

# 机器人软体材料研究进展

张明<sup>1</sup>, 张亦旻<sup>2</sup>, 刘俊亮<sup>1</sup>

1. 扬州大学化学化工学院, 扬州 225002
2. 神户大学系统情报研究科, 日本神户 657-8501

**摘要** 机器人软体材料分为软体驱动材料和软体感知材料, 在仿生机器人中分别起到效应器与感受器的作用。故在制造仿生机器人时, 软体材料的开发越发重要。本文概述了机器人软体材料与软体机器人概念上的差异, 按照软体驱动材料和软体感知材料分别综述了机器人软体材料的发展动态, 并探讨了这两类重要的机器人软体材料研发方面挑战及趋势。

**关键词** 软体材料; 驱动材料; 感知材料; 发展趋势

美国电影《终结者》中施瓦辛格所扮演来自未来世界的机器人杀手 T-800 在金属骨骼外面裹上了生化皮肤和肌肉, 外形与人类非常相似。这种全新的机器人形象让人印象深刻。一直以来, 努力让机器人逼近人类真实行为与情感状态是机器人设计与制造领域的追求与构想。1999 年, 美国国家航空和航天管理局 (NASA) 的 Bar-Cohen<sup>[1]</sup> 提出了基于电活性聚合物材料 (electroactive polymers, EAP) 制造机械手臂的概念, 并在第一届国际光学工程学会 (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, SPIE) 年会上提出用机械手臂与人类扳手腕比赛的挑战构想 (图 1), 历经 6 年, 由 EAP 材料制造的机械手臂与人的第一次扳手腕比赛在美国圣地亚哥举行,



图 1 人工肌肉材料的机械手臂与人扳手腕<sup>[1]</sup>

Fig. 1 An arm wrestling competition between a mechanical arm made of artificial muscles and human arm<sup>[1]</sup>

自此实现了机器人手臂构想<sup>[2]</sup>。之后近 20 年间, 人们对机器人肌肉等软体材料探究与研制付诸了大量努力。随着护理机器人及人工智能等技术的进步, 该领域的发展迎来了新的浪潮。在这一背景下, 本文着眼于机器人软体材料尤其是 EAP 机器人肌肉材料的研制与应用进展, 试图从中探寻机器人软体材料发展趋势及其面临的挑战, 以期为研究人员在此领域的后续研究提供一些思路。

## 1 机器人软体材料

### 1.1 概念

软体机器人一般是指具有结构柔软度高, 环境适应性好, 亲和性强, 功能多样等特点。从仿生机理的角度, 有类似蠕虫、弯曲爬行动物、鱼类游动等几类仿生运动机理及其相应的软体机器人。机器人软体材料则主要是指机器人系统所使用的具有功能性的柔性材料, 尤其是人们在设计外形类似于人类的机器人如护理机器人等类型时, 常常考虑到使用机器人软体材料。它包括机器人肌肉、机器人皮肤以及与肌肉和皮肤相连接, 体现出柔性神经类似功能的机器人柔性传感器材料。总得说, 机器人软体材料不局限于在软体机器人应用, 在其他类似机器人系统也常常需要柔性的机器人软体材料。软体材料在机器人中主要用于制作包括肌肉、皮肤等组织。从功能上看, 可分为软体驱动材料与软体传感材料。前者侧重于在电信号作用下的形变或输出功, 类似于人体的

收稿日期: 2017-07-31; 修回日期: 2017-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51403181)

作者简介: 张明, 教授, 研究方向为高分子复合材料制备与性能, 电子信箱: lxyzhangm@yzu.edu.cn

引用格式: 张明, 张亦旻, 刘俊亮. 机器人软体材料研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(18): 29-38; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.18.003

“效应器”；后者强调对于外部刺激信号的响应,类似于人体的“感受器”(图2<sup>[3]</sup>)。

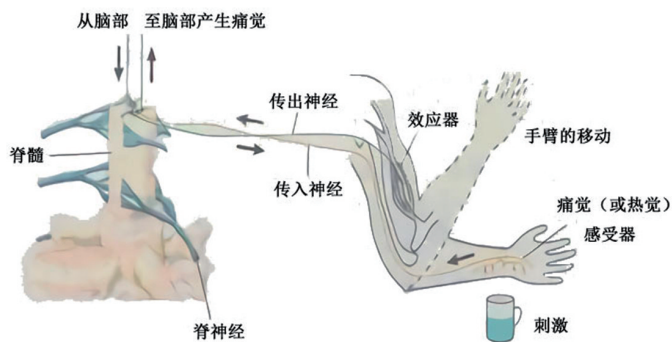


图2 人体反射过程组成与功能实现示意<sup>[3]</sup>

Fig. 2 The units and the functions of human reflex process<sup>[3]</sup>

### 1.2 机器人软体材料的作用

机器人软体材料按照功能特性大体上可分为软体驱动和软体感知材料。软体驱动材料作为电力驱动机器人除了机械驱动之外的一种典型的智能材料驱动,一般依靠形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)、离子聚合物金属复合材料(ionic polymer metal composites, IPMC)及介电弹性体(dielectric elastomers, DE)等这些智能材料通电或者温度变化产生的形变产生驱动力而进行运动。软体感知材料亦可称为仿生皮肤,类似于人的触觉神经系统,感知与外界环境接触的作用点及接触力,从而为机器人路径规划、接触力控制等提供信息,因而在人机交互作业中扮演着十分重要的角色。根据功能结构差异,机器人软体感知材料主要采用压阻式、压电式、磁导式和光学式等结构,获得类似人类皮肤的功能。

不管是软体驱动材料还是软体感知材料,除在功能上存在差异之外,还有一些共同特性,包括:1) 有足够的柔软性,能够在不同外力作用下产生较大的形变,这些形变必须与生物体肌肉和皮肤等组织相似,即容易弯曲和延展;2) 构成材料具有良好的电响应特性,基于材料介电或导电性质,随着材料的形变和受力产生相应的电信号,或者随着电场的变化能够产生相应的形变。

柔性功能器件的开发,推动了软体材料在机器人中的应用。而柔性功能材料的发展,有赖于具有信息传递功能或者动作驱动功能的柔性结构的设计,同时依赖于机器人软体材料研究成果的推动。可以说,机器人软体材料已成为在材料科学、医学、人体行为科学和机器人等多学科交叉研究的一个热点方向。

如上所述,目前可作为机器人软体材料应用的主要包括SMA、IPMC、介电弹性体DE等智能材料。本文偏重于以聚合物为基体的材料介绍,重点关注IPMC和DE等聚合物基柔性材料体系,从这些材料体系的研究状况出发,描述机器人软体材料的发展动态,分析目前存在的瓶颈问题,探究领域的发展趋向。

## 2 机器人软体材料的类型及其发展

### 2.1 离子交换聚合金属材料IPMC

离子聚合物金属复合材料IPMC是一种由阳离子交换膜和金属通过化学镀等方法制作而成的复合材料。最初IPMC是被用作电极材料的。1992年,发现了IPMC源自于IPMC膜内部平衡离子的迁移导致在外加电场条件下能获得较大的形变和张力特性(图3):当对IPMC膜施加电压后,薄膜将向阳极弯曲,并且弯曲的程度与电压、频率、波形等均有关系;反过来,当对IPMC施加弯曲形变时,则相应地在厚度方向产生一个电压差<sup>[4-5]</sup>。在外加电场较低时,形变量可达10%。基于低驱动电压即能产生较大的位移变形特性及其逆效应,人们很快就设想并努力将其用在机器人领域。

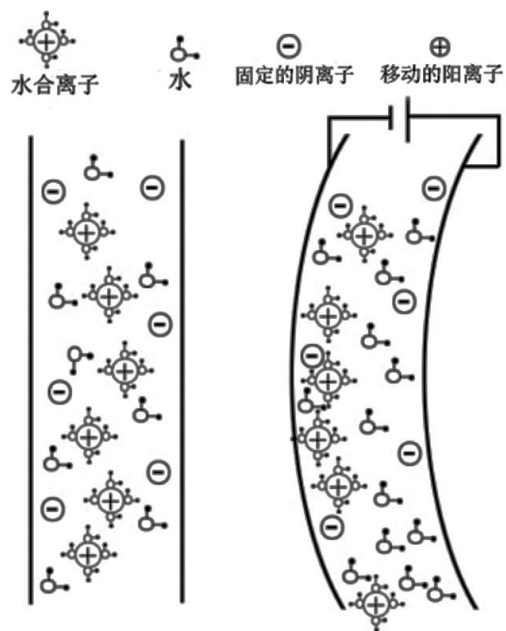
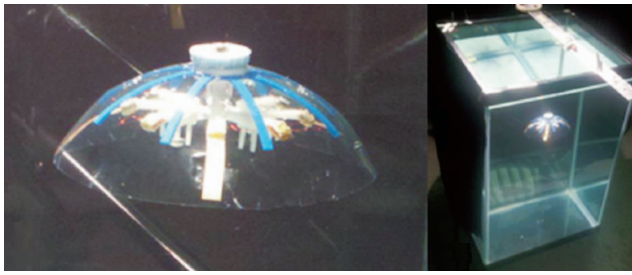


图3 离子聚合物金属复合材料IPMC电致动原理<sup>[4-5]</sup>

Fig. 3 Mechanism and electro-mechanical principle of IPMC

IPMC是较多应用于机器人结构部件中的软体材料,从轻质的机器人手臂末端夹持器、泳动机器人推进器以及仿生机器人设计,在各类新型结构或器件中IPMC的应用层出不穷。2012年,美国弗吉尼亚理工学院Najem等<sup>[6]</sup>用IPMC作为驱动器,以维多利亚多管发光水母为原型,设计制作了仿生机器人水母。该仿生机器人水母重20 g、直径15 cm、高5.8 cm,有一个可热缩的高分子膜构成的柔韧腔体,一个中心柱,一个用于接线和支撑驱动器的平台,8个用于保持上部稳定的桅杆和呈放射状的IPMC驱动器(物理样机见图4)。基于IPMC材料在电场作用下会产生弯曲变形,构建这种驱动器来模拟水母腔体的收缩和扩张过程,实现了类似水母运动的功能,但遗憾的是该机器人水母的速度很低,只有0.77 mm/s。

IPMC自身制造复杂,所能提供的驱动力十分有限,运行功耗,非线性形变过程与形变量还不够高;对温度、湿度敏感等问题也给IPMC作为机器人软体材料的使用带来了很大限

图4 IPMC 仿生水母器件<sup>[6]</sup>Fig. 4 Schematic diagram of IPMC bionic jellyfish device<sup>[6]</sup>

制。控制精度、运动范围有限以及 IPMC 材料需在含水条件下工作的要求,对于电子器件设计而言存有诸多不便。

另外,IPMC 作为软体传感器使用时,通常可以制作成电阻型柔性传感器或者电容型柔性传感器;而当其作为驱动材料应用时,一般需制备成由柔性电极与 IPMC 电致形变材料构成“三明治”结构。因此,在 IPMC 材料的外表面常需使用具有良好压电性、热释电性、压阻性的聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)膜材料作为其柔性电极,增加了工艺复杂性。同时, PVDF 可以弯曲变形,但是延展变形量却很有限。在大形变柔性电极开发上尚需更深入研究。

## 2.2 介电弹性体

介电弹性体(dielectric elastomers, DE)是有高介电常数的弹性体材料,在施加外电场的条件下改变形状或体积;撤销外加电场后能够恢复到原来的形状或体积。这个过程伴随着应力和应变的产生,从而实现电能向机械能转化。这种在外加电场的作用下,通过材料内部结构的改变而伸缩、弯曲、束紧或膨胀的性能,与生物肌肉十分相似。另外,介电弹性体具有超大变形、超快响应速度、高弹性性能密度、高机电转化效率、良好的负载匹配性、超强的环境适用性、高疲劳寿命以及优异的仿生性能等特点。故而,介电弹性体被认为是制造机器人肌肉等主动驱动器最有潜力的电活性聚合物材料。国外早在 20 世纪 40 年代就开始相关研究,国内在该领域的研究起步相对较晚,最近 10 余年才真正取得进展,至今这方面研究依然相当活跃。

介电弹性体驱动器的致动机理可以简化为平板电容器(图 5):介电弹性体的上下表面涂敷上柔性电极后,施加电压,电极之间异性电荷产生的静电引力在膜厚方向挤压弹性膜,水平方向同性电荷的静电斥力则在单位电极上扩张薄膜,从而诱导厚度减小,面积扩大;撤去外加电压,弹性体薄膜便回复到原来的形状。当介电弹性体的结构为理想结构时,电极作用在弹性体上所产生的电致形变与电场强度间的关系为  $S_z = -\epsilon_0 \epsilon E_z^2 / Y$ , 式中  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon$  为材料相对介电常数,  $E$  为外加电场强度,  $Y$  为材料杨氏模量。介电弹性体上下相互平行的电极在电场中产生 Maxwell 应力(静电力),从而使介电弹性体材料产生形变。如果将这种“三明治”式基础电致形变材料设计成各种形状,在电场驱动下就会产生

相应的动作,实现类似于生物肌肉作用。

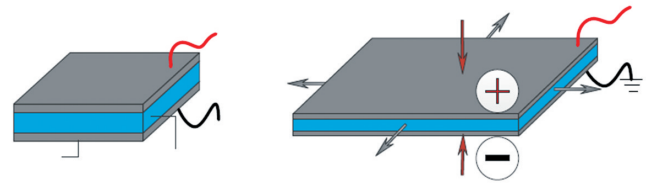


图5 介电弹性体电致形变原理示意

Fig. 5 Electro-deformation of dielectric elastomer

围绕介电弹性体综合性能的提升,众多研究主要集中在介电弹性体基体研究,用于介电弹性体基体填充颗粒的研究,以及相应的复合和改性方法研究,并且取得了一系列成果。张立群团队<sup>[7-10]</sup>研究了通过控制介电弹性体交联密度,添加增塑剂,在橡胶中接入短链基团等方法来控制制备高介电性能、低交联密度、低模量的材料,在较低场强下,产生了较大的电致形变。国外一些研究团队进行了通过对硅橡胶改性以提高介电性能的研究<sup>[11-13]</sup>。高介电填料的使用目前被认为是提高材料电致形变效应的有效途径之一。然而,介电填料的大量使用势必带来诸多不利影响。例如,在橡胶中加入高介电常数的 BaTiO<sub>3</sub> 填充材料,材料整体的介电常数大幅度提升的同时,也引起了杨氏模量急剧上升,从而影响到材料的电致形变性能<sup>[14-16]</sup>。党智敏课题组通过对 BaTiO<sub>3</sub>、炭黑与硅橡胶三相复合材料合成进行研究,降低了 BaTiO<sub>3</sub> 填料带来的模量上升的影响,从而降低了材料的驱动电压和介电损耗<sup>[17-18]</sup>。Carpi 等则在选用 TiO<sub>2</sub> 作为橡胶的填充粒子,在材料模量不显著提升的条件下,提高了材料的介电常数<sup>[19-21]</sup>。Nuchnapa 等<sup>[22]</sup>合成了天然橡胶/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的复合材料,在外加电场 200 V/mm 时便可发生明显弯曲变形。如果使用石墨、铜钛膏等导电材料作为填料,在导电材料含量达到阈值时,材料介电常数会明显上升,但相应介电损耗也会明显上升,击穿电压下降很严重<sup>[23-25]</sup>。在此方面,张明课题组<sup>[26-28]</sup>从弹性体改性、高介电常数填料以及基体与介电颗粒复合相结构控制做了大量的努力。研究发现:采用不同尺度高介电常数钛酸铜钙无机颗粒填充硅橡胶弹性体,可获得高介电常数、低介电损耗和高电致形变的介电弹性体。同体积填充率、不同粒径的钛酸铜钙填充在导致介电弹性体弹性模量增加与介电常数增加上呈相反的趋势,说明此类介电弹性体在优化弹性模量与电致响应上存在颗粒尺度与填充相结构的平衡关系,这给介电弹性体电致形变与输出功率的设计以适应机器人软体驱动型材料使用提供了思路<sup>[26]</sup>。利用低含量  $\pi$ -共轭三聚茛小分子改性有机硅介电弹性体得到三聚茛/硅橡胶复合材料,弹性模量仅稍微增加,保持着良好的柔性,电致形变量达 11.56%,是原基体的 2.6 倍<sup>[27]</sup>;将质量分数为 0.0125% 多壁碳纳米管经剪切分散填充硅橡胶弹性体,在几乎不改变复合弹性体的弹性模量下,介电常数提升至 4.38,低电场(9 V/ $\mu\text{m}$ )电致形变量为 17.61%,展现出很好的电致形变效果<sup>[28]</sup>。

在介电弹性体设计与开发过程中,目前研究工作主要集中在于电致形变效应的提升,这在软体传感材料上有潜在的应用可能性,但在软体驱动材料可输出功特性的提升方面的工作还进展不多。目前研究的介电弹性体驱动器仍需在较高电场(高达 150 MV/m)才能产生较大的电致形变,这将严重影响对介电弹性体实现实际使用的性能要求。实现小驱动电压下产生大的机械输出性能,获得性能可靠介电弹性体,成为开发可广泛应用于微驱动技术的首要关键问题。提高材料的介电常数及降低材料的模量,可在更低的场强下达到相同的形变。同样,在相同的场强条件下,可以提高介电弹性体驱动器的应变响应。大量填充无机填料势必显著提高弹性体的杨氏模量,会严重降低弹性体固有的力学变形能力,导致电致应变过小。解决这一矛盾的策略包括:开发高介电常数低模量的本体介电弹性体;改善介电填料在基体中的分散同时填充增塑剂以降低弹性体的模量;采用高介电常数液体填充聚合物基体在提高介电常数同时降低杨氏模量。相同填充量情况下选择微米颗粒作为无机介电填料,采用预拉伸以提高电致形变效果等都是提高介电弹性体性能的方法。另外,由于在配合介电弹性体软体驱动亦或是作为软体感应材料的柔性电极的设计还未得到实质突破,使得在软体材料电致响应特性测试以及器件结构设计上存在极大限制。

### 2.3 柔性电极设计

机器人无论在软体驱动器或软体感应器设计过程中,配合施加电场使用的导电电极是一类重要的材料。另外,在目标物检测,触觉感应及指纹识别等技术发展,带动了应力传感器的快速发展。其中以橡胶基为典型的高分子柔性电极由于可恢复性强而受到关注。然而,在导电性、韧性及形变量等方面的不足给导电橡胶的应用带来了局限。基于无机碳材料或金属材料在导电性上的优势,产生通过填充导电相与高分子复合的设计思路。通过此种复合,不仅提高了复合材料的导电性,在一定程度上也实现了对基体增韧改性<sup>[29]</sup>。

为了增加导电橡胶的导电性,增加导电组分相对含量是一个有效手段,但随着导电组分的增加,橡胶的模量快速升高,伸长率下降,失去了弹性体的特征性能优势。为此,需要通过新型纳米填充体及纳米结构设计,改善橡胶的导电性以及形变过程导电性的稳定性。鲍哲楠团队<sup>[30]</sup>设计了一款透明、可拉伸的感受器(图6)。它可以重复使用而不会起皱,每次触碰后都会立即回复原状。他们首先向一硅材料表面喷洒一层碳纳米管材料,随后对其进行反复拉伸,最终这些碳纳米管定向排列成了“弹簧状”。这种弹簧可以向任意方向拉伸,这一过程中可以测量施加在材料上力的大小,并且多次反复拉伸都不会导致其结构破坏。



图6 透明、可拉伸的类皮肤感受器<sup>[30]</sup>

Fig. 6 Transparent stretchable skin-like sensors<sup>[30]</sup>

其后,他们在硅模板上制作阵列状硅橡胶,并在表面修饰氧化铟锡/聚酯(ITO/PET)导电层。该制备工艺简单,易于大面积制备,并且所得到的多层复合导电材料具有响应快、灵敏度高等特点,有类似人工皮肤的作用,可作为介电层集成到有机场效应晶体管中构建主动探测器,显示出不错的应用前景(图7)<sup>[31]</sup>。最近他们利用聚合物纳米受限持续地改善聚合物的可拉伸性,而不影响电荷传输能力的概念,研究结果表明他们通过将聚合物链受限在纳米尺度范围,大大降低

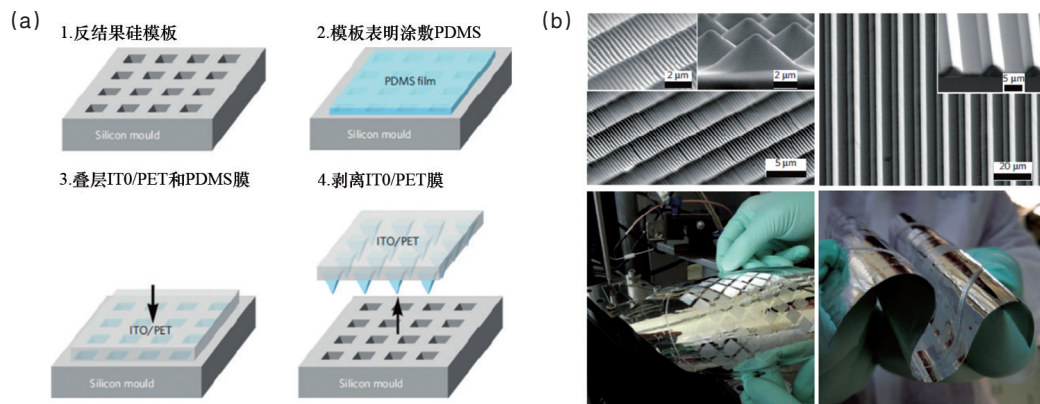


图7 多层复合导电材料制备及其在人工皮肤中的应用<sup>[31]</sup>

Fig. 7 Fabrication of Multi-layered composite films and its application as artificial skins

了共轭高分子的模量,并极大地延缓了应变条件下裂纹的产生,从而所得到的半导体复合膜可拉伸至100%,并不改变其传输能力,在此基础上,他们设计了手指穿戴类似皮肤的驱动器,可驱动发光二极管(图8)。这一研究成果已在《Science》上发表<sup>[32]</sup>。

石高全团队利用含石墨烯的水凝胶涂覆拉伸形变100%的橡胶表面,制备了鱼鳞状拉伸传感器。这种应变传感器制备工艺简单、低廉易于放大,所制备传感器适用于拉伸或弯曲变形探测,探测变形范围达82%,高灵敏度至16.2~150,非常低的形变探测限(<0.1%)以及高的可靠性与稳定性(大于

5000循环),可用于人体运动的全范围探测(图9)<sup>[33]</sup>。另外,他们改进工作,使得最大形变量可达到150%,进一步拓展了形变测试范围,但是在高形变条件下的电-力信号尚不够稳定<sup>[34]</sup>。

Dagdeviren等<sup>[35]</sup>将超薄无机压电和半导体材料组装在橡胶衬底设计了一种可变形的铅钛酸铅感应器。该感应器可放大、低滞后测试皮肤表面压力,其灵敏度可至约0.005 Pa,响应时间约0.1 ms。由此设计的血压监测试验表明该材料可通过浅表血管中血压变化反映出主动脉增强指数以及脉搏情况(图10)。

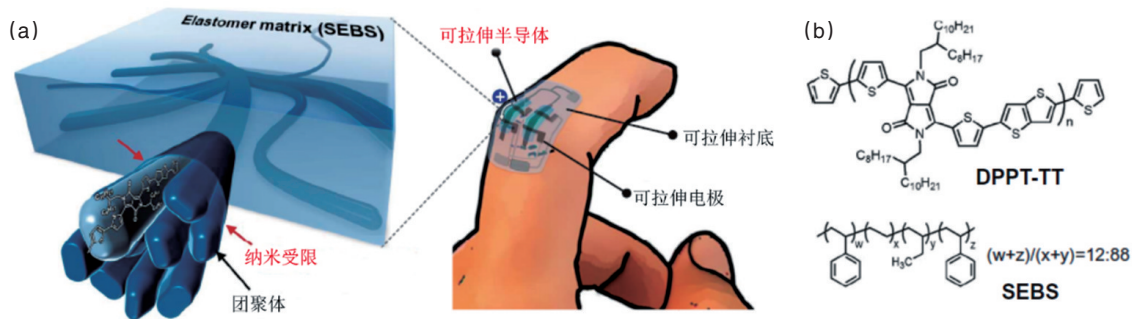


图8 手指穿戴类似皮肤的高分子半导体膜<sup>[32]</sup>

Fig. 8 Soft and conformable wearable skin-like polymer semiconducting film

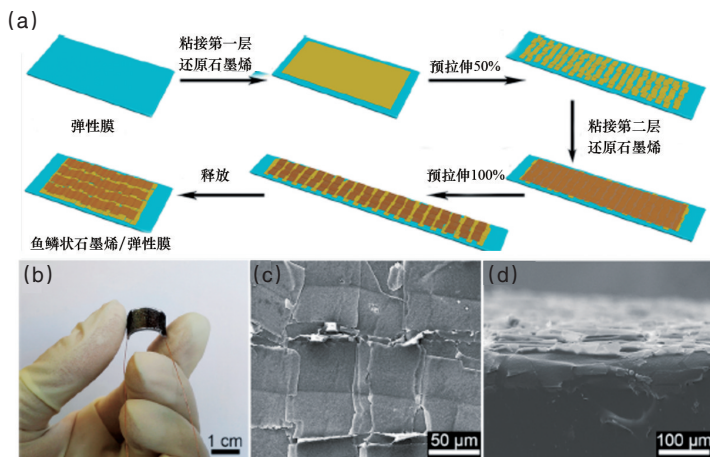


图9 鱼鳞状拉伸传感器的制备与结构<sup>[33]</sup>

Fig. 9 Schematic diagram of fabrication and structure of a fish-scale-like graphene strain sensor

以上报道的传感器材料均可作为机器人软体材料使用。大量研究多集中在高灵敏度(微应力响应)、高导电性和高响应回复能力的提升上,并取得了可喜的成果。而在机器人关节、机械应变等进行测试和应用所需要的在大应力下具有大形变特点的导电橡胶研究方面所取得的突破则不明显。

传统的应变式电阻传感器是利用金属导体或半导体材料的应变电阻效应制成的一种测量器件,是测量应变的最主

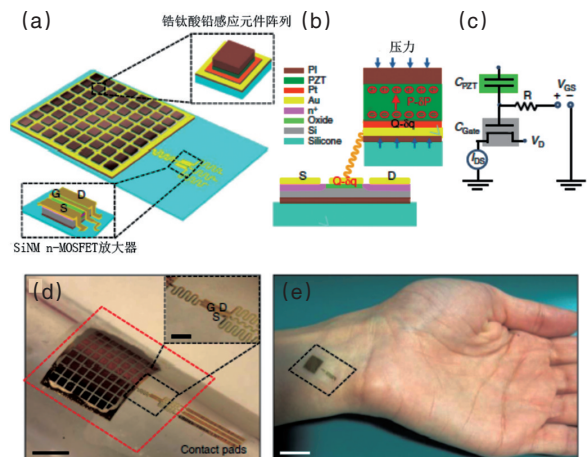


图10 可变形的铅钛酸铅感应器及其在血压监测中的应用<sup>[35]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram and photographs of a thin conformable piezoelectric pressure sensors made of lead zirconate titanate

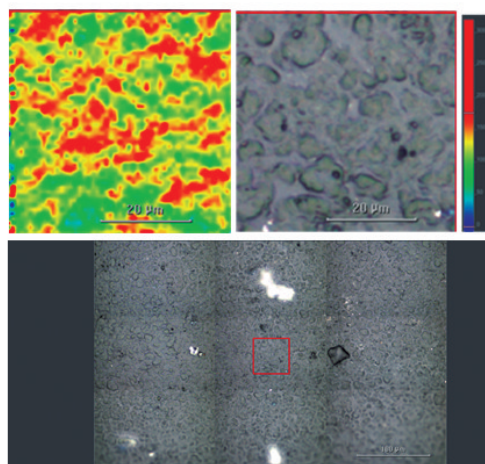
要手段,也是目前测量力、力矩、压力、加速度等物理量应用最广泛的传感器。但是这些材料均只能感测微小的机械变化,变形一般只能是原尺寸的0.1%~1%量级,对于大应变或位移,需要利用传动装置将其变小才能予以处理。开展导电橡胶应变电阻效应的研究,利用导电橡胶的应变电阻效应及力-电阻效应,可以制作超大应变的传感元件及大变形传感器,或作为机器人皮肤,直接测量机器人关节、机械手等应变

或力值。

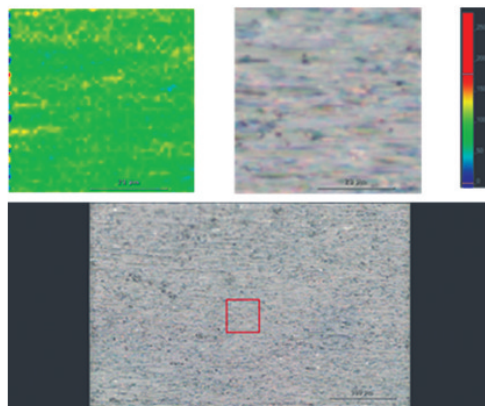
普通导电橡胶大都是通过通过在橡胶基体中掺入导电填料组分而形成。以填充碳组分导电橡胶作为柔性传感器的研究也逐渐展开<sup>[36-37]</sup>。日本大高秀夫等利用长度为300 μm以上的碳纳米管复合导电橡胶制成了可大形变拉伸的柔性导电电极<sup>[38]</sup>。但是应用300 μm以上长度的碳纳米管作原料使得产品成本很高,不利于产业化。通常情况下,为了增加导电性,势必增加导电相含量。随着导电组分的增加,导电橡胶的模量升高,回弹性、伸长率、柔软性等性能将会变差。似乎在利用填充导电组分制备导电橡胶的情况下,良好的弹性体特性和高导电性不可兼得已经成为不能突破的魔咒。

如果选择导电聚合物作为橡胶的导电相,考虑到导电高分子与橡胶的相容性,可在一定程度上达到导电性与大形变性能的兼容。因此,利用导电聚合物作为导电相填充橡胶基体成为制造大形变导电橡胶的一个不错思路。聚苯胺作为一种典型的导电聚合物,具有导电性良好、制备容易、成本低廉的特点,受到人们的关注。有不少团队研究过利用聚苯胺作为导电填料研制导电橡胶,并取得了一定效果<sup>[39-40]</sup>。然而由于所采用的聚苯胺多为磨细的聚合物,实际与橡胶体系形成的大多仍为橡塑共混乃至颗粒填充结构。这使得这类聚苯胺填充橡胶体系中同样出现与普通导电填料相类似的伴随着导电填料增加弹性体特性下降的两难局面。所以,如若能将聚苯胺与橡胶体系在小尺度均匀分散乃至分子级别的共混,是实现保证良好导电特性的前提下降低导电相填充量,保持橡胶大形变特性的关键。近来,张明课题组利用可溶性的十二烷基苯磺酸掺杂聚苯胺与热塑性弹性体(SEBS)在甲苯共溶条件下获得大形变导电橡胶。虽然聚苯胺在SEBS基体中并不一定是以分子状态相溶,但是表观分散均匀,掺杂聚苯胺组分以微米的尺度均匀分散在橡胶基体中,没有团聚现象(图11)。在填充SEBS重量分数15%的聚苯胺之后,黑色的聚苯胺分散在连续相里以及两相界面附近,形成了导电网络。随着聚苯胺的加入,硬段相变得更小。这种相结构类似热塑性IPN物理交联网络互穿体系的结构特征。这使得所制备橡胶具有良好的导电性与优异的综合力学性能<sup>[41-42]</sup>。制备的拉伸型电阻传感器在伸长率达到600%时仍能保持2.66 kΩ的较低电阻,随着橡胶的拉伸-回缩过程,其电阻率在一定范围内呈现有规律的变化(图12)。但是,这种导电橡胶在拉伸-回缩速度较慢时,会产生一定的电阻恢复迟滞现象(图13)。为了减少迟滞现象对拉伸型传感器信号的影响,利用这种可以产生大形变的导电橡胶作为柔性电极用以制备拉伸型电容(图14)。

拉伸型电容随着拉伸-回缩大形变,可以测试到显著的规律变化的电容值(图15)。这种在大形变条件下保持较好导电性的导电橡胶,既可以制成大形变电阻型传感器,也可以制备成大形变柔性电极。为设计研发具有大形变、优良导电橡胶以及衍生的大形变柔性传感器方面的工作提供了一种新型材料思路。



(a) 25 phr PANI/SEBS 样条在拉伸率0%下的拉曼图像



(b) PANI/SEBS 样条在拉伸率200%下的拉曼图像

图11 PANI/SEBS 导电橡胶受拉伸条件下的拉曼图像  
Fig. 11 Raman images of PANI/SEBS conductive rubber under tensile conditions

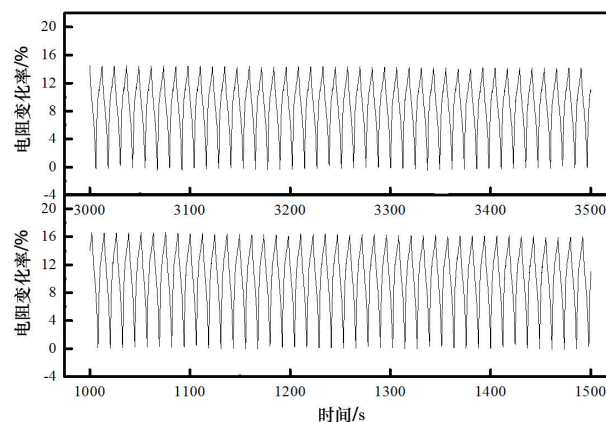


图12 25 phr PANI/SEBS 样条在拉伸率80%~160%范围内相对电阻变化率与时间关系

Fig. 12 The electrical resistance of PANI/SEBS with PANI content of 25 phr as a function of time in the tensile ratio range from 80% to 160%

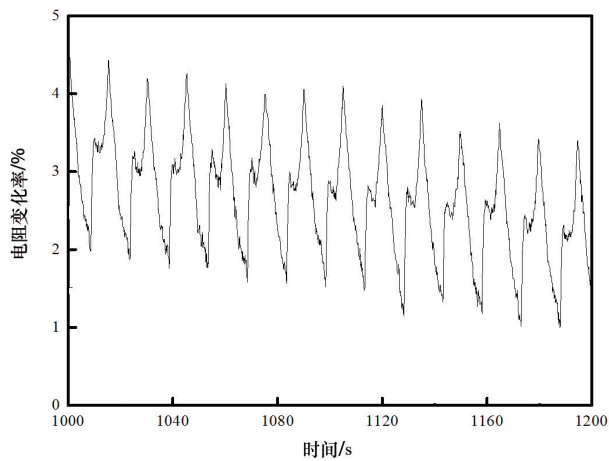


图 13 25 phr PANI/SEBS 样条在拉伸率 0~100% 内电阻变化率与时间的关系

Fig. 13 The electrical resistance of PANI/SEBS with PANI content of 25 phr as a function of time in the tensile ratio range from 0 to 100%

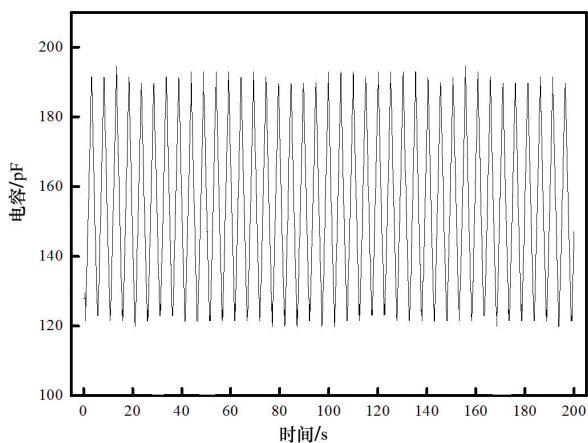


图 15 拉伸率 0~100% 电容型传感器的拉伸-回缩信号

Fig. 15 Capacitance of capacitive sensor as a function of tensile time in the tensile ratio range of 0 to 100%

### 3 机器人软体材料发展趋向与关键问题

在未来相当长的一段时间内,随着人口老龄化的加剧,生产、制造业的高自动、智能化以及人们对于健康的关注,对机器人动作的拟人化以及反应的敏感性等方面的要求会越来越高。动作复杂性和功能多样性将成为这一个领域中的追求。为此,对机器人软体材料发展的要求势必迎来更高的研究浪潮。

目前人们所关注的各种分子结构合成的敏感导电橡胶和石墨烯、长纳米碳管复合以及共溶法聚苯胺复合的导电软体材料都是制备机器人软体传感材料的可能选项。要将导电橡胶等机器人软体材料作为应变敏感导电材料进行应用,则需要达到比较好的精度。即要求柔性传感器能够感知被测量的变化并且不失真地将其转换为相应的电信号。对

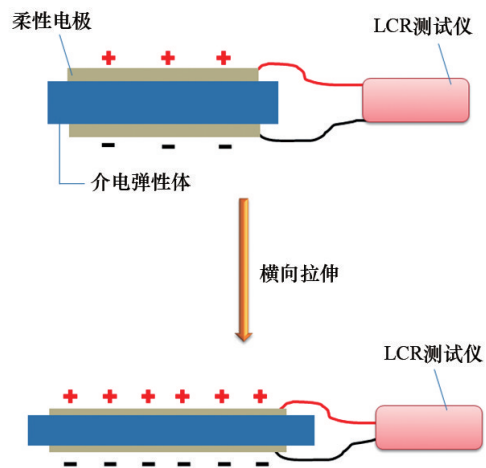


图 14 横向拉伸后,介电弹性体平行板电容器示意

Fig. 14 Schematic diagram of dielectric elastomer capacitor under transverse tension

于静态或缓慢变化的信号,需要研究柔性材料作为应变敏感材料的静态特性的性能指标。主要为考察线性度、灵敏度、迟滞性、重复性、稳定性、量程等以及各种参数变化与材料结构与组成之间的关系。对于动态信号测量,需要对柔性材料的力学-温度-时间-电学之间复杂关系进行深入研究和测试,在此基础上进行材料的系列化研制,以满足静态测试、不同频率动态测试、短时或长时测试的需要。由于机器人软体材料的应变效应可以根据需要调整和设计,改变功能材料结构在柔性材料基体中的分布浓度、分布区域、微纳米导电相的比例等,其相应参数及电路特性得到相应变化。再对电阻系数或电阻率、标称电阻值、电阻的温度系数、灵敏系数、应变电阻的线性等基本参数进行设计优化,从而实现软体材料结构设计和性能可控调节,并保证器件的稳定性和可靠性。

作为机器人软体驱动材料的电致形变材料还面临另外的一系列问题亟待解决。首要关键问题之一就是实现小驱动电压下产生大的机械输出性能。从介电弹性体驱动器原理中可以看出,提高材料的介电常数及降低材料的模量,可在更低的场强下达到相同的形变;同样,在相同的场强条件下,可提高介电弹性体驱动器的应变响应。要开发高介电常数低模量的本体介电弹性体,采用高介电常数液体填充聚合物基体在提高介电常数同时降低杨氏模量,在相同质量份情况下要选择粒径较大的微米颗粒作为无机介电填料。然而,介电弹性体模量过低又会引起最大负载过小,影响介电弹性体材料的力学输出性能。因此,如果能够获得在较高电场下产生较大形变的材料也应该是一个不错的选择。这就要求这种新型软体材料能够承受较高电压下长期工作的条件。在高电场下,高分子材料的各项性能指标长期稳定也是一个非常具有挑战性的课题。需要解决材料在高电场下被极化、因电磁效应引起环境温度变化对材料性能的影响、材料的老

化和性能劣化对材料各项参数的影响等等问题。

期望机器人软体材料能够尽快实现应用的参照对象就是生物学概念的肌肉。生物学肌肉  $1\text{ cm}^2$  大约有  $5\text{ kg}$  拉力, 可以收缩到拉伸长度的  $60\%$ , 而其转换效率超过  $90\%$ , 能够可靠运行上亿次。生物学肌肉之所以可以达到超强的拉力和超高转换效率主要原因是使用了腺苷三磷酸 (adenosine triphosphate, ATP) 化学能驱动, 这种化学能比通常的物理能高  $1\sim 2$  个数量级。现在研究的机器人软体材料在某些单一性能方面可能比较有特点, 但是要达到真正生物学肌肉的性能还相差太远。不过, 现在可以将机器人软体材料作为仿生器械材料和物理器械材料进行研发应用。实际上, 目前机器人仿生器械和物理器械的研究成果已经取得了不少的积累, 但可实际上能作为机器人肌肉和传感器的软体材料成果相对较少, 尤其是系列化、系统化的基础研究数据还很缺乏。例如, 现在工业上主要原料如金属、陶瓷、橡塑等材料都可以通过相关手册查到大部分材料的基本理化和力学性能参数, 从而使得工程师在设计产品时可以得心应手的进行选择。而作为新兴机器人产业所需要的可以作为驱动和传感器件使用的软体材料的基本特性数据还处于不稳定不完善的研究文献阶段。像软体材料在不同环境下的理化性能变化这种基础的研究工作就很少有人去做。研究者们为了获得有显示度的成果, 往往把精力放在具有优异性能特性的材料或者重大创新的技术研究方面。对于需要做大量艰苦细致而且繁琐工作才能获得的海量基础数据库的创建工作缺少介入的动力。企业界和国家的研究基金目前还没有在这种基础工作方面有明显投入。所以, 虽然机器人软体材料的研究成果在快速积累, 在仿生器械和物理器械方面的应用也存在厚积薄发机会。但是, 要真正普遍应用到产业上还需要一个过程和重大的推动力。

#### 4 结论

无论软体驱动材料还是软体感知材料, 要实际应用到机器人身上还有很长的道路要走, 这需要一个非常系统和庞大的工作量。这项工作在给人们带来无限希望和遐想的同时, 也带来了实质性的挑战。这不仅是科学界面临的问题, 也是产业界面临的问题。研究出具有应用前景的软体材料可能比实际应用这种新材料相对要容易。实际应用软体材料, 需要更多的人从各方面去研究和了解这类材料。需要建立庞大的材料结构和性能的大数据库, 需要在长期试验和实际应用过程中去检验其稳定性和可靠性。需要企业投入, 产品规模化后产生的效应才能使得材料的成本下降到工业上可以正常使用的程度。相信在众多科学家与产业专家的共同努力之下, 必将不断攻克机器人软体材料中的各类瓶颈问题。可以期待机器人软体材料将进入可应用的工业产品目录。

就机器人软体材料而言, 各国并没有真正实现产业化。中国在机器人软体材料的研究和开发方面与国际领先水平

的差距并不大。如果可以加大基础研究和应用技术研发的投入, 尽早获得系列化实际应用的技术和数据, 将为机器人软体材料的产业化奠定基础。随着护理机器人等“似人型”机器人的普及使用, 机器人软体材料必将迎来产业化春天。

#### 参考文献 (References)

- [1] Barcohen Y. Worldwide electroactive polymers (artificial muscle) news-letter[J]. EAP Newsletter, 1999, 1(2): 1-12.
- [2] Worldwide electroactive polymers (EAP) newsletter[J]. EAP Newsletter, 2005, 7(1): 1-26.
- [3] 科学(八年级上册)[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2013: 106.  
The course of Science (Grad Eight)[M]. Hangzhou: Zhejiang Education Publication, 2013: 106.
- [4] Shahinpoor M. Conceptual design, kinematics and dynamics of swimming robotic structures using ionic polymeric gel muscles[J]. Smart Materials & Structures, 1992, 1(1): 91-94.
- [5] Segalman D, Witkowski W, Adolf D, et al. Electrically-controlled polymeric gels as active materials in adaptive structures[C]. Active materials and adaptive structures conference, Alexandria V A, November 5-7, 1991.
- [6] Najem J, Leo D J. A bio-inspired bell kinematics design of a jellyfish robot using ionic polymer metal composites actuators[C]// Proceeding of Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2012. Bellingham: SPIE, 2012, doi: 10.1117/12.915170.
- [7] Liu H, Zhang L, Yang D, et al. Mechanical, dielectric and actuated strain of silicone elastomer filled with various types of  $\text{TiO}_2$ [J]. Soft Materials, 2013, 11(3):363-370.
- [8] Yang D, Tian M, Kang H, et al. New polyester dielectric elastomer with large actuated strain at low electric field[J]. Materials Letters, 2012, 76(6): 229-232.
- [9] Yang D, Tian M, Dong Y, et al. Disclosed dielectric and electromechanical properties of hydrogenated nitrile-butadiene dielectric elastomer[J]. Smart Materials & Structures, 2012, 21(3): 035017.
- [10] Liu H, Zhang L, Yang D, et al. A new kind of electro-active polymer composite composed of silicone elastomer and polyethylene glycol[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2012, 45(48): 485303.
- [11] Vucong T, Jeanmistrail C, Sylvestre A. Impact of the nature of the compliant electrodes on the dielectric constant of acrylic and silicone electroactive polymers[J]. Smart Materials & Structures, 2012, 21(10): 5036.
- [12] Carpi F, Gallone G, Galantini F, et al. Silicone-Poly(hexylthiophene) blends as elastomers with enhanced electromechanical transduction properties[J]. Advanced Functional Materials, 2010, 18(2): 235-241.
- [13] Carpi F, De Rossi D. Enhancement of electromechanical transduction properties of a silicone elastomer by blending with a conjugated polymer[C]// Proceeding of Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008. Bellingham: SPIE, 2008, doi: 10.1117/12.776641.
- [14] Liu Y J, Leng J S, Zhang Z. New silicone dielectric elastomers with a high dielectric constant[C]//Proceeding of Modeling, Signal Processing, and Control for Smart Structures 2008. Bellingham: SPIE, 2008, doi: 10.1117/12.775989.
- [15] Jung K, Lee J H, Cho M S, et al. Development of enhanced synthetic rubber for energy efficient polymer actuators[J]. Smart Structures & Materials Electroactive Polymer Actuators & Devices, 2006, 6168(2):

- 61680N-61680N-9.
- [16] Liu Y, Liu L, Zhang Z, et al. Dielectric elastomer film actuators: Characterization, experiment and analysis[J]. *Smart Materials & Structures*, 2009, 18(9), doi: 10.1088/0964-1726/18/9/095024.
- [17] Zhao H, Xia Y J, Dang Z M, et al. Composition dependence of dielectric properties, elastic modulus, and electroactivity in (carbon black-BaTiO<sub>3</sub>)/silicone rubber nanocomposites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 127(6): 4440-4445.
- [18] Dang Z M, Xia B, Yao S H, et al. High-dielectric-permittivity high-elasticity three-component nanocomposites with low percolation threshold and low dielectric loss[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(4), doi: 10.1063/1.3072355.
- [19] Carpi F, Rossi D D. Improvement of electromechanical actuating performances of a silicone dielectric elastomer by dispersion of titanium dioxide powder[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2005, 12(4): 835-843.
- [20] Ouyang G, Wang K, Chen X Y. TiO<sub>2</sub> nanoparticles modified polydimethylsiloxane with fast response time and increased dielectric constant[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2012, 22(7): 74002-74010.
- [21] Mathew G, Rhee J M, Nah C, et al. Effects of silicone rubber on properties of dielectric acrylate elastomer actuator[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2006, 46(10): 1455-1460.
- [22] Tangboriboon N, Datsanae S, Onthong A, et al. Electromechanical responses of dielectric elastomer composite actuators based on natural rubber and alumina[J]. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2012, 45(45): 143-161.
- [23] Cameron C G, Underhill R S. Conductive filler-elastomer composites for Maxwell stress actuator applications[C]//Proceeding of Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD). Bellingham: SPIE, 2004, doi: 10.1117/12.539733.
- [24] Huang C, Zhang Q M, Debotton G, et al. All-organic dielectric-percolative three-component composite materials with high electromechanical response[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(22): 4391-4393.
- [25] Zhang Q M, Li H, Poh M, et al. An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant[J]. *Nature*, 2002, 419(6904): 284-287.
- [26] Wang G L, Zhang Y Y, Duan L, et al. Property reinforcement of silicone dielectric elastomers filled with self-prepared calcium copper titanate particles[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(39), doi: 10.1002/app.42613.
- [27] Wang G L, Zhang Y Y, Duan L, et al. Preparation of  $\pi$ -conjugated truxene/silicone dielectric elastomers with large actuated strain at low electric field[J]. *Materials Letters*, 2016, 169: 157-159.
- [28] Wang G L, Duan L, Ding K H, et al. Property reinforcement of acrylonitrile-butadiene-styrene by simultaneous incorporation of carbon nanotubes and self-prepared copper particles[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(13), doi: 10.1002/app.41738.
- [29] Hu B, Chen W, Zhou J. High performance flexible sensor based on inorganic nanomaterials[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2013, 176(1): 522-533.
- [30] Lipomi D J, Vosgueritchian M, Tee B C, et al. Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(12): 788-792.
- [31] Mannsfeld S C B, Tee C K, Stoltenberg R M, et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(10): 859-864.
- [32] Xu J, Wang S, Wang G N, et al. Highly stretchable polymer semiconductor films through the nanoconfinement effect[J]. *Science*, 2017, 355(6320): 59-64.
- [33] Liu Q, Chen J, Li Y, et al. High-performance strain sensors with fish-scale-like graphene-sensing layers for full-range detection of human motions[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(8): 7901-7906.
- [34] Xu J, Chen J, Zhang M, et al. Highly conductive stretchable electrodes prepared by in situ reduction of wavy graphene oxide films coated on elastic tapes[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2016, 2(6): 1600022.
- [35] Dagdeviren C, Su Y, Joe P, et al. Conformable amplified lead zirconate titanate sensors with enhanced piezoelectric response for cutaneous pressure monitoring[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(7697): 4496.
- [36] 仇月仙, 李斌. 导电橡胶复合材料温敏特性研究[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(12): 6-10.  
Zhang Yuexian, Li Bin, Research on thermal sensitive characteristics of conductive rubber polymer composites[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(12): 6-10.
- [37] 田合雷, 刘平, 郭小辉, 等. 基于导电橡胶的柔性压力/温度复合感知系统[J]. *传感器与微系统*, 2015, 34(10): 100-103.  
Tian Helei, Liu Ping, Guo Xiaoping, et al. Flexible pressure /temperature composite perceptual system based on conductive rubber[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(10): 100-103.
- [38] 大高秀夫, 金子加津寛. 静電容量型センサシート及び静電容量型センサ: WO 2014157627 A1[P], 2014.  
Hideo Otake, Kaneko Hiroshi Kazu. An electrostatic capacity type sensor and capacitance type sensor sheet: WO 2014157627 A1[P]. 2014.
- [39] Silva M J D, Sanches A O, Malmonge L F, et al. Electrical, mechanical, and thermal analysis of natural rubber/polyaniline-Dbsa composite [J]. *Materials Research*, 2014, 17(8): 1131-1143.
- [40] Massoumi B, Farjadbeg F, Mohammadi R, et al. Synthesis of conductive adhesives based on epoxy resin/nanopolyaniline and chloroprene rubber/nanopolyaniline: Characterization of thermal, mechanical and electrical properties[J]. *Journal of Composite Materials*, 2013, 47(9): 1185-1195.
- [41] 张明, 王根林, 张翔, 等. 一种高介电聚苯胺/弹性体复合材料的制备方法: CN106832733A[P]. 2017-06-13.  
Zhang Ming, Wang Genlin, Zhang Xiang, et al. A method for preparing PANI/elastomer composite with high dielectric constant: CN106832733A[P]. 2017-06-13.
- [42] 张明, 王根林, 张杰, 等. 一种可拉伸聚苯胺/弹性体导电复合材料的制备方法: CN106832920A[P]. 2017-06-13.  
Zhang Ming, Wang Genlin, Zhang Jie, et al. A technique for fabricating stretchable PANI/elastomer conductive composite: CN106832920A [P]. 2017-06-13.

## Soft materials for artificial robot

ZHANG Ming<sup>1</sup>, ZHANG Yiyang<sup>2</sup>, LIU Junliang<sup>1</sup>

1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China

2. School of System Informatics, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan

**Abstract** Generally, soft materials for design and manufacture of bionic robots include the soft driving and sensing materials, as the receptor and the effector, respectively. The development of novel soft materials with high performance is very important. This paper reviews the conception of soft materials for bionic robots and the research development of the soft driving materials and sensing materials, including many examples in this area. The challenges and the future trend of this research field are discussed.

**Keywords** soft materials; driving materials; sensing materials; research trends

(责任编辑 刘志远)

## 欢迎参加中国科协举办的第二届全国企业创新方法大赛

由中国科协主办,中国科协企业创新服务中心、天津市科协承办的“第二届全国企业创新方法大赛”,将于2017年12月在天津举行,欢迎积极参加。

### 1) 竞赛内容。

技术创新方法(占比80%)和管理创新方法(占比20%)的理论测试,创新方法在创新项目中的实际应用。

### 2) 大赛流程。

初赛阶段:2017年9月15日至11月15日为地方、行业初赛组织阶段。地方、行业初赛由各省、自治区、直辖市科协,新疆生产建设兵团科协及相关全国学会参照大赛组织方案自行组织。组委会将根据地方、行业初赛报名结果按比例分配进入全国总决赛的名额并予以公布。

总决赛阶段:2017年12月7—9日为全国总决赛阶段,设创新方法理论测试、项目展示、擂台赛3个环节。

### 3) 参赛报名。

参加地方、行业初赛的参赛队(项目)需在线报名,具体报名请登录大赛官方网站www.cxffds.com。

其他未尽事宜请关注大赛官网后续通告。

大赛组委会联系人:赵悠扬,李晓青

电话:010-65085830

传真:010-62177307

电子邮箱:cxffds@163.com

官网技术支持联系人:

李涛,029-88851145,15991604073

崔强,029-88851145,15529356020