

穿戴电子可拉伸材料的制备与应用

潘晓君^{1,2}, 鲍容容^{1,2,3*}, 潘曹峰^{1,2,3*}

1. 广西大学物理科学与技术学院纳米能源研究中心, 南宁 530004

2. 中国科学院北京纳米能源与纳米系统研究所, 北京 100083

3. 中国科学院大学纳米科学与技术学院, 北京 100049

摘要 可拉伸材料的出现解决了智能设备的刚性问题, 使得智能设备能够实现柔弹性。综述了超薄材料、织物以及生物可降解材料等可拉伸材料的最新研究进展与发展方向, 包括超薄材料、织物材料、生物可降解材料等; 介绍了可拉伸材料在可拉伸电极、储能设备及晶体管传感器等方面的应用; 指出可拉伸材料存在材料导电性和拉伸性的平衡问题、可拉伸电极的不透气性和舒适度较差问题, 探讨了其未来发展的机遇与面临的挑战。

关键词 可拉伸; 柔性材料; 超薄; 生物可降解

随着可穿戴电子领域的发展, 对于可拉伸材料的要求越来越高。人体皮肤的变形范围为10%~50%^[1]。为了模仿实现人体皮肤的功能, 可穿戴电子系统集成了许多单元, 例如衬底、电极、传感器、显示器以及能量收集和存储设备^[2]。这些器件及单元需要很高的机械柔韧性和可拉伸性。同时, 为了实现与非平整、粗糙和动态皮肤表面的牢固贴合接触而又不妨碍日常活动, 应选择具有低模量、高拉伸性及良好耐磨性的材料。此外, 还需要考虑材料的舒适度及器件的便携性等。

目前, 大多数可穿戴设备由衬底(硅衬底、玻璃、塑料等)、导电电极、导电灵敏层组成。其中部件的加入使得可穿戴设备拉伸性能变差, 尽管其性能得到提升, 但机械性能并没有得到相应提高。可穿戴设备是对皮肤功能的补充和模仿, 所以可穿戴设备和电子皮肤应满足中压(10~100 kPa, 适用于物体的操作)和低压(<10 kPa, 相当于轻柔的触摸)的双重压力的识别与读取。为了提升可穿戴器件的舒适度及安全性, 一些具有新型特性的材料近年来被广泛地关注和研究。例如, 超薄可

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51622205, 61675027); 科技部国家重点研发计划重点专项(2016YFA0202703); 北京市自然科学基金项目(4181004, 4184110, 2184131); 北京市科技计划项目(Z171100002017019, Z181100004418004)

作者简介: 潘晓君, 硕士研究生, 研究方向为柔性触觉传感器阵列及其在可穿戴电子中的应用, 电子信箱: panxiaojun@binn.cas.cn; 鲍容容(通信作者), 副研究员, 研究方向为一维光电半导体纳米材料生长、定向、器件制备以及柔性阵列传感器制备与应用, 电子信箱: baorongrong@binn.cas.cn; 潘曹峰(共同通信作者), 研究员, 研究方向为低维压电半导体力光电耦合效应及相关微纳光电功能器件, 电子信箱: cfpan@binn.cas.cn

引用格式: 潘晓君, 鲍容容, 潘曹峰. 穿戴电子可拉伸材料的制备与应用[J]. 科技导报, 2022, 40(17): 76-93; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.17.007

拉伸材料能够降低佩戴者的异物感^[3];织物材料不仅能够保持较好的拉伸性,它的透气特性更是其他材料无法比拟的^[4];生物可降解材料使其不易和人体产生排斥反应且可在体内降解,从而减少对人体的伤害^[5]。

迄今为止,人们越来越重视柔性材料的研究。但是可穿戴设备和电子皮肤中柔性材料存在着较大局限性,所以设备除了柔性之外,可拉伸性更加能够促进可穿戴设备的进步与发展。

1 可拉伸材料的分类与机械性能

实现材料的可拉伸性通常有2种途径^[6]:一是采用分子设计的方式获得本征可拉伸材料;二是通过合理的结构设计使弹性较差的材料获得可拉伸性能。可拉伸材料的机械性能一般采用杨氏模量和弹性/应变极限表征。

1.1 可拉伸材料的分类

1.1.1 本征可拉伸材料

本征可拉伸材料通常是本身存在一定拉伸性

能的高分子材料及其改性材料,例如聚二甲基硅氧烷(PDMS)^[7]、聚酰亚胺(PI)^[8]、聚乙烯(PE)^[9]和聚氨酯(PU)^[10]等。它们本身拉伸性能好,具有制备操作简单等优势,在可拉伸材料体系中具有重要地位。

鲍哲南团队通过光刻制作图案化的硅(Si)模具,然后进行湿法或干法蚀刻以形成凹陷结构。进一步将PDMS浇铸在Si模具上,并经过脱气和真空退火后剥离,最终得到均匀微结构化的PDMS膜^[11]。陈涛研究组通过将PDMS旋涂在丝绸基纺织品的模具上,固化后得到带有丝绸微结构的PDMS薄膜^[12],再将界面自组装石墨烯膜转移到微结构的PDMS膜的表面,并通过退火使石墨烯膜与PDMS结合得更加牢固,最终得到表面带有不同层数石墨烯的导电PDMS薄膜^[13]。姜伟课题组将用二甲苯溶液稀释的PDMS浇铸在涂有碳纳米管(CNTs)的聚四氟乙烯基底上,二甲苯挥发和PDMS固化后,最后与聚四氟乙烯基底分离(图1^[14]),得到可拉伸257%的PDMS膜^[14]。

此外,通过化学合成的方法在分子层面进行聚合物的改性也是合成可拉伸材料的一种常用方

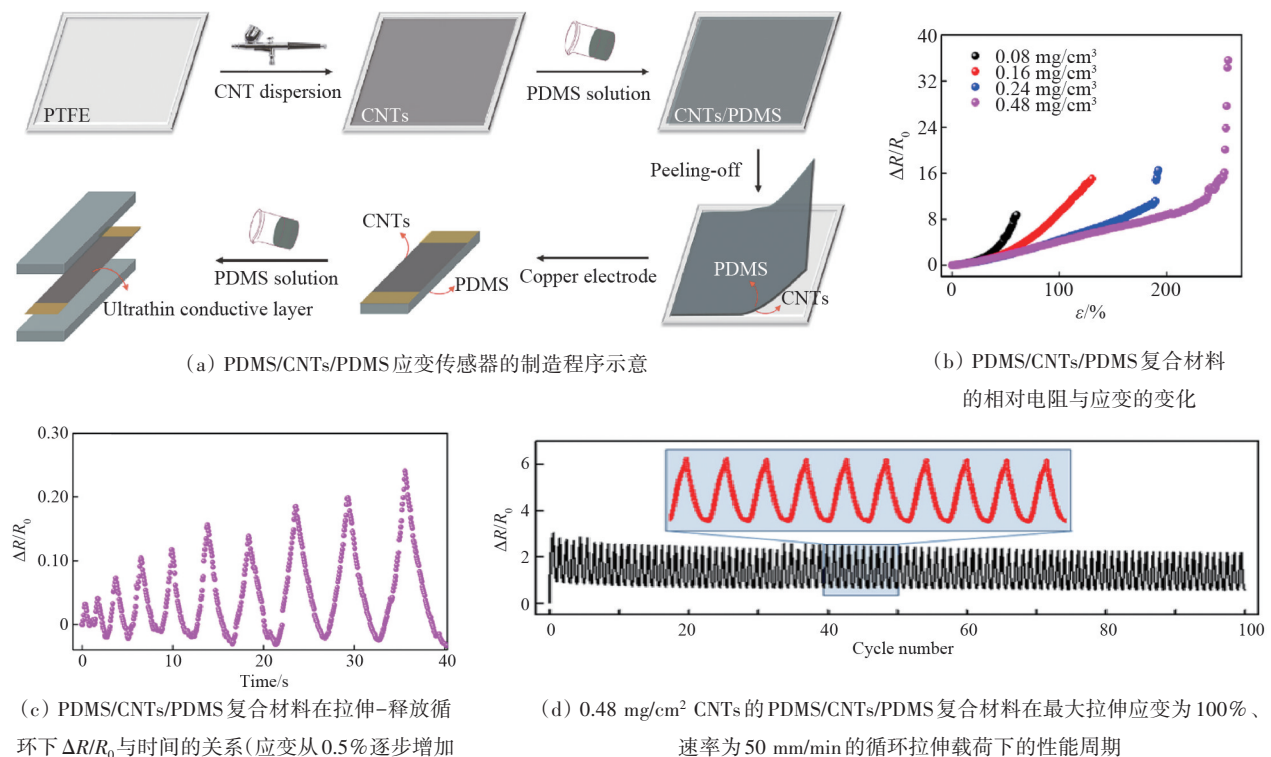


图1 基于三明治式 PDMS/CNTs/PDMS 复合材料的拉伸和透明应变传感器的本征可拉伸材料设计策略

法。其中较为突出的研究是鲍哲南研究团队从分子角度(例如分子量、区域规则性,主链和侧链修饰等)研究结构和性质的关系,通过分子的设计计算,为材料在电荷传输不间断的情况下所允许的最大机械变形提供理论指导^[15]。Jelinek 研究组通过将聚丙烯酸、二乙炔单体以及氯化铬水溶液和乙醇混合,倒入模具后固化,通过紫外灯照射促进

交联,制备了具有 500% 高拉伸性以及高灵敏度的水凝胶传感器(图 2)^[16]。李立东研究组在明胶中掺杂银纳米线的含量,搅拌 0.5 h 后加入鞣酸(TA),得到灰色的复合水凝胶。通过复合水凝胶所制备的应变传感器具有 1600% 的高拉伸率,并具有在 0.65 s 内快速自我修复的能力,以及 95% 的自我修复效率^[17]。

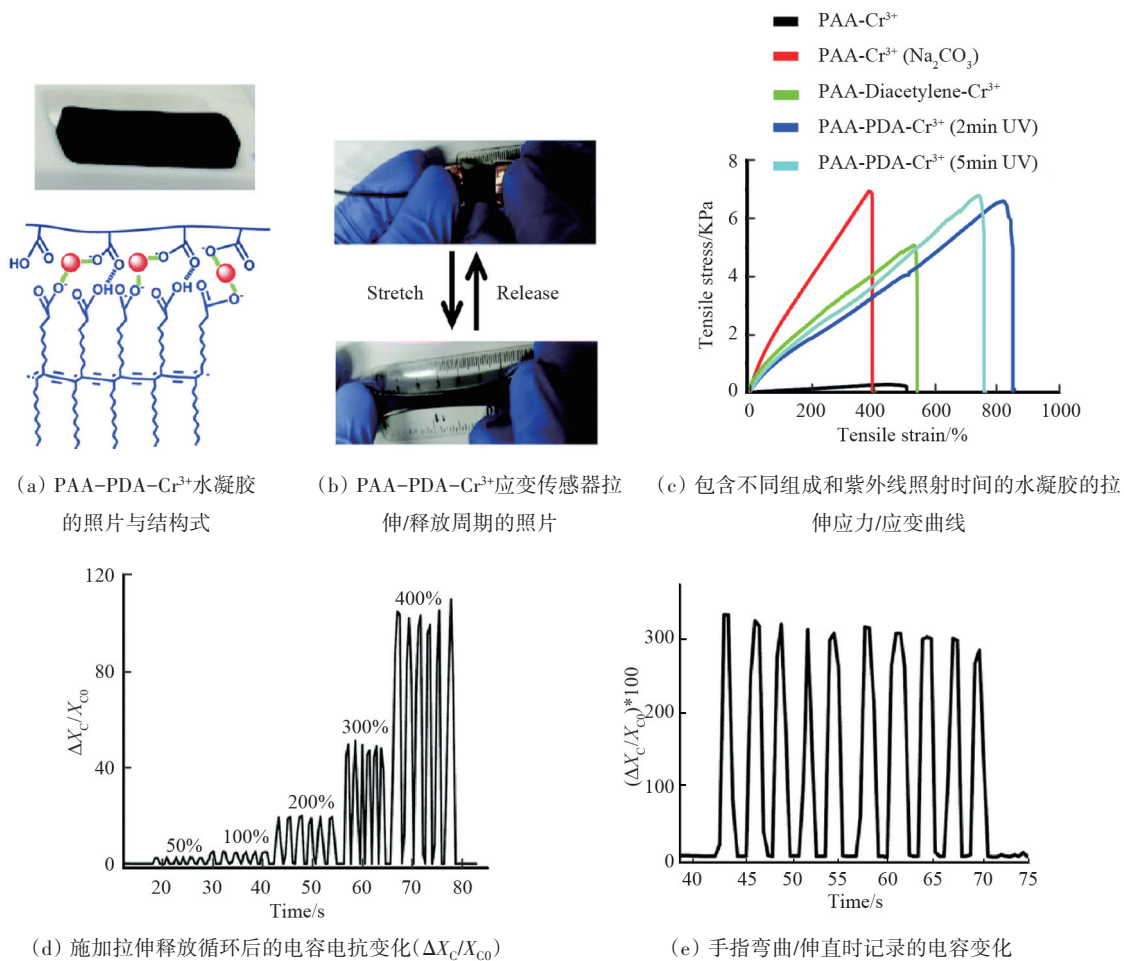


图2 本征可拉伸材料设计策略(由聚二乙炔(PDA)制备的新型灵敏弹性应变传感器)

近年来,液态金属的共晶镓铟(EGaIn)合金以优异电子导电性(3.4×10^4 S/cm)、低熔点(15.5°C)和液态变形能力的优点成为研究的热点。孔德圣研究团队基于液态金属制备了柔软且可拉伸的电子贴片,具有低界面阻抗、高达 400% 拉伸应变的超高拉伸性、出色的重复变形耐久性以及生理条件下的长期稳定性,并且可以实现连续心外膜电生理信

号的记录/映射^[18]。Steve Park 团队提出了在水性溶剂中通过印刷含有液态金属微粒的墨水生成半固态液态金属的方法,此方法实现图案化($50 \mu\text{m}$)和超可拉伸(约 500% 应变)电路^[19]。

1.1.2 结构可拉伸材料

传统金属导电材料研究时间久,理论体系较为完整,针对传统材料的可拉伸化是近年来的研究热

点,可以通过设计一些特殊的结构使其具备拉伸性能,例如波浪结构、弹簧结构、岛桥结构和网状结构等都是常用的可拉伸结构。Rogers 研究组用分子束外延的方法得到了单晶硅-砷化镓(Si-GaAs)晶片,再将 Si-GaAs 纳米带转移到预拉伸的 PDMS 基底上,通过加热拉伸的 PDMS 再冷却松弛,PDMS 产生褶皱而获得波浪的形状,使得脆性较大

的 GaAs 获得了 50% 的拉伸性能^[20]。彭慧胜研究团队设计了基于波浪结构的可拉伸锂离子电池,使电池在保持原有性能的基础上拥有了 400% 的拉伸性能,为在可穿戴电子及智能机器人等领域的应用提供了可能^[21]。潘曹峰研究组充分利用了可伸展的蛇形电极(图 3^[22]),制造了可扩展至 70% 的电容式多功能传感器阵列^[22]。

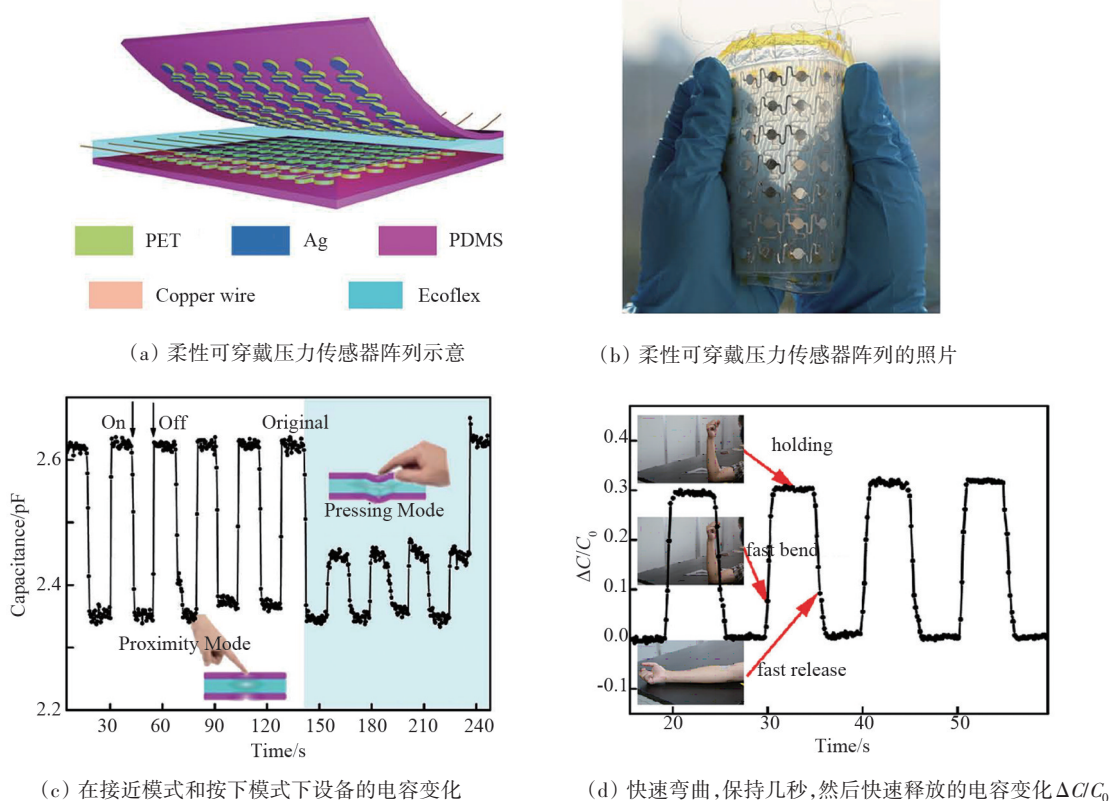


图3 通过形成具有夹层结构的可拉伸蛇形 Ag 作为柔性可穿戴传感器阵列的顶部和底部电极的结构可拉伸材料设计策略

Mamidanna 等研究发现螺旋状结构的拉伸性能比蛇形结构更好,通过电子束蒸发、真空旋涂等方法得到螺旋状的银导电层,此螺旋结构拥有 180% 的拉伸性能^[23]。同样地,潘曹峰研究团队通过多次光刻和磁控溅射方法制备了大面积矩阵网络(图 4^[24]),其特殊的岛桥结构可使矩阵网络在拉伸时保持稳定,并且能够得到 800% 的拉伸,这种基于皮肤的高度可拉伸和整合矩阵网络(SCMN)成功扩展了电子皮肤的传感功能,包括但不限于温度、平面内应变、湿度、光、磁场、压力和邻近度。

中国科学院力学研究所的苏业旺研究团队设计了一种离轴蛇形夹层结构(OASSS)的可拉伸应变传感器,基于拉伸-弯曲-拉伸变换(SBST)机制实现了大的传感范围,当传感器承受较大的外加应变(50%)时,OASSS 结构可以保证高重复性(重复性误差=1.58%)和线性(拟合度>0.999)^[25]。

1.2 常见的机械性能表征参数

杨氏模量衡量的是一个各向同性弹性体的刚度,可以定义为在胡克定律适用的范围内,单轴应力(σ)和单轴形变(ε)之间的比值(单位为 Pa)。在

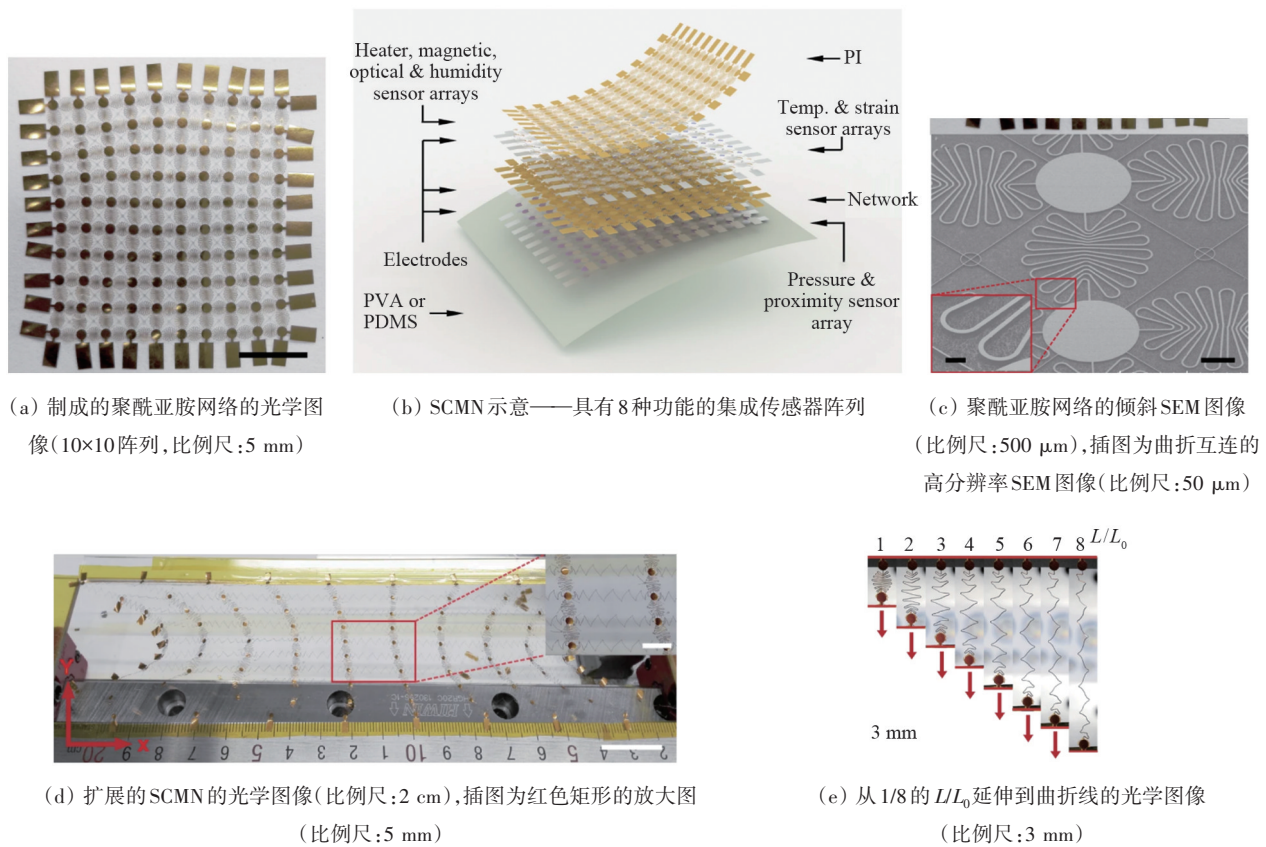


图4 基于可拉伸和整合矩阵网络的结构可拉伸材料设计策略

可穿戴电子和智能机器人领域中人们为发现与皮肤(杨氏模量为2~600 kPa)相媲美的材料,通常采用材料的杨氏模量与皮肤相近甚至低于皮肤的杨氏模量。调整材料杨氏模量的常用方法有4种:将材料设计为多孔的结构^[26];将材料整合到杨氏模量较小的弹性体内^[27-28];在聚合物中加入增塑剂^[29-30];将材料与离子液体或液态金属结合^[31-32]。

机械顺应性是指在外力作用下弹性材料发生形变的难易程度。人们在日常生活和运动中会产生约30%的应变值,所以材料良好的机械顺应性能够保证材料在运动变化过程中不会出现损坏。改善机械顺应性常用的方法可分为缩小材料尺寸或降低材料厚度^[33]、将材料进行可伸缩结构设计^[34]以及将材料与机械顺应性好的材料结合^[35]。

2 新型可拉伸材料

目前对于可拉伸材料的研究已经不仅局限于实现可拉伸性能,更多地在于满足可穿戴电子和

智能机器人等领域应用的特殊需求,如穿着舒适性、生物相容与环境友好性等。因此,许多新型可拉伸材料近年来被广泛地研究。

2.1 超薄材料

超薄材料因其重量轻、贴合度好等特点,可以降低传感器在佩戴过程中的异物感,提升舒适度。同时,因为采用超薄材料使得产品的最终体积减小,提高了与使用对象的贴合性,降低了和使用对象分离的可能。Someya研究组通过对衬底施加预应变,再在衬底上沉积了厚度为50 nm的金属金,将刚性的金属金制成了拥有140%高拉伸性的应变传感器,且灵敏度系数($GF=\Delta C/C_0$)为 $1^{[36]}$ 。Kim研究组在1.4 μm厚的PET薄膜上进行图案化的设计,再将银纳米线分散液旋涂在PET薄膜上,得到厚度<1.5 μm、单轴应变为100%的电容式传感器^[37]。潘曹峰研究团队在玻璃基板上旋涂牺牲层,再将PDMS涂覆在牺牲层上,将刻蚀掉牺牲层的PDMS转移并且沉积37 nm的银,预弯曲后将其制备成超薄的裂纹应变传感器(UCSS)(图5^[33]),此传

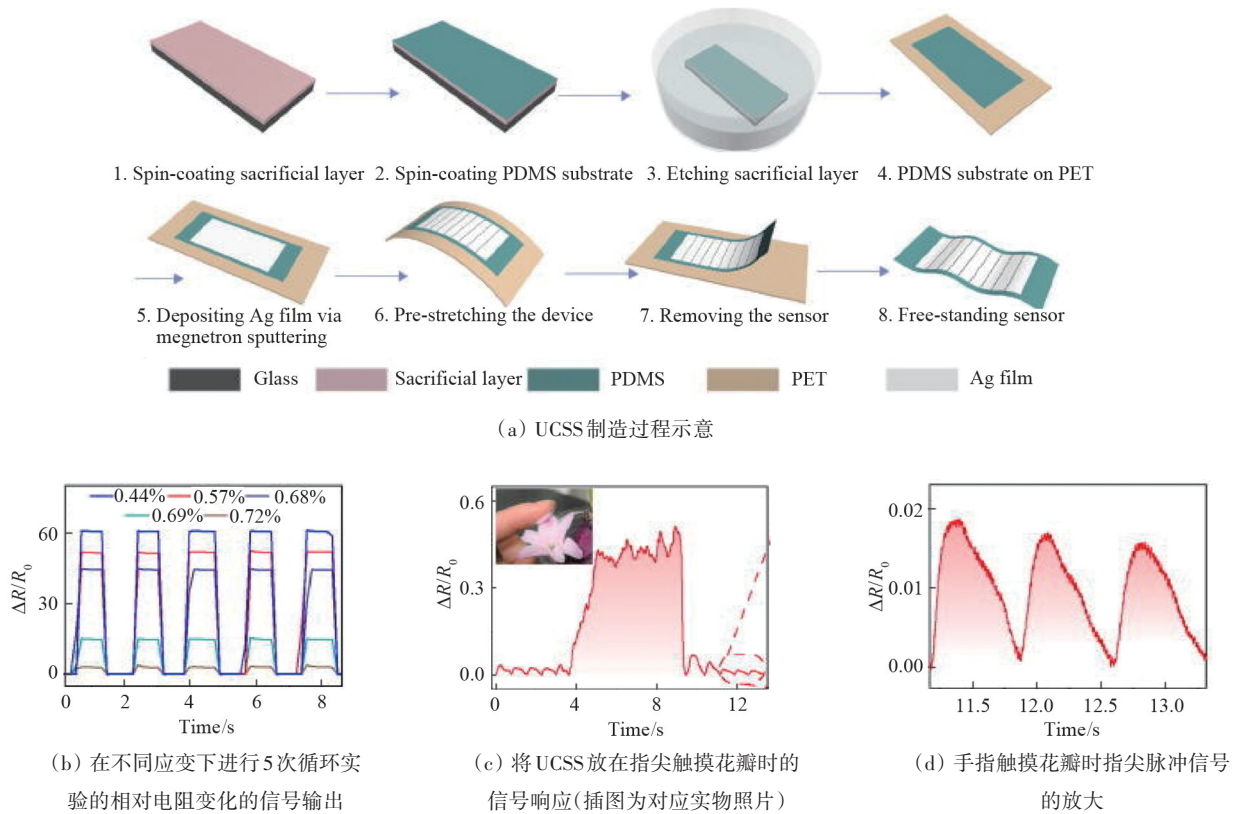


图5 将超薄、高灵敏度、基于裂纹的应变传感器和信号采集电路与实时显示设备相结合, 实现精确运动控制的视觉辅助触觉增强系统

传感器拥有超高的灵敏度,在应变为0.88%时,其灵敏度系数($GF=\Delta R/R_0$)就可达到4.4013万,并且在封装后可进行1.3万次的循环稳定工作^[33]。Zhang等将石墨烯与碳纳米管分散在复合材料的溶液中,通过静电纺丝的方法将石墨烯和碳纳米管分散在纤维内部,得到厚度仅为2 μm 、响应时间为20 ms的集成传感器矩阵,且材料弯曲对于传感器的影响不大,可用于各种曲面的压力探测^[38]。高光辉研究团队通过流延法和甘油— H_2O 二次水合制备了具有超薄结构的PVA导电水凝胶薄膜,不仅具有高达523.3%的断裂伸长率,而且其制备的传感器可以进行物体的表面纹理和粗糙度的识别^[39]。

2.2 织物材料

织物材料因为和人们平常所穿的服装材料结构相似,有良好的透气性和舒适度,并且可以与服装相结合,使服装除了满足穿着、保暖等基本需求外,还具备健康运动监测、自清洁、供电与储能等功能。将传感器与织物材料相结合,可检测应变、湿

度、温度、压力等信息,并广泛应用于医疗检测、运动监测等领域。织物材料大致分为纤维和纱线2大类。两者在材料形态、制备方法以及应用方式等存在一定差异。

纤维是织物材料中的基本单位,可以根据不同实际应用的需求进行改性,满足在实际应用中所需要的耐用性、透气性以及导电性。高杰峰研究组通过静电纺丝的方式获得了热塑性聚氨酯弹性体(TPU)纳米纤维膜,将TPU纳米纤维膜放到碳纳米管分散液中超声,将碳纳米管固定在TPU纳米纤维膜上,再浸入到PDMS中,获得了超疏水的导电纳米纤维。处理后的TPU纳米纤维拉伸性能(杨氏模量(2.62 ± 0.13) MPa,抗拉强度(9.41 ± 0.94) MPa,断裂伸长率 $544.9\% \pm 16.1\%$)比未作处理的TPU纳米纤维(杨氏模量(1.58 ± 0.14) MPa,抗拉强度性能(5.72 ± 0.54) MPa,断裂伸长率 $514.4\% \pm 13.5\%$)更好^[40]。潘曹峰研究团队通过静电纺丝PVA(聚乙烯醇)纳米纤维,然后涂覆金属银形成银

纳米纤维(图6^[41]),基于此制备了薄层电阻为1.68~11.1 $\Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 、具有100%应变拉伸的摩擦触觉传感器(TETS)^[41]。Kim等通过开发和优化原位形成工艺,展示了一种高性能的金属纳米颗粒纤维应变

传感器,传感器表现出0.9 Ω/cm 的初始电阻、宽应变传感范围(220%)和高灵敏度($\sim 5.8 \times 10^4$)。此外,还具有重复拉伸释放循环(5000次循环)的高稳定性^[42]。

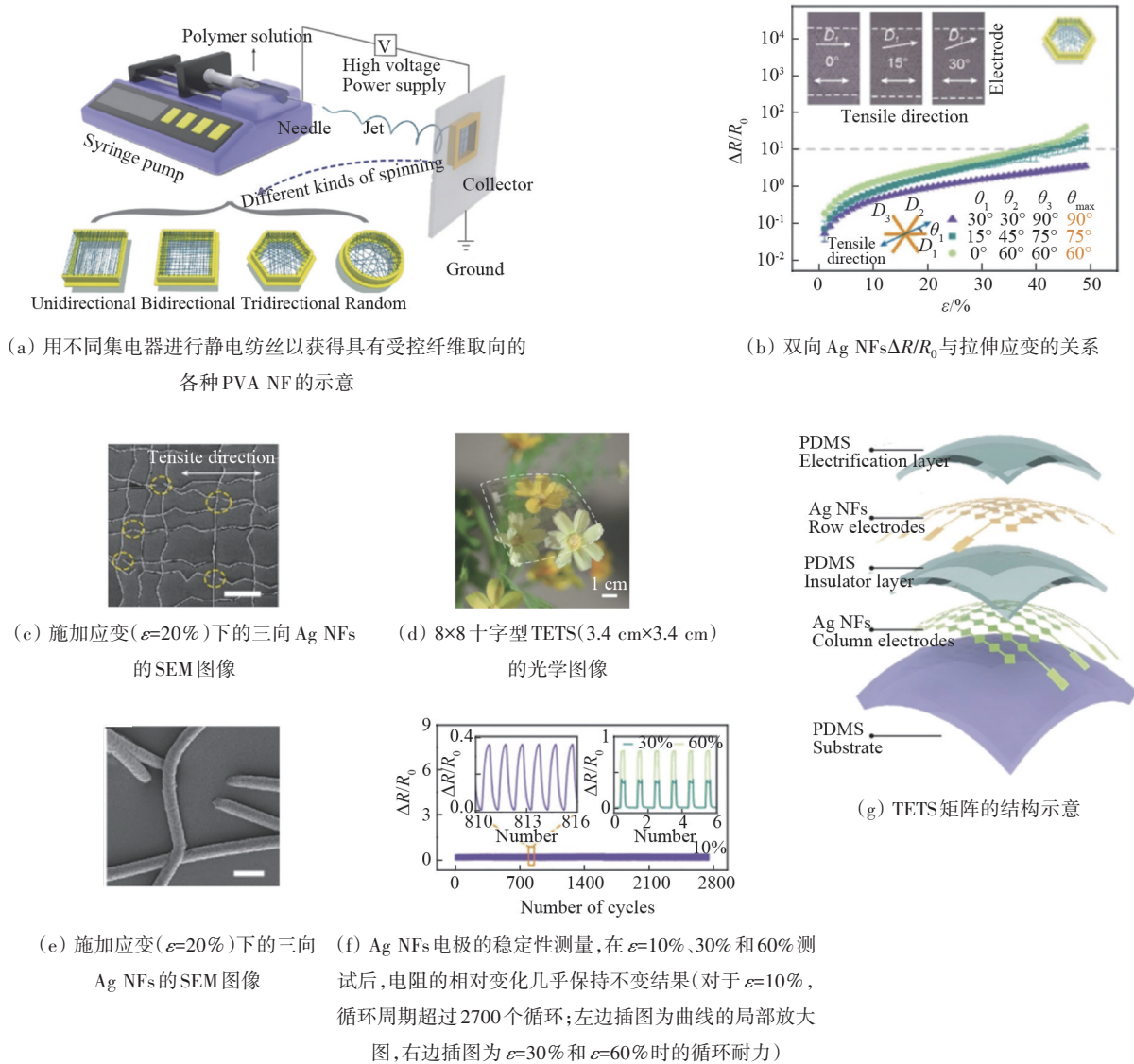


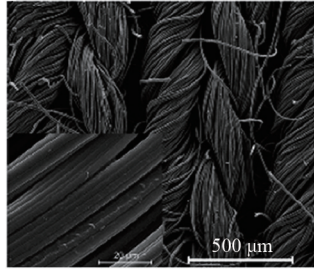
图6 一种自供电、高延展性、透明摩擦电触觉传感器(带有图案的银纳米纤维电极,用于探测和空间绘制轨迹轮廓)

纱线是一种长径比很大的材料,由具有扭转结构的纤维和/或细丝组成。通常,纱线是通过将不同类型的纤维组合成股线制成的,这些股线是形成织物和纺织品的基本要素。对于纱线的使用可分为2类:第一类是将不可拉伸的导电材料与可拉伸的纱线结合在一起,得到具有良好导电性和拉伸性的纱线;第二类是将导电材料通过某些方

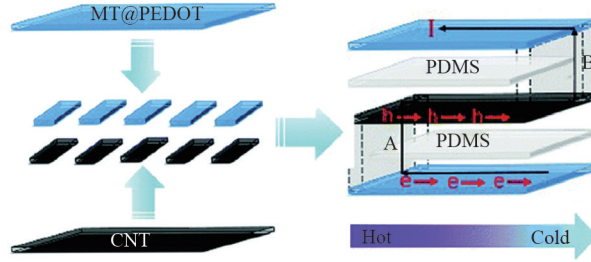
式直接纺成纱线,在保持原有导电性的基础上获得较好的拉伸性。卢灿辉研究小组在聚氨酯(PU)纱线上涂覆一层超薄、具有弹性且坚固的导电聚合物复合材料(CPC)层,在保持聚氨酯纱线固有拉伸性的同时,使纱线拥有导电的能力。所制备的应变传感器灵敏度系数为39,并在1万次循环中具有良好的重现性^[43]。Jiang通过气相聚合的方法将

聚乙烯二氧噻吩(PEDOT)涂覆在模型纺织品(MT)上,使纺织品获得 $155 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ 的电导率,所制备的

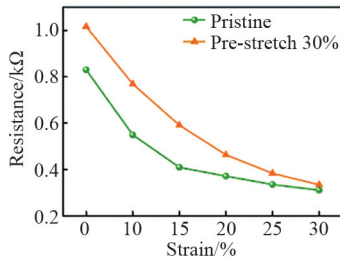
应变传感器获得 30% 的拉伸性和水洗稳定性的特性(图 7)^[44]。



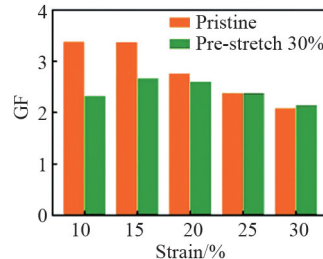
(a) MT@PEDOT 的 SEM 图像(沉积循环数为 3)



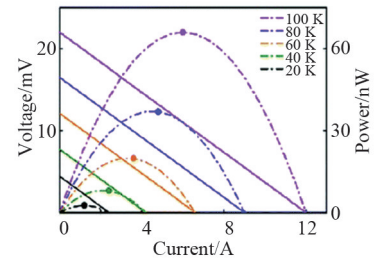
(b) 组装基于 MT@PEDOT 的 TE 生成器设备的示意



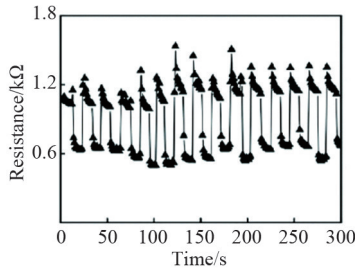
(c) 不同应变下 MT@PEDOT 应变传感器的电阻响应



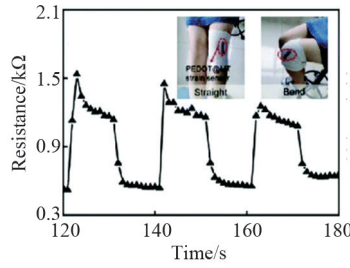
(d) MT@PEDOT 应变传感器在不同应变下的灵敏度系数(GF)



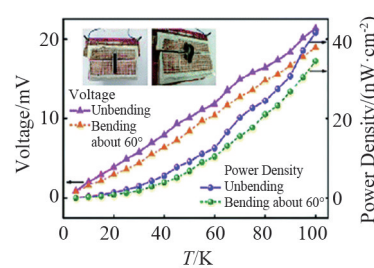
(e) 在不同的 ΔT 时, TE 发电机的输出电压和功率对输出电流的依赖性



(f) MT@PEDOT 应变传感器在不同膝盖运动状态(直线/弯曲)下电阻的时间依赖性



(g) 60 s 的放大测试数据(弯曲到大约 90° 的直线)



(h) 由具有不同的 ΔT 值的发电机装置产生的输出电压和功率密度

图 7 通过气相聚合(VPP)制备了涂覆聚(3,4-乙炔二氧噻吩)高导电的商用纺织品作为可穿戴热电(TE)应变传感器

2.3 生物可降解材料

有些可穿戴传感器的应用需要直接接触人体内部组织或者进入人体内部,所以材料不仅要柔性可拉伸,还要满足能够在体内降解的要求。生物可降解材料无毒无害,可在使用过程中在体内自行降解,避免了将传感器取出手术的二次伤害。鲍哲南课题组将 2 种可生物降解的弹性体聚癸二酸甘油酯(PGS)和聚柠檬酸八亚甲基酯(酸酐)柠檬酸酯(POMaC)用于弹性体和微结构的制备,采用可生物降解的 Mg 作为电极,组合成应变和压力传感器(图 8^[45]),能够检测 15% 的应变和低至 12 Pa 的压

力,并且可在体内稳定工作 2~3 周,5 周后电极开始降解,可用于手术后肌腱的检测^[45]。孙立涛研究组采用市场上出售的鼻膜作为基底,使用电化学剥离的石墨烯作为灵敏层材料,制备了与皮肤贴合良好的应变传感器。该传感器由于鼻膜材料与皮肤良好的贴合度,不需要其他物品(如胶带等)进行辅助,同时此传感器是无毒无害且生物可降解的。该传感器拥有灵敏度系数为 502 的高灵敏度、54 ms 的快速响应时间以及 35% 的水平可拉伸性等优秀的传感性能^[46]。郭文熹团队在载无水环境下合成了可弯曲且可拉伸的银纳米纤维(AgNFs)/丝素蛋

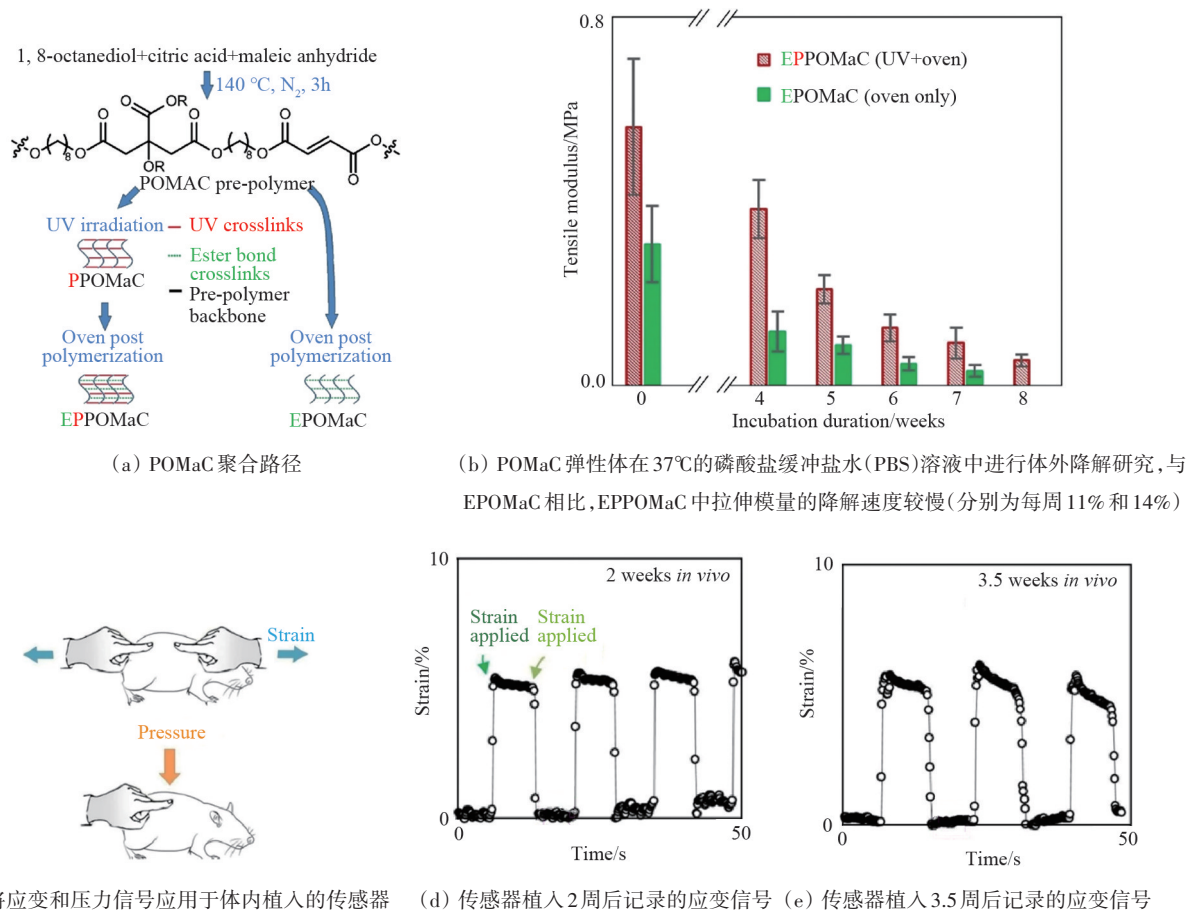


图8 完全由可生物降解材料制成的可植入压力和应变传感器

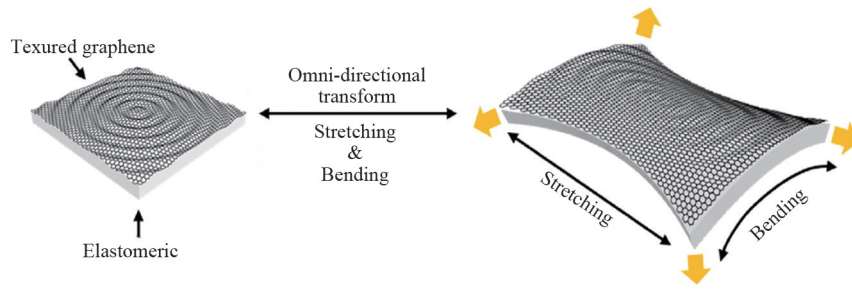
白(SF)基传感器,该电极具有出色的性能,即低薄层电阻($10.5 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$),高透光率($>90\%$),即使在 >2200 次弯曲循环后仍具有出色的稳定性以及良好的延展性($>60\%$ 拉伸)。此传感器在佩戴6 d内没有发现溶胀和过敏反应,且在5%的木瓜溶液(生物酶)中24 h内就会溶解破裂^[47]。潘曹峰课题组制备了基于天然叶脉的全纳米纤维可生物降解透气的传感器,该传感器完全由可生物降解的天然叶脉——聚(乳酸-共乙醇酸)(PLGA)和聚乙烯醇(PVA)纳米纤维(NF)薄膜组成,使设备具有生物降解性。同时,叶脉的NF膜和多孔结构使传感器具备了良好的透气性^[48]。

3 可拉伸材料的应用

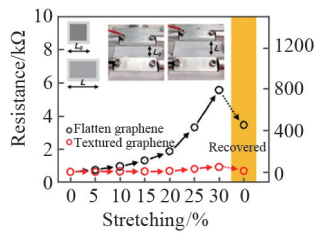
3.1 可拉伸电极

在可穿戴智能设备等领域,可拉伸电极的发展

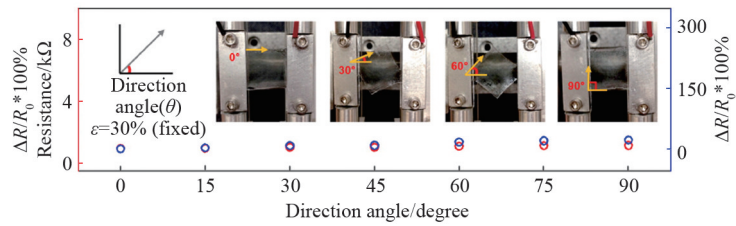
极大程度地解决了可穿戴设备存在的刚性部件问题,从而进一步促进了可穿戴设备的发展,因此一直是该领域的研究重点和热点。常用的制备可拉伸电极的方法为在可拉伸弹性体内嵌入导电材料或对导电性较好的材料进行弹性结构设计。吴伟研究组通过将分形结构的银颗粒嵌入PDMS衬底中制备柔性可拉伸电极。可拉伸电极可以拉伸到100%,弯曲和扭曲到 180° ,并且还具有良好的机械稳定性^[49]。Park研究组在具有同心圆的铜箔上生长石墨烯,再将PDMS旋涂在石墨烯上,菲涅尔透镜图案电极的使用使得多层石墨烯薄片能够实现同心圆形波状结构,从而能够在各个方向承受拉伸应变,可以拉伸30%并拥有较好稳定性(图9)^[50]。胡滨研究组采用液氮辅助的低温转移技术将银纳米线网络转移到PDMS衬底上,恢复至室温后得到薄层电阻为 $13.2 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 、透射率为90.8%、可以承受70%的拉伸应变和5万次重复弯曲循环的透明



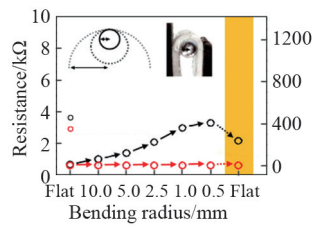
(a) 在施加力下石墨烯/PDMS膜的转变示意



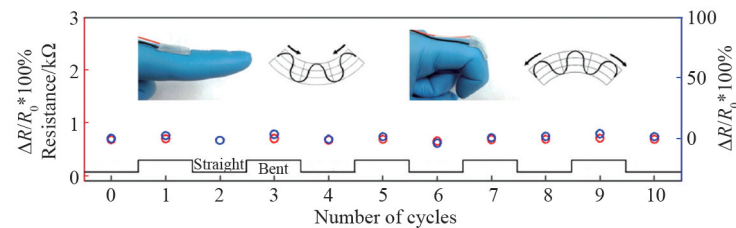
(b) 结构化的石墨烯/PDMS膜的电阻随弯曲半径的变化(插图:石墨烯/PDMS膜的实际测试图像)



(c) 在各种拉伸角度(0°~90°)下,结构化的石墨烯/PDMS膜的电阻变化(在30%的固定拉伸应变下进行拉伸测试)



(d) 石墨烯/PDMS膜的电阻随拉伸应变的变化(插图:石墨烯/PDMS膜的实际测试图像)



(e) 纺织石墨烯/PDMS膜的电阻随手指弯曲周期的变化

图9 具有同心圆波浪结构多层石墨烯/PDMS电极

可拉伸电极^[51]。李润伟团队利用聚氨酯(TPU)静电纺丝与液态金属(LM)微纳颗粒,经静电纺丝和静电喷涂进行原位复合,随后进行机械激活,形成液态金属TPU二维仿“水膜—渔网”结构薄膜,制备出具有柔性自适应导电界面的超稳定可拉伸电极(NHSE)。该电极实现了 $52 \text{ m}\Omega \cdot \text{sq}^{-1}$ 的极低初始方阻,应变下通过TPU网孔束缚液态金属的对外扩展和在网孔内的自适应流动,解决了可拉伸电极曾面临的导电率和拉伸率不可兼容、循环变形下电性能不稳定的问题,具备优越的动态循环稳定性,经过33万次100%拉伸应变循环,电阻仅变化5%^[52]。

3.2 可拉伸储能设备

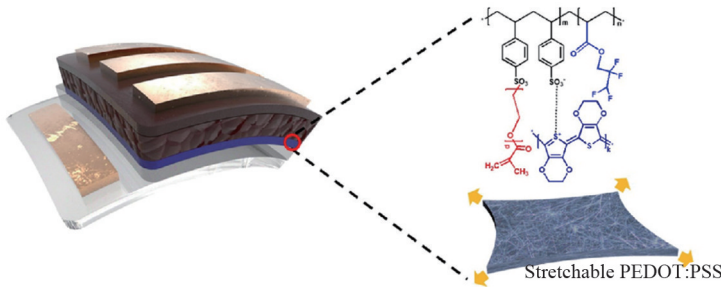
柔性可拉伸的供能设备可使可穿戴设备摆脱笨重且不方便的电源,所以对于可拉伸的储能设备

的研究越来越热门。人们对于可拉伸储能设备的研究一般包括可拉伸太阳能电池、超级电容器、锂离子电池以及摩擦纳米发电机等方面。

可拉伸太阳能电池,特别是薄膜太阳能电池(TFSC)和染料敏化太阳能电池(DSSC),对于设备的便携程度非常重要。然而,复杂的制造工艺、高成本和较低的拉伸性能限制了它们的潜在应用。陈义旺研究团队将具有动态肟-氨基甲酸酯键的自修复聚氨酯(s-PU)作为支架加入钙钛矿薄膜中,增强结晶度的同时钝化了钙钛矿薄膜的晶界,钙钛矿太阳能电池达到了19.15%的最佳功率转换效率^[53]。Park研究团队合成了高度柔性和可拉伸的PEDOT: P(SS-co-TFPMA)-g-PEGMA (PEDOT: PTP)膜作为太阳能电池设备的空穴提取层,拉伸

300%后, PEDOT:PTP 薄膜的电导率保持其原始电导率的 80% 以上, 并且在 1500 个弯曲循环后仍保持 92% 的初始功率转换效率(图 10)^[54]。潘曹峰研究组通过在柔性塑料基板上生长一系列 ZnO 纳米线, 以作为太阳能电池的电子传输层。通过在太阳能电池中引入压电效应, 柔性钙钛矿太阳能电池在 1.88% 的静态机械应变下, 绝对功率转换效率从

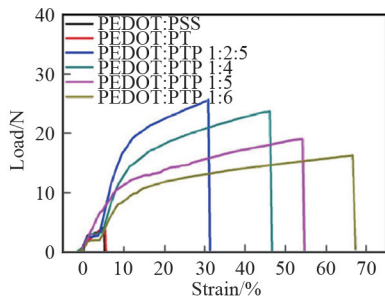
9.3% 提高到 12.8%^[55]。宋伟杰研究组利用剪纸的概念设计制备了一种钙钛矿太阳能电池(kirigami PSCs), 拉伸能力应变可达 200%, 扭曲能力角度可达 450°, 弯曲能力半径可达 0.5 mm。经过 1000 次周期性拉伸, 弯曲和扭曲后 kirigami PSCs 的光伏参数基本保持不变^[56]。



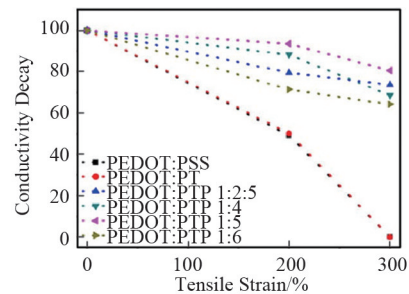
(a) 可拉伸 PEDOT:P(SS-co-TFPMA)-g-PEGMA HEL 的示意



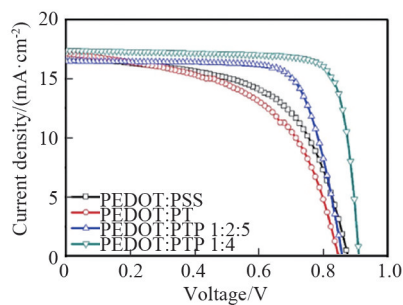
(b) 在热塑性聚氨酯(TPU)上应变为 300% 的 PEDOT:PTP 膜照片



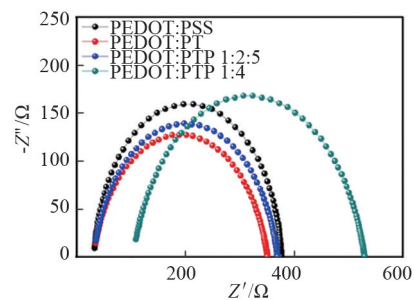
(c) PEDOT:PSS、PEDOT:PT 和 PEDOT:PTP (具有不同的 PEGMA 比) 的载荷/应变曲线



(d) 在 200% 和 300% 应变下 PEDOT:PSS、PEDOT:PT 和 PEDOT:PTP (具有不同的 PEGMA 比) 的应变的电导率衰减



(e) 包含不同浓度的 PEDOT:PSS、PEDOT:P(SS-co-TFPMA) 和 PEDOT:P(SS-co-TFPMA)-g-PEGMA 的柔性 PSC 的 $J-V$ 特性

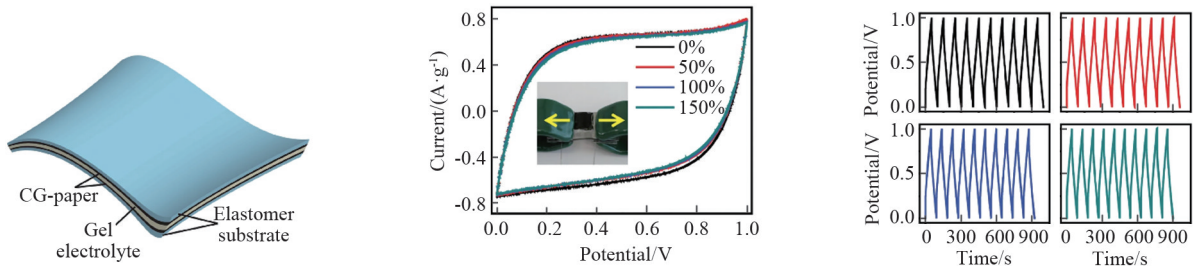


(f) 在一次阳光照射下包含 PEDOT:PSS、PEDOT:PT、PEDOT:PTP 1:2.5 和 PEDOT:PTP 1:4 的 PSC 的奈奎斯特图

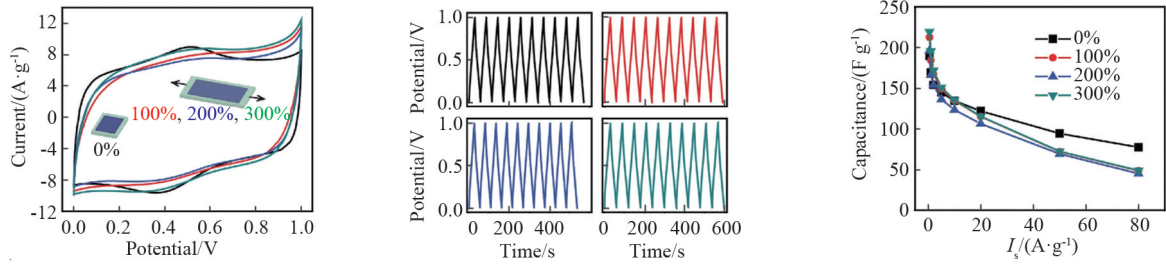
图 10 高延展性和机械稳定性的 PEDOT:PSS 基薄膜及其在柔性钙钛矿太阳能电池上的应用

超级电容器具有许多优点,例如快速充电/放电能力,更高的安全性和较长的循环寿命等,为可穿戴设备提供了供能的途径。Zang等^[57]制备了拉伸皱缩的石墨烯纸并将其用作超级电容器电极(图11^[56])。最终的超级电容器具有高拉伸性(例如线性应变300%,面应变800%),高比电容 $96\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ 和良好的稳定性(超过1000个拉伸/松弛循环)。梅辉研

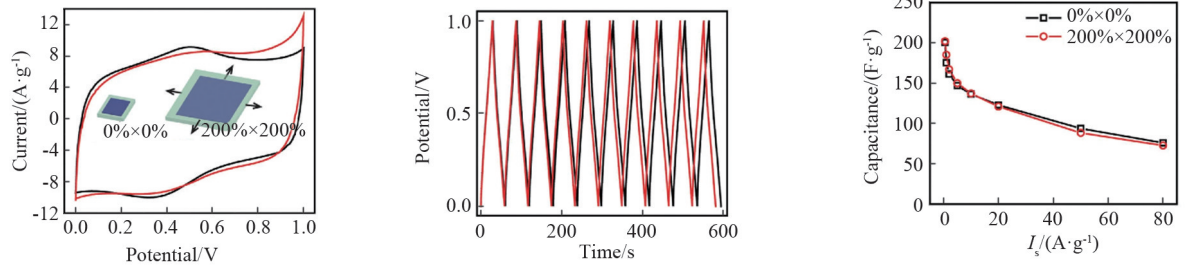
究组通过3D打印与电沉积等方法,获得了独特的3D纳米片上纳米花结构的 $\text{CoNi}_2\text{S}_4/\text{NiCo-LDHs}$ 纳米复合材料,组装后的可拉伸对称超级电容器具有高可拉伸性(高达55%)和柔韧性(高达 180°),具有 $28.71\text{ F}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的电容、 $0.582\text{ mW}\cdot\text{h}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的能量密度,并具有良好的拉伸和弯曲循环稳定性(1000次周期性拉伸/释放循环后仍保持其初始电容的75.2%)^[58]。



(a) 使用具有聚合物电解质凝胶作为电解质和隔膜 的皱纹石墨烯纸电极的超级电容器示意 (b) 以 $10\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫描速率收集的超级电容器的 CV 曲线 (c) 超级电容器分别在单轴应变为 0%、50%、100% 和 150% 的情况下, 电流密度为 1 时的恒电流充电/放电曲线



(d) 超级电容器在 $50\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的循环伏安曲线 (e) 超级电容器在 $5\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 下的恒电流充电/放电曲线 (f) 超级电容器在不同的充电/放电电流密度时的电容性能



(g) 超级电容器在 $50\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 下的循环伏安曲线 (h) 超级电容器在 $5\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 下的恒电流充电/放电曲线 (i) 超级电容器在不同的充电/放电电流密度时的电容性能

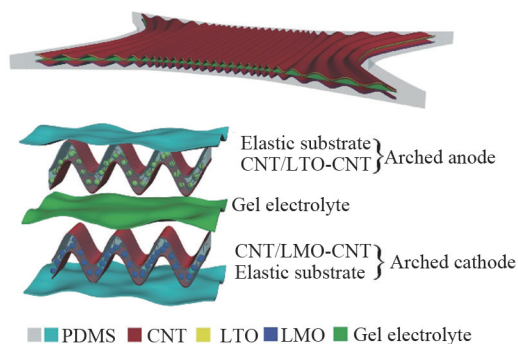
(d)~(f) 为超级电容器承受 0%、100%、200% 和 300% 单轴应变时的电化学特性;

(g)~(i) 为超级电容器承受 0%×0% 和 200%×200% 双轴应变时的电化学特性

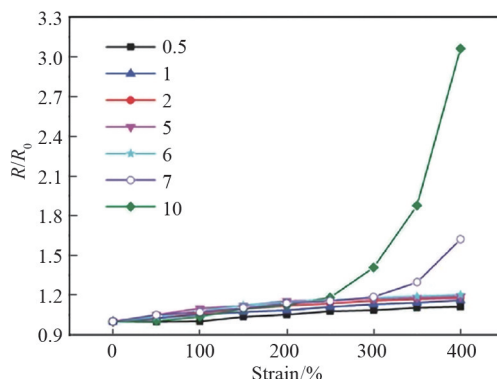
图 11 基于新型的皱褶石墨烯纸制备极具延展性和高性能超级电容器电极

对于传统的锂离子电池,因其电容量大、重量轻等优点,所以锂离子电池的可拉伸化也成为一个研究热点。Shi等设计了类似手风琴结构的可拉伸锂离子电池,其中刚性储能单元通过起皱和可拉伸的组件连接,实现锂离子电池29%的可拉伸性以及高容量保持率^[59]。彭慧胜研究团队设计了基于波浪结构的可拉伸锂离子电池,使锂离子电池在保

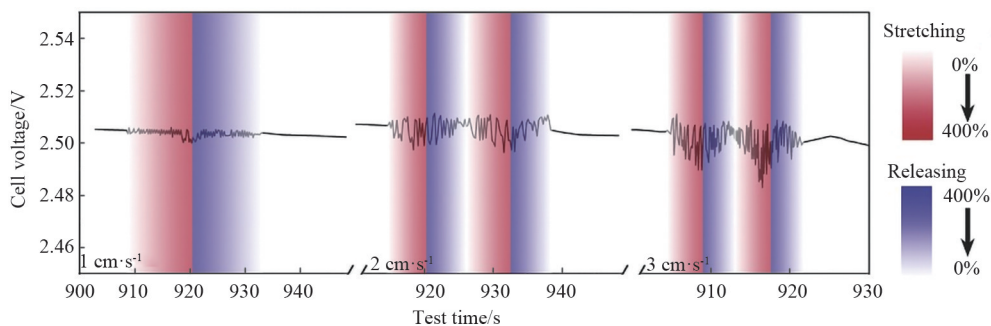
持原有性能的基础上获得了400%的拉伸性能,为锂离子电池在可穿戴电子领域的应用提供了可能(图12)^[21]。Kim等开发出一种基于蛇鳞结构的可拉伸电池,这种可伸缩的锂电池在弯曲变形和拉伸比例为90%的情况下,仍能在超过3.6万次的循环中保持其性能^[60]。



(a) 超级拉伸电池及其多层结构示意图



(b) 对于CNT/LTO-CNT复合材料的各种LTO的质量密度对拉伸性的影响



(c) 在拉伸/释放下以增加的拉伸/释放速度在1 C 放电时的电压曲线

图12 由一个拱形结构和一个可伸缩的正极和阴极组成的可伸缩锂离子电池(LIBs)

摩擦纳米发电机可以将机械能(例如身体或肌肉的拉伸运动)、振动能(例如声波或超声波)和液压能(例如体液流动)转换为电能,近年来广受关注。潘曹峰课题组通过使用多层氧化石墨烯(rGO)/银纳米线(AgNWs)/热塑性聚氨酯(TPU)制作了基于超可拉伸摩擦电纳米发电机(STENG)的柔性自供电电子皮肤(图13)^[60],此电子皮肤具有出色的稳定性及200%的拉伸性,且面积为2 cm×2 cm大小的电子皮肤可以提供高的开路电压(202.4 V)和大的瞬时功率密度(6 mW/m²)^[61]。王中林团队将双网络

的离子凝胶作为电极和一个带电层,该带电层与另一层图案化的PDMS结合以实现摩擦带电的效果,制备的摩擦纳米发电机具有高透明度(83%)、良好的可拉伸性(121%),实现了在不同应变下有不同电压信号的输出^[62]。王黎明团队结合凝固浴静电纺丝和自组装的先进制备方法,以高效、连续制造具有高拉伸性(≈350%)和可缝合性的CNT/PEDOT:PSS热电纳米纤维纱线。基于纱线的热电效应和可缝合性,可以与手套和口罩进行集成,以自供电模式进行冷/热源识别和人体呼吸监测^[63]。

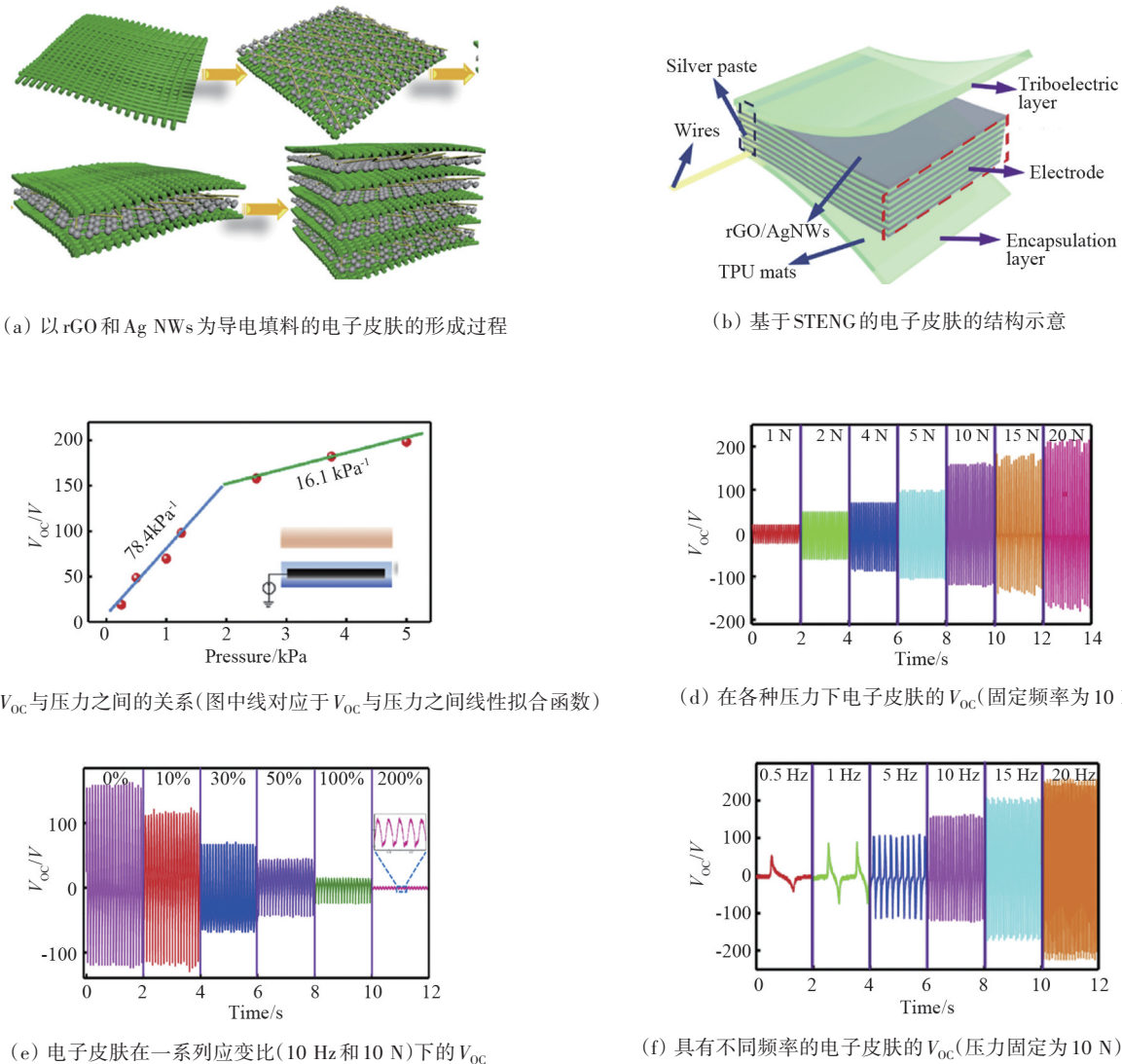


图 13 通过多层还原 rGO/AgNWs/TPU 制备了基于电子皮肤的高延展性摩擦电纳米发电机

3.3 可拉伸晶体管

晶体管对于大规模阵列传感有着重要的意义,是可穿戴电子领域的研究重点之一。鲍哲南团队通过堆叠喷墨打印碳纳米管和聚合物(PEDOT:PSS,聚偏二氟乙烯-六氟乙烯)的方法实现图案化的可拉伸晶体管阵列(图 14^[64]),其迁移率高达 $30 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,开关比为 10^4 ,最大跨导为 $47 \pm 9 \mu\text{S}$,并且能够承受 20% 的应变^[64]。Ren 等基于具有强链内传输能力的聚合物(茚并二噻吩-苯并噻二唑)制备了可拉伸的晶体管,并通过调节分子量的方式使得晶体管的迁移率从 $0.56 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $1.95 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,并且获得了 100% 的拉伸性

能^[65]。鲍哲南团队开发了一种光学光刻技术,用于在可拉伸基板上高通量制造晶体管电路。他们以每平方厘米 42000 个晶体管的密度制造了沟道长度为 $2 \mu\text{m}$ 的晶体管,并且 10×10 的晶体管阵列在受到平行和垂直于电荷传输方向的 100% 应变时,没有任何可观察到的裂缝或分层^[66]。

4 结论

介绍了可拉伸材料制备的常见途径、最新研究进展以及在可拉伸电极、储能设备和晶体管等的应用。通过材料可拉伸和结构可拉伸 2 个方面的改

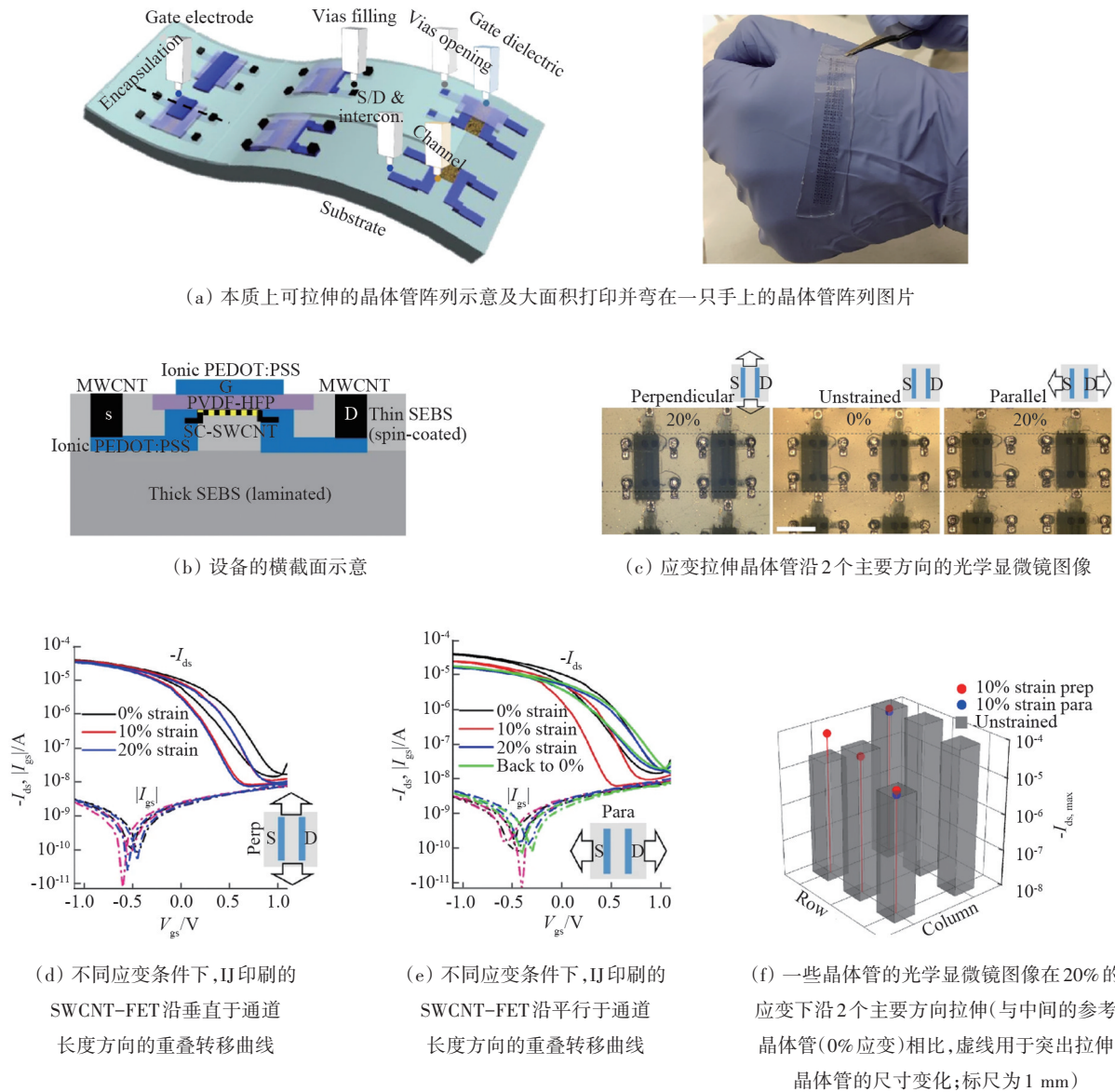


图14 喷墨打印聚合物和碳纳米管图案的可伸缩晶体管阵列

性,使得材料的弹性得以较大提升。同时超薄、透气以及生物可降解等需求进一步促进了可拉伸材料的发展,也促进了可穿戴设备与智能机器人等领域的进步。

当然,目前可拉伸材料的发展也存在一些挑战。第一个挑战是材料导电性和拉伸性的平衡问题。导电纳米材料在弹性体内的分布不均,而且导电材料的加入限制了弹性体的可拉伸性,因此,需要继续从分子结构设计和弹性结构设计2个方面开发和研究导电性能较好的可拉伸材料。第二个挑战是可拉伸电极的不透气性和舒适度较差问题

需要解决。近年来出现的织物衬底及超薄衬底的研究,为这一问题的解决提供了新的技术支持。

参考文献(References)

[1] Buganza T A, Gosain A K, Kuhl E. Stretching skin: The physiological limit and beyond[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012, 47(8): 938-949.

[2] He J, Zhang Y F, Zhou R H, et al. Recent advances of wearable and flexible piezoresistivity pressure sensor devices and its future prospects[J]. Journal of Materiomics, 2020, 6(1): 86-101.

[3] Xu W N, Kwok K, Gracias D. Ultrathin shape change

- smart materials[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2018, 51(2): 436–444.
- [4] Weng W, Chen P N, He S S, et al. Smart electronic textiles[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, 55(21): 6140–6169.
- [5] Chen X, Ahn J H. Biodegradable and bioabsorbable sensors based on two-dimensional materials[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2020, 8(6): 1082–1092.
- [6] Li J, Bao R R, Tao J, et al. Recent progress in flexible pressure sensor arrays: From design to applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(44): 11878–11892.
- [7] Choi Y S, Gwak M J, Lee D W. Polymeric cantilever integrated with PDMS/graphene composite strain sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(10): 105004.
- [8] Qin Y Y, Peng Q Y, Ding Y J, et al. Lightweight, superelastic, and mechanically flexible graphene/polyimide nanocomposite foam for strain sensor application[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(9): 8933–8941.
- [9] Huang Y, Zeng X, Wang W D, et al. High-resolution flexible temperature sensor based graphite-filled polyethylene oxide and polyvinylidene fluoride composites for body temperature monitoring[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 278(1): 1–10.
- [10] Rashid I, Irfan M, Gill Y, et al. Stretchable strain sensors based on polyaniline/thermoplastic polyurethane blends[J]. *Polymer Bulletin*, 2020, 77(3): 1081–1093.
- [11] Mannsfeld S, Tee B, Stoltenberg R, et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(10): 859–864.
- [12] Wang X W, Gu Y, Xiong Z P, et al. Silk-molded flexible, ultrasensitive, and highly stable electronic skin for monitoring human physiological signals[J]. *Advanced Materials*, 2013, 26(9): 1336–1342.
- [13] He J, Xiao P, Lu W, et al. A universal high accuracy wearable pulse monitoring system via high sensitivity and large linearity graphene pressure sensor[J]. *Nano Energy*, 2019, 59: 422–433.
- [14] Chen J W, Zhu Y T, Jiang W. A stretchable and transparent strain sensor based on sandwich-like PDMS/CNTs/PDMS composite containing an ultrathin conductive CNT layer[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 186(20): 107938.
- [15] Ashizawa M, Zheng Y, Tran H, et al. Intrinsically stretchable conjugated polymer semiconductors in field effect transistors[J]. *Progress in Polymer Science*, 2019, 100: 101181.
- [16] Rao V, Shauloff N, Sui X, et al. Polydiacetylene hydrogel self-healing capacitive strain sensor[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(18): 6034–6041.
- [17] Wang J, Tang F, Wang Y, et al. Self-healing and highly stretchable gelatin hydrogel for self-powered strain sensor[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(1): 1558–1566.
- [18] Wang S L, Nie Y Y, Zhu H U, et al. Intrinsically stretchable electronics with ultrahigh deformability to monitor dynamically moving organs[J]. *Science Advances*, 2022, 8(13): eabl5511.
- [19] Lee G H, Lee Y R, Kim H, et al. Rapid meniscus-guided printing of stable semi-solid-state liquid metal microgranular-particle for soft electronics[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2463.
- [20] Sun Y G, Choi W M, Jiang H Q, et al. Controlled buckling of semiconductor nanoribbons for stretchable electronics[J]. *Nature Nanotechnology*, 2006, 1(3): 201–207.
- [21] Weng W, Sun Q, Zhang Y, et al. A gum-like lithium-ion battery based on a novel arched structure[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(8): 1363–1369.
- [22] Zhao X L, Hua Q L, Yu R M, et al. Flexible, stretchable and wearable multifunctional sensor array as artificial electronic skin for static and dynamic strain mapping[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2015, 1(7): 1500142.
- [23] Mamidanna A, Song Z, Lü C, et al. Printing stretchable spiral interconnects using reactive ink chemistries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(20): 12594–12598.
- [24] Hua Q L, Sun J L, Liu H T, et al. Skin-inspired highly stretchable and conformable matrix networks for multifunctional sensing[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 244.
- [25] Li S, Liu G, Li R, et al. Contact-Resistance-Free stretchable strain sensors with high repeatability and linearity[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(1): 541–553.
- [26] Tao J, Dong M, Li L, et al. Real-time pressure mapping smart insole system based on a controllable vertical pore dielectric layer[J]. *Microsystem & Nanoengineering*, 2020, 6(1): 62.
- [27] Kim M K, Kim M S, Kwon H B, et al. Wearable triboelectric nanogenerator using a plasma-etched PDMS-CNT composite for a physical activity sensor[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(76): 48368–48373.
- [28] Puneetha P, Mallem S, Lee Y, et al. Strain-controlled flexible Graphene/GaN/PDMS sensors based on the piezotronic effect[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(32): 36660–36669.
- [29] Lee W S, Yeo K S, Andriyana A, et al. Effect of cyclic compression and curing agent concentration on the stabi-

- lization of mechanical properties of PDMS elastomer[J]. *Materials & Design*, 2016, 96: 470–475.
- [30] Xia T, Yuwen H J, Lin N. Self-bonding sandwiched membranes from PDMS and cellulose nanocrystals by engineering strategy of layer-by-layer curing[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 161: 8–15.
- [31] Keulemans G, Ceyssens F, Puers R. An ionic liquid based strain sensor for large displacement measurement [J]. *Biomed Microdevices*, 2017, 19: 1.
- [32] He Q, Vokoun D, Stalbaum T, et al. Mechanoelectric transduction of ionic polymer-graphene composite sensor with ionic liquid as electrolyte[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 286: 68–77.
- [33] Li J, Bao R R, Tao J, et al. Visually aided tactile enhancement system based on ultrathin highly sensitive crack-based strain sensors[J]. *Applied Physics Reviews*, 2020, 7(1): 011404.
- [34] Hyun D, Park M, Park C, et al. Ordered zigzag stripes of polymer gel/metal nanoparticle composites for highly stretchable conductive electrodes[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(26): 2946–2950.
- [35] Zhang Y Z, Lee K H, Anjum D H, et al. MXenes stretch hydrogel sensor performance to new limits[J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): 6.
- [36] Nur R, Matsuhisa N, Jiang Z, et al. A highly sensitive capacitive-type strain sensor using wrinkled ultrathin gold films[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(9): 5610–5617.
- [37] Ha C J, Park B G, Suk O M, et al. Photo-induced fabrication of Ag nanowire circuitry for invisible, ultrathin, conformable pressure sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(38): 9986–9994.
- [38] Lee S W, Reuveny A, Reeder J, et al. A transparent bending-insensitive pressure sensor[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(5): 472–478.
- [39] Zhang Q, Wang Q, Wang G, et al. Ultrathin and highly tough hydrogel films for multifunctional strain sensors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(42): 50411–50421.
- [40] Wang L, Chen Y, Lin L W, et al. Highly stretchable, anti-corrosive and wearable strain sensors based on the PDMS/CNTs decorated elastomer nanofiber composite[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 362: 89–98.
- [41] Wang X D, Zhang Y F, Zhang X J, et al. A highly stretchable transparent self-powered triboelectric tactile sensor with metallized nanofibers for wearable electronics[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(12): 1706738.
- [42] Kim H, Shaqeel A, Han S, et al. In situ formation of Ag nanoparticles for fiber strain sensors: Toward textile-based wearable applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(33): 39868–39879.
- [43] Wu X D, Han Y Y, Zhang X X, et al. Highly sensitive, stretchable, and wash-durable strain sensor based on ultrathin conductive layer@polyurethane yarn for tiny motion monitoring[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(15): 9936–9945.
- [44] Jia Y H, Shen L L, Liu J, et al. An efficient PEDOT-coated textile for wearable thermoelectric generators and strain sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(12): 3496–3502.
- [45] Boutry C, Kaizawa Y, Schroeder B, et al. A stretchable and biodegradable strain and pressure sensor for orthopaedic application[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(5): 314–321.
- [46] Wan S, Zhu Z H, Yin K B, et al. A highly skin-conformal and biodegradable graphene-based strain sensor[J]. *Small Methods*, 2018, 2(10): 1700374.
- [47] Hou C, Xu Z J, Qiu W, et al. A biodegradable and stretchable protein-based sensor as artificial electronic skin for human motion detection[J]. *Small*, 2019, 15(11): 1805084.
- [48] Liu Y, Tao J, Yang W K, et al. Biodegradable, breathable leaf vein-based tactile sensors with tunable sensitivity and sensing range[J]. *Small*, 2022, 18(8): 2106906.
- [49] Zhang S F, Li Y W, Tian Q Y, et al. Highly conductive, flexible and stretchable conductors based on fractal silver nanostructures[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(15): 3999–4006.
- [50] Hong J, Kim W, Choi D, et al. Omnidirectionally stretchable and transparent graphene electrodes[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(10): 9466–9455.
- [51] Fang Y S, Li Y, Wang X, et al. Cryo-transferred ultrathin and stretchable epidermal electrodes[J]. *Small*, 2020, 16(28): 2000450.
- [52] Cao J, Liang F, Li H Y, et al. Ultra-robust stretchable electrode for e-skin: In situ assembly using a nanofiber scaffold and liquid metal to mimic water-to-net interaction[J]. *Information Materials*, 2022, 4(4): e12302.
- [53] Meng X C, Xing Z, Hu X T, et al. Stretchable perovskite solar cells with recoverable performance[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(38): 16602–16608.
- [54] Rhee R, Im S, Lee H, et al. Stretchable hole extraction layer for improved stability in perovskite solar cells[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(21): 8004–8010.
- [55] Sun J L, Hua Q L, Zhou R R, et al. Piezo-phototronic effect enhanced efficient flexible perovskite solar cells [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(4): 4507–4513.

- [56] Li H, Wang W N, Yang Y, et al. Kirigami-Based highly stretchable thin film solar cells that are mechanically stable for more than 1000 cycles[J]. ACS Nano, 2020, 14 (2): 1560–1568.
- [57] Zang J F, Cao C Y, Feng Y Y, et al. Stretchable and high-performance supercapacitors with crumpled graphene papers[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6492.
- [58] Chang P, Mei H, Tan Y D, et al. A 3D-printed stretchable structural supercapacitor with active stretchability/flexibility and remarkable volumetric capacitance[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(27): 13646–13685.
- [59] Shi C M, Wang T Y, Liao X B, et al. Accordion-like stretchable Li-ion batteries with high energy density[J]. Energy Storage Materials, 2019, 17: 136–142.
- [60] Kim M, Nam S, Oh M, et al. Bioinspired, shape-morphing scale battery for untethered soft robots[J]. Soft Robotics, 2022, 9(3): 486–496.
- [61] Zhou K K, Zhao Y, Sun X P, et al. Ultra-stretchable triboelectric nanogenerator as high-sensitive and self-powered electronic skins for energy harvesting and tactile sensing[J]. Nano Energy, 2020, 70: 104546.
- [62] Zhao G R, Zhang Y W, Shi N, et al. Transparent and stretchable triboelectric nanogenerator for self-powered tactile sensing[J]. Nano Energy, 2019, 59: 302–310.
- [63] He X, Gu J, Hao Y, et al. Continuous manufacture of stretchable and integratable thermoelectric nanofiber yarn for human body energy harvesting and self-powered motion detection[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450: 137937.
- [64] Molina-Lopez F, Gao T, Kraft U, et al. Inkjet-printed stretchable and low voltage synaptic transistor array[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 2676.
- [65] Ren H, Zhang J M, Tong Y H, et al. Synchronously improved stretchability and mobility via tuning molecular weight for intrinsically stretchable transistor[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(44): 15646–15654.
- [66] Zheng Y, Liu Y, Zhong D, et al. Monolithic optical microlithography of high-density elastic circuits[J]. Science, 2021, 373(6550): 88–94.

Preparation and application of stretchable materials

PAN Xiaojun^{1,2}, BAO Rongrong^{1,2,3*}, PAN Caofeng^{1,2,3*}

1. Center on Nanoenergy Research, School of Physical Science & Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China
2. CAS Center for Excellence in Nanoscience, Beijing Key Laboratory of Micro-Nano Energy and Sensor, Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China
3. School of Nanoscience and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract With the development and progress of science and technology, the demand of stretchable materials in intelligent robot, electronic skin and other field is increasing. The emergence of stretchable materials can solve the problem of rigidity of intelligent devices and enable intelligent devices to achieve complete flexibility and stretchability. In this paper, some novel stretchable materials such as ultra-thin materials, fabrics and biodegradable materials at present are reviewed, and applications of stretchable materials in stretchable electrodes, energy storage devices and transistor sensors are briefly introduced. It is pointed out that there are some problems in the balance between the conductivity and the extensibility of the tensile material, and the poor air impermeability and comfort of the tensile electrode. Finally, opportunities and challenges in the future are discussed.

Keywords stretchable; flexible material; ultra-thin; biodegradable ●



(责任编辑 王志敏)