

## 主持人语

英国材料学者马克·米奥多尼克在其《迷人的材料》一书中提出“文明时代就是材料时代”这一观点,认为从我们对文明发展阶段的划分(石器时代、青铜时代和铁器时代),就可以看出材料对我们而言有多么重要。人类社会的每一个新时代都是由一种新材料促成的,材料是技术进步所必须依赖的有形载体,更是人类文明得以发展延续的物质基础。米奥多尼克在书中具体描述了10种与人们生活密切相关的代表性材料,介绍它们作为应用材料的发展历程、形态变化、应用领域,包括钢铁、纸张、混凝土、巧克力、发泡材料、塑料、玻璃、碳材料、陶瓷,以及可植入物,基本涵盖了设计实践与设计研究所涉及的材料种

类,虽是科普类书籍,却不失为一部对设计从业者与设计研究者具有启发意义的著作。

对设计这一可以追溯到远古时代的人类实践活动而言,自其诞生之日起,材料便伴随着设计的发展直至今日。对于设计师来说,丰富多样的各类材料既是他们的工具,也是他们创新改造的对象客体,帮助他们实现设计灵感、发挥设计才华。而对于设计学这一亟待确立自身研究范式的年轻学科来讲,材料创新无疑是一个极为重要的切入点和研究视域;同样,材料科学在20世纪中叶才成为一门独立学科,对这门也很年轻的学科来讲,设计行业是最能直观呈现其研究成果应用转化的领域之一。本期专题是《装饰》第一次系

统性地聚焦于新材料/材料创新方面的话题,邀请的学者文章既包括CMF设计、服装服饰设计、智能材料设计等以“有形”材料为基础的设计实践研究,也有空间设计构建中的图像这类“无形”材料的设计应用阐释。此外,本期专题还有两篇“第一线”性质的材料创新实践者的访谈文章。通过这几位学者与新材料从业者的研究和思考,试图呈现国内外材料创新设计实践与研究的前沿内容及未来发展趋势。

最后,在此特别感谢米兰理工大学设计学院Luca Guerrini教授对本期专题组稿工作给予的大力支持。(李拓)

## 物联网时代的智能材料设计

Designing with Smart Materials in the Internet of Things Age

[意] 马里内拉·费莱拉 Marinella Ferrara

刘 强 Liu Qiang

内容摘要:自新石器时代以来,不同材料都在特定时期主导着人类社会的生产资料。迈入21世纪,智能材料作为一种新兴材料备受关注。尽管大部分智能材料和交互材料仍处于试验阶段,但它们在时尚、建筑、医疗、交通、产品等诸多领域展现出可期待的应用前景。由于其可变特性带来的交互潜能,部分材料(尤其是涉及电能转化的材料)开始被考虑用于智能产品设计。米兰理工大学设计系MADEC研究中心正在积极开展相关研究,与来自世界各地的研究人员联合起来,提出将智能材料和交互材料应用于智能产品的理论方法。本文主要对智能材料、智能产品和物联网的相关研究做出简短的文献综述,并介绍“以材料为主导的设计”和“设计驱动式材料创新”两个理论方法。在米兰理工大学设计学院开展的这一系列研究将会有助于设计师采用智能材料进行智能产品设计。

关键词:智能材料、交互材料、物联网、智能产品、智能体验

### 简介

当今互联网已经成为连接万物的“纽带”,允许设备通过网络基础设施进行远程连接、感知和

马里内拉·费莱拉、刘强

米兰理工大学设计学院, MADEC 研究中心

控制。而基于互联网的智能产品已经成为人类日常生活的一部分,其中功能强大并能提供愉快用户体验的智能产品更是受到广大消费者的青睐。显然,这样的产品也是多数设计师或企业追求的目标。为推进智能产品的进步和创新,一些设计师开始从智能材料中寻求解决方案。目前,一些

智能材料技术已经被应用于商业产品,大众所熟知的太阳眼镜上的光致变色镜片就是一个典型范例。此外更多的智能材料在科研实验室中显示出了巨大的应用潜力。

互联网时代的到来也给智能材料带来了新的发展机遇,尤其是涉及电能转化的智能材料。然

而目前关于智能材料的知识在设计教育领域的普及率较低，相关理论和方法仍然匮乏，这些因素都将成为限制智能材料在产品领域发展的阻碍。对于意图采用智能材料进行智能产品设计的设计师而言，他们必须深刻理解智能材料在物联网环境和智能体验中的角色和作用，采用合适的方法高效地整合产品功能性和用户体验，而这些将是本文的研究主题。

## 一、智能材料

### 1. 智能材料：定义与分类

智能材料是指能对外部刺激（包括温度、光线、压力、电等）做出响应的材料，其可变特性是区别于传统材料的最大特点。而正因为此特性，当智能材料的响应条件被触发时（来自人为操控或环境变化），它们能提供多样化的反馈模式，进而与人产生互动。智能材料的研究通常需要跨学科的方法，它们种类繁多，在不同学术领域的分类方法也大相径庭：若以工程特性为分类标准，它们可以分为结构应用材料（Structural Materials）、摩擦工程系统应用材料（Tribosystems Materials）、防护系统应用材料（Protective Systems Materials）等，每种类型下都有更详细的分支；而在生物领域，它们可以依据原材料的类型分为基于DNA的纳米材料（DNA-Based Nanomaterials）和基于蛋白质的纳米材料（Protein-Based Nanomaterials）等。

在设计领域，为了降低智能材料科学的门槛以增加受众，一些可读性更高的材料分类法被提出。建筑设计领域里，阿丁顿（Addington）早在2005年就将建筑系统需求分为七种类型（如结构系统需求、照明系统需求等）；当涉及某一具体系统时，建筑师可以便捷地在映射图表上找到需要的智能材料；此外，研究员穆罕默德（Mohamed）在智能材料和建筑元素（包括砖块、屋顶等）之间建立了清晰的映射关系，以便设计师理解应用。在产品领域，笔者（费莱拉）根据变化特性（例如变色、运动和能量转换等）来对智能材料进行分类。而在人机交互领域的变形材料分类法上，卡马尔等人（Qamar et al）通过结合直观的插图以及详细的应用，极大地提高了分类法的易读性。

### 2. 智能材料的应用

因其种类繁多，智能材料的应用遍布诸多领域。在建筑领域，装配有微型传感器的智能瓷砖可以在自然灾害后检测到建筑的应力情况和破坏程度；在医学领域，介孔二氧化硅纳米材料（Mesoporous Silica Nanomaterials）可以通过可控的方式针对性地释放抗癌药物；而在时尚领域，用智能织物制作的服装会给人们的固有认知和情感带来冲击。

在产品领域，多数智能材料“无形地”服务于大众，因而它们在日常活里很难被注意。例如，日本TOTO公司生产的恒温水龙头采用形状记忆合金（Shape Memory Alloy）制作的恒温器来降低温度波动，从而最大限度地减少了传统手柄混合器在设定特定温度时所浪费的水量，但在使用时这一部件很难引起用户的额外关注。当外置式智能材料为用户带来可视变化时，它们会变得更有存在感。例如，在炎热的夏季，汽车中的光致变色玻璃能减弱太阳光线，以降低汽车室内的温度。目前，包括通用汽车在内的许多公司已经在汽车中采用了这种智能玻璃，为驾驶员创造了更好的驾驶体验。

然而，由于高昂的成本、复杂的加工工序等问题，很多关于智能材料的研究尚未投入商业生产。但不可否认的是，智能材料有着光明的发展前景。

## 二、新物质体验

### 1. 产品体验、智能体验和材料体验

当代产品设计师在挑选材料进行设计时，只关注材料的机械性能是不够的。满足产品功能性的同时，对用户的情感有着较大影响的各种体验也应成为重要的衡量标准。

诺曼（Norman）曾在2004年提出了“情感设计”的三个层次，包括本能层、行为层和反思层，它们分别涉及产品的外观、产品的使用乐趣和效率，以及用户的自我形象和关联性记忆。2006年，赫克特（Hekkert）将产品体验定义为三个组成部分：审美愉悦（Aesthetic Pleasure）、意义归属（Attribution of Meaning）和情感反应（Emotional Response）。之后在2007年，德斯梅特（Desmet）和赫克特首先使用“产品体验（Product Experience）”一词来表示涉及人与产品交互产生的所有情感体验。此外，安德斯·瓦

雷尔（Anders Warell）指出，知觉产品体验由三种核心模式组成：感官、认知和情感体验模式。他的PPE（Perceptual Product Experience）模型有助于设计师理解交互过程中产生的较全面的产品感性体验。

其后，随着科技进步与互联网技术的发展，许多产品都被赋予了“智能”的特性，这给体验领域的相关研究带来了一些变化和挑战。2015年，布吕格·诺利（Gianluca Brugnoli）将智能用户体验定义为基于智能技术的体验，这些智能技术能感知环境变化、执行指令以行使功能。与传统的用户体验相比，智能体验通过传感器、互联网、人工智能算法等技术极大地丰富了人机交互。

近年来，材料领域的体验研究逐渐兴起。2013年，代尔夫特理工大学的卡拉纳教授（Karana）等人提出了“材料体验（Materials Experience）”一词，包括感官体验（如光滑或磨砂等效果）、意义体验（如“看起来舒适”）以及情感体验（如惊讶等情绪）。<sup>[1]</sup>然而，由于拥有可变特性，智能材料的体验与传统材料相比存在一些差异，这使得“时间维度”成为影响体验的重要因素。目前一些研究人员正在试验不同类型的智能材料，以探索它们的交互体验情况和潜在的应用可能。例如，笔者（费莱拉）的研究表明，变形材料的“意义体验”是可变的，它与人机交互过程中的情感体验相关。

### 2. 交互美学

为了更深入地探索用户体验，关于交互美学的研究开始出现在产品领域。到目前为止，多种探索交互美学的跨学科理论已被用于产品领域的研究。在2000年，帕特里克·乔丹（Patrick Jordan）基于加拿大人类学博士莱昂内尔·泰格尔（Lionel Tiger）提出的名为“四种愉悦（The Four Pleasures）”的理论提出了一个新的框架，以帮助设计师理解用户与产品互动时产生的愉悦。这些愉悦可被细分为四个类型：生理愉悦（Physio-pleasure）、社会愉悦（Socio-pleasure）、心理愉悦（Psycho-pleasure）和意识愉悦（Ideo-pleasure）。此外，温斯文教授（Wensveen）在2010年提出了一个清晰的理论框架阐述人与产品的互动。一些研究员还进行了关于产品特殊反馈形式与交互美学的实验，例如埃因霍温理工大学阿隆索教授（Bruns Alonso）开展的关于力反馈和智能恒温器的形状变化对用

户情感的影响的研究。

至于智能材料领域，由于其可变特性，引入交互美学理论也是必要的。智能材料作为智能系统的一部分，能充当传感器或执行器，参与信息的传递，进而形成基于用户与产品之间“信息流”的互动。

### 三、物联网时代下的智能材料

#### 1. 物联网：定义与发展

随着计算机、手机以及无线蓝牙耳机等智能产品的推广普及，大众对物联网早已不陌生。依据戈比（Gubbi）的定义，物联网是一个连接平台，它基于云技术对提供的数据信息进行全方位的感应、分析，以实现设备间的连接、传感和控制，这种跨平台的信息共享最终以实现人的需求为目标。

物联网的概念最早可以追溯到1991年，当时威瑟（Weiser）和Xerox Palo Alto研究中心的研究人员提出了一个假设：所有物品都可以在计算机技术的支持下连接。此后，物联网这一概念在2005年突尼斯举行的信息社会峰会上被正式提出，威瑟的假设似乎正逐渐成为现实。据统计，2009年时连接到互联网上的智能产品数量比上网用户还多。对智能产品的特征进行全面的分析和概括是困难的，但是其强大的功能，以及“信息共享”带来的良好用户体验可被认为是重要的特征。

自诞生以来，物联网创造了无数的商业机会并促进了世界经济的发展。麦肯锡全球研究所的一份报告显示：预估在2025年，全球企业在物联网相关领域的投入将达到4~11万亿美元；顶级公司或机构将凭借智能家居解决方案和可穿戴设备进军消费市场，以占据更高的市场份额。

#### 2. 智能材料与物联网

与传统材料相似，智能材料可作为物理载体服务于产品。然而，由于具有受环境刺激而变化的特性，它还可以作为传感器或执行器，构成智能系统的一部分。根据戈比对物联网的定义，一旦“物品”与拥有信息转换能力的平台连接，它们便会成为物联网环境下的智能产品。研究表明，多种智能材料具有与物联网发生互动的潜能，尤其是涉及电能转化的智能材料，如电致变色材料和电致发光材料等。

目前，物联网的快速发展为多个领域带来了

挑战与发展机遇，包括但不局限于产品领域。当今时代的用户渴望新产品能给他们的生活带来便利、愉悦、创新且有意义的体验，这也促使设计师持续关注先进技术，与来自其他领域的科研人员进行跨界合作。智能材料与物联网的交叉学科已经吸引了一些设计师和材料工程师等展开研究。

### 四、未来的研究

在物联网背景下，为了在智能材料科学与智能产品设计之间架设高效沟通的桥梁，MADEC研究中心定义了ICS材料<sup>[2]</sup>，并说明了建立智能材料与物联网及其相关技术的映射的必要性。同时，这部分以文献综述的形式简要介绍了“以材料为主导的设计”和“设计驱动式材料创新”。尽管目前在该领域已经有一些工具或方法可以启发设计师如何将应用智能材料展开设计时做出最好的选择和发挥材料的最大潜能，但目前仍有很多问题需要新理论的支撑和解决。

#### 1. ICS材料的研究

如今，智能材料研究已发展为一个涉及生物学、医学、心理学等跨学科的研究领域。一些智能材料在物联网技术的支持下可以给用户带来更多的创新式互动和愉悦的用户体验。基于此背景，米兰理工大学设计系MADEC研究中心展开关于“ICS\_Materials”的研究。该项目旨在探索设计、材料和交互三者之间的关系。

目前的理论研究已应用于实践。从2017年开始，为了探索更深层次的感官表达方式，MADEC研究中心与企业合作开展了一个项目，以探索游艇设计框架中ICS材料的场景。在此项目中，基于过往ICS\_Materials研究项目积累的经验，费莱拉（Ferrara）和帕塞蒂（Pasetti）提出了“UltraSurfaces（USs）”<sup>[3]</sup>的概念，这是一个针对下一代场景设计的全新设计视角。简单来说，“UltraSurfaces”是电子技术、智能材料，及其在分层基板中的集成技术的发展成果。“USs可以探测感知环境中的变化，在被远程技术操控过程中实现数据记录和交换。此外，它能通过改变其物理特性（如颜色、形状、声音或光发射）与用户实现交互并提供反馈。USs比无处不在的物联网、智能产品和环境更进一步，它在未来的空间和产品场景中都有全新的应用潜力”。<sup>[4]</sup>本着这样的愿景，最终整个团队汇报了MADEC研究中心与合作伙伴企业（来自不同研究领域的公

司）的研究成果：他们设想了未来的室内设计场景，并为儿童的生活空间和医疗系统空间提出了相关的设计概念。这些概念能让用户有更深刻的立体感官体验，实现有意义的智能用户体验创新。

然而，在未来仍有许多问题亟待解决。例如，教育和实践方面相关研究方法和工具仍不足；负责设计和开发ICS材料的专业人士仍需被定义。

#### 2. 智能材料、物联网及其相关技术的映射

技术的发展使智能产品的计算机处理器的生产成本逐渐下降，进而为物联网的发展奠定了坚实的基础。半个世纪以来，几乎所有事情（包括大众的工作，娱乐或学习方式）都发生了翻天覆地的变化。其中计算机早已成为现代生产力的一种不可替代的工具，并主导着现代社会中人们的工作和生活。

相比于新石器时期人类在制造工具时仅需要掌握切削打磨石头的技巧，现代“设计”或“制造”所需的知识涉及更多领域。在当今的物联网环境中，传统的理论框架、方法或工具需要进行升级或修订以应对新时代的挑战。目前，一些研究人员正在对此展开相关研究。2013年，阿德里安（Adrian）和哈基姆（Hakim）介绍了从原型设计到制造和销售智能产品流程的每个步骤。2016年，为了更深入地了解最新智能产品并为设计师提供帮助，伊拉里亚·维塔利（Ilaria Vitali）与其同事搜集了上百种相关设备，并提炼相关特征和有参考意义的价值点，进而总结出这些成功的案例的共性和特点。他们的研究成果以网站的形式对外开放，每个智能产品都已归纳出相关特征以供设计师参考和类比。在此研究之后，他们就智能产品设计提出了一系列指导原则，为未来的设计实践提供了框架。

物联网的到来也给材料领域带来了机遇和挑战。实际上，智能材料不仅可以成为智能产品服务功能的一部分，其特性还可以为用户带来新的体验和互动。可以预见的是，在物联网环境中，智能材料将在产品设计领域中发挥极其重要的作用，这也是进行“ICS\_Materials”项目研究的一个原因。尽管目前已有相关的工具和方法，但是智能材料、物联网及其相关技术之间的关系尚不清楚，这将为采用智能材料进行产品设计的设计师带来困扰。如果他们无法确定其智能材料在整体框架下的重要性与其他影响因素的相互作用，在设计过程中缺乏有效协调方法或指导，产

品设计的成功概率会大幅度降低。

### 3. 以材料为主导的设计

由于传统材料过度消耗带来的环境恶化等因素，对各种新材料的探索被提上日程。越来越多的设计师开始探索新材料带来的创新体验和潜在应用，这一方式也被称为“以材料为主导的设计 (Design for Materials)”。

目前“以材料为主导的设计”已经在新兴材料领域被广泛应用。例如，在生物学和材料科学的交叉领域，诺姆·阿蒂亚斯 (Noam Attias) 的团队从制作真菌培养基开始，对菌丝复合材料的化学、物理以及视觉特性进行了评估，以便将来应用于产品设计领域。这种流程显然与传统设计流程有差异，因为传统的设计并非以材料为出发点，而是紧密围绕市场需求或对用户体验的优化。目前，一些研究人员就“以材料为主导的设计”提出了相关研究方法，其中来自代尔夫特理工大学的卡拉纳 (Karana) 教授及其同事提出的材料驱动式设计 (Material Driven Design) [5] 就是一种非常有参考价值的设计方法。

至于诸如 ICS 材料的高新材料，“以材料为主导的设计”的相关方法也已被采用。例如，在探索“LTM”智能发光材料时，巴拉提 (Barati) 主张通过实际接触、探索以了解材料的发光原理。但是，由于智能材料的复杂性和开发技术的不成熟，设计师必须清楚地认识到传统设计流程的局限性，对材料的定位认知也需要改变。

### 4. 设计驱动式材料创新

在用于大规模商业生产之前，关于新材料的研究 (包括加工技术、应用开发等) 平均持续 20 年。从塑料的发明到普及就经历近百年：1856 年，亚历山大·帕克斯 (Alexander Parkes) 取得了首个人造塑料“帕克辛 (Parkesine)” [6] 的专利，而塑料工业直到 20 世纪 60 年代才进入快速发展时期。在此期间，高密度聚乙烯瓶被引入商业领域并很快取代了大多数玻璃瓶。由于先进材料的复杂特性，它们的开发应用周期可能会持续更长的时间。显然，应该引入合适的方法来缩短从开发新材料到应用新材料的时间，以增加新材料在商业领域应用的成功几率。针对此情况，MADEC 研究中心提出了一种基于设计驱动方法的设计驱动式材料创新 (DdMIM)。

在 DdMIM 方法里，设计是创新的驱动力，设计研究在早期阶段就需要执行。该方法分为六

个阶段：

1. 数据收集 (Data Collection)：设计师在此步骤需要对材料的生产技术和寿命周期等进行深入分析。

2. 感知 (Sensing)：设计师应在一定的社会文化背景下审视当代人们的生活方式，以了解人们的需求以及生活形态等。

3. 感知分析 (Sensemaking)：设计师基于感知的结果探索新概念和想法。

4. 具化 (Specifying)：基于想法和概念确定材料需求，同时考虑材料的视觉特性。

5. 执行 (Setting up)：执行材料的开发和产品设计。

6. 落实 (Placing)：设计师探讨将设计对象投放市场的策略。

为了提高中小型企业的竞争力，DdMIM 已在欧洲企业设计培训课程中引入，以帮助企业改善材料设计流程和创新能力。

### 结语

本文聚焦于智能材料、智能产品设计和物联网的交叉领域。与金属、木材和塑料等传统材料相比，智能材料由于其感应能力和可变属性而与物联网的联系更为紧密，这可以为用户创造新的交互体验。可以预见，基于智能材料的产品将成为未来的重要发展趋势。然而，物联网环境下，关于智能材料在产品设计领域的应用的研究尚处于起步阶段。针对此情况，MADEC 研究中心提出了一些方法和工具，试图支持设计师在进行产品设计时选择能提供良好功能性和愉悦体验的智能材料。目前，“以材料为主导的设计”和“设计驱动式材料创新”两个方法的研究被一些高校实验室及企业采纳应用，它们为打算使用智能材料进行设计的设计师提供了有价值的参考。然而，后续的研究 (包括 ICS 材料、UltraSurfaces、智能材料与物联网及其相关技术的映射等) 仍需继续推进。

注释：

[1] 感官体验指人体器官对材料的感知体验，包括视觉、触觉甚至味觉等；意义体验与人的文化背景等相关；情感体验涉及人过往的相关记忆、经验判断等。

[2] Interactive, connected, smart materials.

[3] USs 是电子增强表面材料，其中传感器、执行器、智能材料、微处理器等通过打印等方法被嵌入一个独特的解决方案中。

[4] Ferrara, M., & Pasetti, C. “UltraSurfaces: A New Material Design Vision” (2020, February): 911, Quoted in Intelligent Human Systems Integration. Springer, Cham.

[5] 在概念生成的初始设计阶段就将材料纳入考虑范围以拓宽视野，或以材料为中心探索其应用前景。

[6] 从植物细胞壁 (纤维素) 提炼生产。透明、可模塑，冷却时能保持其形状。

参考文献：

(1) Journal Articles

[1] Attias N, Danai O, Tarazi E, et al. Implementing Bio-design Tools to Develop Mycelium-based Products[J]. The Design Journal, 2019, 22(sup1): 1647-1657.

[2] Barati B, Karana E, Hekkert P. Prototyping Materials Experience: Towards a Shared Understanding of Underdeveloped Smart Material Composites[J]. International Journal of Design, 2019, 13(2): 21-38.

[3] Bergström J, Clark B, Frigo A, et al. Becoming Materials: Material Forms and Forms of Practice[J]. Digital Creativity, 2010, 21(3): 155-172.

[4] Brugnoli G. Designing Smart Experiences. The Smart and Invisible Future of Interactions and Services[J]. 2015.

[5] Cardillo M, Ferrara M R. Materiali Intelligenti, Sensibili, Interattivi. 02 Materiali per il Design[J]. 2008.

[6] Cila N, Rozendaal M, Berghman M, et al. Searching for Balance in Aesthetic Pleasure in Interaction[J]. Design and semantics of form and movement, 19.

[7] Desmet P, Hekkert P. Framework of Product Experience[J]. International Journal of Design, 2007, 1(1): 57-66.

[8] Ferrara M, Lecce C. “Design for Enterprises”: Developing European SMEs Capabilities for Design-driven Innovation[J]. 2019.

[9] Ferrara M. Shifting to Design-driven Material Innovation[J]. 2017.

[10] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, et al. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions[J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(7): 1645-1660.

[11] Hekkert P. Design Aesthetics: Principles of Pleasure in Design[J]. Psychology Science, 2006, 48(2): 157.

[12] Karana E, Barati B, Rognoli V, et al. Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences[J]. 2015.

[13] Karana E, Hekkert P, Kandachar P. A Tool for Meaning Driven Materials Selection[J]. Materials & Design, 2010, 31(6): 2932-2941.

[14] Karana E, Hekkert P. User-material-product Interrelationships in Attributing Meanings[J]. International Journal of Design, 2010, 4(3): 43-52.

[15] Karana E. Meanings of Materials[J]. 2009.

[16] Locher P, Overbeeke K, Wensveen S. Aesthetic Interaction: A Framework[J]. Design Issues, 2010, 26(2): 70-79.

[17] Ludden G D S, van Rompay T J L. How Does It Feel? Exploring Touch on Different Levels of Product Experience[J]. Journal of Engineering Design, 2015, 26(4-6): 157-168.

[18] Mohamed A S Y. Smart Materials Innovative Technologies in Architecture; Towards Innovative Design Paradigm[J]. Energy Procedia, 2017, 115: 139–154.

[19] Pedgley O, Rognoli V, Karana E. Materials Experience as a Foundation for Materials and Design Education[J]. International Journal of Technology and Design Education, 2016, 26(4): 613–630.

[20] Rognoli V. A Broad Survey on Expressive–sensorial Characterization of Materials for Design Education[J]. 2010.

[21] Rognoli V. Dynamic and Imperfect as Emerging Material Experiences. A Case Study[J]. Design and Semantics of Form and Movement, 2015: 66.

[22] Ross P R, Wensveen S A G. Designing Aesthetics of Behavior in Interaction: Using Aesthetic Experience as a Mechanism for Design[J]. International Journal of Design, 2010, 4(2): 3–13.

[23] Schneider H J, Kato K. Molecular Recognition in Chemomechanical Polymers[J]. Journal of Materials Chemistry, 2009, 19(5): 569–573.

[24] Stienstra J, Pul E, Alonso M B. Feedforward Toaster: Design Mapping for Expressive Use[J].

[25] Tales H. Electronic Products, Aesthetic Experience, and Critical Design[J]. Cambridge and, 1999.

[26] Van Kesteren I E H, Stappers P J, De Bruijn J C M. Materials in Products Selection: Tools for Including User–interaction in Materials Selection[J]. International Journal of Design, 2007, 1(3).

[27] Weiser M. The Computer for the 21st Century[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 1999, 3(3): 3–11.

[28] Wensveen S A G. A Tangibility Approach to Affective Interaction[J]. 2005.

(2) Monographs

[1] Addington M, Schodek D. Smart Materials and Technologies in Architecture: For the Architecture and Design Professions[M]. Routledge, 2012.

[2] Ashby M F, Johnson K. Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design[M]. Butterworth–Heinemann, 2013.

[3] Bengisu M, Ferrara M. Designing with Kinetic Materials[M]// Materials that Move. Springer, Cham, 2018: 65–80.

[4] Bengisu M, Ferrara M. Materials that Move: Smart Materials, Intelligent Design[M]. Springer, 2018.

[5] Chen L. Smart Materials for Controlled Drug Release[M]// Design, Fabrication, Properties and Applications of Smart and Advanced Materials. CRC Press, 2016: 98–135.

[6] Cross N, Roy R. Engineering design methods[M]. New York: Wiley, 1989.

[7] Design, Fabrication, Properties and Applications of Smart and Advanced Materials[M]. CRC Press, 2016.

[8] Goldade V, Shil'ko S, Neverov A. Smart Materials

Taxonomy[M]. CRC Press, 2015.

[9] Jordan P W. Designing Pleasurable Products: An Introduction to the New Human Factors[M]. CRC Press, 2002.

[10] Manyika J. The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype[M]. McKinsey Global Institute, 2015.

[11] Norman D A. Emotional Design: Why We Love (or Hate) Everyday Things[M]. Basic Civitas Books, 2004.

[12] Ritter A. Smart Materials in Architecture, Interior Architecture and Design[M]. Walter de Gruyter, 2006.

[13] Tiger L. The Pursuit of Pleasure[M]. Routledge, 2017.

(3) Collection of Thesis

[1] Alexander J, Roudaut A, Steimle J, et al. Grand Challenges in Shape–changing Interface Research[C]//Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2018: 1–14.

[2] Arquilla V, Vitali I. Designing in the IoT Era: Role and Perspectives in Design Practices[C]//6th International Forum of Design as a Process Systems & Design: Beyond Processes and Thinking. EDITORIAL UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA, 2016: 871–882.

[3] Bionda A, Ratti A. Exploring Scenarios for ICS Materials in the Yacht Design Framework[C]//International Conference on Intelligent Human Systems Integration. Springer, Cham, 2018: 751–756.

[4] Djajadiningrat J P, Overbeeke C J, Wensveen S A G. Augmenting Fun and Beauty: A Pamphlet[C]//Proceedings of DARE 2000 on Designing Augmented Reality Environments. 2000: 131–134.

[5] Ferrara M R, Bengisu M. Kinetic Materials Experience[C]// DeSForM 2015 Aesthetics of Interaction: Dynamic, Multisensory, Wise. 2015: 138–145.

[6] Ferrara M R, Lecce C. The Design–driven Material Innovation Methodology[C]//6th International Forum of Design as a Process–IFDP16 Proceedings–Systems & Design: Beyond Processes and Thinking. Universitat Politècnica de València, 2016: 431–448.

[7] Ferrara M, Pasetti C. UltraSurfaces: A New Material Design Vision[C]//International Conference on Intelligent Human Systems Integration. Springer, Cham, 2020: 909–915.

[8] Ferrara M, Pasetti C. UltraSurfaces: A New Material Design Vision[C]//International Conference on Intelligent Human Systems Integration. Springer, Cham, 2020: 909–915.

[9] Ferrara M, Rognoli V, Arquilla V, et al. Interactive, Connected, Smart Materials: ICS Materiality[C]//International Conference on Intelligent Human Systems Integration. Springer, Cham, 2018: 763–769.

[10] Ferrara M, Russo A C. Next Smart Design: Inclusion, Emotions, Interaction in the Concept of Baby Soothing, Caring and Monitoring Smart Solutions[C]//International Conference on Intelligent Human Systems Integration. Springer, Cham,

2018: 673–679.

[11] Ferrara M. Smart Experience in Fashion Design: A Speculative Analysis of Smart Material Systems Applications[C]//Arts. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019, 8(1): 4.

[12] Franinović K, Franzke L. Luminous Matter Electroluminescent Paper as an Active Material[C]// Proceedings of the International Conference on Design and Semantics of Form and Movement. 2015: 37–47.

[13] Giaccardi E, Karana E. Foundations of Materials Experience: An Approach for HCI[C]//Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems. 2015: 2447–2456.

[14] Parisi S, Bionda A, Ratti A, et al. Design for ICS Materials: A Tentative Methodology for Interactive, Connected, and Smart Materials Applied to Yacht Design[C]//International Conference on Intelligent Human Systems Integration. Springer, Cham, 2019: 661–666.

[15] Parisi S, Spallazzo D, Ferraro V, et al. Mapping ICS Materials: Interactive, Connected, and Smart Materials[C]// International Conference on Intelligent Human Systems Integration. Springer, Cham, 2018: 739–744.

[16] Qamar I P S, Groh R, Holman D, et al. HCI Meets Material Science: A Literature Review of Morphing Materials for the Design of Shape–changing Interfaces[C]//Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2018: 1–23.

[17] Rognoli V, Salvia G, Levi M. The Aesthetic of Interaction with Materials for Design: The Bioplastics' Identity[C]// Proceedings of the 2011 Conference on Designing Pleasurable Products and Interfaces. 2011: 1–8.

[18] Stienstra J, Alonso M B, Wensveen S, et al. How to Design for Transformation of Behavior Through Interactive Materiality[C]//Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human–Computer Interaction: Making Sense Through Design. 2012: 21–30.

[19] Van Oosterhout A, Bruns Alonso M, Jumisko–Pyykkö S. Ripple thermostat: Affecting the Emotional Experience Through Interactive Force Feedback and Shape Change[C]// Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2018: 1–12.

[20] Vitali I, Rognoli V, Arquilla V. Mapping the IoT: Co–design, Test and Refine a Design Framework for IoT Products[C]// Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human–Computer Interaction. 2016: 1–3.

[21] Warell A. Modelling Perceptual Product Experience – Towards a Cohesive Framework of Presentation and Representation in Design[C]//Design & Emotion 2008; Proceedings of the 6th International Conference on Design & Emotion, October. 2008: 6–9.