

专题: 应用磁学

基于磁性材料的柔性器件: 材料体系、 制造方法与应用进展*

师念园¹⁾ 李燕^{2)†} 张淇^{2)3)‡}

1) (甘肃中医药大学基础医学院, 兰州 730000)

2) (甘肃中医药大学医学信息工程学院, 兰州 730000)

3) (西安交通大学电子科学与工程学院, 精密微纳制造技术全国重点实验室, 电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2026 年 2 月 1 日收到; 2026 年 3 月 20 日收到修改稿)

柔性电子技术的快速发展推动了传感与交互系统向可弯曲、可拉伸与可贴附形态演进。相较传统电学传感, 基于磁性材料的柔性器件具有磁场可远程读出、信号可穿透封装与隔离介质、磁场分布可编程等优势, 为复杂环境下的稳定感知与非接触交互提供新方案。然而, 磁性材料在“高磁性能”与“高机械顺应性”之间存在内在矛盾: 磁畴结构、磁各向异性及层间耦合在形变与循环载荷下易演化, 引发漂移、滞后与可靠性衰减。本文围绕“材料-制造-应用”主线系统综述相关进展, 首先总结软磁、硬磁与超顺磁材料的核心磁学特性及柔性化策略, 明确其在磁场读出、内置磁源与生物相关磁效应中的功能定位; 其次阐释复合磁性材料的磁-力-电耦合机制与界面工程, 并归纳体相混合/共混复合、薄膜沉积与原子层沉积等制造路线; 进一步梳理磁敏电子皮肤、人体健康监测、多维触觉界面与智能软体机器人等应用与系统集成框架。最后指出未来需在材料-界面-工艺协同、信号稳定性与抗噪读出、以及规模化制造与标定算法一体化方面持续突破, 推动器件从原型走向可部署应用。

关键词: 磁性材料, 柔性电子, 磁敏传感, 人机交互**DOI:** 10.7498/aps.75.20260180**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260180

1 引言

柔性电子技术的进步正引领传感、人机交互与智能系统从刚性、平面形态向可弯折和可拉伸方向演进。相较于以电阻、电容、压电等为基础的传统柔性传感体系, 基于磁性材料的柔性器件具备一系列独特优势, 包括信号可远程读出、可穿透封装检测、磁场分布可编程及多物理场耦合能力强等。这些特点使其在复杂环境下实现稳定信号采集、非接触交互以及多功能集成方面展现出显著潜力^[1-5]。

然而, 磁性材料在实现“高磁性能”与“高机械

顺应性”之间往往存在固有矛盾: 典型的硬磁材料与磁性氧化物通常表现出刚性和脆性, 而高灵敏度的磁阻薄膜及多层自旋器件则对界面质量、层间耦合和应力状态极为敏感。在弯折、拉伸与循环载荷作用下, 材料的磁畴结构、各向异性以及电磁输运特性可能发生耦合性漂移, 进而引起信号滞后、漂移与可靠性下降。此外, 柔性系统的实际应用还需满足可制造性与可集成性要求, 涉及低温工艺、转移组装、规模化制备以及长期工作稳定性等多个方面。因此, 如何在材料、结构与工艺的协同中实现功能的稳定输出, 是磁性柔性器件走向系统化应用所面临的关键科学与工程问题^[6-14]。

* 国家自然科学基金 (批准号: 62501465) 和陕西省自然科学基金 (批准号: 2025JC-YBQN-072) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: ly@gszy.edu.cn

‡ 通信作者。E-mail: qizhang@gszy.edu.cn

针对上述挑战,近年来研究主要从磁性材料体系创新、复合化策略以及柔性制造方法 3 个层面展开探索:通过对软磁、硬磁及超顺磁材料的微纳结构进行调控,可对其磁响应强度、频率特性与稳定性提供可设计的参数空间;借助多相耦合与界面工程,复合磁性材料能够实现磁力电等多场协同效应,为柔性器件提供核心功能模块;混合制备、原子层沉积与微纳加工等方法不断发展,提升了器件的结构精度与一致性,并通过应力管理、层间耦合调控与转移集成等技术,进一步拓展了柔性磁电子器件的形变容限与系统可靠性[8-10,12-17].

基于上述脉络,本综述围绕“磁性材料-柔性制造-应用场景”(图 1[18-24])这一主线展开,系统梳理磁性材料在柔性器件中的关键特征参数、材料分类及其复合化发展趋势,总结柔性器件制造中的核心工艺路径与性能约束,并进一步归纳磁敏电子皮

肤、人体健康监测、触觉感知与智能机器人等应用方向的代表性进展与共性规律.通过跨尺度整合材料机理、器件结构与系统需求之间的映射关系,本文旨在为高稳定、可集成、可扩展的磁性柔性器件设计提供更为清晰的知识框架与发展路径[3,14,17,25-29].

2 磁性材料特点与柔性化发展

磁性材料根据其磁化行为和磁学参数的差异,可划分为不同类别(图 2).磁性材料的发展呈现出由传统刚性体系向柔性可集成体系逐步拓展的趋势.早期磁性材料主要包括铁氧体永磁体、金属永磁合金以及硅钢等,虽然磁性能成熟稳定,但材料刚硬、难以适应弯折与拉伸等复杂变形需求.随着微电子技术的需求日益旺盛,通过在刚性基底(如硅片、玻璃)上制备的纳米级厚度磁性薄膜,

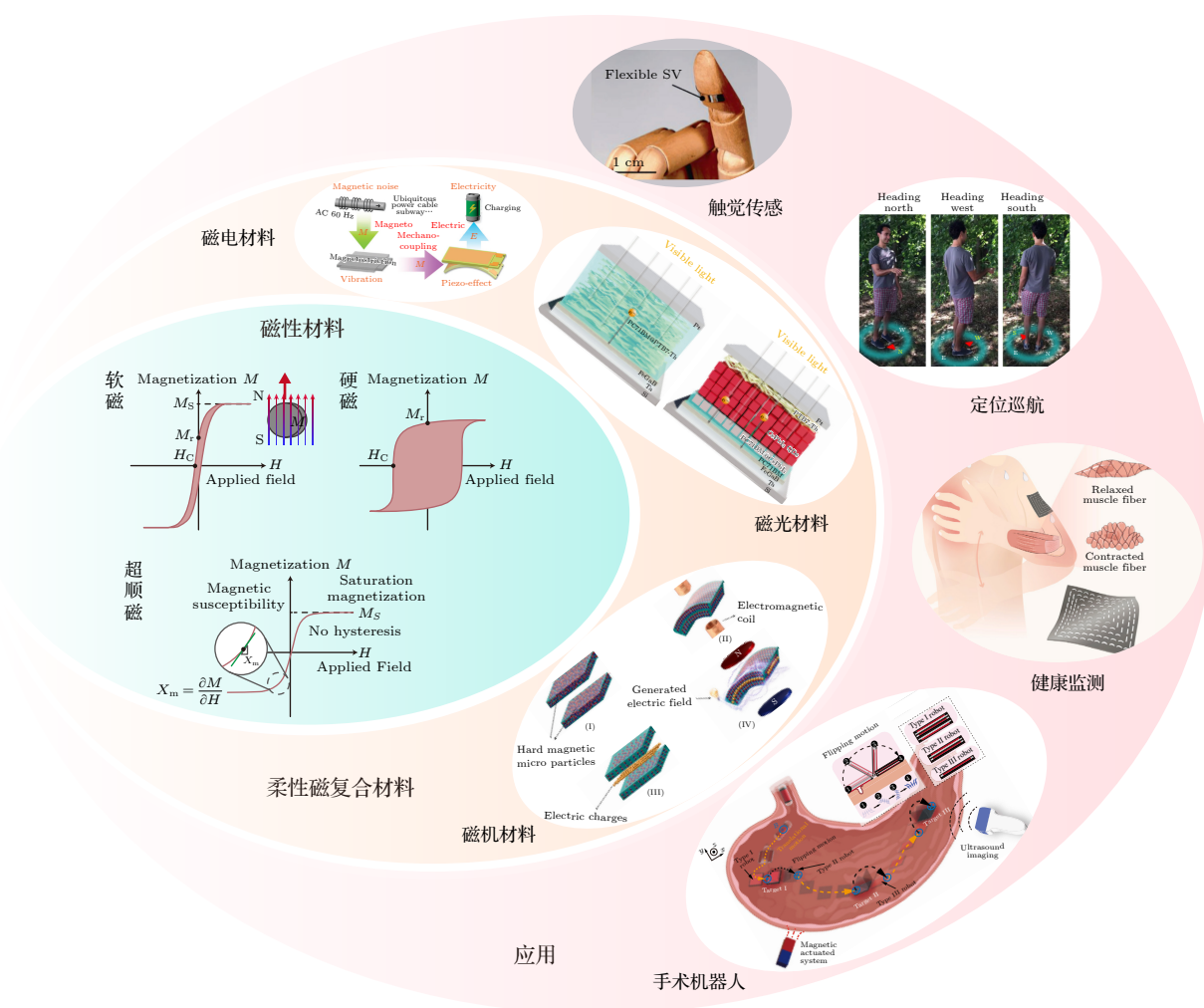


图 1 磁性材料的分类及其应用[18-24]

Fig. 1. Classification and application of magnetic materials[18-24].

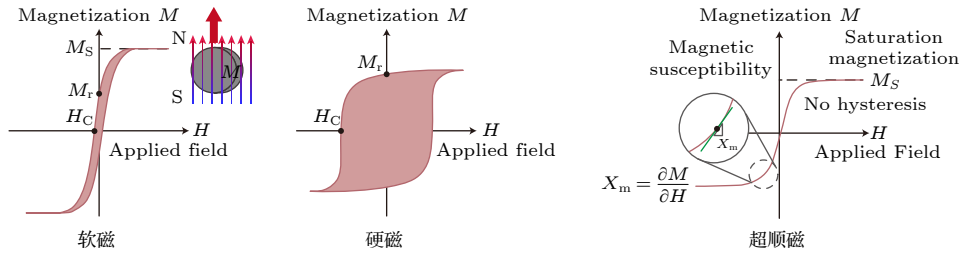


图 2 磁性材料的种类, 其中磁性材料根据其原理可分为软磁、硬磁、超顺磁

Fig. 2. Types of magnetic materials. Magnetic materials can be classified based on their principles into soft magnetic, hard magnetic, and superparamagnetic.

可用于磁阻存储、磁传感等器件, 但其对硅片或玻璃衬底的依赖仍然限制了在柔性电子中的应用^[6,14]. 进入 21 世纪以来, 材料制备与纳米技术的进步显著推动了磁性材料向柔性化方向发展. 一方面, 磁性纳米颗粒、纳米线及超薄磁性层等新型低维磁性单元不断涌现^[30]; 另一方面, 将磁性组分与弹性高分子或柔性薄膜基底相结合的磁性复合材料和柔性磁性薄膜逐渐成为研究热点^[31,32]. 相较于传统磁性器件, 柔性磁性材料能够为系统引入非接触式感知、远程操控和无线信号交互等独特优势, 在复杂形变环境中拓展磁功能的应用边界^[6,16].

2.1 磁性材料的基本特性与发展脉络

磁性材料是一类对外加磁场具有显著响应的功能材料, 其本质在于磁场作用下内部磁矩发生有序取向, 从而产生可观的磁化以及一系列可用于信号转导的效应, 例如磁阻效应 (磁场引起电阻变化, 用于磁传感与存储)、磁致伸缩效应 (磁场诱导形变, 用于致动与应变感知), 并可伴随磁导率、磁光或磁介电等多种响应, 使磁场信号能够与电学、力学、光学等信号互相耦合与转换. 随着应用从传统电工与磁电子器件拓展到柔性电子、可穿戴、电子皮肤与生物医疗传感等领域, 磁性材料的发展也由早期的块体/厚膜硬磁与软磁合金 (如铁氧体永磁体、AlNiCo、硅钢、Ni-Fe 合金) 逐步走向薄膜化、纳米化与复合化: 磁性薄膜在硅片/玻璃等刚性基底上推动了磁阻存储与磁传感, 但其衬底依赖限制了柔性集成; 进入 21 世纪后, 磁性纳米颗粒、纳米线与超薄磁层等低维单元, 以及磁性组分与弹性高分子/柔性薄膜结合形成的复合材料与柔性磁薄膜, 显著提升了材料的可弯折、可拉伸与可加工能力, 并带来非接触感知、远程操控与无线交互等系统优势. 与此同时, 实现“由刚向柔”的转变仍需在保持关键磁学参数、抑制应力诱导的各向异性与

磁畴演化、以及通过微结构与器件结构设计提升循环形变下的稳定性之间取得平衡.

2.2 软磁材料: 高磁导与低损耗的磁场响应单元

2.2.1 基本原理

软磁性材料是指矫顽力很低、易于磁化和退磁的一类铁磁/亚铁磁材料. 它们通常具有较高的饱和磁化强度 (M_s) 和极高的磁导率, 但剩磁 (M_r) 和矫顽力 (H_c) 很小, 因而在外加磁场下呈现窄小的磁滞回线. 这类材料在外部磁场反转时, 磁畴能迅速跟随变化方向重新排列, 因此对磁场的动态响应速度很快. 这些特点使软磁材料非常适合用于需要频繁磁化切换或高灵敏检测的场合.

2.2.2 常见材料类型与制备特征

软磁材料的典型代表包括软磁合金和铁氧体两大类. 如硅钢 (Fe-Si 合金) 是常见的软磁合金材料, 因加入硅降低了电导率和磁滞损耗, 被广泛用作变压器铁芯和电机转子, 而坡莫合金 (79%Ni-Fe 合金) 具有极高磁导率和极低矫顽力, 是磁屏蔽和精密磁传感器的重要材料; 此外还有 Fe-Co 合金、高磁导率的铁基非晶合金和纳米晶合金等, 它们通过快速淬火形成无序或超细晶粒结构, 极大降低了磁晶各向异性与畴壁钉扎, 从而达到超软磁性能^[33]. 典型的软磁铁氧体如锰锌 (Mn-Zn) 和镍锌 (Ni-Zn) 铁氧体, 它们是自旋指数补偿的亚铁磁氧化物, 电阻率高、涡流损耗低, 适合在高频下使用, 是开关电源变压器、射频天线中的常用材料^[34,35]. 近年来发展出多种柔性软磁材料制备技术: 一方面, 利用磁控溅射、化学沉积等方法可以直接在柔性塑料基底上沉积软磁薄膜, 例如制备在 PI 薄膜上的 NiFe 合金薄膜、FeGa 合金薄膜等, 这些薄膜在保持软磁性能的同时具备可弯曲特性^[6]; 另一方

面, 将软磁微粒或纳米颗粒掺入弹性体也是有效途径, 如将羰基铁微粒分散于硅橡胶中可以形成柔软的磁性橡胶, 常用于磁致变刚度器件 (磁流变弹性体) 中^[31,32]. 这些方法使得经典软磁材料的柔性化成为可能. 例如, 有研究在预拉伸的弹性体上沉积 Fe-Ga 薄膜, 释放后获得了褶皱结构的软磁薄膜, 极大提高了可拉伸性^[36]; 还有工作利用转移印刷技术, 将在刚性基底上生长的高品质磁性多层膜剥离并贴合到柔性衬底上, 制成性能接近刚性器件的柔性自旋阀和隧道结传感器^[37].

2.2.3 主要功能

软磁材料在柔性器件中主要充当高灵敏度磁场感应和磁通导引的功能角色. 由于其易磁化特性, 软磁材料能够探测到极其微弱的磁场变化并迅速做出响应, 因而常被用作柔性磁传感器的敏感元件. 例如, 柔性巨磁阻 (GMR) 和隧道磁阻 (TMR) 传感器通常包含软磁层作为感应层, 当外界磁场改变时该软磁层的磁化方向发生微小转动, 导致电阻变化, 从而实现高精度检测^[16]. 将软磁感应层集成在柔性基底上可以制作可贴附在皮肤、织物或曲面物体上的磁场传感器, 用于可穿戴罗盘、姿态监测和生物磁信号检测等^[16]. 软磁材料还可用于柔性电感和变压器元件中, 比如在柔性印刷电路上沉积或贴装一层软磁薄膜作为磁芯, 能够显著提高线圈的电感值和品质因数, 从而研制柔性无线充电线圈、柔性 RFID 天线等^[38]. 此外, 软磁材料的磁致伸缩特性也可以在柔性应变传感中加以利用. 某些软磁材料 (如 Fe-Ga 合金) 在受拉伸时磁化强度会变化, 这一逆磁致伸缩效应可与柔性应变片结合, 构成磁敏应变传感器, 用于监测可穿戴设备的形变^[39]. 需要注意软磁材料在柔性应用中面临的一个问题, 即机械应力往往会引入额外的各向异性, 从而影响软磁性能. 因此, 在柔性器件设计中, 常需要通过结构设计 (如将软磁层置于中性层) 或材料改性 (如采用磁致伸缩系数小的合金) 来减弱应力影响, 以保证软磁元件在变形时性能稳定.

2.3 硬磁材料: 高剩磁与可编程磁化的内置磁源

2.3.1 基本原理

硬磁性材料是指矫顽力高、剩磁强的铁磁或亚铁磁材料, 通常也称为永久磁体材料. 这类材料的磁滞回线呈现宽而方正的特征: 需要很大的反向磁

场才能消除其磁化 (高 H_c), 而即使是在无外场时也保持着显著的磁化强度 (高 M_r). 因此硬磁材料一旦被磁化至饱和, 就能在很长时间内提供稳定的磁场, 不易被外界干扰去磁. 理想硬磁体在外加磁场低于矫顽力时, 其内部磁化基本保持不变, 这意味着在实用中只要不超过一定反向场或温度, 其都能长期稳定输出磁场.

2.3.2 常见材料类型与制备特征

硬磁材料的家族包括金属合金和复合稀土磁体等. 常见的硬磁合金有钴钢 (碳钢中加入钴等成分)、AlNiCo 合金 (铝-镍-钴合金) 等, 这些材料矫顽力相对较低但剩磁较高, 可加工性好, 多用于仪表、电机中. 铁氧体磁体本身是脆性陶瓷, 但可以制成薄片或者研磨成粉末与聚合物黏结形成柔性磁片, 这种黏结永磁虽然磁性能较烧结体有所降低, 但胜在柔软可弯曲, 可裁剪成各种形状, 适合制作曲面贴合的磁体^[34]. 稀土永磁材料是当前性能最高的硬磁材料, 包括钐钴合金 (SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) 和钕铁硼 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) 等. 这类磁体通常脆性大、对拉应力和冲击敏感, 同时需要涂层保护. 为了赋予其一定柔性, 常将 NdFeB 或 SmCo 合金快速淬火制成微米级磁性粉末 (通过熔体旋淬或雾化获得纳米晶微粒), 再混合树脂或橡胶压制成型. 黏结 NdFeB 磁体可以在复杂形状或柔性结构中提供较强磁场, 是柔性永磁组件的首选方案之一^[10]. 近年来还有研究利用 3D 打印将磁粉与高分子复合, 直接打印出定制形状的磁体, 有望用于柔性电子的集成制造^[40].

2.3.3 主要功能

硬磁性材料在柔性器件中的核心优势是同时提供自持磁场与磁力矩驱动. 一方面, 柔性永磁体可作为无需供电的恒定磁场源, 在可穿戴磁传感中用来提供偏置磁场, 再由柔性磁传感器读取人体动作引起的磁场扰动, 实现定位或姿态识别, 从而替代笨重且耗能的电磁线圈^[31]. 在磁敏电子皮肤中, 将微小永磁体阵列嵌入弹性基底并配合磁传感器读出, 可利用按压导致的磁体-传感器间距变化实现触点或应力解析^[41]. 另一方面, 硬磁颗粒具有残余磁化, 在外加磁场中会产生显著磁力矩; 将各向异性硬磁微粒按预设取向分布并整体磁化, 可在外场下形成空间可编程力矩分布, 驱动磁性弹性体发

生复杂形变, 是软体机器人与磁致动器的常用策略^[3]. 在医疗场景中, 硬磁材料也可用于柔性/微型器件, 例如可吞咽机器人中嵌入 NdFeB 磁体并通过体外磁场操控其运动^[42] 以及在部分装置中利用强永磁提供驱动磁场^[43], 将硬磁材料做成薄膜或微粒并嵌入弹性基体有助于提升生物适配性与柔顺性. 与此同时, 硬磁柔性化需在磁性能与力学性能间权衡: 取向复合并充磁可获得各向异性柔性磁体以提升磁能积与输出磁场, 但提高填充率虽增强磁场与驱动力矩, 也会降低柔软度与力学稳定性, 因此需按应用折中 (致动常取中等填充率, 磁场贴片可高填充)^[3]. 此外, 聚合物基体耐温有限且 NdFeB 等硬磁材料升温易退磁, 提升硬磁复合材料的热稳定性仍是工程化应用的重要问题.

2.4 超顺磁材料: 纳米尺度磁响应与生物磁效应

2.4.1 基本原理

超顺磁性材料是指在特定尺寸范围内表现出特殊磁化行为的一类磁性材料. 宏观上看, 它们对外磁场有很高的磁化率 (比一般顺磁体高出几个数量级), 但当磁场撤去后却几乎没有磁滞: 剩磁近乎为零, 矫顽力也近乎为零. 同一种材料, 大颗粒可能是常规铁磁 (有磁滞), 而小到一定尺寸就会转变为超顺磁 (无磁滞). 因此超顺磁并非一种新的磁有序相, 而是尺寸效应下的特殊动力学表现^[36].

2.4.2 常见材料类型与制备特征

实现超顺磁性的关键在于颗粒尺寸控制和表面改性. 材料方面, 铁氧化物和纯铁、钴等是常见的超顺磁材料选择. 例如, Fe_3O_4 和 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子在室温下临界直径为 20 nm 左右, 低于此尺寸时表现出超顺磁性; 单质铁、钴因磁晶各向异性更大, 临界尺寸更小, 一般需要制备更小尺寸且包覆保护以防氧化. 由于纳米颗粒极易团聚形成较大聚集体从而失去超顺磁行为, 制备时常通过湿化学方法获得粒径均一、分散稳定的颗粒. 典型制备方法包括化学共沉淀法、水热合成、热分解有机前驱体等, 可大量制备出磁性氧化物纳米晶. 为了防止粒子在制备和使用中团聚, 还需进行表面修饰: 如利用有机分散剂或高分子刷在颗粒表面形成包覆层, 提供静电或空间位阻排斥力, 使粒子彼此分开悬浮. 这类经过功能化的超顺磁纳米粒子即可稳定存

在于液体中形成磁性液体 (磁流体), 或掺杂到凝胶、高分子中形成磁性纳米复合物^[44].

2.4.3 主要功能

超顺磁性材料在柔性器件与生物医疗中的优势主要来自其无剩磁、无磁滞、可控性强的特性: 由于撤场后不保留磁性, 超顺磁纳米颗粒之间几乎没有持续磁吸引力, 不易团聚沉降, 因而适合长期悬浮于液体或均匀分散/嵌入柔性介质中. 这一点在体内应用尤为关键, 例如超顺磁氧化铁纳米颗粒可用于外磁场操控的靶向递送或 MRI 对比增强, 撤场后不易在体内形成磁性聚集, 安全性更高^[36,44]. 同时, 在交变磁场作用下, 超顺磁颗粒可通过磁矩快速翻转产生热效应, 用于柔性磁热疗贴片的局部热疗或触发药物控释^[44]. 需要注意的是, 超顺磁材料难以像硬磁那样在静态下提供持续磁场或保持形变状态, 因此更多作为“功能单元”而非“结构支撑”存在, 常与硬磁材料形成互补 (如硬磁负责形变保持, 超顺磁负责磁热触发与恢复), 或用于以传感与治疗为主的场景.

3 复合磁性材料与柔性制造: 多相耦合机制与多尺度构筑

单一磁性材料往往难以同时满足“高磁响应”和“高机械顺应性”的双重要求, 因此复合化成为柔性磁器件从概念走向可用的关键桥梁. 复合磁性材料通过在聚合物、纤维与水凝胶等柔性基体中引入硬磁、软磁或超顺磁组分, 并结合界面工程与微结构设计, 实现磁-力-电多物理场的可控耦合, 同时在形变条件下维持可预测的磁场重构与信号输出^[45].

3.1 复合磁性材料的体系与功能机制

柔性磁性器件的核心在于复合磁性材料, 即由磁性功能材料与其他功能或基底材料有机集成形成的多相体系. 这类材料体系直接决定着器件的磁响应能力和多功能特性: 通过将磁性材料与电、光、力、热、生物等不同功能组分复合, 可实现单一材料所不具备的协同效应. 复合磁性材料在外场作用下能够表现出耦合的物理响应, 使器件具备跨物理量的感应或致动能力. 复合磁性材料种类繁多, 具备出色的可设计性, 从典型功能角度讲, 其可以分为以下这些类别.

磁电复合材料: 这类材料将磁性相与介电/压电相结合, 利用两相间的应力耦合实现磁-电转换功能. 典型体系是在磁致伸缩材料与铁电/压电材料间建立应力传递: 外磁场使磁致伸缩相形变进而应力作用于压电相产生电荷 (直接磁电效应), 反之外加电场也可通过压电应变调制磁化强度 (逆磁电效应). 磁电复合材料可实现磁场和电场信号的双向转换, 在自供能传感、能量收集等方面具有独特价值 (图 3(a))^[46]. 为了获得较强的磁电耦合系数, 材料设计上强调两相界面的有效应力传递和耦合 (图 3(b))^[47,48]. 在材料选择和结构设计时需注重界面工程, 如加入过渡层防止扩散、优化制备工艺减少界面缺陷等, 以实现磁相与电相的协同作用 (图 3(c))^[49,50].

磁光复合材料: 通过将磁性组件与光学功能材料复合, 可实现磁场对光信号的调控或光学手段对磁的探测^[51,52]. 磁性发光复合材料兼具磁响应和光发射特性, 在磁场作用下复合纳米材料可以发生定向移动, 并通过光学手段实现定位和检测. 磁性发光复合材料可用于生物分离 (生物分离)^[53]、免疫传感^[54]、靶向药物递送^[55]、以及 MRI 成像等^[56] (图 4(a)). 此外, 通过将光伏 (PV) 层与磁性薄膜复合形成异质结, 能够完成光电子向铁磁层的注入, 从而实现太阳能对自旋电子器件的无线驱动, 这在信息存储、传感器、射频/微波可调谐器件具备出色的应用前景 (图 4(b))^[19,57].

磁机复合材料: 此类复合材料体现了磁场与机械力/运动之间的耦合, 被广泛用于磁致动器、力敏传感等领域. 典型代表有磁致伸缩复合材料和磁流变材料. 磁致伸缩复合材料是在高分子弹性体中嵌入磁致伸缩合金颗粒或纤维, 当施加磁场时磁性相发生形变并带动整体复合材料产生应变, 可实现磁致机械变形 (图 4(c))^[3,20,58-60]; 反之受到外部机械应力时又会改变磁性相的磁化状态, 实现应力磁检测功能. 磁流变复合材料则通常指分散有软磁微粒的弹性体或流体 (称磁流变液/磁流变弹性体), 在无磁场时表现为柔软 (或低黏度), 而一旦加磁场磁粒子迅速磁化并形成链状结构, 从而显著提高材料的杨氏模量或黏度 (图 4(d))^[61-63].

磁热复合材料: 磁热效应是指磁性材料在磁场作用下产生热量或温度变化的现象, 典型包括磁感应加热. 将磁热功能引入柔性材料, 可开发出用于热疗、制冷等用途的复合体系. 例如, 在生物医疗

领域, 利用磁性纳米粒子的感应发热特性制备磁热复合材料, 可实现对体内深部的肿瘤进行无创磁热疗法 (图 5(a))^[64]. 由于磁场对生物组织的穿透性远高于光学手段, 磁热复合材料克服了传统光热材料穿透深度有限的缺点, 可在体内实现局部升温以杀伤病变细胞或释放药物. 然而, 目前磁热剂 (如 Fe_3O_4 纳米颗粒) 的发热效率有待提高, 需要通过材料组合和结构设计来增强磁能到热能的转换. 例如, 将磁性纳米粒子负载于导热性能优异的柔性载体上, 或与光热材料复合形成双模态加热体系, 以提高整体热疗效果.

磁生物复合材料: 强调磁性材料与生物材料的结合, 旨在获得良好生物相容性. 例如, 采用天然生物材料作为基底复合磁性微粒或磁性纳米薄膜, 可制得力学性能接近人体软组织且可降解的柔性磁性传感膜, 实现长周期、安全地贴附于体表或植入体内^[65,66]. 这种材料体系既能响应外部磁场实现无线无源的信号传输, 又不会引起免疫排斥反应, 适合于连续的生理信号监测 (图 5(b))^[67]. 另一方面, 磁生物复合材料还包括用于细胞和组织工程的磁响应支架与微载体等. 例如, 将磁性纳米颗粒掺入水凝胶支架中, 可以在外加磁场下对培养细胞施加远程力学刺激, 从而影响细胞的生长分化 (图 5(c))^[68]. 磁生物复合材料将磁性的远程可控性与生物材料的环境适应性相结合, 为柔性传感器、医疗植入物以及生物操控系统提供了重要的材料基础.

综上所述, 复合磁性材料通过巧妙设计磁性相与其他功能相之间的协同耦合机制, 实现了多物理场的交互, 这些协同机制的有效发挥有赖于材料界面的精准调控, 包括界面结合强度、应力传递效率、相间反应抑制等方面的优化设计. 通过合理的界面工程和结构设计路径 (如构筑层状异质结构、功能粒子表面功能化、双连续互穿网络等), 复合磁性材料的性能得以充分提升, 为柔性磁性器件实现高灵敏度、多功能、小型轻量化提供了材料保障.

3.2 柔性磁性器件的制造策略与工艺挑战

3.2.1 混合/共混复合: 体相磁填料策略与分散控制

混合策略是指将磁性颗粒作为填料直接掺入柔性基体, 通过物理混合、共混浇注/铸造或原位固化等工艺制备大体积或厚膜状磁性复合材料的

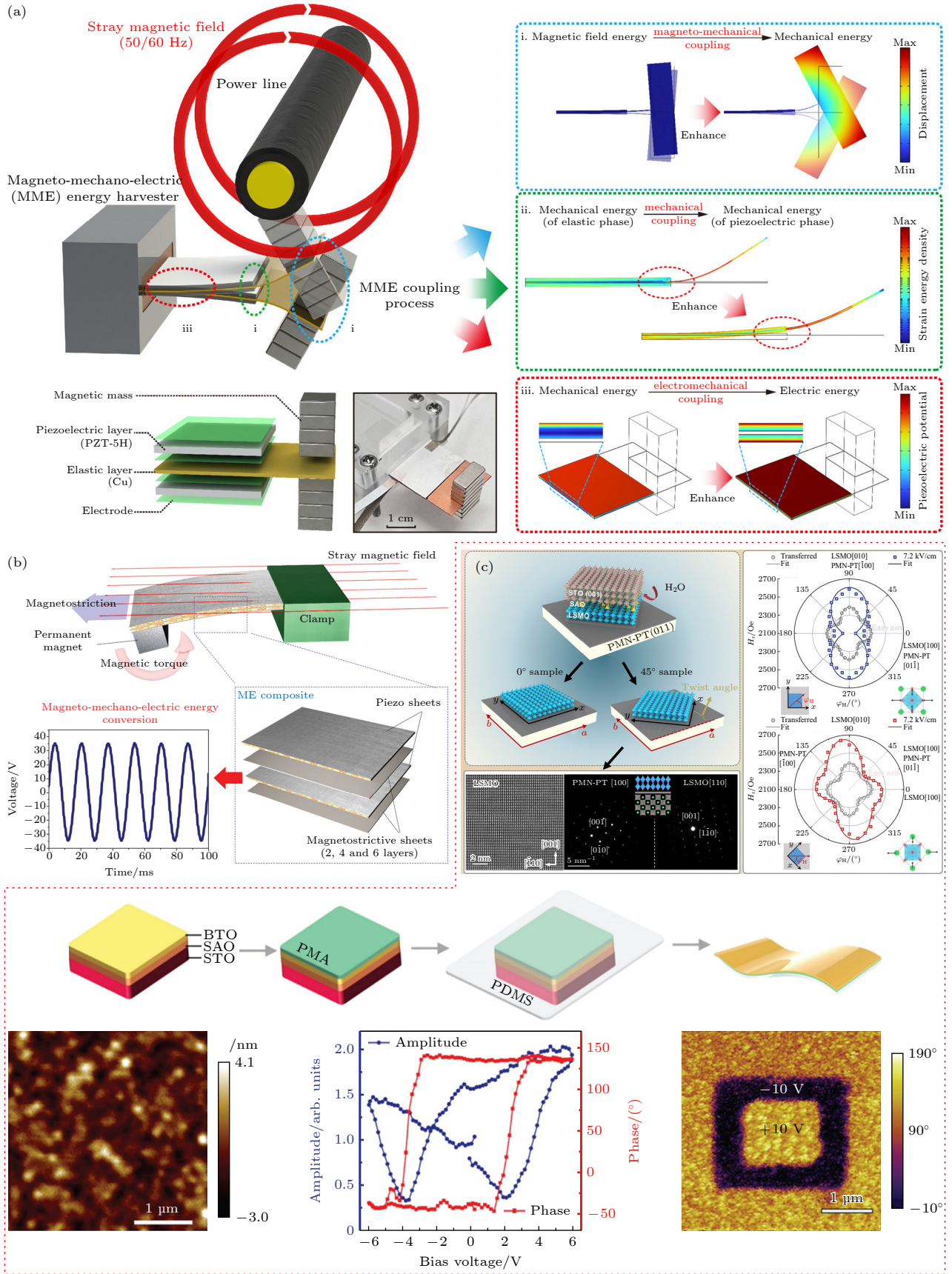

 图 3 磁电复合材料 (a) 压电/弹性相磁机电能量采集器件^[46]; (b) 环境磁能供给的磁机电发电机^[48]; (c) 人工磁电异质结构^[49,50]

 Fig. 3. Magneto-electric composite materials: (a) Piezoelectric/elastic phase magneto-electric energy harvesting device^[46]; (b) magneto-electric generator powered by environmental magnetic energy^[48]; (c) artificial magneto-electric heterostructure^[49,50].

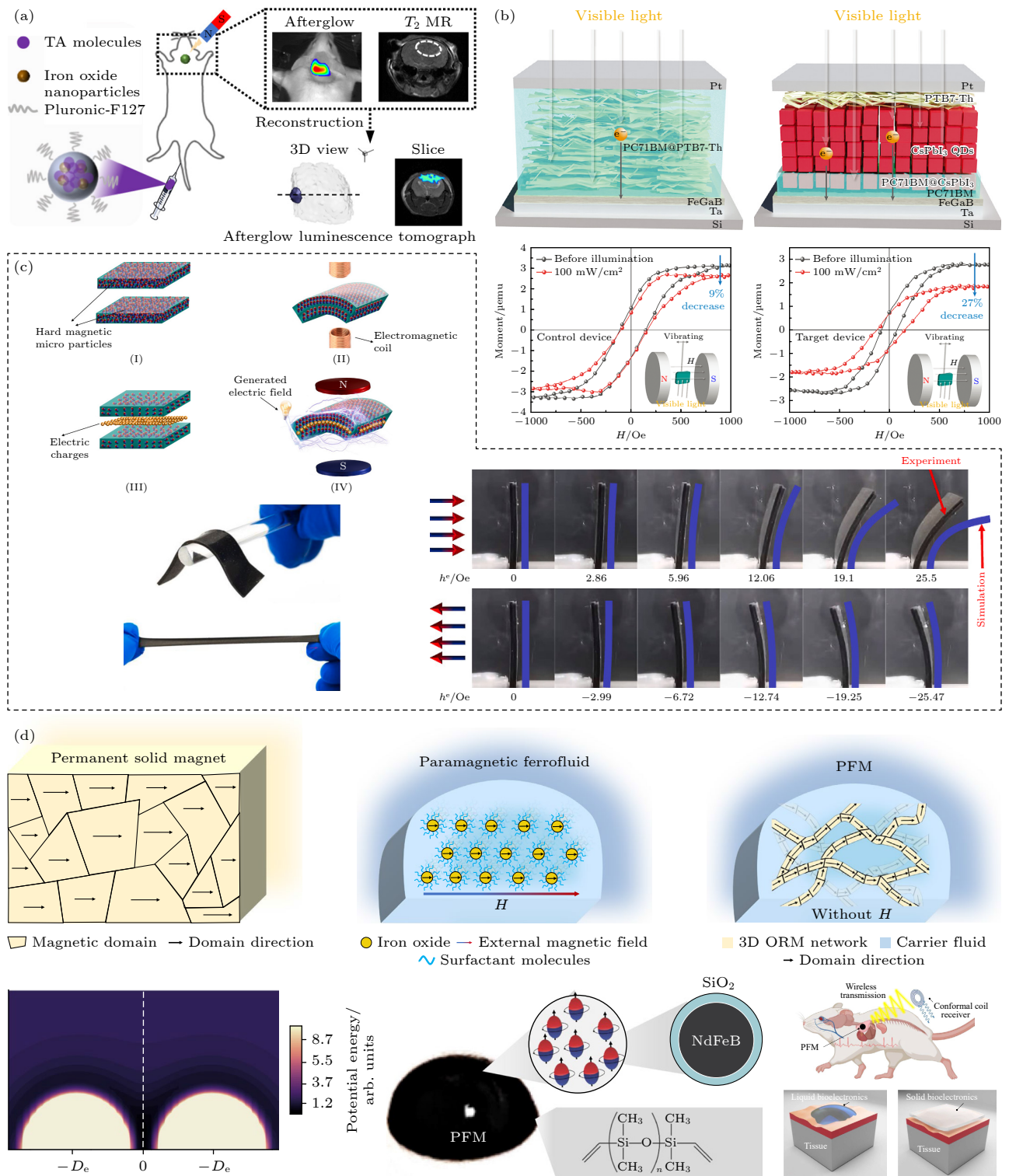


图4 磁光与磁机复合材料 (a) 磁性靶向发光磁性纳米进行深沉肿瘤成像^[56]; (b) 可光控的光伏/磁性薄膜异质结^[19]; (c) 具有极强自偏磁电效应的软磁电材料^[20]; (d) 基于非布朗磁颗粒的永磁流体材料^[61]

Fig. 4. Magnetic-optical composite materials and magnetic-machine composite materials: (a) Magnetic-targeted luminescent magnetic nanoparticles for deep tumor imaging^[56]; (b) photo-controllable photovoltaic/magnetic thin-film heterojunction^[19]; (c) soft magnetic-electric materials with extremely strong self-polarized magnetoelectric effect^[20]; (d) permanent fluid material based on non-Brownian magnetic particles^[61].

方法^[69,70]. 该策略的关键在于获得稳定、均匀的颗粒分散, 因为分散状态直接决定材料的力学一致

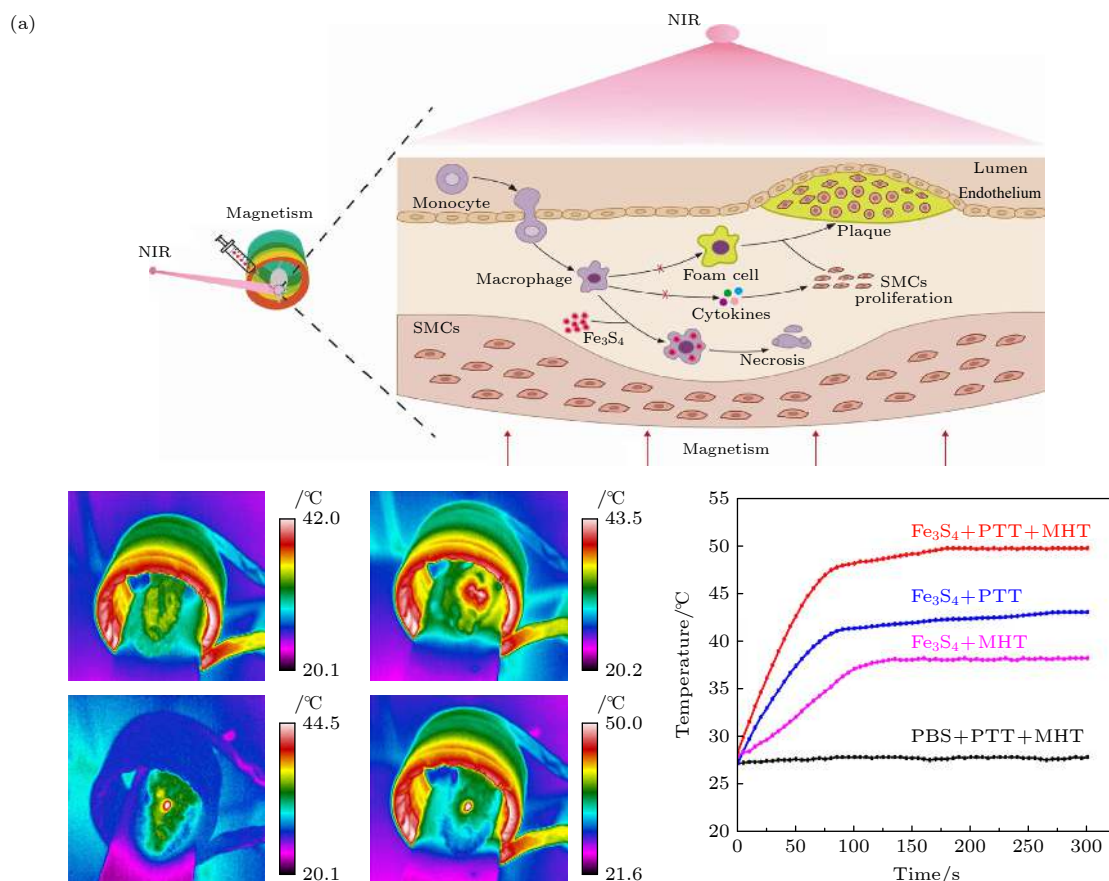
性、磁响应均匀性与可重复性; 若出现团聚或空间不均一, 容易导致局部性能劣化甚至失效, 因此常

结合机械搅拌、超声、球磨等手段,并通过表面改性/功能化提高颗粒与聚合物的相容性与分散稳定性,例如铁颗粒表面改性可显著改善其在硅橡胶中的界面作用与分散性,并同步提升力学性能与磁流变响应^[71].与此同时,磁性相含量对性能具有决定性影响:提高填料比例通常增强磁响应与可编程磁化潜力,但会增大复合材料刚性、降低延展性并收窄加工窗口,这种“磁性能-柔顺性”权衡被多篇磁性软复合材料综述反复强调为核心设计约束,因此需要结合应用目标,通过基体类型、交联方式与界面设计来在承载能力、疲劳稳定性与磁响应之间取得平衡^[69–71].

混合策略已经产生了丰富的磁性复合材料体系.例如,将硬磁颗粒(如NdFeB)混入硅橡胶,可制成柔性硬磁复合材料,并可通过后续磁化/磁化编程获得空间可设计的磁化分布,用于柔性永磁片、软驱动器或可编程形变结构^[72].对于软磁填料体系,软磁颗粒分散于弹性体可形成磁流变弹性体(MRE),其典型特征是在外磁场作用下实现刚度/阻尼的可逆调制,适用于减振与可调刚度元件等场景^[73].在生物医学方向,超顺磁 Fe_3O_4 等磁性纳

米粒子与水凝胶网络复合后,可在交变磁场下产生磁热效应,用于磁热治疗与磁触发药物释放等^[74].在磁性薄膜/膜器件方面,磁性合金薄膜与柔性生物基底复合可用于“传感-通信”相关应用^[66].

然而,这些体系的发展仍面临瓶颈:高磁粉含量往往导致加工黏度上升、成型困难并降低疲劳寿命;磁粉与聚合物界面结合不足时,反复形变下可能出现界面损伤,进而引发漂移与性能衰减^[70,71].此外,在电磁/高频相关应用中,磁性填料可能引入损耗与发热等问题^[75].针对上述问题,近期研究进一步提出把混合策略与增材制造结合:通过磁场辅助打印/光固化等方法在制造过程中实现颗粒取向与磁化分布的空间编程,从而精确控制磁粉在器件中的空间分布与可编程磁化,实现更复杂的结构与功能^[76],而面向硬磁软材料的直接墨水书写(DIW)也已发展出连续磁化编码的可能^[77].展望未来,混合策略有望与先进制造和可编程磁化进一步融合,形成更复杂结构与功能的柔性磁性器件,包括集成感知与驱动的磁性软机器人与可重构磁响应材料^[76,77].



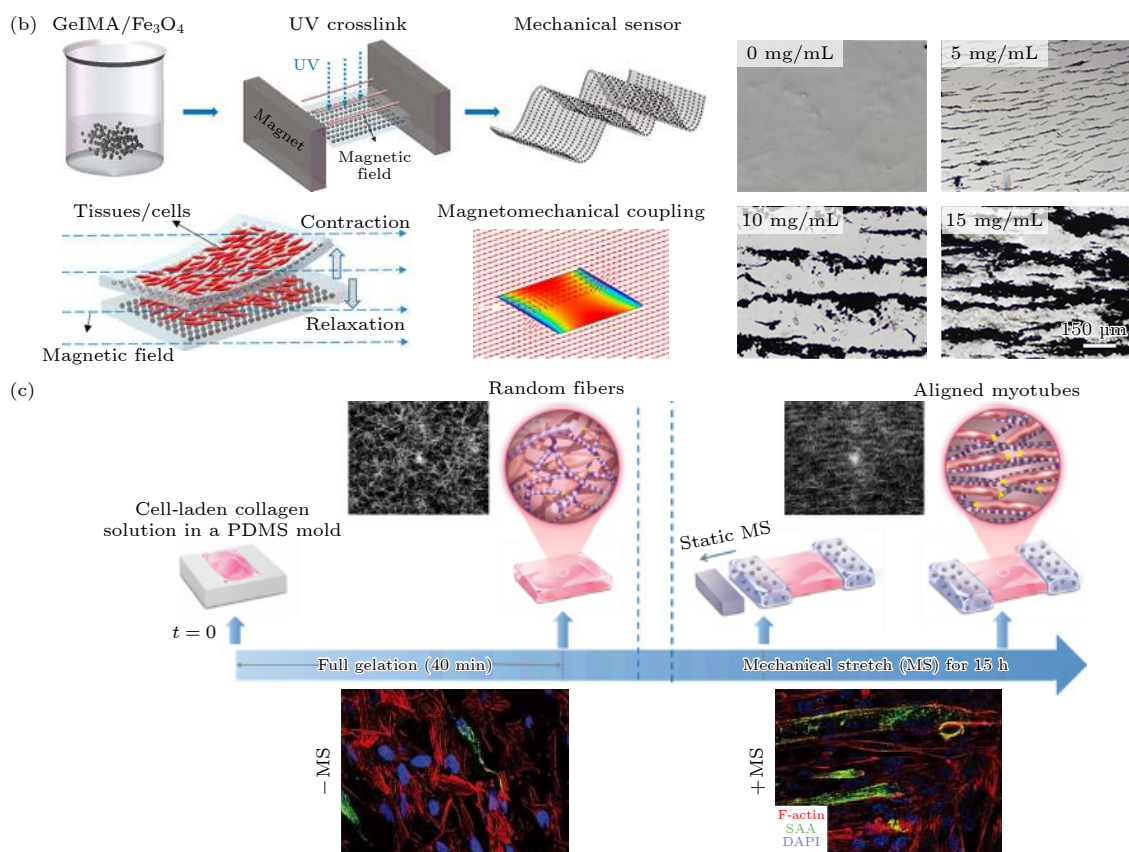


图 5 磁热与磁生物复合材料 (a) 基于磁性纳米粒子的感应发热在深部肿瘤热疗的应用^[64]; (b) 基于超柔生物复合磁水凝胶的可植入应变监测应用^[67]; (c) 基于天然生物材料复合磁性水凝胶的力刺激细胞支架^[68]

Fig. 5. Magnetic thermal and magnetic biological composite materials: (a) Induced heating based on magnetic nanoparticles for the application of tumor hyperthermia in provincial hospitals^[64]; (b) implantable strain monitoring application based on ultra-flexible bio-composite magnetic hydrogel^[67]; (c) force-stimulating cell scaffold based on natural biological materials combined with magnetic hydrogel^[68].

3.2.2 原子层沉积与薄膜构筑

原子沉积方法主要指采用真空薄膜沉积技术在柔性基板上生长磁性功能薄膜或多层膜, 包括磁控溅射、电子束蒸发、化学气相沉积 (CVD)、原子层沉积 (ALD) 等手段. 此类方法能够获得厚度从纳米级到微米级的高质量磁性薄膜, 适用于制造柔性磁存储器、磁传感芯片等需要精细结构的器件. 然而, 在柔性衬底 (通常为高分子薄膜, 如聚酰亚胺 PI、聚酯 PET 等) 上进行薄膜沉积, 面临着与刚性基底截然不同的工艺挑战^[14,25]. 首先是应力控制: 磁性薄膜在沉积过程中往往产生内应力, 如果应力过大, 会导致柔性基底发生卷曲变形, 甚至引发薄膜龟裂或剥离. 通过将模量分布结构与液态金属集成, 传感器能够在复杂变形下保持性能, 使整体系统具备全向拉伸能力 (图 6(a))^[7]. 柔性基底本身无法提供像硅片那样高的平整度和刚性固定, 因而薄膜/基底界面的应力状态对最终器件的磁各向异

性、磁畴结构都会产生显著影响. 通过对柔性基底尤其是生物材料基底制备过程的控制降低粗糙度, 同时严格控制薄膜沉积过程中的温度和速率能够实现铁磁材料与柔性基底的良好复合 (图 6(b))^[78]. 此外, 采用在塑料基底表面旋涂光刻胶的方法, 有效降低了基底粗糙度并提高磁性多层膜界面的平整度, 在 Kapton 薄膜上制备出了巨磁阻效应 (GMR) 高达 20% 的 Co/Cu 多层膜, 性能甚至优于在硅片上制备的同类刚性器件 (图 6(c), (d))^[37,79].

另一个关键是层间耦合调控, 这在多层膜器件中尤为重要. 柔性磁性器件常采用自旋阀等多层结构, 其磁电输出依赖层间交换耦合、界面散射与磁各向异性的协同稳定性^[6,7], 因此在柔性基底上制备时需保证各层在应力传递与结构匹配上的兼容性, 避免弯折/拉伸引发耦合漂移甚至失效^[80]. 为提升薄膜质量与应变容限, 研究还提出牺牲层转移与应变结构化等制造策略: 例如利用可溶解 MgO

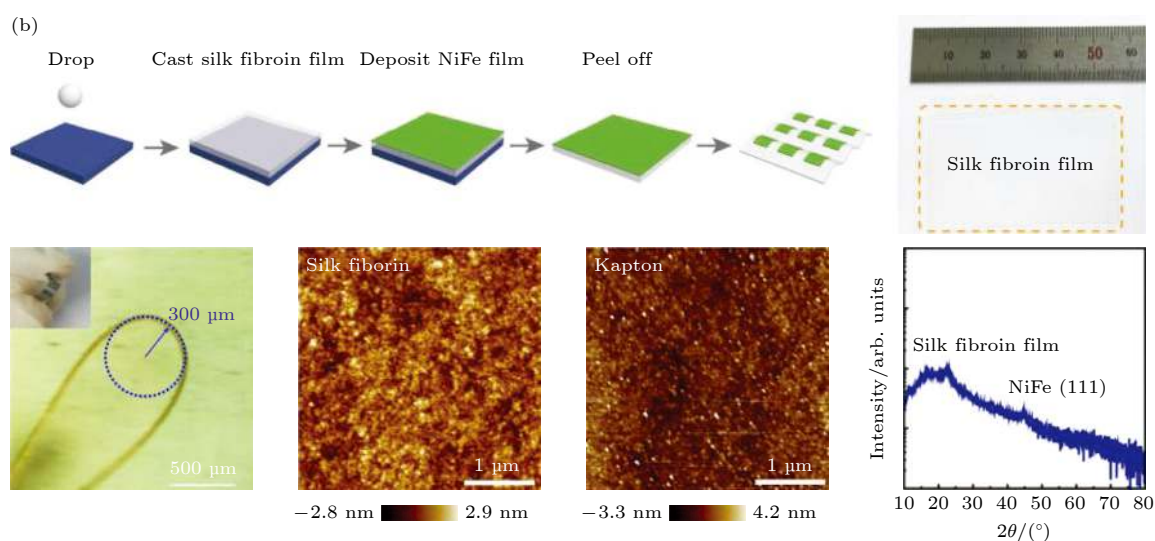
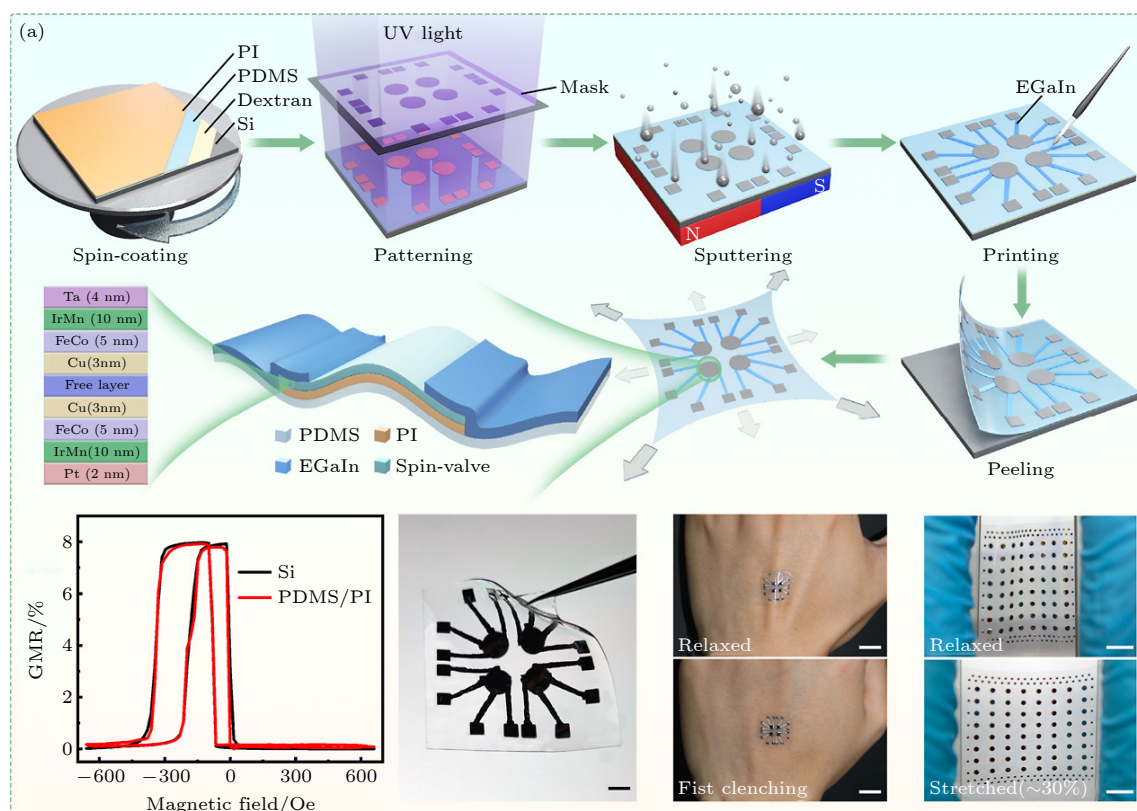
牺牲层将外延 CoFe_2O_4 薄膜剥离并转移到柔性基底, 实现高品质铁氧体薄膜的柔性集成^[81]. 又如将 GMR 多层膜转移到预拉伸弹性体并释放形成波纹褶皱结构, 以结构吸收应变并在较大拉伸范围内保持稳定 GMR 响应^[37].

总体来说, 基于原子级沉积与薄膜生长的制造范式能够赋予柔性磁性器件高精度与小尺寸优势, 但其长期可靠性高度依赖于界面耦合与应力管理. 通过针对柔性基底特性的工艺优化(应力控制、低温沉积、界面工程与转移集成等), 已经能够在较大形

变条件下维持多层磁薄膜器件的关键磁输运特性与工作稳定性. 未来随着多层界面在复杂应力场下的耦合机理被进一步解析, 以及转移制造与可控预应力结构的成熟, 这类方法有望在柔性自旋电子学、磁存储阵列与高稳定磁传感平台中发挥更关键作用.

4 磁性材料在柔性器件的应用

磁性柔性器件的应用优势, 本质上来自磁信号“可穿透封装、可远距耦合、可空间编程”的信息属



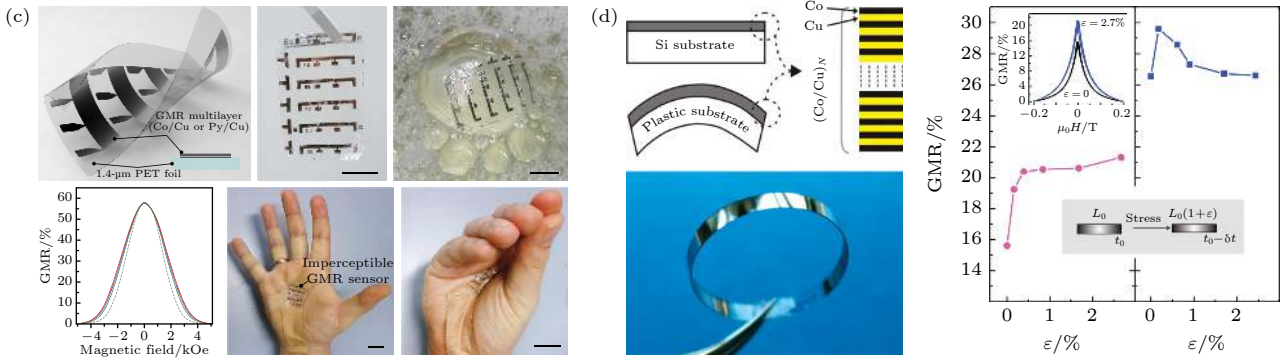


图6 原子层沉积与薄膜构筑制备的柔性磁性器件 (a) 全向可伸缩的自旋阀柔性传感器^[7]; (b) 天然生物材料基底上的纳米磁性薄膜制备方案^[78]; (c) 基于天然生物材料复合磁性水凝胶的力刺激细胞支架^[37]; (d) 基于力学可调节缓冲柔性基板实现的Co/Cu 多层 GMR 器件^[79]

Fig. 6. Flexible magnetic devices fabricated through atomic layer deposition and film construction: (a) Omnidirectional stretchable spin valve flexible sensor^[7]; (b) scheme for preparing nano-magnetic films on natural biomaterial substrates^[78]; (c) force-stimulated cell scaffold based on natural biomaterial composite magnetic hydrogel^[37]; (d) Co/Cu multilayer GMR device achieved through a mechanically adjustable buffer flexible substrate^[79].

性, 以及磁源/磁路在形变下可被结构化重构的可设计性. 在应用层面, 这些特征将柔性系统从单纯的接触式传感扩展到无接触交互、无线无源监测与远程驱动等更系统化的能力. 本节聚焦于磁敏电子皮肤、人体健康监测、触觉感知、智能机器人及其他新兴方向, 系统综述了磁性材料在这些场景中的工作机制、器件架构与系统集成进展. 通过剖析不同应用对材料性能、结构设计与信号读出的具体要求, 旨在揭示磁性柔性技术从实验室原型走向实际应用的路径与挑战.

4.1 磁敏电子皮肤: 基于磁场读出的可封装柔性感觉与无接触交互界面

磁敏电子皮肤是以磁性材料或磁场读出机制为核心、可贴附人体或软曲面并在形变条件下实现触觉与交互信息采集的柔性系统. 与电阻、电容或压电电子皮肤相比, 其优势主要体现在三点: 一是磁信号可在多种非磁性介质中实现有效耦合, 因此在隔离膜、织物覆盖等条件下仍具可读性, 更适合防水、防污染或医疗隔离等场景^[9,16]. 二是磁源(永磁体、磁化微结构或磁性复合层)产生的空间磁场分布具有可设计性, 可在结构与磁化层级实现信息编码, 为多自由度触觉解耦、阵列化扩展及方向/矢量感知提供新的设计维度^[82-84]; 三是磁场读出可与 AMR, GMR, PHE 等多类磁电器件兼容, 便于与柔性电路、可穿戴终端及低功耗信号链集成^[6,85].

从器件与材料平台看, 磁敏电子皮肤的发展很大程度上依赖可形变磁场传感单元的制造与可靠

性提升. 可印刷、可拉伸的 GMR 传感器为批量化、皮肤共形部署提供了关键器件基础, 并在弯折与拉伸条件下保持稳定磁敏输出(图 7(a))^[6,21]; 全向拉伸自旋阀阵列则进一步提升了多轴形变下的响应稳定性与阵列一致性^[7]. 与此同时, 共形透明磁阻器件兼顾外观友好与耐环境交互, 并在浸水等条件下保持稳定读出^[10,16]; 磁传感矩阵与驱动/放大电路的集成则为大面积磁场成像与定位提供了器件级支撑(图 7(b))^[86]. 在长时程稳定性方向, 引入交变磁场触发的自修复策略, 可在器件受损后实现性能恢复/状态重置, 为机械损伤与疲劳裂纹条件下的可持续工作提供了新路径^[10].

在交互模式上基于磁源与传感器相对位姿变化的体系可在接近阶段实现预接触探测与位置/方向编码, 并在接触后进一步解码触压与触点信息^[9,12]; 磁化微结构(如磁化微柱)则可强化磁场调制能力, 提升无接触交互与信息通信的灵敏度和多点分辨性^[87]. 此外, 具备超低探测限与宽量程的柔性磁场传感器、以及磁弹/磁致弹阵列等路线, 也为复杂环境下的稳定读出和实时动作交互提供了补充支撑^[10,12,13,88]. 在更高层应用中, 磁敏电子皮肤还可与地磁解码耦合, 形成可穿戴定向与姿态感知单元. 电子皮肤罗盘已展示在超薄柔顺基底上感知地磁场并用于虚拟交互或户外定向的可行性(图 7(d))^[24], 而生物启发的人工突触罗盘则进一步将地磁方向映射为可学习输出, 为低功耗、自适应的神经形态导航接口提供了新思路^[85,89]. 总体而言, 磁敏电子皮肤的进一步发展仍依赖材料-结构-



图 7 柔性磁传感器用于制造磁敏电子皮肤 (a) 3D 打印制造的可贴附磁敏电子皮肤^[6,21]; (b) 通过微纳制造构建的单片丙烯酸晶圆电子皮肤用于位置感知^[86]; (c) 自供电电子皮肤通过人机交互实现运动感知^[12]; (d) 磁敏电子皮肤感知地磁场实现定位巡航^[24]

Fig. 7. Flexible magnetic sensor for manufacturing magnetic-sensitive electronic skin: (a) 3D-printed attachable magnetic-sensitive electronic skin^[6,21]; (b) single-chip acrylic wafer electronic skin constructed through micro-nano manufacturing for position sensing^[86]; (c) self-powered electronic skin that realizes motion sensing through human-computer interaction^[12]; (d) magnetic-sensitive electronic skin that locates and navigates by sensing the Earth's magnetic field^[24].

读出协同优化: 材料侧提升柔性磁阻薄膜与软/硬磁复合层的形变稳定性, 结构侧通过可编程磁化实现多自由度信息编码与解耦, 系统侧通过预先标定与改进算法实现环境噪声的抑制与个体差异的个性化采集, 从而推动其由原理验证走向可规模化部署的柔性人机接口^[24,83].

在磁敏电子皮肤与无接触交互中, 挑战已从“能否读出”转向“在复杂环境中稳定、可解释地读出”. 环境磁噪声(地磁扰动、金属物体、电子设备)会与人体动作信号叠加, 导致久戴漂移与误触发; 可采用差分参考传感、三轴矢量测量与主动补偿结合, 并用物理模型约束的滤波/学习算法实现在线标定. 多自由度解耦依赖磁源结构与磁化编码, 可通过可编程磁化图案与编码设计提升容错.

4.2 人体健康监测: 无线与连续生理信息获取

硬磁/软磁颗粒或磁性纳米结构与弹性体等软材料复合后, 可在拉伸、压缩、弯折和剪切过程中保持可设计的磁响应, 将生理力学等信号转化为磁场分布或等效磁参数变化^[59,61]. 同时, 磁信号既可通过霍尔、磁阻等器件近场读出, 实现跨封装、跨介质读取, 更契合可穿戴和植入式系统对无线、低功耗与长期工作的需求^[65,66,90]. 从机理上看, 现有体系主要包括材料本征的磁-力耦合, 以及形变引起的磁源相对位移两条路径^[59,61]. 在体表监测方面, 磁性柔性材料已覆盖运动应变、关节活动和皮肤微形变等多类指标. 丝素等天然高分子基底因良好的生物相容性与皮肤适配性, 被用于构建柔性磁敏薄膜与运动监测器件(图 8(a))^[66]. 柔性 CoFeB 丝素薄

膜则进一步展示了传感通信一体化的潜力^[65,66]. 在系统层面, 将人体运动引起的磁场变化反演为姿态、位移或轨迹参数, 实现连续活动记录(图 8(b))^[22,65]. 结合医院场景对安全的要求, 磁感应无接触交互界

面强调非接触、封装友好, 可用于降低交叉感染风险^[91,92]. 在深部生物力学与植入式监测方向, 磁植入物结合体外读出可实现脊柱运动的无线监测(图 8(c))^[93], 毫米尺度磁性植入体与体表可穿戴装

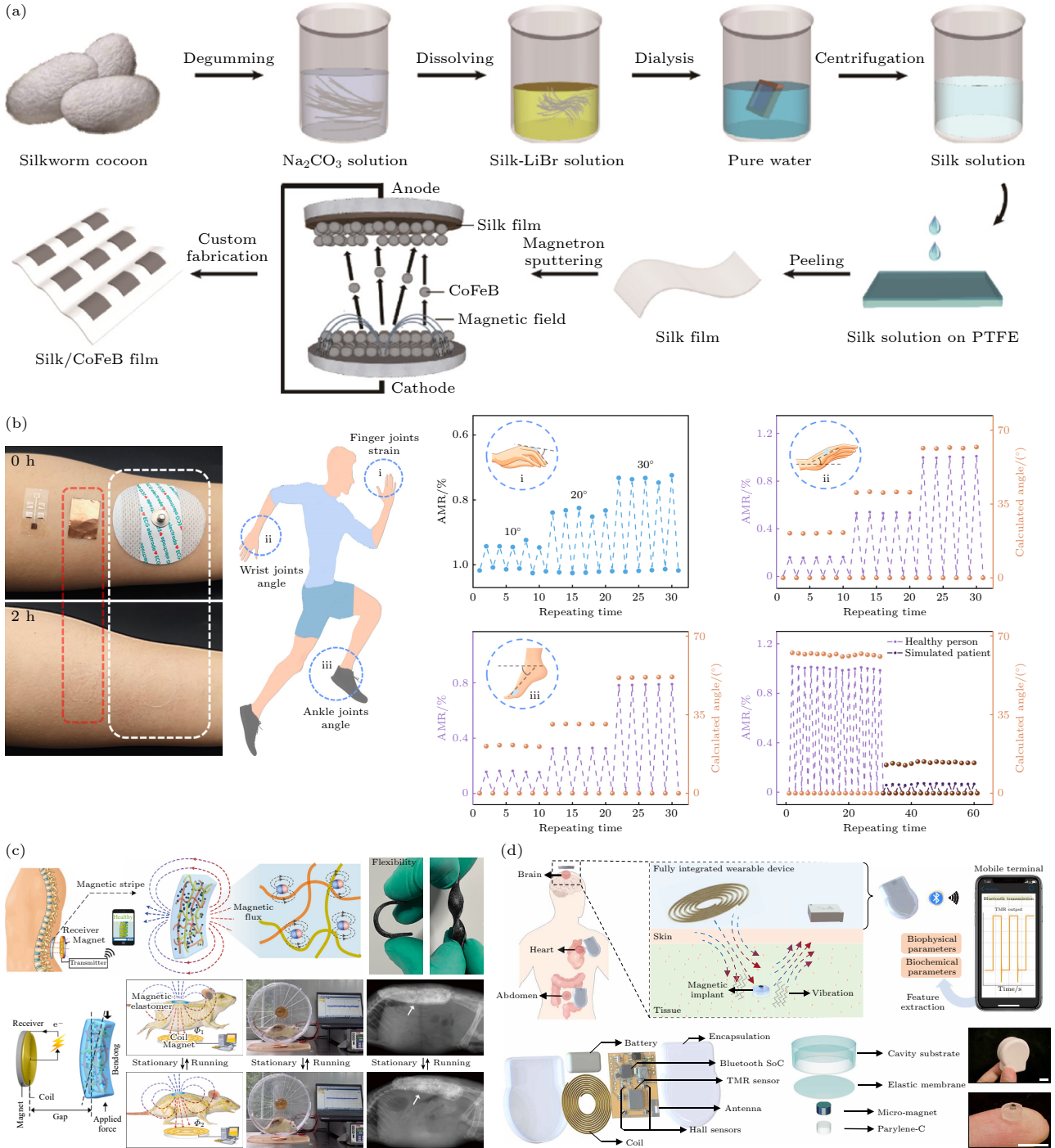


图 8 柔性磁传感器实现人体健康监测 (a) 丝素基磁敏复合薄膜实现柔性贴附与人体运动信号采集^[66]; (b) 基于丝素和 NiCo 的柔性磁传感器实现关节运动监测^[65]; (c) 可植入的柔性磁传感器用于脊柱运动监测^[93]; (d) 穿戴式柔性磁传感器监测液体黏稠度、环境压强等物理生化量^[92]

Fig. 8. Flexible magnetic sensors for human health monitoring: (a) Silk-based magnetic sensitive composite film enables flexible attachment and collection of human motion signals^[66]; (b) flexible magnetic sensor based on silk and NiCo realizes joint motion monitoring^[65]; (c) implantable flexible magnetic sensor is used for spinal motion monitoring^[93]; (d) wearable flexible magnetic sensor monitors physical and biochemical quantities such as liquid viscosity and environmental pressure^[92].

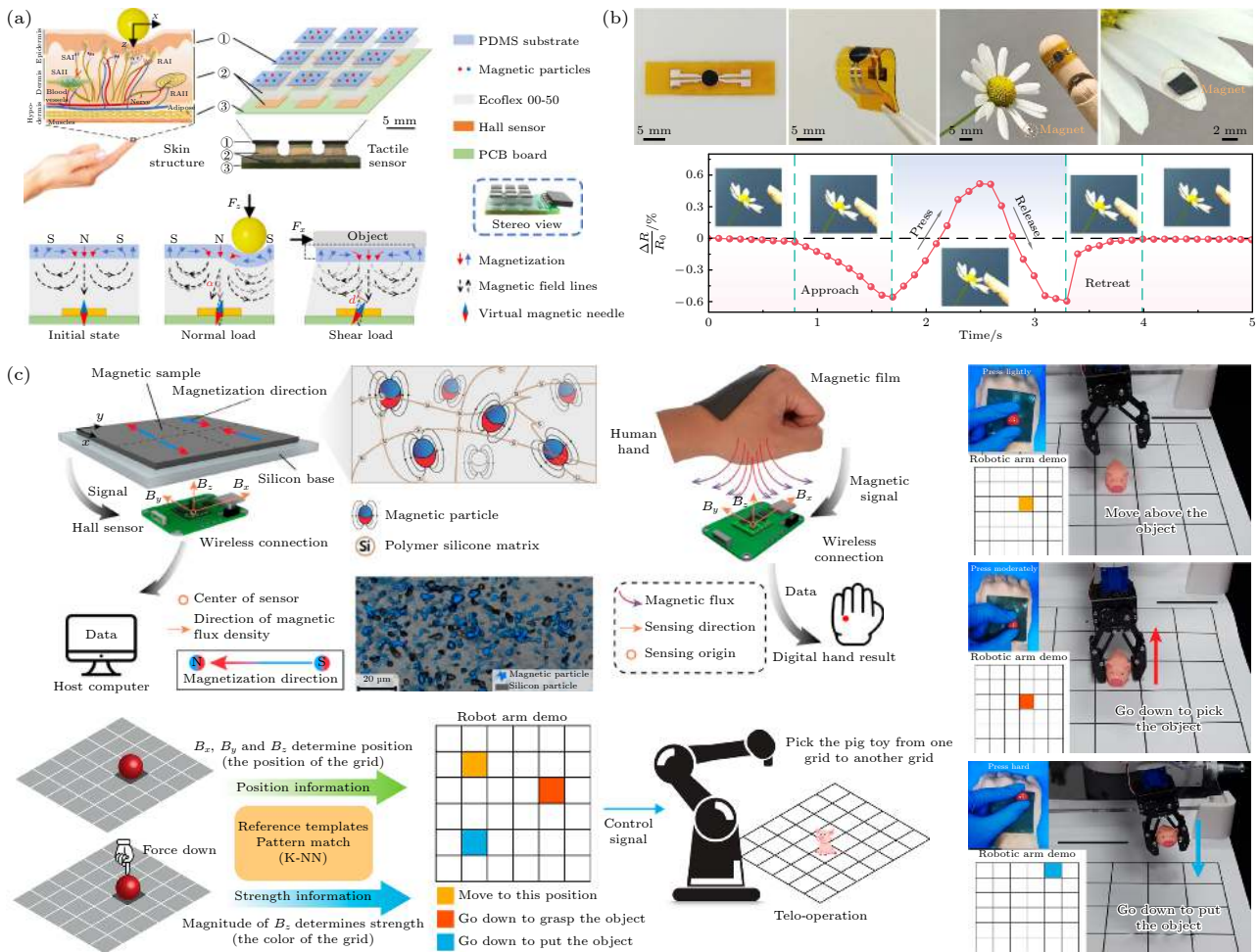
置的组合则为长期部署的体内传感提供了新方案(图 8(d))^[92]. 此外, 超软磁性水凝胶和永磁流体等材料进一步拓展了这一方向, 使器件在顺应性、贴合性和信号稳定性方面具备更大优势^[22,61,67]. 在疾病诊断与病程跟踪方面, 磁性柔性材料通常通过对微弱动作或形变的高保真记录与对深部形变的可持续追踪体现价值^[22,94]. 例如柔性霍尔传感器阵列可贴合组织表面记录局部磁场变化, 并通过模型重建实现对肿瘤组织形变或生长趋势的早期监测^[95]. 在口腔等特殊部位, 基于磁阻变化的压力监测模块可实现跨组织或跨封装的无线读出, 用于咬合力或口腔压力等指标的长期监测^[65,90].

可以发现, 磁性柔性器件的优势集中在封装友好与穿透性(磁场可跨非磁性隔离层读出)、三维矢量与无接触信息编码(可通过磁化编程与磁路设计实现多自由度解耦)、以及无线无源/低功耗读出潜力(可通过磁通检测或外部激励实现电池与穿皮导线最小化); 其短板主要是对环境磁噪声与装配公差更敏感、需要磁源/磁化步骤并引入标定开销,

且高性能磁阻薄膜与多层器件在一致性与成本上仍受工艺约束. 总体而言, 走向真实应用仍需系统性解决磁化状态与界面黏附的长期稳定、环境磁噪声与运动伪影抑制, 以及植入式读出距离与耦合效率等约束. 更可预期的演进方向是材料更软、系统更无源、信息更高维, 并通过标定与数据驱动反演提升临床可解释输出^[59,61,65,92].

4.3 触觉感知: 可封装、可解耦与可扩展的触觉界面

触觉感知是柔性器件在真实交互场景中实现闭环感知与智能反馈的关键环节, 相较于电阻、电容或压电方案, 磁性材料体系的优势在于磁信号具有更好的封装友好性和介质适应性: 磁场可穿透多数非磁性封装层与隔离介质, 使触觉界面在防水、防污染和隔离操作条件下仍能稳定工作. 同时, 磁场分布可通过结构设计承载可编码的触觉信息, 为多自由度解耦和面积扩展提供新的设计空间(图 9(a))^[41,96-98]. 因此, 磁性柔性触觉界面本质上



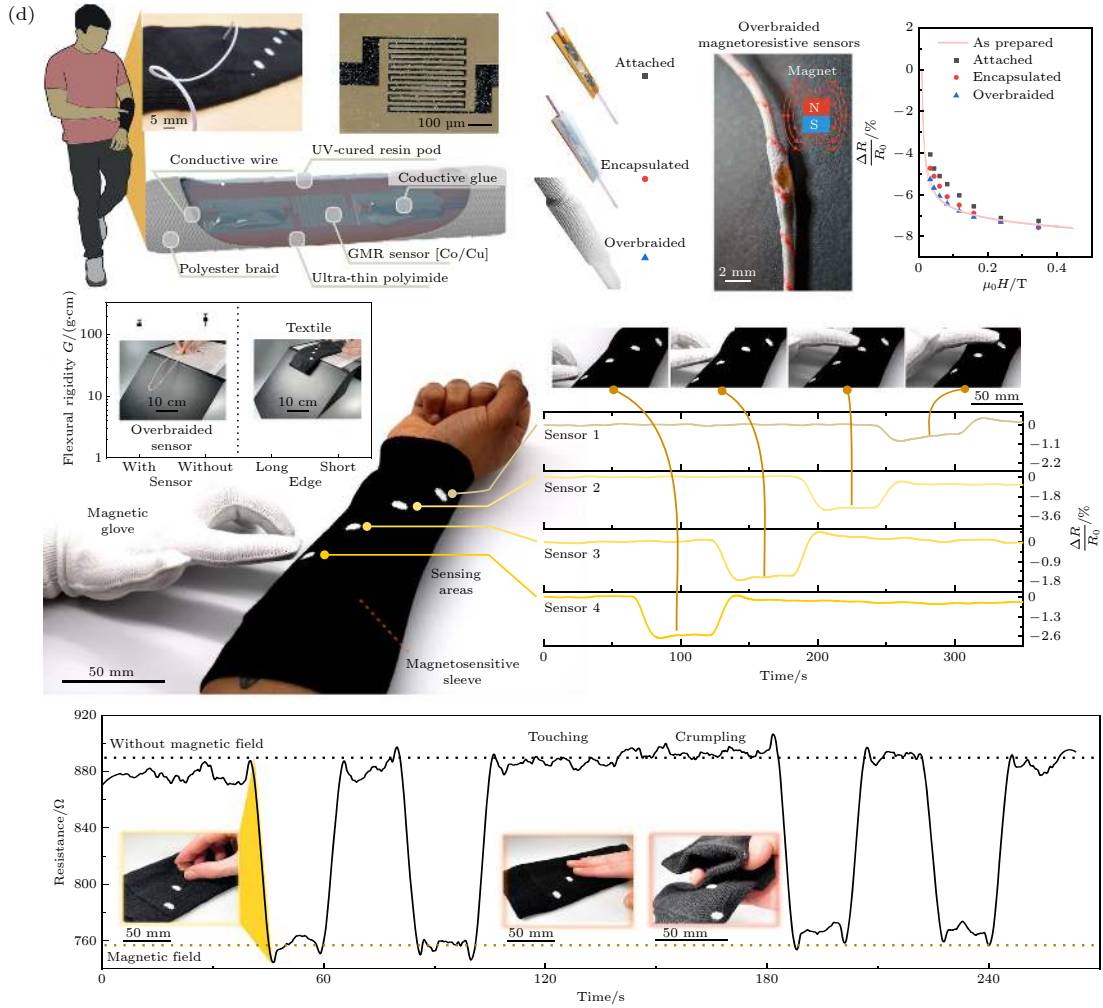


图9 柔性磁传感器用于触觉传感 (a) 软磁性皮肤用于超分辨率触觉感应并实现力自耦功能^[41]; (b) 软磁性电子皮肤实现实时的触觉与无接触交互^[99]; (c) 具备大面积超分辨率的无线柔性磁性触觉传感器^[97]; (d) 磁阻纺织品用于触觉传感及运动监测^[17]

Fig. 9. Flexible magnetic sensors for tactile sensing: (a) Soft magnetic skin is used for ultra-resolution tactile sensing and to achieve force self-coupling functionality^[41]; (b) soft magnetic electronic skin realizes real-time tactile perception and contactless interaction^[99]; (c) wireless flexible magnetic tactile sensor with large-area ultra-resolution^[97]; (d) magnetic resistance textiles are used for tactile sensing and motion monitoring^[17].

依赖“磁源-力学界面-读出端”的协同设计, 其中磁源可由永磁体、磁化微结构或磁性复合层提供, 力学界面负责将触觉刺激转化为磁源位移、姿态变化或磁路参数改变, 而读出端则采用霍尔、AMR等磁敏器件, 或通过磁路调制和感应耦合将磁信号转换为电信号^[96-99]. 在此基础上, 磁感应皮肤和磁感受器等研究进一步通过阈值设计和信号逻辑, 将触觉输入从单纯的模拟量采集扩展为具备一定交互逻辑的界面单元, 并在接触与无接触之间实现连续过渡(图9(b))^[21,91,99,100]. 面向机器人触觉和高维力学信息获取, 磁性柔性材料为多维力觉提供了较易工程化的解耦路径^[101]; 同时, 通过结构化磁源和三维力学界面对形变进行引导或放大, 可提升对剪切、滑移和复杂接触的敏感性, 并减少对纯算法解

耦的依赖^[96,98]. 在更宏观的“触觉-交互-机器人”场景中, 磁触觉已被视为机器人柔顺交互的底层感知模块, 用于抓取稳定性评估、接触状态估计和交互控制, 使触觉传感从测量走向任务驱动感知^[41].

在大面积、高分辨和可扩展方面, 磁触觉体系同样具有优势: 磁场可在一定范围内传播并携带位置信息, 因此可在不明显增加布线密度的前提下支持大面积触觉定位(图9(c))^[97]; 磁致-压阻耦合界面则利用磁性微结构在接近阶段引入力学调制, 为连续交互提供更丰富的特征^[100]. 此外, 磁阻传感器实现的无接触交互也说明磁触觉界面对水下、污染或隔离操作场景具有天然优势^[17]. 未来, 磁触觉的工程化仍需解决磁化状态与微结构不稳定导致的漂移, 环境磁噪声与多点接触信号叠加, 以及阵列

化互连与低功耗实时解码等系统问题; 未来趋势可能聚焦可编程磁化实现硬件级触觉编码、可拉伸磁阻器件提升系统扩展性, 并通过数据驱动模型将触觉信号从位置/压力提升到接触状态的高层语义表达 (图 9(d))^[17].

4.4 智能机器人: 远程驱动、可编程形变与多模态交互

磁性柔性材料在智能机器人领域的核心价值在于将磁场作为一种远程、可穿透且可空间编程的能量与信息载体, 使软体结构在无需刚性传动链或物理连接条件下实现驱动、形态重构与环境交互, 在微尺度操控、复杂环境进入及多模块协同方面展现出显著优势 (图 10(a))^[26,23]. 在材料层面, 硬磁颗粒复合弹性体通过磁化编程实现结构即控制的驱动单元; 而软磁材料与磁流体体系则更强调在外场作用下的可重构磁化为柔顺机构和自适应交互提供补充路径^[26,102]. 在多模态运动方面, 小尺度磁驱动软体机器人通过结构设计与磁化策略实现

爬行、滚动、跳跃等多种运动模式切换, 展示了磁驱动在运动形态重构与环境适应方面的独特优势^[103]; 同时, 纤维或丝束构型的磁驱动软体机器人利用纤维级各向异性与层级结构设计, 在轻量化与大形变输出之间取得平衡, 为可穿戴、可部署与可组装的软体系统提供了新的材料形态学路径^[104]. 此外, “磁性人工肌肉”概念通过将磁响应与力学储能、结构各向异性及相变机制耦合, 实现更接近生物肌肉的连续、可控与高功率密度输出 (图 10(b))^[27].

在复杂交互与任务执行层面, 磁性柔性材料已被用于构建具备附着、抓取与环境适配能力的软体机器人系统^[23]. 与此同时, 针对磁驱动软体机器人的系统性综述工作从响应速度、控制自由度、可扩展性及能量效率等维度比较了磁驱动与其他驱动范式的差异, 强调了材料编程、磁场控制系统与感知闭环在实现复杂任务中的协同作用^[102]. 例如通过软材料结构与电磁系统的协同设计, 可在有限能量条件下实现高效运动与环境适应^[105]. 此外, 具备可编程磁化和多功能模块集成能力的无系绳磁性

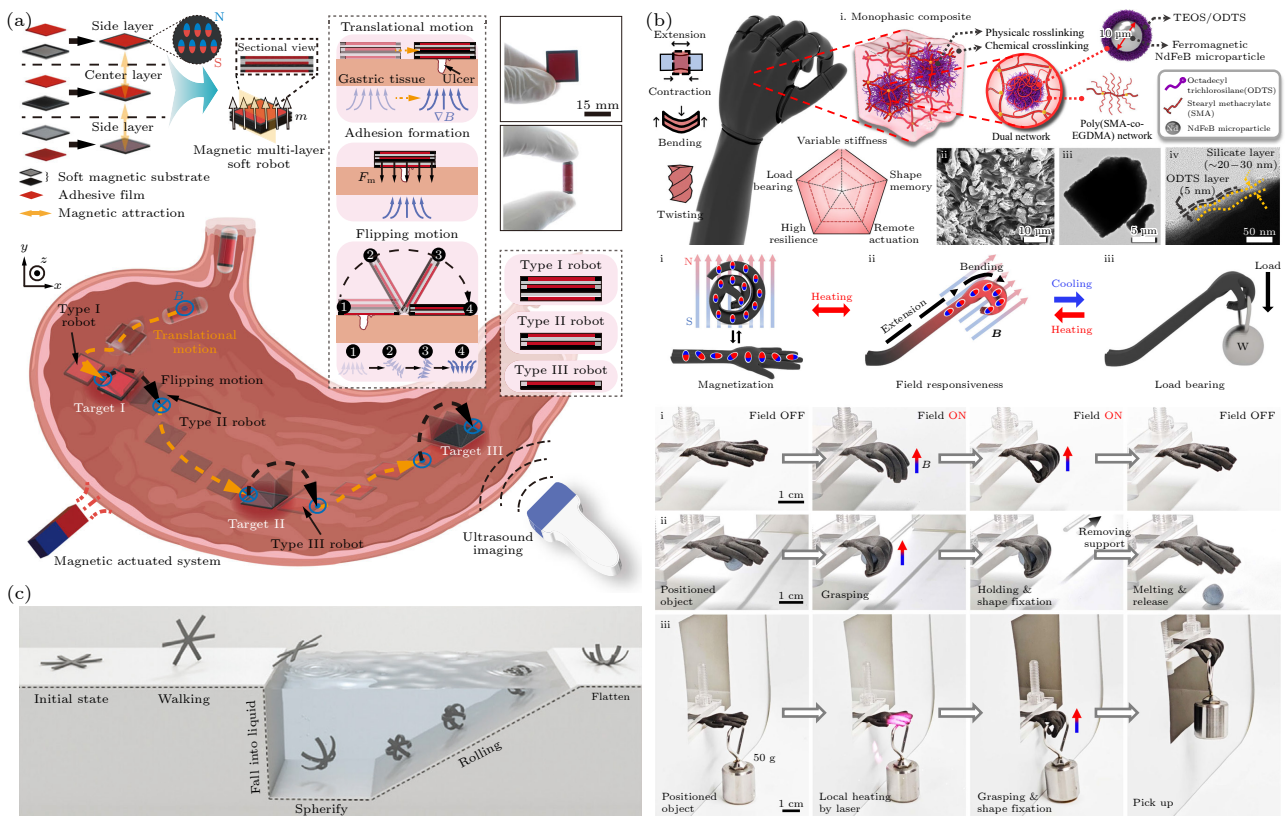


图 10 柔性磁传感器用于智能机器人制造 (a) 柔性磁机器人用于按需定向黏附治疗胃肠道疾病^[23]; (b) 柔性磁传感器用于制作多功能机械臂^[27]; (c) 柔性磁机器人用于多模态运动^[106]

Fig. 10. Flexible magnetic sensors are used in the manufacturing of intelligent robots: (a) Flexible magnetic robots are used for on-demand directional adhesion for treating gastrointestinal diseases^[23]; (b) flexible magnetic sensors are used to fabricate multifunctional robotic arms^[27]; (c) flexible magnetic robots are used for multimodal movement^[106].

软体机器人进一步展示了磁性材料在形态编程、功能集成与任务泛化方面的系统潜力^[102]。

总体而言, 磁性柔性材料驱动机器人走向实用仍面临若干关键挑战, 包括外场发生与精确控制的系统成本、磁化编码的一致性与可规模制造性, 以及在复杂环境中的鲁棒运动控制与感知闭环构建。未来更具前景的发展路线在于: 通过可编程材料降低控制复杂度, 以数据驱动设计缩短迭代周期, 并结合多模态感知与策略学习提升软体机器人的任务泛化能力与智能水平 (图 10(c))^[26,23,102,106,107]。

4.5 其他应用方向: 电磁功能材料、工业检测与新型交互的磁性柔性器件拓展

除定位导航、健康诊疗、触觉感知与智能机器人等典型场景外, 基于磁性材料的柔性器件还在若干跨场景方向形成了具有代表性的应用谱系。这些方向往往以磁信号可穿透、可远距耦合以及应力/形变强关联为核心优势, 将柔性器件从贴附式传感进一步推向电磁环境功能材料、工业级无损检测、自供能交互与可重构结构等系统层面^[108]。在电磁功能材料与可穿戴电磁环境适配方面, 磁性复合体系与液态金属/弹性体耦合使柔性器件从“测磁”扩展到“调控电磁波”: 磁性液态金属复合薄膜可在形变过程中重构导电网络与界面状态, 从而实现电磁屏蔽效能的可调与可逆切换, 为智能电磁防护与可穿戴电磁开关提供材料基础^[109]。在磁性-电学同体化器件方向, 通过磁性微粒与导电壳层等结构化复合, 可在保持磁性的同时实现稳定电导, 为柔性磁电器件的印刷制造与电路级集成提供路径, 并降低“磁功能模块-电互连”的系统复杂度^[110]。

围绕振动/声学能量转换, 柔性电磁器件因结构上非接触或弱接触特征而具备较好的耐久性与宽频响应潜力。通过折纸磁场约束结构可在柔性体系内实现磁通约束/增强并扩展有效频段, 支撑贴附式运动与声学信号采集^[6]; 进一步引入磁悬浮与表面微金字塔阵列以集中局域磁通、提高磁通变化效率, 可提升输出并拓宽频响范围, 为柔性振动传感/能量采集一体化提供新的结构范式^[111]。在可重构结构与引导装配方面, 可重构磁折纸执行器将可编程磁化/多场驱动与结构折叠序列结合, 并集成板载磁场传感实现状态感知与装配引导, 体现了磁性柔性材料从“功能材料”上升为“智能结构单元”的趋势^[15]。在信息安全与交互方向, 自供能柔

性压力阵列用于打字过程身份认证, 结合按键动力学特征与机器学习实现固定文本与动态文本的高准确率识别, 体现了磁性柔性系统在“交互-安全-边缘智能”方向的可拓展性^[112]。整体而言, 这些难以归类的方向很可能进一步凝聚为面向电磁环境与复杂系统的通用技术, 并反向促进磁性材料体系与器件架构的协同演化。

5 总结与展望

总体而言, 磁性材料为柔性器件引入了可穿透封装的磁信号、可编程的空间磁场分布、以及磁与多物理量耦合的组合能力, 使系统在隔离封装、无接触交互与无线读出等场景中形成区别于传统电学传感的优势。本文沿“材料-制造-应用”的主线, 系统梳理了软磁、硬磁和超顺磁材料在柔性体系中的功能分工, 以及复合填充与薄膜沉积等多尺度构筑策略如何共同决定器件的磁响应、机械顺应性与可集成性; 归纳了磁敏电子皮肤、连续健康监测与磁触觉界面等代表性应用中协同设计的共性规律, 为从原理验证走向可部署系统提供设计框架。

柔性磁敏器件从实验室原型走向长期稳定运行, 当前的主要瓶颈已逐步从单一器件性能不足转向系统层级的综合约束, 主要体现在材料-结构层面的稳定性、信号处理与集成工艺的协同优化以及生物适配等方面。在材料与界面层面, 应力诱导的磁各向异性演化、聚合物蠕变及温湿度老化会引起磁化特性或磁导率随时间漂移, 导致零点漂移与批次差异, 同时自旋阀、GMR、TMR 等多层结构在弯折拉伸下易出现偏置场漂移、层间剥离与噪声上升; 针对这些问题, 采用低磁致伸缩软磁、稳定高矫顽力硬磁复合层、梯度填充与界面偶联剂增强等方式, 并结合阻隔封装抑制微结构演化, 同时发展低温沉积、插入层/缓冲层与预应力波纹化等应变缓释工艺, 都是有潜力实现器件长期稳定性的方案。进一步看, 系统级的抗噪能力与标定同样制约着实用化进程——环境磁噪声与个体佩戴差异会放大读取误差, 需通过差分/参考通道、在线标定及物理模型约束的滤波算法降低对精确几何标定的依赖; 从集成制造角度, 高像素阵列受互连与功耗限制, 可结合可印刷磁敏元件降低布线复杂度, 并配套自动化磁场扫描将一致性控制前移至制造环节; 面向长期应用, 还需兼顾生物相容、低发热

与安全磁场暴露, 通过惰性包覆、抗污表面与无源读出技术, 并在动物/人体实验中系统记录漂移, 以促进长期监测的应用。

基于上述分析, 可构建分阶段的发展路线图: 短期应聚焦材料-界面稳定性与可重复制造的基准测试体系, 包括循环形变、汗液/消毒/浸水老化、温漂与磁噪声等标准化表征, 并完善集成差分读出、主动补偿与在线标定功能的通用体系; 中期需着力突破大面积/高分辨阵列的低功耗读出, 研发磁化编程批量化工装, 实现柔性电路与无线模块一体化封装, 使“阵列-算法-标定”成为可批量生产的系统; 远期则需推进可植入磁传感与可穿戴读出终端的系统级验证, 制定面向医疗及机器人应用的性能标准与可靠性评价体系, 并探索集“感知-诊断-干预”于一体的闭环平台化方案, 最终实现从实验室原型向真实场景的跨越。

参考文献

- [1] Ates H C, Nguyen P Q, Gonzalez-Macia L, Morales-Narváez E, Güder F, Collins J J, Dincer C 2022 *Nat. Rev. Mater.* **7** 887
- [2] Luo Y, Abidian M R, Ahn J H, et al. 2023 *ACS Nano* **17** 5211
- [3] Kim Y, Zhao X H 2022 *Chem. Rev.* **122** 5317
- [4] Pan L L, Xie Y L, Yang H L, Li M C, Bao X L, Shang J, Li R W 2023 *Sensors* **23** 4083
- [5] Mostufa S, Yari P, Rezaei B, Xu K L, Wu K 2023 *ACS Appl. Nano Mater.* **6** 13732
- [6] Ha M, Cañón Bermúdez GS, Kosub T, Mönch I, Zabala Y, Oliveros Mata ES, Illing R, Wang Y, Fassbender J, Makarov D 2021 *Adv. Mater.* **33** 2005521
- [7] Pan L L, Xie Y L, Yang H L, Bao X L, Chen J X, Zou M T, Li R W 2025 *ACS Nano* **19** 5699
- [8] Zhang J J, Jin Z H, Chen G Y, Chen J M 2024 *Microsyst. Nanoeng.* **10** 109
- [9] Makushko P, Ge J, Cañón Bermúdez G S, Volkov O, Zabala Y, Avdoshenko S, Illing R, Ionov L, Kaltenbrunner M, Fassbender J, Xu R, Makarov D 2025 *Nat. Commun.* **16** 1647
- [10] Xu R, Cañón Bermúdez G S, Pylypovskiy O V, Volkov O M, Oliveros Mata E S, Zabala Y, Illing R, Makushko P, Milkin P, Ionov L, Fassbender J, Makarov D 2022 *Nat. Commun.* **13** 6587
- [11] Zhao X, Chen G R, Zhou Y H, Nashalian A, Xu J, Tat T, Song Y, Libanori A, Xu S, Li S, Chen J 2022 *ACS Nano* **16** 6013
- [12] Zhang T T, Ding Y, Hu C S, Zhang M Y, Zhu W X, Bowen C R, Han Y, Yang Y 2023 *Adv. Mater.* **35** 2203786
- [13] Li S B, Wu Y Z, Asghar W, Li F L, Zhang Y, He Z D, Liu J Y, Wang Y W, Liao M Y, Shang J, Ren L, Du Y, Makarov D, Liu Y W, Li R W 2024 *Adv. Sci.* **11** 2304525
- [14] Yang H L, Li S B, Wu Y Z, Bao X L, Xiang Z Y, Xie Y L, Pan L L, Chen J X, Liu Y W, Li R W 2024 *Adv. Mater.* **36** 2311996
- [15] Ha M, Cañón Bermúdez G S, Liu J A C, Oliveros Mata E S, Evans E E, Tracy J B, Makarov D 2021 *Adv. Mater.* **33** 2008751
- [16] Xu R, Oliveros Mata E S, Cheng F, Pylypovskiy O V, Zhang Q H, Das P T, Zabala Y, Bezsmertna O, Yang J, Wang X T, Lehmann S, Guo L, Hübner R, Ganss F, He R, Illing R, Nielsch K, Makarov D 2025 *ACS Nano* **19** 21891
- [17] Lugoda P, Oliveros-Mata E S, Marasinghe K, Bhaumik R, Pretto N, Oliveira C, Dias T, Hughes-Riley T, Haller M, Münzenrieder N, Makarov D 2025 *Commun. Eng.* **4** 33
- [18] Ryu J, Kang J E, Zhou Y, Choi S Y, Yoon W H, Park D S, Choi J J, Hahn B D, Ahn C W, Kim J W, Kim Y D, Priya S, Lee S Y, Jeong S, Jeong D Y 2015 *Energy Environ. Sci.* **8** 2402
- [19] Zhao M, Zhao Y F, Wang J, Liu J Q, Zha X, Quan Y, Wang G, Liu M 2025 *Adv. Funct. Mater.* **35** 2425518
- [20] Rahmati AH, Jia R, Tan K, Liu L P, Zhao X H, Deng Q, Sharma P 2023 *Mater. Today Phys.* **31** 100969
- [21] Makushko P, Oliveros Mata E S, Cañón Bermúdez G S, Hassan M, Laureti S, Rinaldi C, Fagiani F, Barucca G, Schmidt N, Zabala Y, Kosub T, Illing R, Volkov O, Vladymyrskiy I, Fassbender J, Albrecht M, Varvaro G, Makarov D 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2101089
- [22] Xu J, Tat T, Yin J Y, Ngo D, Zhao X, Wan X, Che Z Y, Chen K R, Harris L, Chen J 2023 *Matter* **6** 2235
- [23] Chen Z H, Wang Y B, Chen H, Law J H, Pu H Y, Xie S R, Duan F, Sun Y, Liu N, Yu J F 2024 *Nat. Commun.* **15** 644
- [24] Cañón Bermúdez G S, Fuchs H, Bischoff L, Fassbender J, Makarov D 2018 *Nature Electronics* **1** 589
- [25] Bo G H, Xu X G, Meng K K, Wu Y, Jiang Y 2025 *npj Spintronics* **3** 48
- [26] Karacakol A C, Alapan Y, Demir S O, Sitti M 2025 *Nat. Commun.* **16** 2946
- [27] Seong M, Sun K, Kim S, Kwon H, Lee S W, Veerla S C, Kang D K, Kim J, Kondaveeti S, Tawfik S M, Park H W, Jeong H E 2024 *Nat. Commun.* **15** 7929
- [28] Zhang S F, Li Z F, Xu Y Z, Su B 2024 *Appl. Phys. Rev.* **11** 041321
- [29] Xia N, Jin D D, Zhang L 2024 *Acc. Mater. Res.* **5** 173
- [30] Elahi E, Dastgeer G, Nazir G, Nisar S, Bashir M, Akhter Qureshi H, Kim D K, Aziz J, Aslam M, Hussain K, Assiri M A, Imran M 2022 *Comput. Mater. Sci.* **213** 111670
- [31] Nadzharyan T A, Shamonin M, Kramarenko E Y 2022 *Polymers* **14** 4096
- [32] Wang L, Kim Y, Guo C F, Zhao X H 2020 *J. Mech. Phys. Solids* **142** 104045
- [33] Azuma D, Ito N, Ohta M 2020 *J. Magn. Magn. Mater.* **501** 166373
- [34] Cui J, Ormerod J, Parker D, Ott R, Palasyuk A, McCall S, Paranthaman M P, Kesler M S, McGuire M A, Nlebedim I C, Pan C C, Lograsso T 2022 *JOM* **74** 1279
- [35] Chen Z X, Li T, Wang A P, Shi M X, Han B C 2025 *Open Ceramics* **21** 100732
- [36] Guo Z H, Liu D F, Zhang H Y, Yu W B, Li Y, Gu N 2025 *eBioMedicine* **122** 106054
- [37] Melzer M, Kaltenbrunner M, Makarov D, Karnaushenko D, Karnaushenko D, Sekitani T, Someya T, Schmidt O G 2015 *Nat. Commun.* **6** 6080
- [38] Yang W D, Cheng X, Guo Z H, Sun Q H, Wang J, Wang C H 2023 *J. Mater. Chem. C* **11** 406
- [39] Pradhan G, Celegato F, Barrera G, Olivetti E S, Coisson M, Hajduček J, Arregi J A, Čelko L, Uhlř V, Rizzi P, Tiberto P

- 2022 *Sci. Rep.* **12** 17503
- [40] Palmero E M, Casaleiz D, Jiménez N A, Rial J, Vicente J D, Nieto A, Altimira R, Bollero A 2019 *IEEE Trans. Magn.* **55** 1
- [41] Yan Y C, Hu Z, Yang Z B, Yuan W Z, Song C Y, Pan J, Shen Y J 2021 *Sci. Rob.* **6** eabc8801
- [42] Zhang H, Luo K D, Wang F H, Li S S, Meng X H, Xie H 2025 *J. Bionic Eng.* **22** 1609
- [43] Mani T, Yeldose M, Mannamplackal T J, Joy J, Jacob R G 2021 *Mater. Today: Proc.* **47** 5379
- [44] Liang Y J, Xie J, Yu J, Zheng Z G, Liu F, Yang A P 2021 *Nano Select* **2** 216
- [45] Shokrollahi H, Janghorban K 2007 *J. Mater. Process. Technol.* **189** 1
- [46] Xu Y W, He X, Liang X F, Huang H, Wu J G, Ju D F, Guo J H, Dong S X, Hu Z Q, Liu M 2025 *Energy Environ. Sci.* **18** 8339
- [47] Patil D R, Lee S, Thakre A, Kumar A, Jeong D Y, Ryu J 2023 *J. Mater. Chem. A* **11** 15219
- [48] Lee H, Sriramadas R, Kumar P, Sanghadasa M, Kang M G, Priya S 2020 *Energy Environ. Sci.* **13** 1462
- [49] Yang G N, Dong G H, Zhang B T, Xu X, Zhao Y N, Hu Z Q, Liu M 2023 *Nano-Micro Lett.* **16** 19
- [50] Cheng Y, Dong G, Li Y, Yang G, Zhang B, Guan M, Zhou Z, Liu M 2022 *ACS Nano* **16** 11291 (in Chinese)
- [51] Corr S A, Rakovich Y P, Gun'ko Y K 2008 *Nanoscale Res. Lett.* **3** 87
- [52] Salgueiriño-Maceira V, Correa-Duarte M A, Spasova M, Liz-Marzán L M, Farle M 2006 *Adv. Funct. Mater.* **16** 509
- [53] Yoon T J, Kim J S, Kim B G, Yu K N, Cho M H, Lee J K 2005 *Angew. Chem. Int. Ed.* **44** 1068
- [54] Wu H B, Huang W, Zhou X Y, Min Y Z 2020 *Front. Immunol.* **11** 575816
- [55] Shen J M, Guan X M, Liu X Y, Lan J F, Cheng T, Zhang H X 2012 *Bioconjug. Chem.* **23** 1010
- [56] Zhang Y, Wen J X, Fan X Y, Yu Y Z, Zhang C, Sun Y, Yin B L, Zhang Q P, Shen H X, Wei H L, Cao H, Huan S Y, Du Y, Song G S 2025 *ACS Nano* **19** 33430
- [57] Zhao Y F, Zhao S S, Wang L, Zhou Z Y, Liu J X, Min T, Peng B, Hu Z Q, Jin S Y, Liu M 2019 *Adv. Sci.* **6** 1901994
- [58] Kwon H, Yang Y, Kim G, Gim D, Ha M 2024 *Nanoscale* **16** 6778
- [59] Zhou Y H, Zhao X, Xu J, Fang Y S, Chen G R, Song Y, Li S, Chen J 2021 *Nat. Mater.* **20** 1670
- [60] Sheng P, Wang B M, Li R W 2018 *J. Semicond.* **39** 011006
- [61] Zhao X, Zhou Y H, Song Y, Xu J, Li J, Tat T, Chen G R, Li S, Chen J 2024 *Nat. Mater.* **23** 703
- [62] Hao Z J, Li Y X, Pu S L, Wang J, Chen F, Lahoubi M 2022 *Nanophotonics* **11** 3519
- [63] Guo Y Y, Li Y S, Chen Y, Ali A, Yao S 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 30874
- [64] Liu J C, Guo X, Zhao Z, Li B, Qin J B, Peng Z Y, He G J, Brett D J L, Wang R H, Lu X W 2020 *Appl. Mater. Today* **18** 100457
- [65] Zhang C L, Zhang Q, Li X R, Zhan W, Han Y L, Zhang Z Y, Su W, Xue L, Zhang W, Zhou K, Pan S M, Peng N C, Ye Z L, Peng B, Zhang X H 2025 *J. Mater. Chem. A* **13** 1863
- [66] Zhang Q, Peng B, Zhao Y N, Li C L, Zhu S K, Shi K Q, Zhou Z Y, Zhang X H, Liu M, Pan J Y 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 51654
- [67] Zhang Q, Yang G N, Xue L, Dong G H, Su W, Cui M J, Wang Z G, Liu M, Zhou Z Y, Zhang X H 2022 *ACS Nano* **16** 21555
- [68] Shi N Y, Li Y H, Chang L, Zhao G X, Jin G R, Lyu Y, Genin G M, Ma Y F, Xu F 2021 *Small Methods* **5** 2100276
- [69] Wu S, Hu W Q, Ze Q J, Sitti M, Zhao R K 2020 *Multifunct. Mater.* **3** 042003
- [70] Li S P, Zhang J Q, He J, Liu W P, Wang Y H, Huang Z J, Pang H, Chen Y W 2023 *Adv. Sci.* **10** 2304506
- [71] Zhao J Q, Li D L, Sun B J, Jiang L, Zhou Y F, Wen S P, Jerrams S, Ma J W, Chen S J 2023 *Polym. Test.* **119** 107935
- [72] Zhao R, Dai H D, Zhou G P, Yao H C, Zhang B 2023 *AIP Adv.* **13** 025303
- [73] Barron Iii E J, Williams E T, Tutika R, Lazarus N, Bartlett M D 2023 *RSC Appl. Polym.* **1** 315
- [74] Ganguly S, Margel S 2021 *Polymers* **13** 4259
- [75] Pošković E, Franchini F, Ferraris L, Fracchia E, Bidulski J, Carosio F, Bidulsky R, Actis Grande M 2021 *Materials* **14** 6844
- [76] Meng X H, Li S S, Shen X J, Tian C Y, Mao L Y, Xie H 2024 *Nat. Commun.* **15** 10442
- [77] Wang C, Zhao Z, Li Z Y, Jia Y Q, Sharma A A, Zhang X S 2025 *Addit. Manuf.* **105** 104770
- [78] Guan M M, Zhang Q, Qiu R B, Hu Z Q, Zhang X H, Peng B, Liu M 2024 *Adv. Electron. Mater.* **10** 2300323
- [79] Chen Y F, Mei Y F, Kaltofen R, Mönch J I, Schumann J, Freudenberger J, Klauß H J, Schmidt O G 2008 *Adv. Mater.* **20** 3224
- [80] Zhang X S, Zhan Q F, Dai G H, Liu Y W, Zuo Z H, Yang H L, Chen B, Li R W 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 022412
- [81] Zhang Y, Shen L K, Liu M, Li X, Lu X L, Lu L, Ma C R, You C Y, Chen A P, Huang C W, Chen L, Alexe M, Jia C L 2017 *ACS Nano* **11** 8002
- [82] Hu Q Y, Wu Z K, Tian Y, Wang J X, Pan Z Q, Yu Y, Cheng Y F, Yang Y Y, Tang H C, Zang J F 2025 *npj Flex. Electron.* **9** 33
- [83] Becker C, Bao B, Karnaushenko D D, Bandari V K, Rivkin B, Li Z, Faghili M, Karnaushenko D, Schmidt O G 2022 *Nat. Commun.* **13** 2121
- [84] Dai H Z, Zhang C Q, Pan C F, Hu H, Ji K P, Sun H N, Lyu C X, Tang D F, Li T F, Fu J Z, Zhao P 2024 *Adv. Mater.* **36** 2310145
- [85] Granell P N, Wang G, Cañon Bermudez G S, Kosub T, Golmar F, Steren L, Fassbender J, Makarov D 2019 *npj Flex. Electron.* **3** 3
- [86] Kondo M, Melzer M, Karnaushenko D, Uemura T, Yoshimoto S, Akiyama M, Noda Y, Araki T, Schmidt O G, Sekitani T 2020 *Sci. Adv.* **6** eaay6094
- [87] Zhou Q, Ji B, Hu F M, Luo J Y, Zhou B P 2021 *Nano-Micro Lett.* **13** 197
- [88] Zhang W G, Guo Q H, Duan Y, Xing C Y, Peng Z C 2022 *IEEE Sens. J.* **22** 10420
- [89] Kim Y, Lee K, Lee J, Jang S, Kim H, Lee H, Lee S W, Wang G, Park C 2021 *ACS Nano* **15** 20116
- [90] Kohli M, Hsu L F, Chen C C, Yao C C J, Chung T K 2023 *IEEE Trans. Magn.* **59** 1
- [91] Zhang J J, Chen G Y, Chen J M 2022 *Adv. Sensor Res.* **1** 202270004
- [92] Wan J, Nie Z Y, Xu J, Zhang Z X, Yao S L, Xiang Z H, Lin X, Lu Y X, Xu C, Zhao P C, Wang Y R, Zhang J Y, Wang Y Z, Zhang S T, Wang J Z, Man W T, Zhang M, Han M D 2024 *Sci. Adv.* **10** eadm9314
- [93] Shi Y S, Tang S H, Zhang W F, Lei C C, Feng X B, Wang K, Yue Y M, Wang Q, Chen A N, Su J, Zhao H, Yan C Z, Tian Y J, Zhou K, Lu J, Yang C, Su B 2024 *Chem. Eng. J.* **482** 148891

- [94] Chen G R, Tat T, Zhou Y H, Duan Z Q, Zhang J K, Scott K, Zhao X, Liu Z Y, Wang W, Li S, Cross K A, Chen J 2025 *Nat. Chem. Eng.* **2** 358
- [95] Liu J H, Wu Z Y, Zhou L J, Shen Y R, Wu X J, Liang J L, Shao Y T, Liu P C, Li Z Z, Hu B F, Wang M, Di Z F, Cai T J, Xu F, Jiang S, Han M D, Tao L, Mei Y F, Song E M 2025 *npj Flex. Electron.* **10** 16
- [96] Ruan L X, Wen J H, Wang Y X, Zhao X Y, Li F, Zhang Y, Liu C, Tao W T, Liang H B, Zhang X M, Zhou Y L, Tang C X, Zhong X Q, He S Q, Yang W Z 2025 *J. Mater. Chem. C* **13** 16837
- [97] Hu H, Zhang C Q, Pan C F, Dai H Z, Sun H N, Pan Y F, Lai X Y, Lyu C X, Tang D F, Fu J Z, Zhao P 2022 *ACS Nano* **16** 19271
- [98] Deng R Y, Li X J, Cai S Q, Luo Y, Zhang Y Q, Wang B Y, Zhou W B, Xie H K, Shen G Z, Gong G F, Yang H Y, Wang X Y, Han D 2025 *npj Flex. Electron.* **9** 14
- [99] Ge J, Wang X, Drack M, Volkov O, Liang M, Cañón Bermúdez G S, Illing R, Wang C G, Zhou S Q, Fassbender J, Kaltenbrunner M, Makarov D 2019 *Nat. Commun.* **10** 4405
- [100] Zhang W G, Guo Q H, Duan Y, Xu Q H, Shang C, Li N, Peng Z C 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 61422
- [101] Ren L M, Wang K K, Wang X Y, Tan Y S 2021 *IEEE Sens. J.* **21** 21432
- [102] Dong Y, Wang L, Xia N, Yang Z X, Zhang C, Pan C F, Jin D D, Zhang J C, Majidi C, Zhang L 2022 *Sci. Adv.* **8** eabn8932
- [103] Ren Z Y, Sitti M 2024 *Nat. Protoc.* **19** 441
- [104] Lee Y, Koehler F, Dillon T, Loke G, Kim Y, Marion J, Antonini M J, Garwood I C, Sahasrabudhe A, Nagao K, Zhao X, Fink Y, Roche E T, Anikeeva P 2023 *Adv. Mater.* **35** 2301916
- [105] Xu C Y, Cao Y J, Zhao J Y, Cao Y J, Huang Y, Lin Y Y, Wang D, Zhang Z, Jiang H Q 2025 *Nat. Commun.* **16** 6813
- [106] Yao D R, Kim I, Yin S, Gao W 2024 *Adv. Mater.* **36** 2308829
- [107] Zeng W H, Ding X R, Jin Y, Liu B, Zeng R H, Gong F, Lou Y, Jiang L L, Li H 2025 *npj Flex. Electron.* **9** 59
- [108] Nicolicea A, Oliveros-Mata E S, Zabala Y, Makarov D, Melzer M, Pelkner M 2024 *NDT E Int.* **146** 103160
- [109] Zhu R Q, Li Z Y, Deng G, Yu Y H, Shui J L, Yu R H, Pan C F, Liu X F 2022 *Nano Energy* **92** 106700
- [110] Dai W T, Xu H, Zhang C N, Li Y, Pan H Z, Wang H J, Wei G F, Huang X 2019 *Adv. Electron. Mater.* **5** 1900111
- [111] Zhang X, Zheng C Y, Li Y, Wu Z Y, Huang X 2022 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14** 37916
- [112] Zhang T T, Manshaei F, Bowen C R, Zhang M Y, Qian W Q, Hu C S, Bai Y N, Huang Z J, Yang Y, Chen J 2025 *Sci. Adv.* **11** eads2297

SPECIAL TOPIC—Applied magnetism

Flexible devices based on magnetic materials: Material systems, manufacturing methods and applications*

SHI Nianyuan¹⁾ LI Yan^{2)†} ZHANG Qi^{2)3)‡}¹⁾ (School of Basic Medicine, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China)²⁾ (School of Information Engineering, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China)³⁾ (State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 1 February 2026; revised manuscript received 20 March 2026)

Abstract

Flexible electronics are transforming sensing, actuation, and human-machine interaction from rigid, planar platforms into compliant systems that can conform to skin, soft tissues, and complex curvilinear surfaces. Within this rapidly evolving field, magnetic-material-based flexible devices have attracted increasing attention because they offer several capabilities that are difficult to achieve simultaneously with conventional resistive, capacitive, piezoelectric, or optical approaches, including remote readout, tolerance to encapsulation and

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62501465) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2025JC-YBQN-072).

† Corresponding author. E-mail: ly@gszy.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: qizhang@gszy.edu.cn

intervening media, programmable field distributions, and robust operation in sealed, wet, contaminated, or sterile environments. These unique features make magnetic flexible systems particularly attractive for wearable monitoring, electronic skin, tactile interfaces, biomedical devices, and soft robotics. However, their development is fundamentally constrained by the intrinsic tension between magnetic performance and mechanical compliance: materials with strong and stable magnetic responses are often rigid or brittle, whereas highly deformable matrices tend to dilute, destabilize, or complicate magnetic functionality.

This review provides a systematic overview of recent progress in magnetic-material-enabled flexible devices through an integrated framework spanning material systems, manufacturing strategies, and application scenarios. First, we summarize the magnetic material platforms used in flexible systems, including soft magnetic materials for flux guidance, field concentration, and low-coercivity sensing; hard magnetic composites for remanent field generation, information encoding, and magnetic torque output; and superparamagnetic nanoparticles for nanoscale magnetic manipulation, magnetic heating, and biomedical compatibility. Their distinct magnetic response mechanisms are discussed in relation to deformation tolerance, signal stability, and device function. Second, we compare the major manufacturing routes for flexible magnetic devices, including particle mixing and casting for bulk composites, thin-film deposition and transfer integration for high-performance magnetic layers, and micro/nanostructuring and additive manufacturing for programmable architectures. Particular attention is paid to critical engineering issues such as particle dispersion, interfacial adhesion, stress transfer, magnetic anisotropy evolution, encapsulation, and the long-term reliability of devices under repeated bending, stretching, and cyclic loading.

We further analyze representative applications in four major categories: magnetic electronic skin for sealed touch and touchless interaction, health monitoring systems for wireless or low-power biomechanical signal acquisition, tactile interfaces capable of multidimensional force reconstruction, and magnetically actuated soft robotic systems for remote and spatially selective control. Beyond these major directions, emerging applications in electromagnetic functional materials, industrial inspection, and biointegrated systems are also highlighted. Across these examples, a common theme emerges: magnetic flexible devices are most powerful when their material response, structural design, and readout strategy are co-optimized rather than developed independently. In particular, programmable magnetization, distributed magnetic architectures, and data-assisted signal decoding are becoming increasingly important for improving sensitivity, decoupling capability, environmental robustness, and scalability.

Overall, this review shows that magnetic flexible devices represent not merely a magnetic extension of conventional flexible electronics, but a distinct technological route with unique physical advantages and system-level possibilities. At the same time, several bottlenecks remain before broad practical deployment can be achieved, including the difficulty of simultaneously maximizing magnetic functionality and softness, drift caused by stress-induced anisotropy changes and interfacial degradation, insufficient understanding of deformation-dependent magnetic behavior, and challenges in scalable manufacturing and low-power integrated readout. Future progress will require coordinated advances in material design, multiscale structural engineering, stable magnetization strategies, compensation and inversion models, and standardized reliability evaluation. Addressing these issues will be essential for translating magnetic flexible devices from proof-of-concept demonstrations to deployable platforms in healthcare, human-machine interaction, and intelligent soft systems.

Keywords: magnetic materials, flexible electronics, magnetic sensing, human-machine interaction

DOI: [10.7498/aps.75.20260180](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260180)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260180](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260180)



基于磁性材料的柔性器件：材料体系、制造方法与应用进展

师念园 李燕 张洪

Flexible devices based on magnetic materials: Material systems, manufacturing methods and applications

SHI Nianyuan LI Yan ZHANG Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 150901 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260180

CSTR: 32037.14.aps.75.20260180

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260180>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

柔性磁性薄膜材料与器件研究进展

Research progress of flexible magnetic films and devices

物理学报. 2022, 71(9): 097503 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212354>

基于机器学习的无机磁性材料磁性基态分类与磁矩预测

Classification of magnetic ground states and prediction of magnetic moments of inorganic magnetic materials based on machine learning

物理学报. 2022, 71(6): 060202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211625>

基于数据挖掘技术的稀土磁性材料研究进展

Research progress of rare earth magnetic materials based on machine learning

物理学报. 2025, 74(13): 137102 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250431>

基于二维磁性材料的自旋轨道力矩研究进展

Research progress of spin orbit torque of two-dimensional magnetic materials

物理学报. 2024, 73(1): 017502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231244>

二维非层状磁性材料的研究进展

Research advances in two-dimensional non-layered magnetic materials

物理学报. 2025, 74(22): 227501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251177>

离子辐照对材料磁性的调控及其应用

Ion irradiation modulated magnetic properties of materials and its applications

物理学报. 2024, 73(13): 136101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240541>