

文章编号:1001-4888(2018)05-0716-09

锂离子薄膜电极充放电变形的原位实验观测方法^{*}

杨盼盼¹, 李凯^{2,3}, 冯捷敏^{2,3}, 李大伟¹, 张俊乾^{2,3}

(1. 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200444; 2. 上海市能源工程力学重点实验室, 上海 200072;

3. 上海大学理学院力学系, 上海 200444)

摘要: 锂离子薄膜电极在充放电过程中的力学变形会严重影响锂离子电池的性能和使用寿命。本文提出一种原位观测锂离子薄膜电极充放电变形的实验方法, 该方法通过设计一种新型的实验室模型电池, 并采用基于位相增量叠加的相移电子散斑干涉方法测量变形, 成功实现了对锂离子薄膜电极充放电变形的原位实验观测。实验结果表明, 锂离子薄膜电极在充放电过程中会产生周期性的变形, 该变形宏观上与电池的 SOC(State of Charge, 充电状态) 相关, 微观上则与锂离子在电极活性材料中的嵌入/脱出过程对应。该实验方法为深入研究锂离子薄膜电极变形对锂离子电池性能的影响提供了一种有力的实验手段。

关键词: 锂离子薄膜电极; 锂离子电池; 充放电; 变形; 相移电子散斑干涉

中图分类号: TM911

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-007

0 引言

锂离子电池因能量密度大、循环寿命长, 已成为当前电子产品和电动汽车的主要动力源^[1]。如图 1 所示, 锂离子电池由两个薄膜电极(正极和负极)、隔膜和电解液构成。薄膜电极由集流体和活性材料两部分粘接而成, 集流体通常为铜箔或铝箔, 它们通过极耳与外界连接, 主要作用是导电。活性材料则是锂离子电池电量存储的载体, 常用的正极活性材料有磷酸铁锂、氧化钴锂等, 负极活性材料有石墨、硅等^[2]。锂离子电池通过锂离子在正负极活性材料间的迁移来实现充放电, 当锂离子在电极活性材料中嵌入/脱出时, 会引起电极活性材料的膨胀/收缩, 此过程伴随着电极的变形和电极内部应力的产生。在电池的使用过程中, 随着充放电循环的不断进行, 这种变形和应力的积累会造成电极活性材料的断裂和电极的分层, 从而导致电池性能的退化^[3]。如何解决这一问题, 是当前锂离子电池研究的热点, 而原位实验观测锂离子薄膜电极在充放电过程中的变形, 则是研究这一问题的重要手段。

目前, 已有很多学者开展了锂离子薄膜电极充放电变形的原位实验研究。布朗大学的 Sethuraman 等^[4-6]利用 MOSS(Multi-beam Optical Stress Sensor, 多光束光学应力传感器)技术, 实时测量了充放电过程中薄膜电极的曲率变化, 并在此基础上讨论了充放电循环过程中活性材料的应力演化、模量改变以及塑形变形等问题。Jones 等^[7]运用 DIC(Digital Image Correlation, 数字图像相关)方法观测了石墨薄膜电极充放电过程的面内应变, 观察到无约束的石墨电极嵌锂膨胀率为 1.41%, 脱锂收缩率 1.33%。Chen 等^[8]采用 DIC 方法, 原位观测了石墨薄膜电极的变形, 研究了集流体刚度对薄膜电极的影响, 发现沉积在薄铜箔上的石墨电极比沉积在厚铜箔上的石墨电极产生的应变要大。Xie 等^[9]和 Li 等^[10]通过拍摄图片的方式, 原位监测了细长形薄膜电极在充放电过程中的曲率变化, 并在此基础上对电极活性

^{*} 收稿日期: 2018-01-07; 修回日期: 2018-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(11332005)资助, 上海市自然科学基金(17ZR1410700)资助

通讯作者: 李凯(1978—), 男, 博士, 副教授。主要从事光测实验技术方面的研究。Email: likai@shu.edu.cn

材料的应力以及杨氏模量进行了讨论。这些方法中,MOSS 技术^[4-6]对薄膜电极的单个点进行测量,不能给出薄膜电极的全场变形信息。DIC 方法^[7,8]要求被测物体表面有可识别的散斑图样,薄膜电极表面的自然纹理较弱,该方法使用起来比较困难,文献[7]采用荧光标记的办法在电极表面制作了人工散斑,但该方法操作难度较大且可能引起电化学副反应对实验研究造成干扰。通过拍摄细长形薄膜电极的侧面图片^[9,10],得到的是薄膜电极变形的平均曲率,无法揭示薄膜电极表面的全场变形。

本文提出一种原位观测锂离子薄膜电极充放电变形的实验方法。该方法通过设计一种新型的实验室模型电池,并采用基于位相增量叠加的相移电子散斑干涉方法,可实现对锂离子薄膜电极充放电变形的原位、全场测量。实验观测到:锂离子薄膜电极在充放电过程中会产生与电池 SOC(state of charge, 充电状态)相关的周期性变形,该变形微观上与锂离子在电极活性材料中的嵌入/脱出过程对应。该实验方法为深入研究薄膜电极变形对锂离子电池性能的影响提供了一种有力的实验手段。

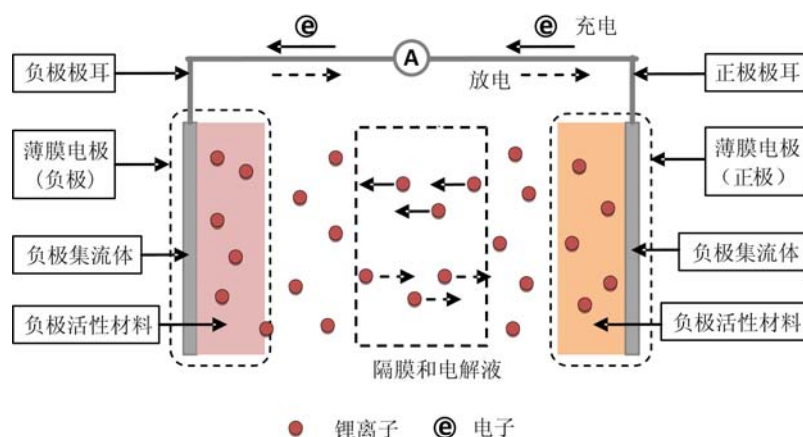


图1 锂离子电池的工作原理示意图

Fig. 1 The working principle of lithium-ion battery

1 实验室模型电池设计

1.1 模型电池的材料

实验室用 95.7% 的石墨作为负极活性材料(比容量为 330Ah/g),粘接剂为 SBR+CMC(深圳科晶),负极集流体为铜箔;正极活性材料使用磷酸铁锂,正极集流体为铝箔(深圳科晶)。电解液使用 1mol/LiPF₆/EC+DEC。石墨负极活性材料厚度为 40μm,铜箔集流体的厚度为 10μm,磷酸铁锂正极活性材料厚度为 68μm,铝箔集流体的厚度为 15μm。隔膜(Celgard 2325)用来隔开正负极,厚度为 25μm。

1.2 模型电池的结构

本文设计的实验室模型电池如图 2 所示。图 2(a)是模型电池的组装示意图,电池外壳采用石英玻璃制作,具有很好的抗腐蚀性和透光性,磷酸铁锂正极片为 12mm×12mm 的正方形,上端连接导电极耳,石墨负极为直径 12mm 的圆形,负极导电极耳为圆环形(内径 8mm,外径 12mm),组装时,由两片石英玻璃将石墨负极的铜箔集流体与圆环形导电极耳叠压在一起实现导电,两片石英玻璃中心孔径为 8mm,周边 6 个小孔可通过螺钉把两片石英玻璃压紧,对石墨负极施加四周固支约束。常温下(25±1℃),手套箱中(Ar, O₂, H₂O 小于 0.1ppm),将磷酸铁锂正极用隔膜完全包覆,并与四周固支的石墨负极一起放进石英玻璃外壳,随后将电解液注入石英外壳至完全浸没电极,最后将石英外壳上端封盖,留出充放电的正负极耳,组装成模型电池,如图 2(b)所示。实验中观测变形的表面是石墨负极的集流体一侧,图 2(c)显示了观测区域的放大图片。

1.3 模型电池的充放电规程

实验使用 BK-6808 电池充放电仪(广州蓝奇)在室温条件下对模型电池进行恒流充放电,充放电倍

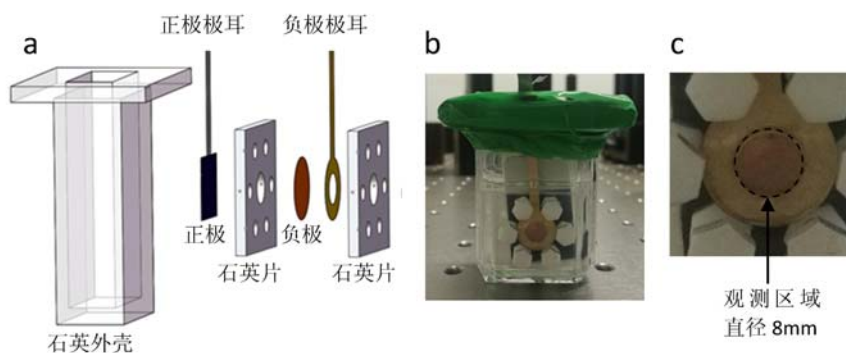


图 2 模型电池的结构。(a)电池组装示意图;(b)模型电池实物;(c)观测区域的放大图

Fig. 2 The structure of the model battery. (a) assembly diagram of the model battery;

(b) the real assembled model battery; (c) enlarged view of the observation area

率为 1C,即充电 1h 达到石墨的理论容量 330mAh/g,充放电的控制电压区间为 2.0~4.2V。充电和放电结束后分别保持开路状态 3min。在充放电过程中,电流、电压数据被记录下来,记录频率为 1Hz。

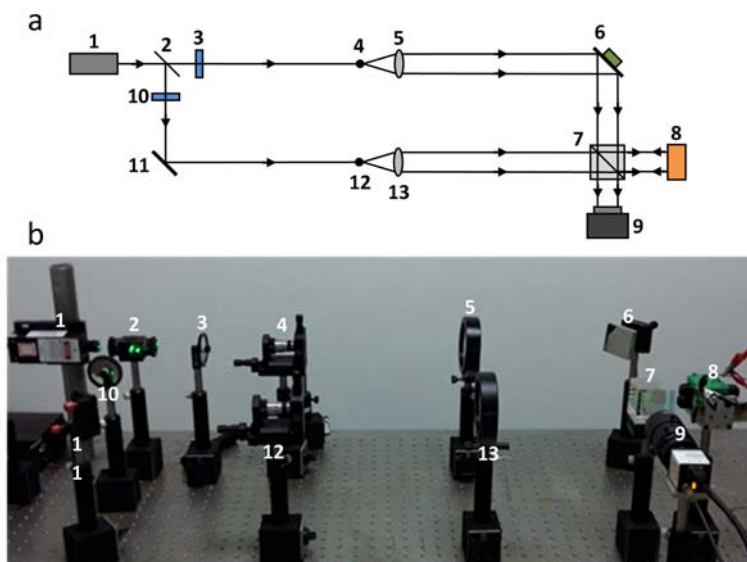


图 3 相移电子散斑干涉变形测量系统。(a)测量系统光路;(b)测量系统照片

1 激光器,2 分束镜,3 光强衰减片,4 扩束镜,5 准直镜,6 压电陶瓷(PZT)相移镜,

7 分光棱镜,8 模型电池,9 CCD 相机,10 光强衰减片,11 反射镜,12 扩束镜,13 准直镜

Fig. 3 The phase shifting ESPI (electronic speckle pattern interferometer) deformation measurement system.

(a) the optical path of the measurement system; (b) the photograph of the measurement system

1 Laser, 2 Beam splitter, 3 Optical attenuator, 4 Beam expander, 5 Collimating lens, 6 Piezoceramic (PZT) phase shift mirror,

7 Splitter prism, 8 Model battery, 9 CCD Camera, 10 Optical attenuator, 11 Reflective mirror, 12 Beam expander, 13 Collimating lens

2 基于增量叠加的相移电子散斑干涉变形测量

2.1 相移电子散斑干涉

电子散斑干涉是一种基于激光散斑干涉的变形测量技术,具有无损、高精度、全场测量等优点^[11,12]。1985 年,Creath 将相移技术与电子散斑干涉结合起来^[13],实现了相移电子散斑干涉,该方法大大提升了电子散斑干涉的测量精度和测量效率,使电子散斑干涉方法得到了广泛的应用^[14]。图 3 是本文搭建的相移电子散斑干涉变形测量系统。图 3(a)为测量系统的光路示意图,图 3(b)为测量系统的实物照片,该系统可对物体表面的离面变形进行测量。如图 3 所示,从激光器(1)发出的激光束,被分束

镜(2)分成两束,一束作为参考光,一束作为物光;参考光经光强衰减片(3)调节光强后,由扩束镜(4)扩束,准直镜(5)准直,再经压电陶瓷(PZT)相移镜(6)反射后,透过分光棱镜(7),进入 CCD 相机(9);物光则经光强衰减片(10)调节光强和反射镜(11)反射后,由扩束镜(12)扩束,准直镜(13)准直,透过分光棱镜(7)照射到薄膜电极表面,被电极表面反射回来的光再次经过分光棱镜(7)时被反射进入 CCD 相机(9)。物光和参考光在 CCD 相机靶面形成的干涉散斑图可表示为:

$$I(x, y) = I_r(x, y) + I_o(x, y) + 2 \sqrt{I_r(x, y) I_o(x, y)} \cos[\phi(x, y)] \quad (1)$$

式中, (x, y) 表示相机靶面的图像坐标; $I(x, y)$ 表示光强; $I_r(x, y)$ 表示参考光光强; $I_o(x, y)$ 表示物光光强; $\phi(x, y)$ 表示位相。

在计算机控制下,压电陶瓷(PZT)相移镜(6)可产生指定的相移量,本文采用四步相移法,采集到的四幅相移图为:

$$\begin{aligned} I_0 &= I_r + I_o + 2 \sqrt{I_r I_o} \cos(\phi) \\ I_1 &= I_r + I_o + 2 \sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + \pi/4) \\ I_2 &= I_r + I_o + 2 \sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + \pi/2) \\ I_3 &= I_r + I_o + 2 \sqrt{I_r I_o} \cos(\phi + 3\pi/4) \end{aligned} \quad (2)$$

为叙述简便,上式省略了坐标 (x, y) , 下文同。位相 ϕ 可通过四步相移算法得到:

$$\phi = \arctan \left(\frac{I_1 - I_3}{I_0 - I_2} \right) \quad (3)$$

2.2 基于位相增量叠加的变形测量

通常的相移电子散斑干涉法测量变形的过程为:采集物体变形前和变形后的相移图,计算物体变形前和变形后的位相 ϕ 和 ϕ' , 计算位相增量 $\Delta\phi = \phi - \phi'$, 根据测量光路所对应的位相增量与变形间的关系计算物体的变形。本文测量光路所对应的位相增量与变形间的关系为

$$w = \frac{\Delta\phi}{4\pi} \times \lambda \quad (4)$$

式中, w 表示离面变形; λ 表示激光波长。

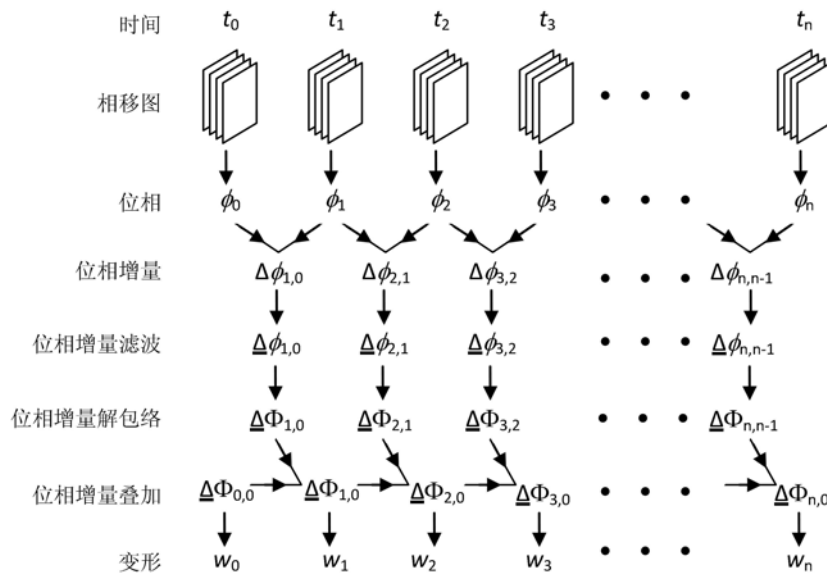


图4 基于位相增量叠加的变形测量方法

Fig. 4 Deformation measurement method based on phase increment superposition

充放电循环过程中的薄膜电极变形观测时间常常为几小时甚至十几小时,为了避免观测过程中激光散斑退相关的影响,本文采用了一种基于位相增量叠加的变形测量方法,该方法的具体过程如图4所

示。图 4 中从左到右是时间轴方向,实验中根据事先设定的时间间隔 $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ 采图,每次采集四幅相移图。图 4 中从上到下是变形的求解过程:先根据四步相移算法公式(3)计算出各个时间点的位相 ϕ_k ,而后计算相邻时间点间的位相增量 $\Delta\phi_{k,k-1}$

$$\Delta\phi_{k,k-1} = \phi_k - \phi_{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

为了去除位相增量中的噪声,用正余弦均值滤波^[15]对位相增量进行滤波,得到滤波后的位相增量 $\underline{\Delta\phi}_{k,k-1}$,由于根据公式(3)得出的是包络位相,因此 $\underline{\Delta\phi}_{k,k-1}$ 也是包络的。为了得到连续的位相分布,采用最小二乘法^[16]对位相增量 $\underline{\Delta\phi}_{k,k-1}$ 进行解包络,得到连续的位相增量 $\underline{\Delta\Phi}_{k,k-1}$,而后,通过位相增量叠加可求出任意时刻 t_k 相对初始时刻 t_0 的位相增量 $\underline{\Delta\Phi}_{k,0}$,叠加的过程为:

$$\underline{\Delta\Phi}_{0,0} = 0 \quad (6)$$

$$\underline{\Delta\Phi}_{k,0} = \underline{\Delta\Phi}_{k-1,0} + \underline{\Delta\Phi}_{k,k-1}, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

最后,根据公式(4)可求出任意时刻 t_k 相对初始时刻 t_0 的变形 w_k :

$$w_k = \frac{\underline{\Delta\Phi}_{k,0}}{4\pi} \times \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

3 实验结果与讨论

实验所用相机为 Baumer TXG14f(分辨率 1392×1040 , 帧率 30fps), 相机镜头为 ComputarMLH-10X, 激光器波长为 532nm。模型电池制作好后,置于图 3 所示的测量光路中,测量表面为石墨负极的集流体一侧。根据测量光路可知,本文测量的变形是薄膜电极的离面位移。实验中,按 1.3 节的充放电规程对电池进行充放电,相移电子散斑干涉测量系统每隔 5s 采集一次相移图,采集的图像保存到计算机中,实验结束后按图 4 的变形求解过程计算薄膜电极的变形。

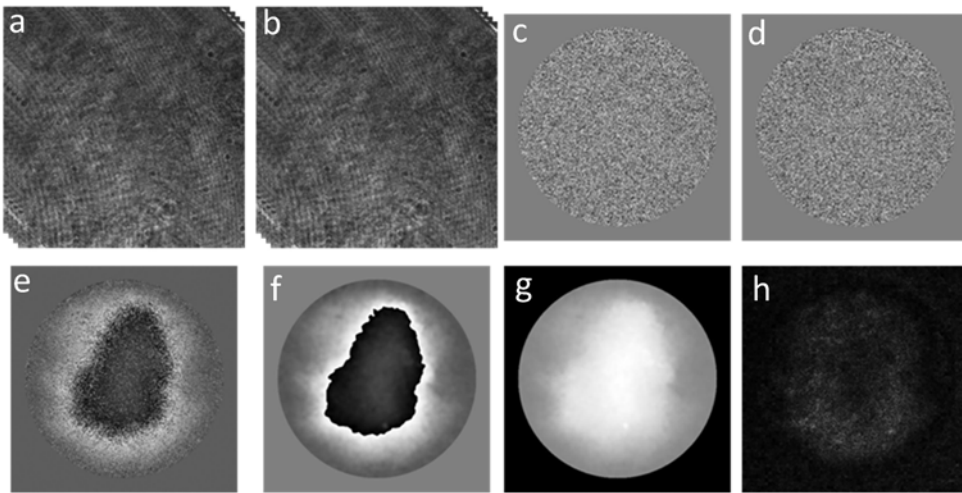


图 5 位相增量的求解过程。(a)和(b)是某两个相邻时刻采集到的相移图;(c)和(d)是由公式(3)计算出的这两个时刻的位相;(e)是这两个时刻间的位相增量;(f)是对(e)滤波后的结果;(g)是对(f)解包络的结果;(h)是这两个时刻的相减散斑条纹图

Fig. 5 The process of solving phase increment. (a) and (b) is the phase shift images captured at some two adjacent times; (c) and (d) is the phase distributions corresponding to the two adjacent time; (e) is the phase increment between the two adjacent time; (f) is the filtering result of (e); (g) is the unwrapping result of (f); (h) is the subtraction speckle fringe pattern between the two adjacent time

图 5 显示了位相增量的求解过程。图 5(a)和(b)是实验中某两个相邻时刻采集到的相移图,图 5(c)和(d)是由公式(3)算出的这两个时刻的位相图,由于电极片是四周固支的,观测区域为中心圆孔部分(如图 2 所示),因此只选取中心圆形观测区域进行计算,图 5(e)是这两个相邻时刻位相图相减得到的位相增量,可以看到其中包含明显的噪声;用正余弦均值滤波^[15](滤波窗口 3×3 , 迭代 20 次)对

图 5(e) 进行滤波, 得到的滤波结果为图 5(f), 可以看到噪声被很好地滤除了; 为了得到连续的位相分布, 对图 5(f) 用最小二乘法^[16] 进行位相解包裹, 得到的连续位相增量如图 5(g) 所示。作为对比, 图 5(h) 给出了这两个相邻时刻的相减散斑条纹图, 可以看出要从该图中提取位相信息是比较困难的。

所有的位相增量计算完后, 即可通过位相增量叠加求出任意时刻相对初始时刻的位相增量, 进而得出任意时刻的变形。图 6 显示了模型电池首次充电过程中, SOC (state of charge, 充电状态) 等于 0%、30%、70% 和 100% 时的薄膜电极变形图。SOC 是充电容量与理论容量比值的百分数, SOC 为 0% 是充电的起始状态, SOC 为 100% 则表示电池充电至理论容量, 充电完成。从图 6 可看出, 随着电池充电的进行, 薄膜电极的变形逐渐增长, 该过程微观上与锂离子嵌入电极活性材料的过程对应: 当锂离子嵌入活性材料石墨时, 石墨会发生膨胀, 从而引起薄膜电极的变形, 由于所观测的薄膜电极是四周固支的, 因此产生的是鼓包状变形。图 6 还显示出这种鼓包状变形并非理想的圆形鼓包, 这可能与活性材料在集流体上的分布不均匀, 以及实验中不可能完全实现理想的四周固支边界条件有关。

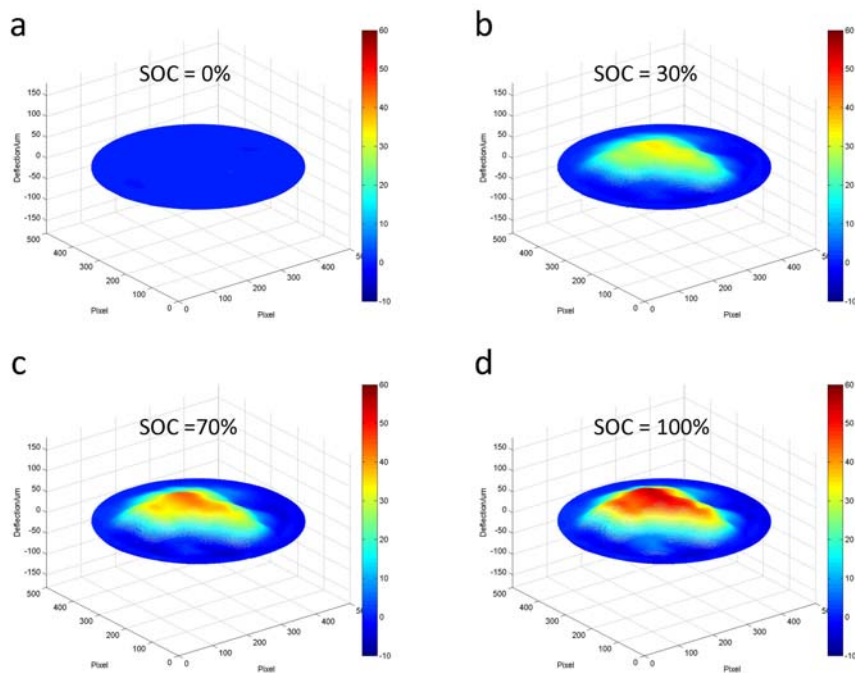


图 6 薄膜电极在首次充电过程中不同 SOC 下的变形分布 (变形单位: μm)。

(a) SOC=0%; (b) SOC=30%; (c) SOC=70%; (d) SOC=100%

Fig. 6 Deformation distributions of the thin film electrode at different SOC in the first charging process (deformation unit: μm). (a) SOC=0%; (b) SOC=30%; (c) SOC=70%; (d) SOC=100%

图 7 给出了电池在前 3 个充放电循环过程中电压和薄膜电极中心点变形的情况。图 7(a) 是时间—电压曲线, 电压升高对应电池充电, 石墨电极嵌锂 (即锂离子进入石墨), 电压降低则是电池放电, 石墨电极脱锂。图 7(b) 是时间—变形曲线, 变形是薄膜电极中心点的变形。可以看出, 在电池充放电过程中, 薄膜电极的变形具有周期性, 且与电池充放电的周期吻合。石墨是一种层状结构, 石墨嵌锂过程会形成多种锂—石墨层间化合物, 如 LiC_6 、 LiC_{18} 和 LiC_{12} 等^[17]。Qi 等^[18] 基于两相模型得出的石墨嵌锂过程层间距与 SOC 之间的关系曲线, 与本文时间—变形曲线的变化趋势一致, 验证了本文实验方法的有效性。图 8 显示了前 3 个充放电循环过程中薄膜电极的变形情况。图 8(a-c) 是 SOC=0% 时薄膜电极的变形分布, 图 8(d-f) 是 SOC=100% 时薄膜电极的变形分布。可以看到, 在充放电循环过程中, 薄膜电极的变形是周期性的, 呈鼓包状。然而, 随着充放电循环的进行, 薄膜电极的变形出现了不可逆性, 如图 8(b) 和图 8(c) 所示, 当 SOC 再次回到 0% 时, 电极变形并没有完全回到 0, 图 8(c) 比图 8(b) 表现得更明显。图 7 给出的变形曲线也反映出变形的不可逆性, 可以看到放电结束后, 变形未能完全回到 0。锂

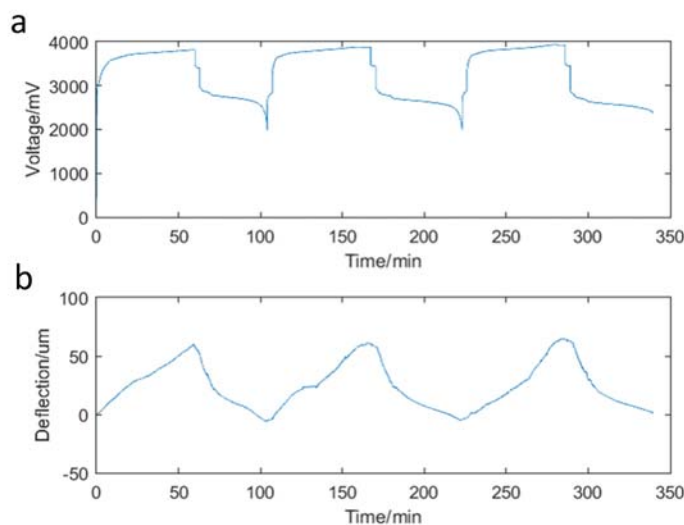


图 7 前 3 个充放电循环的电压和薄膜电极中心点的变形。

(a)时间—电压曲线;(b)时间—变形曲线(变形指薄膜电极中心点处的变形)

Fig. 7 The voltage and the deformation of the center of the thin film electrode in the first three charge-discharge cycles. (a)Time-Voltage curve; (b)Time-Deformation curve (the deformation refers to the deformation of the center point of the thin film electrode)

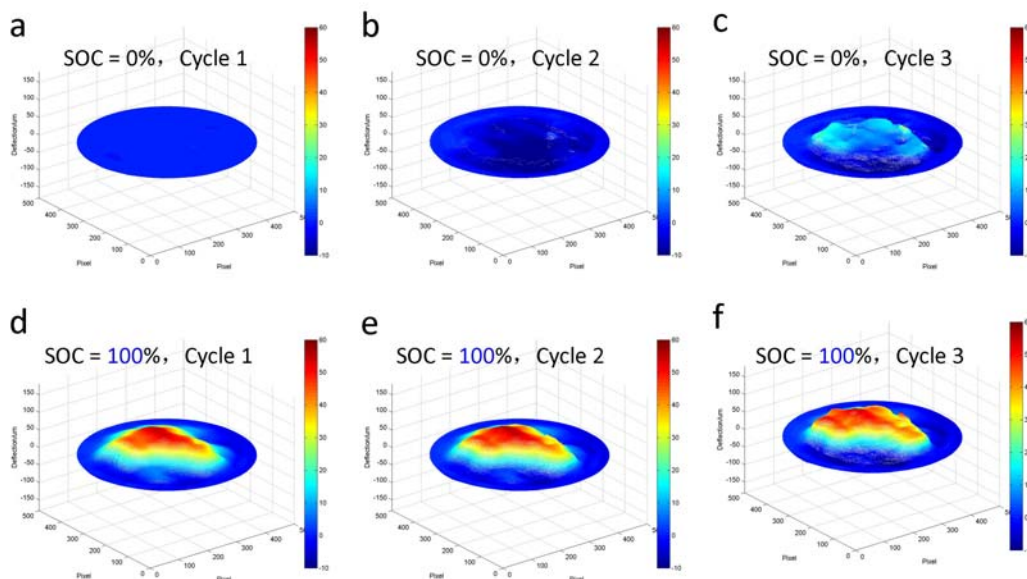


图 8 电池在前 3 个充放电循环中 SOC=0% 和 SOC=100% 时的薄膜电极变形分布(变形单位: μm)。(a-c) SOC = 0%; (d-f) SOC = 100%

Fig. 8 Deformation distributions of the thin film electrode at SOC = 0% and SOC = 100% in the first three charge-discharge cycles(deformation unit: μm). (a-c)SOC = 0%; (d-f) SOC = 100%

离子薄膜电极在充放电过程中产生的变形,可分为可逆变形和不可逆变形两部分^[19];可逆变形是由锂离子在电极活性材料中嵌入和脱出引起的体积膨胀导致的,不可逆变形则与充放电过程中伴随的一些电化学反应有关,如固体电解质膜(Solid Electrolyte Interface, SEI)在活性材料表面的生成,此外,不可逆变形还与电极活性材料在充放电过程中的破坏和电池性能的退化相关^[1,3]。

4 结论

针对锂离子薄膜电极在充放电过程中的变形会引起锂离子电池性能衰退的问题,本文提出了一种能够原位实验观测锂离子薄膜电极充放电变形的实验方法。该方法通过设计一种新型的实验室模型电池,并采用基于位相增量叠加的相移电子散斑干涉变形测量方法,成功实现了对充放电循环过程中薄膜电极变形的原位、全场实验观测。结果表明,在充放电过程中,锂离子薄膜电极变形呈现周期性,嵌锂时变形增大,脱锂时变形减少,此外,变形还具有不可逆性。本文实验方法为深入研究薄膜电极变形对锂离子电池性能的影响提供了一种有力的实验手段。

参考文献:

- [1] Tarascon J M, Armand M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries[J]. *Nature*, 2001, 414(6861):359.
- [2] 吴宇平. 锂离子电池:应用与实践(第2版)[M]. 化学工业出版社, 2012
- [3] Vetter J, Novák P, Wagner M R, et al. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 147(1):269—281.
- [4] Sethuraman V A, Chon M J, Shimshak M, et al. In situ measurements of stress evolution in silicon thin films during electrochemical lithiation and delithiation[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(15):5062—5066.
- [5] Sethuraman V A. In situ measurement of biaxial modulus of Si anode for Li-ion batteries[J]. *Electrochemistry Communications*, 2010, 12(11):1614—1617.
- [6] Sethuraman V A, Srinivasan V, Bower A F, et al. In situ measurements of stress-potential coupling in Lithiated silicon[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 157(11):A1253—A1261.
- [7] Jones E M C, Silberstein M N, White S R, et al. In situ measurements of strains in composite battery electrodes during electrochemical cycling[J]. *Experimental Mechanics*, 2014, 54(6):971—985.
- [8] Chen J, Thapa A K, Berfield T A. In-situ characterization of strain in lithium battery working electrodes[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 271:406—413.
- [9] Xie H, Zhang Q, Song H, et al. Modeling and in situ characterization of lithiation-induced stress in electrodes during the coupled mechano-electro-chemical process[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 342:896—903.
- [10] Li D, Wang Y, Hu J, et al. In situ measurement of mechanical property and stress evolution in a composite silicon electrode[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 366:80—85.
- [11] Leendertz J A. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect[J]. *Journal of Physics E Scientific Instruments*, 1970, 3:214—218.
- [12] Jones R, Wykes C. Holographic and Speckle Interferometry[M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1989.
- [13] Creath K. Phase-shifting speckle interferometry[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(18):3053—3058.
- [14] Jacquot P. Speckle interferometry: A review of the principal methods in use for experimental mechanics applications[J]. *Strain*, 2008, 44(1):57—69.
- [15] Aebischer H A, Waldner S. A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns[J]. *Optics Communications*, 1999, 162(4-6):205—210.
- [16] Ghiglia, Dennis C. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software[M]. Wiley, 1998.
- [17] Woo K C, Kamitakahara W A, Divincenzo D P, et al. Effect of in-plane density on the structural and elastic properties of graphite intercalation compounds[J]. *Physical Review Letters*, 1983, 50(3):182—185.
- [18] Qi Y, Guo H, Hector LG, et al. Threefold increase in the young's modulus of graphite negative electrode during lithium intercalation[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2010, 157(5):A558—A566.
- [19] Jones E M C, Capraz O O, White S R, et al. Reversible and irreversible deformation mechanisms of composite graphite electrodes in lithium-ion batteries[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 163(9):A1965—A1974.

On the in-situ experimental observation method of lithium-ion thin film electrode deformation in charge-discharge process

YANG Pan-pan¹, LI Kai^{2,3}, FENG Jie-min^{2,3}, LI Da-wei¹, ZHANG Jun-qian^{2,3}

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200072, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy Engineering, Shanghai 200072, China;

3. Department of Mechanics, College of Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The mechanical deformation of lithium-ion thin film electrode during the charge-discharge cycles can seriously affect the performance and service life of lithium-ion battery. In this paper, an experimental method for in-situ observation of lithium-ion thin film electrode deformation in charge-discharge process is presented. By designing a new type of laboratory model battery and using the phase shift electron speckle interferometry based on phase increment superposition, this method successfully realizes the in-situ experimental observation of the deformation of the electrode during charging and discharging process. It is shown that the lithium ion thin film electrode can produce periodic deformation in the process of charging and discharging. The deformation is corresponding to the state of charge state (SOC) of the battery and caused by the process of lithium-ion insertion/extraction of the electrode active material. The proposed experimental method provides a powerful experimental method for the study of the influence of thin film electrode deformation on the performance of lithium ion battery.

Keywords: Lithium-ion thin film electrode; Lithium-ion battery; Charge-discharge; deformation; Phase-shifting ESPI (electronic speckle pattern interferometry)