

智能响应型生物材料研究现状与未来展望

吴俊豪 金敏

东北大学生命科学与健康学院, 辽宁 沈阳 110169

摘要: 在材料科学与生命科学深度融合的背景下, 智能响应型生物材料作为前沿研究领域备受关注。本研究通过文献综述与案例分析, 系统梳理其研究现状, 剖析分类、特性、制备方法及在生物医学等领域的应用成果。该材料凭借自适应性、自诊断性等独特性质, 在药物靶向递送、组织工程支架构建、环境污染物去除等方面取得显著成效, 为疾病治疗和环境治理提供创新方案。然而, 当前研究面临材料性能提升难题, 稳定性、可控性、响应速度和力学性能有待优化; 成本与规模化生产阻碍其市场化进程, 原材料昂贵、制备工艺复杂、质量控制困难; 生物相容性与安全性评估复杂, 降解产物、添加剂残留及免疫原性存在隐患。展望未来, 随着纳米技术、人工智能等前沿技术的融合, 智能响应型生物材料有望在新型响应机制探索、制备技术创新和应用领域拓展上取得突破。通过产学研深度合作、政府政策支持和国际交流协作, 将加速科研成果转化, 推动产业升级, 使其在解决人类健康和环境问题中发挥更重要作用, 具有广阔发展前景与巨大应用潜力。

关键词: 智能响应型材料; 生物工程; 自适应性材料

DOI: 10.63887/ssrp.2025.1.5.5

研究背景

在材料科学与生命科学深度交融的时代背景下, 智能响应型生物材料作为前沿研究领域, 正引发广泛关注与探索。这类材料突破传统材料局限, 能依据环境刺激精准调整自身性能与形态, 是多学科交叉的成果。自 20 世纪 60 年代萌芽, 在纳米技术、生物工程等学科推动下, 已从简单体系发展为复杂多功能材料体系。以温敏性水凝胶为例, 其分子结构中亲疏水基团与水分子的动态作用, 使得材料在不同温度下呈现溶胀或收缩的智能特性。

在生物医学领域, 智能响应型生物材料为药物递送和组织工程带来革新。传统药物递送效率低、副作用大, 而智能材料载体可根据体内 pH 值、温度等生理信号, 实现药物靶向精准释放, 如 pH 响应型材料在肿瘤治疗中的应用, 显著提升药效并减少对正常组织损害。在组织工程中, 智能支架能模拟生物组织微环境, 响应细胞信号调节自身性能, 促进组织再生。在环境工程领域, 其于污水处理、土壤修复等方面发挥重要作用, 如智能吸附材料可特异性去除污水中重金属, 智能生物材料能改善土壤结构与肥力。

基于此, 本研究旨在系统梳理智能响应型生物材

料的研究现状, 通过文献综述与案例分析相结合的方法, 深入剖析其分类、特性、制备方法及应用成果, 总结面临的挑战, 进而科学预测未来发展趋势, 为该领域的后续研究与实际应用提供坚实的理论支撑与实践参考。

1 智能响应型生物材料的定义和性质

智能响应型生物材料, 是一类能够敏锐感知外界环境变化, 并基于这些变化自主调节自身物理、化学或生物学特性的先进材料。它仿佛被赋予了“智慧”, 具备类似生物体的感知、响应与自适应能力, 可与周围环境进行动态交互, 极大地突破了传统材料性能固定的局限, 引领材料科学迈向新的发展阶段。从微观层面剖析, 这类材料的分子结构通常包含特殊的功能基团或分子链段, 正是这些微观结构赋予了材料对环境刺激的敏感性。当外界刺激出现时, 分子间作用力、化学键状态等发生改变, 进而引发材料宏观性能的显著变化^[1]。

自适应性是智能响应型生物材料的核心特性之一^[2]。它能依据外部环境的温度、湿度、pH 值、酶活性等因素的改变, 自动调整自身物理和化学性质。在生

物体体内,这种自适应性可使材料与组织和生理过程高度匹配,有效降低不良反应和排异反应的发生概率。以药物释放系统为例,材料能够根据体内 pH 值、酶活性等生理信号,精准控制药物的释放速率和模式。在肿瘤治疗中,肿瘤组织的酸性环境可触发 pH 响应型智能材料载体释放药物,既提高了对肿瘤细胞的杀伤效果,又减少了对正常组织的损害,实现更高效、安全的治疗。随着生物体内环境监测技术的进步,未来的智能响应型生物材料有望实现更精准的自适应调节,为疾病诊断和个性化治疗带来重大突破。

自诊断性是智能响应型生物材料的核心优势之一。材料通过内置或外置传感元件,可实时监测温度、湿度、压力、化学成分等环境参数,进而评估自身内部状态,及时识别潜在损伤或性能退化。以形状记忆合金制成的医疗器械为例,其在体内使用时,能凭借自身电学或力学性能的变化,敏锐感知是否发生变形或损坏,并将相关信息反馈出来,助力医护人员及时采取应对措施。这一特性大幅提升了材料应用的可靠性与安全性,在生物医学领域意义重大,为保障患者健康提供了有力支撑。该功能通过“感知-评估-反馈”的闭环机制,实现了对材料状态的动态监测,在心血管介入、骨科植入等场景中,可有效降低器械故障风险,提升诊疗安全性。

自修复性是智能响应型生物材料的突出特性。材料受损伤时能自主修复裂纹或缺陷,恢复原有性能以延长使用寿命。如含微胶囊修复剂的智能材料,裂纹出现时微胶囊破裂释放修复剂,其与裂纹表面发生化学反应填充裂纹,实现自修复。在生物医学领域,自修复材料可减少因损坏而更换的频率,降低患者痛苦与医疗成本。该特性通过模拟生物组织再生机制,在软骨修复、血管支架等应用中,既能维持材料结构完整性,又能减少手术干预,为可植入器械的长期稳定使用提供保障,展现出在降低医疗负担方面的重要价值。

智能化控制是智能响应型生物材料的关键特性,可通过光、电、磁等外部信号实现精准调控。在药物输送中,材料能根据体内药物浓度或疾病进展,实时调整释放速率与模式,提升治疗效果。如含偶氮苯基

团的聚合物材料,经光照射后发生形变,可实现药物定向释放;施加电场调控电响应材料形变,能控制药物释放通道开合。随着智能控制技术发展,未来将实现更精确复杂的调控,为生物医学等领域提供更高灵活性与可控性。这种智能化调控通过多模态响应机制,在肿瘤靶向治疗、慢性病管理等场景中,可实现药物释放的时空精准控制,推动个性化治疗发展,展现出在提升疗效与降低副作用方面的重要潜力。

2 智能响应型材料在生物工程领域的应用

在生物工程领域,智能响应型材料凭借独特的环境感知与响应特性,为疾病诊疗、组织修复等带来创新突破,成为推动该领域发展的关键力量。

药物递送是智能响应型材料的重要应用方向^[3]。pH 响应型材料利用肿瘤组织微环境的酸性特征,实现药物靶向释放。以聚甲基丙烯酸(PMAA)制备的纳米粒子为例,包裹抗癌药物阿霉素后,在中性环境中稳定存在、缓慢释药,而在肿瘤部位酸性环境下,PMAA 羧基质子化,纳米粒子结构改变,快速释放阿霉素,精准杀伤肿瘤细胞。温度响应型材料同样表现出色,聚 N-异丙基丙烯酰胺(PNIPAAm)接近人体体温的低临界溶解温度(LCST)特性,使其在局部加热肿瘤治疗中,可随温度变化调控药物释放速度,提升治疗效果。

组织工程领域中,智能响应型材料为功能性组织与器官构建开辟新路径。形状记忆聚合物(SMP)因良好可塑性与形状记忆功能,成为组织工程支架的理想材料^[4]。低温下 SMP 可塑形成所需支架,植入体内升温后恢复原始形状,为细胞生长和组织修复提供支撑,如用其制备的血管支架,已在体外实验中成功支持血管细胞生长增殖。自组装材料也备受关注,含特定生物活性分子的自组装材料能模拟细胞外基质,促进细胞粘附、增殖与分化,基于多肽的自组装材料形成的纳米纤维网络,可负载生长因子,助力神经组织再生。

医疗器械的性能与安全性也因智能响应型材料得到显著提升。压电材料制成的医疗传感器,如压电陶瓷传感器,能将血压、心率等生理信号高效转换为电信号,实现实时监测^[5]。形状记忆合金(SMA)则用

于制造可降解医疗器械，镍钛合金制作的骨固定装置，在骨折愈合期提供力学支撑，随着骨骼恢复逐渐降解，避免二次手术取出的风险与痛苦，为患者带来更好的治疗体验。

3 智能响应型材料面临的挑战

智能响应型材料虽在多领域展现巨大潜力，但其发展与广泛应用仍面临诸多挑战，涵盖材料性能、成本与规模化生产、生物相容性与安全性等多个关键方面。

在材料性能提升上，稳定性、可控性、响应速度和力学性能均存在瓶颈^[6]。稳定性方面，复杂环境易干扰材料性能，如生物医学中，pH 响应型药物载体受体内离子和生物分子干扰，难以精准释放药物；环境工程里，智能吸附材料被污水侵蚀，吸附性能下降。可控性问题突出，体内复杂环境和个体差异使药物递送难以精准控制释放量；光响应材料受光照多因素影响，精确调控困难。响应速度也不尽人意，部分温度响应材料在温度变化后响应迟缓，无法满足疾病诊断等场景的实时需求。此外，材料力学性能与智能特性常难以兼顾，如部分水凝胶生物相容性好但强度低，增强力学性能又可能削弱其智能响应能力。

成本与规模化生产是智能响应型材料从实验室走向市场的阻碍。原材料成本高昂，特殊化学物质和生物分子价格贵且纯度要求高，如核酸适配体合成需昂贵试剂^[7]。制备工艺复杂，自组装需精准操作，部分过程依赖特殊环境，3D 打印虽能定制但成本高。研发成本同样巨大，长时间研究和大量实验测试增加投入。规模化生产时，现有制备方法效率低，溶胶 - 凝胶法、电纺丝法难以满足需求；质量控制困难，生产条件微小差异就可能导致材料性能波动；且缺乏高效设备和成熟工艺，造成材料浪费、次品率高。

生物相容性与安全性隐患限制了智能响应型材料在生物医学等领域的应用^[8]。生物相容性评估复杂，材料化学组成、微观结构影响其在体内的反应，特定官能团可能引发炎症，纳米结构或致细胞毒性；体内复杂环境，如不同部位 pH 值差异、免疫系统作用，也增加评估难度。安全性风险不容忽视，材料降解产物可能有害，可降解聚合物产生的酸性物质会引发炎症；

制备过程中的添加剂、杂质残留或具毒性；材料免疫原性可引发免疫反应，基于蛋白质的材料常因抗原性导致不良后果，直接威胁患者健康与治疗效果。

4 智能响应型材料未来的发展方向

智能响应型材料凭借独特的环境感知与自适应特性，在多领域展现应用潜力，其未来发展将围绕技术突破、应用拓展和产业升级三大方向持续推进。

技术层面，新型响应机制与制备技术革新是核心驱动力。一方面，基于纳米技术与生物工程的协同响应机制成为研究热点。将纳米级量子点嵌入智能聚合物，可借助量子点光学和电学特性实时监测材料响应状态，实现精准调控。另一方面，多刺激响应机制突破单一刺激局限，使材料能同时感知温度、pH 值、生物分子浓度等多重信号。在肿瘤治疗中，多刺激响应型药物载体可依据肿瘤微环境特征，实现药物精准高效释放。制备技术上，3D 打印将实现材料结构的复杂定制与仿生设计，纳米制造技术则通过纳米粒子、纳米纤维等特殊结构，显著提升材料响应性能与生物相容性。

应用领域，与人工智能、物联网等前沿技术的融合将开辟新路径。人工智能赋能材料研发，机器学习算法可挖掘材料实验数据规律，预测性能表现，辅助药物筛选与个性化治疗方案设计；在生物传感器领域，AI 实时分析材料响应信号，大幅提升检测灵敏度与准确性。物联网技术则实现材料性能与环境参数的远程监测调控，如可穿戴设备中的智能材料实时采集人体生理数据并传输至医疗平台，助力精准医疗；智能家居场景下，智能材料净化设备依据空气质量自动调节工作模式。

产业发展方面，市场需求与技术进步带来历史机遇。生物医学领域，老龄化加剧与慢性病高发催生对先进医疗材料的迫切需求；环保领域，可持续发展理念推动智能响应型材料在环境监测与污染治理中的应用。为把握机遇，需强化产学研合作，整合高校科研优势与企业产业化能力，加速成果转化；政府应完善政策支持体系，设立科研基金、提供税收优惠并加强知识产权保护；同时深化国际合作，引进先进技术经验，提升国际竞争力，推动智能响应型材料产业迈向

更高发展阶段。

结语

智能响应型生物材料作为材料科学与生命科学深度融合的产物，在生物医学、环境工程等领域已取得显著成果。其独特的自适应性、自诊断性等特性，为疾病治疗、组织修复和环境治理提供了创新思路和解决方案。然而，当前研究仍面临材料性能提升、成本控制、规模化生产以及生物相容性与安全性等方面的难题，这些问题制约着该材料的广泛应用和进一步发

展。

展望未来，随着纳米技术、人工智能、物联网等前沿技术的不断突破与融合，智能响应型生物材料有望在新型响应机制探索、制备技术创新、应用领域拓展等方面取得更大进展。通过产学研深度合作、政府政策支持和国际交流协作，将加速科研成果转化，推动产业升级。智能响应型生物材料必将在解决人类健康和环境问题等方面发挥更为重要的作用，具有广阔的发展前景和巨大的应用潜力。

参考文献

- [1]张海峰,郑士亚,程韬,等.智能响应性生物材料在组织修复与再生中的应用进展[J]. 山东第一医科大学(山东省医学科学院)学报, 2024, 45(12): 752-758.
- [2]孔颖.智能纳米材料对细胞命运的调控及其生物医学应用[D]. 山东大学, 2022.
- [3]易江南,田珮,向玮琦,等.智能响应材料在生物医用领域的应用与进展[J]. 高分子通报, 2024, 37(06): 725-741.
- [4]张恒杰,柳坤锐,陈显春,等.光响应智能生物粘附材料的设计与应用[J]. 化学学报, 2023, 81(12): 1739-1753.
- [5]孙菁,熊发强,邓汝辉,等.智能高分子材料在医学监控中的研究进展[J]. 中国塑料, 2023, 37(10): 40-49.
- [6]陈浩,席洪钟,薛鹏,等.智能响应性材料在股骨头坏死精准修复中的应用[J]. 解放军医学杂志, 2024, 49(07): 841-847.
- [7]王振峰,伞宏贍,田萌萌,等.植入体表面光响应抗菌涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(03): 249-257.
- [8]岳辰.MXene 增强的凝胶基智能材料的组分设计及柔性传感和摩擦学性能研究[D]. 西北民族大学, 2024.