

柔性敏感材料：重塑感知边界与形态

九三学社中央科技委副主任、中国传感器与物联网产业联盟常务副理事长 郭源生

从折叠屏手机随心弯折无断触、柔性心电贴守护心脏健康,到服务机器人轻柔抓取果蔬、仿生假肢重现人体触觉,如今越来越多的智能终端、医疗设备、机器人产品,正在摆脱传统电子产品“坚硬、刻板、固定僵化”的固有形态。支撑这场智能产品形态变革与感知升级的核心底层技术,正是柔性敏感材料。作为新一代柔性电子产业、智慧医疗、仿生机器人领域的核心基础材料,柔性敏感材料打破了传统刚性传感材料的物理桎梏与性能边界,兼具极致柔韧性、环境适配性与高精度感知能力,能够贴合曲面、适配形变、兼容人体,实现了机械设备从“生硬检测数据”到“类人感知世界”的跨越式升级。

结构重构：从坚硬刚性体到柔性感知的底层革新

柔性敏感材料是一套多品类、多机理、多场景适配的完整材料体系。按照材质属性可划分为碳基、复合基、高分子三大核心类别,不同材料拥有差异化的结构特质、感知机理、性能参数与应用赛道,相互补充、协同迭代,共同构筑起现代柔性感知技术的产业根基。

所有柔性敏感材料的核心突破,本质上都是一场微观结构的重构革命。在天然状态下,具备导电、感知能力的功能性纳米材料大多质地坚硬、脆性极大,无法直接用于柔性器件制备,这也是传统传感材料刚性化的核心根源。科研人员通过十余年的技术探索,摸索出一套成熟的结构改造逻辑:不改变材料本身优异的电学、力学、敏感核心属性,仅通过微观结构重组、形态重塑、功能整合、界面优化、参数

集成与适配,让硬质功能材料拥有宏观柔性特质,最终实现“硬材料做软、软材料做精、精材料做稳”的技术突破,兼顾柔韧形变能力与精准感知性能。当前主流柔性敏感材料的结构改造逻辑,主要围绕碳基材料、层状材料、高分子材料三大体系展开,形成了差异化的柔性成型路径。

石墨烯作为典型的硬质单原子碳基材料,本身硬度远超钢铁、质地脆硬,无任何形变能力。科研人员创新采用湿法转移工艺,将单层石墨烯从硬质铜箔基底剥离,精准转移附着在轻薄柔软的聚酰亚胺柔性薄膜基底上,最终形成独特的鱼鳞状微片搭接结构。这种微观结构具备极强的自适应形变能力,当材料发生弯曲、折叠、扭转时,相邻的石墨烯微片可以相互轻微滑

动、错位、贴合,不会出现断裂、脱落、导电断路等问题。

碳纳米管为刚性管状纳米材料,单根碳管坚硬笔直、无法形变,但具备极佳的导电性与力学性能。基于这一特性,科研人员通过静电纺丝、层层自组装工艺,将海量超细碳纳米管无序交织、缠绕堆叠,构筑出疏松多孔、立体贯通的三维网络搭接结构。这种网状结构内部存在大量可形变空隙,当材料受到拉伸、挤压、弯折作用时,碳管之间可自由滑动、转动、重组网络形态,释放形变应力,有效避免结构破损。

MXene作为新型层状硬质陶瓷材料,原生状态下堆叠致密、质地坚硬、毫无韧性,导电与导热性能优异。通过液相剥离、纳米片分散、柔性堆叠成型工艺,可将致密的块状MXene

剥离为超薄二维纳米片,再重新无序堆叠复合,形成柔性层状结构。

高分子材料的柔性改造逻辑与纳米碳材料截然不同,核心是分子链结构重塑。以PVDF聚偏氟乙烯为代表的分子原料,原生状态下是坚硬的塑料颗粒,分子链无序杂乱排布,无任何感知功能。通过高温熔融拉伸工艺,可将杂乱的分子链拉伸理顺、定向排列,再配合高压极化处理,让分子内部电偶极矩规律排布,最终将硬质塑料颗粒转化为轻薄柔软、可随意形变、具备压电感知功能的柔性薄膜。而水凝胶材料则通过高分子粉末、纯水、交联剂科学配比,结合紫外光固化工艺,构筑出可锁水的三维网状海绵结构,质地柔软、拉伸性极强、亲肤无毒,完美适配人体贴合场景。

核心工艺与感知机理：柔性传感的技术内核

柔性敏感材料能够实现产业化落地、多场景应用,离不开成熟的制备工艺与稳定可控的感知机理。材料结构重构解决了“变软”的问题,而核心加工工艺与感知机理,则解决了“能用、好用、精准用、长期用”的核心难题,是柔性器件实现标准化、规模化、高精度工作的技术根基。

三大核心加工工艺,筑牢柔性器件产业化基础。经过多年技术迭代,湿法转移、静电纺丝、界面改性三大核心工艺已经趋于成熟,成为柔性敏感器件标准化制备的核心支撑,有效破解了材料贴合不牢、良品率低、稳定性差的产业化痛点。湿法转移技术是碳基柔性器件的基础核心工艺,主要用于石墨烯、碳纳米管等超薄纳米材料的无损转

印。而湿法转移依靠液体表面张力,能够将纳米材料平稳、均匀、完整地 from 硬质生长基底剥离,无损贴合至聚酰亚胺、PU等柔性基底表面,最大程度保留材料的导电与传感性能,可稳定制备大面积、无裂纹、高均匀度的柔性薄膜,是折叠屏触控层、大面积传感阵列的必备工艺。静电纺丝技术主打提升材料柔性 with 感知灵敏度,通过高压电场将高分子溶液、复合溶液拉伸为超细纳米纤维,层层堆积形成多孔网状柔性薄膜。这种工艺制备的材料孔隙率高、弹性极佳、拉伸性能优异,内部传感网络丰富,能够极大提升器件对微小压力、细微形变的感知能力。界面改性技术是提升器件使用寿命与稳定性的关键工艺。柔性器

件由多层不同材质复合而成,长期反复弯折、拉伸后,层间极易出现脱层、剥离、失效等问题。通过等离子体处理、化学修饰、界面黏合优化等改性手段,可大幅增强硬质功能层与柔性基底、各复合层之间的结合力度,有效解决长期使用分层脱落、性能衰减的行业难题。

三大主流感知机理,覆盖全场景感知需求。柔性敏感器件的工作原理通俗易懂,核心是将外力形变、温度、湿度等外界物理信号,精准转化为可读取、可分析的电信号,根据材料体系与应用场景的差异,形成了压阻、压电、电容三大成熟感知机理,各司其职、覆盖从常规监测到超高精度感知的全场景需求。压阻效应是应用最广泛、产业化最

成熟的感知机理,主要适配碳基与复合基柔性材料。其核心逻辑简单直观:柔性材料内部构建了密集的导电网络,当器件受到按压、拉伸、挤压等外力作用时,内部导电通路会发生细微形变、断裂、重组,直接引发电阻数值的规律性变化。压电效应是高分子柔性材料的专属核心机理,以PVDF材料为核心代表。经过高压极化处理的柔性高分子薄膜,内部电偶极矩形成稳定的定向排布,无须外接供电,无须额外能耗,即可实现无源感知。电容效应主打超高精度、超微弱感知,适配各类高端精细化监测场景。器件采用经典的“电极-柔性介质-电极”三明治结构,中间层为柔性绝缘介质,上下两层为柔性导电电极。

三大材料体系的类别、特质与适配场景

经过十余年迭代发展,柔性敏感材料已经形成碳基、高分子、复合基三大成熟体系,构成了当前柔性电子产业的核心材料根基。三类材料不存在优劣之分,而是性能互补、场景细分、协同发展,各自拥有独特的结构特征、性能参数、技术短板与精准赛道,共同覆盖消费电子、医疗健康、智能机器人、工业自动化等全领域应用场景。

碳基柔性材料:高频高精度、高稳定的工业级感知基石。碳基柔性材料主要包含石墨烯、碳纳米管、MXene三大核心品类,是最早实现产业化的柔性敏感材料体系。这类材料的共同特质是导电性能优异、响应速度超快、高频感知精准、耐弯折稳定性强,主打高精度、高频率、高稳定性的工业级、消费电子级场景,核心短板是拉伸性能有限、生物相容性中等、大面积量产成本偏高。从核心性能参数来看,碳基柔性器件综合性能稳定可靠,能够适配高频动态感知场景,经过10万次反复弯折疲劳测试后,性能保留率可达92%以

上。从技术迭代现状来看,2025年麻省理工学院优化的石墨烯制备工艺,将大面积制备良率提升至82%,国内工艺良率达到75%,持续缩小国际差距。当前碳基材料的核心短板集中在拉伸性能有限、大面积量产成本高、极端潮湿环境长期稳定性一般。未来迭代方向主要是提升拉伸性能、降低量产成本、优化环境稳定性,同时拓展温度、气

体、光学等多维度敏感机理下的感知能力,打破单一感知局限。高分子柔性材料:高拉伸、高亲肤的医疗民生核心材料。高分子柔性材料以PVDF压电薄膜、水凝胶为核心代表,是最贴合民用、医疗场景的柔性材料体系,核心特质是极致柔韧、安全亲肤、拉伸性强、成本低廉、生物相容性优异,主打人体适配、无创监测、柔性形变场景,弥补了碳基材料拉伸性、亲肤性不足的短板,是大健康领域柔性器件的核心根基。PVDF柔性材料由硬质塑料迭代而来,经高温拉伸、高压极化处理后,成为可随意弯折、扭曲、形变的功能性柔

性薄膜,最大拉伸率可达800%,形变适配性极强。其核心优势是压电性能稳定、无源工作、信号采集精准、长期佩戴舒适安全,常规环境下年度性能衰减可控制在5%~8%。水凝胶材料是柔性材料中生物适配性最优的品类,能够紧密贴合手腕、膝盖、脚踝等高频活动关节,精准捕捉人体运动姿态、关节角度、肌肉收缩状态,广泛用于运动监测、术后康复训练、人体姿态矫正等场景。2026年新型喷涂式水凝胶技术实现突破,可直接喷涂于人体皮肤表面形成超薄感知层,进一步提升佩戴无感体验与信号采集精度。高分子材料的核心短板是耐高温性能差、高温易变形老化、机械强度偏低、长期抗疲劳性不足,无法适配高温、高强度工业场景,主要聚焦民用与医疗健康赛道,未来迭代重点是提升耐高温性、抗老化性与长期使用寿命,拓展植入式医疗监测高端场景。

复合基柔性材料:性能全能、场景广谱的未来核心赛道。复合基柔性材料是将碳基导电

材料、高分子柔性基底、功能性助剂有机结合的新型材料体系,也是当前行业技术迭代最快、发展潜力最大的核心赛道。其核心创新是取长补短、性能互补,完美融合碳基材料高导电、高灵敏、高稳定的优势,以及高分子材料高拉伸、高亲肤、高柔韧的特质,同时实现多模态感知能力,可同步监测压力、温度、湿度、形变等多维信号,是电子皮肤、机器人触觉、高端人机交互设备的核心材料。当前产业化主流的银纳米线/PU复合、石墨烯/高分子复合、MXene/碳纳米管复合材料,综合性能全面优于单一材料,信号转化效率相比单一材料提升30%以上,弯折稳定性、感知精度、场景适配性大幅优化。复合材料的核心优势是无明显性能短板、场景适配广谱、感知功能全面,可兼顾工业高强度作业、医疗无创监测、智能人机交互等多元场景。未来,复合材料将逐步替代部分单一材料,成为柔性感知产业的主流核心材料,同时还将拓展生物、化学信号感知能力,实现真正的类皮肤全维度感知。

全场景应用落地

经过十余年技术迭代与产业落地,柔性敏感材料已经走出实验室,完成消费电子、医疗健康、智能机器人、工业自动化四大核心领域的全面渗透,从大众日常智能产品,到高端医疗监测设备、智能服务机器人,全方位赋能产业升级与生活智能化,实现了“技术落地、产品成型、市场放量”的完整产业闭环。

消费电子是柔性敏感材料最早实现大规模商用的赛道,彻底打破了传统智能设备的刚性形态桎梏,开启了柔性终端、无感交互的新时代。传统手机、平板电脑、穿戴设备采用刚性触控传感层,无法弯折、形变能力差,反复使用易损坏,而柔性敏感材料的普及,让折叠屏、卷轴屏、柔性穿戴设备从概念变成量产爆款。在折叠智能终端领域,石墨烯柔性触控层是核心核心配件,凭借轻薄透光、耐弯折、响应快、触控均匀的优势,完美适配手机每日上百次的开合使用,10万次弯折后仍保持触控灵敏、无断触、无失灵,彻底解决折叠屏折痕触控失效的行业痛点。在可穿戴设备领域,柔性传感材料赋能智能手环、智能服饰、智能眼镜,实现轻薄贴合、无感佩戴,全天候精准监测心率、血氧、运动步数、睡眠状态,摆脱传统穿戴设备笨重、束缚、监测不准的问题。同时柔性耳机、柔性触控设备依托压力传感技术,实现无按键触控操作,轻触即可完成功能切换,大幅优化人机交互体验。未来,随着技术成熟,可卷曲、可穿戴、可植入的全柔性智能终端将持续普及,彻底改写消费电子产业形态格局。

医疗健康是柔性敏感材料价值最高、落地潜力最大的赛道,核心解决了传统医疗监测“设备笨重、有创不适、数据间断、无法长期监测”的痛点,打造出人体专属的“第六感知器官”,实现了常态化、无创化、精准化、居家化的健康监测新模式。柔性心电贴、肌电传感贴是目前最成熟的医疗应用产品,轻薄柔软、重量不足1克,可紧密贴合人体胸部、四肢皮肤,不受运动、坐姿、睡姿影响,可连续7天稳定采集心电、肌电、呼吸等生理信号,数据精度远超传统家用监测设备。在康复与辅助医疗领

域,柔性水凝胶传感器可贴合关节部位,精准捕捉术后患者运动姿态、关节活动角度,辅助医生评估康复进度、指导康复训练;柔性电子皮肤覆盖于仿生假肢表面,可帮助肢体障碍人群感知外界压力、温度、纹理,恢复基础触觉功能。在创面护理领域,智能柔性绷带可实时监测伤口温度、湿度、压力与感染信号,提前预警炎症、感染风险。在神经监测领域,柔性神经贴片可无创捕捉大脑与外周神经信号,助力神经疾病诊断与康复治疗。行业数据显示,2035年全球柔性医疗传感市场规模将突破3000亿美元,中国市场占比超40%。

柔性敏感材料与电子皮肤技术的落地,彻底改变了机器人的作业模式,让冰冷的工业机器拥有了媲美人类的细腻触觉与环境感知能力。搭载复合柔性触觉传感器的机器人手指,可精准感知抓取力度、物体软硬、表面纹理、环境温度,自动实时调节夹持力度,能够轻柔、稳定抓取鸡蛋、草莓、玻璃器皿等易损易碎柔软物件,也可精准操作精密工业零件,实现精细化、柔性化作业。在工业场景中,柔性感知机器人可完成精密装配、易碎物料分拣、柔性工件加工等传统机器人无法实现的作业;在民用场景中,家政服务机器人可安全搀扶老人、轻柔整理物品、平稳搬运物件;在医疗场景中,护理机器人、手术辅助机器人依托柔性感知技术,实现轻柔精准操作。未来,人形机器人全身覆盖柔性电子皮肤后,将具备全方位环境感知、碰撞规避、柔性交互能力,彻底摆脱工业工具属性,转型为智能服务伙伴。

在工业自动化领域,柔性压力传感阵列可贴合异型工件、柔性生产线表面,实时监测生产压力、形变状态,精准把控生产工艺参数,提升精密制造良品率;柔性形变传感器可监测设备振动、构件形变,提前预警设备故障,实现工业设备状态监测与智能运维。在航空航天、特种装备领域,柔性敏感材料可贴合飞行器曲面、特种装备表面,在轻量化、不影响设备结构的前提下,实现全方位环境感知、形变监测、压力检测,适配极端复杂的作业环境,为高端装备智能化升级提供核心支撑。

产业发展趋势

立足2026年至2035年的技术发展周期,随着材料科学、微纳加工、人工智能、生物工程的跨界融合突破,柔性敏感材料将迎来多维度技术迭代、材料体系扩容、性能全面跃迁、感知维度升级、产业格局重塑的全方位变革,从单一工业材料升级为跨领域、多品类、高智能的核心战略材料,诞生多个全新技术赛道与产业风口。

材料体系迭代扩容:活体生物材料全新登场,完善产业谱系。未来十年,柔性敏感材料体系将不再局限于人工合成的碳基、高分子、复合材料,活体生物柔性材料将成为全新的行业核心成员,完成材料体系的终极扩容。该材料将心肌细胞、神经细胞、皮肤细胞等活体生物单元,与水凝胶、柔性基底深度融合,打造出生物-电子一体化的新型感知材料,兼具生物活性、人体适配性与电子感知能力,是柔性材料领域最具颠覆性、最具吸引力的未来赛道。活体柔性材料可与人体组织共生适配、同步律动,能够直接捕捉神经信号、心肌收缩、细胞微形变等微观生理信息,感知精度达到细胞级,彻底解决传统材料无法植入、长期适配性差的短板。

性能全面跃迁:彻底打破柔性 with 性能的对立瓶颈。行业长期存在的“柔而不精、精而不柔”的核心瓶颈将被彻底突破,三大材料体系性能将实现质的飞跃,全面适配高端产业化需求。碳基材料拉伸率将提升至500%,潮湿环境导电性衰减控制在5%以内,量产良品率提升至95%,生产成本下降60%,高频感知精度大幅优化,兼顾柔性、精度与稳定性。高分子材料耐高温上限从80℃提升至120℃,年度性能衰减降至2%以内,使用寿命从5年延长至10年,抗老化、耐候性大幅提升,

适配更多复杂场景。复合基材料量产成本下降50%,10万次弯折分层概率控制在5%以内,多模态感知精度提升50%。

感知能力升级:从机械检测到类皮肤全维度智能感知。未来柔性感知将彻底摆脱单一机械检测的局限,升级为媲美甚至超越人体皮肤的全维度智能感知。器件可精准识别1Pa超微压力、0.1℃细微温差、3%湿度波动、0.1mm纹理细节,振动感知频率可达1000Hz,同时具备自修复、自适应、环境自调节能力。通过多材料复合结构、仿生微纳纹理设计、AI智能解耦算法的三重加持,可实现压力、温度、湿度、振动、生物信号、化学信号的同步采集、精准分离、智能分析,彻底解决信号耦合干扰问题。未来,电子皮肤不仅能“感知数据”,还能“识别场景、判断状态、自主适配”,真正实现智能化感知升级。

产业格局变革:多领域爆发式增长,重塑科技生态。2026—2035年将是柔性敏感材料产业的黄金爆发期,技术成熟度、产品渗透率、市场规模将同步跃升。在医疗健康领域,无创长期监测、植入式感知、假肢触觉修复、智能创面护理等产品全面普及,构建居家智慧健康监测体系,重塑传统医疗监测模式。在智能终端领域,柔性折叠、卷曲、穿戴式终端成为消费电子主流,无感化柔性交互成为行业标配,2035年全球柔性电子市场规模将突破3000亿美元。在机器人领域,柔性触觉感知、全身电子皮肤全面落地,人机安全协作、仿生智能交互成为常态,服务机器人、人形机器人加速走进民生与工业场景。在工业与特种领域,柔性智能感知全面赋能智能制造,高端装备、航空航天,成为高端智造的核心底层支撑。