(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 112805340 B
(45)授权公告日 2022.07.01

(21)申请号 201980064326.1
(22)申请日 2019.09.24
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112805340 A
(43)申请公布日 2021.05.14
(30)优先权数据
18200100.8 2018.10.12 EP
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2021.03.30
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2019/075692 2019.09.24
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2020/074251 EN 2020.04.16
(73)专利权人 卡尔斯鲁厄技术研究所
地址 德国卡尔斯鲁厄
(72)发明人 孙红叶 诺伯特·威伦巴赫 韩宗佑
(74)专利代理机构 北京英赛嘉华知识产权代理有限责任公司 11204
专利代理师 王达佐 洪欣
(51)Int.Cl.
C09D 11/03(2006.01)
C09D 11/101(2006.01)
C09D 11/102(2006.01)
C09D 11/52(2006.01)
H01B 1/22(2006.01)
H01L 31/00(2006.01)
(56)对比文件
CN 106164142 A,2016.11.23
CN 107201089 A,2017.09.26
CN 103403105 A,2013.11.20
CN 102656237 A,2012.09.05
EP 3267491 A1,2018.01.10
审查员 张丽

权利要求书2页 说明书6页 附图6页

(54)发明名称

用于高可拉伸的软电子器件的高传导性的可印刷油墨

(57)摘要

本发明涉及用于高可拉伸的软电子器件的高传导性、可印刷的油墨、其制造方法以及生产高可拉伸的软电子器件的方法。

CN 112805340 B

1.高传导性且可印刷的油墨，包含：

(i)相对于所述油墨的总体积，5体积％至40体积％的作为传导性固体相的传导性疏水性银颗粒，

(ii)液体初级相，其包括作为聚合物基质的通过交联而可变为弹性体的可交联疏水性聚二甲基硅氧烷(PDMS)，并且还包含相对于PDMS基质1体积％至10体积％的量的交联剂和0.01体积％至5体积％的量的催化剂溶液，以及

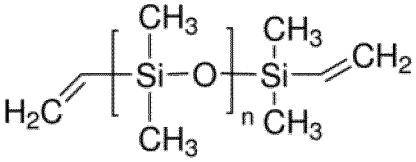
(iii)基于离子液体的液体次级相，其中液体次级相与传导性固体相之间的体积比ρ为0.01至0.2，

其中所述液体次级相与所述液体初级相不混溶并且不润湿所述传导性固体相，使得三相体系产生毛细管悬浮体。

2.根据权利要求1所述的油墨，其中所述传导性疏水性银颗粒具有根据DIN EN 725-5，ISO 13320通过激光衍射测量的0.1μm至50μm的中等粒度d50。

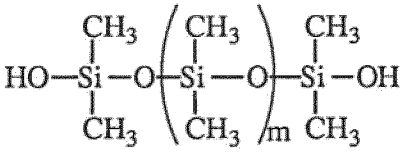
3.根据权利要求2所述的油墨，其中所述可交联聚二甲基硅氧烷(PDMS)具有如根据ISO 3015通过毛细管粘度计所测定的100cSt至60,000cSt的运动粘度。

4.根据权利要求1至3中任一项所述的油墨，其中所述可交联疏水性PDMS选自用于加成固化的乙烯基二甲基甲硅烷氧基封端的PDMS：



其中n为50至2,000；

或用于缩合固化的硅烷醇封端的PDMS：

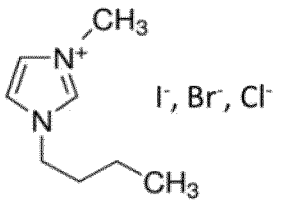


其中m为50至1,800。

5.根据权利要求1至4中任一项所述的油墨，其中所述离子液体含有取代或未取代的咪唑鎓阳离子，其中盐的所述咪唑鎓阳离子在1-和3-位或1-、2-和3-位具有(C1-C6)烷基基团，并且所述离子液体的阴离子是卤化物离子、高氯酸根离子、拟卤化物离子、硫酸根离子、磷酸根离子、烷基磷酸根离子和/或C1-C6羧酸根离子。

6.根据权利要求5所述的油墨，其中所述咪唑鎓阳离子选自1-乙基-3-甲基咪唑鎓阳离子、1,3-二甲基咪唑鎓阳离子或1-丁基-3-甲基咪唑鎓阳离子。

7.根据权利要求1至6中任一项所述的油墨，其中所述离子液体包含1-丁基-3-甲基碘化咪唑鎓、1-丁基-3-甲基氯化咪唑鎓、1-丁基-3-甲基溴化咪唑鎓：



。

8.生产根据权利要求1至7中任一项所述的高传导性且可印刷的油墨的方法，包括：

将下述进行混合：

(i)5体积％至40体积％的作为传导性固体相的传导性疏水性银颗粒，

(ii)液体初级相，其包含作为聚合物基质的通过交联而可变为弹性体的可交联疏水性聚二甲基硅氧烷(PDMS)，并且还包含相对于PDMS基质1体积％至10体积％的量的交联剂和0.01体积％至5体积％的量的催化剂溶液，以及

(iii)基于离子液体的液体次级相，其中液体次级相与传导性固体相之间的体积比ρ为0.01至0.2，

其中所述液体次级相与所述液体初级相不混溶并且不润湿所述传导性固体相，使得三相体系产生毛细管悬浮体。

9.根据权利要求8所述的方法，其中通过机械搅拌将所述银颗粒分散在所述液体初级相中，随后添加所述液体次级相并且进行随后的混合步骤以将所述液体次级相破碎成液滴。

10.生产高可拉伸的软电子器件的方法，通过将根据权利要求1至7中任一项所述的未固化油墨通过点涂、丝网印刷、狭缝模涂、喷涂或直写成型的方式施用在软基材上，并且然后将其固化以产生可拉伸且可变形的电气装置。

11.根据权利要求10所述的方法，其中，在所需的电子结构上印刷之后，通过湿气、热处理或UV辐射来启动所述固化。

12.根据权利要求1至7中任一项所述的高传导性且可印刷的油墨用于产生传感器、软机器人、无线装置、柔性太阳能电池或软电子器件的用途。

用于高可拉伸的软电子器件的高传导性的可印刷油墨

[0001] 本发明涉及用于高可拉伸的软电子器件的高传导性的可印刷油墨、其制造方法以及生产高可拉伸的软电子器件的方法。

[0002] 高传导性、可印刷且弹性的导体的开发使得诸如传感器、集成电路或天线的软电子组件的制造以及它们在生物电子学、可佩戴装置和软机器人中的应用成为可能。创建下一代软电子器件需要不同特征的油墨，包括机械柔韧性和可拉伸性、可根据应用需求调节的传导性、以及与现有技术(丝网印刷、点涂、狭缝模涂、喷涂)以及新兴的印刷和涂覆技术(诸如直写成型(direct ink writing)的增材制造)兼容的可印刷性。

[0003] 现有的可拉伸的传导性油墨遭遇的主要挑战之一是电性质与机械性质之间的权衡，例如在传导性聚合物中添加增塑剂以确保良好的可拉伸性会劣化传导性，在柔性聚合物中嵌入高体积分数的传导性颗粒提供了高传导性却降低了可变形性。因此，高度需求开发高传导性还高可拉伸且可印刷的油墨，其能够实现大面积且高生产量生产、高印刷分辨率、容易加工和成本效益。

[0004] 尽管已经提出了许多方法来生产传导性电子材料，但很少能够同时满足机械可拉伸性、电子传导性和可印刷性的要求。WO2018/006990描述了由传导性颗粒之间形成毛细管桥而产生的高传导性的可印刷糊料。然而，糊料在干燥和烧结之后是刚性的，并且与软基材不相容。

[0005] US 9,870,843 B2表明，当制备传导性聚合物复合材料颗粒时，毛细管力可用于降低颗粒消耗，因为由毛细管力驱动的颗粒自组装产生低逾渗阈值。另一篇报道表明，毛细管力可以增强银环氧粘合剂的导电性，即在低颗粒负载下实现高传导性(Sun,Hongye,Xinfeng Zhang,和Matthew MF Yuen,“Enhanced conductivity induced by attractive capillary force in ternary conductive adhesive”,Composites Science and Technology 137(2016):109-117)。然而，在这些出版物中没有解决可印刷性和可拉伸性。

[0006] Matsuhisa,N.等(“Printable elastic conductors by in situ formation of silver nanoparticles from silver flakes”,Nature materials,2017.16(8),pages 834ff)描述了通过引入表面活性剂和原位生长纳米尺寸的传导性颗粒而在低银含量下实现高传导性和高可拉伸性的方法。在US9,460,824中，通过将沉积在基材上的银纳米颗粒退火而形成可拉伸且传导性的膜。然而，纳米材料在大规模生产中的使用受到材料和膜的复杂制备步骤限制。

[0007] Araki等报道了由银/聚氨酯复合材料制成的可拉伸性高达600％的高可拉伸配线(Araki,Teppei等,“Printable and stretchable conductive wirings comprising silver flakes and elastomers”,IEEE Electron Device Letters 32.10(2011):1424-1426)。然而，没有解决对应用至关重要的油墨的循环耐久性。

[0008] 各种商业产品提供良好的传导性和柔韧性，即来自Engineered Materials Solutions,Inc的CI-1036可拉伸银油墨。尽管如此，它只能拉伸至100％。在2015年，DuPont发布了一系列的服装用可拉伸电子油墨，例如PE873和PE874银导体，其通过将银薄片悬浮在弹性体中来配制。这些产品在12体积％至15体积％的低银负载下表现出低电导率(～10

^{2}S/cm)。此外，没有指明这些油墨的可拉伸性。

[0009] 因此，本发明的技术目的在于提供简单且经济的方法来生产在相应的用于应用于软电子器件的印刷和固化装置中提供高变形性和可拉伸性的高传导性且可印刷的油墨。油墨制造应与现有技术的单元操作兼容，并且应允许大规模生产。

[0010] 本发明利用毛细管悬浮现象来设计在相应的用于应用于软电子器件的印刷和固化装置中提供高变形性和可拉伸性的高传导性且可印刷的油墨，通过本发明实现了上述目的以及根据以下公开内容将变得显而易见的其它目的。

[0011] 特别地，本发明涉及高传导性且可印刷的油墨，包含如权利要求1中所限定的传导性固体相和两个不混溶的流体相。

[0012] 将5至40体积百分比(体积%)，优选8至20体积%的疏水性银(Ag)颗粒掺入疏水性初级聚合物相中。因此，确保了填料与聚合物基质之间的相容性，为了固化的软电子器件的良好机械稳定性以及高导电性。

[0013] 初级液体相包括聚合物基质及其相应的交联剂和催化剂。可交联聚二甲基硅氧烷(PDMS)用作决定可拉伸性的软聚合物基质。为了固化液体PDMS聚合物，掺入根据现有技术的交联剂和催化剂。相对于PDMS基质的量，采用1至10体积%，优选2至5体积%的交联剂以及0.01至5体积%，优选0.05至2体积%的催化剂溶液。交联剂的量决定了交联密度，交联密度决定了固化材料的机械强度和最大可拉伸性。催化剂的量控制聚合期间的固化动力学。用于PDMS聚合物的交联剂和催化剂是本领域熟知的并且是可商购的。

[0014] 次级流体相必须与初级相不混溶并且不应润湿传导性固体相。次级流体的量通过参数ρ来量化，参数ρ被定义为次级流体与传导性固体相之间的体积比。

[0015] $$\rho = \frac{\text{次级流体的体积}}{\text{传导性固体的体积}}$$

[0016] ρ为0.01至0.2，优选0.02至0.1。次级流体的量决定了颗粒网络结构并且因此决定了最终传导性。

[0017] 为了制造油墨，通过机械搅拌将银颗粒分散在初级相中。在添加液体次级相之后，随后进行后续的混合步骤以将次级流体相破碎成小液滴，所述小液滴将银颗粒连接成团簇，所述团簇进一步生长成样品-扩展型传导性网络。

[0018] 三相体系产生毛细管悬浮体，其中悬浮颗粒由于由不混溶的次级流体引起的毛细管力而自组装成逾渗样品-扩展型网络。未固化的油墨保持稳定，并且即使在10天内也不会发生沉淀。它可以使用标准技术(例如丝网印刷、狭缝模涂或喷涂)或新兴的增材制造方法(例如可以用于快速成型复杂的3D物体(例如压力和应变传感器)的直写成型)印刷。在印刷所需的电子结构之后，通过湿气、热处理(<200℃)或UV辐射来启动固化。

[0019] 固化的样品在低银体积分数下表现出低逾渗阈值和高传导性。降低柔性聚合物中的银固体的消耗确保了高的、前所未有的可拉伸性(约1000%最大应变)。此外，其提供了优异的循环耐久性，并且即使在超过现有技术的大量循环(在100%的循环应变下>1000次循环)之后仍保持传导性。迄今为止，文献中报道的可拉伸性的最高值为约400%至500%(Matsuhisa,N.,等“Printable elastic conductors by in situ formation of silver nanoparticles from silver flakes”,Nature materials,2017.16(8),pages 834ff)。然

而，上述油墨显示出低的循环稳定性，并且在50％的循环应变下750次循环之后发生突然的电阻增加。

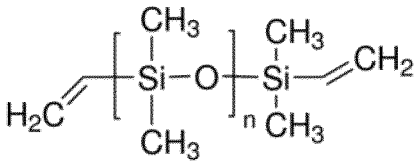
[0020] 银颗粒在初级相中的分散以及次级相的添加可以使用不同的现有技术混合装置实现，例如溶解器、共混器、球磨机、三辊磨机或非接触行星式混合器。

[0021] 银颗粒在初级流体中的悬浮优选通过采用500至3000rpm，优选1000至2500rpm的旋转速度，在室温下持续例如约10分钟的非接触行星式混合程序以及随后以30至300min^{-1}，优选30至80min^{-1}的旋转速度将团聚体尺寸降至约5μm的三辊研磨来实现。然后在随后的持续例如约1分钟的非接触行星式混合步骤中将次级流体相添加至其中。

[0022] 优选地，传导性银颗粒具有0.1至50μm的中等粒度d_{50}，由根据DIN EN 725-5，ISO 13320的激光衍射测定。

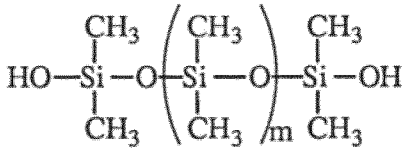
[0023] 添加疏水性银颗粒以确保良好的分散性以及与疏水性PDMS基质的良好相容性，这是实现高可拉伸性和良好循环稳定性的关键，因为差的相容性将导致银薄片与基质之间的微观破裂，从而劣化油墨的机械性质和电性质。疏水性银颗粒是可商购的。

[0024] 更具体地，通过交联转化成弹性体的反应性聚二甲基硅氧烷(PDMS)优选具有100cSt至60,000cSt的运动粘度，如根据ISO 3015通过毛细管粘度测定法测定。这些聚合物在室温下是流体且非挥发性，并且次级流体可以容易地共混。根据本发明，可以使用可交联且疏水的两种类型的优选PDMS。一种是乙烯基二甲基甲硅烷氧基封端的PDMS，其可以通过加成固化聚合：

[0025] 

[0026] 其中n可以在50与2,000之间变化，对应于6,000至120,000g/mol的平均分子量。

[0027] 另一种是硅醇封端的PDMS，其可以通过缩合固化聚合：

[0028] 

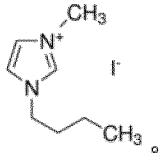
[0029] 其中m可以在50与1,800之间变化，对应于4,000至110,000g/mol的平均分子量。

[0030] 就与PDMS不混溶的次级液体相而言，基本上与悬浮的银颗粒成90°至165.3°的三相接触角θ的任何非润湿性次级流体均可以产生毛细状态的毛细管悬浮体(参考Koos Erin and Norbert Willenbacher.Soft Matter 8.14(2012):3988-3994)。接触角的准确上限取决于团簇结构和桥体积，即对于一些体系，最大接触角可以低于上述理论限度。应注意，三相接触角θ取决于三元体系的两种液体以及固体相的材料性质。特别地，三相接触角根据ASTM标准D7334通过静滴法测定。将Ag颗粒压制成致密的团块并且浸入初级聚合物相中。将从注射器中挤出的次级流体液滴装载在Ag团块上并且使其沉降。在接触角测量中使用的典型液滴尺寸是1微升至10微升。通过照相机记录液滴形状，并且通过液滴轮廓拟合确定三相接触角。图1示出了在聚合物相内次级流体在颗粒上的三相接触角θ的示意图，θ应为90°至165.3°，以产生毛细管状态毛细管悬浮体。

[0031] 在本发明中，优选地，离子液体(IL)可以特别地含有取代或未取代的咪唑鎓阳离

子，其中盐的咪唑鎓阳离子优选地在1-和3-位或1-、2-和3-位具有(C1-C6)烷基基团。更优选地，咪唑鎓阳离子是1-乙基-3-甲基咪唑鎓阳离子、1,3-二甲基咪唑鎓阳离子或1-丁基-3-甲基咪唑鎓阳离子。离子液体的阴离子通常是卤化物离子、高氯酸根离子、拟卤化物离子、硫酸根离子、磷酸根离子、烷基磷酸根离子和/或C1-C6羧酸根离子，卤化物离子是氯化物离子、溴化物离子和/或碘化物离子，拟卤化物离子是氰化物离子、硫氰酸根离子和/或氰酸根离子，以及C1-C6羧酸根离子是甲酸根、乙酸根、丙酸根、丁酸根、己酸根、马来酸根、富马酸根、草酸根、乳酸根和/或丙酮酸根。

[0032] 最优选地，可以使用1-丁基-3-甲基碘化咪唑鎓：

[0033] 

。

[0034] 例如，在PDMS作为初级相的情况下，被称为次级流体的IL(1-丁基-3-甲基碘化咪唑鎓)在本发明中使用的疏水性银上表现出119°的三相接触角。三相接触角可以通过向IL中添加水或乙醇来调节，例如重量比为2:5的离子液体和水的二元混合物表现出126°的三相接触角。纯水具有超过上述θ范围的170°的高的三相接触角，因此水不能用于形成毛细管悬浮体。图2示出了在PDMS聚合物相中三种液体液滴在疏水性银上形成不同接触角的实验图像。纯IL和二元IL/水混合物可以在PDMS中形成毛细管悬浮体，而纯水则不能。

[0035] 如上所述，根据本发明的油墨可以用于通过以下方法来生产高可拉伸的软电子器件：优选通过点涂、丝网印刷、狭缝模涂、喷涂或直写成型的方式将获得的未固化油墨施用至软基材上，然后固化它们。在印刷所需结构之后，通过用于缩合固化的湿气或者通过用于加成固化的热处理(<200℃)或UV辐射来启动固化，这最终产生可拉伸且可变形的电气装置。

[0036] 本发明的油墨可用于以下种类的应用：

[0037] (i)传感器：用于可佩戴式健康监测的生物医学传感器，用于记录实时数据以反映人类的生理状况。本发明的油墨可用作感测材料的候选物。

[0038] (ii)软机器人：人工皮肤或E-皮肤使得机器人能够感测压力、应变、温度。基于应变感测的数据手套捕获机器人手指的运动。

[0039] (iii)无线装置：诸如移动电话的无线且便携式通信装置正在快速增长，并且电信系统中的天线必须与软电子封装兼容。本发明的可印刷且传导性油墨允许复杂的天线设计和射频传播。

[0040] (iv)柔性太阳能电池：柔性薄膜光伏电池是收集太阳能的低成本装置。本发明材料的油墨可以在低银消耗的同时在柔性基材上提供良好的电池接触。这在未来的大众市场中是决定性的。

[0041] (v)软电子器件：本发明的油墨可以印刷成集成在软机器人、电子纸和柔性显示器中的电路。

[0042] 更详细地描述本发明，但不限于以下实施例。

实施例

[0043] 在一个实施例中，将Ag薄片[SF-01C,Great wall precious metals Co.]当作疏水性传导性颗粒，并且将聚二甲基硅氧烷(PDMS)[AB109360,abcr GmbH]以及其交联剂[聚(二甲基硅氧烷-共-甲基氢硅氧烷)，三甲基甲硅烷基封端的，Sigma-Aldrich]和催化剂[三(二丁基硫化物)三氯化铑，Gelest Inc]用作软聚合物。Ag薄片通过非接触行星式混合和三辊研磨均匀地分布在PDMS基质中。然后，将与PDMS基质不混溶的1-丁基-3-甲基碘化咪唑鎓水溶液(IL和水的重量比为2:5)作为次级流体相添加至Ag-PDMS悬浮体。次级流体与银固体相之间的体积比ρ在0.02与0.08之间变化，确保在次级液体蒸发期间油墨是可固化的并且没有气泡残留在固化的样品内部。随后进行另一个混合步骤以将次级流体破碎成小液滴，从而促进银颗粒团簇的形成。含有小的次级流体液滴的团簇驱动Ag薄片自组装成低逾渗阈值的传导性网络。图3示出了电导率相对于二元Ag-PDMS和毛细管Ag-PDMS的Ag颗粒负载量。通过拟合如下所示的幂律关系来确定逾渗阈值Φ_c：

[0044] $\sigma=\sigma_0(\Phi-\Phi_c)^s$其中$\Phi>\Phi_c$

[0045] 其中σ是复合材料的电导率，Φ是银颗粒的体积分数，Φ_c是逾渗阈值的银颗粒的体积分数，s是临界指数，并且σ_0是前因子。毛细管Ag-PDMS的逾渗阈值确定为$\Phi_c=6.4$vol.%，并且相应的二元Ag-PDMS混合物的逾渗阈值确定为$\Phi_c=23$vol.%。

[0046] 值得注意地，初始电导率在15体积%银时高达1100S/cm，而相应的没有毛细桥接的常规油墨在这种颗粒负载时仍是绝缘的。此外，Ag薄片的作用类似于在拉伸时彼此滑动的小片。这允许在拉伸时保持传导路径。

[0047] 进行拉伸试验以确定油墨的可拉伸性。印刷狗骨形试样，然后在130℃固化1小时。固化之后，观察到8.5体积%Ag-PDMS的断裂拉伸应变高达1000%。图4示出了对具有三种不同Ag负载量的固化油墨的狗骨形试样的拉伸试验的应力-应变曲线。8.5体积%Ag-PDMS的最大应变高达1000%。电导率变化对应变的敏感性取决于Ag负载量，如图5a中所示。包含15体积%Ag的PDMS油墨保有导电性直至应变高达800%。然而，电导率保持大致恒定水平的电导率直至应变高达100%，然后电导率降低几个数量级(参见图5b)。这允许其作为高传导性电路(只要应变<100%)或作为高应变敏感传感器(应变>100%)应用。油墨的电导率随变形强烈变化的应变范围可以通过其Ag含量来调节(参见图5a)。因此，图5a示出了具有三种不同Ag负载量的Ag-PDMS的机电性质。在低Ag负载量下，电导率变化对应变更敏感。在拉伸至800%之后，15体积%Ag-PDMS的油墨仍然是导电的。图5b示出当拉伸至100%应变时，15体积%Ag-PDMS的电导率不下降。

[0048] 进行循环测试以确定油墨的耐久性。首先制备狗骨形的纯PDMS膜。在狗骨形的两个端部上印刷高传导性银糊剂的两个电极。然后将油墨印刷成在两个电极之间的直丝的形式，并且在130℃固化1小时。图6a示出了在100%的应变幅度和0.012Hz的频率下的循环负载期间10体积%Ag-PDMS的循环耐久性。所施加的应变循环以蓝色示出，并且黑线表示记录的响应于所施加的应变的电阻。在1000次循环之后，油墨保有800hm的低电阻，即与初始状态相比，其仅增加约4倍。

[0049] 高循环耐久性对于诸如在使用期间遭受大量变形的弹性电路的应用是重要的。图6b示出了10体积%Ag-PDMS样品在前30个循环期间的循环电阻变化(图6a中矩形的放大区域)。电阻瞬时响应于所施加的应变，并且在这些变量之间没有观察到相位滞后，如虚红线

所示，这意味着油墨性质的良好的可恢复性和耐久性。图6c示出了10体积％Ag-PDMS在两个拉伸/释放响应循环时的电阻变化。油墨在拉伸和释放应变时表现出完全可恢复的电阻，滞后可忽略。

[0050] 图7用本发明的油墨3D印刷蜂窝结构证明了本发明的油墨的特征(即可印刷、柔性且导电的)。它对圆形瓶适形良好(a)；在纸上印刷电路，甚至折叠的(b)和卷曲的(c)电路仍然可以点亮LED；由本发明的油墨印刷的绑箍扭卷却没有电阻的变化(d)。

[0051] 通过3D印刷的应变传感器进一步证明了Ag-PDMS油墨的性能。图8a示出了具有四个集成的应变传感器的手套，应变传感器的蛇形设计，以及由9体积％Ag-PDMS毛细管油墨印刷的传感器原型。铜箔用作电极。将传感器印刷在由与用于传导性油墨的相同PDMS制成的基材上，以避免分层。图8b示出了手指弯曲期间手套上的传感器的性能。将每个手指分别弯曲三次，然后同时弯曲所有手指。R/R_0信号证实传感器响应于弯曲而没有延迟，并且在释放应变之后完全恢复。图8c示出了由毛细管Ag-PDMS制成的传感器的性能。在两个初始循环之后，显示了6次三角形应变循环的相对电阻变化$\Delta R/R_0$。应变传感器对所施加的应变表现出可重复且同相位的响应。传感器的灵敏度由灵敏系数(GF)＝$(\Delta R/R_0)/\varepsilon$来表征。我们的传感器显示9体积％Ag-PDMS在15％的应变下的GF为9.1，这与由PDMS复合材料制成的其它应变传感器相当，但包含更高的填料含量[Hu,Y.,等,Nano Research,2018.11(4):p.1938-1955.]。

图1

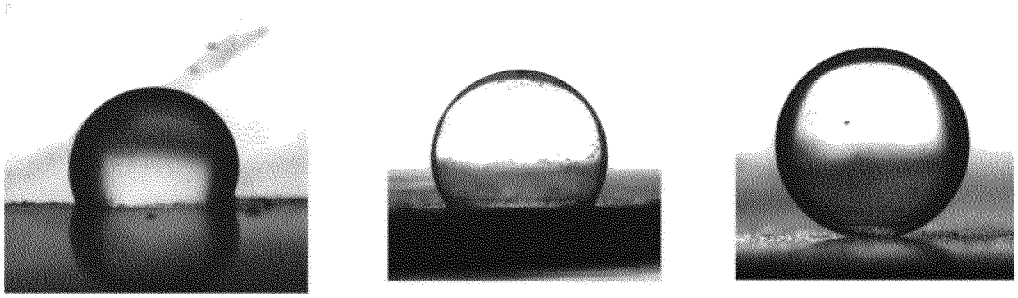


图2

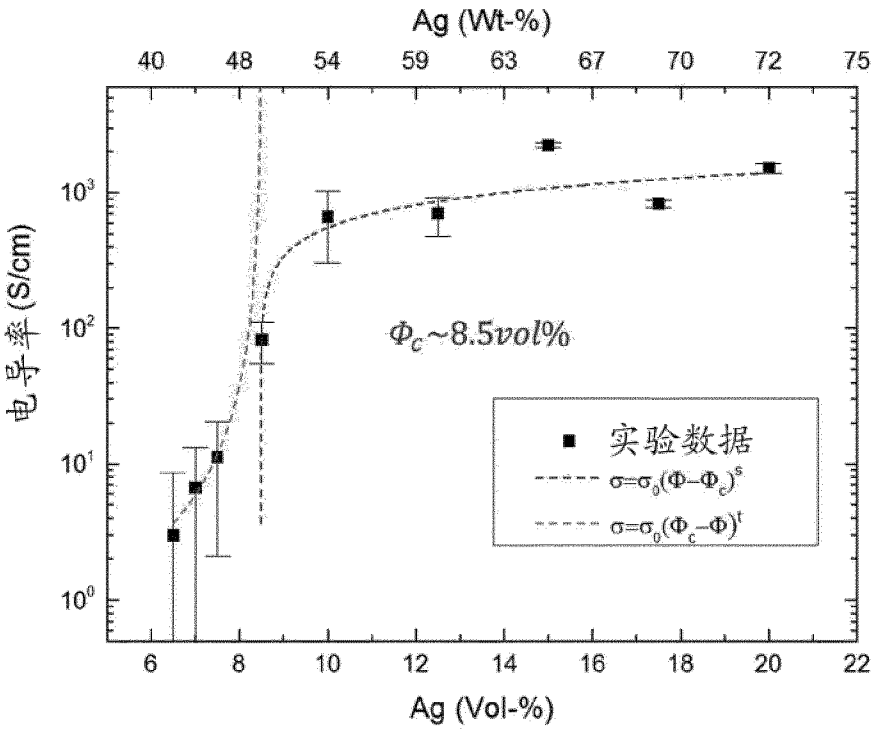

Ag (Wt-%)
40
48
54
59
63
67
70
72
75
电导率 (S/cm)
10^3
10^2
10^1
10^0
Φ_c~8.5vol%
实验数据
$\sigma=\sigma_0(\Phi-\Phi_c)^s$
$\sigma=\sigma_0(\Phi_c-\Phi)^t$
6
8
10
12
14
16
18
20
22
Ag (Vol-%)

图3

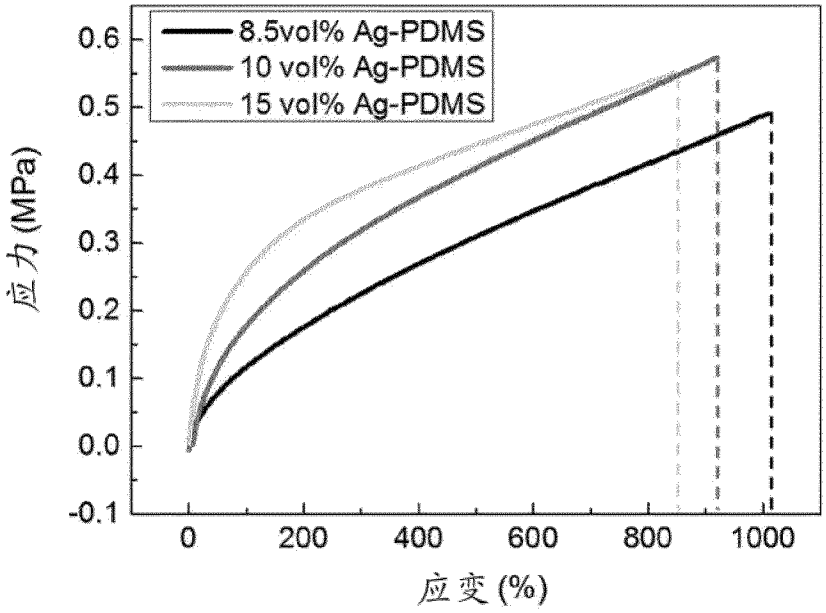
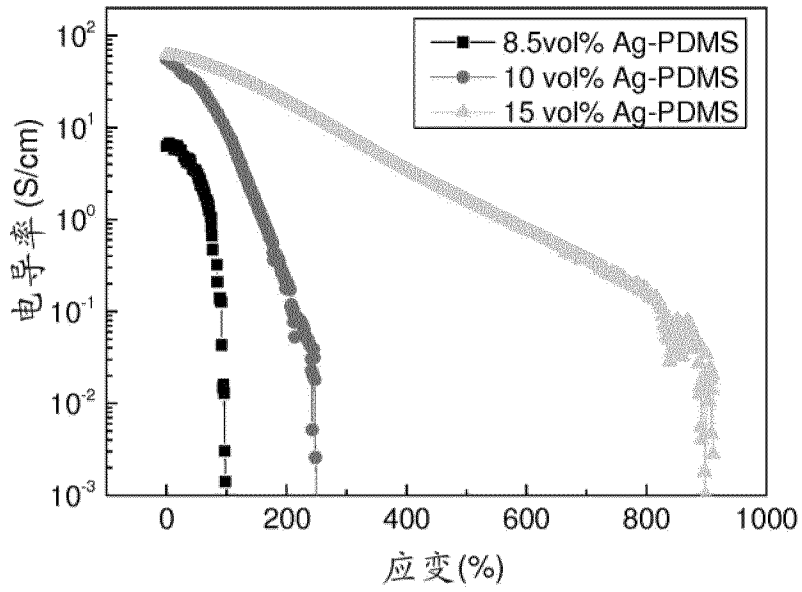

8.5vol% Ag-PDMS
10 vol% Ag-PDMS
15 vol% Ag-PDMS
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
-0.1
应力 (MPa)
0
200
400
600
800
1000
应变 (%)

图4

(a)


8.5vol% Ag-PDMS
10 vol% Ag-PDMS
15 vol% Ag-PDMS
电导率 (S/cm)
应变(%)

(b)

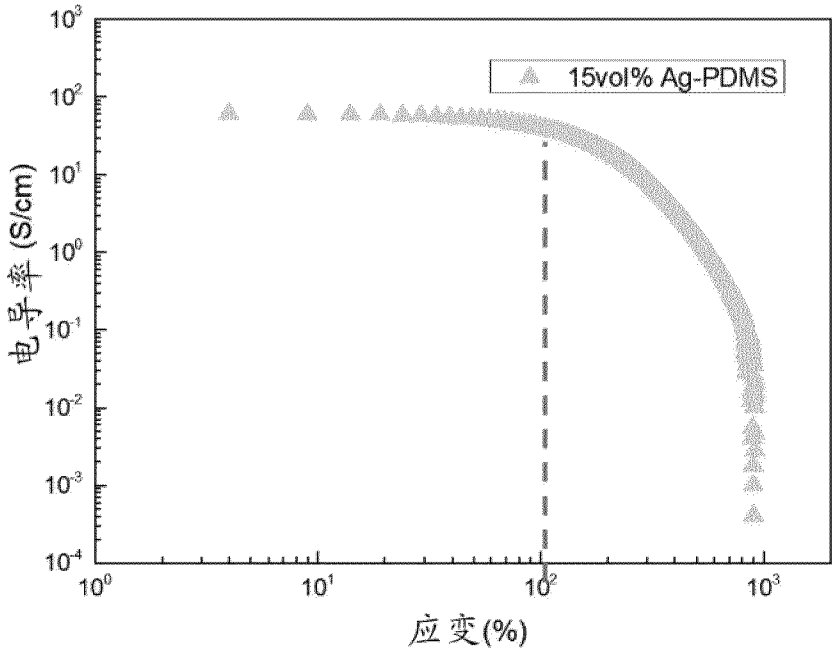
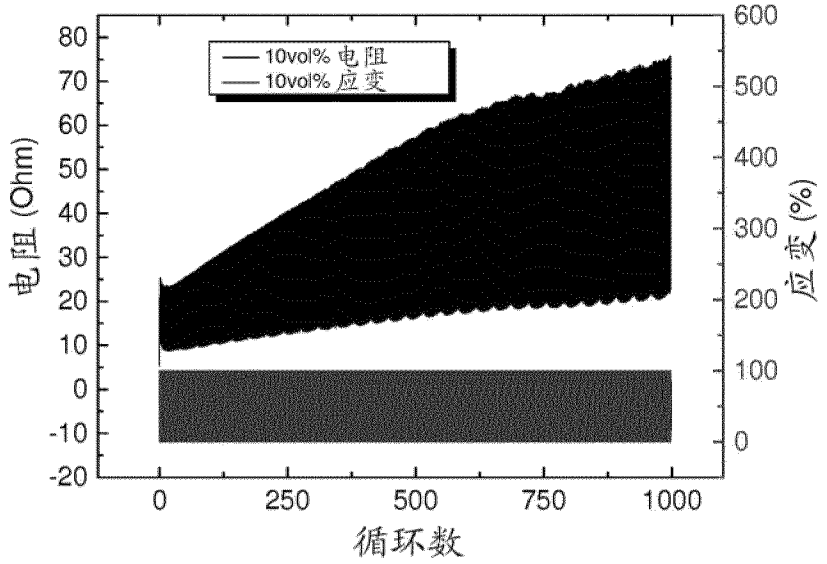

15vol% Ag-PDMS
电导率 (S/cm)
应变(%)

图5

(a)


10vol% 电阻
10vol% 应变
电阻 (Ohm)
应变 (%)
循环数
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
600
500
400
300
200
100
0
0
250
500
750
1000

(b)

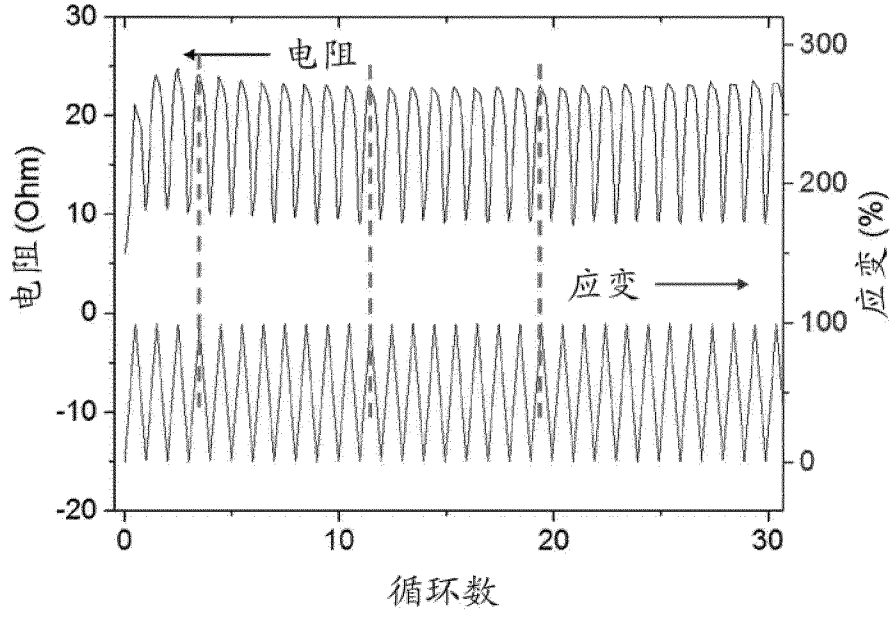

电阻
应变
电阻 (Ohm)
应变 (%)
循环数
30
20
10
0
-10
-20
300
200
100
0
0
10
20
30

图6

(c)

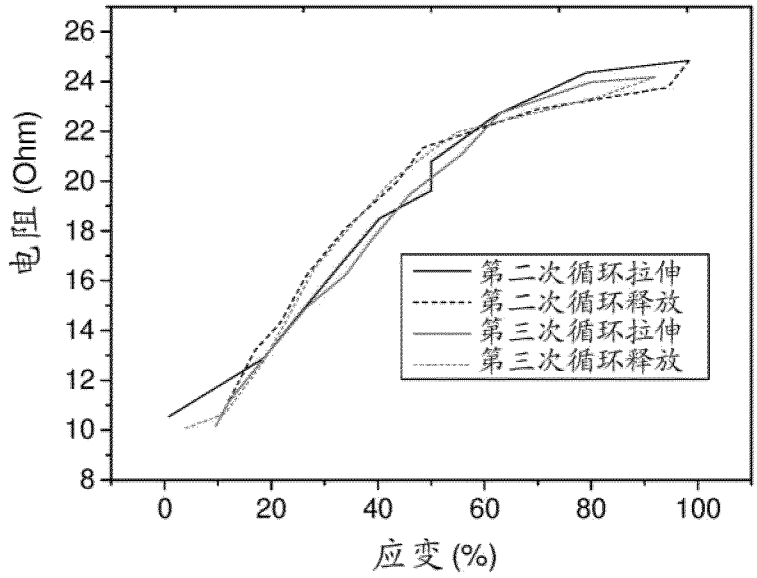

电阻 (Ohm)
应变 (%)
第二次循环拉伸
第二次循环释放
第三次循环拉伸
第三次循环释放

图6 (续)

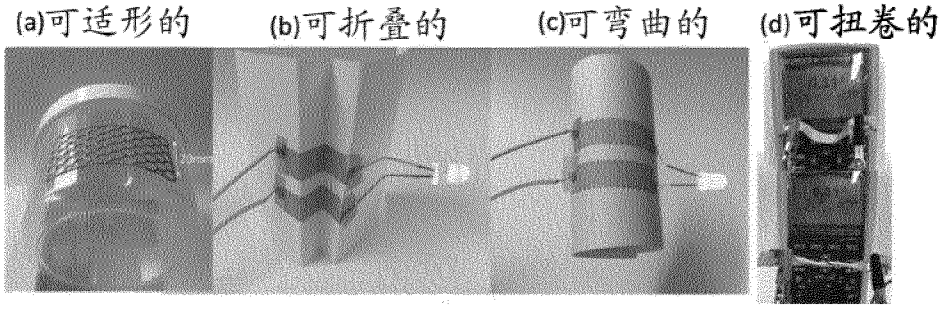

(a)可适形的
(b)可折叠的
(c)可弯曲的
(d)可扭卷的

图7

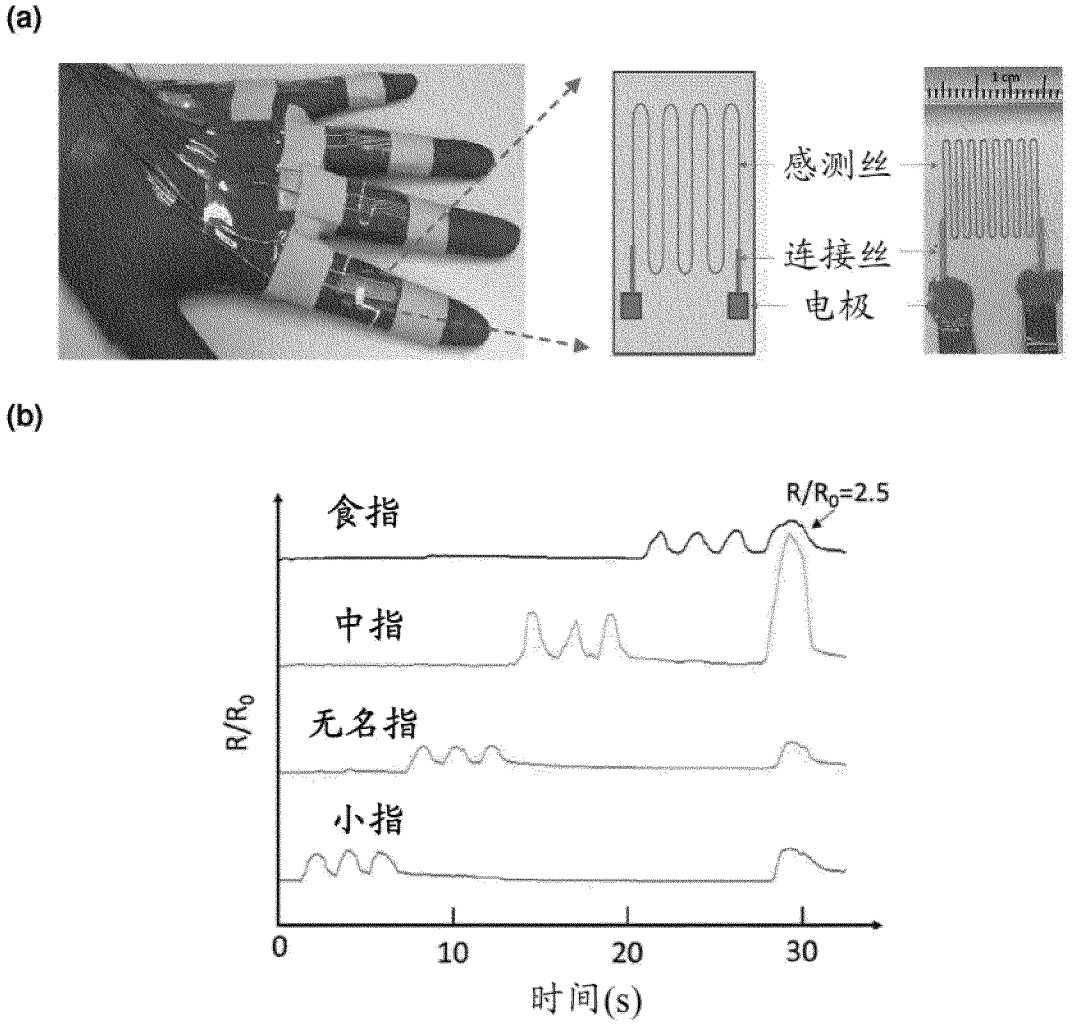

(a)
感测丝
连接丝
电极
(b)
食指
中指
无名指
小指
R/R0=2.5
R/R0
0
10
20
30
时间(s)
(c)
Ag-PDMS
ΔR/R0
应变
1.5
1.0
0.5
0.0
15
10
5
0
0
1
2
3
4
5
6
循环数
应变(%)

图8