



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106840473 A

(43)申请公布日 2017.06.13

(21)申请号 201710121763.5

(22)申请日 2017.03.02

(71)申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号天津大学

(72)发明人 亢一澜 谢海妹 宋海滨 石宝琴

(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代理事务所 12201

代理人 王丽

(51)Int.Cl.

G01L 1/04(2006.01)

G01N 3/06(2006.01)

G01N 3/40(2006.01)

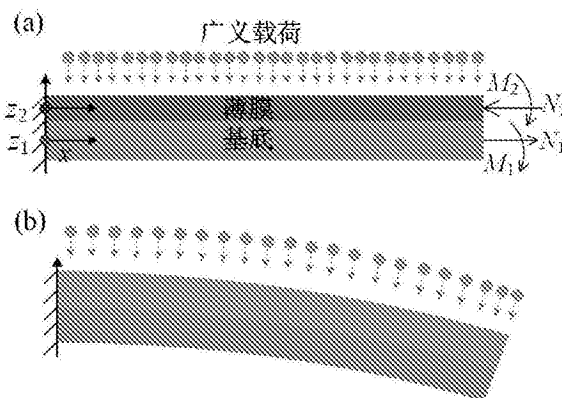
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

广义载荷引起薄膜材料弹性模量变化的应力测量方法

(57)摘要

本发明提出一种广义载荷引起薄膜材料弹性模量变化的应力测量方法;针对基底-薄膜双层异质结构,在基底材料弹性模量 E_1 已知且不变的条件下,进行薄膜材料弹性模量 E_2 随广义载荷变化的应力测量方法;1、基于广义载荷下的变形曲率,表征广义载荷作用下随广义载荷变化的薄膜材料弹性模量;2、基于变形曲率与得到的薄膜材料的弹性模量,表征考虑广义载荷引起的薄膜材料弹性模量变化的双层异质结构基底应力与薄膜应力。将热应力分析推广到多场耦合的广义载荷下双层异质结构应力测量中,相比于目前常用的假定薄膜材料弹性模量为常数的Stoney公式,基底应力与薄膜应力计算更精确,为材料的损伤断裂等分析以及结构优化设计提供参考依据。



1. 一种广义载荷引起薄膜材料弹性模量变化的应力测量方法；针对基底-薄膜双层异质结构，在基底材料弹性模量 E_1 已知且不变的条件下，进行薄膜材料弹性模量 E_2 随广义载荷变化的应力测量方法；步骤如下：

(1) 广义载荷引起的薄膜材料的弹性模量变化的表征方法，其计算方法为：

$$E_2 = -\frac{E_1 h_1}{h_2^3 k} \{ 2h_2^2 k + 3h_2 h_1 k + 2kh_1^2 - 3h_2(\beta_2 - \beta_1)T - 3h_2(\beta_2 - \beta_1)T + \sqrt{4h_2^4 k^2 + 12h_2^3 h_1 k^2 + 16h_2^2 h_1^2 k^2 + 12h_1^3 h_2 k^2 + 4h_1^4 k^2 - 12(\beta_2 - \beta_1)Th_2^3 k - 30(\beta_2 - \beta_1)Th_2^2 h_1 k - 30(\beta_2 - \beta_1)Th_1^2 h_2 k - 12(\beta_2 - \beta_1)Th_1^3 k + 9(\beta_2 - \beta_1)^2 T^2 h_2^2 + 18(\beta_2 - \beta_1)^2 T^2 h_2 h_1 + 9(\beta_2 - \beta_1)^2 T^2 h_1^2} \} ;$$

(2) 考虑广义载荷引起的薄膜材料弹性模量变化的基底应力与薄膜应力的表征方法，计算方法分别为：基底应力

$$\sigma_1 = \left[\frac{E_2 h_2^3 + E_1 h_1^3}{6(h_2 + h_1)h_1} + E_1 z_1 \right] \frac{6(\beta_2 - \beta_1)T}{1 + 4 \frac{h_2}{h_1} \frac{E_2}{E_1} + 6 \frac{h_2^2}{h_1^2} \frac{E_2}{E_1} + 4 \frac{h_2^3}{h_1^3} \frac{E_2}{E_1} + \frac{h_2^4}{h_1^4} \frac{E_2^2}{E_1^2}}{\left(\frac{h_2}{h_1} + 1 \right) \frac{h_2}{h_1^2} \frac{E_2}{E_1}} ;$$

薄膜应力

$$\sigma_2 = \left[-\frac{E_2 h_2^3 + E_1 h_1^3}{6(h_2 + h_1)h_2} + E_2 z_2 \right] \frac{6(\beta_2 - \beta_1)T}{1 + 4 \frac{h_2}{h_1} \frac{E_2}{E_1} + 6 \frac{h_2^2}{h_1^2} \frac{E_2}{E_1} + 4 \frac{h_2^3}{h_1^3} \frac{E_2}{E_1} + \frac{h_2^4}{h_1^4} \frac{E_2^2}{E_1^2}}{\left(\frac{h_2}{h_1} + 1 \right) \frac{h_2}{h_1^2} \frac{E_2}{E_1}} ;$$

式中： k 为梁变形曲率， T 为等效广义载荷， β_1 、 β_2 分别为基底材料与薄膜材料的等效膨胀系数， h_1 、 h_2 分别为基底与薄膜的厚度， E_1 、 E_2 分别为基底材料与薄膜材料的弹性模量； σ_1 、 σ_2 分别为基底应力与薄膜应力， z_1 、 z_2 分别为偏离基底与薄膜中性层的距离。

广义载荷引起薄膜材料弹性模量变化的应力测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于生-物-电-化-热-力等多场耦合领域,具体涉及一种多层异质结构中广义载荷引起薄膜材料弹性模量变化的应力测量方法。

背景技术

[0002] 目前,基底-薄膜多层异质结构在电子封装、柔性电子器件与微/纳电子机械等系统中得以广泛应用,其中薄膜与基底存在材料性能错配,在生物、物理、电学、化学、热等多场耦合的广义载荷作用下引起多层结构产生不协调的错配应变与应力。不仅用做传感器的多层结构应力测量必不可少,应力导致的结构分层脱粘与断裂等严重影响器件与系统的使用与寿命,从而精确测量基底-薄膜多层异质结构在多场耦合过程中的应力备受关注。目前常用于基底-薄膜结构的薄膜应力测量方法是基于形式简单的Stoney公式,式中唯一变量-基底曲率可由扫描激光法、光栅发射法、光杠杆技术以及多光束光学传感技术等实验测得,该方法正逐渐应用到锂离子电池电化学过程中电极材料的应力测量与分析中。事实上广义载荷作用下尤其是生物、化学与电化学,薄膜材料的物理性质尤其是弹性模量可能会发生显著变化,而Stoney公式在上述应用中并未考虑广义载荷引起的薄膜材料弹性模量的变化,将其设定为常数,使得应力计算结果存在误差。总之目前可变的弹性模量值并未应用到应力测量中,因此急需一个考虑薄膜材料弹性模量随广义载荷变化的应力测量方法,修正目前常用的Stoney公式以更精确计算基底-薄膜结构的应力。

[0003] 参考文献:

[0004] [1] S.Singamaneni, M.C Lemieux, H.P Lang, C.Gerber, Y.Lam, S.Zauscher et al. Bimaterial Microcantilevers as a Hybrid Sensing Platform [J]. Advanced Materials, 2008, 20 (4) :653-80.

[0005] [2] L.Wu, T.Cheng, Q.C Zhang. A bi-material microcantilever temperature sensor based on optical readout [J]. Measurement, 2012, 45 (7) :1801-6.

[0006] [3] G.Bucci, S.P.V Nadimpalli, V.A Sethuraman, A.F Bower, P.R Guduru. Measurement and modeling of the mechanical and electrochemical response of amorphous Si thin film electrodes during cyclic lithiation [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 62:276-94.

[0007] [4] V.A Sethuraman, A.Nguyen, M.J Chon, S.P.V Nadimpalli, H.Wang, D.P Abraham, et al. Stress Evolution in Composite Silicon Electrodes during Lithiation/Delithiation [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2013, 160 (4) :A739-A46.

[0008] [5] L.A Berla, S.W Lee, Y.Cui, W.D Nix. Mechanical behavior of electrochemically lithiated silicon [J]. Journal of Power Sources, 2015, 273:41-51.

发明内容

[0009] 本发明的目的是针对基底-薄膜双层异质结构,在基底材料弹性模量已知且不变的条件下,提出一种考虑薄膜材料弹性模量随广义载荷变化的应力测量方法,修正常用的弹性模量为常数的Stoney公式,以精确测量与计算基底应力与薄膜应力,为分析材料的损伤断裂及优化设计异质结构提供依据。

[0010] 它应具备以下两个功能:

[0011] (1) 可表征广义载荷引起的薄膜材料的弹性模量变化;

[0012] (2) 可表征考虑广义载荷引起的薄膜材料弹性模量变化的基底应力与薄膜应力。

[0013] 本发明的技术方案如下:

[0014] 一种广义载荷引起薄膜材料弹性模量变化的应力测量方法;针对基底-薄膜双层异质结构,在基底材料弹性模量 E_1 已知且不变的条件下,进行薄膜材料弹性模量 E_2 随广义载荷变化的应力测量方法;步骤如下:

[0015] (1) 广义载荷引起的薄膜材料的弹性模量变化的表征方法,其计算方法为:

$$E_2 = -\frac{E_1 h_1}{h_2^3 k} \{2h_2^2 k + 3h_2 h_1 k + 2k h_1^2 - 3h_2(\beta_2 - \beta_1)T - 3h_2(\beta_2 - \beta_1)T +$$

$$[0016] \sqrt{(4h_2^4 k^2 + 12h_2^3 h_1 k^2 + 16h_2^2 h_1^2 k^2 + 12h_1^3 h_2 k^2 + 4h_1^4 k^2 - 12(\beta_2 - \beta_1)Th_2^3 k - 30(\beta_2 - \beta_1)Th_2^2 h_1 k - 30(\beta_2 - \beta_1)Th_1^2 h_2 k - 12(\beta_2 - \beta_1)Th_1^3 k + 9(\beta_2 - \beta_1)^2 T^2 h_2^2 + 18(\beta_2 - \beta_1)^2 T^2 h_2 h_1 + 9(\beta_2 - \beta_1)^2 T^2 h_1^2)} ;$$

[0017] (2) 考虑广义载荷引起的薄膜材料弹性模量变化的基底应力与薄膜应力的表征方法,计算方法分别为:

[0018] 基底应力

$$[0019] \sigma_1 = \left[\frac{E_2 h_2^3 + E_1 h_1^3}{6(h_2 + h_1)h_1} + E_1 z_1 \right] \frac{6(\beta_2 - \beta_1)T}{1 + 4 \frac{h_2 E_2}{h_1 E_1} + 6 \frac{h_2^2 E_2}{h_1^2 E_1} + 4 \frac{h_2^3 E_2}{h_1^3 E_1} + \frac{h_2^4 E_2^2}{h_1^4 E_1^2}} \left(\frac{h_2}{h_1} + 1 \right) \frac{h_2 E_2}{h_1^2 E_1};$$

[0020] 薄膜应力

$$[0021] \sigma_2 = \left[-\frac{E_2 h_2^3 + E_1 h_1^3}{6(h_2 + h_1)h_2} + E_2 z_2 \right] \frac{6(\beta_2 - \beta_1)T}{1 + 4 \frac{h_2 E_2}{h_1 E_1} + 6 \frac{h_2^2 E_2}{h_1^2 E_1} + 4 \frac{h_2^3 E_2}{h_1^3 E_1} + \frac{h_2^4 E_2^2}{h_1^4 E_1^2}} \left(\frac{h_2}{h_1} + 1 \right) \frac{h_2 E_2}{h_1^2 E_1};$$

[0022] 式中: k 为梁变形曲率, T 为等效广义载荷, β_1 、 β_2 分别为基底材料与薄膜材料的等效膨胀系数, h_1 、 h_2 分别为基底与薄膜的厚度, E_1 、 E_2 分别为基底材料与薄膜材料的弹性模量; σ_1 、 σ_2 分别为基底应力与薄膜应力, z_1 、 z_2 分别为偏离基底与薄膜中性层的距离。

[0023] 具体说明如下:

[0024] 基底-薄膜双层异质结构,可简化为双层梁结构,其示意图如图1所示,在广义载荷的驱使下,由于两者材料性能存在差异使得梁结构发生弯曲变形。在双层异质结构中,基底一般情况下只作为薄膜材料的依托结构,在广义载荷作用下,基底虽然变形,但其弹性模量认定为常数,尤其是生物、化学与电化学等广义载荷,因此本发明认为只要确定基底所选材料,基底材料的弹性模量就已知且不随广义载荷变化。在弹性范围内,假设界面变形连续,

类比于热膨胀变形,由平衡方程、边界条件以及几何方程建立广义载荷引起的梁变形曲率方程,并反解曲率方程表征广义载荷引起的薄膜材料的弹性模量变化;然后由本构方程可得到基底应力与薄膜应力表征方法,将计算得到的弹性模量代入应力表征方法计算薄膜材料弹性模量变化时的基底应力与薄膜应力,因此本发明的考虑广义载荷引起的薄膜材料弹性模量变化的应力测量方法有上述两个步骤,将步骤(1)计算得到的随广义载荷变化的薄膜材料的弹性模量代入到步骤(2)可计算得到广义载荷作用下考虑薄膜材料弹性模量变化的基底应力与薄膜应力,具体说明如下:

[0025] 分别以基底和薄膜的中性层为原点,有基底坐标系 xOz_1 和薄膜坐标系 xOz_2 , x 轴沿着结构长度方向, z_1 轴和 z_2 轴沿着厚度方向,如图1所示

[0026] 1) 双层梁平衡方程

[0027] 由于界面上变形连续,界面载荷可分别等效为横截面上基底轴力 N_1 和基底弯矩 M_1 、薄膜轴力 N_2 和薄膜弯矩 M_2 ,有双层梁横截面上受力平衡可知双层梁平衡方程为:

$$[0028] \quad N_1 = -N_2$$

$$[0029] \quad M_1 + M_2 = \frac{N_1}{2}(h_1 + h_2)$$

$$[0030] \quad M_1 + M_2 = k(E_1wh_1^3/12 + E_2wh_2^3/12)$$

$$[0031] \quad N_1 = wk(E_1h_1^3 + E_2h_2^3)/(h_1 + h_2)/6$$

[0032] 2) 双层梁几何方程

[0033] 基底应变

$$[0034] \quad \varepsilon_1 = \frac{N_1}{E_1wh_1} + kz_1 + \beta_1 T, \quad -h_1/2 \leq z_1 \leq h_1/2$$

[0035] 薄膜应变

$$[0036] \quad \varepsilon_2 = -\frac{N_1}{E_2wh_2} + kz_2 + \beta_2 T, \quad -h_2/2 \leq z_2 \leq h_2/2$$

[0037] 3) 双层梁边界条件

$$[0038] \quad \varepsilon_1 \Big|_{z_1=h_1/2} = \frac{N_1}{E_1wh_1} + k\frac{h_1}{2} + \beta_1 T = \varepsilon_2 \Big|_{z_2=-h_2/2} = -\frac{N_1}{E_2wh_2} - k\frac{h_2}{2} + \beta_2 T$$

[0039] 4) 双层梁变形曲率方程

$$[0040] \quad k = \frac{6(\beta_2 - \beta_1)T}{1 + 4\frac{h_2}{h_1}\frac{E_2}{E_1} + 6\frac{h_2^2}{h_1^2}\frac{E_2}{E_1} + 4\frac{h_2^3}{h_1^3}\frac{E_2}{E_1} + \frac{h_2^4}{h_1^4}\frac{E_2^2}{E_1^2}}{\left(\frac{h_2}{h_1} + 1\right)\frac{h_2}{h_1^2}\frac{E_2}{E_1}}$$

[0041] 5) 双层梁本构方程

$$[0042] \quad \text{基底应力 } \sigma_1 = E_1(\varepsilon_1 - \beta_1 T)$$

$$[0043] \quad \text{薄膜应力 } \sigma_2 = E_2(\varepsilon_2 - \beta_2 T)$$

[0044] 式中 N_1 、 N_2 分别为基底与薄膜的轴力, M_1 、 M_2 分别为基底与薄膜的弯矩, h_1 、 h_2 分别为基底与薄膜的厚度, w 为梁宽度, k 为梁变形曲率, E_1 、 E_2 分别为基底材料与薄膜材料的弹性模量, T 为等效广义载荷, z_1 、 z_2 分别为偏离基底与薄膜中性层的距离, ε_1 、 ε_2 分别为基底应变与薄膜应变, β_1 、 β_2 分别为基底材料与薄膜材料的等效膨胀系数, σ_1 、 σ_2 分别为基底应力与薄膜应力。

[0045] 本发明的特点以及有益效果

[0046] 1. 本发明将热膨胀应力分析方法推广应用到生-物-电-化-热-力等多种广义载荷作用下基底-薄膜双层异质结构基底应力与薄膜应力的测量方法中,在不同的广义载荷作用下,只需要计算基底材料与薄膜材料的等效膨胀系数即可;

[0047] 2. 由于广义载荷作用下存在薄膜材料物理性质发生变化的事实,在基底材料弹性模量已知且不变的条件下,本发明可表征随广义载荷变化的薄膜材料弹性模量;

[0048] 3. 本发明的应力测量方法考虑了薄膜材料弹性模量的变化,应力表征方法与薄膜材料的弹性模量直接相关,相比于目前常用的假定薄膜材料弹性模量为常数的Stoney公式,本发明的应力测量方法显示出薄膜材料弹性模量的重要性,更符合实际应用,使得应力测量结果更精确,可用于多场耦合下广义载荷引起的应力分析中,为多层结构的优化设计提供参考依据。

附图说明

[0049] 图1是基底-薄膜双层异质梁结构 (a) 初始构型 (b) 广义载荷引起的梁弯曲变形,图中 N_1 、 N_2 分别基底和薄膜的轴力, M_1 、 M_2 分别基底和薄膜的弯矩;

[0050] 图2是恒电流充放电过程中电化学嵌锂浓度广义载荷作用下硅复合电极第二圈嵌锂过程中嵌锂引起的变形曲率(左轴)以及嵌锂浓度引起的电极材料弹性模量(右轴)随比容量的变化,其中比容量表示嵌锂浓度;

[0051] 图3是第二圈嵌锂过程中嵌锂引起的电极材料应力演化曲线,其中左轴考虑电极材料弹性模量随嵌锂浓度变化,右轴电极材料的弹性模量为常数1.08GPa。

具体实施方式

[0052] 首先需要知道广义载荷作用下的双层异质结构的弯曲变形响应。目前已知在电化学领域中,电化学广义载荷-嵌锂浓度的作用下锂离子电池硅电极的弹性模量随着嵌锂浓度发生显著变化,以下通过硅复合电极在电化学载荷作用下引起错配应变从而使得电极发生弯曲变形为例,说明本发明提出的应力测量方法的具体使用过程,及其对应力准确性的重要性。需要说明的是本实施例是叙述性的,而不是限定性的,不以此限定本发明的保护范围。

[0053] 硅复合电极由铜箔和电极材料组成,可简化为由以铜箔为基底和以电极材料为薄膜的基底-薄膜双层异质梁结构,电极材料由70wt%的硅纳米颗粒、15wt%导电剂super p和15wt%粘结剂海藻酸钠(AS)组成。在电化学恒电流充放电过程中,随着锂离子的不断嵌入,嵌锂浓度增加,电极材料发生膨胀,由于基底的约束作用使得电极材料与基底之间存在错配应变从而硅复合电极发生弯曲变形。使用LAND-CT2001A蓝电电池测试仪对硅复合电极以530uA的电流大小进行恒电流充放电循环,同时采用光学方法,通过原位立式电化学电池测量恒电流充放电过程中硅复合电极的弯曲变形,硅复合电极第二圈嵌锂过程中嵌锂浓度引起的变形曲率随比容量的变化如图2左轴所示,其中比容量可用于代表广义电化学载荷-嵌锂浓度。

[0054] 基于上述比容量-变形曲率的一一对应关系,考虑广义载荷引起的薄膜材料弹性模量变化的应力测量方法有以下两个步骤:

[0055] (1) 表征电化学嵌锂浓度引起的薄膜材料弹性模量变化

[0056] 相关的材料与实验参数如下:

[0057] (a) 广义载荷

[0058] 在电化学过程中, 广义载荷 T 为嵌锂浓度, 由比容量 c 与最大比容量 C_{\max} 的比值进行归一化, 即 $T=c/C_{\max}$;

[0059] (b) 等效膨胀系数

[0060] 由于嵌锂反应仅发生在电极材料层, 因此在基底铜箔中 $\beta_1=0$; 考虑到硅复合电极中非活性物质和孔隙率所占体积, 硅体积分数取值50%, 且完全锂化时硅的最大体积膨胀约为370%, 因此该复合电极最大膨胀体积为 $370\%*0.5+0.5=2.3=(1+\beta_2)^3$, 由此得到等效膨胀系数 $\beta_2=0.33$;

[0061] (c) 双层结构材料物理性质

[0062] 铜箔弹性模量 $E_1=80\text{GPa}$, 铜箔厚度 $h_1=28\mu\text{m}$; 电极材料初始厚度 $h_2^0=18\mu\text{m}$, 其随嵌锂浓度变化的厚度 $h_2=h_2^0(1+1.3T)$, 其中考虑了基底约束作用下最大体积膨胀230%仅发生在厚度方向;

[0063] 结合得到的比容量-曲率一一对应值以及上述相关的参数, 根据广义载荷引起的薄膜材料的弹性模量变化的表征方法

$$E_2 = -\frac{E_1 h_1}{h_2^3 k} \{ 2h_2^2 k + 3h_2 h_1 k + 2kh_1^2 - 3h_2(\beta_2 - \beta_1)T - 3h_2(\beta_2 - \beta_1)T +$$

[0064]
$$\sqrt{\frac{(4h_2^4 k^2 + 12h_2^3 h_1 k^2 + 16h_2^2 h_1^2 k^2 + 12h_1^3 h_2 k^2 + 4h_1^4 k^2 - 12(\beta_2 - \beta_1)Th_2^3 k - 30(\beta_2 - \beta_1)Th_2^2 h_1 k - 30(\beta_2 - \beta_1)Th_1^2 h_2 k - 12(\beta_2 - \beta_1)Th_1^3 k + 9(\beta_2 - \beta_1)^2 T^2 h_2^2 + 18(\beta_2 - \beta_1)^2 T^2 h_2 h_1 + 9(\beta_2 - \beta_1)^2 T^2 h_1^2)}{}} \}$$

[0065] 可计算得到广义载荷-嵌锂浓度作用下第二圈嵌锂过程中电极材料随嵌锂浓度变化的弹性模量, 如图2右轴所示。

[0066] (2) 表征考虑嵌锂浓度引起的硅复合电极材料弹性模量变化的基底应力与薄膜应力

[0067] 在此仅以薄膜应力为例, 采用与步骤(1)相同的计算参数, 并且将步骤(1)计算得到的随嵌锂浓度变化的电极材料弹性模量值代入到考虑广义载荷引起的薄膜材料弹性模量变化的薄膜应力的表征方法

$$[0068] \quad \sigma_2 = \left[-\frac{E_2 h_2^3 + E_1 h_1^3}{6(h_2 + h_1)h_2} + E_2 z_2 \right] \frac{6(\beta_2 - \beta_1)T}{1 + 4\frac{h_2}{h_1} \frac{E_2}{E_1} + 6\frac{h_2^2}{h_1^2} \frac{E_2}{E_1} + 4\frac{h_2^3}{h_1^3} \frac{E_2}{E_1} + \frac{h_2^4}{h_1^4} \frac{E_2^2}{E_1^2}} \left(\frac{h_2}{h_1} + 1 \right) \frac{h_2}{h_1} \frac{E_2}{E_1}$$

[0069] 计算可得到第二圈嵌锂过程中考虑嵌锂浓度引起的电极材料弹性模量变化的电极材料应力, 如图3左轴所示。同时在薄膜应力表征方法中, 取电极材料的弹性模量始终为其初始值1.08GPa, 其余计算参数不变, 可得到电极材料弹性模量为常数时电极材料应力, 如图3右轴所示, 该应力值与目前薄膜材料弹性模量为常数的Stoney公式计算得到的应力值大体一致。电极材料弹性模量为常数下计算得到的应力值(图3右轴)与本发明考虑电极材料弹性模量变化时计算得到的应力值(图3左轴)存在巨大差异, 该对比证实了应力测量时考虑广义载荷引起的薄膜材料性质变化的重要性以及本发明的必要性以精确计算应力。

[0070] 本发明提出一种基底-薄膜双层异质结构基底应力与薄膜应力测量方法,已知基底材料的弹性模量且为常数,考虑广义载荷作用下薄膜材料弹性模量随广义载荷变化,修正了常用的Stoney公式。其特点是将热应力分析推广到多场耦合的广义载荷下双层异质结构应力测量中,主要分为两个步骤:1、基于广义载荷下的变形曲率,表征广义载荷作用下随广义载荷变化的薄膜材料弹性模量;2、基于变形曲率与得到的薄膜材料的弹性模量,表征考虑广义载荷引起的薄膜材料弹性模量变化的双层异质结构基底应力与薄膜应力。本发明的应力测量方法考虑了广义载荷引起的薄膜材料弹性模量的变化,相比于目前常用的假定薄膜材料弹性模量为常数的Stoney公式,本发明的应力表征方法显示出薄膜材料弹性模量的重要性,更符合实际应用,使得基底应力与薄膜应力计算更精确,可用于多场耦合下广义载荷引起的基底应力与薄膜应力测量,从而为材料的损伤断裂等分析以及结构优化设计提供参考依据。

[0071] 本发明公开和提出的一种广义载荷引起薄膜材料弹性模量变化的应力测量方法;本领域技术人员可通过借鉴本文内容,适当改变条件路线等环节实现,尽管本发明的方法和制备技术已通过较佳实施例子进行了描述,相关技术人员明显能在不脱离本发明内容、精神和范围内对本文所述的方法和技术路线进行改动或重新组合,来实现最终的制备技术。特别需要指出的是,所有相类似的替换和改动对本领域技术人员来说是显而易见的,他们都被视为包括在本发明精神、范围和内容中。

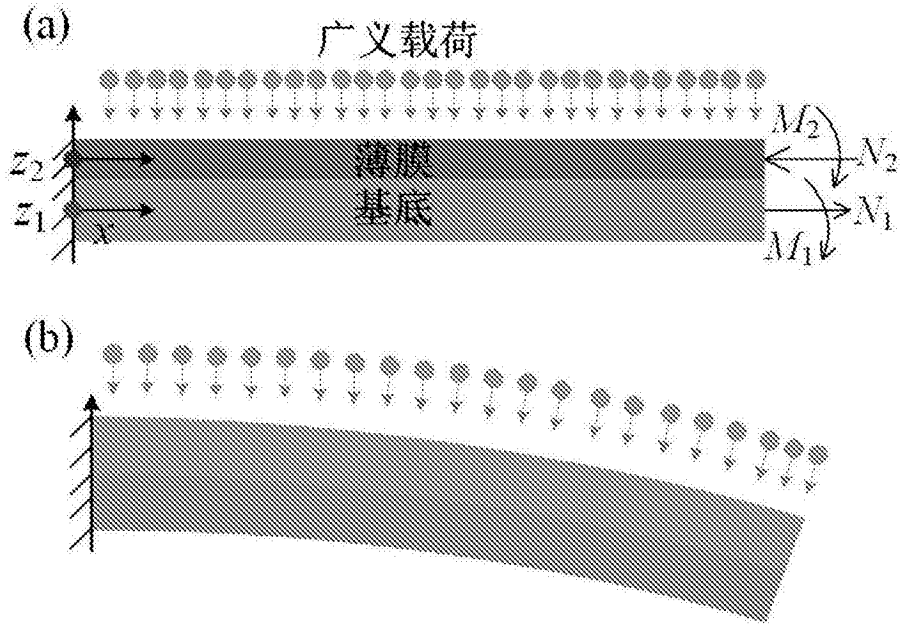


图1

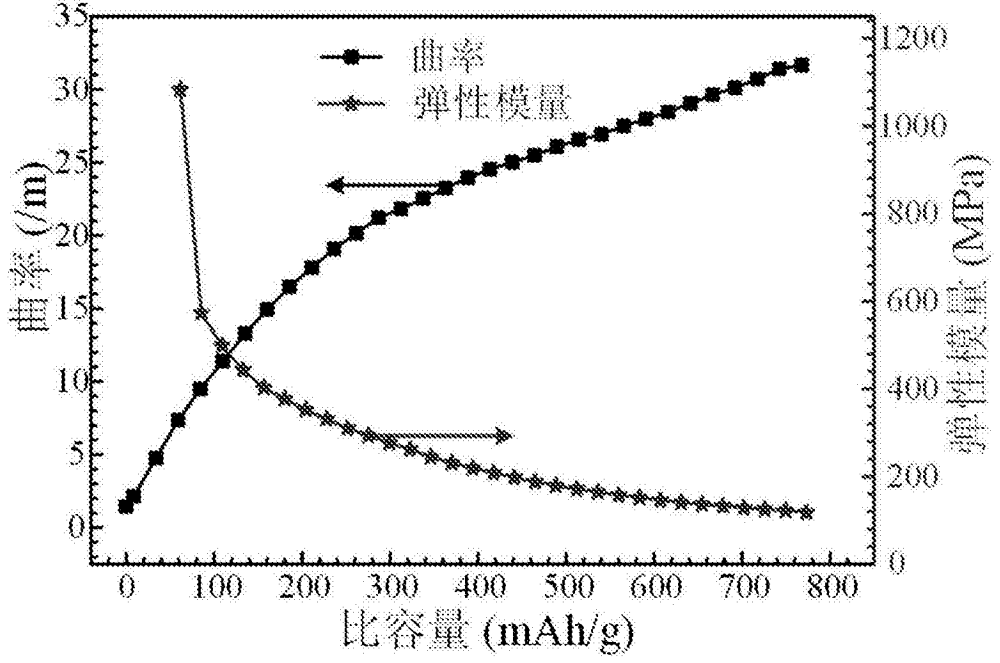


图2

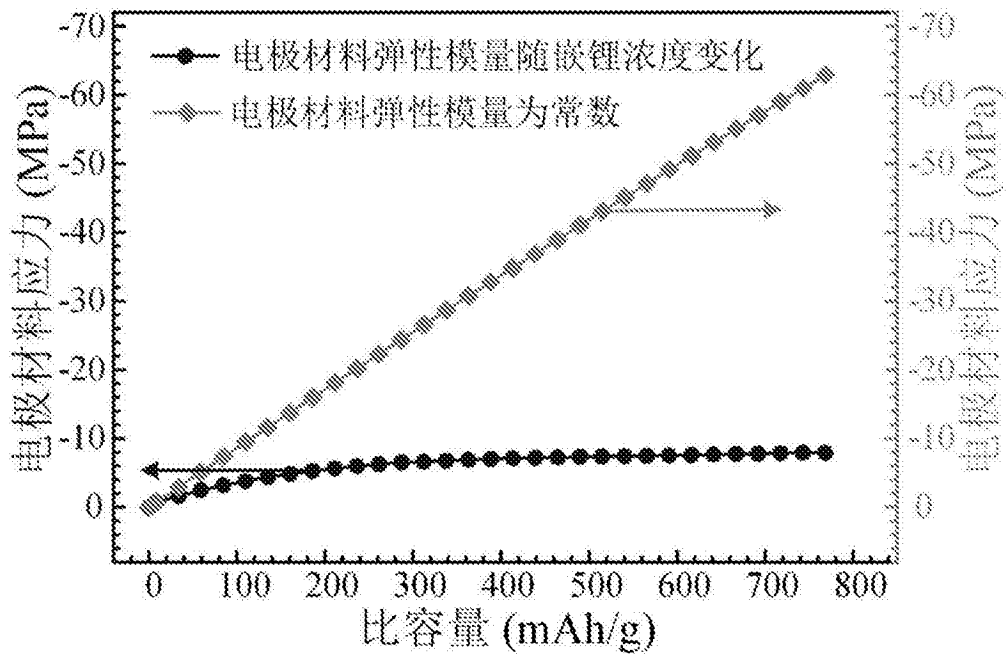


图3