。在一些实施方式中,执行本文技术的一个或多个功能性工具可以一起形成完整的软件包。在可替选实施例中,这些功能性工具可以适于与其它不相关的功能性工具和/或过程进行交互,以实现软件程序应用。在其它实施方式中,功能性工具可以适于与其它功能性工具交互,诸如形成操作系统,包括可从美国华盛顿州雷蒙德市的微软公司获得的Windows操作系统。换句话说,在一些实施方式中,功能性工具可以可替选地被实现为操作系统的一部分或在操作系统之外实现。

[0173] 本文已经描述了用于执行一个或多个任务的一些例证性功能性工具。然而,应明白,所述的功能性工具和任务的划分仅说明了可实施本文中所述的例证性技术的功能性工具的类型,并且实施例不限于以任何特定数量、划分、或功能性工具的类型。在一些实施方式中,所有功能都可以在单个功能性工具中实施。还应明白,在一些实施方式中,本文所述的一些功能性工具可以与其它功能性工具一起或彼此分开地实施(即,作为单个单元或单独的单元),或者可以不实施这些功能性工具中的一些。

[0174] 在一些实施例中,可以将实现本文所述的技术的计算机可执行指令(当实现为一个或多个功能性工具或以任何其它方式实现时)在一个或多个计算机可读介质上编码以向

该介质提供功能。计算机可读介质包括磁性介质(诸如硬盘驱动器)、光学介质(诸如光盘(CD)或数字多功能光盘(DVD))、永久性或非永久性固态存储器(例如,闪存、磁性RAM等)或任何其它合适的存储介质。这样的计算机可读介质可以以任何适当的方式来实现,包括作为上述图22的计算机可读存储介质2206(即,作为计算设备2200的一部分),或作为独立的单独存储介质。本文中使用的“计算机可读介质”(也称为“计算机可读存储介质”)是指有形存储介质。有形存储介质是非暂时性的,并具有至少一个物理、结构性组件。在本文中使用的“计算机可读介质”中,至少一个物理、结构性组件具有至少一个物理特性,该至少一个物理特性可以在创建具有嵌入信息的介质的过程、在其上记录信息的过程或者以信息对介质编码的任何其它过程期间以某种方式改变。例如,可以在记录过程期间改变计算机可读介质的物理结构的一部分的磁化状态。

[0175] 此外,上述某些技术包括以某些方式存储信息(例如,数据和/或指令)以供这些技术使用的动作。在这些技术的一些实施方式中——诸如其中这些技术被实施为计算机可执行指令的实施方式——信息可以被编码在计算机可读存储介质上。在本文中将特定结构描述为用于存储这种信息的有利格式的情况下,当在存储介质上进行编码时,这些结构可以用于赋予信息的物理组织。然后,这些有利结构可以通过影响与信息交互的一个或多个处理器的操作来向存储介质提供功能;例如,通过提高处理器执行计算机操作的效率。

[0176] 在其中技术可以体现为计算机可执行指令的一些但不是全部实施方式中,这些指令可以在包括图22的例证性计算机系统在内的任何合适的计算机系统中运行的一个或多个合适的计算设备上执行,或者可以对一个或多个计算设备(或一个或多个计算设备的一个或多个处理器)进行编程以执行计算机可执行指令。当指令以计算设备或处理器可访问的方式存储在诸如数据存储装置(例如,芯片上高速缓存或指令寄存器、可经由总线访问的计算机可读存储介质、可经由一个或更多网络访问并且可由设备/处理器访问的计算机可读存储介质等)中时,计算设备或处理器可被编程以执行这些指令。包括这些计算机可执行指令的功能性工具可以与单个多功能可编程数字计算设备、共享处理能力并共同执行本文所述的技术的两个或多个多功能计算设备的协调系统、专用于执行本文所述的技术的单个计算设备或计算设备的协调系统(位于同一地点或地理分布)、用于执行本文所述的技术的一个或多个现场可编程门阵列(FPGA)或任何其它合适的系统集成并指导其操作。

[0177] 图22示出了以可以在实现本文所述的技术的系统中使用的计算设备2200的形式的计算设备的一种例证性实施方式,但是可能存在其它实施方式。应明白,图22既无意作为用于作为从系统接收和分析信号的装置从而根据本文所述的原理确定锂离子电池的SoC和SoH的计算设备的必要组件的描绘,也无意作为全面的描绘。

[0178] 计算设备2200可以包括至少一个处理器2202、网络适配器2204以及计算机可读存储介质2206。计算设备2200可以是例如台式或膝上型个人计算机、个人数字助理(PDA)、智能手机、服务器、无线访问点或其它网络元件或任何其它合适的计算设备。网络适配器2204可以是使计算设备2200能够通过任何合适的计算网络与任何其它合适的计算设备进行有线和/或无线通信的任何合适的硬件和/或软件。计算网络可以包括无线接入点、交换机、路由器、网关和/或其它联网设备,以及用于在两个或多个计算机之间交换数据的任何合适的有线和/或无线通信介质,包括互联网。计算机可读存储介质2206可以适于存储要被处理的数据和/或要由处理器2202执行的指令。处理器2202使得能够处理数据和执行指令。数据和

指令可以存储在计算机可读存储介质2206上,并且可以例如使得能够在计算设备2200的组件之间进行通信。

[0179] 存储在计算机可读存储介质2206上的数据和指令可以包括实现根据本文所述的原理进行操作的技术的计算机可执行指令。在图22的示例中,计算机可读存储介质2206存储实现各种设备并如上所述存储各种信息的计算机可执行指令。计算机可读存储介质2206可以存储计算机可执行指令,以接收和处理来自系统的信号,从而确定锂离子电池的SoC和SoH并在屏幕上显示结果。

[0180] 虽然在图22中未示出,但是计算设备可以另外具有一个或多个组件和外围设备,包括输入和输出设备。这些设备尤其可以用于呈现用户界面等。能够用于提供用户界面的输出设备的示例包括用于视觉呈现输出的打印机或显示屏,以及用于听觉呈现输出的扬声器或其它声音生成设备。能够用于用户界面的输入设备的示例包括键盘和定点设备,诸如鼠标、触摸板和数字化平板。作为另一示例,计算设备可以通过语音识别或其它可听格式接收输入的信息。

[0181] 已经描述了在电路和/或计算机可执行指令中实现这些技术的实施例。应明白,一些实施例可以是方法的形式,已经提供了其至少一个示例。作为该方法的一部分执行的动作可以以任何合适的方式排序。因而,可以构造这样的实施例,其中以与所示出的顺序不同的顺序执行动作,即使在说明性实施例中被示为顺序动作,也可以包括同时地执行一些动作。

[0182] 上述实施例的各个方面可以单独使用,组合使用或以在前述实施例中未具体讨论的各种布置使用,因此,其应用不限于在前述描述中阐述或在附图中示出的组件的细节和布置。例如,一个实施例中描述的各个方面可以以任何方式与其它实施例中所述的各个方面组合。

[0183] 另外,本文所使用的措词和术语是出于描述的目的,并且不应被视为限制。本文中“包括…”、“包含…”、“具有…”、“含有…”、“涉及…”及其变体的使用意在涵盖其后列出的项目及其等同物以及其它项目。

[0184] 单词“例证性”在本文中用来表示用作示例、实例或例示说明。因此,除非另外指出,否则本文中描述为例证性的任何实施例、实施方式、过程、特征等都应被理解为说明性示例,并且不应被理解为优选或有利示例。

[0185] 因而,已经描述了至少一个实施例的几个方面,应明白,本领域技术人员将容易想到各种改变、修改和改进。这些改变、修改和改进旨在成为本公开的一部分,并且旨在落入本文所述的原理的精神和范围内。因而,前面的描述和附图仅作为示例。

[0186] 一种用于测量锂离子电池的荷电状态(SoC)和健康状态(SoH)的装置可以体现为不同的配置。如下所述,示例配置可以包括配置(1)至(22)和(123)的任何组合或多种组合。

[0187] (1)一种用于测量锂离子电池的荷电状态(SoC)和/或健康状态(SoH)的装置,所述装置包括:被配置成测量所述锂离子电池的物理特性和/或化学特性的至少一个设备,其中根据所测得的物理特性和/或化学特性确定所述锂离子电池的SoC和SoH。

[0188] (2)根据配置(1)所述的装置,其中,所述至少一个设备包括至少一个超声换能器。

[0189] (3)根据配置(2)所述的装置,其中,所述至少一个超声换能器包括:至少一个发射超声换能器,其被配置成位于所述锂离子电池的一侧;和至少一个接收超声换能器,其被配

置成位于所述锂离子电池的与所述至少一个发射超声换能器相反的一侧。

[0190] (4) 根据配置 (1) - (3) 所述的装置, 其中: 所述至少一个发射超声换能器被配置成将至少一个超声波发射到所述锂离子电池中; 并且所述至少一个接收超声换能器被配置成用于接收和测量所述至少一个超声波; 并且根据所述至少一个超声波确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0191] (5) 根据配置 (1) - (4) 所述的装置, 其中, 所述至少一个发射超声换能器被配置成接收和测量所述至少一个超声波的从所述锂离子电池的外边界或从所述锂离子电池内的内部结构反射的一部分, 并且根据所述至少一个超声波的所述一部分确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0192] (6) 根据配置 (1) - (5) 所述的装置, 其中, 所述至少一个发射超声换能器和所述至少一个接收超声换能器被配置成接收和测量所述至少一个超声波在所述锂离子电池内反射多次的部分, 并且根据所述至少一个超声波的所述部分确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0193] (7) 根据配置 (1) - (6) 所述的装置, 其中, 所述至少一个设备包括至少一个应变仪和/或至少一个加速度计, 所述至少一个应变仪和/或所述至少一个加速度计被配置成测量所述锂离子电池的响应于外部振动激励或经校准的力的振动和/或加速度, 以确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0194] (8) 根据配置 (1) - (7) 所述的装置, 其中, 所述至少一个设备包括至少一个电光传感器, 所述至少一个电光传感器被配置成测量对在所述锂离子电池上的振动激励或经校准的力输入的振动响应。

[0195] (9) 根据配置 (1) - (8) 所述的装置, 其中, 在所述锂离子电池上输入的激励或经校准的力来自电磁振荡器、仪器化落锤、经校准的弹簧加载脉冲探头、由锂离子电池周围的环境条件产生的周围噪声、振动计和/或声学或超声换能器。

[0196] (10) 根据配置 (1) - (9) 所述的装置, 其中, 所述装置还包括被配置成摇动所述锂离子电池的振荡器, 并且所述至少一个应变仪和/或所述至少一个加速度计被配置成测量所述锂离子电池的响应于所述振荡器摇动所述锂离子电池的运动, 并且能够根据所测得的运动确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0197] (11) 根据配置 (1) - (10) 所述的装置, 其中, 所述至少一个设备包括第一声学换能器和第二声学换能器, 其中: 所述第一声学换能器被配置成将至少一个声波发射到所述锂离子电池, 并且接收和测量所述至少一个声波的从所述锂离子电池反射的第一部分; 并且所述第二声学换能器被配置成接收和测量所述至少一个声波的穿过所述锂离子电池透射的第二部分。

[0198] (12) 根据配置 (1) - (11) 所述的装置, 其中, 所述装置还包括至少一个加速度计, 所述至少一个加速度计被配置成测量所述锂离子电池的来自所述至少一个声波的激励。

[0199] (13) 根据配置 (1) - (12) 所述的装置, 其中, 所述锂离子电池的SoC和/或SoH至少是根据所述至少一个声波的所述第一部分、所述至少一个声波的所述第二部分以及所述锂离子电池的激励确定的。

[0200] (14) 根据配置 (1) - (13) 所述的装置, 其中, 所述至少一个设备包括: 用于向所述锂离子电池施加静态力或动态力的设备, 其中, 所述设备在垂直于所述锂离子电池的平面的

方向上向在其边缘上安装的、下方有间隙的所述锂离子电池施加力；和用于测量所述锂离子电池的响应于所述力的偏转的设备，其中根据所述偏转确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0201] (15) 根据配置(1) - (14)所述的装置，其中，所述至少一个设备包括：用于向所述锂离子电池施加至少一个力的设备，其中，所述设备：在垂直于所述锂离子电池的平面的第一方向上向所述锂离子电池施加第一力；和在第二方向上向所述锂离子电池施加第二力，其中所述第二方向与所述第一方向相反或所述第二力是由于刚性背衬而产生的反作用力；和用于测量在所述锂离子电池的厚度上的响应于所述力的变化的设备，其中，根据所述厚度的变化确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0202] (16) 根据配置(1) - (15)所述的装置，其中，所述至少一个设备包括硬度计，所述硬度计被配置成：在所述锂离子电池的表面中产生凹痕；以及测量所述锂离子电池的表面中的所述凹痕的深度，其中，根据所述凹痕的深度确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0203] (17) 根据配置(1) - (16)所述的装置，其中，所述至少一个设备包括被配置成测量所述锂离子电池的重量的秤，并且根据所测得的所述锂离子电池的重量确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0204] (18) 根据配置(1) - (17)所述的装置，其中，所述秤被配置成将所述锂离子电池浸没在流体中，并且所述秤被配置成在所述锂离子电池被浸没在所述流体中的同时测量所述锂离子电池的重量。

[0205] (19) 根据配置(1) - (18)所述的装置，其中，所述装置还包括：用于测量由被浸没在流体中时的所述锂离子电池置换的流体的量的设备，并且根据所测得的由所述锂离子电池置换的流体的量确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0206] (20) 根据配置(1) - (19)所述的装置，其中，所述至少一个设备包括至少一个X射线设备。

[0207] (21) 根据配置(1) - (20)所述的装置，其中，所述至少一个X射线设备包括：第一X射线发射器，其被配置成位于所述锂离子电池的一侧；第一X射线检测器，其被配置成位于所述锂离子电池的与所述第一X射线发射器相反的一侧；以及第二X射线发射器，其被配置成位于与所述第一X射线发射器相同的一侧。

[0208] (22) 根据配置(1) - (21)所述的装置，其中，所述第一X射线发射器被配置成将至少一个X射线包发射到所述锂离子电池中；所述第一X射线检测器被配置成接收和测量所述至少一个X射线包的穿过所述锂离子电池透射的第一部分；并且所述第二X射线检测器被配置成接收和测量所述至少一个X射线包的从所述锂离子电池反向散射的第二部分；至少根据所述至少一个X射线包的所述第一部分和所述第二部分确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0209] 一种用于确定锂离子电池的荷电状态(SoC)和/或健康状态(SoH)的系统可以体现为不同的配置。示例配置可以包括如下所述的配置(23)至(44)和(124)的任何组合或多个组合。

[0210] (23) 一种用于确定锂离子电池的SoC和SoH的系统，所述系统包括：包括被配置为测量锂离子电池的物理特性和/或化学特性的至少一个设备的装置；至少一个计算设备，其被配置成接收和分析来自所述设备的至少一个信号以确定所述锂离子电池的SoC和SoH。

[0211] (24) 根据配置 (23) 所述的系统, 其中, 所述至少一个设备包括至少一个超声换能器。

[0212] (25) 根据配置 (23) - (24) 所述的系统, 其中, 所述至少一个超声换能器包括: 至少一个发射超声换能器, 其被配置成位于所述锂离子电池的一侧; 和至少一个接收超声换能器, 其被配置成位于所述锂离子电池的与所述至少一个发射超声换能器相反的一侧。

[0213] (26) 根据配置 (23) - (25) 所述的系统, 其中: 所述至少一个发射超声换能器被配置成将至少一个超声波发射到所述锂离子电池中; 所述至少一个接收超声换能器被配置成接收和测量所述至少一个超声波; 并且根据所述至少一个超声波确定所述锂离子电池的SoC 和/或SoH。

[0214] (27) 根据配置 (23) - (26) 所述的系统, 其中, 所述至少一个发射超声换能器被配置成接收和测量所述至少一个超声波的从所述锂离子电池的外边界或从所述锂离子电池内的内部结构反射的一部分, 并且根据所述至少一个超声波的所述一部分确定所述锂离子电池的SoC 和/或SoH。

[0215] (28) 根据配置 (23) - (27) 所述的系统, 其中, 所述至少一个发射超声换能器和所述至少一个接收超声换能器被配置成接收和测量所述至少一个超声波在所述锂离子电池内反射多次的部分, 并且根据所述至少一个超声波的所述部分确定所述锂离子电池的SoC 和/或SoH。

[0216] (29) 根据配置 (23) - (28) 所述的系统, 其中, 所述至少一个设备包括至少一个应变仪和/或至少一个加速度计, 所述至少一个应变仪和/或所述至少一个加速度计被配置成测量所述锂离子电池的响应于外部刺激或经校准的力的振动和/或加速度, 以确定所述锂离子电池的SoC 和/或SoH。

[0217] (30) 根据配置 (23) - (29) 所述的系统, 其中, 所述至少一个设备包括至少一个电光传感器, 所述至少一个电光传感器被配置成测量对在所述锂离子电池上的外部刺激或经校准的力输入的振动响应。

[0218] (31) 根据配置 (23) - (30) 所述的系统, 其中, 所述锂离子电池上的经校准的力输入或外部刺激来自电磁振荡器、仪器化落锤、经校准的弹簧加载脉冲探头、由锂离子电池周围的环境条件产生的周围噪声、振动计和/或声学或超声换能器。

[0219] (32) 根据配置 (23) - (31) 所述的系统, 其中, 所述系统还包括被配置成摇动所述锂离子电池的振荡器, 并且所述至少一个应变仪和/或所述至少一个加速度计被配置成测量所述锂离子电池的响应于所述振荡器摇动所述锂离子电池的运动, 并且能够根据所测得的运动确定所述锂离子电池的SoC 和/或SoH。

[0220] (33) 根据配置 (23) - (32) 所述的系统, 其中, 所述至少一个设备包括第一声学(音频频率)换能器和第二声学(音频频率)换能器, 其中: 所述第一声学换能器被配置成将至少一个声波发射到所述锂离子电池, 并且接收和测量所述至少一个声波的从所述锂离子电池反射的第一部分; 并且所述第二声换能器被配置成接收和测量所述至少一个声波的穿过所述锂离子电池透射的第二部分。

[0221] (34) 根据配置 (23) - (33) 所述的系统, 其中, 所述系统还包括至少一个加速度计, 所述至少一个加速度计被配置成测量所述锂离子电池的来自所述至少一个声波的激励。

[0222] (35) 根据配置 (23) - (34) 所述的系统, 其中, 所述锂离子电池的SoC 和/或SoH至少

是根据所述至少一个声波的所述第一部分、所述至少一个声波的所述第二部分以及所述锂离子电池的激励确定的。

[0223] (36) 根据配置 (23) - (35) 所述的系统,其中,所述至少一个设备包括:用于向所述锂离子电池施加静态力或动态力的设备,其中,所述设备在垂直于所述锂离子电池的平面的方向上向通过其边缘悬置的、下方有间隙的所述锂离子电池施加力;和用于测量所述锂离子电池的响应于所述力的偏转的设备,其中根据所述偏转确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0224] (37) 根据配置 (23) - (36) 所述的系统,其中,所述至少一个设备包括:用于向所述锂离子电池施加至少一个力的设备,其中,所述设备:在垂直于所述锂离子电池的平面的第一方向上向所述锂离子电池施加第一力;和在第二方向上向所述锂离子电池施加第二力,其中所述第二方向与所述第一方向相反或所述第二力是由于刚性背衬而产生的反作用力;和用于测量在所述锂离子电池的厚度上的响应于所述力的变化的设备,其中,根据所述厚度的变化确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0225] (38) 根据配置 (23) - (37) 所述的系统,其中,所述至少一个设备包括硬度计,所述硬度计被配置成:在所述锂离子电池的表面中产生凹痕;以及测量所述锂离子电池的表面中的所述凹痕的深度,其中,根据所述凹痕的深度确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0226] (39) 根据配置 (23) - (38) 所述的系统,其中,所述至少一个设备包括被配置成测量所述锂离子电池的重量的秤,并且根据所测得的所述锂离子电池的重量确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0227] (40) 根据配置 (23) - (39) 所述的系统,其中,所述秤被配置成将所述锂离子电池浸没在流体中,并且所述秤被配置成在所述锂离子电池被浸没在所述流体中的同时测量所述锂离子电池的重量。

[0228] (41) 根据配置 (23) - (40) 所述的系统,其中,所述系统还包括:用于测量由被浸没在流体中时的所述锂离子电池置换的流体的量的设备,并且根据所测得的由所述锂离子电池置换的流体的量确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0229] (42) 根据配置 (23) - (41) 所述的系统,其中,所述至少一个设备包括至少一个X射线设备。

[0230] (43) 根据配置 (23) - (42) 所述的系统,其中,所述至少一个X射线设备包括:第一X射线发射器,其被配置成位于所述锂离子电池的一侧;第一X射线检测器,其被配置成位于所述锂离子电池的与所述第一X射线发射器相反的一侧;以及第二X射线检测器,其被配置成位于与所述第一X射线发射器相同的一侧。

[0231] (44) 根据配置 (23) - (43) 所述的系统,其中,所述第一X射线发射器被配置成将至少一个X射线包发射到所述锂离子电池中;所述第一X射线检测器被配置成接收和测量所述至少一个X射线包的穿过所述锂离子电池透射的第一部分;并且所述第二X射线检测器被配置成接收和测量所述至少一个X射线包的从所述锂离子电池反向散射的第二部分;至少根据所述至少一个X射线包的所述第一部分和所述第二部分确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0232] 一种用于破坏锂离子电池的SSEI层的装置。示例配置可以包括如下所述的配置 (45) 至 (72) 和 (125) 的任何组合或多个组合。

[0233] (45) 一种用于破坏锂离子电池的二次固体电解质中间相(SSEI)层的装置,所述装置包括:被配置成破坏所述锂离子电池的所述SSEI层的至少一个设备。

[0234] (46) 根据配置(45)所述的装置,其中,所述至少一个设备包括多个超声换能器。

[0235] (47) 根据配置(45) - (46)所述的装置,其中,所述多个超声换能器被配置成将高能超声波发射到所述锂离子电池中以破坏所述SSEI层。

[0236] (48) 根据配置(45) - (47)所述的装置,其中,所述高能超声波的频率等于所述SSEI层的分子键的共振频率。

[0237] (49) 根据配置(45) - (48)所述的装置,其中,所述高能超声波被设计成在所述SSEI层中引起气蚀。

[0238] (50) 根据配置(45) - (49)所述的装置,其中,所述高能超声波被设计成激励所述锂离子电池的阳极和/或阴极中的一个或多个结构共振。

[0239] (51) 根据配置(45) - (50)所述的装置,其中,所述高能超声波包括连续波、短纯音、脉冲和/或啁啾。

[0240] (52) 根据配置(45) - (51)所述的装置,其中,所述多个超声换能器利用相控阵超声。

[0241] (53) 根据配置(45) - (52)所述的装置,其中,所述多个超声换能器被配置成将超声波发射到所述锂离子电池中,使得所述超声波在期望位置处相长地干涉。

[0242] (54) 根据配置(45) - (53)所述的装置,其中,所述超声波在所述SSEI层处相长地干涉以破坏所述SSEI层。

[0243] (55) 根据配置(45) - (54)所述的装置,其中,通过在所述多个超声换能器的超声换能器之间设置预定的相移,所述超声波在期望的位置处相长地干涉。

[0244] (56) 根据配置(45) - (55)所述的装置,其中,所述至少一个设备包括至少一个X射线发射器。

[0245] (57) 根据配置(45) - (56)所述的装置,其中,所述至少一个X射线发射器被配置为将X射线发射到所述锂离子电池中以破坏所述SSEI层。

[0246] (58) 根据配置(45) - (57)所述的装置,其中,所发射的X射线的能量由所述SSEI层的吸收特性确定。

[0247] (59) 根据配置(45) - (58)所述的装置,其中,所述至少一个X射线发射器被配置成在与所述锂离子电池的平面平行的方向上将X射线发射到所述锂离子电池中,以在所述锂离子电池中引起等离子体共振。

[0248] (60) 根据配置(45) - (59)所述的装置,其中,所述至少一个设备包括至少一个电流源,并且所述至少一个电流源被配置成以引起强烈的共振结构响应的频率驱动交流电流通过所述锂离子电池以破坏所述SSEI层。

[0249] (61) 根据配置(45) - (60)所述的装置,其中,所述至少一个电流源连接至所述锂离子电池的阳极和阴极。

[0250] (62) 根据配置(45) - (61)所述的装置,其中,所述至少一个设备包括被配置成产生类似于短路的能量状况的电路,以在所述锂离子电池内产生强电子力以破坏所述SSEI层。

[0251] (63) 根据配置(45) - (62)所述的装置,其中,所述电路被配置成通过跨越所述锂离子电池的阳极和阴极放置低阻抗,并迫使大电流流过所述锂离子电池,产生类似于所述锂

离子电池内的短路的能量状况。

[0252] (64) 根据配置 (45) - (63) 所述的装置, 其中, 所述至少一个设备包括外部摇动件, 所述外部摇动件被配置成将所述锂离子电池的电解质驱动为谐波水平运动以破坏所述SSEI层。

[0253] (65) 根据配置 (45) - (64) 所述的装置, 其中, 所述外部摇动件被配置成通过使所述外部摇动件绕垂直于所述锂离子电池的平面的轴线摇动而将所述锂离子电池的电解质驱动为谐波水平运动。

[0254] (66) 根据配置 (45) - (65) 所述的装置, 其中, 所述外部摇动件被配置成驱动所述锂离子电池的电解质进入谐波水平运动, 以在所述锂离子电池的阳极和阴极的表面上产生剪切应力, 以破坏所述SSEI层。

[0255] (67) 根据配置 (45) - (66) 所述的装置, 其中, 所述至少一个设备包括旋转设备, 所述旋转设备被配置成旋转所述锂离子电池以破坏所述SSEI层。

[0256] (68) 根据配置 (45) - (67) 所述的装置, 其中, 所述旋转设备被配置成使所述锂离子电池绕垂直于所述锂离子电池的平面的轴线旋转。

[0257] (69) 根据配置 (45) - (68) 所述的装置, 其中, 所述旋转设备被配置成使所述锂离子电池以连续旋转或振荡旋转而旋转, 以在所述锂离子电池的电解质内引起流动并在所述SSEI层上引起高剪切力以破坏所述SSEI层。

[0258] (70) 根据配置 (45) - (69) 所述的装置, 其中, 所述至少一个设备包括至少一个高能超声换能器, 所述至少一个高能超声换能器被配置成发射平行于所述锂离子电池的阳极和阴极的表面的高能超声波, 从而在所述锂离子电池的电解质中产生冲流并产生高剪切力以破坏所述SSEI层。

[0259] (71) 根据配置 (45) - (70) 所述的装置, 其中, 所述至少一个设备包括控制所述锂离子电池的环境以破坏所述SSEI层的设备。

[0260] (72) 根据配置 (45) - (71) 所述的装置, 其中, 控制所述锂离子电池的环境的设备被配置成向所述锂离子电池施加热或从所述锂离子电池去除热。

[0261] 用于确定锂离子电池的SoC和SoH的方法可以包括各种过程。示例方法可包括如下所述的过程 (73) 至 (94) 和 (126) 的任何组合或多种组合。

[0262] (73) 一种用于确定锂离子电池的荷电状态 (SoC) 和/或健康状态 (SoH) 的方法, 所述方法包括: 利用至少一个设备测量所述锂离子电池的物理特性和/或化学特性; 根据所测得的物理特性和/或化学特性确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0263] (74) 根据配置 (73) 所述的方法, 其中, 所述至少一个设备包括至少一个超声换能器。

[0264] (75) 根据配置 (73) - (74) 所述的方法, 其中, 所述至少一个超声换能器包括: 至少一个发射超声换能器, 其被配置成位于所述锂离子电池的一侧; 和至少一个接收超声换能器, 其被配置成位于所述锂离子电池的与所述至少一个发射超声换能器相反的一侧。

[0265] (76) 根据配置 (73) - (75) 所述的方法, 其中: 所述至少一个发射超声换能器被配置成将至少一个超声波发射到所述锂离子电池中; 并且所述至少一个接收超声换能器被配置成用于接收和测量所述至少一个超声波; 并且根据所述至少一个超声波确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0266] (77) 根据配置(73) - (76)所述的方法,其中,所述至少一个发射超声换能器被配置成接收和测量所述至少一个超声波的从所述锂离子电池的外边界或从所述锂离子电池内的内部结构反射的一部分,并且根据所述至少一个超声波的所述一部分确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0267] (78) 根据配置(73) - (77)所述的方法,其中,所述至少一个发射超声换能器和所述至少一个接收超声换能器被配置成接收和测量所述至少一个超声波在所述锂离子电池内反射多次的部分,并且根据所述至少一个超声波的所述部分确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0268] (79) 根据配置(73) - (78)所述的方法,其中,所述至少一个设备包括至少一个应变仪和/或至少一个加速度计,所述至少一个应变仪和/或所述至少一个加速度计被配置成测量所述锂离子电池的响应于外部振动刺激或经校准的力的振动和/或加速度,并且根据所测得的振动和/或加速度确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0269] (80) 根据配置(73) - (79)所述的方法,其中,所述至少一个设备包括至少一个电光传感器,所述至少一个电光传感器被配置成测量对在所述锂离子电池上的外部振动刺激或经校准的力输入的振动响应。

[0270] (81) 根据配置(73) - (80)所述的方法,其中,所述锂离子电池上的经校准的力输入或外部刺激来自电磁振荡器或振动计、仪器化落锤、经校准的弹簧加载脉冲探头、由锂离子电池周围的环境条件产生的周围噪声、和/或声学或超声换能器。

[0271] (82) 根据配置(73) - (81)所述的方法,其中,所述方法还包括被配置成摇动所述锂离子电池的振荡器,并且所述至少一个应变仪、所述至少一个加速度计和/或所述至少一个光电传感器被配置成测量所述锂离子电池的响应于所述振荡器摇动所述锂离子电池的运动,并且能够根据所测得的运动确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0272] (83) 根据配置(73) - (82)所述的方法,其中,所述至少一个设备包括第一声学换能器和第二声学换能器,其中:所述第一声学换能器被配置成将至少一个声波发射到所述锂离子电池,并且接收和测量所述至少一个声波的从所述锂离子电池反射的第一部分;并且所述第二声学换能器被配置成接收和测量所述至少一个声波的穿过所述锂离子电池透射的第二部分。

[0273] (84) 根据配置(73) - (83)所述的方法,其中,所述方法还包括至少一个加速度计,所述至少一个加速度计被配置成测量所述锂离子电池的来自所述至少一个声波的激励。

[0274] (85) 根据配置(73) - (84)所述的方法,其中,所述锂离子电池的SoC和/或SoH至少是根据所述至少一个声波的所述第一部分、所述至少一个声波的所述第二部分以及所述锂离子电池的激励确定的。

[0275] (86) 根据配置(73) - (85)所述的方法,其中,所述至少一个设备包括:用于向所述锂离子电池施加静态力或动态力的设备,其中,所述设备在垂直于所述锂离子电池的平面的方向上向在其边缘上安装的、下方有间隙的所述锂离子电池施加力;和用于测量所述锂离子电池的响应于所述力的偏转的设备,其中根据所述偏转确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0276] (87) 根据配置(73) - (86)所述的方法,其中,所述至少一个设备包括:用于向所述锂离子电池施加至少一个力的设备,其中,所述设备:在垂直于所述锂离子电池的平面的第

一方向上向所述锂离子电池施加第一力；和在第二方向上向所述锂离子电池施加第二力，其中所述第二方向与所述第一方向相反或所述第二力是由于刚性背衬而产生的反作用力；和用于测量在所述锂离子电池的厚度上的响应于所述力的变化的设备，其中，根据所述厚度的变化确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0277] (88) 根据配置(73) - (87) 所述的方法，其中，所述至少一个设备包括硬度计，所述硬度计被配置成：在所述锂离子电池的表面中产生凹痕；以及测量所述锂离子电池的表面中的所述凹痕的深度，其中，根据所述凹痕的深度确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0278] (89) 根据配置(73) - (88) 所述的方法，其中，所述至少一个设备包括被配置成测量所述锂离子电池的重量的秤，并且根据所测得的所述锂离子电池的重量确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0279] (90) 根据配置(73) - (89) 所述的方法，其中，所述秤被配置成将所述锂离子电池浸没在流体中，并且所述秤被配置成在所述锂离子电池被浸没在所述流体中的同时测量所述锂离子电池的重量。

[0280] (91) 根据配置(73) - (90) 所述的方法，还包括：用于测量由被浸没在流体中时的所述锂离子电池置换的流体的量的设备，并且根据所测得的由所述锂离子电池置换的流体的量确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0281] (92) 根据配置(73) - (91) 所述的方法，其中，所述至少一个设备包括至少一个X射线设备。

[0282] (93) 根据配置(73) - (92) 所述的方法，其中，所述至少一个X射线设备包括：第一X射线发射器，其被配置成位于所述锂离子电池的一侧；第一X射线检测器，其被配置成位于所述锂离子电池的与所述第一X射线发射器相反的一侧；以及第二X射线检测器，其被配置成位于所述锂离子电池的与所述第一X射线发射器相同的一侧。

[0283] (94) 根据配置(73) - (93) 所述的方法，其中，所述第一X射线发射器被配置成将至少一个X射线包发射到所述锂离子电池中；所述第一X射线检测器被配置成接收和测量所述至少一个X射线包的穿过所述锂离子电池透射的第一部分；并且所述第二X射线检测器被配置成接收和测量所述至少一个X射线包的从所述锂离子电池反向散射的第二部分；至少根据所述至少一个X射线包的所述第一部分和所述第二部分确定所述锂离子电池的SoC和/或SoH。

[0284] 用于恢复锂离子电池的方法可以包括各种过程。示例方法可以包括如下所述的过程(95)至(122)和(127)的任何组合或多种组合。

[0285] (95) 一种用于恢复锂离子电池的方法，所述方法包括：利用至少一个设备破坏所述锂离子电池的二次固体电解质中间相(SSEI)层。

[0286] (96) 根据配置(95)所述的方法，其中，所述至少一个设备包括多个超声换能器。

[0287] (97) 根据配置(95) - (96) 所述的方法，其中，所述多个超声换能器被配置成将高能超声波发射到所述锂离子电池中以破坏所述SSEI层。

[0288] (98) 根据配置(95) - (97) 所述的方法，其中，所述高能超声波的频率等于所述SSEI层的分子键的共振频率。

[0289] (99) 根据配置(95) - (98) 所述的方法，其中，所述高能超声波被设计成在所述SSEI层中引起气蚀。

[0290] (100) 根据配置 (95) - (99) 所述的方法, 其中, 所述高能超声波被设计成在所述锂离子电池的阳极和/或阴极处激励结构共振。

[0291] (101) 根据配置 (95) - (100) 所述的方法, 其中, 所述高能超声波包括连续波、短纯音、脉冲和/或啁啾。

[0292] (102) 根据配置 (95) - (101) 所述的方法, 其中, 所述多个超声换能器利用相控阵超声。

[0293] (103) 根据配置 (95) - (102) 所述的方法, 其中, 所述多个超声换能器被配置成将超声波发送到所述锂离子电池中, 使得所述超声波在期望位置处相长地干涉。

[0294] (104) 根据配置 (95) - (103) 所述的方法, 其中, 所述超声波在所述SSEI层处相长地干涉以破坏所述SSEI层。

[0295] (105) 根据配置 (95) - (104) 所述的方法, 其中, 通过在所述多个超声换能器的超声换能器之间设置预定的相移, 所述超声波在期望的位置处相长地干涉。

[0296] (106) 根据配置 (95) - (105) 所述的方法, 其中, 所述至少一个设备包括至少一个X射线发射器。

[0297] (107) 根据配置 (95) - (106) 所述的方法, 其中, 所述至少一个X射线发射器被配置为将X射线发射到所述锂离子电池中以破坏所述SSEI层。

[0298] (108) 根据配置 (95) - (107) 所述的方法, 其中, 所发射的X射线的能量由所述SSEI层的吸收特性确定。

[0299] (109) 根据配置 (95) - (108) 所述的方法, 其中, 所述至少一个X射线发射器被配置成在与所述锂离子电池的平面平行的方向上将X射线发射到所述锂离子电池中, 以在所述锂离子电池中引起等离子体共振。

[0300] (110) 根据配置 (95) - (109) 所述的方法, 其中, 所述至少一个设备包括至少一个电流源, 并且所述至少一个电流源被配置成以结构共振的频率驱动交流电流通过所述锂离子电池以破坏SSEI层。

[0301] (111) 根据配置 (95) - (110) 所述的方法, 其中, 所述至少一个电流源连接至所述锂离子电池的阳极和阴极。

[0302] (112) 根据配置 (95) - (111) 所述的方法, 其中, 所述至少一个设备包括被配置成产生类似于短路的能量状况的电路, 以在所述锂离子电池内产生强电子力以破坏所述SSEI层。

[0303] (113) 根据配置 (95) - (112) 所述的方法, 其中, 所述电路被配置成通过跨越所述锂离子电池的阳极和阴极放置低阻抗, 并迫使大电流流过所述锂离子电池, 产生类似于短路的能量状况以在所述锂离子电池内产生强电子力。

[0304] (114) 根据配置 (95) - (113) 所述的方法, 其中, 所述至少一个设备包括外部摇动件, 所述外部摇动件被配置成将所述锂离子电池的电解质驱动为谐波水平运动以破坏所述SSEI层。

[0305] (115) 根据配置 (95) - (114) 所述的方法, 其中, 所述外部摇动件被配置成通过使所述外部摇动件绕垂直于所述锂离子电池的平面的轴线摇动而将所述锂离子电池的电解质驱动为谐波水平运动。

[0306] (116) 根据配置 (95) - (115) 所述的方法, 其中, 所述外部摇动件被配置成驱动所述

锂离子电池的电解质进入谐波水平运动,以在所述锂离子电池的阳极和阴极的表面上产生剪切应力,以破坏所述SSEI层。

[0307] (117) 根据配置 (95) - (116) 所述的方法,其中,所述至少一个设备包括旋转设备,所述旋转设备被配置成旋转所述锂离子电池以破坏所述SSEI层。

[0308] (118) 根据配置 (95) - (117) 所述的方法,其中,所述旋转设备被配置成使所述锂离子电池绕垂直于所述锂离子电池的平面的轴线旋转。

[0309] (119) 根据配置 (95) - (118) 所述的方法,其中,所述旋转设备被配置成使所述锂离子电池以连续旋转或振荡旋转而旋转,以在所述锂离子电池的电解质内引起流动并在所述SSEI层上引起高剪切力以破坏所述SSEI层。

[0310] (120) 根据配置 (95) - (119) 所述的方法,其中,所述至少一个设备包括至少一个高能超声换能器,所述至少一个高能超声换能器被配置成发射平行于所述锂离子电池的阳极和阴极的表面的高能超声波,从而在所述锂离子电池的电解质中产生冲流并产生高剪切力以破坏所述SSEI层。

[0311] (121) 根据配置 (95) - (120) 所述的方法,其中,所述至少一个设备包括控制所述锂离子电池的环境以破坏所述SSEI层的设备。

[0312] (122) 根据配置 (95) - (121) 所述的方法,其中,控制所述锂离子电池的环境的设备被配置成向所述锂离子电池施加热或从所述锂离子电池去除热。

[0313] (123) 根据配置 (1) - (22) 所述的装置,其中,根据所述锂离子电池的SoC和/或SoH确定所述锂离子电池的SSEI层的厚度。

[0314] (124) 根据配置 (23) - (44) 所述的系统,其中,根据所述锂离子电池的SoC和/或SoH确定所述锂离子电池的SSEI层的厚度。

[0315] (125) 根据配置 (73) - (94) 所述的方法,其中,所述方法还包括:根据所述锂离子电池的SoC和/或SoH确定所述锂离子电池的SSEI层的厚度。

[0316] (126) 根据配置 (45) - (72) 所述的装置,其中,所述装置还包括:被配置成降低所述锂离子电池的温度以最小化对所述锂离子电池的潜在附带损害的设备,其中,被配置成降低所述锂离子电池的温度的设备可被配置成在上述用于破坏所述SSEI层的方法中的一个或多个期间降低所述锂离子电池的温度。

[0317] (127) 根据配置 (95) - (122) 所述的方法,其中,所述方法还包括:降低所述锂离子电池的温度以最小化对所述锂离子电池的潜在附带损害,其中,降低所述锂离子电池的温度的步骤能够在上述用于破坏所述SSEI层的方法中的一个或多个之前、期间或之后发生。

100

## 具有反弹的超声脉冲/回声

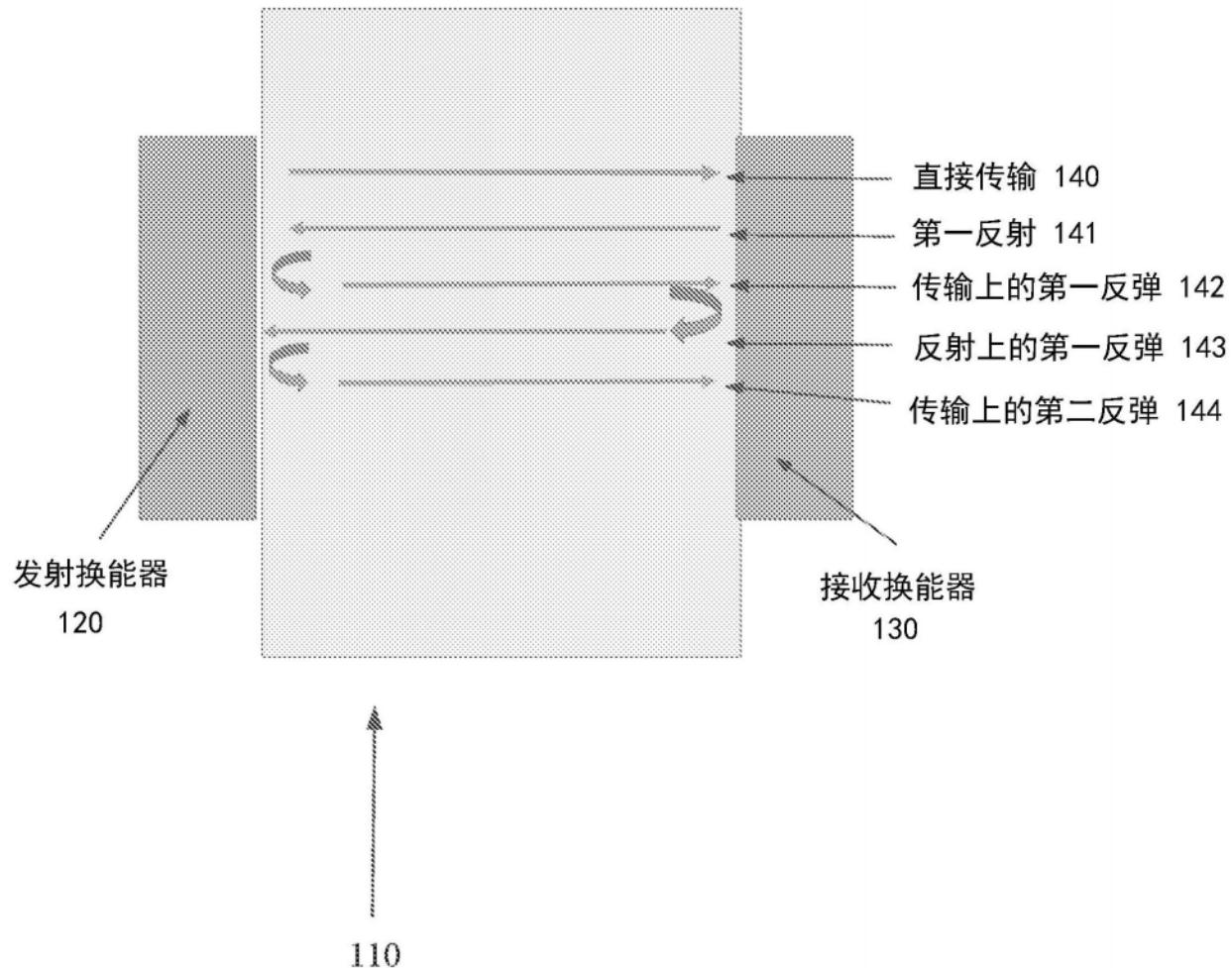


图1

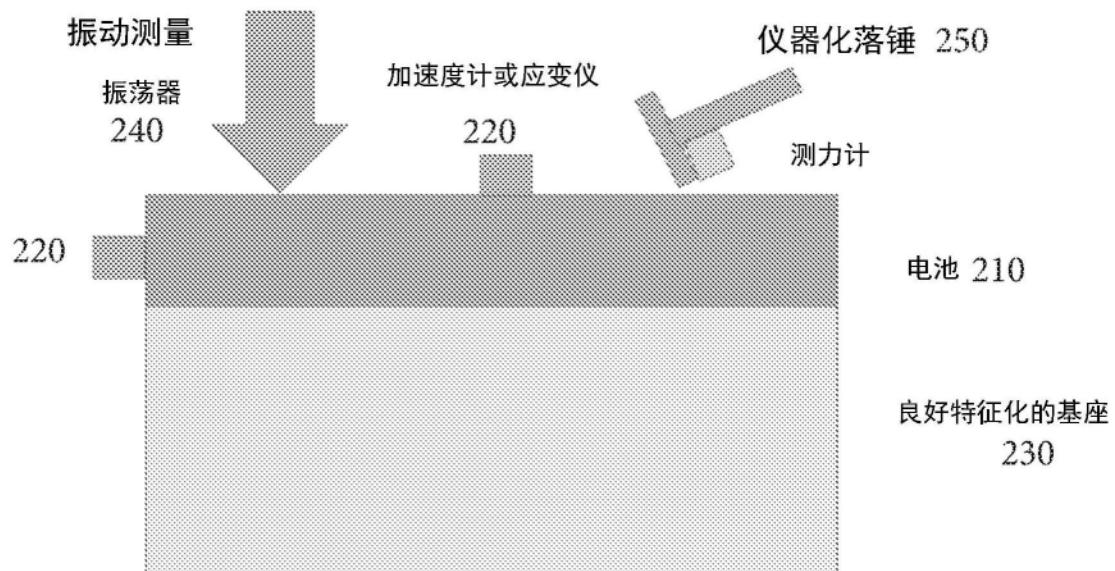
200

图2

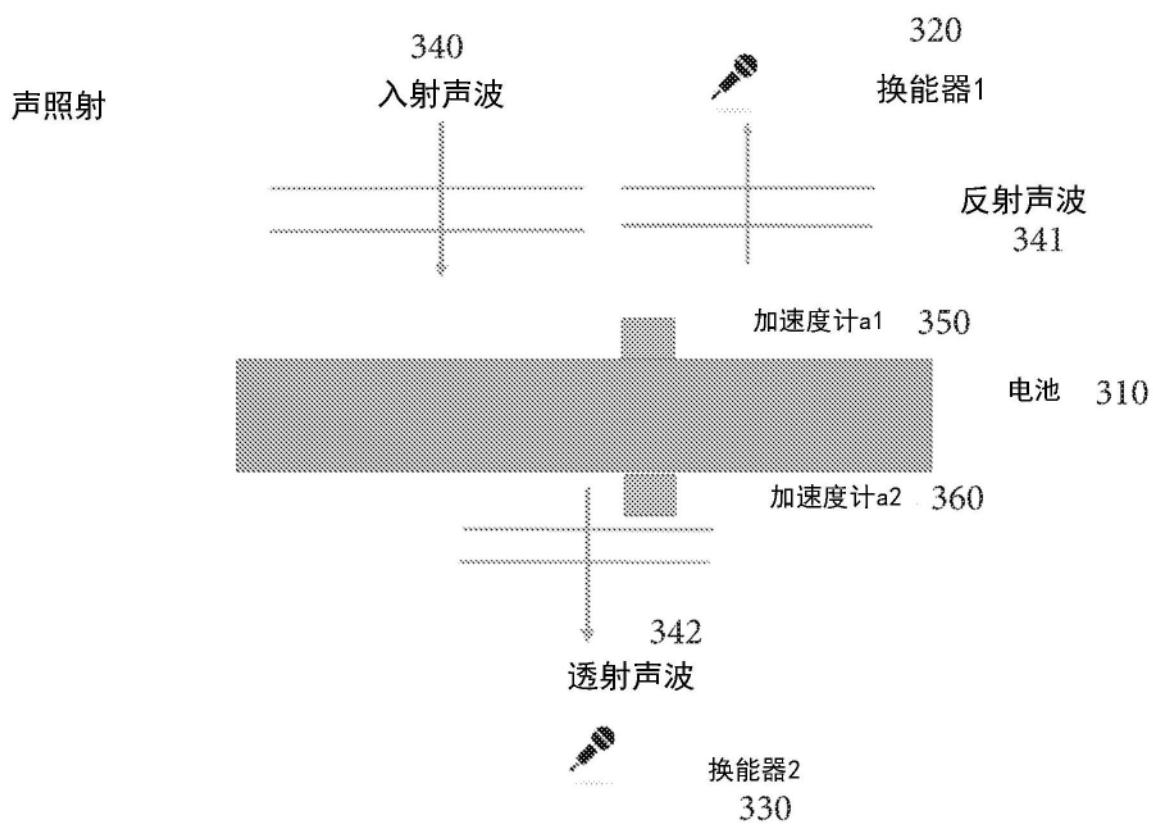
300

图3

400

振荡器测量

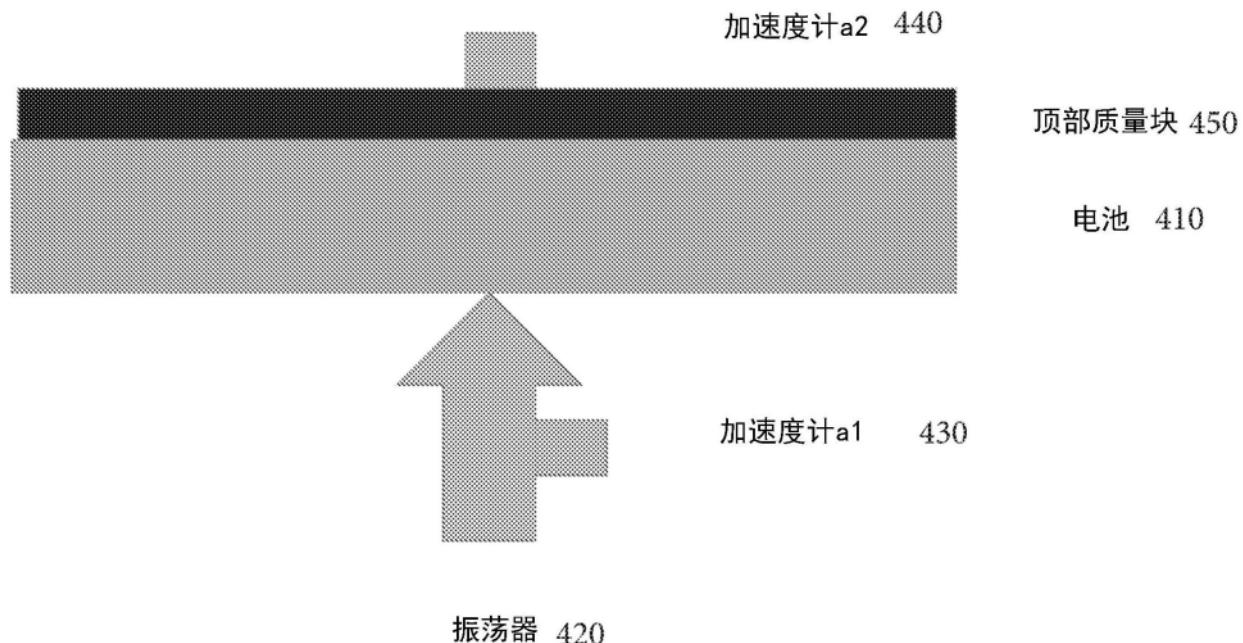


图4

500

弯曲模量测试

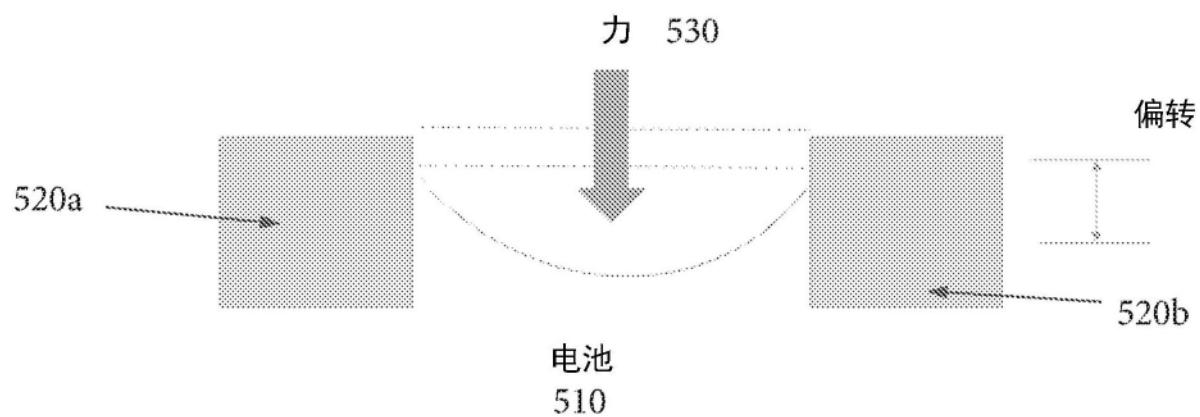


图5

600

"英斯特朗"试验机测试

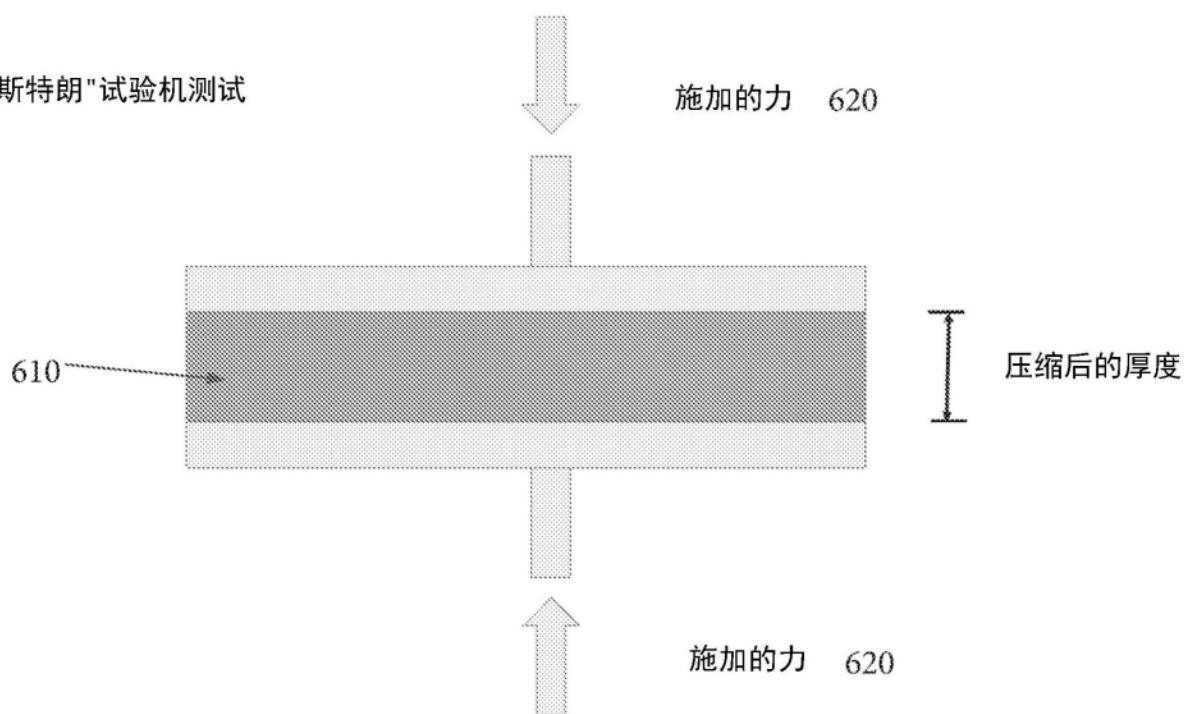


图6

硬度计测试

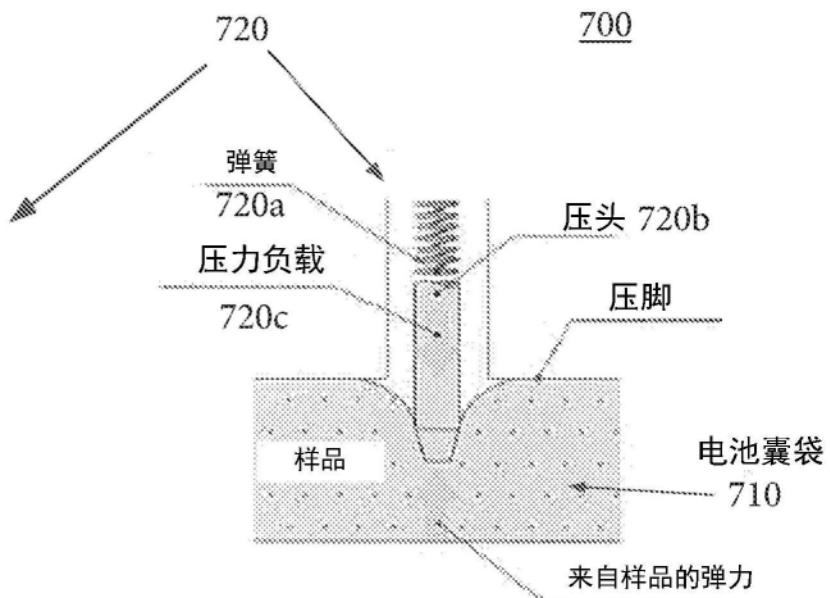
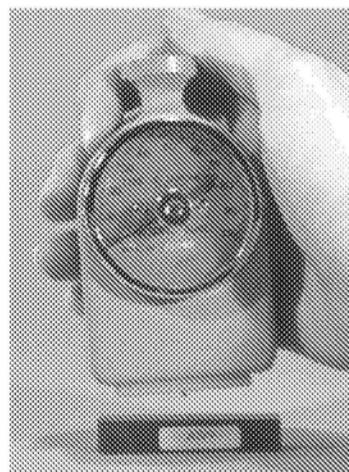


图7

## 有效体积（密度）测量

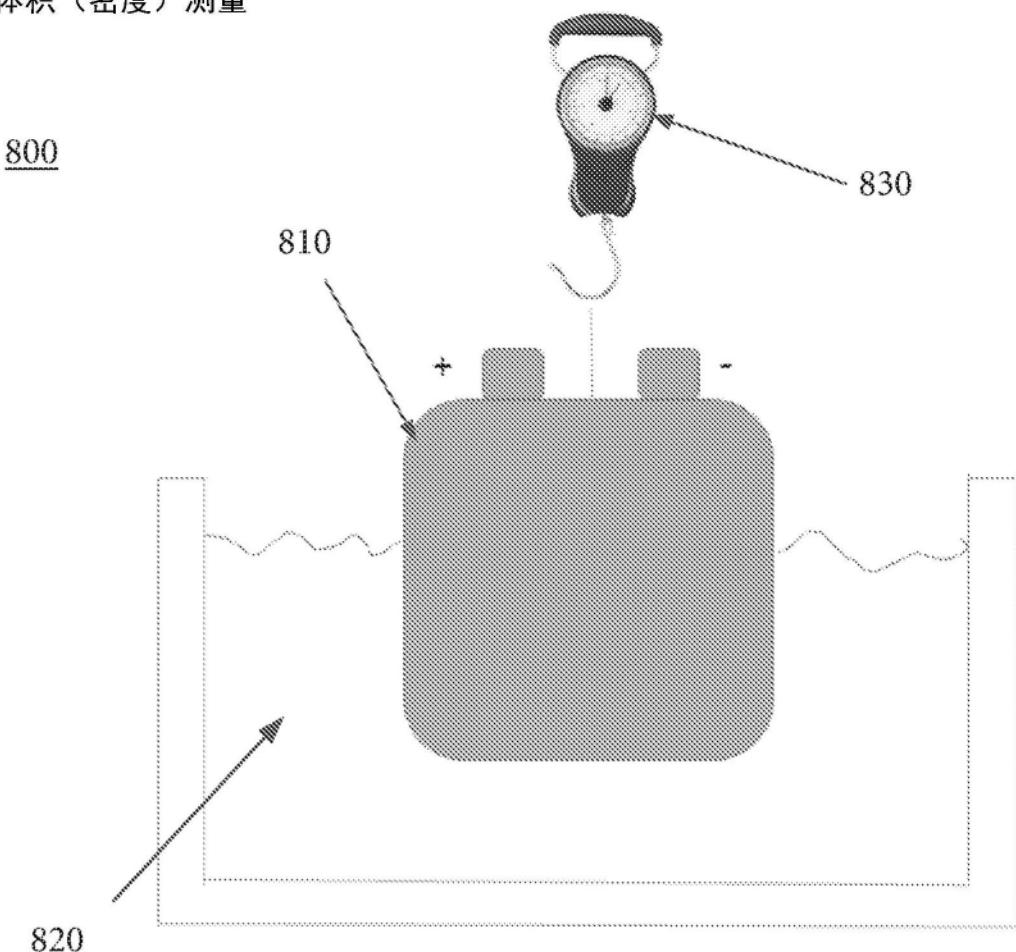


图8

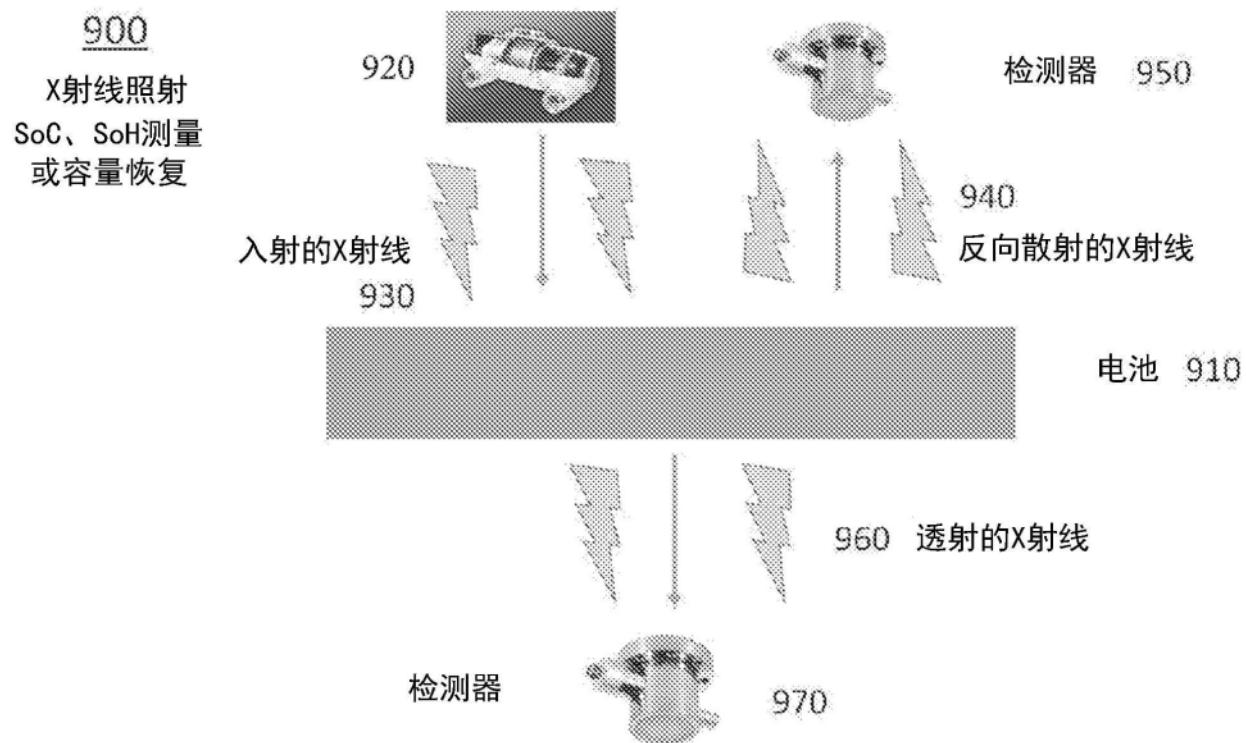


图9

高强度超声

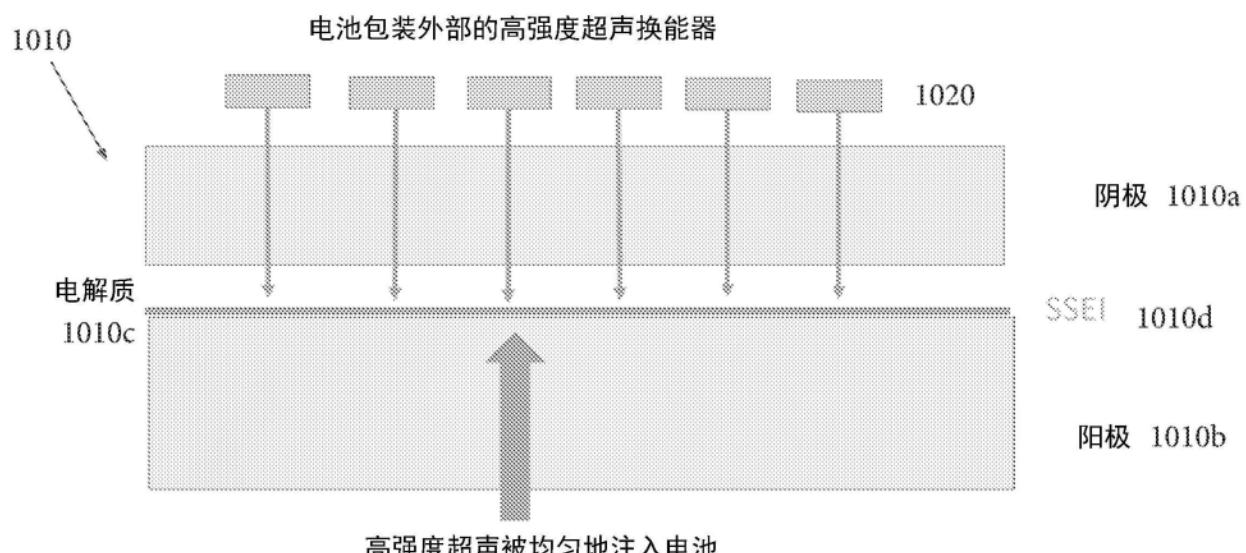
1000

图10

1100

气蚀

具有所需振幅和频率的超声在SSEI表面处产生气蚀。

换能器可以是相控的。

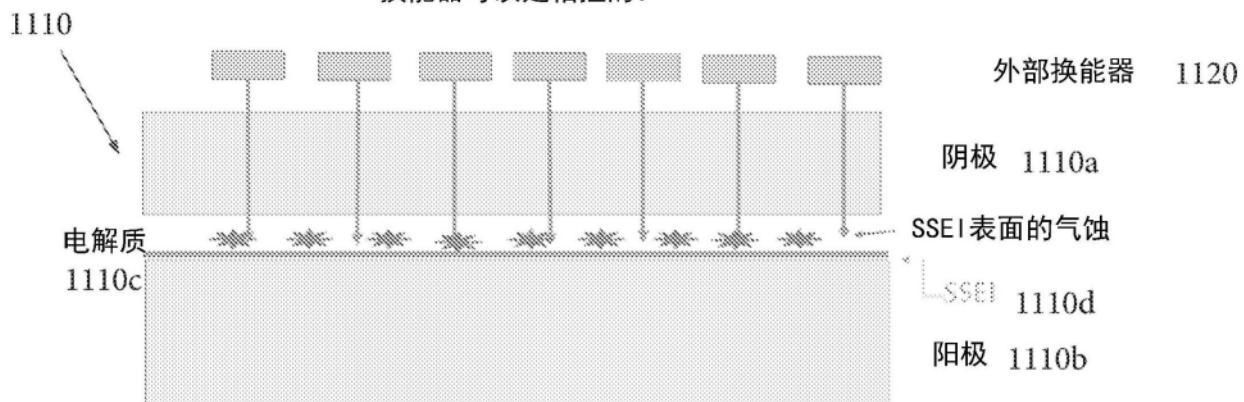


图11

以共振频率注入阳极的机械能量

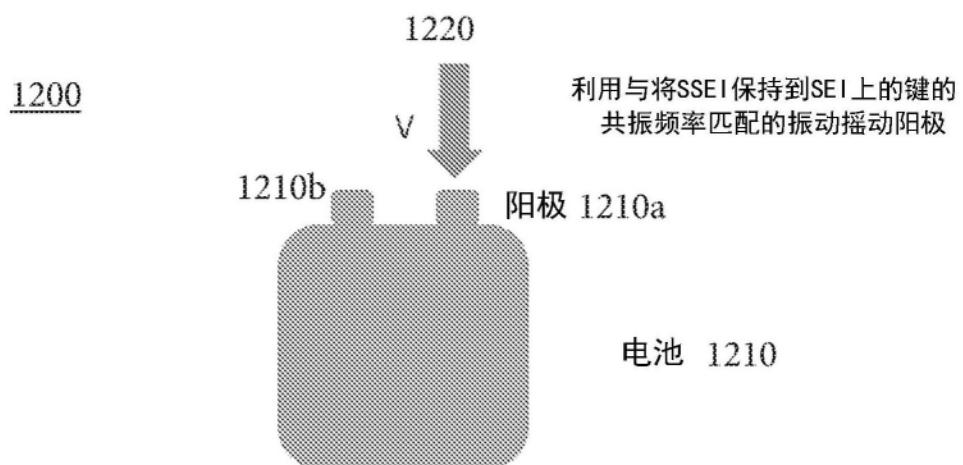


图12

相控阵列

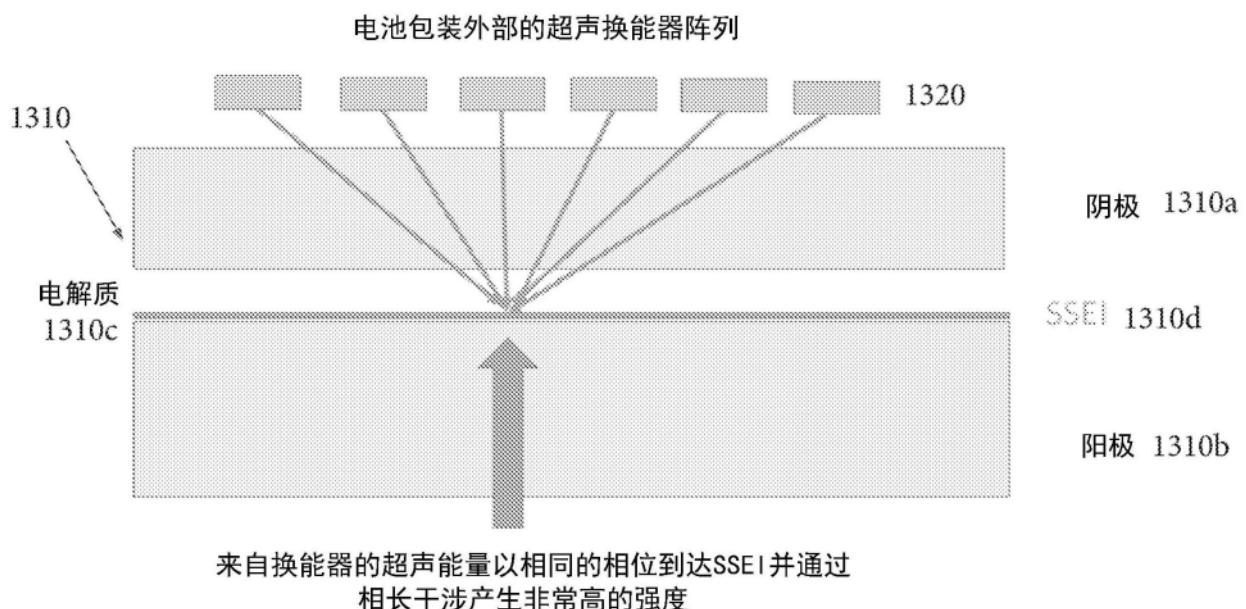
1300

图13

1400

采用SPR的轴向X射线照射

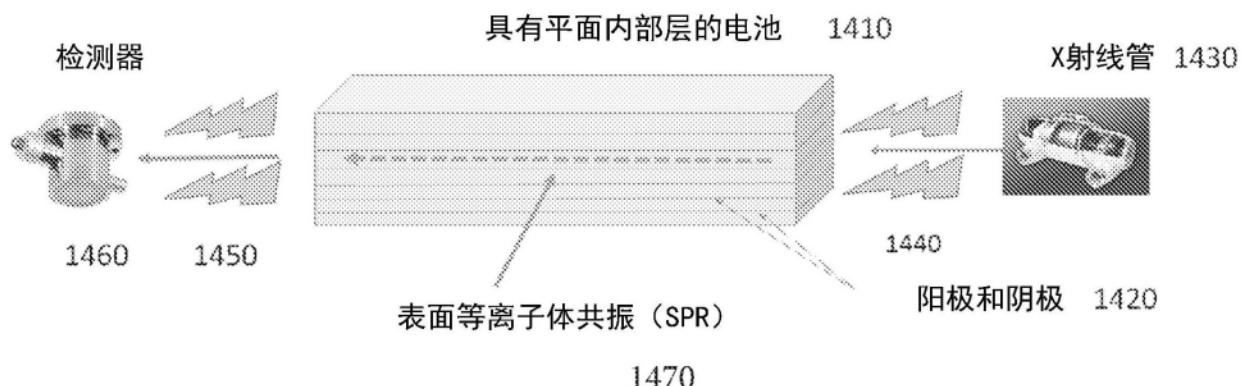


图14

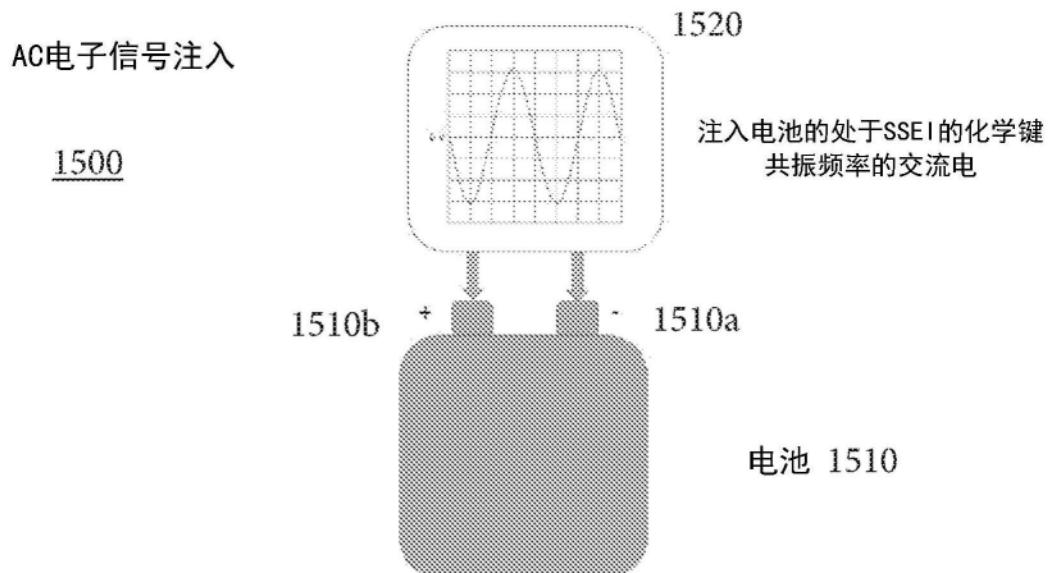


图15

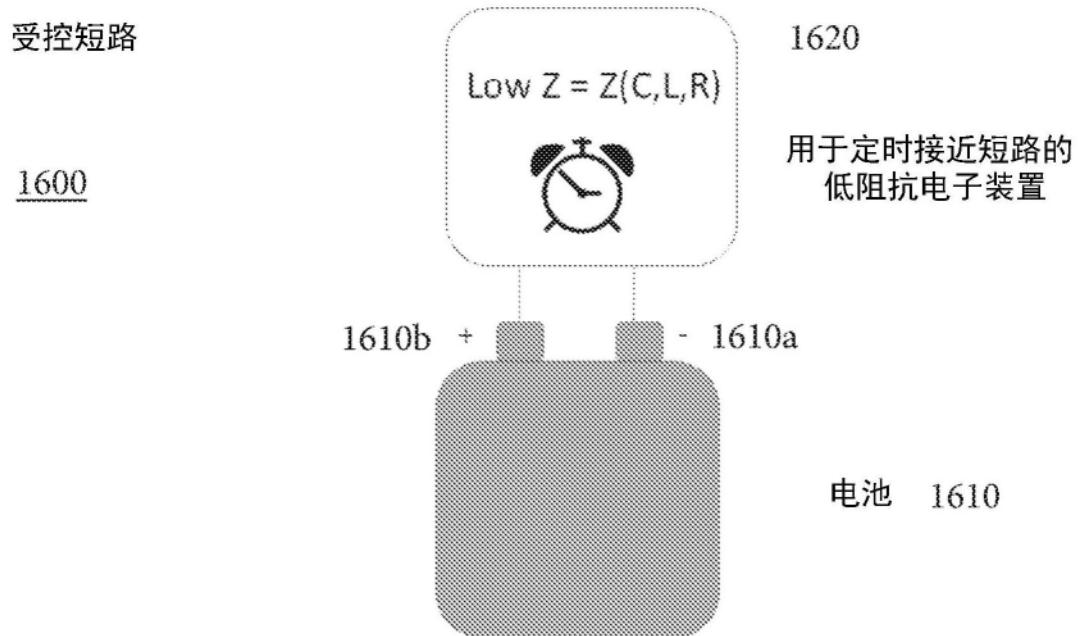


图16

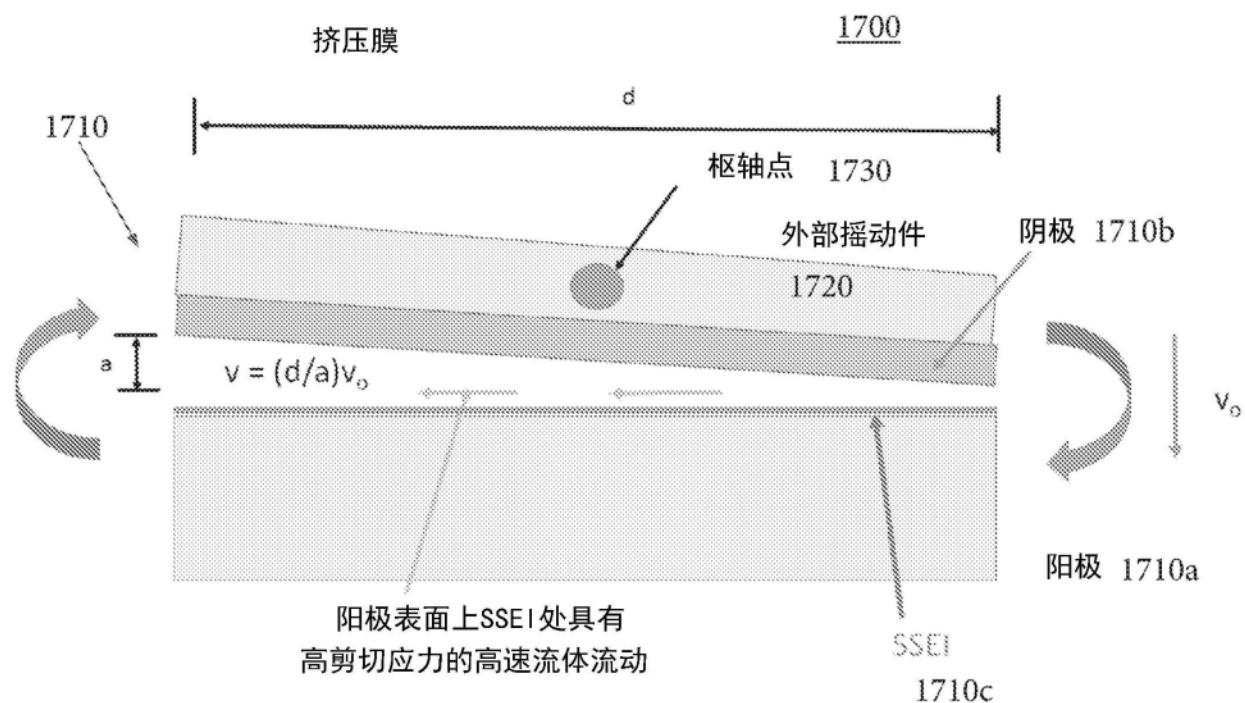


图17

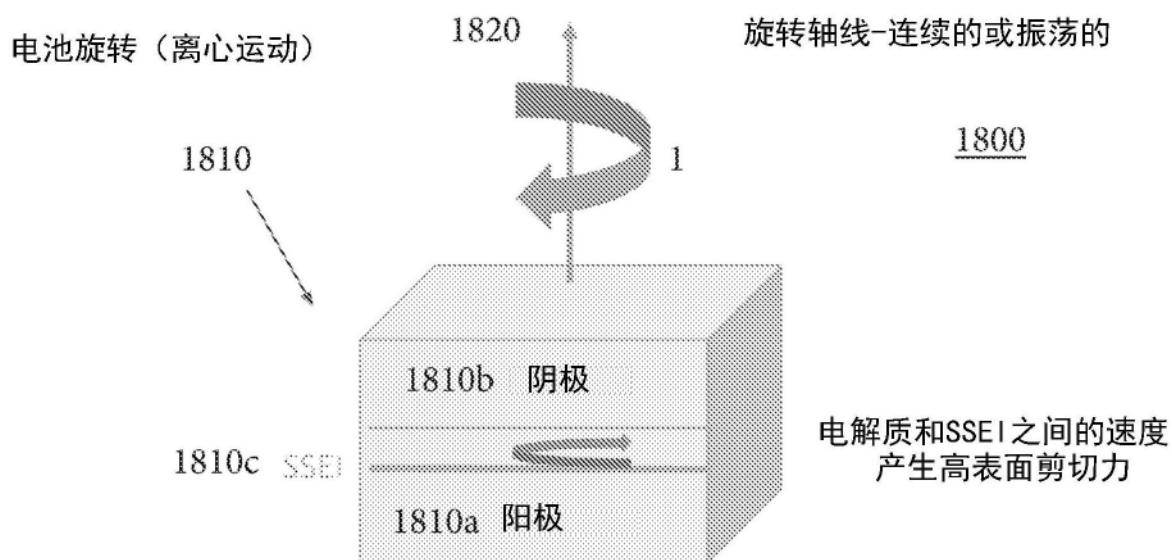


图18

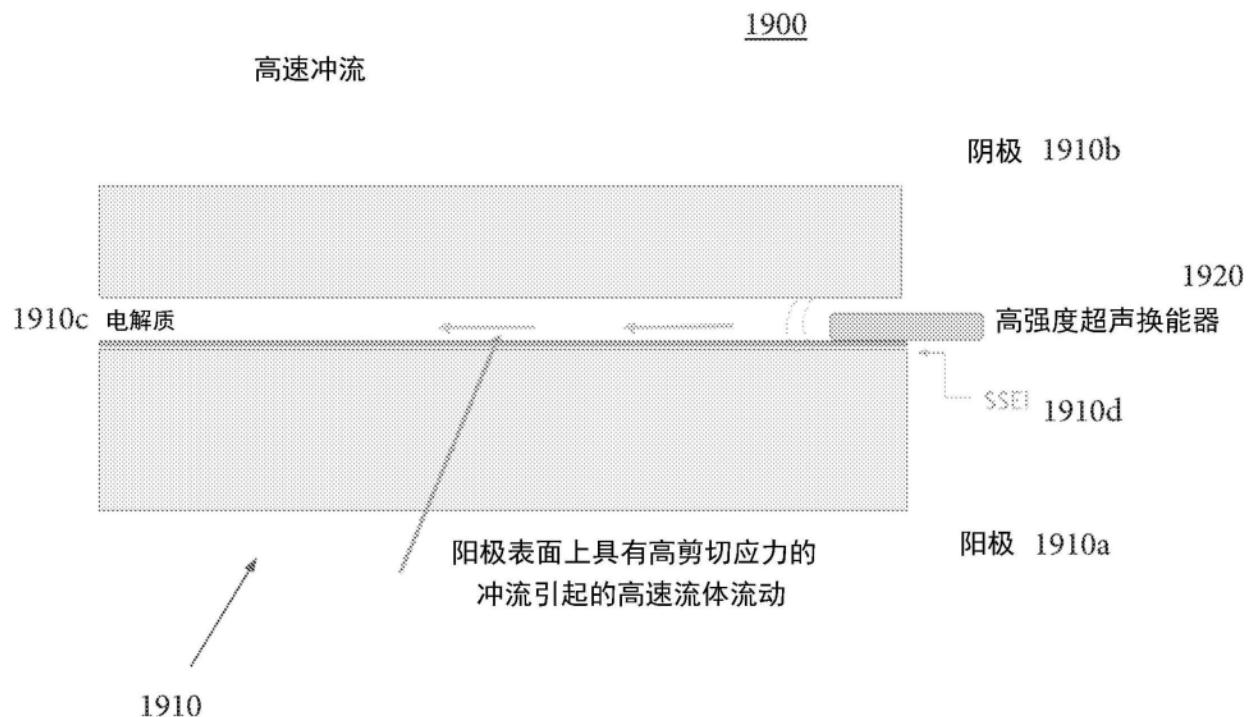


图19

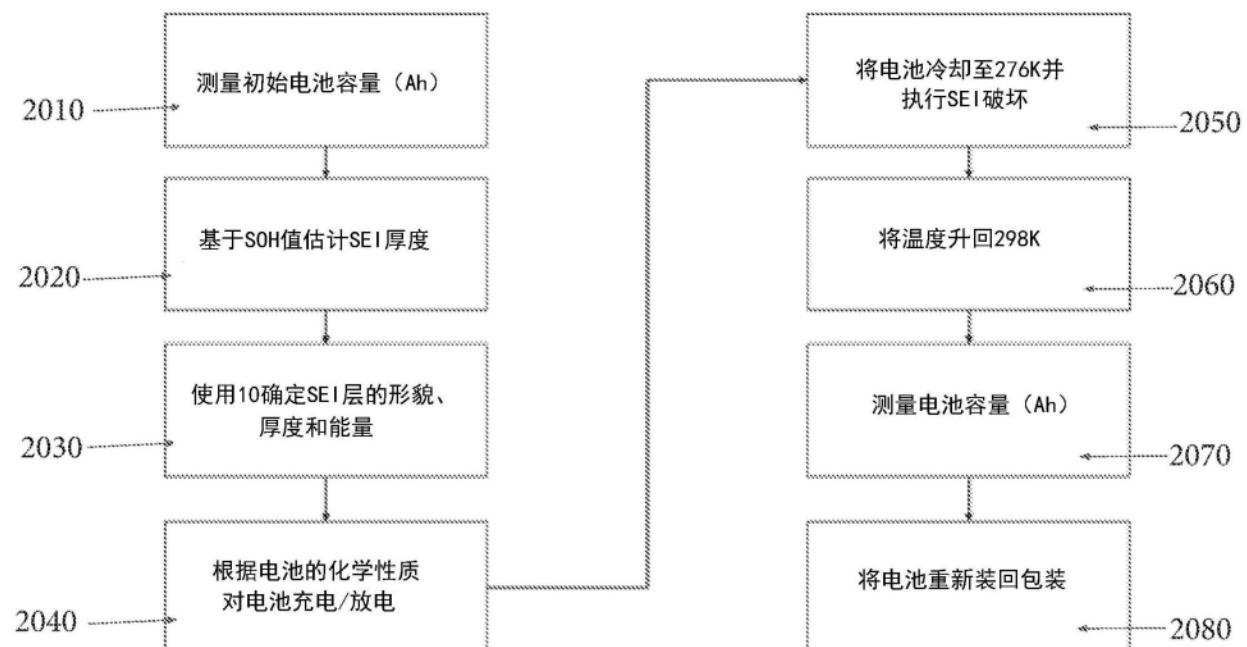
2000

图20

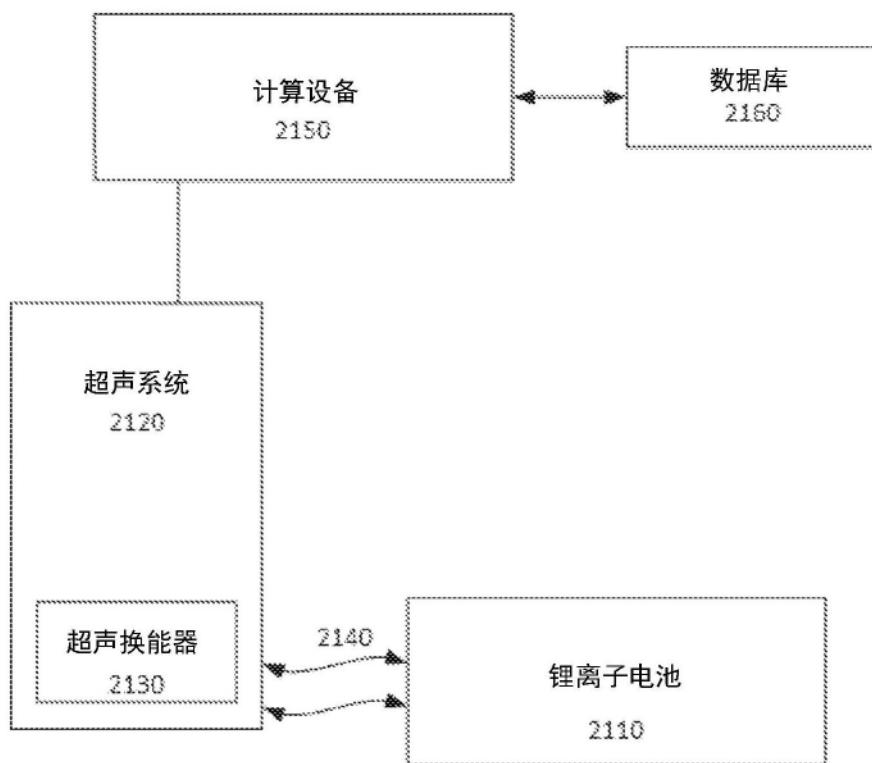
2100

图21



图22