

· 综述 ·

人形机器人用高分子材料研究进展

朱桂英¹ 刘春艳² 邓宝¹ 刘博恩² 夏鹏程¹ 李鹏娟² 雷军¹ 徐家壮^{1*}

(¹四川大学高分子科学与工程学院 先进高分子材料全国重点实验室 成都 610065)

(²上海中镭新材料科技有限公司 上海 201306)

摘要 人形机器人是实现具身智能的关键物理载体,发展潜力和应用前景巨大.高分子材料具有低密度、高比强度、易加工及功能可设计性等优势,已逐渐用于人形机器人的承重与功能部件.本文综述了近年来高分子材料在人形机器人中的研究成果.重点围绕轻量化骨骼结构材料、仿生皮肤材料、智能感知-驱动材料的关键性能需求,阐述其在微观结构设计、功能网络构建、制备加工方法及构效关系等方面的研究进展.最后,对该领域面临的挑战及发展方向进行了探讨与总结.

关键词 人形机器人;高分子材料;骨骼材料;皮肤材料;感知-驱动材料

引用: 朱桂英,刘春艳,邓宝,刘博恩,夏鹏程,李鹏娟,雷军,徐家壮.人形机器人用高分子材料研究进展.高分子学报, doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26044.

Citation: Zhu, G. Y.; Liu, C. Y.; Deng, B.; Liu, B. E.; Xia, P. C.; Li, P. J.; Lei, J.; Xu, J. Z. Research progress in polymers for humanoid robots. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26044.

人形机器人是指具有类人形态结构与运动特征的智能机器人系统^[1-3].作为具身智能的物理实体,人形机器人融合了人工智能、高端制造、新材料等前沿技术,正成为新一轮科技革命和产业变革的重要载体^[4].在当前全球科技竞争与产业转型的背景下,发展人形机器人已被世界各大国家纳入战略布局,以推动产业升级、塑造未来经济与社会发展模式^[5].

人形机器人不仅能替代人类执行高重复性与高危险性的操作,显著提升生产效率与作业安全性,更能利用其类人外形与多模态感知能力,实现复杂环境的自主适应与智能协同^[6,7].为适应多场景的应用需求,人形机器人的材料体系需满足严苛的性能要求:在承重方面,材料面临高力学性能与轻量化矛盾,人形机器人每成功减重10%~15%,其理论续航能力可提升20%~30%,然而现有材料力学性能存在明显不足,制约上述

目标实现^[8];在感知与人机交互方面,需具有应力、温度、触觉等多模态传感特性的功能材料,并兼具自适应乃至仿生触感的外观与表面特性.作为高度集成的系统,人形机器人整机性能依赖于材料在结构承载、信号感知与动作执行等多重功能上的协同适配,对材料提出了轻质高强、耐磨柔韧、多功能集成等差异化需求,这对传统金属或无机材料构成了重大挑战.

高分子材料具有密度低、结构与功能可设计性强等优势,在人形机器人骨骼系统与仿生皮肤中备受关注.例如,纤维增强高分子复合材料在保持与铝合金相当或更高强度的同时,密度降低约30%~70%,显著提升比强度^[9].在柔性高分子基体(如聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等)中构建功能网络(如导电网络、导热网络、磁响应网络等),制备了兼具感知与响应的仿生皮肤材料.此外,高分子材料具备优

2026-02-06 收稿, 2026-03-20 录用, 网络出版.

基金项目: 国家科技重大专项(项目号 2025ZD0619300)、四川省科技计划(项目号 2026NSFSCZY0067).

* 通信联系人, E-mail: jzxu@scu.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2026.26044; CSTR: 32057.14.GFZXB.2026.7589

异的加工适配性,使其易通过3D打印、熔融沉积成型、注射成型等先进赋形技术,实现材料微观结构的调控与复杂几何构型的定制化制备,从而更好地满足人形机器人关键部件对材料性能与形状的多样化需求.高分子材料已成为推动人形机器人向结构轻量化、精准感知与交互发展的关键材料.

本文综述了高分子材料在人形机器人领域中的应用进展,重点阐述轻量化骨骼结构材料、仿生智能皮肤材料及感知-驱动一体化材料的设计原理与性能特点,以期为人形机器人的材料创新与系统集成提供参考.

1 轻量化骨骼结构材料

1.1 高强度高模量承重材料

人形机器人骨骼的高动态负载特性,对承重材料的比强度、比模量及疲劳耐久性均提出了高要求^[10].纤维增强高分子复合材料,特别是以工程高分子或特种工程高分子为基体的纤维增强材料,为人形机器人骨骼结构的轻量化与高动态负载能力提供了重要途径.该材料体系常以聚醚醚酮(PEEK)、聚苯硫醚(PPS)、尼龙等基体为连续相,以碳纤维、玻璃纤维等为增强相^[8],通过二者协同作用,使材料在保持金属级强度的同时,大幅降低密度.目前,波士顿动力Atlas、本田ASIMO、特斯拉Optimus、宇树科技Walker等人形机器人在其躯干主承力框架、肩部或腿部等承重部件中已逐步采用碳纤维增强高分子复合材料^[8].

连续碳纤维(CF)增强复合材料可大幅提升承载能力.Wang等^[11]采用连续CF/PEEK替代传统CF粉状或短切纤维改性的PEEK复合材料,使强度和模量提高了2倍以上.当纤维体积含量为70%时,弯曲强度达950 MPa,弯曲模量达74 GPa,适用于承受高负载、复杂曲率的承力部件.

仿生结构与多级微观结构设计优化能在显著降低部件重量的同时,提高弯曲强度、抗冲击性能等多方面性能.Elasswad等^[8]采用3D打印技术,通过CF增强热塑性树脂蒙皮结合聚酰胺芯层设计成夹芯结构,构建了可变柔性脚.该结构不仅通过优化夹芯厚度比与一体化成型实现减重,还采用材料分区域功能布局,使整体弯曲强

度提高3倍.还在机器人后跟处引入柔性材料单元,提高了冲击吸能能力.Sleiman等^[12]在聚乳酸(PLA)外壳内铺设液压管路,用体积分数为10%的CF增强环氧树脂包裹,制备了轻量化复合机械臂雏形.Abdellatif等^[8]采用玻璃纤维增强聚酰胺通过3D打印一体化在其内部构筑复杂液压流道,并以CF/环氧树脂复合材料作为外部增强层,得到双层复合结构.该设计实现液压流道与结构承压功能一体化,在保持承重15 MPa的条件下,将部件重量降低了60%.Zhu等^[13]为电驱液压人形机器人的腿部设计了具有仿生梯度蜂窝结构(基材由PEEK组成),其大腿采用均匀的蜂窝构型,而小腿仿照人体骨骼结构,设计为外密内疏的梯度蜂窝构型(图1(a)),使腿部总重量降低21.28%,在能抵抗多向冲击性的同时,可支撑机器人完成10 km/h奔跑与300 mm越障等动态任务.

1.2 高耐磨关节与传动材料

人形机器人的关节需在高速、高负载工况下往复运动,长期面临磨损、疲劳及摩擦生热等方面的挑战.因此,相应材料需在满足轻量化的同时,兼具高耐磨与抗疲劳特性.Yu等^[14]采用熔融沉积成型(FDM),制备了聚四氟乙烯(PTFE)/PEEK复合多孔轴承自润滑材料.该设计利用PTFE相提供固体自润滑性降低磨损,同时,多孔结构具有储油、减重与促进散热能力.通过优化工艺窗口(如喷嘴温度和直径等),该复合材料的拉伸强度达60~80 MPa.Hao等^[15]提出了一种用于柔性机械臂的紧凑型低惯性关节.其以3D打印刚性光固化树脂为刚性骨架,以编织钢缆为肌腱,并在外部包裹了一层嵌入光纤光栅传感器的预拉伸硅胶护套.该关节无需润滑能实现两自由度运动,并能通过调节肌腱预紧力主动改变刚度.在承受数倍于自身重量的负载时呈现良好的顺应与抗干扰性能.Wen等^[16]基于张拉整体原理设计了机器人仿生膝关节(图1(b)).该结构采用Snelson-X型弹簧-连杆单元实现刚柔耦合与自恢复.利用四杆锁死与绳索地面触发解锁,通过单电机驱动可完成连续步态,振动阻尼较传统关节增加29%~38%.

微观结构的精细化设计可进一步调控机器人关节的刚度,以提高负载自适应能力.Lu等^[17]通过注射成型制备了具有扇形柱中空结构的聚氨酯

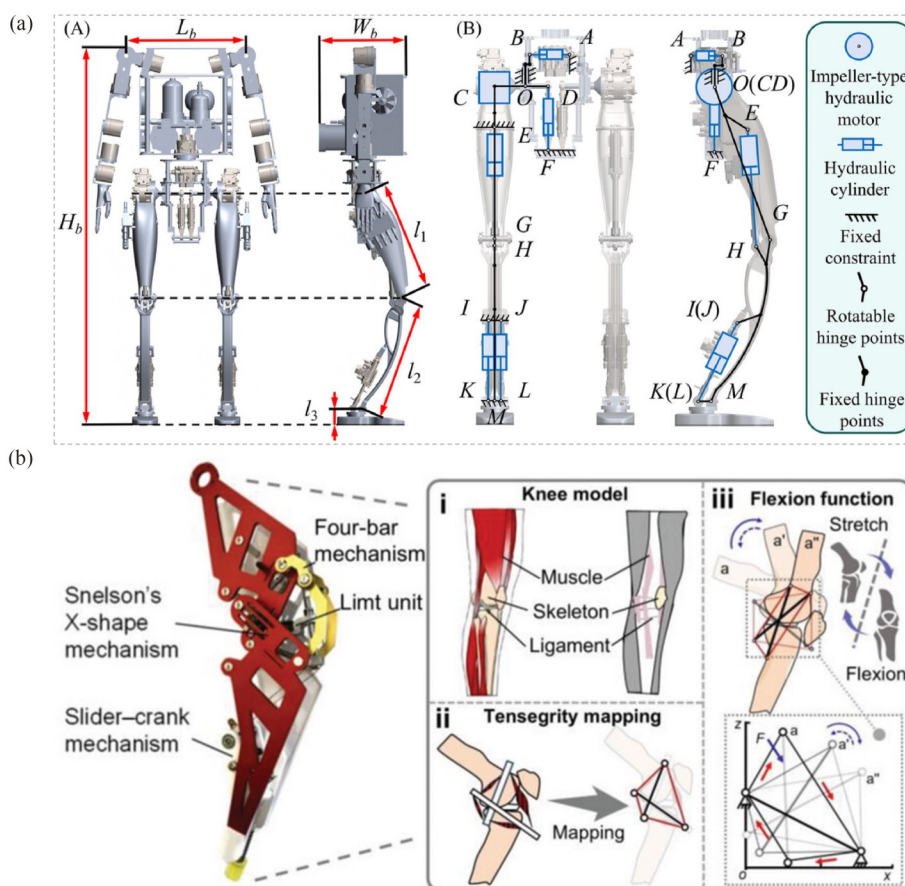


Fig. 1 (a) Schematic diagram of the overall robot configuration and leg actuator layout (Reprinted with permission from Ref. [13]; Copyright (2025) John Wiley and Sons. License Number: 6190101328400). (b) Schematic diagrams of the robot knee joint model, the tensegrity mapping process, and the biomimetic realization of flexion (Reprinted from Ref. [16] under the CC BY 4.0 license; see the license at: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

(PU)弹性体柔性骨架，作为关节的承力部件。该设计通过驱动部件的相对旋转改变扇形柱的重叠面积，实现关节刚度的动态调节(刚度变化比达191.58%，负载自重比为10.42)。Hao等^[18]开发了一种基于绳索-弹簧驱动与张力反馈的可控刚度机器人关节。该关节通过远端电机与内置张力传感器完成闭环控制，利用绳索预紧力连接刚性部件，避免了滑动摩擦，在承重180 g的条件下实现了两自由度运动与实时刚度调节。

2 智能柔性皮肤材料

2.1 单模态传感柔性电子皮肤材料

电子皮肤是模仿人体皮肤而设计的柔性触觉传感器系统^[19,20]，基于材料的电阻、电容或压电等电学特性，将外界的形变、压力及温度等物理刺激转换为电信号^[21,22]。需要皮肤材料具备高灵敏度、宽响应范围、快速响应能力及良好的柔韧性等功能与性能。

形变传感通过在弹性基体中(如PDMS、热塑性聚氨酯(TPU)等)构建导电网络，使其拓扑结构与基体形变耦合，将拉伸、弯曲等力学信号转换为电阻或电容的规律性电信号。Gong等^[23]在PU海绵骨架表面逐层涂覆银纳米线形成三维导电网络，再与羧基铁颗粒及可调控交联密度的PDMS复合，制备了兼具拉伸、压缩与磁响应的导电磁流变弹性体。该结构利用三维导电网络随骨架同步变形，通过交联密度调节基体链段运动，在20%拉伸与10%压缩下电阻变化率分别为91.8%和67.6%，在428 mT磁场中电阻变化为100%，实现形变与磁场的多场耦合传感。

压力传感在弹性基体中构建可压缩搭接的导电网络，当受压时网络变形产生电阻变化。Canavese等^[24]利用表面具有纳米尖端的镍粉在PDMS中构建隧穿型导电网络，通过尖端场增强效应使电阻在受压时变化9个数量级，响应时间为50 ms，在300~900 kPa范围内稳定响应。Stassi

等^[25]调控带有尖刺形貌的铜粉在PDMS中的含量及复合层厚度,使材料在未受压时保持绝缘(电阻 $>100\text{ M}\Omega$),在 2 MPa 压力下电阻变化达8个数量级,并可通过厚度调节灵敏度和工作压力范围.

温度传感主要通过2种机制实现,一是利用高分子基体的热膨胀效应改变其内部导电网络的连通性,引起电阻变化;二是利用热电材料的塞贝克效应,将温度梯度直接转换为电压信号.Li等^[26]利用石墨烯(GR)/PDMS复合材料的电阻-温度特性,结合黄原胶电解质层,构建了“人工热

痛觉感受器”(图2).该器件利用黄原胶电解质层在温度调控下的质子迁移行为,将热刺激映射为类似神经系统的信号增强与记忆效应,模拟人体高温痛觉的阈值触发等仿生感知特性.Chen等^[27]利用选择性过滤工艺在柔性聚酰亚胺(PI)基底上直接集成p型单壁碳纳米管(SWCNT)与n型碲化铋(Bi_2Te_3),制得无接头p-n结热电单元.该一体化结构避免了传统 π 型热电堆中连接材料叠层组装产生的界面损耗,有效降低了器件的电阻与热阻.该器件在 $<1\text{ cm}^2$ 范围内响应速度 $<0.1\text{ s}$,使机器人手臂具有热感知功能.

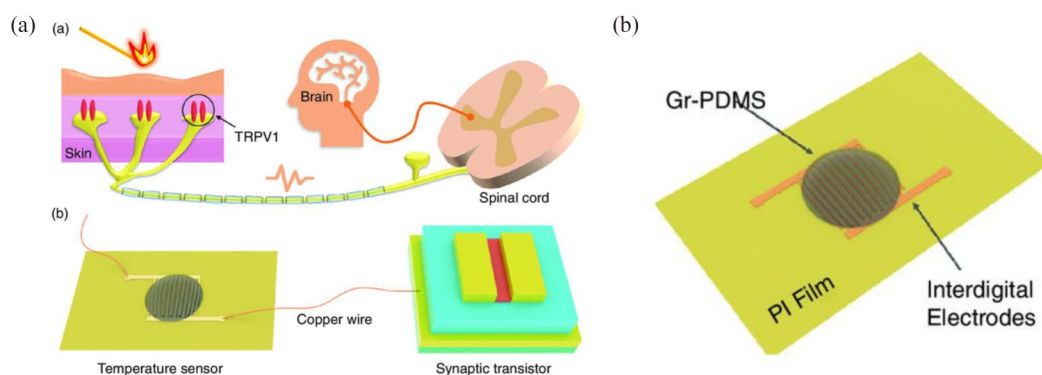


Fig. 2 Schematic of (a) the thermal nociceptor structure and (b) the corresponding temperature sensor, both based on graphite-PDMS composites (Reprinted from Ref. [26] under the CC BY 4.0 license; see the license at: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

可拉伸电子皮肤材料在高动态形变部位(如指关节)的贴合与信号感知方面受到了广泛关注.Yaragalla等^[28]在丁腈橡胶(NBR)基底上喷涂以天然橡胶为黏结剂的GR和碳纳米纤维复合导电材料,使二者在硫化前形成高结合力与共形拉伸,构建了电容式触觉传感器,其在50%拉伸下电流值下降约50%.Ullah等^[29]对聚酯-棉混纺织物多轴预拉伸取向,再在其表面喷涂碳纳米管(CNT),形成兼具导电性与结构适应性的应变传感层.该结构通过预拉伸缓解了后续形变引起的导电网络断裂,使传感器在50%拉伸应变下灵敏度为113%、响应速度78 ms.

2.2 多模态传感电子皮肤材料

为突破单一信号感知的限制,多模态传感电子皮肤材料已成为柔性电子与机器人领域研究的重点.该材料能同步检测温度、压力、湿度等2种及以上外部刺激并能解耦信号.根据集成的感知维度,可分为双模态与全模态感知.

双模态感知指实现2种不同类型物理信号

(如压力-温度、形变-温度等)的同步获取与解耦.Gao等^[30]在壳聚糖改性PDMS多孔泡沫中均匀负载MXene,形成了兼具高导电与隔热特性的三维复合结构.该传感器基于热电效应与压阻效应可分别实现对温度与压力的独立检测.Yuan等^[31]利用离子液体(IL)修饰CNT,并诱导聚(3,4-乙烯二氧噻吩)(PEDOT)与聚苯乙烯磺酸盐(PSS)相分离,制备了热电与压阻双模响应的纳米复合薄膜.Gautham等^[32]采用逐层涂覆在弹性织物表面构建PEDOT:PSS导电包覆层,再与钛箔组装,开发出一种基于摩擦伏特效应的自驱动仿生触觉材料.该材料利用滑动过程中肖特基界面内电子-空穴对的激发与分离机制,直接输出与相对运动速度相关的直流电信号,实时感知滑移等动态触觉刺激.进一步,其与ITO-PET电容式力传感器垂直集成后可在单一器件中原位、同步地区分动态滑移信号与静态法向压力.

全模态感知主要指能集成3种及以上感知维度和识别,以应对高度复杂作业场景.Zhao等^[33]

采用定向冷冻与退火技术,制备了具有波纹层状纳米结构的还原氧化GR/纤维素纳米晶复合碳气凝胶,将其封装在硅橡胶弹性体支撑层与聚乙烯薄膜之间,构建了一体化的多功能触觉传感器(图3(a)).该材料可同步感知人形机器人手指所受压力、温度与摩擦电信号,其压力检测范围为0.04~100 kPa,响应时间为11 ms,并结合机器学习算法,可实现厨房常见食材及模拟火星地形中岩石、沙土、干河床等多种地貌类别识别.Ge等^[34]采用垂直堆叠结构,在PI柔性基底与PDMS封装层之间依次集成CB/PDMS压敏层、溅射镍温敏层及聚偏氟乙烯/聚乙烯醇/氯化锂(PVDF/PVA/LiCl)湿敏薄膜,开发了多层多功能电子皮肤(图3(b)).该设计通过物理分离各传感功能层与独立信号采集,可同步检测压力(0~30 N)、温度(20~120 °C)、湿度(20%~70% RH)及接近距离(0~100 mm).将其集成于机械臂后,可借助机器学习将绝缘物体接近识别准确率从18%提升至88%.Dai等^[35]报道了一种光/电融合人工皮肤,以PDMS为基底,将CNT修饰的多孔PU海绵夹于两层指纹状螺旋电极之间构成压阻式触觉传感单元,并在周围嵌入六根环形排布的激发光纤与一根中心采集光纤,形成触觉-光学集成传感结构.该设计利用CNT海绵的压缩形变检测力学信号,同时借助光纤网络获取近红外光谱,可同步、原位采集目标的力学与化学信息,在眼科无创检测与果实成熟度评估等场景具有应用潜力(图3(c)).Cao等^[36]构建了全可回收四模态电子皮肤,以TPU为柔性基底,依次集成丝网印刷银电极、PVA/离子液体温敏层、自合成乙醇可溶聚氨酯(ES-PU)绝缘层及具有微金字塔结构的银浆-ES-PU导电层,实现了热接近、热触摸、力感知与接近感知功能.

2.3 自修复与动态自适应电子皮肤材料

为保障人形机器人在复杂交互场景下的可靠运行,智能电子皮肤材料还需具备损伤自修复和动态自适应性能^[37].动态化学键的可逆作用或分子链的结构重构,常用于设计自修复电子皮肤材料.Khatib等^[18]将银纳米线、炭黑(CB)和SWCNT引入以动态共价交联的自修复PDMS中,所制备的电子皮肤在微小损伤后,可于30 s内自修复并通过重建导电网络实现温度、压力及pH传感性能的快速恢复.Zhao等^[38]利用聚乙烯吡咯烷酮与

没食子酸间的多重氢键作用,制备了一种可注射、自黏附的水凝胶.该材料在无外界刺激条件下可在30 s内实现自修复,自修复效率>90%,并具备良好的生物相容性与导电性.

受生物自愈与保护机制启发(如植物创口封闭与动物皮肤再生),发展了一系列耐高温、抗穿刺、适应腐蚀环境的皮肤材料.Cao等^[39]制备了具有湿度响应且自黏附的蚕丝/GR复合皮肤材料,利用Ca²⁺的强水合作用与GR阻燃协同,实现了火情警报和主动防火.Shepherd等^[40]利用软光刻技术在短切聚芳酰胺纤维/硅胶复合材料上制备了具有准波纹管褶皱结构的气动致动器皮肤,在保持整体韧性的同时,抑制了裂纹的萌生与扩展,能在穿刺损伤时自封闭.

近年来,发展了“全功能一体化”智能皮肤材料,主要是集成自修复、耐极端环境、多模态感知与能量自供给等关键功能.Guo等^[41]在水/甘油二元溶剂中,以两性离子单体[3-(甲基丙烯酸氨基)丙基]二甲基(3-磺丙基)氢氧化铵内盐(MH)与丙烯酸(AA)为共聚前驱体,在铋离子存在下通过光聚合构筑了具有有机/金属铋离子协同架构的多功能水凝胶(COMBIA)(图4(a)和4(b)).该体系中,铋离子与MH/AA共聚物链上的羧基(来自AA单元)、磺酸基(来自MH单元)等形成强配位键,并结合氢键、静电相互作用等多种可逆非共价键,形成了能量尺度跨越2个数量级的动态交联网络,其自修复效率为91%,拉伸率>5400%,并具备多模态感知性能.Liu等^[42]针对高盐度及水下环境,通过受限界面聚合反应在丙烯腈-甲基丙烯酸-二甲氨基丙基甲基丙烯酸酯共聚水凝胶表面构筑疏水烷基链屏障,形成“疏水外层-导电内层”的类似皮肤异质结构,使水凝胶在海水环境中保持95%的自修复能力.Gao等^[43]报道了神经形态电子皮肤(NRE皮肤),其采用PEDOT:PSS/PDMS压阻传感层与多层电路集成,通过压敏环振将压力转换为脉冲频率,并利用脉冲形状、宽度与幅度的三级分层编码,在单通道内实现多点触觉定位(图4(c)).NRE皮肤集成了主动疼痛感知与损伤自检定位功能,支持模块化更换.对于“感知-判断-响应”一体化自适应的策略推动了人形机器人从环境适应向主动交互的升级.

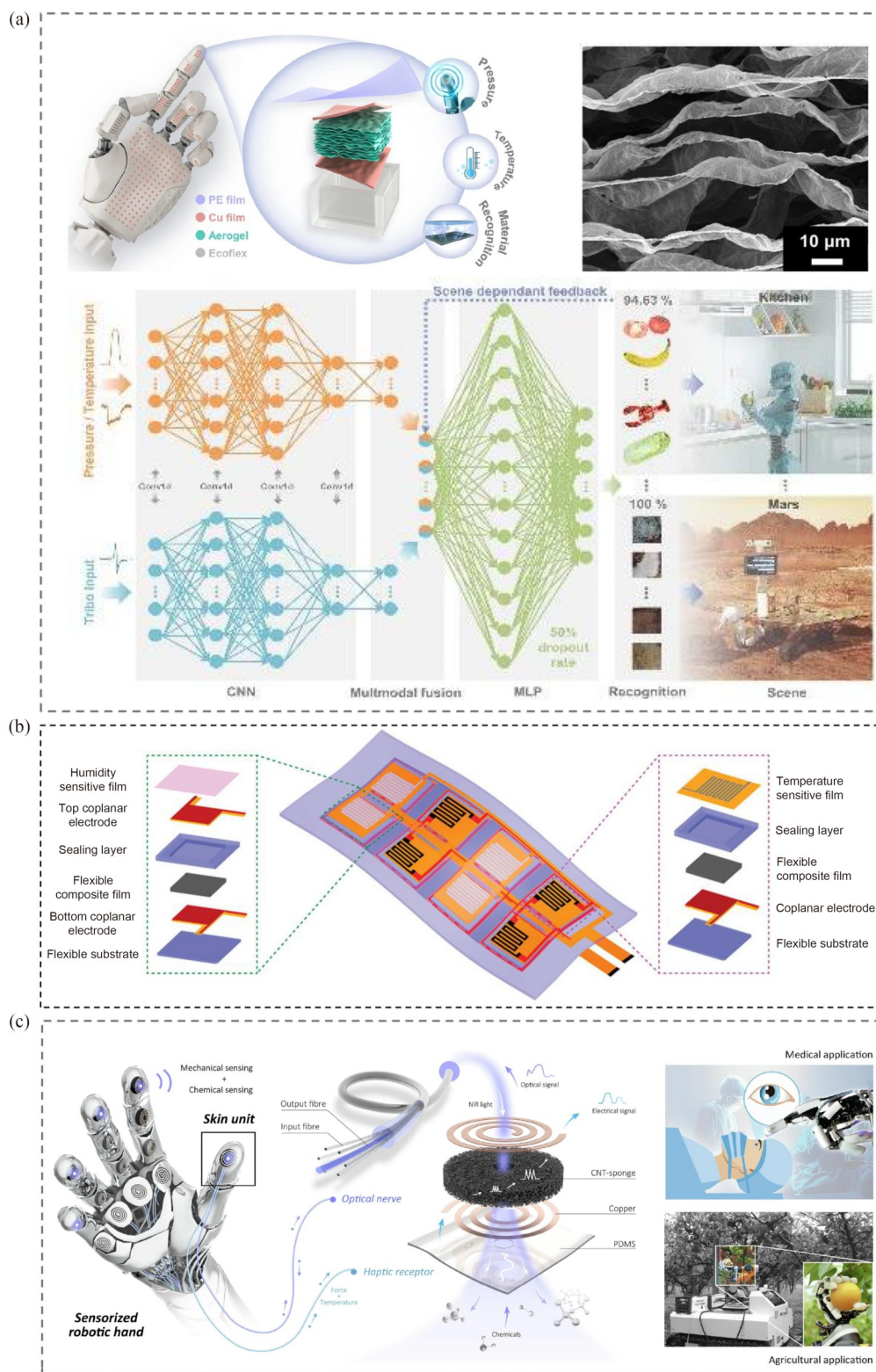


Fig. 3 (a) Schematic diagram of the multifunctional tactile system integrated into a robotic hand, providing haptic perception capabilities, along with the architecture and application scenarios of the multimodal supervised learning algorithm for the MTAS tactile system (Reprinted from Ref. [33] under the CC BY 4.0 license; see the license at: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>); (b) Schematic of the multifunctional electronic skin (Reprinted from Ref. [34] under the CC BY 4.0 license; see the license at: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>); (c) Schematic of a robotic hand embedded with a multi-unit skin system and its application scenarios in ophthalmic surgery and agriculture (Reprinted from Ref. [35] under the CC BY 4.0 license; see the license at: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

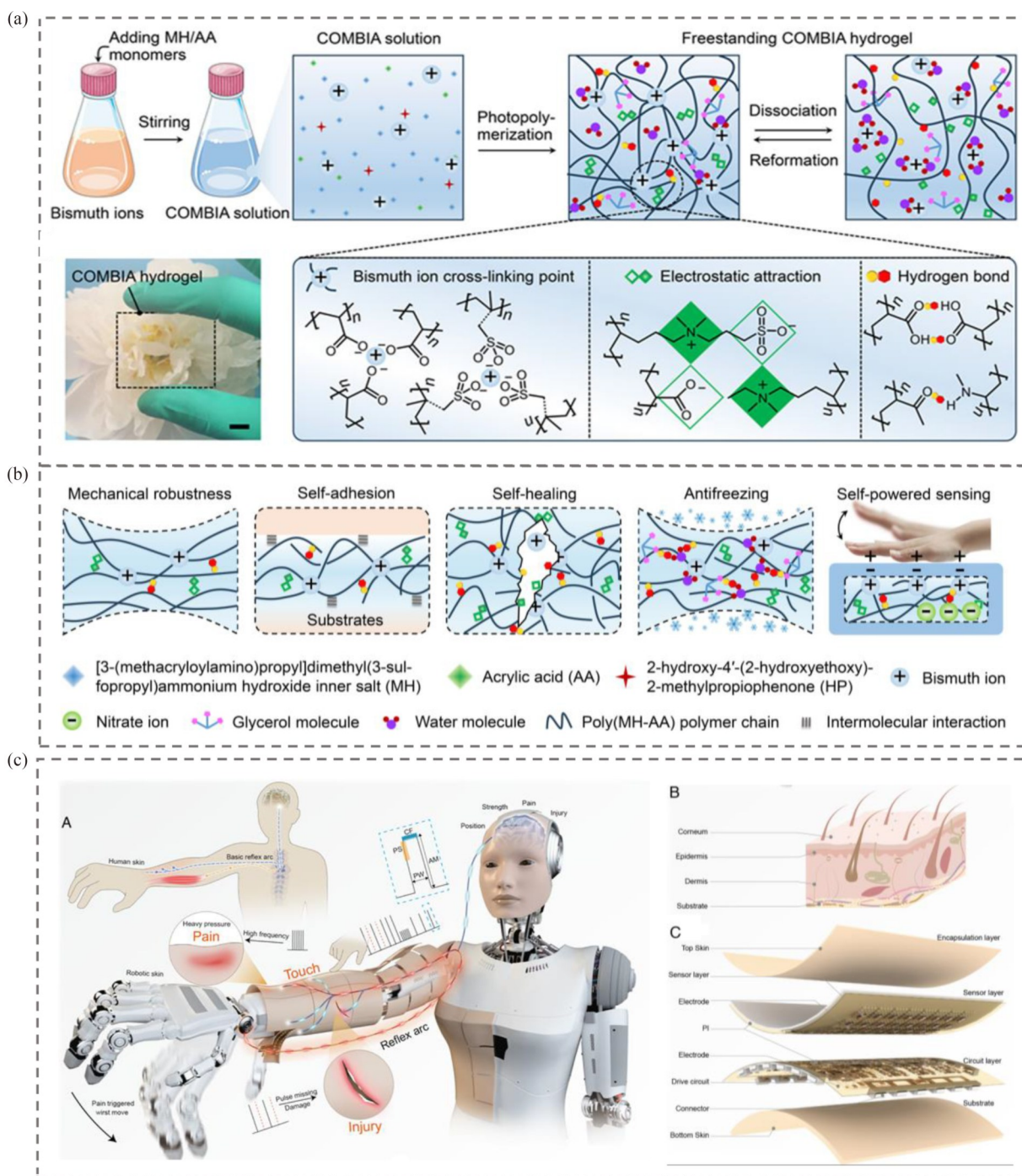


Fig. 4 Scheme of (a) the preparation process and (b) the integrated properties of COMBIA hydrogel, including mechanical robustness, self-adhesion, self-healing, frost resistance, and self-powered sensing capability (Reprinted from Ref. [41]; under the terms of the CC BY-NC 4.0 license); (c) Schematic of the NRE skin designed for embodied intelligent robots, which provides not only fundamental tactile perception but also advanced functionalities, including active nociception, damage detection, localized reflex loops, and rapid assembly (Reprinted from Gao *et al.* [43] under the CC BY-NC-ND 4.0 license; see the license at: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

3 智能感知与驱动材料

3.1 刺激-响应型驱动材料

人形机器人的动作执行依赖高效、可控的驱

动系统^[44]。该系统承载着任务指令向物理运动转换的关键功能，直接影响机器人在复杂交互场景中完成任务的可靠性^[45,46]。这对驱动材料的性能提出了多维要求：在产生大形变与快速响应的同

时, 还需具备状态自感知与环境自适应等智能化能力. 刺激-响应型智能材料能在外界物理或化学信号(如热、电、光、磁等)激励下产生可控形变或力学响应, 其核心机制主要包括基于电热效应的熵弹性收缩及液晶分子取向变化引发的宏观形变等.

由尼龙或聚乙烯等高分子纤维经预先设计的加捻与卷曲工艺制成的扭曲卷曲聚合物(TCP)是一类典型的电热响应型驱动材料. Almubarak等^[47]将TCP肌肉预拉伸并嵌入硅橡胶基底, 构建出“肌肉-皮肤”复合结构, 通过电致焦耳热引发TCP肌肉收缩, 驱动硅胶表面产生可编程的凹凸形变, 实现蒙皮形貌的控制.

液晶弹性体(LCE)和液晶网络(LCN)为基体制备分子有序-无序转变的液晶高分子驱动材料^[48]. Ware等^[49]控制LCE的分子取向并引入拓扑缺陷阵列, 结合光聚合工艺制备了可逆褶皱形变片材. 在热刺激下, 该片材产生从平面到波纹结构的可逆形貌转变, 可为自适应机器人蒙皮提供无需外部致动器的动态形变表面. He等^[50]设计了一种同轴复合纤维驱动器, 利用在LCE纤维中CNT的焦耳热效应引发基体相变, 驱动纤维轴向收缩, 兼具高拉伸性与柔韧性, 适用于柔性关节仿生驱动. Kotikian等^[51]构建了一种以液态金属为内芯、LCE为外壳的同轴复合纤维. 该结构通过直写成型工艺集成微流道与可拉伸弹性体, 在单根纤维中同时实现了电热驱动与应变传感. 当纤维形变时, 芯层液态金属的导电路径发生几何重构, 引起电阻连续变化, 进行实时无源自感知. Cho等^[52]受生物肌肉-肌腱复合体启发, 设计了由各向同性LCE与向列相LCE集成的一体化驱动单元(图5(a)). 其中, 向列相LCE作为主动驱动部分, 通过内置蛇形液态金属通道的焦耳热效应实现形变响应. 各向同性LCE则充当被动弹性肌腱, 借助另一路液态金属通道同步检测拉伸应变与张力, 在低应力松弛和高回弹特性支撑下, 实现驱动.

3.2 感知与驱动智能集成材料

感知-驱动一体化材料赋予了驱动单元在产生动作时, 同步感知自身形变、应力或温度等状态的能力. 相应原位感知信息可直接用于实时行为控制, 实现“感知-驱动”的闭环. Amjadi等^[53]设计了一种双层自支撑结构, 在高湿膨胀性

纸张表面涂覆石墨-CNTs导电传感层, 并与低湿渗透、高热膨胀的聚丙烯薄膜层合, 利用两者在热膨胀系数与湿膨胀系数上的显著差异, 实现了对电热、光热及湿度等多刺激响应的自感知与致动. Chen等^[54]借助4D打印技术, 利用CB/PLA复合材料构建了具有梯度间隙的微结构. 该结构基于电子隧穿效应, 使材料同时具备应变敏感与温度响应的自感知能力, 在热驱动形状恢复过程中可通过电阻变化同步识别触摸状态. Li等^[55]开发了一种基于侧栅结构的摩擦电人工突触材料. 该体系在PET基底上依次构筑了P3HT纳米纤维半导体薄膜与聚(偏氟乙烯-共-六氟丙烯)/1-乙基-3-甲基咪唑-双(三氟甲基磺酰基)亚胺(PVDF-HFP/EMIM-TFSI)离子凝胶介电层, 并通过上层的PTFE/Cu摩擦电层与介电层形成动态接触-分离界面, 在单一器件中实现触觉信号感知和类神经信息处理(图5(b)).

将传感/驱动材料与智能算法融合以实现感知-驱动的闭环, 是提升人形机器人环境交互智能的关键^[56]. Bao等^[57]构建了一种三明治结构电容式触觉传感阵列, 以多孔硅橡胶(Ecoflex)为介电层, 银纳米纤维/PET复合薄膜为上下电极. 该阵列可在动态抓取中实时获取压力信号, 并通过预设电容阈值实现闭环控制, 完成对气球、软质蛋糕乃至活体蚕等多种物体的无损伤抓取. Wei等^[58]在柔性PI基底上将2个同心环形铂(Pt)单元分别置于上下层, 中间层为多孔PDMS感压介质, 设计了一种双层触觉传感器. 利用上层Pt的电热效应感知界面接触与滑动, 同时通过下层Pt监测中间层热导率变化测量压力, 实现了接触、滑移与压力信号的低串扰同步采集. 采集的多模态触觉信号经长短期记忆网络编码为语义化抓取状态, 使机器人能自适应调整抓握力. 在光滑、易碎、柔软及重型物体上的实验表明, 该方法的平均抓取成功率达到95.2%. Lin等^[59]开发了集成梯度金字塔结构触觉接口与AI的抓取系统(图5(c)). 该系统以表面旋涂SWCNTs的梯度金字塔微结构PDMS作为敏感层, 结合一维卷积神经网络进行多通道信号处理, 在物体形状与硬度识别中准确率达97.2%. 此外, 该系统还建立了一套双向触觉反馈机制. 在感知端, 基于实时压力自主调节抓握力度, 实现对气球等易损物体的安全抓取; 在反馈端, 通过可编程的局部机械振动, 传

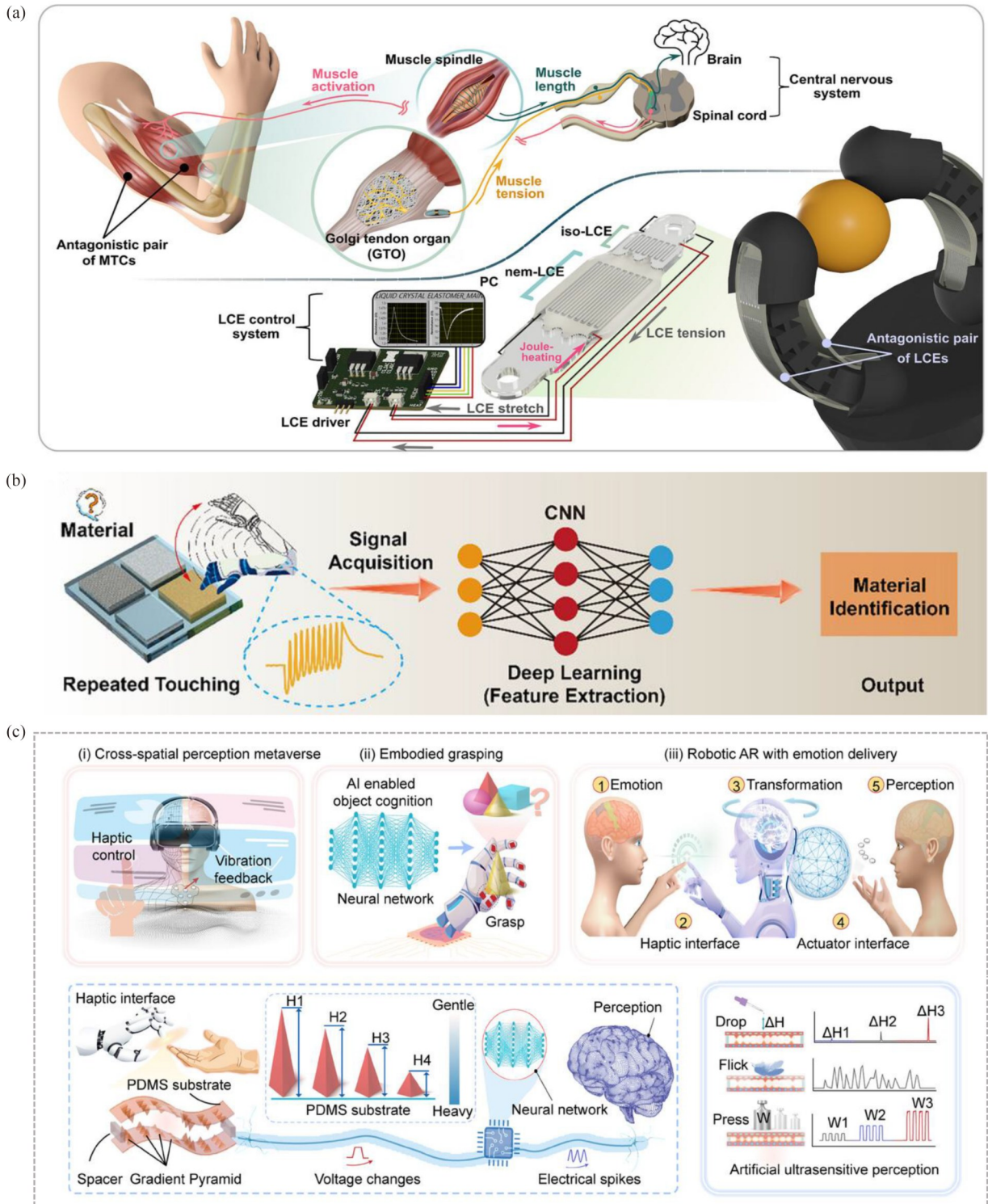


Fig. 5 (a) Schematic illustration of the biological muscle-tendon complex (MTC) and the corresponding robotic gripper employing liquid crystal elastomer (LCE) artificial muscles, along with their muscle contraction mechanism (Reprinted from Ref. [52] under the CC BY-NC 4.0 license; see the license at: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>); (b) Schematic diagram of the intelligent perception system based on triboelectric artificial synapses and the corresponding material identification process (Reprinted with permission from Ref. [55]; Copyright (2025) Wiley-VCH GmbH. License Number: 6190190873735); (c) Application prospects of the advanced haptic interface (PED)—including metaverse systems for cross-space perception, haptic cognition for embodied grasping and object recognition, and enhanced robotic interaction with emotion-feedback functionality—along with its schematic design (Reprinted with permission from Ref. [59]; Copyright (2025) Wiley-VCH GmbH. License Number: 6190171106561).

递情感或疼痛等复杂触觉信号, 构建了连接物理与虚拟环境的闭环情感交互链路。

4 结论与展望

高分子材料在人形机器人轻量化骨骼、仿生皮肤及智能感知与驱动等方面的研究与应用中取得了显著进展。在轻量化骨骼材料方面, 通过组分协同改性、仿生与多级微观结构设计优化等方式, 在保持力学强度或刚性的同时, 实现了结构减重。在仿生皮肤材料方面, 发展了单模态感知、多模态信号解耦, 自修复与动态自适应等智能高分子复合材料, 提升了人形机器人对复杂环境的感知能力与适应性。在智能驱动材料方面, 刺激响应型高分子材料为人形机器人提供了非电机式的驱动, 感知-驱动一体化材料实现了执行过程中对自身状态的实时监测。进一步, 结合先进机器算法, 可根据感知信号动态调整驱动行为, 提高任务交互中的响应精度与适应性。

随着人形机器人应用场景不断拓展, 对材料性能的要求日益提高, 高分子材料在迎来广阔机遇的同时, 也面临诸多挑战。为提升人形机器人的运动效率、动态稳定性和续航能力, 需进一步提高轻量化高分子结构材料强度与刚度, 同时降低密度。仿生皮肤材料需协同提升灵敏度、多模态信号解析准确性、环境适应性及长效耐久性等方面的性能。智能感知与驱动材料需在长期服役维持功能稳定, 并进一步提升感知-驱动闭环系统的实时响应与信号处理效率。此外, 当前高性能高分子材料仍面临规模化制备成本较高、复杂结构成型工艺难度大、不同功能材料之间的界面兼容性差等问题, 制约了其在人形机器人中的应用。随着材料基因工程、人工智能等前沿技术的深度融合, 有望加速新型高分子材料研制, 推动轻量化结构、感知精度与智能交互等方面关键性能的突破, 为新一代人形机器人提供材料基础。



作者简介: 徐家壮, 男, 1986年生。2009年毕业于四川大学高分子科学与工程学院高分子材料加工工程专业, 获学士学位。同年, 开始攻读四川大学高分子科学与工程学院材料加工工程专业硕士学位, 并被推荐提前攻博。2012年10月~2014年4月在美国哈佛大学附属麻省总医院 Orhun K Muratoglu 和 Ebru Oral 研究小组参加国家公派联合培养博士生项目。2014年6月于四川大学高分子科学与工程学院高分子材料加工工程专业获工学博士学位并留校任教, 任讲师。2016年晋升为副教授, 2020年破格晋升为教授。主要从事医用高分子材料加工、结构与性能关系的研究工作。以第一/通讯作者在 *Advanced Materials*, *Macromolecules*, *Biomaterials* 等期刊发表论文70余篇, 申请国家发明专利20件, 已授11件, 完成技术转让1件。主持国家自然科学基金面上项目、四川省省院省校科技合作研发项目及企业合作项目等项目。

REFERENCES

- 1 Fukuda, T.; Dario, P.; Yang, G. Z. Humanoid robotics-History, current state of the art, and challenges. *Sci. Robot.*, **2017**, 2(13), eaar4043.
- 2 徐程浩, 王耀南, 莫洋, 朱青. 人形机器人技术与产业发展研究. *中国工程科学*, **2025**, 27(1), 150-167.
- 3 Slade, P.; Atkeson, C.; Donelan, J. M.; Houdijk, H.; Ingraham, K. A.; Kim, M.; Kong, K.; Poggensee, K. L.; Riener, R.; Steinert, M.; Zhang, J. J.; Collins, S. H. On human-in-the-loop optimization of human-robot interaction. *Nature*, **2024**, 633(8031), 779-788.
- 4 Tu, K. R.; Ma, X. G.; Qian, Z. X.; Duan, P. H. Large-scale multimodal model based embodied intelligent robots: a survey. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, **2026**, 163, 112991.
- 5 Cao, L. B. Humanoid robots and humanoid AI: review, perspectives and directions. *ACM Comput. Surv.*, **2026**, 58(4), 1-37.
- 6 Zhang, C.; Chen, J. X.; Li, J. T.; Peng, Y. H.; Mao, Z. B. Large language models for human-robot interaction: a review. *Biomim. Intell. Robot.*, **2023**, 3(4), 100131.
- 7 DeDonato, M.; Dimitrov, V.; Du, R. X.; Giovacchini, R.; Knoedler, K.; Long, X. C.; Polido, F.; Gennert, M. A.; Padir, T.; Feng, S. Y.; Moriguchi, H.; Whitman, E.; Xinjilefu, X.; Atkeson, C. G. Human-in-the-loop control of a humanoid robot for disaster response: a report from the DARPA robotics challenge trials. *J. Field Robot.*, **2015**, 32(2), 275-292.
- 8 熊健, 倪庆雅. 复合材料在人形机器人中的应用进展与趋势. *复合材料学报*, **2025**, 44, 1-18.
- 9 王宏岗. 人形机器人产业化进程中高端化工材料的发展新机遇. *石油石化绿色低碳*, **2025**, 10(4), 13-20.

- 10 Liu, H.; Yang, Y. D.; Wang, T.; Yin, J. T.; Wang, H. Q. Bioinspired growable humanoid robot with bone-mimetic linkages for versatile mobility. *Sci. Adv.*, **2026**, 12(4), eaca2831.
- 11 王二平, 朱姝, 谭宗尚, 陆士强, 朱冠南, 冯习. CF/PEEK复合材料的性能研究. *纤维复合材料*, **2020**, 37(4), 35–38.
- 12 Sleiman, M.; Khalil, K.; Olaru, A.; Alfayad, S. Design and validation of new methodology for hydraulic passage integration in carbon composite mechanisms. *Appl. Sci.*, **2024**, 14(11), 4378.
- 13 Zhu, H.; Luo, M. Z.; Lv, Z. G.; Luo, Y.; Li, J.; Liu, R. K.; Lv, P. F.; Xue, J. L. Investigation of musculoskeletal-inspired architecture and honeycomb lightweight design for electro-hydraulic humanoid robot legs. *Ann. N Y Acad. Sci.*, **2026**, 1556(1), e70175.
- 14 余乃泽, 裴伟娟, 李大伟. 面向机器人关节轴承的PTFE/PEEK多孔材料制备与力学性能. *塑料*, **2025**, 54(5), 59–63.
- 15 Hao, Y. F.; Wang, X. M.; Song, X. Q.; Li, Y. Q.; Fu, H.; Lee, A. P.; Cheung, K. M.; Lam, J.; Kwok, K. W. A tensegrity joint for low-inertia, compact, and compliant soft manipulators. *Adv. Intell. Syst.*, **2024**, 6(2), 2470008.
- 16 Wen, Q.; Zhang, M. L.; Sun, J. W.; Li, W. J.; Chu, J. K.; Wang, Z. Y.; Zhang, S. Y.; Ren, L. Q. Legged robot with tensegrity feature bionic knee joint. *Adv. Sci.*, **2025**, 12(12), 2411351.
- 17 Lu, Y.; Zhang, F.; Shang, W. W.; Ma, Y. F.; Gao, X. Y.; Kong, L. B. Design and modelling of a flexible cable-driven robotic joint with variable stiffness capability. *Robot. Auton. Syst.*, **2026**, 196, 105249.
- 18 Hao, Y. F.; Dai, J.; Jiang, Z. Y.; Lee, A. P.; Lam, J.; Kwok, K. W. A controllable-stiffness tensegrity robot joint for robust compliant manipulation. *J. Field Robot.*, **2025**, 42(7), 3348–3360.
- 19 Rafsanjani, A.; Coulter, F. B.; Studart, A. R. Giving life to robotic skins. *Matter*, **2022**, 5(7), 1990–1992.
- 20 Wu, X. D.; Zhu, J.; Evans, J. W.; Lu, C. H.; Arias, A. C. A potentiometric electronic skin for thermosensation and mechanosensation. *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31(17), 2010824.
- 21 Ali, A. R.; Selim, M. Y. Design and integration of a multi-axial tactile sensor for dexterous manipulation by humanoid robots for industrial applications. *Results Eng.*, **2026**, 29, 108494.
- 22 Stassi, S.; Cauda, V.; Canavese, G.; Pirri, C. F. Flexible tactile sensing based on piezoresistive composites: a review. *Sensors*, **2014**, 14(3), 5296–5332.
- 23 Hu, T.; Xuan, S. H.; Ding, L.; Gong, X. L. Stretchable and magneto-sensitive strain sensor based on silver nanowire-polyurethane sponge enhanced magnetorheological elastomer. *Mater. Des.*, **2018**, 156, 528–537.
- 24 Canavese, G.; Stassi, S.; Fallauto, C.; Corbellini, S.; Cauda, V.; Camarchia, V.; Pirola, M.; Pirri, C. F. Piezoresistive flexible composite for robotic tactile applications. *Sens. Actuat. A Phys.*, **2014**, 208, 1–9.
- 25 Stassi, S.; Canavese, G.; Cosiansi, F.; Gazia, R.; Fallauto, C.; Corbellini, S.; Pirola, M.; Cocuzza, M. Smart piezoresistive tunnelling composite for flexible robotic sensing skin. *Smart Mater. Struct.*, **2013**, 22(12), 125039.
- 26 Li, F. Z.; Liu, H. R.; Guo, J. M.; Zhou, X. Y.; Liu, K. K.; Liang, L. Z.; Pei, X. Y.; Zhou, F. C.; Huang, F.; Wang, H.; Liu, Y. H. An artificial thermal nociceptor based on xanthan gum-gated synaptic transistors to emulate human thermal nociception. *Adv. Intell. Syst.*, **2022**, 4(12), 2200233.
- 27 Chen, C. Z.; Liu, Z. J.; Guo, L. C.; Huo, B. C.; Sun, Q.; Liang, L. R.; Du, C. Y.; Chen, G. M. High spatiotemporal resolution biomimetic thermoreceptors realizing by jointless p-n integration thermoelectric composites. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(49), 2411490.
- 28 Yaragalla, S.; Dussoni, S.; Zahid, M.; Maggiali, M.; Metta, G.; Athanasiou, A.; Bayer, I. S. Stretchable graphene and carbon nanofiber capacitive touch sensors for robotic skin applications. *J. Ind. Eng. Chem.*, **2021**, 101, 348–358.
- 29 Ullah, Z.; Mustafa, G. M.; Khalil, A.; Waseem, M.; Khan, S. U.; Sonil, N. I.; Ahmad Shah, I.; Imran, M.; Atiq, S. CNTs-coated stretchable fabric as ultrasensitive e-skin for rotational motion monitoring in humanoid robots. *J. Mater. Sci.*, **2024**, 59(43), 20480–20490.
- 30 Gao, F. L.; Liu, J.; Li, X. P.; Ma, Q.; Zhang, T. T.; Yu, Z. Z.; Shang, J.; Li, R. W.; Li, X. F. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene-based multifunctional tactile sensors for precisely detecting and distinguishing temperature and pressure stimuli. *ACS Nano*, **2023**, 17(16), 16036–16047.
- 31 Yuan, S.; Tian, Y. C.; Li, Y.; Li, S. Z.; Fu, L.; Li, T.; Zhang, T. A selectively bimodal flexible sensor based on IL/SWCNTs/PEDOT: PSS nanocomposites for materials and shape recognition. *J. Mater. Chem. C*, **2024**, 12(10), 3611–3621.
- 32 Gautham, V.; Panpalia, A.; Manouchehri, H.; Gabani, K. K.; Anil, V.; Yerneni, S.; Thakar, R.; Nayyar, A.; Payare, M. A.; Jorgensen, E.; Yang, R. Z.; Esfahani, E.; Liu, J. Slip-actuated bionic tactile sensing system with dynamic DC generator integrated E-textile for dexterous robotic manipulation. *Nat. Commun.*, **2025**, 16(1), 7005.
- 33 Zhao, H. Q.; Zhang, Y. Z.; Han, L.; Qian, W. Q.; Wang, J. B.; Wu, H. T.; Li, J. C.; Dai, Y.; Zhang, Z. Y.; Bowen, C. R.; Yang, Y. Intelligent recognition using ultralight multifunctional nano-layered carbon aerogel sensors with human-like tactile perception. *Nanomicro Lett.*, **2023**, 16(1), 11.

- 34 Ge, C. Y.; An, X. Y.; He, X. X.; Duan, Z.; Chen, J. T.; Hu, P. G.; Zhao, J.; Wang, Z. L.; Zhang, J. Integrated multifunctional electronic skins with low-coupling for complicated and accurate human-robot collaboration. *Adv. Sci.*, **2023**, 10(20), 2301341.
- 35 Dai, B. H.; Zheng, Y. J.; Qian, Y. H.; Hu, X. Y.; Sun, Z. Z.; Ma, Z. H.; Bao, G. J.; Wu, H. P.; Luo, X.; Hughes, J.; Liu, X. J.; Ying, Y. B.; Xie, L. J. An optical/electronic artificial skin extends the robotic sense to molecular sensing. *npj Flex. Electron.*, **2025**, 9, 87.
- 36 Cao, Y. X.; Peng, Y. X.; Ren, W. J.; Wang, H. H.; Diao, Y.; Liu, Z. M.; He, X.; Luo, H.; Wu, X. D. Intrinsically soft and fully recyclable robotic sensors with quadruple sensing functions for reliable human-robot interactions. *Sci. Bull.*, **2025**, 70(17), 2784–2796.
- 37 Bilodeau, R. A.; Kramer, R. K. Self-healing and damage resilience for soft robotics: a review. *Front. Robot. AI*, **2017**, 4, 48.
- 38 Zhao, M. C.; Tang, Z. W.; Zhang, X. H.; Li, Z. P.; Xiao, H.; Zhang, M.; Liu, K.; Ni, Y. H.; Huang, L. L.; Chen, L. H.; Wu, H. A self-healing, stretchable, and conductive poly(*N*-vinylpyrrolidone)/gallic acid composite hydrogel formed via hydrogen bonding for wearable electronic sensors. *Compos. Sci. Technol.*, **2020**, 198, 108294.
- 39 Cao, L. T.; Liu, Q.; Ren, J.; Chen, W. S.; Pei, Y.; Kaplan, D. L.; Ling, S. J. Electro-blown spun silk/graphene nanoionotronic skin for multifunctional fire protection and alarm. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(38), 2102500.
- 40 Shepherd, R. F.; Stokes, A. A.; Nunes, R. M. D.; Whitesides, G. M. Soft machines that are resistant to puncture and that self seal. *Adv. Mater.*, **2013**, 25(46), 6709–6713.
- 41 Guo, X. K.; Zhang, S. L.; Patel, S.; Sun, X. L.; Zhu, Y. L.; Wei, Z. C.; Wang, R. G.; He, X. D.; Wang, Z. K.; Yu, C. J.; Tan, S. C. A skin-mimicking multifunctional hydrogel via hierarchical, reversible noncovalent interactions. *Sci. Adv.*, **2025**, 11(20), eadv8523.
- 42 Liu, Y. N.; Lin, J. H.; Wei, J. J.; Chen, T.; Wang, W. Q. Skin-like heterogeneous and self-healing conductive hydrogel toward ultrasensitive marine sensing. *ACS Sens.*, **2025**, 10(3), 2276–2286.
- 43 Gao, Y. Y.; Zhang, J. P.; Zhang, H. H.; Chow, L.; Zhao, G. Y.; Guo, G. H.; Yiu, C. K.; Zhang, B. B.; Huang, Y.; Zhou, J. K.; Zhang, Q.; Huang, T.; Guo, Y.; Li, J.; Li, J. Y.; Huang, X. C.; Chen, Z. L.; Liu, Z. Y.; Qiu, Y. Z.; Guo, C. F.; Yu, X. G. A neuromorphic robotic electronic skin with active pain and injury perception. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2025**, 122(52), e2520922122.
- 44 Wang, X. J.; Guo, W.; He, Z. C.; Li, R. C.; Zha, F. S.; Sun, L. N. Bionic jumping of humanoid robot via online centroid trajectory optimization and high dynamic motion controller. *J. Bionic Eng.*, **2024**, 21(6), 2759–2778.
- 45 Zhang, J. Y.; Li, J. M.; Xu, R.; Wang, Y. D.; Wang, J. W.; Wang, T. X.; Zhao, Y. K. A self-driven Ga₂O₃ memristor synapse for humanoid robot learning. *Small Meth.*, **2025**, 9(3), 2400989.
- 46 Hernandez-Vicen, J.; Łukawski, B.; Martinez, S.; Tzagarakis, N.; Balaguer, C. Hybrid sensor fusion mixed with reinforcement learning in autonomous dual-arm lifting tasks performed by humanoid robots. *Robotics*, **2024**, 13(8), 121.
- 47 Almubarak, Y.; Tadesse, Y. Twisted and coiled polymer (TCP) muscles embedded in silicone elastomer for use in soft robot. *Int. J. Intell. Robot. Appl.*, **2017**, 1(3), 352–368.
- 48 Feng, W.; He, Q. G.; Zhang, L. Embedded physical intelligence in liquid crystalline polymer actuators and robots. *Adv. Mater.*, **2025**, 37(2), 2312313.
- 49 Ware, T. H.; McConney, M. E.; Wie, J. J.; Tondiglia, V. P.; White, T. J. Voxellated liquid crystal elastomers. *Science*, **2015**, 347(6225), 982–984.
- 50 He, Q. G.; Wang, Z. J.; Wang, Y.; Wang, Z. J.; Li, C. H.; Annapooranan, R.; Zeng, J.; Chen, R. K.; Cai, S. Q. Electrospun liquid crystal elastomer microfiber actuator. *Sci. Robot.*, **2021**, 6(57), eabi9704.
- 51 Kotikian, A.; Morales, J. M.; Lu, A.; Mueller, J.; Davidson, Z. S.; Boley, J. W.; Lewis, J. A. Innervated, self-sensing liquid crystal elastomer actuators with closed loop control. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(27), 2101814.
- 52 Cho, J.; Lee, M.; Park, T.; Wang, Y.; Lee, H.; Cai, S. Q.; Park, Y. L. Bio-inspired artificial muscle-tendon complex of liquid crystal elastomer for bidirectional afferent-efferent signaling. *Adv. Mater.*, **2026**, 38(2), e03094.
- 53 Kim, H.; Ahn, S. K.; Mackie, D. M.; Kwon, J.; Kim, S. H.; Choi, C.; Moon, Y. H.; Lee, H. B.; Ko, S. H. Shape morphing smart 3D actuator materials for micro soft robot. *Mater. Today*, **2020**, 41, 243–269.
- 54 Chen, D. B.; Liu, Q. P.; Han, Z. W.; Zhang, J. Q.; Song, H. L.; Wang, K. J.; Song, Z. Y.; Wen, S. F.; Zhou, Y.; Yan, C. Z.; Shi, Y. S. 4D printing strain self-sensing and temperature self-sensing integrated sensor-actuator with bioinspired gradient gaps. *Adv. Sci.*, **2020**, 7(13), 2000584.
- 55 Li, M.; Luo, F. L.; Gong, L. K.; Zeng, J. H.; Li, Y. B.; Wang, Z. Y.; Cao, J.; Niu, J. Q.; Zhao, J. Q.; Chen, Y. F.; Zhang, C. Neuromorphic tactile perception enabled by triboelectric artificial synapse for material identification. *Adv. Funct. Mater.*, **2026**, 36(4), e14750.

- 56 Liu, Y. M.; Yiu, C.; Song, Z.; Huang, Y.; Yao, K. M.; Wong, T.; Zhou, J. K.; Zhao, L.; Huang, X. C.; Nejad, S. K.; Wu, M. G.; Li, D. F.; He, J. H.; Guo, X.; Yu, J. S.; Feng, X.; Xie, Z. Q.; Yu, X. G. Electronic skin as wireless human-machine interfaces for robotic VR. *Sci. Adv.*, **2022**, 8(2), eabl6700.
- 57 Bao, R. R.; Tao, J.; Zhao, J.; Dong, M.; Li, J.; Pan, C. F. Integrated intelligent tactile system for a humanoid robot. *Sci. Bull.*, **2023**, 68(10), 1027–1037.
- 58 Wei, C. S.; Liao, Z. J.; Qin, Y. C.; Mao, Q.; Liu, S. Q.; Zhu, R. Human-taught sensory-control synergy for universal robotic grasping. *Natl. Sci. Rev.*, **2025**, 13(3), nwaf583.
- 59 Lin, W. S.; Xu, Y. J.; Yu, S. F.; Wang, H. S.; Huang, Z. J.; Cao, Z. C.; Wei, C.; Chen, Z.; Zhang, Z. L.; Zhao, Z. Y.; Liao, Q. L.; Zheng, Y. J.; Liao, X. Q. Highly programmable haptic decoding and self-adaptive spatiotemporal feedback toward embodied intelligence. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(38), 2500633.

Review

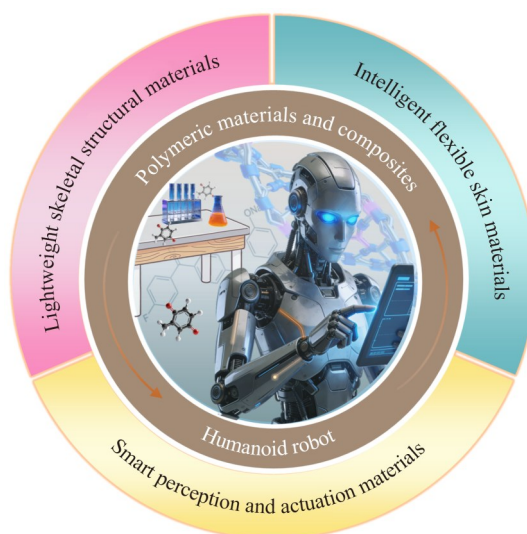
Research Progress in Polymers for Humanoid Robots

Gui-ying Zhu¹, Chun-yan Liu², Bao Deng¹, Bo-en Liu², Peng-cheng Xia¹, Peng-juan Li², Jun Lei¹, Jia-zhuang Xu^{1*}

(¹National Key Laboratory of Advanced Polymer Materials, College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

(²Shanghai Zhonglei New Materials Technology Co., Ltd., Shanghai 201306)

Abstract Humanoid robots represent a pivotal physical carrier for embodied intelligence, demonstrating significant developmental potential and broad application prospects. Polymers, featured by the merits such as low density, high specific strength, ease of processing, and tunable functionality, are increasingly being utilized in load-bearing and functional components of humanoid robots. This article reviews recent research achievements in polymers for humanoid robotic applications. Placing focus on key performance requirements for lightweight skeletal structural materials, bionic skin materials, and intelligent sensing-actuation materials, this review elaborates on advances in microstructural design, functional network construction, preparation and processing methods, as well as structure-property relationships. Finally, current challenges and future development directions in this field are discussed and summarized.



Keywords Humanoid robots; Polymers; Skeletal materials; Skin materials; Sensing-actuation materials

* Corresponding author: Jia-zhuang Xu, E-mail: jzxu@scu.edu.cn