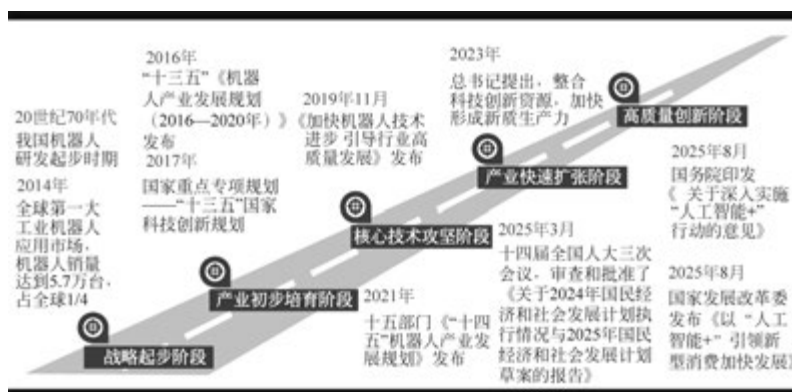


# 第一部分 基础概述

智能软体机器人作为融合材料科学、机器人工程、生物医学等多学科的前沿技术,凭借其在医疗健康、高端制造、特种作业等领域的不可替代价值,已成为各国科技竞争与产业升级的核心赛道,受到我国国家战略层面的高度重视。

从“十三五”规划到“十四五”规划的专项政策文件中,我国多次将智能软体机器人相关技术纳入战略性新兴产业发展体系,明确其在推动制造业高端化、智能化、绿色化转型,以及保障民生健康和提升应急响应能力中的关键作用。在《“十四五”机器人产业发展规划》中将“软体机器人”列为重点突破的新型机器人产品,提出攻克柔性材料与仿生驱动等核心技术,推动软体机器人在医疗康复、工业抓取、应急救援等场景的规模化应用。同时,《“十四五”医疗装备产业发展规划》进一步聚焦细分领域,要求研发柔性微创手术机器人、智能康复手套等高端装备,为医疗类软体机器人开辟产业化快速通道。在“十五五”规划建议中也明确全面实施“人工智能+”行动,而机器人正是人工智能最重要的载体之一。在具体科研投入与创新体系建设上,国家自然科学基金委员会将“柔性智能材料与软体机器人”列为优先资助方向,国家科学技术部重点研发计划“智能机器人”专项中,“生物混合软体机器人”“极端环境软体探测机器人”等课题立项数逐年大幅增长,推动我国在高强柔性材料、多场耦合驱动等核心技术领域实现突破,相关专利申请量跃居世界首位。这些国家层面的战略布局不仅加速了技术迭代,更推动智能软体机器人从实验室走向产业应用,成为我国培育战略性新兴产业、抢占全球科技竞争制高点的重要力量。

我国智能机器人发展阶段与战略规划



本部分共分3章内容来分别阐述智能材料与软体机器人相关的基本概念,以期为后续全面深入理解智能材料在软体机器人中的应用构建基础知识框架。

# 第1章

## 智能材料基础

材料,自人类文明伊始,便是时代进步的基石。从石器时代、青铜时代到硅时代,每一种标志性材料的出现都深刻地重塑了社会。然而,在过去漫长的岁月里,材料大多扮演着被动、静态的角色。它们的性能在出现时便被确定,无法根据外界环境的变化作出主动的、智能的响应。这一范式持续了数千年,直到 20 世纪中后期才被打破。科学家们开始不再满足于仅仅创造更强、更轻或更耐用的材料,他们向自然汲取灵感,试图赋予材料“生命”的特征,集感知、响应和适应于一体。于是,一类全新的材料家族——智能材料,登上了历史舞台。它们能够感知外界环境的变化(如温度、压力、光、电、磁场),并通过改变自身的物理性质(如形状、颜色、刚度、黏度)来作出响应,从而执行特定的功能。这标志着材料从“被动”到“主动”的根本性飞跃,从单纯的“结构件”演变为集感知、驱动甚至决策于一体的“功能系统”。

本章旨在系统地介绍“智能材料”这一新兴领域,追溯其从奇妙科学现象到关键核心技术的发展历程,剖析其背后复杂而精妙的工作机理,探索其从实验室走向产业化的道路——看它如何深刻地影响着航空航天、生物医疗、能源环境乃至我们日常生活的方方面面。

### 1.1 智能材料的定义

智能材料是一类能够感知外部环境(如应力、温度、光、电、磁、pH、化学物质等)的变化,并通过自身的物理或化学性质变化,针对这些变化作出响应、执行特定功能,从而适应环境变化的先进功能材料。要深入理解这一定义,需要把握其核心内涵,这同时也是智能材料区别于传统被动材料的根本特征。

感知能力是智能材料的基本特征之一,是判断一个材料是否为智能材料必须符合的要求之一。材料内部必须具备能够探测到外部刺激的元件或机制,这种感知不是通过外接传感器实现的,而是材料本身固有的属性,例如压电材料能感知到压力或形变的变化,光致变色材料能感应到特定波长光强的变化。响应能力是智能材料的

“肌肉”系统,在材料感知到外部刺激后,其自身的某些性质必须能够发生可测量的、显著的变化,这种响应是主动的,例如,感知到温度变化后,形状记忆合金会发生显著的可恢复的形状改变,感知到电场变化后,电致变色材料的颜色会发生可逆改变。

智能材料的最终目标是自适应性与功能性。材料的响应不是随意的,而是有目的的、使其在新的环境下可以更好地发挥作用的行为,它实现了从“感知”到“执行”的闭环,表现出一种初级的“智能”或自适应行为。

总之,智能材料是集感知、驱动与信息处理于一体,能够通过改变自身的物理参数(如形状、颜色、刚度、黏度等)来响应外部环境变化,并执行特定功能,从而实现自适应、自诊断、自修复等类智能行为的一类新型材料。

为了更好地阐述智能材料,表 1.1.1 将智能材料与传统的材料作对比。相较于传统的材料,智能材料实现了感知和响应的统一,并非对传统材料的简单改进,而是理念上的跨越,区别核心在于“被动性”和“主动性”的对立。

表 1.1.1 传统材料与智能材料的主要区别

特征维度	传统材料	智能材料
核心本质	静态、被动	动态、主动
功能角色	系统的一部分,功能单一	感知-决策-执行系统的集成
与环境关系	单向抵抗环境的影响	双向交互适应并响应环境变化
设计标准	追求特定环境下的最优静态性能	变化环境下的自适应性和功能性
性能指标	强度、硬度、韧性等静态标准	响应速度、灵敏度、可逆性、疲劳寿命等动态指标
系统复杂性	相对简单,结构-性能关系明确	高度复杂,涉及多物理场耦合、非线性响应

从功能的本质来说,传统材料的功能是固定的、静态的,一旦被制造出来其性能便被固化,无法随外部条件的变化而自我调整;智能材料的功能是可变的、动态的,其核心在于变化,例如,电致变色玻璃可以根据电流的指令在透明和不透明之间切换,从而在采光和隐私保护两种功能状态间动态变化,这种功能可切换的特性是传统材料完全不具备的。从与环境的关系上来看,传统材料的设计理念是抵抗环境变化,设计者期望材料在高温、高压等环境下能保持长期稳定,尽可能不被环境影响而发生性能改变,这是一种被动、防御型的关系。智能材料的设计原理是材料与环境发生“对话”并作出响应,它能主动感知环境的变化,并将这种变化转化为有用的响应,这是一种主动、交互型的关系。从系统集成方面来看,传统材料在器件中通常作为单一的功能部件或结构部件,要实现复杂功能,需要将传感器、处理器、执行器等多种部件组装成一个系统。而智能材料本身就是一个高度集成的微观系统,它将感知、响应甚至决策的功能集成于一种材料中。表 1.1.1 清晰地概括了二者的主要区别。

智能材料区别于传统材料,对其的衡量标准也远不止于传统材料的力学或化学指标,而是一套综合的、关注其“智能”行为的评价标准,以下是几个核心的关键性

指标。

(1) 响应灵敏度：材料对外部刺激的感知阈值和响应幅度。所需的刺激强度越低、产生的响应变化越大，灵敏度就越高，例如电致变色材料，其变色所需电压越低，其灵敏度越好。

(2) 响应速度：从施加刺激到材料完成响应所需的时间，是决定智能材料能否实现动态实时控制的关键，例如磁流变液在毫秒级内实现液固转变，使其能用于汽车主动悬架，而某些热响应水凝胶的响应时间长达几秒甚至几分钟，则无法满足实时控制的要求。

(3) 可逆性与耐久性：可逆性是指刺激移除后，材料能否完全恢复到初始状态；耐久性是指材料能经历多少次“刺激-响应-恢复”循环而不出现性能衰减或结构破坏，而形状记忆合金在千万次循环后仍能保持性能，就是其商业化的原因之一。

(4) 能量效率：产生单位响应(如单位应变、颜色变化)所消耗的能量。高效率是实现器件微型化和长时间工作的前提，例如介电弹性体驱动器能产生巨大的形变但是需要上千伏的电压，所以应用得到了限制。

(5) 功能密度：在单一材料中集成多种智能功能(如“自感知+自响应+自供能”)的能力。高功能密度是实现器件小型化和复杂智能行为的基础。

(6) 工作环境适应性：材料在极端或复杂环境(如高温、低温、腐蚀、辐射)下保持其智能性能稳定性的能力，例如航天器使用的智能材料必须能在巨大的温差和真空环境下正常工作。

因此，智能材料的设计是一场从微观到宏观、从单一到集成的系统性工程。其性能的优劣，已不能仅凭单一指标判断，而必须置于其目标应用场景下，用响应速度、耐久性、效率等多维指标进行综合考量。理解这些评价指标和设计原理，是理性开发和成功应用智能材料的基础。

## 1.2 智能材料的类型

智能材料的分类方式多样，可按其响应机制、功能用途或材料基质进行划分。由于响应机制最为直接地揭示了智能材料的内在物理化学变化，所以本节以响应机制为主要分类方法对智能材料进行分类。

(1) 首先是电响应材料<sup>[1]</sup>，其作用机理是材料在外部电场作用下，其内部带电粒子(如离子、电子)以及偶极子发生定向迁移或重新排列，从而导致材料的形状、尺寸、刚度或光学性质发生可逆变化，典型的有压电材料、电致变色材料以及电流变液等。其中，压电材料的作用机理为晶体结构缺乏对称中心，在受到机械应力时，晶胞内正负电荷中心发生相对位移，产生电偶极矩，从而使材料表面出现束缚电荷(正压电效应)。反之，施加电场时材料会产生机械应变(逆压电效应)。电致变色材料的机理是在电场作用下，材料发生氧化还原反应，导致其电子能级结构改

变,从而对可见光的吸收谱发生变化,产生可逆的颜色变化,如聚苯胺等材料。而电流变液机理为悬浮于绝缘油中的介电颗粒在电场作用下被极化,形成链状或柱状结构,使流体在毫秒量级内从牛顿流体转变为具有剪切屈服强度的类固体状态。

(2) 光响应材料<sup>[2]</sup>是指在特定波长的光照射下,能够发生可逆或不可逆变化的材料,其作用机理是材料中的光敏基团(如偶氮苯、螺吡喃)吸收特定波长的光子后,发生光致异构化、光致解离或光致二聚等化学反应,引起分子构型、极性或尺寸的改变,最终表现为宏观的形状、颜色或表面性能变化。典型的有光致变色材料,材料吸收光后,分子结构在两种状态之间可逆切换,这两种状态具有不同的吸收光谱,呈现出不同的颜色。光致形变材料通过将光能直接转换为机械能,使得材料发生形变,光照导致分子构象变化,进而扰动整个聚合物网络,产生宏观的弯曲、收缩或爬行运动。

(3) 热响应材料<sup>[3]</sup>可以对外界温度变化产生响应,通常通过改变分子链的运动能力、构象或者相态来实现功能的切换。典型的有热致形状记忆聚合物,当温度达到其转变温度时,分子链运动能力增强,可以使这种材料由初始形状变为另一种形状并固定,当温度变化后还可以恢复到起始状态。热致变色材料通过温度的变化引起材料内部发生晶型转变、配体几何结构变化等,从而导致材料的颜色发生改变。

(4) 常见的还有磁响应材料,这种材料中含有磁性颗粒(如四氧化三铁、钆铁硼等),在外部磁场作用下,颗粒被磁化并受到磁力的作用从而驱动材料整体发生运动、发热或者刚度变化。其中,磁流变液<sup>[4]</sup>与电流变液机理类似,但响应的是磁场,磁性颗粒在磁场中极化形成链状结构,使流体变稠或固化,例如羰基铁粉悬浮液。还有磁性形状记忆合金,如 Ni-Mn-Ga 合金的相变由磁场驱动,磁场诱导马氏体变体重新取向,产生巨大的可恢复应变,其响应速度远快于传统的热致形变记忆合金。

(5) 除此之外还有化学响应材料,这种材料可以与环境中特定的化学物质(如离子、分子、水)发生相互作用(如离子交换、配位作用、氢键断裂/形成),引起自身体积、质量、光学或电学性质的改变。典型的有自修复材料<sup>[5]</sup>,这种材料分为本征型和外援型。本征型自修复材料的内部具有可逆的化学作用(如狄尔斯-阿尔德(Diels-Alder)反应、氢键、离子键),损伤处可以在外部刺激下可逆重新结合;外援型材料则是通过预埋有修复剂的微胶囊,在刺激下使其破裂而实现对材料的修复。pH 响应水凝胶作为另一种化学响应材料,其聚合物网络中带有可离子化基团(如-COOH 或-NH<sub>2</sub>),环境 pH 变化会导致基团电离或中和,改变网络内的渗透压和静电斥力,从而引起溶胀或收缩。

除按照响应机制分类,智能材料还可以依据其功能进行分类。常见的有:能够感知自身状态或环境变化的自感知材料、能够将感知到的信号转换为动作输出的自响应材料、能够自主或在一定条件下修复自身损伤以恢复功能的自修复材料,以及能够从环境中收集能量并转化为电能的自供能材料等。

智能材料的分类并非绝对的,许多先进的智能材料往往同时具备多种响应机制(如磁-光双响应水凝胶),或集感知、响应、修复等多种功能于一身,理解其核心

工作机制才是设计和应用这些材料的关键。

智能材料从仿生学原理、多尺度结构设计原理等出发,集感知、驱动与信息处理于一体,形成了一套完整的体系,可以通过改变自身的物理参数来响应外部环境的变化并执行特定的功能,从而实现自适应、自诊断、自修复等类智能行为。同时,智能材料的设计是一场从微观到宏观、从单一到集成的系统性工程。

### 1.3 发展历程

智能材料的发展并非一蹴而就,其科学根基深植于过去一个多世纪中对各类材料特殊响应现象的观察、理解和利用。早在19世纪80年代,对于智能材料就有了一些探索,在这个时期,科学家们就发现了一些特殊的物理现象,虽然尚未与“智能”这个概念联系起来,但是为后续智能材料的发展奠定了理论基础。1880年,法国物理学家居里兄弟在对石英晶体的介电现象和晶体对称性的试验研究中发现了压电效应,揭示了机械能与电能相互转换的物理基础;1932年,瑞典化学家 Arne Ölander 在研究金-镉(Au-Cd)合金时首次观察到形状记忆效应。

20世纪60—80年代,一系列关键智能材料在此阶段问世并得到深入研究,“智能材料”的概念开始萌芽。20世纪60年代,美国海军军械实验室的 William J. Buehler 团队发现了镍钛诺(nitinol),其形状记忆效应远优于此前所有材料,并很快在航空航天领域(如F-14战斗机液压管路接头)得到应用。之后,锆钛酸铅(PZT)陶瓷被开发出来,其压电性能远超之前的材料,成为现代压电传感与执行器的基石。20世纪70年代,日本学者开发出聚偏二氟乙烯(PVDF),这是一种柔性的聚合物压电材料,极大地拓展了压电技术的应用场景。同时期光致变色、电致变色材料的机理研究也逐步深入。20世纪80年代,日本科学家首次将“智能材料”的概念与这些具有响应特性的材料联系起来,智能材料的概念形成。

20世纪90年代到现在,可以说是智能材料的突破阶段,纳米技术、生物技术和计算科学的飞跃,为智能材料带来了革命性的变化,智能材料从单一响应走向多场耦合、从宏观走向微观。2001年,美国伊利诺伊大学 Scott White 团队提出了微胶囊型自修复聚合物的概念,开创了自修复智能材料的新纪元。同时期碳纳米管(CNT)等纳米材料的出现,为制备具有自感知特性的智能复合材料提供了理想填料。随着4D打印<sup>[6]</sup>技术的出现,科学家提出将形状记忆聚合物与3D打印结合,打印出的物体能在时间(第四维度)的推移下,在外界刺激下自发改变形状,通过结合智能材料与外部刺激响应能力,实现了结构的动态化和功能化。同时,多响应智能材料概念的提出使科学家开发出可同时响应光、热、pH等多种刺激的智能凝胶,也出现了许多生物杂交材料,如用活体细胞驱动的人工水母。随着人工智能(AI)的发展,计算材料学也不断发展,利用人工智能和机器学习逆向设计具有特定智能响应功能的新分子和新结构,大幅加速研发进程。图1.3.1显示了不同时期的关键材料突破。

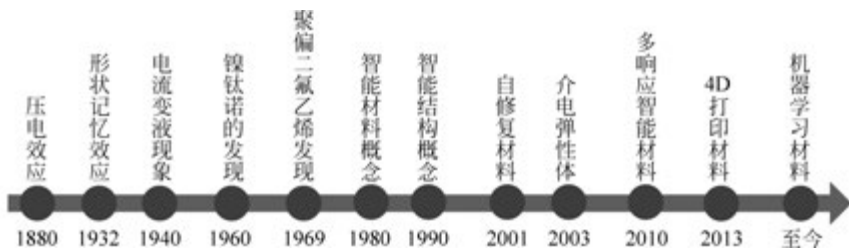


图 1.3.1 智能材料发展历史的关键节点

目前,智能材料产业正处于爆发式增长期,在航空航天、机器人、医疗、建筑等领域,其市场规模呈现爆发增长态势。2024年,全球智能材料市场估值为854亿美元,预计2030年将达到1675亿美元,年复合增长率为11.9%。然而,与国外先进水平相比,我国智能材料产业发展还处于起步阶段,产业离大规模实用化、商品化尚有一段距离。未来,随着5G、物联网、人工智能等新技术的发展,智能材料的应用领域将进一步拓宽,包括智能建筑、智能医疗、智能制造等多个领域都将迎来智能材料的广泛应用。智能材料作为一种新型功能材料,具有广阔的发展前景和巨大的应用潜力。随着科技的不断进步和人们对材料性能要求的不断提高,智能材料将在更多领域发挥重要作用,为人类社会的发展作出更大的贡献<sup>[7]</sup>。

## 1.4 应用简述

智能材料在这么多年的发展中已不是实验室中的新颖概念,它们正在以前所未有的速度融入高端制造、日常生活以及可持续发展中,持续而深刻地改变着人类的生活方式<sup>[8-9]</sup>。

首先是高端制造与航空航天领域<sup>[10]</sup>,在这个领域中,智能材料的价值体现在可以提升材料的极限性能、可靠性以及安全性。作为航空航天的自适应结构,美国国家航空航天局(NASA)基于形状记忆合金和压电材料制备的可形变机翼被应用于飞机上;形状记忆合金可以对环境作出响应,平滑地改变翼梢形状或进气道几何结构,以适应不同飞行阶段(起飞、巡航、降落)的气动需求,显著降低阻力、节省燃油。将压电陶瓷片(如PZT)作为传感器和执行器,粘贴于直升机旋翼、航天器太阳能板或精密仪器平台上,通过传感器实时监测振动,控制系统驱动执行器产生反向振动,从而主动抵消振动,实现主动振动与噪声控制,提升舒适性与精度。自修复材料也被应用于航空航天领域,通过在机身或机翼中嵌入微胶囊型自修复材料,当机翼出现微裂纹时可以修复损伤,极大提高了飞行器的安全性。

智能材料以“精准”“微创”和“个性化”为核心特征,在生物医疗与健康领域引发了一场医疗革命<sup>[11]</sup>。镍钛诺支架在体温下扩张,可以撑开狭窄的血管,形状记忆合金导丝能灵活地在复杂血管中穿行,这种镍钛诺器械已是介入医学的黄金标准。基于智能聚合物的骨钉、血管支架等在完成支撑使命之后,可以在体内温和条

件下实现降解,避免二次取出所造成的伤害,目前已是产业化的重点方向。与此同时,采用压电或导电水凝胶制备的电子皮肤作为柔性可穿戴设备<sup>[12-13]</sup>,能贴合人体实时监测血糖、血压等生理信号,已经被广泛应用。

在日常生活中,智能材料正在让我们的日常用品也变得更“智能”。电致变色玻璃<sup>[14]</sup>可以通过开关实现玻璃透光度的调节,实现隐私保护以及采光的功能集成,已经广泛应用于写字楼和住宅,智能窗的应用市场正在快速增长。同时,光致变色玻璃应用于眼镜的制造<sup>[15]</sup>,在光照下眼镜可以变色防止刺眼。在精细元件方面,压电陶瓷扬声器应用于智能手机中,常见三折叠手机的铰链结构由形状记忆合金制备,这也是高端折叠屏手机的关键技术。智能材料制备的纺织品<sup>[16]</sup>也有望实现各种防护功能。图 1.4.1 展示了一些智能材料在生活中各领域的实际应用。

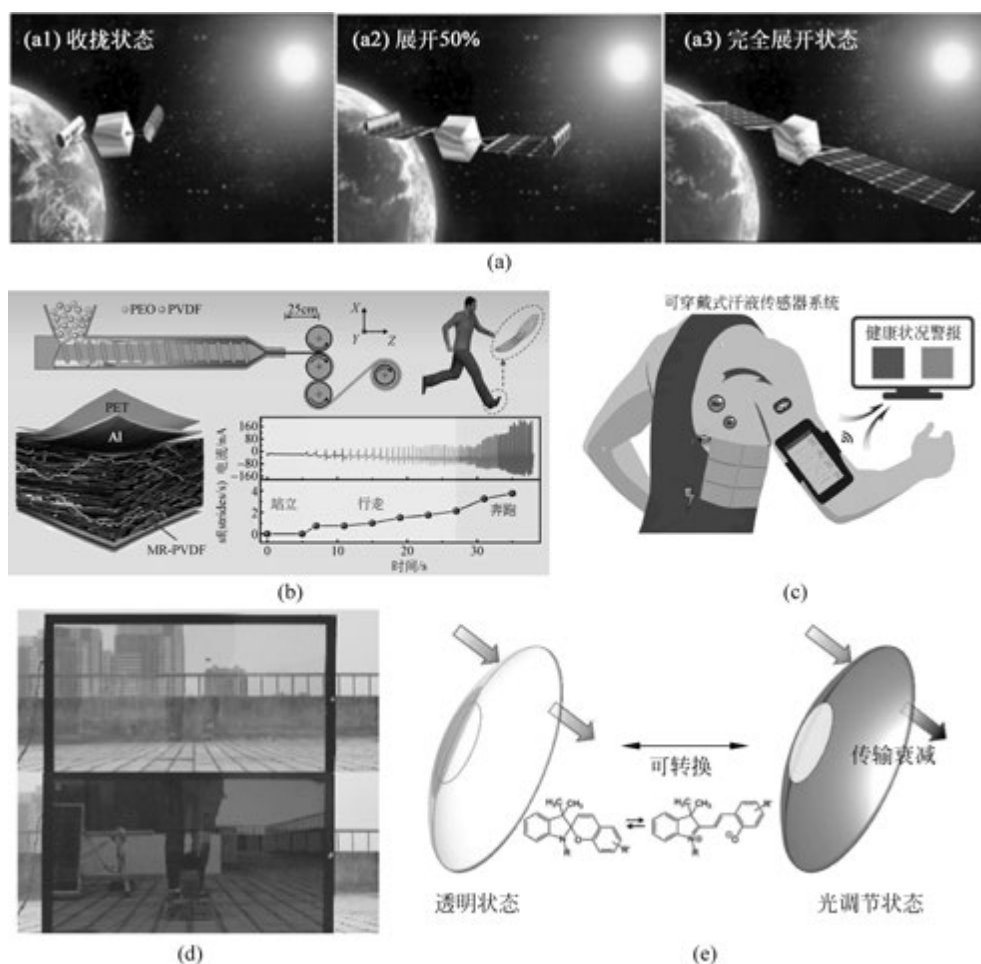


图 1.4.1 (a)形状记忆聚合物复合材料用于可展开柔性太阳能电池阵列的工作示意图<sup>[17]</sup>; (b)微带结构 PVDF 压电聚合物用于人体步态监测<sup>[11]</sup>; (c)压电材料用于无线自供电可穿戴电化学汗液传感贴片<sup>[13]</sup>; (d)电致变色玻璃用于保护隐私和采光<sup>[18]</sup>; (e)光致变色玻璃用于变色眼镜的制备<sup>[15]</sup>

除此之外,智能材料为解决能源和环境挑战提供了创新性解决方案。智能材料可应用于废弃能源收集,例如压电材料、热电材料以及摩擦发电材料,将环境中的废弃机械能(如车辆震动、人体运动、风力)或热能转化为电能,为物联网传感器、可穿戴设备等微功率器件供电,这项技术正处于研究和示范应用阶段。同时,化学响应材料可以用来检测水中特定污染物,并在感知后改变颜色或将其吸附,致力于实现实时监测和原位修复,这也为环境污染治理提供了新的可能。

智能材料的应用呈现出“军民融合”“从高端到普通”的路径,它们正悄然融入从航空航天、医疗器械到智能手机以及居家建筑的众多领域,其核心价值在于为复杂的问题提供了简洁、高效、智能的解决方案。相信随着技术的不断成熟和成本的下降,智能材料必将更深入地融入人类生活的方方面面。

## 参考文献

- [1] NIE J, CHEN X, WANG Z L. Electrically responsive materials and devices directly driven by the high voltage of triboelectric nanogenerators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(41): 1806351.
- [2] XU F, FERINGA B L. Photoresponsive supramolecular polymers: from light-controlled small molecules to smart materials[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(10): e2204413.
- [3] ZHANG Z, CAO B. Thermal smart materials with tunable thermal conductivity: mechanisms, materials, and applications [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 65(11): 117003.
- [4] 李凯权,代俊,常辉,等. 磁流变材料的应用综述[J]. *探测与控制学报*, 2019, 41(1): 6-14.
- [5] LI G, XIAO P, HOU S, et al. Graphene based self-healing materials[J]. *Carbon*, 2019, 146: 371-387.
- [6] CHEN J, VIRRUETA C, ZHANG S, et al. 4D printing: the spotlight for 3D printed smart materials[J]. *Materials Today*, 2024, 77: 66-91.
- [7] ZHANG W B, YANG L, DONG Y, et al. Intelligent materials science for the future[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2025, 39(3): 376-388.
- [8] 江洪,王微,王辉,等. 国内外智能材料发展状况分析[J]. *新材料产业*, 2014(5): 2-9.
- [9] 王林林,冷劲松,杜善义. 4D打印形状记忆聚合物及其复合材料的研究现状和应用进展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(6): 227-244.
- [10] 李丰丰,刘彦菊,冷劲松. 形状记忆聚合物及其复合材料在航天领域的应用进展[J]. *宇航学报*, 2020, 41(6): 697-706.
- [11] ZHENG Y, TANG N, OMAR R, et al. Smart materials enabled with artificial intelligence for healthcare wearables[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(51): 2105482.
- [12] ZHU J, ZHANG Y, ZHENG G, et al. Microribbon structured polyvinylidene fluoride with high-performance piezoelectricity for sensing application [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2021, 3(5): 2411-2419.
- [13] SONG Y, MIN J, YU Y, et al. Wireless battery-free wearable sweat sensor powered by human motion[J]. *Science advances*, 2020, 6(40): aay9842.

- [14] WEN J, SUN J, MENG X. Effect of window orientation on the thermal performance of electrochromic glass[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 69: 105990.
- [15] SEUM K, HYUN L S, KITAE K, et al. Self-regulating contact lenses with the patterning of a photochromic layer based on wettability contrast[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 8(2): 2001443.
- [16] LU H, ZHANG Y, ZHU M, et al. Intelligent perceptual textiles based on ionic-conductive and strong silk fibers[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 3289.
- [17] 哈工大在国际上首次实现基于形状记忆聚合物智能复合材料结构的柔性太阳能电池系统的在轨可控展开[EB/OL]. (2020-6-23) <https://www.nsf.gov.cn/csc/20340/20289/53326/index.html>.
- [18] WEN J, HU C, MENG X. Analysis and optimization of the optimal transmittance range and WWR combination of electrochromic glass[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 74: 106992.