引用格式：李静，刘丹阳，李文博，等. 聚合物/纳米复合材料柔性拉伸应变传感器研究进展[J]. 材料工程，2026，54(6)：40-52.
LI Jing，LIU Danyang，LI Wenbo，et al. Research progress in polymer-nanocomposites flexible and stretchable strain sensors [J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(6)：40-52.

聚合物/纳米复合材料柔性拉伸应变传感器研究进展

李　静[1,2,3]，刘丹阳[1]，李文博[1,2,3]，刘　静[2,3]，王佳伟[2,3]，张宝勋[2,3]，
李炯利[2,3]，王旭东[2,3*]

（1 中国航发北京航空材料研究院，北京 100095；2 北京石墨烯技术研究院有限公司，北京 100094；
3 北京市石墨烯及应用工程技术研究中心，北京 100095）

摘要：聚合物/纳米复合柔性拉伸应变传感器由于轻巧便携、传感机制简单、信号稳定等优点，在可穿戴电子领域引起广泛的关注。本文以介绍常用的聚合物基体和传感材料类型为基础，对聚合物/纳米复合柔性拉伸应变传感器的研究进展进行了综述。传感范围与灵敏度是评价传感器的主要指标，影响这两大指标的关键因素包括聚合物材料的选取、导电网络的构型以及结构化设计。构建不同类型的结构，如微裂纹、孔结构以及褶皱等，有助于提升传感器的拉伸性和灵敏度，但如何平衡其宽传感范围和高灵敏度仍面临挑战。在未来研究中，高弹性聚合物材料的选择、导电网络构型的优化以及新型结构的设计是提升传感器性能的主要研究方向。聚合物/纳米复合柔性拉伸应变传感器在人体运动监测、健康监测、发声监测、医疗监护和未来家居设计等方面具有广阔的应用前景。

关键词：聚合物；纳米材料；柔性；拉伸应变；传感器；结构化设计
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000184　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000184
中图分类号：TB34　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)06-0040-13

Research progress in polymer-nanocomposites flexible and stretchable strain sensors

LI Jing[1,2,3]，LIU Danyang[1]，LI Wenbo[1,2,3]，LIU Jing[2,3]，WANG Jiawei[2,3]，ZHANG Baoxun[2,3]，
LI Jiongli[2,3]，WANG Xudong[2,3*]

（1 AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials，Beijing 100095，China；2 Beijing Institute of Graphene Technology，Beijing 100094，China；3 Beijing Engineering Research Centre of Graphene Application，Beijing 100095，China）

Abstract：Polymer-nanocomposite based flexible and stretchable strain sensors offer portability，simple sensing mechanism，and stable signals，attracting considerable attention in wearable electronics. This paper reviews the research progress of polymer-nanocomposite flexible stretchable strain sensors，with a focus on introducing common types of the properties of polymers and the types of sensing materials. The evaluation of sensing performance mainly includes sensing range and sensitivity. The main factors affecting sensing performance include the selection of polymer materials，the configuration of the conductive network，and the structure design. Although the construction of different types of structures，such as micro-cracks，pore structure，and wavy structure，can contribute to improving the stretchability and sensitivity of the sensor，it is still a challenge to balance its broad detection range and high sensitivity. The main advanced research trends of sensing performance improvements can be oriented towards the selection of highly elastic polymer materials，the optimization of conductive network configuration，and the design of new structures. Polymer-nanocomposite based flexible and stretchable strain sensors will have broad application prospects in human motion detection，personal health monitoring，phonation monitoring，medical monitoring，and futuristic

home design.

Key words: polymer; nanomaterial; flexibility; stretchable strain; sensor; structure design

可拉伸应变传感器可以将所需测量项目引起的机械形变转化为电信号形式输出并对测量信息进行识别。传统的金属或半导体应变传感器由于固有的脆性，传感范围<5%，这限制了可穿戴传感器未来发展对高度可拉伸的需求[1-2]。大多数纳米传感材料是具有有限拉伸性的导电材料，而聚合物具有高拉伸性。因此，通过传感材料以及聚合物的各自属性选取混合（导电网络和弹性网络混为一体）、复合（在已形成的弹性网络表面制备导电网络）以及浇筑（用弹性材料浇筑封装/转移已组装的导电网络）等结合方式来获得高性能的拉伸应变传感器。拉伸应变传感器的传感行为多表现为电阻随应变产生变化，其成本低、结构简单、易于制备[3]。具有优异的柔韧性、宽传感范围以及高灵敏度的拉伸应变传感器在人体肢体运动、发声测试、表情识别、健康监测、生理参数、电子皮肤、人机交互等应用场景展现出巨大的潜力[4-7]，如图1所示。

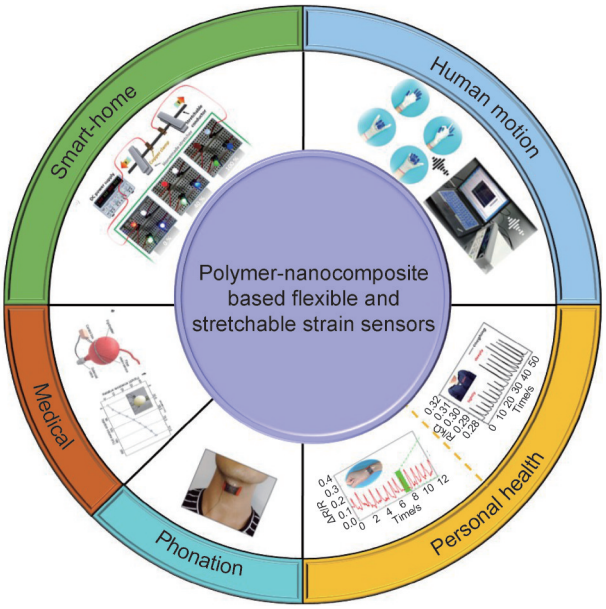


图1　聚合物/纳米复合柔性拉伸应变传感器的应用

Fig.1　Application of polymer-nanocomposite based flexible and stretchable strain sensors

一般来说，拉伸应变传感器的传感机制表现为在拉伸过程中，导电网络间的破坏与重建使其发生传感行为。基于这个理论基础，传感机制包括：隧穿效应、重叠导电材料的分离以及产生裂纹与扩展[8]。高的灵敏度，通俗地讲是传感器在小应变范围下具有高的响应强度。这就表明传感器在小应变范围内导电网络变化程度大，而当发生大的应变时导电网络变化程度扩大至呈断路状态则不再具有传感行为。因此，高灵敏度传感器具有较窄的传感范围。如若导电网络随应变缓慢变化则使得传感器具有低灵敏度，在排除聚合物自身受限的拉伸性外，该传感器一般都具有宽的传感范围。由此看来，宽传感范围与高灵敏度相互制约，通过构建具有良好导电网络的传感器（传感材料的选取组合、结构化设计等）可突破上述制约，是未来研究的重点方向。

本文从材料的属性出发，包括柔性聚合物基体以及传感材料，全面分析聚合物/纳米复合柔性拉伸应变传感器的研究现状。聚合物的弹性赋予传感器高拉伸性，纳米材料构建的导电网络赋予传感器应变响应特性，决定了传感器的传感范围及灵敏度。针对聚合物/纳米复合柔性拉伸应变传感器展开分析研究，对推动高性能拉伸应变传感器研究的进一步发展有重要作用。

1　拉伸应变传感器的主要性能参数

评价拉伸应变传感器的两个主要性能指标包括传感范围和灵敏度。传感范围指的是传感器能够产生传感信号的应变范围。在拉伸应变传感器中，拉伸应变指的是在拉伸力作用下产生的变形量[9]，即长度变化量与初始长度的比值；拉伸性指的是传感器在不断裂的条件下可以发生的最大应变，取决于弹性基体的拉伸极限；应变ε计算如式(1)所示：

$$\varepsilon=\Delta L/L \tag{1}$$

式中：L为传感器的整体原长；ΔL为给予传感器单轴拉伸力下的变化量。

灵敏度(GF)是指传感器中电阻的相对变化量与所发生应变之间的比值。高灵敏度则表示传感器在小应变下输出强的响应信号。灵敏度的计算如式(2)所示[10]：

$$GF=(\Delta R/R_0)/\varepsilon \tag{2}$$

式中：ΔR为在一定应变下电阻相较于初始电阻的变化值；R_0为拉伸应变传感器的初始阻值。

2　材料的属性

2.1　聚合物基体

高弹性聚合物具有良好的拉伸回弹性兼柔性，如

聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT,也称Ecoflex[11])以及热塑性聚氨酯弹性体(TPU)等[12]。各聚合物由于其自身属性不同,也影响传感器的拉伸性。

PDMS是一种聚合有机硅化合物,呈液态状,流变性能好。固化过程需要交联剂的辅助,经热处理固化形成无色透明、无毒、疏水且不易燃的聚合物弹性体,具有较低的杨氏模量以及良好的生物相容性[13-14]。PDMS前驱体溶液与交联剂的比例不同,可获得不同杨氏模量的聚合物[15]。PDMS基拉伸应变传感器适用于混合、复合以及浇筑制备方式。Kong等[16]将平均直径为50 nm的纳米碳颗粒直接与PDMS混合制备拉伸应变传感器。Li等[17]受“鱼鳞”结构的启发,将大面积超薄的石墨烯薄膜转移至弹性基材PDMS表面复合制备高灵敏度应变传感器。Amjadi等[18]将银纳米线(AgNWs)溶液滴涂于载玻片,浇筑PDMS形成呈三明治结构的PDMS-AgNWs-PDMS夹层薄膜传感器,拉伸形变约为100%。

Ecoflex由再生聚合物和木材的混合物组成,兼具聚合物和木材的优良特性,力学性能可模拟人体表皮[19]。类似于PDMS性质,Ecoflex基拉伸应变传感器同样适用于混合、复合[20]、浇筑[21]制备方式,但拉伸性优于PDMS。Amjadi等[22]采用浇筑法制备Ecoflex-碳纳米管(CNTs)-Ecoflex夹层薄膜传感器,拉伸性约500%,其拉伸性能优于该研究团队采用类似方法制备的PDMS-AgNWs-PDMS薄膜传感器[18]。

TPU介于塑料和橡胶,具有良好的弹性,尤其在拉伸完成后回弹稳定性好[23]。TPU基拉伸应变传感器适用于混合、复合制备方式。Wang等[24]在N,N-二甲基甲酰胺(DMF)有机溶剂的辅助下,混合CNTs与TPU并采用静电纺丝制备出CNTs/TPU线型拉伸应变传感器。Lin等[25]通过静电纺丝预先制得TPU纳米纤维膜用作弹性基体,复合CNTs以及AgNWs层,浇筑PDMS封装形成TPU/CNTs/AgNWs/PDMS复合传感器。

在制备工艺方面,PDMS/Ecofelx呈液态状且环保,可与传感导电网络以简单灵活且多样的方式结合,可加工性强。TPU则需预先溶于DMF/THF有机溶剂中形成溶液状,通过刮涂/静电纺丝形成弹性基体[26-27],制备工艺复杂且不环保。同时,TPU多用于预先形成薄膜弹性网络基体。在拉伸性/传感范围方面,PDMS和Ecoflex的拉伸应变极限分别为400%和900%[28],Ecoflex的拉伸性优于PDMS。在相类似制备条件下,TPU基应变传感器的传感范围一般优于PDMS/Ecoflex应变传感器。

2.2 传感材料

纳米材料具有独特的物理化学特性,如多维度、导电性及良好的稳定性等,作为传感材料广泛用于应变传感器领域。根据纳米材料在三维空间尺度进行分类。零维(0D)材料:微观结构呈现球形,如金或银纳米颗粒(AuNPs、AgNPs)、碳黑(CB)等;一维(1D)材料:微观结构为线形,如AgNWs、CNTs等;二维(2D)材料:微观结构为片状,如石墨烯、二硫化钼(MoS_2)、MXenes等。选用不同微观结构特性的传感材料直接影响传感器中导电网络的形成。

2.2.1 0D材料

金属0D材料如AuNPs、AgNPs具有低的纵横比,导电网络呈现形式多为导电线[29]和导电膜[30-31]。Lee等[31]通过旋涂制备AgNPs薄膜,转移至PDMS基体制备应变传感器。Han等[32]刷涂AgNPs浆料至平行排列的TPU纤维织物下表面,再利用3D打印TPU上层织物。其中,上下两层织物中TPU纤维相互垂直,形成斜网状结构。当拉伸时,上下织物中变形的TPU纤维挤压中层的AgNPs进行剪切运动发生传感行为。

非金属0D材料CB,粒径介于10~500 μm,根据它的材料属性常直接通过混合/复合制备拉伸应变传感器。Shang等[33]利用硅烷偶联剂预处理CB,与聚合物基体直接混合获得拉伸应变传感器。Hu等[34]喷涂CB至聚乙烯醇(PVA)层,在表面复合PDMS,牺牲PVA层可使CB转移至PDMS制备CB-PDMS复合拉伸应变传感器。

2.2.2 1D材料

1D材料如AgNWs、CNTs具有高的长径比,“线”与“线”之间的搭接形成导电网络。在拉伸过程中,相较于0D材料,1D材料可以通过“线”间的持续接触来保持导电性使传感器具有较宽的传感范围。金属0D/1D材料导电性好,制备工艺成熟,但存在成本高、导电网络单一等缺点,使其应用受限;非金属材料,尤其1D材料CNTs,通过多种制备方式形成的导电网络与聚合物基体可灵活结合,拓宽了柔性拉伸应变传感器的研究广度。常规制备的CNTs适用于混合或复合法。Fan等[35]将CNTs、NaCl和PDMS直接混合固化成型,溶解移除NaCl,制备内部具有微观孔结构的拉伸应变传感器。Nie等[36]将CNTs溶液涂刷于Ecoflex表面复合制备出双层微结构应变传感器。通过超声或者溶胀-超声作用可将CNTs吸附复合于弹性基材表面。Li等[37]将CNTs吸附复合于TPU弹性基材表面构建出导电网络。Zhang等[38]将CNTs吸附于具有波浪状纹理结构的Ecoflex表面,两者紧密结合且保持稳定不易脱落。化学气相沉积(CVD)法垂直生长的碳纳米

管(VACNTs)适合浇筑聚合物制备传感器,Paul等[39]将PDMS浇筑于排列整齐的VACNTs间隙中,制备VACNTs/PDMS薄膜拉伸应变传感器。

2.2.3　2D材料

2D材料如石墨烯、MoS_2及MXenes,重叠的纳米片构筑导电网络。石墨烯研究较早,单层石墨烯表现出优异的电子和力学性能,如高的室温迁移率(3×10^4 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot S^{-1}$)、杨氏模量(≈1 TPa)以及固有的高强度(≈130 GPa)[40]。聚合物的加入,拓展了石墨烯在传感器领域的应用[41]。石墨烯粉体常需在有机溶剂中预分散,与聚合物混合制备应变传感器[42]。当石墨烯含量达到渗透阈值以上,整个传感器具有传感行为。此外,导电添加物含量于渗漏阈值附近时,传感器的灵敏度最高[43-44]。石墨烯溶液通过CVD[45]、滴涂[46]、吸附[47]等方式形成薄膜类的传感导电网络复合于聚合物弹性基材表面;针对化学还原法[48]、冷冻辅助法[49]及CVD[50-51]自组装形成的石墨烯三维(3D)多孔导电网络,主要通过浇筑聚合物如PDMS/Ecoflex来制备基于3D石墨烯的柔性聚合物纳米复合材料。尽管有些研究表明,独特的3D石墨烯结构使得传感器在拉伸应变下几乎具有恒定的电阻,不具备明显的传感行为。如该类型传感器的拉伸应变约为50%时,灵敏度仅为0.6[52]。造成该现象的原因是当聚合物渗透到3D孔结构的过程中时,填充了一些大孔结构使得骨架/孔壁间重叠的石墨烯在拉伸过程中变化程度小。施加在3D结构上的拉伸力可以在局部连接中分解并产生较小的应变,单轴拉伸可以在节点处转换为弯曲而不是直接拉伸[53]使该类传感器具有更大的拉伸性,骨架/孔壁间重叠的石墨烯变化可以增强传感性能[48]。因此,3D导电网络可通过优化制备方式[54]来调控孔结构使其在拉伸应变过程中具有传感行为。

其他2D层状材料如MoS_2及MXenes材料在拉伸应变传感器研究领域也具有潜在的应用价值。其中,MoS_2存在能带间隙,独特的半导体性质优于石墨烯。Neri等[55]报道了基于3层MoS_2悬浮液的拉伸应变传感器,传感范围为0%~20%并获得240.61高灵敏度。这是由于在平面单轴的拉伸机械应变下,MoS_2完成了由半导体—导体的转变。但生产高灵敏度高质量的MoS_2造价高,限制了MoS_2传感元件的实际应用[56]。MoS_2复合材料用作传感材料的制备工艺相对简单以及成本低,且MoS_2的低摩擦因数(约10^{-4})和高弹性模量(约330 GPa)是一种优选的聚合物弹性体复合材料填料。MXenes材料是通过刻蚀MAX相陶瓷的中间相制备获得的一种新型2D材料,主要包括过渡金属碳化物、氮化物/碳氮化物[57]。纯MXenes材料多以溶液形式存在,具有优良的分散性和可加工性,主要通过过滤、沉积等方法制备成薄膜导电网络[58]。由于MXenes与石墨烯性质相似,且基于纯石墨烯用于拉伸应变传感器的研究,MXenes基应变传感器中的传感材料也多采用复合材料协同作用来提升传感性能。

2.2.4　复合材料

在复合传感材料中,不同微观结构的传感材料组合所形成的导电网络凸显出各自明显的优势,不仅提升了传感器导电性,同时也增强了传感性能。主要包括1D-0D复合材料、2D-0D复合材料以及2D-1D复合材料。

(1)1D-0D复合材料

1D材料通过“线与线”的搭接构建传感导电网络,加入0D材料可以弥合“线”之间的间隙,增强了复合材料导电网络的致密性从而提高电导率。当在大的应变范围下,1D“线”间的搭接受损,0D纳米粒子可以迁移到间隙中修复导电路径,使得拉伸应变传感器具有较宽的传感范围。Zheng等[59]通过混合法制备CNTs-CB/PDMS拉伸应变传感器,传感范围及灵敏度为0.91(0%~100%)、3.25(100%~255%)及13.1(255%~300%)。

(2)2D-0D复合材料

基于2D材料已构建的传感导电网络,加入0D材料“丰富”了导电路径。不仅增强了导电网络的导电性,也提升了传感范围以及灵敏度。Wang等[60]通过CVD将2D石墨烯生长于Ni泡沫,“牺牲”模板可获得3D石墨烯传感导电网络。基于单石墨烯导电网络石墨烯-PDMS传感器在0%~30%应变下的灵敏度为2.4。当在石墨烯内壁镀一层0D AuNPs,所制备的AuNPs-石墨烯-PDMS复合应变传感器的传感范围为0%~90%,灵敏度的值分别为10(0%~30%)、15(30%~60%)以及5(60%~90%)。在应变0%~30%的条件下,相较于石墨烯-PDMS应变传感器,AuNPs增强导电性的同时也使器件的灵敏度提升了4倍左右。

(3)2D-1D复合材料

2D材料可自组装形成薄膜/3D多孔传感导电网络。如2D石墨烯构筑的3D多孔结构,其骨架可作为“间隔剂”将缠绕的1D CNTs相互分离,而CNTs也可在石墨烯间架起桥梁。Cai等[61]制备出具有石墨烯和CNTs协作的二元渗透导电网络,浇筑PDMS制备拉伸应变传感器。在拉伸应变过程中,3D骨架断开形成裂缝并以此发生传感行为。该传感器的有效传感范

围0%～85%，优于大部分聚合物/3D石墨烯应变传感器的性能参数。图2为CNTs桥接裂缝的示意图以及在不同拉伸状态下裂缝的微观图像。当形变量为10%时，产生微小裂缝；形变量为50%时，CNTs桥接于裂缝保持良好的导电通路；形变量为80%时，CNTs作用减低，最大工作范围维持于85%。此外，协同的导电网络可降低渗透阈值，提升应变传感器的工作范围及灵敏度[62]。

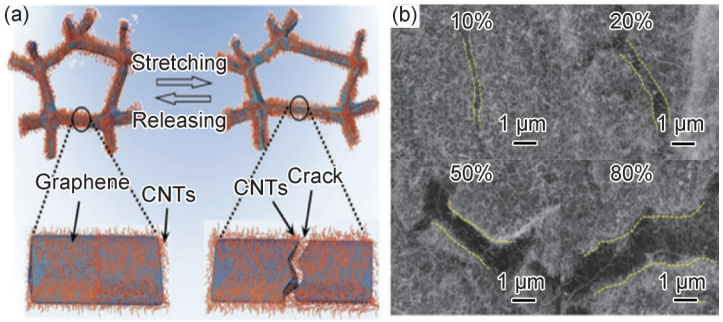


图2 CNTs桥接裂纹的示意图(a)和不同拉伸状态下裂缝的电子扫描图像(b)[61]

Fig.2 Schematic illustration of the crack bridged by CNTs(a) and SEM images of the crack junctions after experiencing different strains(b)[61]

2D材料形成薄膜类传感导电网络，附加1D材料的搭接可制备复合薄膜应变传感器。在拉伸应变过程中，薄膜材料产生微裂纹发生传感行为，1D材料可搭接裂纹，能扩大薄膜类拉伸应变传感器的工作范围，如2D MXenes薄膜材料在低应变范围具有高灵敏度，1D CNTs材料具有宽响应范围。因此，MXenes-CNTs复合薄膜应变传感器性能优良。You等[63]制备获得的CNTs-MXenes/PDMS夹层薄膜应变传感器，传感范围及灵敏度为43(0.01%～5%)，118(5%～50%)及321(50%～100%)。此外，结合MXenes材料溶液的可加工特性及TPU高弹性优势，Dong等[64]通过真空抽滤，制备获得MXene-CNTs/TPU复合薄膜应变传感器。传感范围扩大至330%，灵敏度分别为37.5(0%～50%)、289.5(50%～150%)、1070.1(150%～250%)、2911(250%～330%)。

此外，Alam等[65]提出了具有CNTs和MoS_2的硅橡胶纳米复合材料用于应变传感器，其灵敏度及传感范围分别为0.25(0%～40%)、4.51(40%～100%)以及25.95(100%～155%)。与单一MoS_2传感材料拉伸应变传感器相比，MoS_2/CNTs纳米复合拉伸应变传感器具有较宽的传感范围。

表1[16-18,24,32-33,36-39,45-46,48,50,59-61,63-65]总结了单一及复合传感材料用于应变传感器的性能参数。单一传感材料基于自身材料属性使导电网络构型具有局限性，复合材料组合构建的导电网络优势互补。0D材料“填补剂”、1D材料“搭接剂”以及2D材料“间隔剂”，尤指1D-2D复合薄膜类拉伸应变传感器优势明显，0D-1D-2D三组分复合材料可做进一步研究验证多重导电网络对传感性能的影响。

3 传感机制

在拉伸应变过程中，传感器中内部导电通路的可重复破坏与重建是发生传感行为的理论基础。传感导电纳米材料间的隧穿效应、重叠导电材料的分离以及产生裂纹与扩展可用于解释导电网络的变化。本部分系统讨论了每种传感机制适用的拉伸应变传感器类型以及对传感性能参数的影响。

3.1 隧穿效应

隧穿效应是指传感导电网络中相邻导电材料间的距离无限接近，致使电子穿越绝缘屏障而表现出导电性。它可用于解释混合填充型应变传感器的传感行为。当发生应变时，相邻未接触导电材料间的隧道距离增加使导电路径减少。混合填充型应变传感器中若仅存在少部分未接触的导电材料间能产生隧穿效应，传感行为不明显。如通过直接混合制备的碳纳米颗粒/PDMS应变传感器[16]，传感范围及灵敏度为5.5(0%～10%)和1.8(10%～80%)，灵敏度较低。若2D超薄传感导电网络复合于聚合物表面，导电性主要是由于相邻纳米片材间的隧穿效应引起的。像这种类型应变传感器，在小应变范围内电阻显著增加；而在大应变下隧穿效应消失其传感器呈断路状态，传感范围虽窄但灵敏度较高。如Zhao等[45]利用CVD制备出透明的石墨烯薄膜并转移至柔性PDMS基材，传感范围为0%～1.6%但灵敏度为546。

3.2 重叠导电材料的分离

重叠导电材料的分离则针对多维材料，如1D CNTs/AgNWs、2D石墨烯等，这类材料相互重叠连接形成导电网络。在拉伸过程中，纳米传感材料间发生滑动使得重叠分离断开/重叠面积减小而使得电阻增

表 1　不同聚合物/纳米复合材料的传感性能总结

Table 1　Summary of sensing performances of different polymer-nanocomposites

Sensing material	Polymer	Combination method	Sensing range	Sensitivity	Ref.
Carbon nanoparticles	PDMS	Mixing	0%-10%	5.5	[16]
			10%-80%	1.8	
Graphene films	PDMS	Recombination	0%-2%	1037	[17]
AgNWs	PDMS	Recombination/drop-casting	0%-30%	14	[18]
CNTs	TPU	Mixing	0%-160%	22.1	[24]
			160%-320%	97.5	
AgNPs	TPU	Recombination/brush-coating	0%-60%	2374	[32]
			60%-90%	4184	
			90%-120%	11477	
			120%-138%	38220	
CB	PDMS	Recombination	0%-60%		[33]
			60%-100%	67.2	
CNTs	Ecoflex	Recombination/brush-coating	0%-50%	12.3	[36]
			50%-200%	29.4	
CNTs	TPU	Recombination/adsorption	0.05%-400%	8	[37]
			400%-600%	7	
CNTs	Ecoflex	Recombination/adsorption	0%-1300%	6.86	[38]
VACNTs	PDMS	Pouring	0.004%-5%	13	[39]
			5%-10%	105.3	
			10%-15%	759.4	
			15%-20%	775.4	
			20%-25%	6341.7	
			25%-30%	6436.8	
Graphene films	PDMS	Recombination	0%-1.6%	546	[45]
Graphene	PDMS	Recombination/drop-casting	0%-2%	34.4	[46]
			2%-5%	99.9	
			5%-7.5%	402.3	
3D graphene	PDMS	Pouring	0%-10%	39.3	[48]
3D graphene	PDMS	Pouring	0%-18%	2.6	[50]
			22%-40%	8.5	
CNTs/CB	PDMS	Mixing	0%-100%	0.91	[59]
			100%-255%	3.25	
			255%-300%	13.1	
3D graphene/AuNPs	PDMS	Pouring	0%-30%	10	[60]
			30%-60%	15	
			60%-90%	5	
3D graphene/CNTs	PDMS	Pouring	0%-5%	2	[61]
			5%-85%	20.5	
MXenes/CNTs	PDMS	Recombination	0.01%-5%	43	[63]
			5%-50%	118	
			50%-100%	321	
MXenes/CNTs	TPU	Recombination	0%-50%	37.5	[64]
			50%-150%	289.5	
			150%-250%	1070.1	
			250%-300%	2911	
MoS_2/CNTs	Silicone rubber	Mixing	0%-40%	0.25	[65]
			40%-100%	4.51	
			100%-155%	25.95	

加。若传感器在通路状态下只涉及导电材料间滑移使得重叠面积减少，则该类型传感器引起的电阻变化程度小即灵敏度相对较低。如 Amjadi 等[18]制备的 PDMS-AgNWs-PDMS 复合薄膜传感器，传感范围为 0%～30% 且灵敏度为 14。若导电材料滑移至部分分离呈可重复断开状态则电阻变化程度大，那么传感器相应的灵敏度也会得到提高。如 Paul 等[39]制备获得的 VACNTs/PDMS 薄膜应变传感器其传感范围为 0.004%～30%，灵敏度分别为 13（0.004%～5%）、105.3（0.004%～10%）、759.4（10%～15%）、775.4（15%～20%）、6341.7（20%～25%）及 6436.8（25%～30%）。图 3 为重叠的石墨烯导电网络在拉伸过程中的分离状态[48]。当处于小应变范围时，相邻石墨烯纳米片滑移导致重叠区域减小；随着应变程度加大，重叠面积进一步减小至呈断开状态。较小的重叠区域则意味着较弱的电子云，电阻也较高。

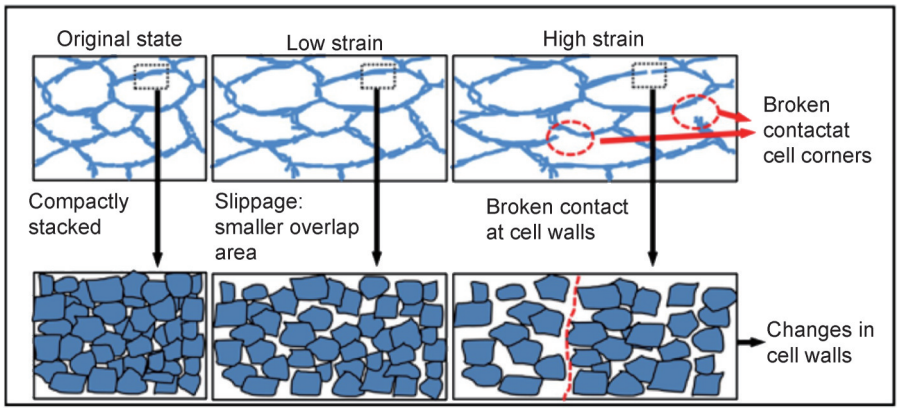


图 3 在拉伸应变下，石墨烯导电网络结构变化的示意图[48]

Fig.3 Schematic illustrations of the structural change of the graphene network under an applied tensile strain[48]

3.3 产生裂纹与扩展

产生裂纹与扩展多发生于薄膜类拉伸应变传感器，如传感材料通过沉积/刷涂/吸附成膜于聚合物表面。其中，裂纹在应力集中区域随应变增加向外扩展产生传感行为。在拉伸过程中微裂纹的扩展使得电阻增加，在释放过程中通过依靠聚合物闭合微裂纹来恢复电阻。在聚合物表面沉积/转移的金属薄膜存在初始微裂纹，虽具有高电阻但可拉伸。Lee 等[31]制备的 AgNPs/PDMS 应变传感器的传感范围为 0%～20%，灵敏度最大为 2.05。传感材料通过超声方式密集吸附在高拉伸性弹性体基材表面，在应变过程中表面发生微小裂纹，该传感器具有宽传感范围但灵敏度低。Li 等[37]制备的 TPU@CNTs 应变传感器传感范围为 0.05%～400% 时，灵敏度≈8；传感范围为 400%～600% 时，灵敏度≈7。Zhang 等[38]基于 CNTs/Ecoflex 复合材料的拉伸应变传感器的传感范围为 0%～1300%，灵敏度为 6.86。

4 结构化设计

理想的拉伸应变传感器应兼具宽传感范围和高灵敏度。上述研究表明采用复合填料可增强传感性能，为进一步提升传感器的性能参数，构建不同类型的结构，如微裂纹、孔结构以及褶皱也引起了广泛的研究。

4.1 微裂纹

微裂纹的设计主要提升传感器的灵敏度，Yang 等[25]通过将金薄膜沉积于 PDMS 并诱导产生横向裂纹，灵敏度相对较高分别为 200（<0.5%）、1000（0.5%～0.7%）及 5000（0.7%～1%）。Sun 等[6]通过预拉伸聚氨酯（PU）再释放，可使原本吸附于 PU 表层的 CNT 产生微裂纹。传感范围及灵敏度分别为 111.1（0%～50%）及 1344.1（150%～200%）。而 Boland 等[47]通过吸附复合制备的天然橡胶/石墨烯应变传感器，拉伸范围>800% 但灵敏度仅为 35。两者相比，设计微裂纹可提高传感器的灵敏度。但裂纹的形成并不容易控制，易产生大而长的裂纹导致传感器传感范围较低及稳定性差等问题。

4.2 孔结构

在拉伸应变过程中，引入微观/宏观孔结构增大了传感器在应力作用下的变形空间，有利于拓宽传感范围。

4.2.1 微观孔结构

微观孔结构通常形成于传感材料内部，Yan 等[66]采用溶液加工法，制备具有微观孔结构的石墨烯/纳米纤维素/PDMS 复合薄膜拉伸应变传感器；NaCl 可用作模板引入 200～400 μm 的空腔，Zhou 等[67]利用球磨混合 NaCl@CNTs/TPU 粉末并热压制备薄膜，除

去NaCl模板可获得传感范围为0%～800%的CNTs-TPU多孔拉伸应变传感器;利用索氏提取技术也可引入微孔结构,He等[68]混合CNTs、石墨烯、PDMS以及石蜡成型,将其置于索氏萃取器中通过移除石蜡制备CNTs-石墨烯/PDMS拉伸应变传感器,传感范围为0%～110%。图4(a)为具有微观孔结构的CNTs-石墨烯/PDMS复合材料,能承受200 g砝码的拉伸变形,图4(b)为复合材料在拉伸应变过程中微观孔结构的变化,为传感器提供了应变空间[67]。同时,由于协同导电网络孔壁内外两层CNTs脆性的破坏效应以及相邻孔壁在不同应变范围内的接触效应影响传感器的灵敏度。

4.2.2　宏观孔结构

尽管传感材料中微观孔结构的存在可优化传感范围,但宏观开孔结构的变形空间大更具有结构优势。宏观开孔型结构一般指网格状结构,可通过直接/模板导向型制备方式获得。当发生拉伸应变时,网格开孔结构随拉伸方向变形。

(1)直接导向

直接导向指的是通过3D打印、激光切割等方式,直接构建出宏观网格状孔结构。Ma等[69]采用3D打印制备的网格状石墨烯-PDMS拉伸应变传感器,传感范围为0%～350%。图4(c)为具有宏观网状结构的拉伸应变传感器在0%～400%下的变化,变形空间大[68]。Wang等[70]采用超快激光切割出网状结构的PDMS基底,滴加AgNWs制备出高透明型应变传感器其传感范围为0%～150%。

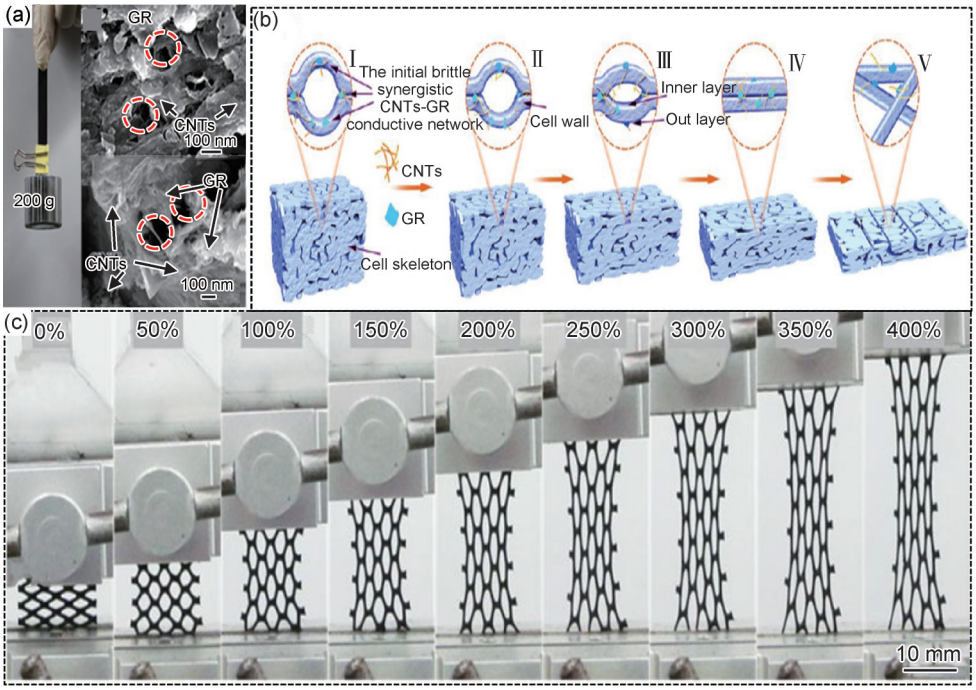


图4　具有微观孔结构的CNTs-graphene/PDMS应变传感器及在拉伸应变过程中孔结构的变化示意图(a),(b)[67]及具有宏观孔结构的石墨烯-PDMS应变传感器在0%～400%应变下的图片(c)[68]

Fig.4　CNTs-graphene/PDMS strain sensor with micro-pore structure and schematic illustration of the porous structure evolution with increasing tensile strain (a),(b)[67] and digital images of graphene-PDMS strain sensor with macro-pore structure at strains from 0%-400% (c)[68]

(2)模板导向

模板导向指的是采用具有开孔结构的模板,如铜网[71-72]、棉绷带[73]等,在其表面"生长"导电网络后"牺牲"模板以此获得开孔型导电网络。在拉伸应变过程中,导电网络通过产生高密度裂纹发生传感行为。相较于无结构薄膜类应变传感器来说,网状结构相应地提升了传感范围。但开孔模板制备的导电网络在移除模板后,韧性差且传感范围低于直接导向型传感器。Tang等[72]通过水热法将氧化石墨烯(GO)溶液覆于开孔型铜网表面,移除铜网制备具有微管结构的RGO@PDMS拉伸应变传感器,传感范围为0%～50%。Yin等[73]将GO溶液浸涂于网格型的棉绷带上,转移至乙醇火焰中除去棉绷带并形成还原氧化石墨烯(RGO)导电网络。采用天然橡胶封装,该拉伸应变传感器的传感范围为0%～57%。

4.3　褶皱结构

将传感材料吸附/沉积于预拉伸弹性基底[74],释放基底可形成褶皱弯曲的导电网络。褶皱结构克服了导电薄膜与聚合物表面力学性能的不匹配性,在大应变下仍可保持良好的导电性。这一结构设计,主要

提升传感器的传感范围。此外,通过调控沉积导电层的类型、厚度和弹性基材预应变水平(方向、程度),同时优化了传感范围和灵敏度性能参数。Chu 等[75]基于 RGO、金(Au)、PDMS 和 VHB 基板的简单预拉伸制备了具有梯度褶皱结构的拉伸应变传感器:包括轻微褶皱区和明显褶皱区,轻微褶皱区感应小应变,明显褶皱区则感应大应变。该传感器的灵敏度及应变范围为 19.24(0%~8%)、170.7(8%~20%)、9156.3(20%~170%)、55785.8(170%~270%)、167665.6(270%~300%)。

5 应用场景

聚合物/纳米复合拉伸应变传感器具有高的拉伸性兼柔性,适应性强且可与人体紧密贴合,应用于人体运动监测、健康监测、发声监测、医疗监护以及智能家居等领域。

5.1 运动监测

在运动领域,监测人体运动轨迹(如关节的弯曲程度、速度等)参数有助于制定有效的训练方案。传统的相机监测不适用于动态监测,如步行、跑步或踢足球等运动;可穿戴的测角仪精度高但造价成本高。可穿戴应变传感器用于监测人体运动并识别信号正快速发展,主要通过将传感器连接到人体的各个关节来反馈相应的电信号[76]。同时,传感器需具有宽的传感范围(>100%)。Zhang 等[38]制备的超拉伸性 MWCNTs/Ecoflex 应变传感器,不仅可监测人体的大范围运动(蹲、跳等),而且可识别出不同的手语动作(A~Z 字母手势)。

5.2 健康/发声监测

在日常生活中,监测一些细微运动(脉搏[69]、咳嗽及呼吸[70]等)可反映出人体健康的生理参数。如脉搏是反映血压及心率的重要生理信号,监测脉搏信号常需应变传感器在小应变范围内具有高灵敏度。Ma 等[69]制备出石墨烯-PDMS 应变传感器,当安装传感器在手腕上时,能够实时监测人体的脉搏包括脉压周期和波形。同时,该传感器监测出实验者的脉搏频率为 70 次/min,符合健康成人的脉搏指标。Wang 等[70]制备的 AgNWs-PDMS 应变传感器,当传感器被贴在胸前,可感知并记录人的咳嗽及呼吸频率。此外,当安装石墨烯-PDMS 传感器在喉咙时,通过监测微小的表皮/肌肉运动可识别出不同的发音[69]。如佩戴者发出“石墨烯”、“好”和“传感器”,传感器能够显示出可区分且可重复的信号模式。该传感器还可监测扬声器产生的声学振动,当播放“佳能变奏曲”时,传感器能同步输出电信号并保留了大部分的峰值。如此,优异的语音识别能力使得该类型应变传感器在人机交互和语音康复等方面具有巨大的应用潜力。

5.3 医疗监护

在医疗监护领域,输尿管是一个可扩张的管道。它将尿液从肾脏输送到膀胱,在泌尿系统中起着重要的作用。由于其解剖位置不明显,在手术中容易受伤,尤其在妇科、结直肠、盆腔等外科手术。医疗工作者多通过经验识别导尿管,风险较大。已有研究[77]将传感器定制成管状并依靠自身弹性固定于内镜钳的曲面上,可检测到实验猪的输尿管动态变化。针对一些由于脊髓损伤引起的神经源性的排尿功能障碍患者,能够监测膀胱系统的体积变化使尿液及时排出对患者的健康显得尤为重要。Lee 等[78]模拟人造膀胱系统(如橡胶气球),将高度可拉伸纤维传感器安装于气球的曲面上。通过向橡胶气球中不断灌入液体使气球的体积膨胀,观察传感器输出的电信号变化。结果表明,应变传感器不仅能够监测球囊体积的变化,而且能够对各种重复体积变化(注入/提取液体)具有连续且稳定的电信号响应。高灵敏度拉伸应变传感器在医疗监护方面有一定的潜力。

5.4 智能家居

在智能家居设计中,基于传感器在发生拉伸应变其电阻增大的现象,可用于控制电路用作电流调节的开关及电阻器[79]。Zhu 等[80]将具有微裂纹的金薄膜应变传感器与发光二极管(LED)串联,根据不同的应变程度可调整 LED 的发光强度。初始状态下,应变传感器充当导线点亮 LED;随着应变增加,传感器的电阻增大,LED 的光强度衰减;当超过拉伸极限,LED 灯熄灭。相同地,若将应变传感器与风扇连接,在恒定外部电压下,传感器发生应变使得风扇的输出功率降低,如此便降低了风扇的转速[81]。

6 结束语

评价聚合物基拉伸应变传感器性能的优劣主要包括传感范围和灵敏度两大关键指标,但如何制备兼具宽传感范围和高灵敏度的传感器仍是科研人员一直探索的热点方向。本文从应变传感器的主要性能参数、聚合物基体的选择、传感材料的类型、结构化设计以及应用场景对聚合物/纳米复合柔性拉伸应变传感器研究进展进行了综述。

(1)聚合物本身的材料属性主要影响拉伸性。TPU 弹性网络常需预先制备成纤维膜/线,制备方式受限且不环保;Ecoflex/PDMS 的材料属性类似且适

用性广，但 Ecoflex 的拉伸性优于 PDMS。因此，Ecoflex 基应变传感器有助于制备高拉伸应变传感器。

(2)传感材料形成的导电网络类型直接决定了与聚合物相结合适用的制备方式。粉体类材料适用于与聚合物直接混合；薄膜类导电网络适用于复合在聚合物表面；3D 结构导电网络需经聚合物浇筑/转移来制备应变传感器。同时，传感材料构建的导电网络影响应变传感器的传感范围以及灵敏度，复合传感材料中选用不同维度纳米材料在构建导电网络中可优势互补，显著提升了传感器的性能参数。

(3)结构化设计中，微裂纹的设计可提升传感器的灵敏度。但由于裂纹不易控制，该类型应变传感器传感范围窄，重现性差。在后续研究中，可通过设计有序的裂纹优化传感范围。孔结构设计为传感导电网络提供了变形空间，一定程度上拓宽了传感范围。但这使得传感器在小应变下未能够发生明显传感行为，宽传感范围和高灵敏度仍相互制约。褶皱型设计可改善导电薄膜与弹性基材两者相差的杨氏模量以及匹配性差问题，但同样存在小应变范围内，导电网络构型变化不明显的劣势。因此，通过优化导电网络构型如设计二阶的结构/设计具有轻微褶皱区和明显褶皱区，有针对性地分别感应小应变和大应变使传感器能够同时兼具宽传感范围和高灵敏度。未来，新型结构化设计仍是高性能拉伸应变传感器的研究重点。

综上所述，一个传感器性能的优劣是综合聚合物基体、传感材料构建的导电网络构型以及结构化设计依据各自适用属性共同作用的成果。同时，评价传感器的先进性还与制备方式、成本高低以及适用的应用场景息息相关。因此，不能单一而论如某种最佳聚合物基体、最佳传感材料以及最优结构设计。尽管传感器在微小应变下具有高的灵敏度或在超大应变下信号稳定仍存在挑战，但针对特定的应用场景也可选择出满足要求的拉伸应变传感器。随着不断的深入研究，柔性拉伸应变传感器应用将会有新的突破与发展。

参考文献

[1] SEGEV-BAR M, HAICK H. Flexible sensors based on nanoparticles[J]. ACS Nano, 2013, 7(10): 8366-8378.

[2] SUN Y, ROGERS J A. Structural forms of single crystal semiconductor nanoribbons for high-performance stretchable electronics [J]. Journal of Materials Chemistry, 2007, 17(9): 832-840.

[3] LI J, LI W, LIU J, et al. Green preparation of graphene-based plantar pressure sensor[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023, 34(7): 680.

[4] GAO B, ELBAZ A, HE Z, et al. Bioinspired kirigami fish-based highly stretched wearable biosensor for human biochemical-physiological hybrid monitoring[J]. Advanced Materials Technologies, 2018, 3(4): 1700308.

[5] 李文博，王旭东，宋延林. 石墨烯基墨水的制备及其在印刷电子中的应用[J]. 科技导报，2017，35(17)：30-36.
LI W B, WANG X D, SONG Y L. Preparation of graphene-based inks and their applications to printed electronics: a review [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(17): 30-36.

[6] SUN H, DAI K, ZHAI W, et al. A highly sensitive and stretchable yarn strain sensor for human motion tracking utilizing a wrinkle-assisted crack structure[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(39): 36052-36062.

[7] LI W, LIU J, LIU D, et al. Freely-shapable fabrication of aerogel patterns and 3D architectures by freeze-assisted transfer printing [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023, 11(32): 10834-10842.

[8] CHEN J, YU Q, CUI X, et al. An overview of stretchable strain sensors from conductive polymer nanocomposites[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(38): 11710-11730.

[9] FAROOQ M, SAZONOV E. Strain sensors in wearable devices [M]//Wearable Electronics Sensors, Cham: Springer International Publishing, 2015: 221-239.

[10] ZHANG Z, XIE C, ZHANG J, et al. Tunable stretchable strain sensors enabled by patterned Ecoflex-vertical aligned carbon nanotube arrays and pre-stretching transfer[J]. Carbon, 2022, 197: 218-225.

[11] 张天永，吴畏，朱剑，等. 基于纳米碳填料可拉伸导电聚合物复合材料的制备[J]. 化学进展，2021，33(3)：417-425.
ZHANG T Y, WU W, ZHU J, et al. Stretchable conductive polymer composites prepared with nano-carbon fillers[J]. Progress in Chemistry, 2021, 33(3): 417-425.

[12] 华江龙，江琦. 耐久可拉伸超疏水材料的构建及应用研究进展[J]. 材料工程，2023，51(1)：76-84.
HUA J L, JIANG Q. Research progress in construction and application of durable stretchable superhydrophobic materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(1): 76-84.

[13] JO B H, VAN LERBERGHE L M, MOTSEGOOD K M, et al. Three-dimensional micro-channel fabrication in polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2000, 9(1): 76-81.

[14] 金欣，畅旭东，王闻宇，等. 基于聚二甲基硅氧烷柔性可穿戴传感器研究进展[J]. 材料工程，2018，46(11)：13-24.
JIN X, CHANG X D, WANG W Y, et al. Research progress in flexible wearable strain sensors based on polydimethylsiloxane [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(11): 13-24.

[15] LAMBERTI A, DI DONATO M, CHIAPPONE A, et al. Tunable electromechanical actuation in silicone dielectric film[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(10): 105001.

[16] KONG J H, JANG N S, KIM S H, et al. Simple and rapid micropatterning of conductive carbon composites and its application to elastic strain sensors[J]. Carbon, 2014, 77: 199-207.

[17] LI X, YANG T, YANG Y, et al. Large-area ultrathin graphene films by single-step Marangoni self-assembly for highly sensitive

strain sensing application[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(9): 1322-1329.
[18] AMJADI M, PICHITPAJONGKIT A, LEE S, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite[J]. ACS Nano, 2014, 8(5): 5154-5163.
[19] LU N, LU C, YANG S, et al. Highly sensitive skin-mountable strain gauges based entirely on elastomers[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(19): 4044-4050.
[20] RYU S, LEE P, CHOU J B, et al. Extremely elastic wearable carbon nanotube fiber strain sensor for monitoring of human motion[J]. ACS Nano, 2015, 9(6): 5929-5936.
[21] HE X, SHEN G, LIANG J, et al. Stretchable strain sensors based on two- and three-dimensional carbonized cotton fabrics for the detection of full range of human motions[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2021, 3(7): 3287-3295.
[22] AMJADI M, YOON Y J, PARK I. Ultra-stretchable and skin-mountable strain sensors using carbon nanotubes-Ecoflex nanocomposites[J]. Nanotechnology, 2015, 26(37): 375501.
[23] QUAN H, ZHANG B Q, ZHAO Q, et al. Facile preparation and thermal degradation studies of graphite nanoplatelets (GNPs) filled thermoplastic polyurethane (TPU) nanocomposites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(9): 1506-1513.
[24] WANG X Z, SUN H L, YUE X Y, et al. A highly stretchable carbon nanotubes/thermoplastic polyurethane fiber-shaped strain sensor with porous structure for human motion monitoring[J]. Composites Science and Technology, 2018, 168: 126-132.
[25] LIN L, CHOI Y, CHEN T, et al. Superhydrophobic and wearable TPU based nanofiber strain sensor with outstanding sensitivity for high-quality body motion monitoring[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 419: 129513.
[26] XIE X, HUANG H, ZHU J, et al. A spirally layered carbon nanotube-graphene/polyurethane composite yarn for highly sensitive and stretchable strain sensor[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 135: 105932.
[27] LI Y H, ZHOU B, ZHENG G Q, et al. Continuously prepared highly conductive and stretchable SWNT/MWNT synergistically composited electrospun thermoplastic polyurethane yarns for wearable sensing[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6(9): 2258-2269.
[28] SALIM A, LIM S. Recent advances in noninvasive flexible and wearable wireless biosensors[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2019, 141: 111422.
[29] JIANG J, BAO B, LI M, et al. Fabrication of transparent multilayer circuits by inkjet printing[J]. Advanced Materials, 2016, 28(7): 1420-1426.
[30] YANG T, LI X, JIANG X, et al. Structural engineering of gold thin films with channel cracks for ultrasensitive strain sensing[J]. Materials Horizons, 2016, 3(3): 248-255.
[31] LEE J, KIM S, LEE J, et al. A stretchable strain sensor based on a metal nanoparticle thin film for human motion detection[J]. Nanoscale, 2014, 6(20): 11932-11939.
[32] HAN X, XIAO W, WEN S, et al. High-performance stretchable strain sensor based on Ag nanoparticles sandwiched between two 3D-printed polyurethane fibrous textiles[J]. Advanced Electronic Materials, 2021, 7(4): 2001242.
[33] SHANG S, YUE Y, WANG X. Piezoresistive strain sensing of carbon black/silicone composites above percolation threshold[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(12): 123910.
[34] HU M, GAO Y, JIANG Y, et al. High-performance strain sensors based on bilayer carbon black/PDMS hybrids[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2021, 4(3): 514-520.
[35] FAN Y J, MENG X S, LI H Y, et al. Stretchable porous carbon nanotube-elastomer hybrid nanocomposite for harvesting mechanical energy[J]. Advanced Materials, 2017, 29(2): 1603115.
[36] NIE M, REN X, WEN L, et al. Highly sensitive and large range strain sensor based on synergetic effects with double conductive layer structures[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 318: 112515.
[37] LI H, CHEN J, CHANG X, et al. A highly stretchable strain sensor with both an ultralow detection limit and an ultrawide sensing range[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(3): 1795-1802.
[38] ZHANG Y, ZHU X, LIU Y, et al. Ultra-stretchable monofilament flexible sensor with low hysteresis and linearity based on MWCNTs/ecoflex composite materials[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2021, 306(8): 2100113.
[39] PAUL S J, ELIZABETH I, GUPTA B K. Ultrasensitive wearable strain sensors based on a VACNT/PDMS thin film for a wide range of human motion monitoring[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(7): 8871-8879.
[40] LEE C, WEI X, KYSAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
[41] 杨文彬, 张丽, 刘菁伟, 等. 石墨烯复合材料的制备及应用研究进展[J]. 材料工程, 2015, 43(3): 91-97.
YANG W B, ZHANG L, LIU J W, et al. Progress in research on preparation and application of graphene composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(3): 91-97.
[42] BANG S, LIM J, CHUN S, et al. A flexible graphene-polydimethylsiloxane nanocomposite force sensor with linear response across a wide pressure detection range[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2019, 19(3): 1630-1634.
[43] LIU H, LI Y, DAI K, et al. Electrically conductive thermoplastic elastomer nanocomposites at ultralow graphene loading levels for strain sensor applications[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2016, 4(1): 157-166.
[44] WANG B, LEE B K, KWAK M J, et al. Graphene/polydimethylsiloxane nanocomposite strain sensor[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(10): 105005.
[45] ZHAO J, WANG G, YANG R, et al. Tunable piezoresistivity of nanographene films for strain sensing[J]. ACS Nano, 2015, 9(2): 1622-1629.
[46] WANG D Y, TAO L Q, LIU Y, et al. High performance flexible strain sensor based on self-locked overlapping graphene sheets

[J]. Nanoscale, 2016, 8(48): 20090-20095.

[47] BOLAND C S, KHAN U, BACKES C, et al. Sensitive, high-strain, high-rate bodily motion sensors based on graphene-rubber composites[J]. ACS Nano, 2014, 8(9):8819-8830.

[48] WU S, LADANI R B, ZHANG J, et al. Strain sensors with adjustable sensitivity by tailoring the microstructure of graphene aerogel/PDMS nanocomposites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(37): 24853-24861.

[49] ZHANG R, HU R, LI X, et al. A bubble-derived strategy to prepare multiple graphene-based porous materials[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(23): 1705879.

[50] PANG Y, TIAN H, TAO L, et al. Flexible, highly sensitive, and wearable pressure and strain sensors with graphene porous network structure[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(40): 26458-26462.

[51] PAN F, CHEN S M, LI Y, et al. 3D graphene films enable simultaneously high sensitivity and large stretchability for strain sensors[J].Advanced Functional Materials,2018, 28(40): 1803221.

[52] SAMAD Y A, LI Y Q, ALHASSAN S M, et al. Novel graphene foam composite with adjustable sensitivity for sensor applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(17): 9195-9202.

[53] YU Y, ZENG J, CHEN C, et al. Three-dimensional compressible and stretchable conductive composites[J]. Advanced Materials, 2014, 26(5): 810-815.

[54] 安飞, 孙冰, 李娜, 等. 三维石墨烯的制备及其在电阻型气体传感器领域的应用[J]. 材料工程, 2020, 48(12): 24-35.
AN F, SUN B, LI N, et al. Research on the fabrication of 3D graphene and its application in chemiresistive gas sensors[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(12): 24-35.

[55] NERI I, LOPEZ-SUAREZ M. Electronic transport modulation on suspended few-layer MoS 2 under strain[J]. Physical Review B, 2018, 97(24): 241408.

[56] ZHU M, DU X, LIU S, et al. A review of strain sensors based on two-dimensional molybdenum disulfide[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(29): 9083-9101.

[57] 齐新, 陈翔, 彭思侃, 等. MXenes二维纳米材料及其在锂离子电池中的应用研究进展[J]. 材料工程, 2019, 47(12): 10-20.
QI X, CHEN X, PENG S K, et al. Research progress on two-dimensional nanomaterials MXenes and their application for lithium-ion batteries[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(12): 10-20.

[58] WU Z, WEI L, TANG S, et al. Recent progress in $Ti_3C_2T_x$ MXene-based flexible pressure sensors[J]. ACS Nano, 2021, 15(12): 18880-18894.

[59] ZHENG Y, LI Y, DAI K, et al. A highly stretchable and stable strain sensor based on hybrid carbon nanofillers/polydimethylsiloxane conductive composites for large human motions monitoring[J]. Composites Science and Technology, 2018, 156: 276-286.

[60] WANG J, ZHANG C, CHEN D, et al. Fabrication of a sensitive strain and pressure sensor from gold nanoparticle-assembled 3D-interconnected graphene microchannel-embedded PDMS[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(46): 51854-51863.

[61] CAI Y, SHEN J, DAI Z, et al. Extraordinarily stretchable all-carbon collaborative nanoarchitectures for epidermal sensors[J]. Advanced Materials, 2017, 29(31): 1606411.

[62] LIU H, GAO J, HUANG W, et al. Electrically conductive strain sensing polyurethane nanocomposites with synergistic carbon nanotubes and graphene bifillers[J]. Nanoscale, 2016, 8(26): 12977-12989.

[63] YOU J, ZHANG J, ZHANG J, et al. Stretchable and highly sensitive strain sensor based on a 2D MXene and 1D whisker carbon nanotube binary composite film[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(50): 55812-55820.

[64] DONG H, SUN J, LIU X, et al. Highly sensitive and stretchable MXene/CNTs/TPU composite strain sensor with bilayer conductive structure for human motion detection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(13): 15504-15516.

[65] ALAM M N, KUMAR V, LEE D J, et al. Synergistically toughened silicone rubber nanocomposites using carbon nanotubes and molybdenum disulfide for stretchable strain sensors[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 259: 110759.

[66] YAN C, WANG J, KANG W, et al. Highly stretchable piezoresistive graphene-nanocellulose nanopaper for strain sensors[J]. Advanced Materials, 2014, 26(13): 2022-2027.

[67] ZHOU C G, SUN W J, JIA L C, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensor with porous segregated conductive network[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(40): 37094-37102.

[68] HE Y, WU D, ZHOU M, et al. Wearable strain sensors based on a porous polydimethylsiloxane hybrid with carbon nanotubes and graphene[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(13): 15572-15583.

[69] MA J, WANG P, CHEN H, et al. Highly sensitive and large-range strain sensor with a self-compensated two-order structure for human motion detection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(8): 8527-8536.

[70] WANG Z, ZHANG L, LIU J, et al. Highly stretchable, sensitive, and transparent strain sensors with a controllable in-plane mesh structure[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(5): 5316-5324.

[71] WANG Y, WANG L, YANG T, et al. Wearable and highly sensitive graphene strain sensors for human motion monitoring[J]. Advanced Functional Materials, 2014, 24(29): 4666-4670.

[72] TANG Y, ZHAO Z, HU H, et al. Highly stretchable and ultrasensitive strain sensor based on reduced graphene oxide microtubes-elastomer composite[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(49): 27432-27439.

[73] YIN B, WEN Y, HONG T, et al. Highly stretchable, ultrasensitive, and wearable strain sensors based on facilely prepared reduced graphene oxide woven fabrics in an ethanol flame[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(37): 32054-32064.

[74] WANG Y, YANG R, SHI Z, et al. Super-elastic graphene ripples for flexible strain sensors[J]. ACS Nano, 2011, 5(5): 3645-3650.

[75] CHU Z, JIAO W, HUANG Y, et al. Superhydrophobic gradient wrinkle strain sensor with ultra-high sensitivity and broad strain range for motion monitoring[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(15): 9634-9643.
[76] NAKAMOTO H, YAMAJI T, HIRATA I, et al. Joint angle measurement by stretchable strain sensor[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2023, 14(11): 14623-14628.
[77] WANG S, CHEN G R, YAO B, et al. *In situ* and intraoperative detection of the ureter injury using a highly sensitive piezoresistive sensor with a tunable porous structure[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(18): 21669-21679.
[78] LEE J, SHIN S, LEE S, et al. Highly sensitive multifilament fiber strain sensors with ultrabroad sensing range for textile electronics[J]. ACS Nano, 2018, 12(5): 4259-4268.
[79] KE K, SANG Z, CHEN X, et al. Tuning mechanical and electrical properties of elastomer composites with hybrid filler network containing graphene for stretchable strain sensors[J]. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(2): 2100703.
[80] ZHU J, WU X, JAN J, et al. Tuning strain sensor performance *via* programmed thin-film crack evolution[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(32): 38105-38113.
[81] LIU X B, LIANG X W, LIN Z Q, et al. Highly sensitive and stretchable strain sensor based on a synergistic hybrid conductive network[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(37): 42420-42429.

基金项目:国家自然科学基金项目(51802296);北京市科技新星计划(Z191100001119102)
收稿日期:2024-03-15;**录用日期**:2024-04-10
通讯作者:王旭东(1980—),男,研究员,博士,研究方向为石墨烯复合材料,联系地址:北京81信箱2分箱(100095),E-mail:netfacn@163.com

(本文责编:齐　新)