

# 碳纳米管纤维力-电耦合效应的 实验研究

Experimental Research on Electro-mechanical  
Coupling Effects of Carbon Nanotubes Fibers

刘扶庆, 刘 夏, 杨庆生

(北京工业大学 机电学院, 北京 100124)

LIU Fu-qing, LIU Xia, YANG Qing-sheng

(College of Mechanical Engineering, Beijing

University of Technology, Beijing 100124, China)

**摘要:** CNT 纤维是由沿轴向排列的高度取向的数十万根碳纳米管加捻组装而成。以实验方法研究 CNT 纤维在拉伸载荷与电流共同作用下的力学性质。实验结果表明, 电流的引入会使纤维的模量和断裂强度显著降低。纤维在有电流通过时会产生轴向电致收缩力, 电流强度越大, 电致收缩力越大, 在 5mA 时的收缩力约为 2.5mN。将纤维轴向拉伸到 2% 应变, 经过应力松弛使载荷趋于平稳后, 首次通入电流或加大电流的强度, 发现纤维的张力明显下降, 主要原因是纤维模量变化引起的应力下降大于电致收缩力。在一定强度的电流下将纤维轴向拉伸到 2% 应变, 经过应力松弛使载荷趋于平稳, 然后改为通入相同强度的交流电流时, 发现电致收缩力的响应很敏捷, 当交流电流变化 400 个周期后, 电致收缩力依然展现出较好的变化规律, 这可使得 CNT 纤维作为新型电致驱动材料。

**关键词:** 碳纳米管纤维; 力-电耦合; 力学性质; 电致收缩力; 电致驱动

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2017.001609

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)09-0031-08

**Abstract:** CNT fibers are composed of millions of highly aligned CNTs. The mechanical properties of CNT fibers when passing through different intensities of currents were investigated experimentally. The experimental results show that the introduction of current can obviously reduce the modulus and breaking strength of the fibers. When the current passes through the fibers, an axial electro-contraction force is produced, the electro-contraction force is increased with the increase of current intensity, the electro-contraction force at 5mA is about 2.5mN. By stretching the fiber to the 2% strain axially, after 1000s of the stress relaxation, the load tends to be stable, then switch on current or increase the current intensity, it is found that the tension of the fiber is obviously decreased due to the decrease of the stress caused by the change of modulus is greater than the increase of electric-contraction force. Stretching the fiber axially to 2% strain when passing through a certain intensity of current, after the stress relaxation, the load tends to be stable, then the same intensity of AC current is passed through, the response of the electro-contraction force is very quick. When the AC current changes experience 400 cycles, electro-contraction force exhibits good change, which makes the CNT-fibers as a new type of electro-actuation material.

**Key words:** CNT-fiber; electro-mechanical coupling; mechanical property; electro-contraction force; electro-actuation characteristic

CNTs 已经被研究用于纳米电子器件<sup>[1-4]</sup>。为了进一步推动碳纳米管的实际应用, 需要将其组装成宏观结构, 如连续纤维等。CNT 纤维是一种新型材料, 具备优异的力学和电学性能。典型的应用包括纤维型驱动器<sup>[5]</sup>、人工肌肉<sup>[6-7]</sup>以及新型超级电容器和新型太

阳能电池<sup>[8]</sup>等。

不少学者已经对 CNTs 的力学和电学性质进行了研究。实验发现 CNTs 在电流作用下发生了静态和动态的变形和共振, 并能诱发 CNTs 表面结构的破坏<sup>[9-11]</sup>。数值模拟发现碳纳米管在外加电场作用下产

生了电致伸缩变形<sup>[12-15]</sup>。杜娟等<sup>[16]</sup>对碳纳米管的光致发光和电致发光性质进行了报道。

CNT 纤维作为 CNTs 的一种集合体,对其力电耦合性能的研究工作相对较少。实验发现 CNT 纤维在电流作用下产生了轴向的收缩和径向的转动<sup>[17]</sup>,高度螺旋的经石蜡浸润的 CNT 纤维在电流下产生了较大变形<sup>[18]</sup>。电流还能引起 CNT 纤维弹性模量的显著降低<sup>[19]</sup>,作为同素异形体的石墨烯纤维也表现出了相似的性质<sup>[20]</sup>。另外,利用 CNT 纤维能将电能转换为机械能,并预测人工肌肉、纤维微型旋转电机、纤维电致驱动器是其具有潜力的应用领域<sup>[21-22]</sup>。

本工作在不同电流强度下对纤维进行单次和循环加载测试,研究了电流对纤维模量和强度的影响;通过控制同一强度电流的通断和引入交流电流,研究了纤维的电致驱动特性。这些实验结果对 CNT 纤维在能源、电子、驱动等领域的应用具有十分重要的参考价值。

1 实验材料与方

1.1 实验材料

本工作采用的 CNT 纤维由阵列纺丝法制备,由高度取向的碳纳米管阵列中抽出的丝束加捻,经乙醇收缩致密后得到螺旋形的 CNT 纤维,如图 1(a)所示。实际测得纤维的直径均在 11.5~12.5 $\mu\text{m}$  之间,平均值为 12 $\mu\text{m}$ ,因此在实际测试中试样直径取 12 $\mu\text{m}$ 。从图 1(b)可以看出 CNT 纤维的表面呈现较为均匀的螺旋组装结构。纤维的密度为 0.3~0.5g/cm<sup>3</sup>,强度为 800~1000MPa,断裂伸长率为 2%~3.5%。

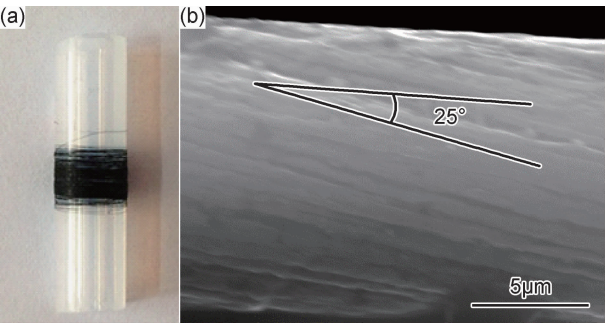


图 1 CNT 纤维及其表面形貌  
(a)CNT 宏观纤维;(b)CNT 纤维的表面形貌

Fig. 1 CNT fiber and its surface topography  
(a)CNT fiber;(b)surface topography of CNT fiber

1.2 试样制备及测试系统

将载体纸裁成 15mm×25mm 长条纸板,并利用模具在长方形纸板中间部位裁出两对角线分别长 8mm 和 10mm 的菱形孔洞,先用导电银浆(图 2(a)所

示)将纤维的两端与 2 根细铜丝固定在纸板菱形孔的长对角线的端点处,铜丝作为通电导线在纤维中引入电流。然后用粘接剂 HY-914(环氧树脂 A 组分和固化剂 B 组分按照 5:1 的比例进行混合得到,如图 2(b)所示)将纤维两端粘贴固定在载体纸上。将试样衬纸菱形孔的长对角线的两端装在拉伸仪夹头上,剪断菱形孔短对角线连接处,使得只有 CNT 纤维承受轴向拉伸载荷,如图 3 所示。实验设备如图 4 所示。

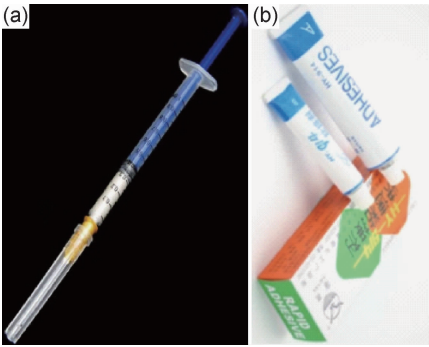


图 2 试样制备中用到的粘接剂  
(a)导电银浆;(b) HY-914 快速粘接剂

Fig. 2 Adhesive used in the preparation of sample  
(a)conductive silver paste;(b)HY-914 rapid adhesive

采用 Agilent T150 UTM 微纳米拉伸仪进行加载,用波形发生器提供电流输入,如图 3 所示。实验采集到的结果数据为纤维在外加载荷与电流作用下的应力-应变数据。本实验中加载速率均为 2×10<sup>-4</sup>s<sup>-1</sup>。

2 结果与分析

2.1 电场作用下纤维的力学性质

使 CNT 纤维承受轴向拉伸载荷与电流的联合作用,电流强度设置为 0,2.5,3.5mA 和 5mA 四种情况。在加载过程中,保持电流强度不变,与 Meng 等<sup>[19]</sup>每个电流强度测试两组试样不同,由于试样性质分散性大,对每个电流强度测试 7 组试样,并给出不同性质的离散系数,不同电流强度下纤维拉伸断裂强度、模量(纤维断裂点的应力比应变)见表 1。实验得到了不同电流强度下纤维轴向拉伸的载荷-应变曲线,如图 5 所示。电流为 5mA 时,电致破坏明显且随机性大,断裂强度和模量的离散系数较大;而当电流较小时,断裂强度和模量离散系数较小。

由图 5 可以看出,随着电流强度的增加,拉伸相同应变 1.5%所需的载荷越小,断裂强度也不断减小。这是因为电流引起的 C—C 键的结合强度下降,进而

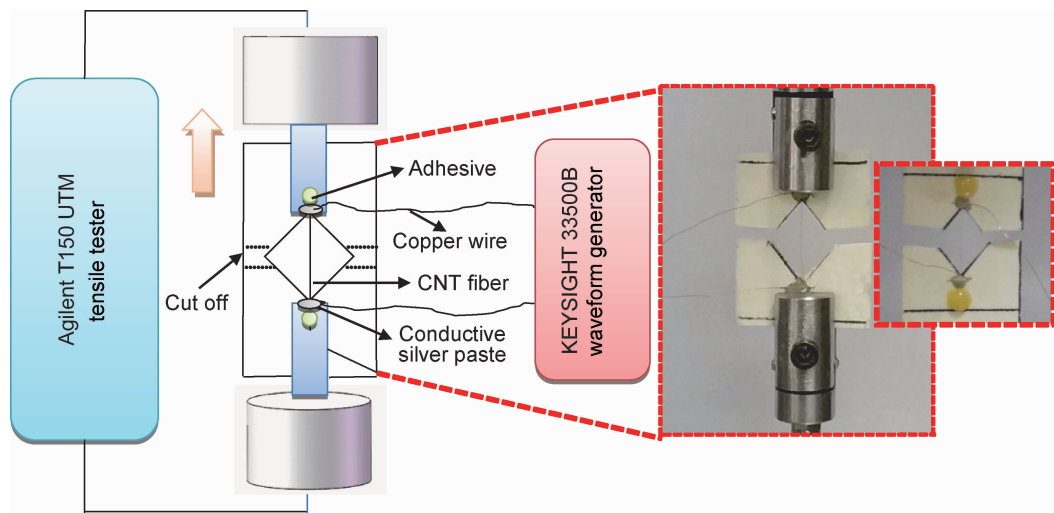


图 3 CNT 纤维力-电耦合试样及测试系统

Fig. 3 Schematic diagram of electro-mechanical testing system of CNT fiber

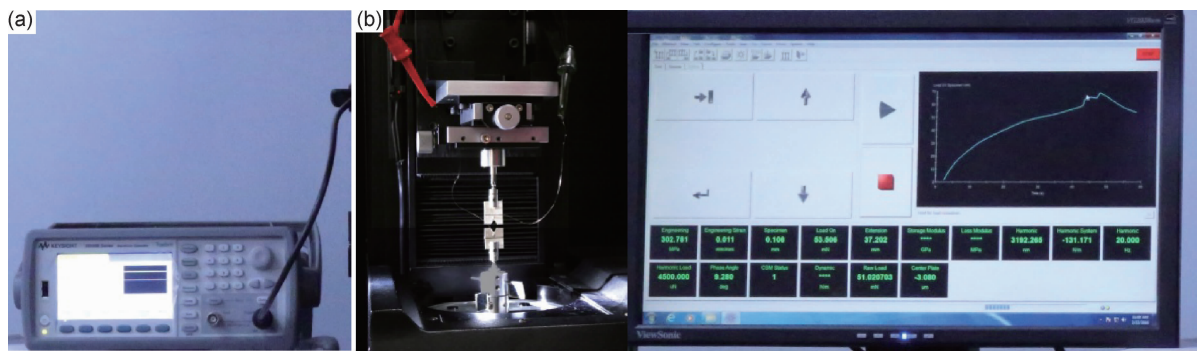


图 4 实验设备

(a)波形发生器;(b)agilent T150 UTM 微纳拉伸仪

Fig. 4 Experimental setup

(a)agilent 33600A series waveform generator;(b)agilent T150 UTM tensile tester

表 1 不同电流强度下 CNT 纤维拉伸断裂强度、模量及其离散系数

Table 1 Breaking strength,modulus and their variation coefficient of CNT fiber when passing through different current intensity during tensile loading(corresponding to fig. 5)

Item	0mA		2. 5mA		3. 5mA		5mA	
	Strength/	Modulus/	Strength/	Modulus/	Strength/	Modulus/	Strength/	Modulus/
	MPa	GPa	MPa	GPa	MPa	GPa	MPa	GPa
Sample 1	854. 5	30. 5	800. 2	26. 6	780. 6	25. 0	684. 0	24. 0
Sample 2	907. 2	31. 4	850. 6	26. 1	778. 5	26. 5	560. 9	23. 8
Sample 3	834. 1	32. 1	887. 1	26. 1	773. 1	23. 9	495. 9	17. 9
Sample 4	830. 6	29. 1	811. 3	26. 9	765. 3	25. 8	568. 1	20. 8
Sample 5	904. 7	32. 9	857. 5	24. 9	800. 4	24. 4	589. 3	23. 4
Sample 6	842. 2	33. 1	831. 8	25. 9	741. 3	23. 9	444. 9	24. 0
Sample 7	888. 6	34. 1	803. 1	22. 3	733. 6	22. 9	621. 6	23. 7
Average value	865. 9	31. 9	834. 5	25. 6	767. 5	24. 6	566. 4	22. 5
Variation coefficient	0. 0385	0. 0537	0. 0387	0. 0621	0. 0303	0. 0495	0. 1389	0. 1045

引起 CNTs 强度的下降,而 CNT 纤维是由大量的 CNT 管束组成的,因此在 CNT 纤维的变形过程中,不断有 CNTs 发生破坏,这导致 CNT 纤维的模量和强度随之下降。

实验表明,纤维在分别通入 2. 5,3. 5mA 和 5mA 电流时,其平均模量(断裂应力比断裂应变)从无电流的 31. 9GPa 降低到 25. 6,24. 6GPa 和 22. 5GPa;平均断裂强度从无电流的 865. 9MPa 降低到 834. 5,767. 5MPa

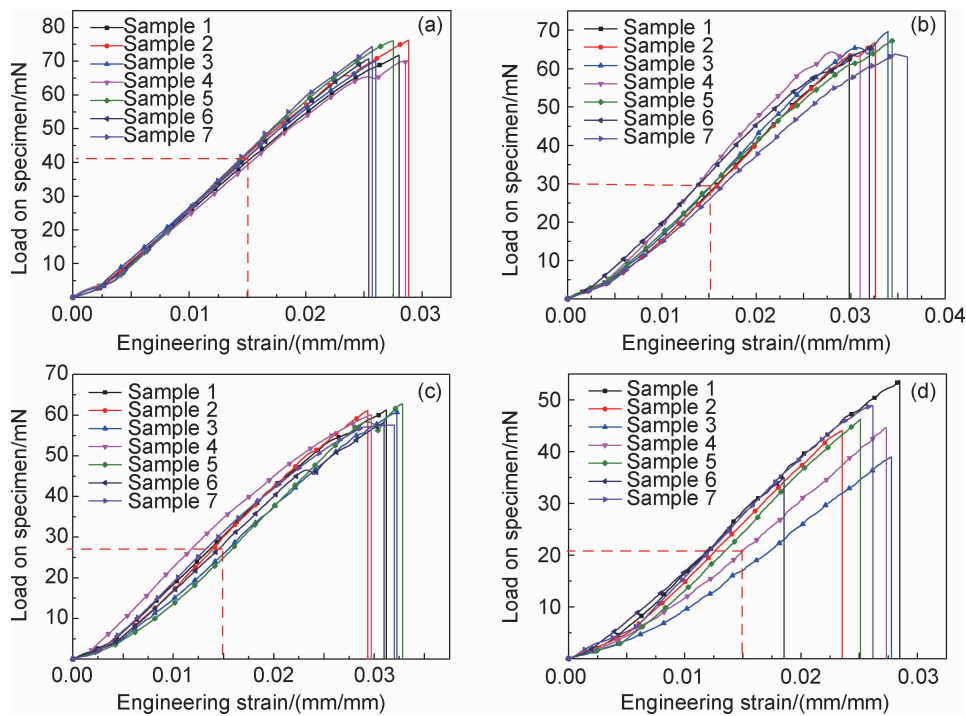


图 5 电流强度分别为 0, 2.5, 3.5, 5mA 时的 CNT 纤维单次拉伸荷载-应变曲线 (a)0mA;(b)2.5mA;(c)3.5mA;(d)5mA  
Fig. 5 Load-strain curves of CNT fibers with applied currents of 0, 2.5, 3.5, 5 mA, respectively during tensile loading  
(a)0mA;(b)2.5mA;(c)3.5mA;(d)5mA

和 566.4MPa。

不同的电流强度下的纤维循环加载荷载-应变曲线如图 6 所示。可以看出,每个加载循环中,相同应变所

需的载荷随着电流强度的增大而不断减小。在无电流时,CNT 纤维的断裂载荷为 80.1mN,在引入的电流强度为 2.5, 3.5, 5mA 时,其断裂载荷分别为 78.2,72.6,

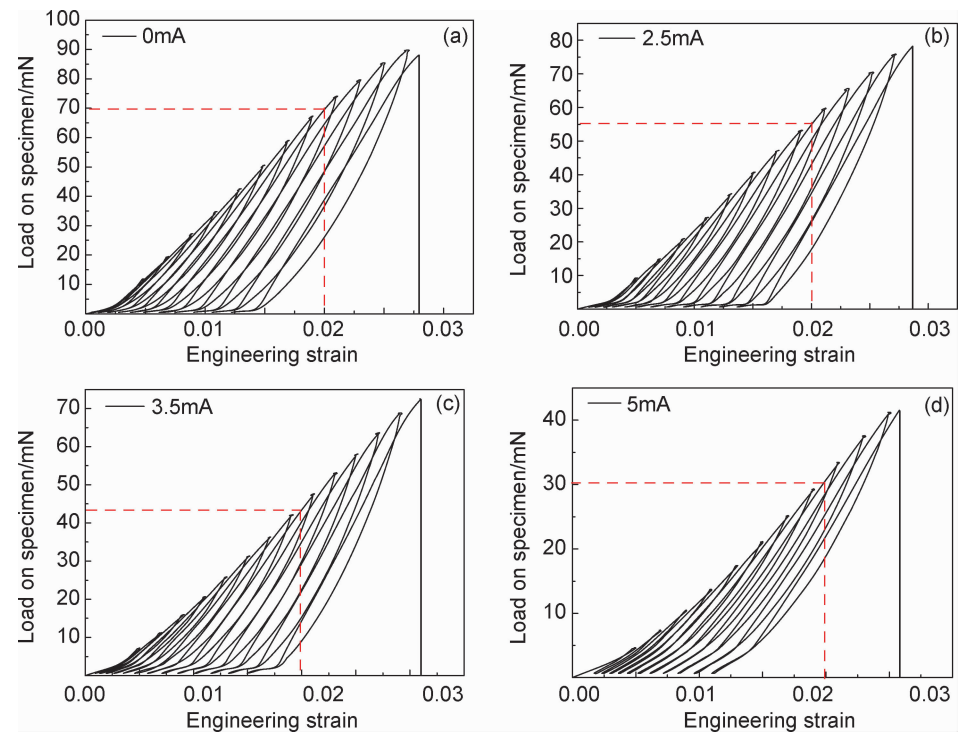


图 6 通入 0(a),2.5(b),3.5(c),5mA(d)电流时的循环荷载-应变曲线(初始应变为 0.005,应变增量为 0.002)  
Fig. 6 Load-strain curves of incremental cyclic loading with applied currents of 0(a),2.5(b),3.5(c),5mA(d), respectively(initial strain 0.005, strain increment 0.002)



41.6mN,说明 CNT 纤维的强度受到电流的显著影响。在循环加载到 2% 的应变时,对应的载荷分别为 63.7,54.9,42.9,30.9mN,如图 5 中的虚线所示,这也进一步验证了电流导致纤维模量的显著降低。

为了考虑电流的交替变化对于 CNT 纤维性能的影响,在单次拉伸实验中设置电流强度从 5mA—0mA—5mA—0mA 的连续变化过程,如图 7 所示。在不同的电流强度下,计算得出的模量(应力增量比应变增量)依次为 36.5,94.9,26.4,98.6GPa,说明电流能显著降低纤维的模量。

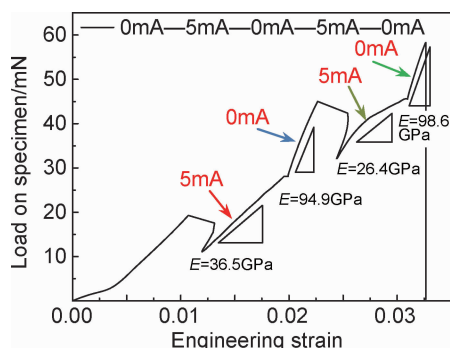


图 7 当交替接通 0mA 和 5mA 电流时的 CNT 纤维单次轴向拉伸的载荷-应变曲线

Fig. 7 Load-strain curve of CNT fiber with alternating applied currents of 0mA and 5mA during tensile loading

需要指出的是由于纤维独特的螺旋组装结构,只要有电流通过时,其内部就会产生电致收缩力,但这个收缩力是很微弱的(在 2.5mA 时只有 1mN),并不会使纤维承载能力显著提高。而在单次拉伸实验中,断裂载荷的值远远超过电致收缩力,此时纤维断裂载荷的减小主要由模量减小引起。

## 2.2 力-电耦合效应

本实验中将 CNT 纤维轴向拉伸到应变为 2%,经过蠕变使载荷趋于平稳,然后再通入电流,考虑其力-电耦合特性。与 Meng 等<sup>[19]</sup>在单次拉伸过程中测试力-电性质不同,松弛蠕变测试可以使纤维的拉伸应变保持不变,从而使测试更精确;加大电流强度时纤维的张力变化也需要作进一步讨论。如图 8 所示,纤维在无电流状态下拉伸到 2% 应变并应力松弛 1000s,之后首次通入 2.5mA 的电流,则纤维的载荷有一个很显著的下降。经一段时间后切断电流,载荷又会有一个明显的下降;如果再次通入相同强度的电流,载荷又会回到切断电流前的水平,而这个载荷的变化值可以被认为是电致收缩力,即由电流的作用而在纤维内产生的安培力。可以看出,电致收缩力的大小随着电流强度的增大而增大。电致收缩力是由高度螺旋排列的

CNTs 产生的集体安培力<sup>[6]</sup>,其大小随着电流的接通而迅速增加,随着电流的断开而快速下降到电流接通前的水平。另外,依次加大通入电流的强度(对应图 8 中 3.5,5mA),纤维的张力每次都会有一个很明显的下降,这是因为电流的通入还会影响纤维的弹性模量,且电流越大,弹性模量变得越小。如图 8 所示,当保持拉伸应变 2% 不变时,加大电流强度,载荷的下降量  $\Delta F = F - F_a$ <sup>[6,17,19]</sup>。实际上当加大通入纤维的电流强度时,此时纤维内有两种力的变化,一种是模量降低引起的载荷(应力)的降低  $F$ ,另一种是电流引起的电致收缩力  $F_a$ 。增加电流的强度,纤维的张力表现出下降的现象,即纤维的承载能力会下降,这是因为模量引起的载荷的下降量要大于电致收缩力。

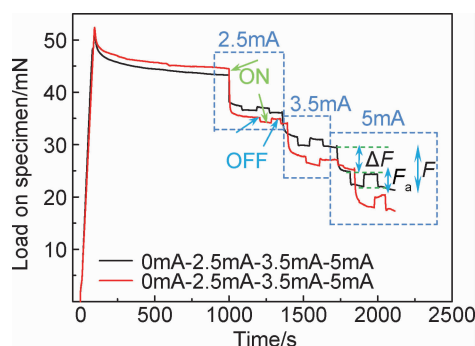


图 8 CNT 纤维在应力松弛后依次通入不同电流强度的载荷-时间曲线

Fig. 8 Load-time curves of CNT fibers when sequentially passing through different current intensity during the stress relaxation stage

## 2.3 电致驱动效应

为了研究电致收缩力与电流强度的关系,在纤维两端分别通入 1.5,2.5,3.5,4,5mA 的直流电流,经过轴向拉伸到 2% 并应力蠕变松弛 1000s,图 9 为 CNT 纤维的载荷-时间曲线。可以明显地观察到保持

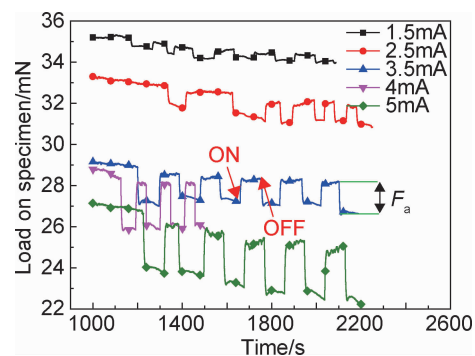


图 9 CNT 纤维在应力松弛阶段控制同一电流通断时的载荷-时间曲线

Fig. 9 Load-time curves of CNT fibers when passing through/disconnecting the same density currents during the stress relaxation stage

纤维的拉伸应变(2%)不变,当断开电流时,纤维的载荷会快速地下降,而当恢复电流时,载荷又快速地回复。这说明通入电流后,纤维内部产生了一个沿轴向的电致收缩力,而在断开电流后,这个收缩力随即消失,纤维载荷下降。电流强度越大,纤维内部产生的电致伸缩力越大,在 5mA 时的电致伸缩力约为 2.5mN,如图 10 所示。

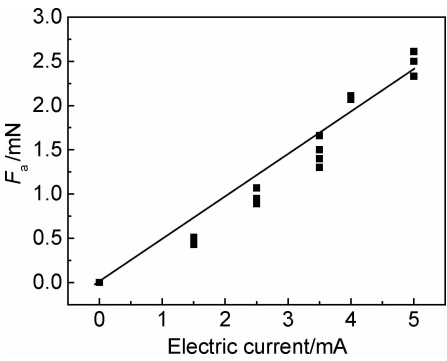


图 10 电致伸缩力与所施加电流的关系

Fig. 10 Electro-contraction forces as a function of the currents

对这个现象可以作出如下解释<sup>[6]</sup>。在纤维中碳纳米管相当于一根根通电导线,碳纳米管沿纤维表面呈一定角度取向螺旋排列,整个纤维相当于一个松弛的螺旋线圈。电流主要沿着碳纳米管螺旋的方向传输,各个通电碳纳米管间产生安培力,最终导致纤维产生轴向收缩力,如图 11 所示。

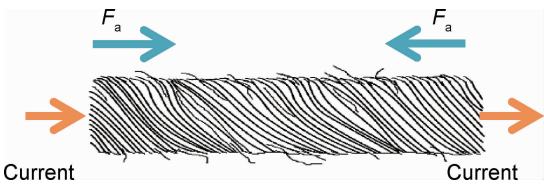


图 11 纤维通入电流后轴向收缩的示意图

Fig. 11 Schematic illustration of axial contraction when current passing through

为了更直观地研究纤维的电致伸缩力与电流强度的关系,通过在纤维中通入幅值大小为 5mA 的频率为 0.005Hz 的正弦交流电流,纤维的载荷-时间曲线如图 12 所示,其电致伸缩力函数可以表示为  $y = A|\sin\omega x|$ 。由此可见,在纤维中通入一个周期为 200s 的正弦交流电流,纤维中产生的收缩力也随着电流的增大而增大,到达峰值后,又随着电流的减小而减小。为了进一步测试纤维保持电致伸缩能力的稳定性,在纤维中通入电流大小为 5mA 频率为 0.05Hz 的正弦交流电流,由纤维的载荷-时间曲线(图 13)可知,当交流电流的频率提高 10 倍后,纤维产生收缩力的变化随电流变化趋势相同。

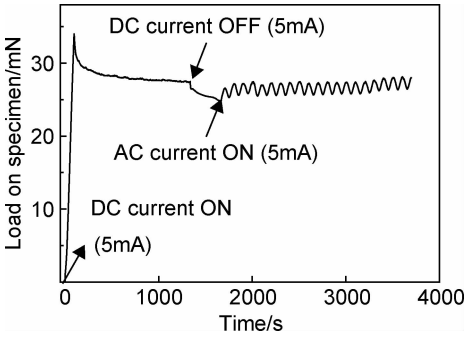


图 12 CNT 纤维在应力松弛阶段通入交流电流后对应的载荷-时间曲线

Fig. 12 Load-time curve of CNT fiber when passing through AC current during the stress relaxation stage

在通入两种不同频率的交流电流,分别经过 200 个(图 14)和 400 个(图 15)周期的变化后,纤维的收缩力随着电流的变大而不断变大,随着电流的减小又不断减小,这种趋势具有很好的可逆性;而电致驱动力的值在持续通入数百个周期的交流电流后,没有出现很明显的下降,具有较好的稳定性。另外,由于纤维内部会存在缺陷,还有实验测试环境的影响,纤维载荷变化的峰值会出现不重合的现象。本实验也说明了电能到机械能的有效转换可以在 CNT 纤维上得以实现。虽

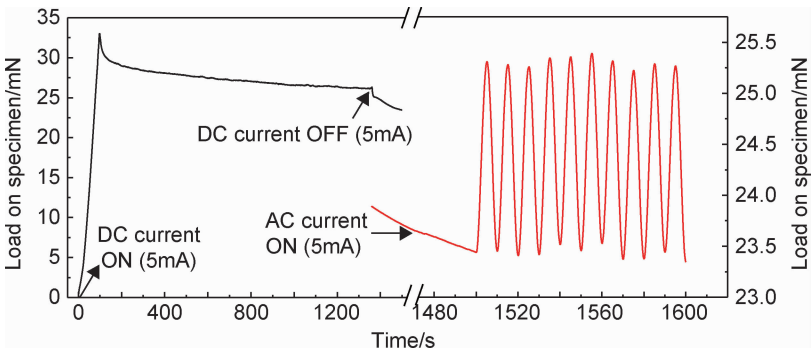


图 13 CNT 纤维在应力松弛阶段通入交流电流后对应的载荷-时间曲线

Fig. 13 Load-time curve of CNT fiber when passing through AC current during the stress relaxation stage

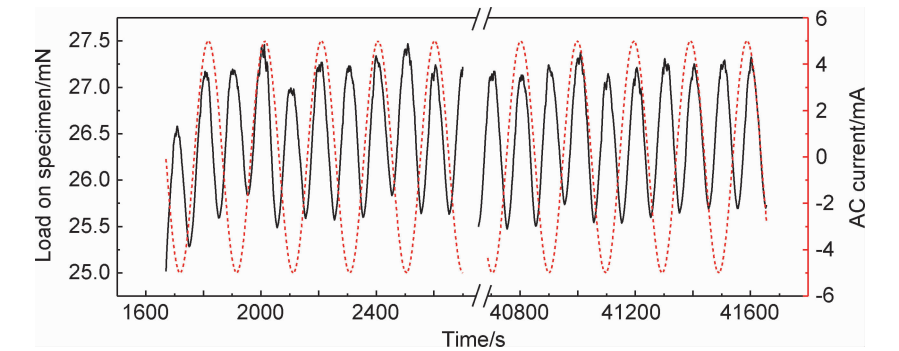


图 14 图 12 中通入交流电流后的前 5 个周期和 195~200 个周期所对应的载荷-时间曲线

Fig. 14 Load-time curve corresponding to the first 5 cycles and the 195-200<sup>th</sup> cycles of fig. 12 after passing through alternating current

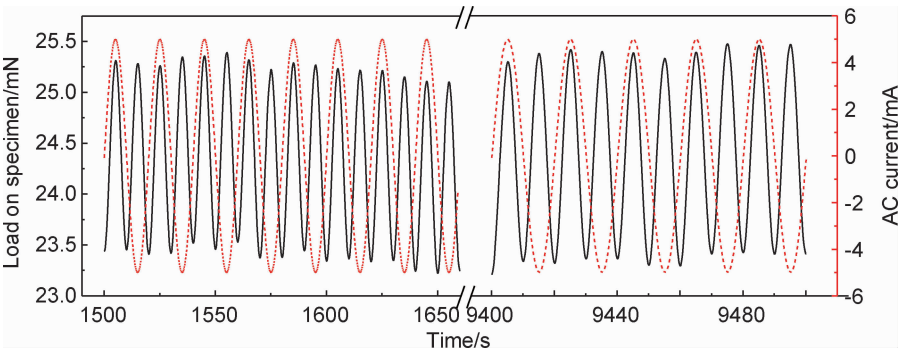


图 15 图 13 中通入交流电流后的前 8 个周期和 395~400 个周期所对应的载荷-时间曲线

Fig. 15 Load-time curve corresponding to the first 8 cycles and the 395-400<sup>th</sup> cycles of fig. 13 after passing through alternating current

然由单根纤维产生的电磁收缩力比较小,在 5mA 时只有大约 2.5mN,但是如果由数十根的 CNT 纤维拧成宏观 CNT 线,那么由其产生的轴向驱动力能够大幅度地提高。CNT 纤维的电致收缩特性使其在人工肌肉和纤维马达等领域具有应用潜力。

3 结论

(1)当电流通过 CNT 纤维时,会引起力学性质的变化,包括模量、断裂强度的下降和电致驱动效应,尤其是在首次通入电流或增加电流的强度时,会引起模量的显著降低,这些力-电耦合响应在其应用中是不可忽略的。

(2)蠕变实验结果表明,在频率为 0.005Hz 和 0.05Hz 的 5mA 交流电流分别经过 200 个和 400 个周期的变化后,纤维仍然保持较好的电致收缩性能且循环稳定性较好,电致收缩力的大小随着电流的大小实时变化,具有很好的电流敏感性,响应速率快。

(3)本实验说明了电能到机械能的有效转换可以在 CNT 纤维上得以实现。虽然由单根纤维产生的电致收缩力比较小,但是如果由数十根的 CNT 纤维拧

成宏观 CNT 线,由其产生的轴向驱动力能够大幅度提高。CNT 纤维的电致驱动特性也使其在能源、生物医学和电学器件上具有很大的潜在应用价值,例如可以用 CNT 纤维制造人工肌肉、电动马达和仿生器件等。

参考文献

[1] LI C, CHOU T W. Vibrational behaviors of multiwalled-carbon-nanotube-based nanomechanical resonators[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(1): 121-123.

[2] JIANG H, YU M F, LIU B, et al. Intrinsic energy loss mechanisms in a cantilevered carbon nanotube beam oscillator[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(18): 185501.

[3] 刘珍红,孙晓刚,陈珑,等. 碳纳米管纸/纳米硅复合电极的锂离子电池性能[J]. 材料工程, 2018, 46(1): 99-105.

LIU Z H, SUN X G, CHEN L, et al. Performance of lithium ion batteries with carbon nanotube paper/nano silicon composite electrode[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(1): 99-105.

[4] KIM P, LIEBER C M. Nanotube nanotweezers[J]. Science, 1999, 286(5447): 2148.

[5] 余雪平,兰竹瑶,邹菁云,等. 碳纳米管纤维的多功能特性及其驱动应用[J]. 材料导报, 2016, 30(5): 132-137.

YU X P, LAN Z Y, ZOU J Y, et al. Multifunctionality and actuation application of carbon nanotube fibers[J]. Materials Review, 2016, 30(5): 132-137.

[6] 郭文瀚. 基于取向碳纳米管纤维的人工肌肉[D]. 上海: 复旦大学

- 学, 2013.
- GUO W H. Artificial muscle based on aligned carbon nanotube fibers[D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [7] FOROUGH J, BAUGHMAN R H. Torsional carbon nanotube artificial muscles[J]. Science, 2011, 334(6055): 494-497.
- [8] 朱路. 碳纳米管复合纤维超级电容器和太阳能电池[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- ZHU L. Carbon nanotube composite fibers for supercapacitors and solar cells[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [9] ZHAO Z, LI L. Ultrafast nano-oscillators based on interlayer-bridged carbon nanoscrolls [J]. Nanoscale Research Letters, 2011, 6(1): 1-11.
- [10] PONCHARAL P, WANG Z L, UGARTE D, et al. Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes [J]. Science, 1999, 283(5407): 1513.
- [11] PABLO P J D, HOWELL S, CRITTENDEN S, et al. Correlating the location of structural defects with the electrical failure of multiwalled carbon nanotubes [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(25): 3941-3943.
- [12] GUO W L, GUO Y F. Giant axial electrostrictive deformation in carbon nanotubes [J]. Physical Review Letters, 2003, 91(11): 115501.
- [13] 彭川. 碳纳米管力学行为的分子动力学模拟[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- PENG C. Molecular dynamics simulation study on mechanical behaviors of carbon nanotubes [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012.
- [14] LI C Y, CHOU T W. Charge-induced strains in single-walled carbon nanotubes[J]. Nanotechnology, 2006, 17(18): 4624-4628.
- [15] GUO Y F, GUO W L. Mechanical and electrostatic properties of carbon nanotubes under tensile loading and electric field[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2003, 36(7): 805.
- [16] 杜娟, 李宪洲, 田宏伟, 等. 碳纳米管最新性质-光学相关性[J]. 材料工程, 2006(增刊 1): 501-502.
- DU J, LI X Z, TIAN H W, et al. Newest property in carbon nanotube-correlation of optics[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(Suppl 1): 501-502.
- [17] GUO W, LIU C, ZHAO F, et al. A novel electromechanical actuation mechanism of a carbon nanotube fiber[J]. Advanced Materials, 2012, 24(39): 5379-5384.
- [18] SHANG Y, HE X, WANG C, et al. Large-deformation, multi-functional artificial muscles based on single-walled carbon nanotube yarns[J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 17(1): 14-20.
- [19] MENG F, ZHANG X, LI R, et al. Electro-induced mechanical and thermal responses of carbon nanotube fibers[J]. Advanced Materials, 2014, 26(16): 2480-2485.
- [20] MENG F, WANG M, LU W, et al. An electromechanical behavior of reduced graphene oxide fiber[J]. Carbon, 2016, 105: 244-247.
- [21] BAUGHMAN R H. Playing nature's game with artificial muscles[J]. Science, 2005, 308(5718): 63.
- [22] SU R S, CHANG K L, SO I, et al. DNA-wrapped single-walled carbon nanotube hybrid fibers for supercapacitors and artificial muscles[M]. Faculty of Engineering-Papers (Archive), 2008: 466-470.

---

**基金项目:**国家自然科学基金项目(11502007, 11472020, 11632005)

**收稿日期:**2017-12-26; **修订日期:**2018-01-06

**通讯作者:**杨庆生(1962—), 男, 教授, 博士, 从事专业: 新型材料和结构的力学问题, 联系地址: 北京市朝阳区北京工业大学机电学院(100124), E-mail: qsyang@bjut.edu.cn

(本文责编: 高磊)