

基于随机电阻网络碳毡复合层力阻建模*

方 玺, 葛权耕

(武汉理工大学 理学院, 武汉 430063)

摘要: 基于碳纤维单丝力阻效应影响因素的统计规律,揭示了碳毡复合层力阻传感特性的导电网络量化模型.对碳纤维单丝相互搭接后的长度进行了讨论,得到关于纤维均长、纤维密度、纤维根数等多参量间的统计关系;在假设毡内纤维随机均匀分布且搭接点正态分布的情况下,分别对4种不同尺寸的碳纤维毡复合层的电阻进行了估测,并通过箱线图分析表明实测值在相应的估测范围内,说明本模型可较好地、对碳纤维随机乱相分布的碳毡复合层电阻进行估测;最后,基于碳毡电阻网络的统计模型,对碳毡复合层的力阻特性进行了研究,通过比较理论电阻变化率与实测电阻变化率发现模型给出的复合层力阻效应灵敏系数较为稳定,从而表明随机电阻网络模型可较好的模拟碳毡受载荷时的力阻行为.

关键词: 碳纤维毡; 电阻网络; 复合层; 统计分析

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.01.007

引 言

树脂基碳纤维智能材料通常是将一定量的碳纤维与树脂进行混合后的复合材料,其力阻响应是通过碳纤维任意分布并且相互间搭接而形成的电阻网络实现的,故而碳纤维的分布是一个关键问题,影响碳纤维分布的因素也是碳纤维智能材料领域中的研究重点之一.

关于树脂基碳纤维智能材料的力阻功能特性,国内外学者广泛地开展了研究,美国 Chung 等教授主要以环氧树脂作为基体较全面地考察了碳纤维复合材料的力阻特性^[1-2];国内李卓球等系统地、对树脂基碳纤维智能材料的力阻耦合等响应机理进行了深入的分析^[3-4].关于树脂基碳纤维智能材料力阻效应的形成机理, Park 等在对 CFRP(carbon fiber reinforced polymer composite)力阻效应的解释中提出了纤维局部并联的改进模型^[5];Zhu 等早在 2007 年通过建立的树脂基连续碳纤维层合梁表面电阻模型分析了变形后梁的力阻效应^[6].尽管诸如上述电学响应模型可对碳纤维智能材料的力阻效应作出与实际测量相吻合的解释,但力阻效应的形成机理仍旧不明确,尤其是导电机理方面缺乏有力的量化分析.对于碳纤维毡复合材料存在力阻功能特性上国内外学者是具有共识的,纤维分布对感知网络的形成具有关键作用.但现有文献中关于纤维电阻网络如何对载荷或温度进行响应的机理尚不多见,对于碳纤维毡二维平面内不同类型纤维搭连形式的数学模型和与之对应的导电网络的响应机理研究尚不明确,故在碳毡

* 收稿日期: 2012-06-21; 修订日期: 2012-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11102142);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012-IV-057);2012 国家级大学生创新创业训练项目(20121049714004)

作者简介: 方玺(1981—),男,湖北浠水人,讲师,博士(通讯作者. E-mail: fangxi@whut.edu.cn).

中纤维分布规律的统计研究基础上有必要进一步在细观尺度下开展碳纤维无规电阻网络的传感机理研究。

本文对实物毡在真空袋压成型工艺下复合层的力阻传感机理进行更深入的细观建模并对其传感特性展开研究。提出碳毡传感功能特性的统计建模的课题,对于碳纤维智能复合材料的结构响应本质特征以及碳纤维复合材料在重大工程结构服役过程中的损伤检测和健康状态的表征,不仅在学术上揭示碳毡复合层力阻传感特性的导电网络定量化模型,而且具有潜在的理论应用价值。

1 随机碳毡导电网络的细观建模

如图 1 所示,图 1(a)为 SEM 下放大的碳毡表面形貌,其上可以观察到,纤维与纤维间在同一个平面内相互随机搭接,同时在不同的层面内纤维也上下错动,不同层面间的纤维也存在相互搭接,常见的形式是在同一个搭接点处存在着多根碳纤维搭接的现象;搭接点间的碳纤维段的长度是随机分布的,对应着其导电网络中的各个由纤维段所产生的电阻自然也是随机取值的,搭接段的数目巨大。由于接触电阻和隧道效应产生的电阻的机理相当复杂,目前没有定论可直接应用,因此这众多不确定因素给深入研究碳纤维毡的力阻特性造成了困难。出于简化模型的考虑,可将碳纤维毡视为由两层碳纤维平面相互接触形成的,将两层碳纤维视作电阻并联结构。可将碳纤维层假设为由碳纤维单丝和接触电阻构成的随机电阻网络,其平面结构如图 1(b)所示,深色电阻即为接触电阻,浅色电阻为对应的碳纤维单丝的电阻。因此,在如上假设下,我们将碳纤维毡复合层的导电网络假设为图 1(c)中 $N \times N$ 阶导电网络。

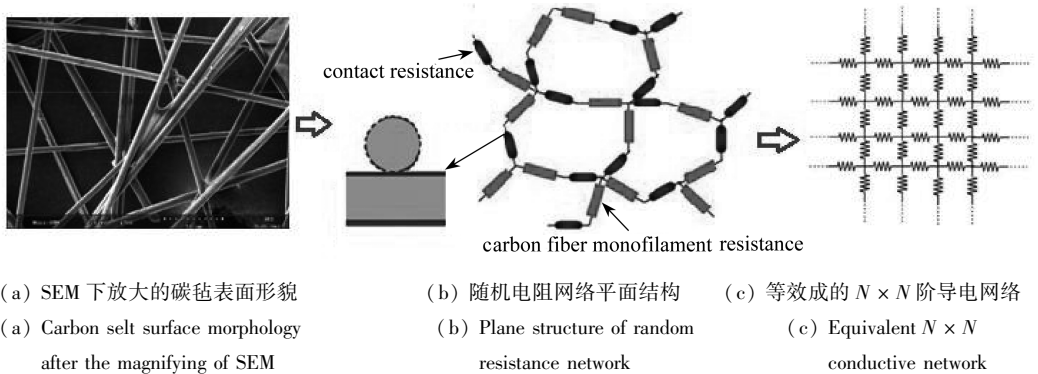


图 1 随机碳毡导电网络的细观建模原理图

Fig. 1 Modeling principle diagram of random carbon felt conductive network

1.1 电阻网络阶数及总接触点个数的确定

在具体使用 $N \times N$ 阶导电网络分析碳毡复合层传感特性时,必须要知道该导电网络的阶数,由 Cheng 等^[7]的研究成果可得到电阻网络中纤维搭接点处个数与纤维根数、纤维尺寸、纤维指向等因素间具有如下的统计关系:

$$N_c = \frac{1}{2} (1 + e^{-N_f \lambda \omega / A}) \frac{N_f^2 \lambda^2}{A} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{e^2 \pi}{6} \right), \quad (1)$$

其中, N_c 为网络中搭接点的个数; N_f 为形成网络的纤维根数; A 为网络形成面积; λ 为纤维长度; ω 为纤维直径; e 为纤维指向。

在二维平面内,纤维指向的分布密度函数可以用 Fourier 级数展开,取前两项,有

$$P(\theta) = \frac{1}{\pi} + e \cdot \cos 2\pi, \quad (2)$$

对于随机分布的碳毡而言, e 这里可取 0. 式(1)可简化为

$$N_c = \frac{1}{2\pi A} (1 + e^{-N_f \lambda \omega / A}) N_f^2 \lambda^2. \quad (3)$$

同时通过导电网络的自身性质, 知道对 $N \times N$ 阶网络而言, 网络中搭接点的个数和网络阶数有如下关系:

$$N_c = (N_J + 1) \times (N_J + 1). \quad (4)$$

在本文中, 所用碳纤维单丝直径 $7 \mu\text{m}$, 长度 5 mm , 以毡面积 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 为例, 通过上述方程可得网络阶数与纤维根数间的关系:

$$(N_J + 1)^2 = 25 \left(1 + \frac{1}{e^{2.2N_f \times 10^{-5}}} \right) N_f^2 \times 10^{-4}, \quad (5)$$

其关系图如图 2 所示.

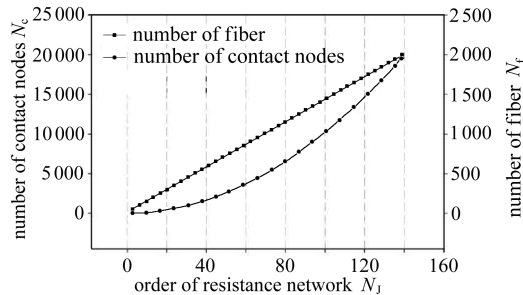


图 2 网络阶数与纤维根数间的关系

Fig. 2 Relationship between network order number and fiber number

1.2 搭接段平均长度的确定

若已知碳纤维毡的面积设为 A , 厚度为 T , 孔隙度为 e , 碳纤维直径为 r , 碳纤维层间树脂 (含偶联剂) 的厚度为 H , 则定义单层电阻网络的厚度为 t

$$t = r + H, \quad (6)$$

单层电阻网络碳纤维总长 L_f , 由文献[8]可建立如下表达式:

$$L_f = \frac{AT(1 - e)}{(1/4)\pi r^2 A (T/(r + H))} = \frac{4(r + H)(1 - e)}{\pi r^2}. \quad (7)$$

假设单层纤维网络中, 碳纤维长度为 l_f , 碳纤维的指向成均匀随机分布. 有着共同搭接点的两纤维处于同一电阻网络中, 其中单位面积内碳纤维根数由下式可确定:

$$n = \frac{A \cdot L_f}{l_f}. \quad (8)$$

在本文中, 碳纤维毡为类似造纸技术“湿成法”所制, 碳纤维单丝长度均为 5 mm . 碳纤维毡的面积 A 可通过测量得到.

在模型中, 关于纤维搭接段长度是最为重要的参数之一. 很显然由碳毡的 SEM 图中可观察, 同根纤维可与周围数根纤维形成搭接点, 也就是说, 同根纤维可被数根纤维所分割成若干段, 每段由其长度形成一定的电阻, 这样形成整个电阻网络.

纤维搭接段的长度不仅与搭接点的数目有关, 而且与该纤维的指向有关, 从图 1 也可发现, 要通过图像技术测量出网络中各个分段电阻是不现实的. 所以只可能结合统计技术从纤维

搭接段长度的概率分布入手而后得到统计意义上的搭接长度的平均值。

根据碳纤维毡中纤维随机分布的特点,由文献[9]假设碳纤维毡单层碳纤维网络中,单位面积内有 n 根碳纤维. 假设纤维指向角为 θ , 长度为 l , 则其分布函数可记为 $\psi(\theta, l)$, 又因为纤维指向角 θ 和长度 l 相互独立, 故有

$$\psi(\theta, l) = \varphi(\theta) \cdot g(l), \quad (9)$$

$\varphi(\theta)$ 为指向角 θ 的分布函数, $g(l)$ 代表纤维长度 l 的分布函数. 对于长度固定为 l_f 且指向角 θ 限制在区间 $[0, \theta_f]$ 的情形, $\psi(\theta, l)$ 可用下式表示:

$$\psi(\theta, l) = \frac{D(l - l_f)}{\theta_f} \quad (0 < \theta_f < \pi), \quad (10)$$

其中分子 $D(l - l_f)$ 为 Dirac 函数.

纤维分段长度落在区间 $[L, L + dL]$ 的可通过下式描述:

$$dN(L, \gamma) = nl_f \psi(\gamma, l_f) [\kappa(\gamma) + 2r] dL d\gamma, \quad (11)$$

其中 γ 为与指向角 θ 碳纤维有搭接点的纤维间的夹角.

当纤维长度固定为 l_f 时, $\kappa(\gamma) = l_f \sin(\gamma) + 2r |\cos(\gamma)|$, 对于单根碳纤维上搭接点的个数可通过下式估计^[9].

$$p = \begin{cases} \frac{nl_f^2 \left\{ 1 - \cos(\theta_f) + 2 \frac{[\theta_f + \sin(\theta_f)] \cdot r}{l_f} \right\}}{\theta_f}, & 0 < \theta_f < \pi/2, \\ \frac{nl_f^2 \left\{ 1 - \cos(\theta_f) + 2 \frac{[2 + \theta_f - \sin(\theta_f)] \cdot r}{l_f} \right\}}{\theta_f}, & \pi/2 \leq \theta_f \leq \pi. \end{cases} \quad (12)$$

通过观测自制毡,基本上可认为碳纤维指向是均匀分布,也就是说 $\theta_f = \pi$, 则

$$p = \frac{2n}{\pi} l_f^2 \left[1 + \frac{(2 + \pi) \cdot r}{l_f} \right]. \quad (13)$$

得到单根纤维上的搭接点个数 p , 而单根纤维的长度是一定的, 则纤维分段长度的均值可由下式给出.

$$\bar{l} = \frac{l_f}{p + 1} = \frac{l_f}{1 + 2nl_f^2 \left(\frac{1}{\pi} + \frac{(1 + 2/\pi) \cdot r}{l_f} \right)}. \quad (14)$$

2 碳纤维毡复合层初始电阻的估测

将碳纤维毡分别裁成试样 I: 10 mm×30 mm, 试样 II: 20 mm×40 mm, 试样 III: 30 mm×50 mm, 试样 IV: 40 mm×60 mm 大小, 按照图 3 的尺寸分别贴上铜丝电极, 真空袋压常温固化成型. 后粘贴于玻璃钢样条上. 碳毡复合层随机电阻网络模型中关键参量见表 1.

将固化后并牢固粘连玻璃钢样条的碳毡纤维试样放在 Instron 5882 材料试验机上对其进行拉伸, 在玻璃钢样条上施加最大载荷值为 12 kN 的力, 同时在载荷三角形控制循环下进行试样循环拉伸实验, 测得电阻随外载的变化趋势, 并且获得碳毡复合层的初始电阻. 测试结果如图 4 (这里只列举试样 II 的测试结果). 当载荷到达 12 kN 时, 应变所测为 4 700 $\mu\epsilon$. 可见真空袋压工艺下的碳毡复合层灵敏度比手糊工艺下的碳毡复合层的灵敏度要低, 但从电阻曲线来看, 真空袋压工艺下的碳毡复合层的电阻非常的稳定.

表 1 不同尺寸的碳毡复合层随机电阻网络参数

Table 1 Parameters of different size of carbon felt composite layer random felt resistance network

sample number <i>i</i>	number of fibers in the plane <i>m</i>	the number of fibers in unit area <i>n</i>	average lap length \bar{l}	number of fibers lap point in the plane N_c	resistance network order number N_j
I	2.546×10^3	2.546×10^7	12.2 μm	363 896	602
II	1.018×10^4	2.546×10^7	12.2 μm	1 454 442	1 205
III	2.291×10^4	2.546×10^7	12.2 μm	3 272 481	1 808
IV	4.073×10^4	2.546×10^7	12.2 μm	5 820 628	2 411

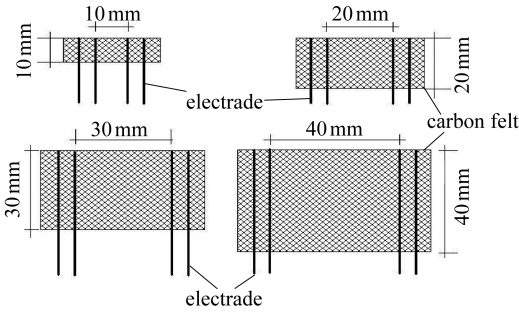


图 3 不同尺寸的毡

Fig. 3 Different size of felts

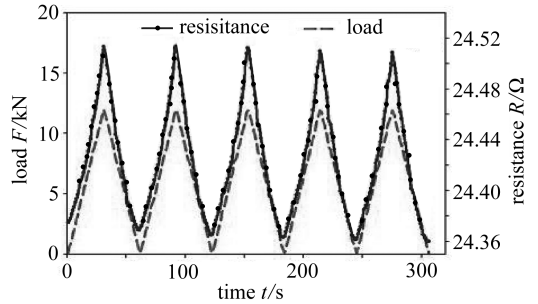


图 4 试样 II 对应的电阻响应值

Fig. 4 Resistance response value of sample II

表 2 各尺寸下的初始电阻值 Ω

Table 2 Initial resistance value (Ω) in different size

sample number <i>i</i>	resistance <i>R</i>											
	theory resistance value										mean	measured value
I	14.96	14.19	12.9	16.77	17.54	19.09	21.16	15.12	18.19	18.58	16.85	20.79
II	20.46	17.69	15.43	21.10	17.23	25.41	20.90	20.64	18.47	22.75	20.01	24.36
III	28.99	18.83	17.36	20.82	29.08	24.82	21.79	19.97	24.10	24.77	23.05	25.35
IV	35.40	31.55	48.66	30.57	45.05	36.89	25.05	31.58	28.48	28.23	34.15	35.84

表 2 为各尺寸碳毡复合层的理论估测电阻(由式(14)估测,在估测时本文假设单位长度的电阻值是相同的)和实测电阻. 每种尺寸的试样均通过随机网络估算了 10 次电阻, 试样 I 和试样 II 的实测值与估算值平均值相对误差约 18.95% 和 17.86%, 试样 III 和试样 IV 的实测值与估算值平均值的相对误差为 9.07% 和 4.72%, 这可能是因为毡样尺寸效应引起的, 当碳毡试样的尺寸远大于其内碳纤维单丝的长度时, 电阻网络越匀称, 由纤维指向不均匀导致的局部畸形电阻网络对整个网络阻值的影响越小, 故而尺寸效应对电阻值计算的影响也就越小. 对于相同长度碳纤维随机搭接构成的碳毡, 如果碳毡尺寸越大, 即毡边长与碳纤维长度比值越大, 碳纤维在其内分布越均匀, 其搭接长度更加满足正态分布且纤维指向分布愈加均匀, 而本模型正是建立在碳纤维均匀分布的假设基础上, 可见碳毡的尺寸是一个影响模型精度的重要因素.

图 5 通过箱线图这个统计工具描述了理论电阻值和实测电阻的偏差程度. 图中折线为实测各样本的电阻. 不难发现, 尽管试样 I 和试样 II 中, 实测值几乎达到了理论估测区间的上限, 但整体上实测值仍在相应的估测范围内, 说明本模型可较好地对碳纤维随机乱相分布的碳毡复合层电阻进行估测.

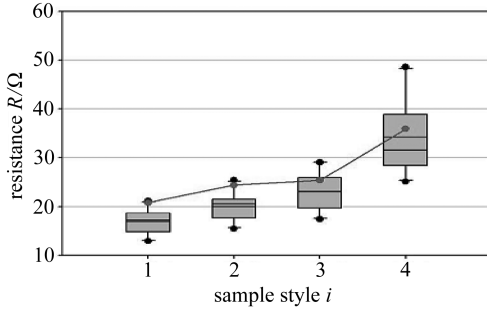


图5 理论电阻值箱线图

Fig.5 Box plot of theoretical resistance value

3 碳毡复合层的力阻特性细观统计分析

为了将本模型用到碳纤维毡力阻传感特性的研究中,以试样IV作为研究对象,通过基于细观统计分析模型来估测各拉伸状态下的电阻变化率.在产生的随机电阻网络中,每个电阻因位置不同根据单丝的力阻效应予以修正,通过对照修正后的电阻网络的等效电阻值和实测值,进一步明确真空工艺下碳毡复合层力阻传感特性的机理.

对试样IV分别用表2中的估测数据对其力阻效应进行定量描述,分别在4 kN,6 kN,8 kN,10 kN,12 kN,14 kN,16 kN,18 kN,20 kN作用下对其进行力阻效应实验.取这9组随机电阻中的最大电阻估测值和最小估测值做各实验下的力阻效应分析.

图6为试样IV在4 kN及20 kN等幅循环拉伸实验下的电阻响应曲线.通过与其余图对比,我们发现除了20 kN的实验状况下,电阻曲线在谷值附近有凸起类似“w”形状外,其他实验下,电阻曲线均与载荷曲线严格同步,且电阻曲线基本是按线性地随着外加荷载增大电阻增大,随外加荷载减小而减小的规律变化的.20 kN拉伸状况下,谷底处电阻不同步的现象可能是在该荷载下,有些纤维间的搭接点已经松动了,由前几个阶段的接触电阻发展到这个阶段的少许搭接处靠隧道电流导通,所以宏观上电阻表现出不如前几阶段的电阻曲线的良好线性,而且峰值有所漂移,因此本模型不再适用.

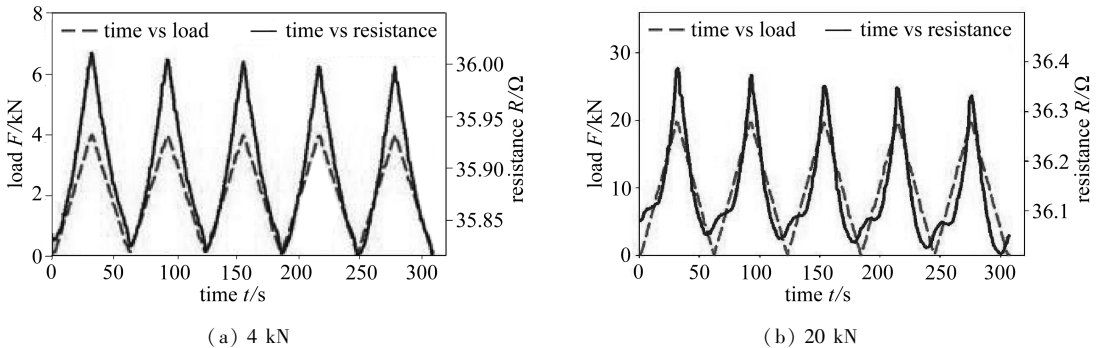


图6 碳毡复合层的电阻响应曲线

Fig.6 The resistance response curve of carbon felt composite layer

因为真空袋压工艺下的纤维搭接很紧密,所以其碳毡复合层的力阻效应主要靠纤维自身的形变产生,基于此,本文取经过丙酮处理后的碳纤维单丝的平均灵敏度2.5作为电阻网络输入参数之一,将各实验下测得的应变输入到电阻网络中,使得各个纤维产生形变导致电阻变化,从而整个电阻网络发生相应的改变.表3显示的是理论上的计算值和实测值,本文以此进

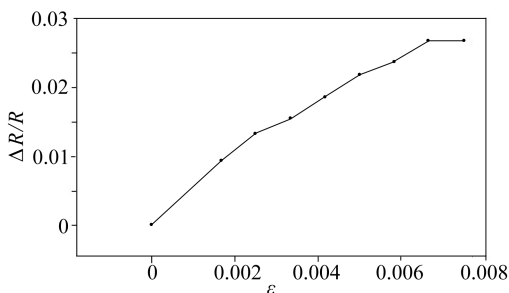
一步来分析碳毡复合层的力阻特性。

表 3 实验 1 ~ 8 下的理论电阻值与实测值 Ω

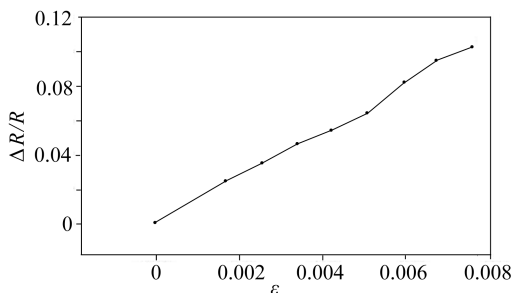
Table 3 Theory and measured resistance value (Ω) in experiment 1 ~ 8

	initial value	experiment 1	experiment 2	experiment 3	experiment 4
measured value	35.8	35.99	36.12	36.20	36.27
estimate 1	25.040 1	25.042 5	25.043 5	25.044 0	25.044 8
estimate 2	48.669 1	48.680 99	48.686 15	48.691 57	48.695 44
	experiment 5	experiment 6	experiment 7	experiment 8	
measured value	36.33	36.40	36.42	36.43	
estimate 1	25.045 6	25.046 1	25.046 9	25.046 9	
estimate 2	48.700 34	48.708 85	48.715 56	48.719 43	

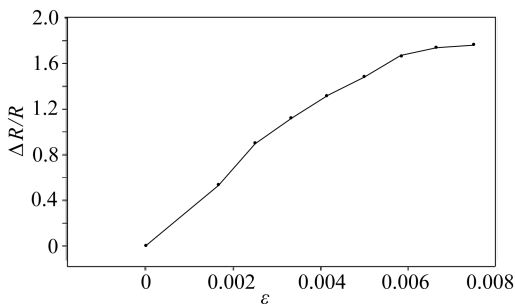
图 7 为基于电阻网络估测的电阻率对应变的响应。不难发现,图 7(a)和图 7(b)中碳毡响应电阻的估测值均可以较好的体现毡的力阻特性,当拉应变增大的时候,电阻网络的电阻也随之相应的增大,电阻率增量随着应变线性增大,与图 7(c)中碳毡复合层承载时的电阻变化率实测曲线趋势上吻合,同时也反映出由模型给出的复合层力阻效应灵敏系数较为稳定,因而可以说明本文给出的模型所得理论结果与实测情况较为统一,进一步说明了模型的正确性。



(a) 以初始值为最小值 25.040 1 Ω 时的电阻变化率
(a) Resistance change rate in the minimum initial value of 25.040 1 Ω



(b) 以初始值为最小值 48.669 1 Ω 时的电阻变化率
(b) Resistance change rate in the minimum initial value of 48.669 1 Ω



(c) 实测电阻变化率
(c) Actual resistance change rate

图 7 基于随机电阻网络估测碳毡复合层应变响应下的电阻变化率曲线

Fig. 7 Resistance change rate basic on the strain response of random resistance network carbon felt composite layer

4 结 论

本文通过在细观尺度下对碳纤维毡复合层的力阻特性进行了建模。主要工作如下:

1) 在研究了碳纤维毡微观形貌后,对碳纤维单丝相互搭接后的长度进行了讨论,并得到关于纤维均长、纤维密度、纤维根数等多参量间的统计关系,得到了碳毡细观统计模型。

2) 在假设毡内纤维随机均匀分布且搭接点正态分布的情况下,结合已有的电阻网络程序,分别对4种不同尺寸的碳纤维毡复合层的电阻进行了估测,通过绘制箱线图发现实测值几乎达到了理论估测区间的上限,但整体上实测值仍在相应的估测范围内,说明本模型可较好的对碳纤维随机乱相分布的碳毡复合层电阻进行估测。

3) 基于碳毡电阻网络的统计模型,对碳毡复合层的力阻特性进行了研究,通过比较理论电阻变化率与实测电阻变化率,发现模型给出的复合层力阻效应灵敏系数较为稳定,进而表明随机电阻网络模型可较好的模拟碳毡受载荷时的力阻行为。

参考文献(References):

- [1] Chung D D L. Damage detection using self-sensing concepts[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2007, **221**(4): 509-520.
- [2] ZHEN Mei, Chung D D L. Thermoplastic matrix phase transition in a carbon fiber composite, studied by contact electrical resistivity measurement of the interface between two unbonded laminae[J]. *Polym Compos*, 2002, **23**(5): 824-827.
- [3] 宋显辉, 刘冬, 吕泳, 李卓球. 碳纤维树脂基复合材料的传感特性研究[J]. *工程塑料应用*, 2007, **35**(2): 48-51. (SONG Xian-hui, LIU Dong, LÜ Yong, LI Zhuo-qiu. Research on sensing properties of polymer based carbon fiber composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2007, **35**(2): 48-51. (in Chinese))
- [4] 刘冬, 李卓球, 宋显辉, 朱四荣, 郑华升. 树脂基碳纤维复合材料应变传感稳定性研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, **30**(12): 8-10. (LIU Dong, LI Zhuo-qiu, SONG Xian-hui, ZHU Si-rong, ZHEN Hua-sheng. Research on the strain-sensing stability of polymer based carbon fiber composite[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, **30**(12): 8-10. (in Chinese))
- [5] Park J B, Okabe T, Takeda N, Curtin W A. Electromechanical modeling of unidirectional CFRP composites under tensile loading condition[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, **33**(2): 267-275.
- [6] ZHU Si-rong, Chung D D L. Analytical model of piezoresistivity for strain sensing in carbon fiber polymer-matrix structural composite under flexure[J]. *Carbon*, 2007, **45**(8): 1606-1613.
- [7] Cheng X, Sastry A M, Layton B E. Transport in stochastic fibrous Networks[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2001, **123**(1): 12-19.
- [8] 吴芝亮. 质子交换膜燃料电池接触电阻数学建模与参数分析[D]. 博士论文. 天津: 天津大学, 2008. (WU Zhi-liang. Modeling and parametric study of electrical contact resistance in PEM fuel cells[D]. Ph D thesis. Tianjin: Tianjin University, 2008.)
- [9] Wu X F, Dzenis Y A. Elasticity of planar fiber networks[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**(9): 093501-093509.
- [10] 朱四荣, 李卓球, 宋显辉. 碳纤维水泥砂浆梁变形调节的实验分析[J]. *建筑材料学报*, 2003, **6**(3): 308-311. (ZHU Si-rong, LI Zhuo-qiu, SONG Xian-hui. Experimental analysis about adjustment for deformation of carbon-fiber cement mortar beam[J]. *Journal of Building Materials*, 2003, **6**(3): 308-311. (in Chinese))
- [11] 张小玉, 李卓球, 宋显辉. 碳纤维智能层的传感功能特性研究[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2008, **25**(2): 36-38. (ZHANG Xiao-yu, LI Zhuo-qiu, SONG Xian-hui. Sensor function

- characteristic research of carbon fiber smart layer[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(City Science)*, 2008, **25**(2): 36-38. (in Chinese))
- [12] 张小玉. 碳纤维智能层的特性及其场域监测[D]. 博士论文. 武汉: 武汉理工大学, 2007. (ZHANG Xiao-yu. Characteristic research of carbon fiber smart layer and its field monitoring [D]. Ph D thesis. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.)

Modeling Based on the Random Resistance Network Carbon Felt Composite Layer

FANG Xi, GE Quan-geng

(School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, P. R. China)

Abstract: Based on the statistical rule of the influence factors of carbon fiber monofilament force-resistance effects, the conductive network quantitative model of carbon felt composite layer force-resistance sensing properties was revealed. The length after the lapping of carbon fiber monofilament was discussed, and got the statistics relationship between the average length, density, number of carbon fiber; on the assumption that the fiber random uniform distributed in the felt and the lap points normal distribution, the resistances of 4 different sizes carbon fiber composite layer was estimated, and through the box plot analysis showed that the measured value in the corresponding estimation range, which showed that this model could be good for estimating the resistances of carbon felt composite layer who's fiber random distributed; finally, basic on the statistics model of carbon felt resistance network, the force-resistance effects of carbon felt composite layer was researched. Through the comparison of theory resistance change rate and the measured resistance change rate, find that composite layer force-resistance effects sensitivity coefficient the model gave is comparatively stable, and the simulated result shows that random resistance network model can imitate the resistance behavior when the carbon felt is loaded well.

Key words: carbon felt; resistance network; composite layer; statistic analysis