



## (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109431460 A

(43)申请公布日 2019.03.08

(21)申请号 201811052885.4

D02G 3/02(2006.01)

(22)申请日 2018.09.10

D02G 3/34(2006.01)

(71)申请人 中原工学院

D02G 3/44(2006.01)

地址 451191 河南省郑州市新郑双湖经济  
技术开发区淮河路1号

(72)发明人 周玉嫚 何建新 南楠 刘凡  
邵伟力 崔世忠 齐琨 李梦营  
王琳琳 张景 李方 陶雪姣  
翁凯

(74)专利代理机构 郑州优盾知识产权代理有限  
公司 41125  
代理人 张真真 张志军

(51)Int.Cl.

A61B 5/00(2006.01)

D01D 5/00(2006.01)

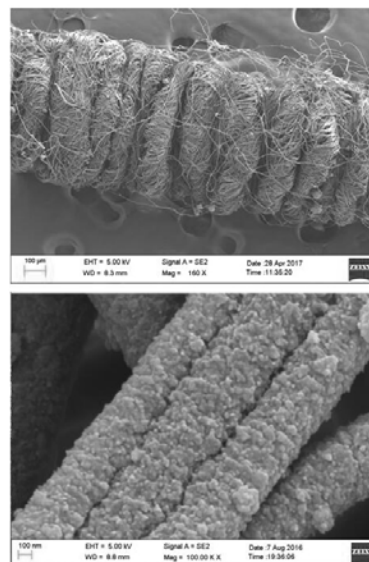
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

### (54)发明名称

一种柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器及其制备方法

### (57)摘要

本发明公开了一种柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器及其制备方法。采用高性能弹性长丝用作芯纱作为高伸缩的弹性基质,然后通过共轭静电纺丝技术在预拉伸至一定长度的弹性长丝表面包覆静电纺纳米纤维制备连续的纳米纤维包芯纱。通过原位液相聚合方法在包芯纱的壳层纳米纤维表面聚合包覆一层导电聚合物聚吡咯,最后在纱线表面涂覆一层带有导电铜丝的凝胶膜,获得应力传感器,并应用于可穿戴电子皮肤上。当受到拉伸、弯曲以及压力等外部刺激时,这种纳米纤维纱线应力传感器不仅具有较好的力学自适应性,显示了超高的灵敏度以及较宽的传感范围。在人体监测系统中,可实现从微弱应力变化的心率监测到较大应力变化的肢体运动监测。



1. 一种柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器,其特征在于:它是由静电纺纳米纤维加捻形成纳米纤维纱线,然后在纳米纤维纱线表面聚合包覆一层导电聚合物,通过在纱线的表面复合带有导电铜丝的凝胶膜获得柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器。

2. 根据权利要求1所述的应力传感器,其特征在于:所述纳米纤维由高分子聚合物构成,纳米纤维的直径为100-900nm。

3. 根据权利要求2所述的应力传感器,其特征在于:所述高分子聚合物为聚偏氟乙烯、聚氨酯和聚丙烯腈,聚合物的分子量 $\geq 100000$ 。

4. 根据权利要求1所述的应力传感器,其特征在于:所述的纳米纤维纱线的直径为60-500 $\mu\text{m}$ 。

5. 根据权利要求1所述的应力传感器,其特征在于:所述的凝胶膜为聚二甲基硅氧烷膜,厚度为0.01-10 mm。

6. 根据权利要求1所述的应力传感器,其特征在于:所述的铜丝直径为0.1-10 mm。

7. 根据权利要求1-6任一所述的应力传感器的制备方法,其特征在于按以下步骤进行:

(1) 将高分子聚合物溶解于N,N二甲基甲酰胺或N,N二甲基甲酰胺和四氢呋喃的混合溶剂中,于30-100 $^{\circ}\text{C}$ 下搅拌1-10 h得到质量分数为8%-30%的聚合物溶液;

(2) 搭建静电纺丝装置,将步骤(1)中的纺丝溶液加入到注射泵中制备连续的纳米纤维包芯纱线;

(3) 将步骤(2)中制备的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为30-100 mol/L的三氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )溶液中30-100 min;

(4) 将步骤(3)中的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为30-100 mol/L的吡咯(Py)溶液中,在0-4 $^{\circ}\text{C}$ 下浸泡1-5 h,取出后用去离子水清洗,然后置于30-90 $^{\circ}\text{C}$ 的真空烘箱中干燥;

(5) 将步骤(4)中的纳米纤维包芯纱表面涂覆带有导电铜丝的凝胶膜,得到纳米纤维纱线应力传感器。

8. 根据权利要求7所述的应力传感器的制备方法,其特征在于:所述步骤(2)制备连续的纳米纤维包芯纱线时,弹性长丝的伸长率 $\geq 100\%$ ,静电纺丝电压为14-22 kV,纺丝溶液总流量为0.5-0.9 mL/h,金属喇叭的直径为10-20cm,金属喇叭与卷绕装置的垂直距离为40-60cm,喷头与金属喇叭的垂直距离为4-8cm,喷头与金属喇叭的水平距离为3-5cm,喷头的数目为2-16个,喷头内径0.26-0.86 mm,正负喷头溶液流量比1:0.5-1,正负喷头间的距离13-17.5 cm,卷绕速度40-53mm/min。

## 一种柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于柔性传感器技术领域,涉及一种柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器及其制备方法,具体涉及一种利用静电纺丝技术及液相沉积聚合技术制备柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱传感器,应用于人体健康监测系统。

### 背景技术

[0002] 人体皮肤能够将各种机械刺激从外部环境传递到大脑。在人造皮肤中实现这一功能是创造先进的人形机器人,生物医学假体,手术电子手套和穿戴式健康监护装置的关键。为了模仿人体皮肤的性质,人造皮肤应该具有测量由诸如正常压力,横向应变和屈曲等多种机械刺激引起的应力的空间分布的能力,为了能够掌握控制和记录身体运动,第二,可伸缩性是人造皮肤的重要特性,确保其适应性地覆盖任意弯曲和移动的表面,例如机器人手臂的关节,并且承受重复和延长的机械变形,例如弯曲和扭曲,第三,为了实现人造皮肤在日常生活中的广泛应用,人造皮肤应兼容大面积制备,材料成本低廉。在过去十年中,基于柔性基板上的压力传感器阵列的人造皮肤的发展已经取得了很大的进展,具有灵敏度高,快响应速度和触觉映射的分辨率等,但与人体皮肤的差距很大,这些压力传感器阵列缺乏可拉伸性,只能提供空间压力分布信息的功能。为了解决这些问题,选择本质可伸缩材料的新结构设计传感器是制造具有多重机械力敏感的和可伸缩机械传感器的有效策略,因此设计一种体积小、柔韧性好且高伸缩的超灵敏纳米纤维包芯纱应力传感器是解决上述问题的关键。

[0003] 静电纺是一种简单高效、最具有吸引力的纳米技术。利用静电纺技术制备的纳米纤维因尺寸小、空隙率高以及比表面积大,已在较多领域显示了较好的可应用性。因此,本发明采用高性能弹性长丝用作芯纱作为高伸缩的弹性基质,首先通过共轭静电纺丝技术在预拉伸至一定长度的弹性长丝表面包覆静电纺纳米纤维制备连续的纳米纤维包芯纱,释放预拉伸的弹性长丝(芯纱)后得到具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱。然后在包芯纱的纳米纤维表面接枝一层导电聚合物,最后在纱线的表面复合带有导电铜丝的凝胶膜,获得柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器,并应用于可穿戴电子皮肤上。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术中存在的问题,本发明提供一种柔性高伸缩的具有褶皱结构的纱线应力传感器的制备方法。采用高性能弹性长丝用作芯纱作为高伸缩的弹性基质,然后通过共轭静电纺丝技术在预拉伸至一定长度的弹性长丝表面包覆静电纺纳米纤维制备连续的纳米纤维包芯纱。由于纳米纤维和高伸缩的弹性长丝之间的刚度不匹配,释放预拉伸的弹性长丝可得到具有周期性褶皱结构的纳米纤维包芯纱。在此基础上,通过原位液相聚合方法在包芯纱的壳层纳米纤维表面聚合包覆一层导电聚合物,最后在纱线表面涂覆一层带有导电铜丝的凝胶膜,获得柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器,并应

用于可穿戴电子皮肤上。当受到拉伸、弯曲以及压力等外部刺激时,这种纳米纤维纱线应力传感器不仅具有较好的力学自适应性,而且显示了超高的应力灵敏度以及较宽的传感范围。在人体监测系统中,可实现从微弱应力变化的心率监测到较大应力变化的肢体运动监测。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明采用以下技术方案:

一种柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱传感器,它是由静电纺纳米纤维包覆在高伸缩的弹性长丝表面构成的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱。具体是采用高性能弹性长丝用作芯纱作为高伸缩的弹性基质,然后通过共轭静电纺丝技术在预拉伸至一定长度的弹性长丝表面包覆静电纺纳米纤维制备连续的纳米纤维包芯纱。由于纳米纤维和高伸缩的弹性长丝之间的刚度不匹配,释放预拉伸的弹性长丝可得到具有周期性褶皱结构的纳米纤维包芯纱。在此基础上,通过原位液相聚合方法在包芯纱的壳层纳米纤维表面聚合包覆一层导电聚合物,最后在纱线表面涂覆一层带有导电铜丝的凝胶膜,获得柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器。

[0006] 所述的高伸缩弹性长丝的伸长率大于等于100%,弹性长丝的直径为60-500  $\mu\text{m}$ 。

[0007] 所述的纳米纤维由高分子聚合物构成,纳米纤维的直径100-900 nm。

[0008] 所述的聚合物为聚偏氟乙烯(PVDF)、聚氨酯(PU)、聚丙烯腈(PAN)的一种或几种,聚合物的分子量大于等于100000。

[0009] 所述的纳米纤维包芯纱的直径为60-500  $\mu\text{m}$ ,伸长率大于等于0.01%。所述的凝胶膜为聚二甲基硅氧烷(PDMS)膜,厚度0.01-10 mm。所述的铜丝直径为0.1-10 mm。

[0010] 本发明柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器采用如下步骤:

(1)将高分子聚合物溶解于N,N二甲基甲酰胺(DMF)或N,N二甲基甲酰胺(DMF)和四氢呋喃的混合溶剂中,于30-100℃下搅拌1-10 h得到质量分数为8%-30%的聚合物溶液;

(2)按照图示1搭建静电纺丝装置,首先将弹性长丝从退绕装置上退绕,穿过金属喇叭口卷绕到卷绕装置上。退绕装置的退绕速度与卷绕装置的卷绕速度的比值为0-1。然后将步骤(1)中的纺丝溶液加入到注射泵中制备连续的纳米纤维包芯纱线。静电纺丝电压为14-22 kV,纺丝溶液总流量为0.5-0.9 mL/h,金属喇叭的直径为10-20cm,金属喇叭与卷绕装置的垂直距离为40-60cm,喷头与金属喇叭的垂直距离为4-8cm,喷头与金属喇叭的水平距离为3-5cm,喷头的数目为2-16个,喷头内径0.26-0.86 mm,正负喷头溶液流量比1:0.5-1,正负喷头间的距离13-17.5 cm,卷绕速度10-1000 mm/min。

[0011] (3)将步骤(2)中制备的纳米纤维包芯纱从卷绕装置上退绕,重新卷绕到另一个卷绕装置上。卷绕装置的卷绕速度与退绕装置的退绕速度的比值为0-1,确保退绕过程中制备的纳米纤维包芯纱中的芯纱(弹性长丝)恢复到初始未伸长状态,从而形成具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱。

[0012] (4)将步骤(3)中制备的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为30-100 mol/L的三氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )溶液中30-100 min;

(5)将步骤(4)中的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为30-100 mol/L的吡咯(Py)溶液中,低温(0-4℃)下1-5 h,取出后用去离子水清洗,然后置于30-90℃的真空烘箱中干燥;

(6)将步骤(5)中的纳米纤维包芯纱表面涂覆带有导电铜丝的凝胶膜聚二甲基硅氧烷(PDMS)膜,得到纳米纤维纱线应力传感器。

[0013] 本发明的有益效果：(1) 本发明利用静电纺丝技术在具有高伸缩性能的弹性长丝表面包覆纳米纤维制备具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱，获得具有较大伸长率的纳米纤维包芯纱。(2) 本发明所制备的纳米纤维包芯纱应力传感器具有对压力、拉伸和弯曲多力敏感的性能，同时具备灵敏度高、响应速度快、电导率高、可承受应变范围广、稳定性好等特点。(3) 制备的纳米纤维包芯纱应力传感器具有较好的力学自适应性，可实现真正意义上的可穿戴传感器。

## 附图说明

[0014] 图1为静电纺丝装置示意图，1卷绕装置、2喷头、3注射泵、4金属喇叭、5 高压发生器、51正极、52负极；

图2 为纳米纤维包芯纱应力传感器结构示意图，6铜导线、7 PDMS弹性膜、8纳米纤维包芯纱；

图3 具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱及单根纤维的SEM图片；

图4实施例1中不同压力下纳米纤维包芯纱应力传感器的灵敏度。

## 具体实施方式

[0015] 下面结合具体实施例，对本发明做进一步说明。应理解，以下实施例仅用于说明本发明而非用于限制本发明的范围，该领域的技术熟练人员可以根据上述发明的内容作出一些非本质的改进和调整。

### [0016] 实施例1

本实施例的柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器的制备方法如下：

(1) 将聚丙烯腈(PAN)溶解于N,N二甲基甲酰胺(DMF)溶剂中，于80℃下搅拌6 h得到质量分数为8%的PAN溶液；

(2) 按照图示1搭建静电纺丝装置，将步骤(1)中的PAN溶液加入到注射泵中制备连续的纳米纤维纱线，弹性长丝的伸长率等于100%，静电纺丝电压为17.5 kV，纺丝溶液总流量为0.6 mL/h，金属喇叭的直径为10 cm，金属喇叭与卷绕装置的垂直距离为50 cm，喷头与金属喇叭的垂直距离为4 cm，喷头与金属喇叭的水平距离为3 cm，喷头的数目为4个，喷头内径0.4 mm，正负喷头溶液流量比2:1，正负喷头间的距离17 cm，卷绕速度50 mm/min；

(3) 将步骤(2)中制备的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为50 mol/L的三氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )溶液中30 min；

(4) 将步骤(3)中的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为50 mol/L的吡咯(Py)溶液中低温(0-4℃)下3 h，取出后用去离子水清洗，然后置于60℃的真空烘箱中干燥，得到PPy@PAN的纳米纤维包芯纱；

(5) 将步骤(4)中的纳米纤维包芯纱表面复合带有导电铜丝的聚二甲基硅氧烷(PDMS)膜，得到PPy@PAN纳米纤维纱线应力传感器。

[0017] (6) 将步骤(5)中制备的PPy@PAN纳米纤维纱线应力传感器拉伸至不同长度，可获得相应的拉伸灵敏度，如图所示，显示了较高的灵敏度和较宽的拉伸灵敏度范围。

### [0018] 实施例2

本实施例的柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器的制备方法如下：

(1) 将聚偏氟乙烯 (PVDF) 溶解于N,N二甲基甲酰胺 (DMF) 和四氢呋喃的混合溶剂中(质量比为1:1), 于80℃下搅拌6 h得到质量分数为16.5%的PVDF溶液；

(2) 按照图示1搭建静电纺丝装置, 将步骤(1)中的纺丝溶液加入到注射泵中制备连续的纳米纤维纱线, 弹性长丝的伸长率等于150%, 静电纺丝电压为17.5 kV, 纺丝溶液总流量为0.6 mL/h, 金属喇叭的直径为10 cm, 金属喇叭与卷绕装置的垂直距离为50 cm, 喷头与金属喇叭的垂直距离为4 cm, 喷头与金属喇叭的水平距离为3 cm, 喷头的数目为4个, 喷头内径0.4 mm, 正负喷头溶液流量比2:1, 正负喷头间的距离17 cm, 卷绕速度50 mm/min;

(3) 将步骤(2)中制备的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为30 mol/L的三氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )溶液中50 min;

(4) 将步骤(3)中的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为30 mol/L的吡咯(Py)溶液中低温(0-4℃)下4 h, 取出后用去离子水清洗, 然后置于60℃的真空烘箱中干燥, 得到PVDF @PPy的纳米纤维包芯纱;

(5) 将步骤(4)中的纳米纤维包芯纱表面复合带有导电铜丝的聚二甲基硅氧烷(PDMS)膜, 得到PVDF @PPy的纳米纤维纱线应力传感器。

#### [0019] 实施例3

本实施例的柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器的制备方法如下：

(1) 将聚氨酯(PU)溶解于N,N二甲基甲酰胺(DMF)和四氢呋喃的混合溶剂中(质量比为1:1), 常温下搅拌8 h得到质量分数为12%的PU溶液;

(2) 按照图示1搭建静电纺丝装置, 将步骤(1)中的纺丝溶液加入到注射泵中制备连续的纳米纤维纱线, 弹性长丝的伸长率等于200%, 静电纺丝电压为20 kV, 纺丝溶液总流量为0.6 mL/h, 金属喇叭的直径为10 cm, 金属喇叭与卷绕装置的垂直距离为50 cm, 喷头与金属喇叭的垂直距离为4 cm, 喷头与金属喇叭的水平距离为3 cm, 喷头的数目为4个, 喷头内径0.4 mm, 正负喷头溶液流量比2:1, 正负喷头间的距离17 cm, 卷绕速度50 mm/min;

(3) 将步骤(2)中制备的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为75 mol/L的三氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )溶液中70 min;

(4) 将步骤(3)中的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为75 mol/L的吡咯(Py)溶液中低温(0-4℃)下1 h, 取出后用去离子水清洗, 然后置于60℃的真空烘箱中干燥, 得到PU @PPy的纳米纤维包芯纱;

(5) 将步骤(4)中的纳米纤维包芯纱表面复合带有导电铜丝的聚二甲基硅氧烷(PDMS)膜, 得到PU @PPy的纳米纤维纱线应力传感器。

[0020] (6) 将步骤(5)中制备的PPy@PAN纳米纤维纱线应力传感器编织成织物, 通过施加不同压力, 可获得相应的压力灵敏度。

#### [0021] 实施例4

本实施例的柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器的制备方法如下：

(1) 将聚氨酯(PU)溶解于N,N二甲基甲酰胺(DMF)和四氢呋喃的混合溶剂中(质量比为

1:1), 常温下搅拌8 h得到质量分数为12%的PU溶液;

(2) 按照图示1搭建静电纺丝装置, 将步骤(1)中的纺丝溶液加入到注射泵中制备连续的纳米纤维纱线, 弹性长丝的伸长率等于200%, 静电纺丝电压为20 kV, 纺丝溶液总流量为0.6 mL/h, 金属喇叭的直径为10 cm, 金属喇叭与卷绕装置的垂直距离为50 cm, 喷头与金属喇叭的垂直距离为4 cm, 喷头与金属喇叭的水平距离为3 cm, 喷头的数目为4个, 喷头内径0.4 mm, 正负喷头溶液流量比2:1, 正负喷头间的距离17 cm, 卷绕速度50 mm/min;

(3) 将步骤(2)中制备的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为75 mol/L的三氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )溶液中70 min;

(4) 将步骤(3)中的纳米纤维包芯纱浸泡在浓度为75 mol/L的吡咯(Py)溶液中低温(0-4°C)下1 h, 取出后用去离子水清洗, 然后置于60°C的真空烘箱中干燥, 得到PU @PPy的纳米纤维包芯纱;

(5) 将步骤(4)中的纳米纤维包芯纱表面复合带有导电铜丝的聚二甲基硅氧烷(PDMS)膜, 得到PU @PPy的纳米纤维纱线应力传感器。

[0022] (6) 将步骤(5)中制备的PPy@PAN纳米纤维纱线应力传感器弯曲至不同角度, 可获得相应的弯曲灵敏度。

[0023] 因此, 本发明制备的柔性高伸缩的纳米纤维纱线应力传感器, 基于纳米纤维较大的比表面积以及材料优异的性能特点, 当受到外力刺激时, 柔性高伸缩的纳米纤维纱线应力传感器显示了超高的灵敏度以及较宽的传感范围。在人体监测系统中, 可实现从微弱压力的心率监测到较大压力的肢体运动监测。此外, 制作工艺简便、成本低廉, 有利于向大规模商业化方向发展。

[0024] 以上显示和描述了本发明的基本原理和主要特征以及本发明的优点。本行业的技术人员应该了解, 本发明不受上述实施例的限制, 上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理, 在不脱离本发明精神和范围的前提下, 本发明还会有各种变化和改进, 这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

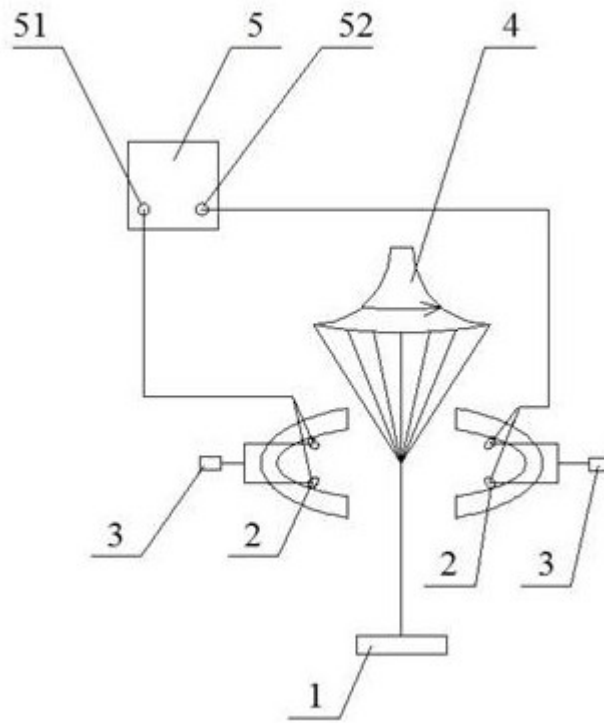


图1

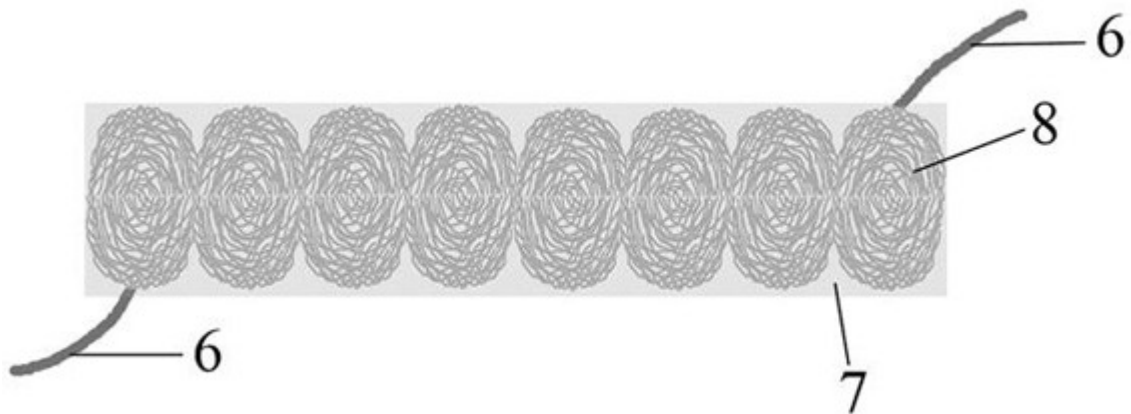


图2



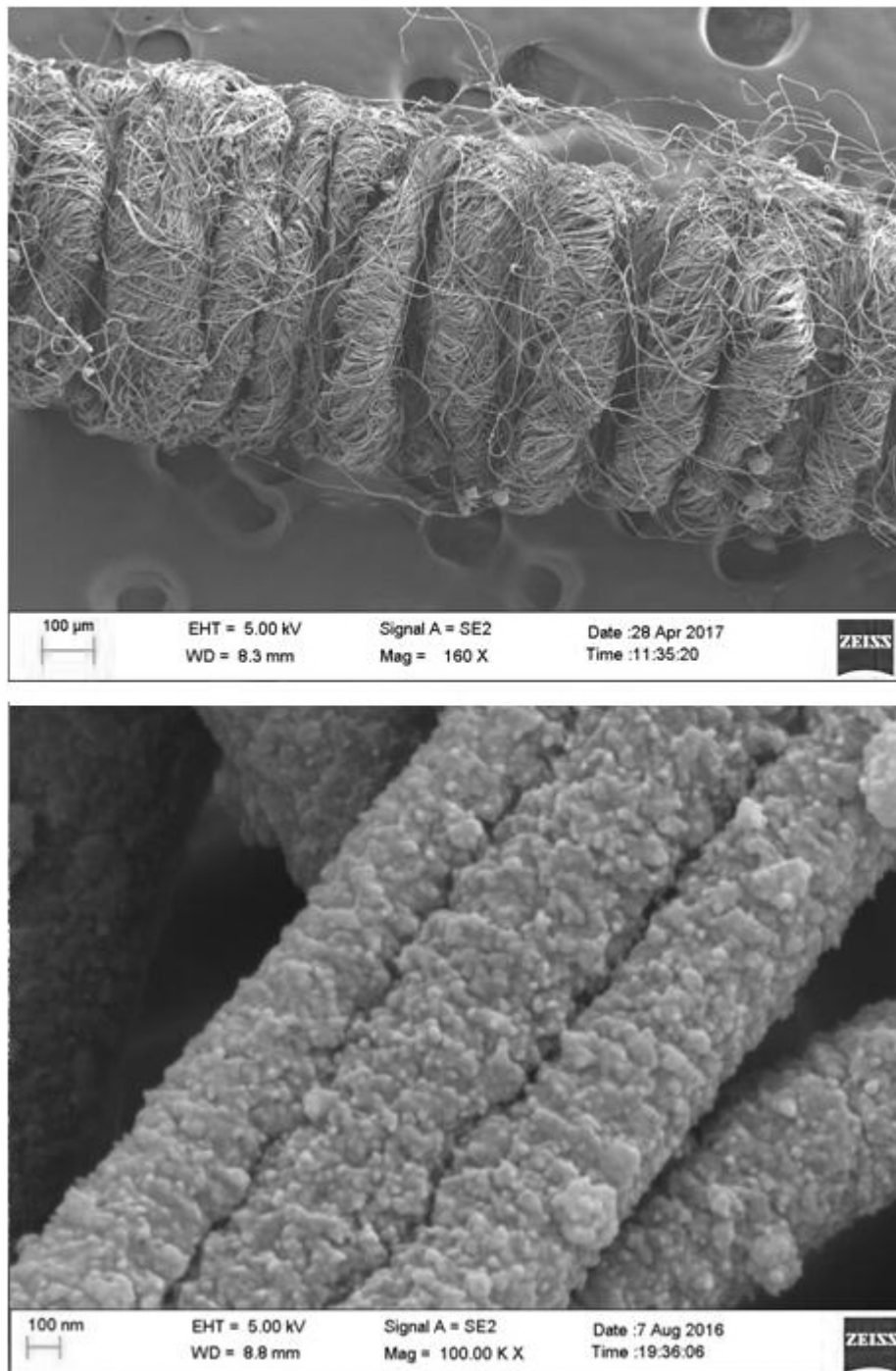


图3

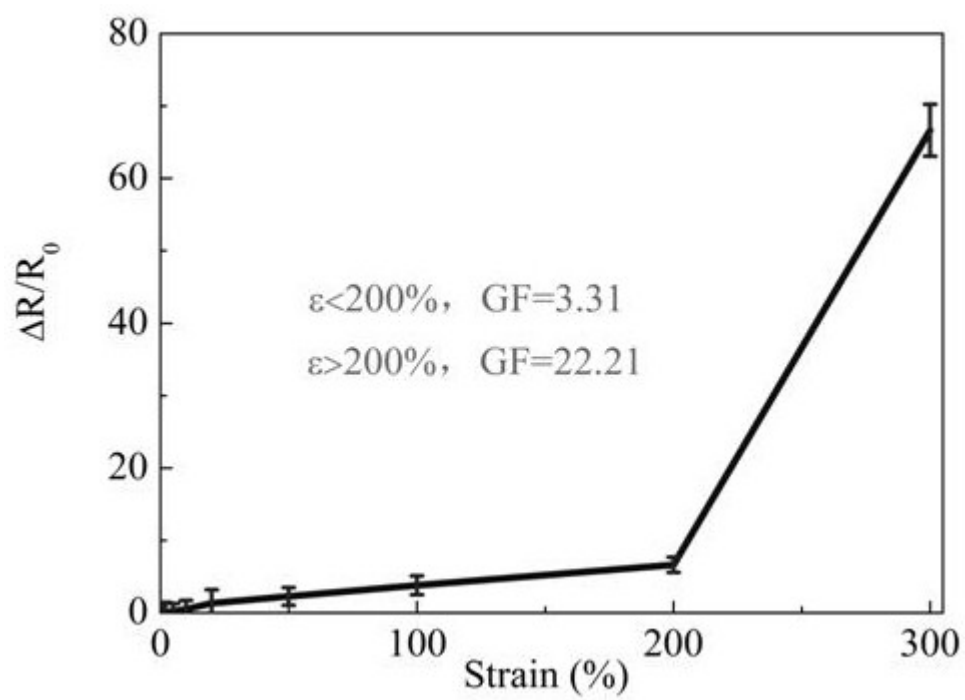


图4

|                |                                                                                                                                      |         |            |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------|
| 专利名称(译)        | 一种柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器及其制备方法                                                                                                    |         |            |
| 公开(公告)号        | <a href="#">CN109431460A</a>                                                                                                         | 公开(公告)日 | 2019-03-08 |
| 申请号            | CN201811052885.4                                                                                                                     | 申请日     | 2018-09-10 |
| [标]申请(专利权)人(译) | 中原工学院                                                                                                                                |         |            |
| 申请(专利权)人(译)    | 中原工学院                                                                                                                                |         |            |
| 当前申请(专利权)人(译)  | 中原工学院                                                                                                                                |         |            |
| [标]发明人         | 周玉嫚<br>何建新<br>南楠<br>刘凡<br>邵伟力<br>崔世忠<br>齐琨<br>李梦营<br>王琳琳<br>张景<br>李方<br>陶雪姣<br>翁凯                                                    |         |            |
| 发明人            | 周玉嫚<br>何建新<br>南楠<br>刘凡<br>邵伟力<br>崔世忠<br>齐琨<br>李梦营<br>王琳琳<br>张景<br>李方<br>陶雪姣<br>翁凯                                                    |         |            |
| IPC分类号         | A61B5/00 D01D5/00 D02G3/02 D02G3/34 D02G3/44                                                                                         |         |            |
| CPC分类号         | A61B5/6801 A61B2562/0247 D01D5/003 D01D5/0069 D01D5/0076 D01D5/0092 D02G3/02 D02G3/34 D02G3/441 D10B2321/042 D10B2321/10 D10B2331/10 |         |            |
| 代理人(译)         | 张真真<br>张志军                                                                                                                           |         |            |
| 外部链接           | <a href="#">Espacenet</a> <a href="#">SIPO</a>                                                                                       |         |            |

#### 摘要(译)

本发明公开了一种柔性高伸缩的具有褶皱结构的纳米纤维包芯纱应力传感器及其制备方法。采用高性能弹性长丝用作芯纱作为高伸缩的弹性基质，然后通过共轭静电纺丝技术在预拉伸至一定长度的弹性长丝表面包覆静电纺纳米纤维制备连续的纳米纤维包芯纱。通过原位液相聚合方法在包芯纱的壳层纳米纤维表面聚合包覆一层导电聚合物聚吡咯，最后在纱线表面涂覆一层带有导电铜丝的凝

胶膜，获得应力传感器，并应用于可穿戴电子皮肤上。当受到拉伸、弯曲以及压力等外部刺激时，这种纳米纤维纱线应力传感器不仅具有较好的力学自适应性，显示了超高的灵敏度以及较宽的传感范围。在人体监测系统中，可实现从微弱应力变化的心率监测到较大应力变化的肢体运动监测。

