

新材料监测快报

MATERIALS NEWSLETTER

2024.09

本期要目

- 欧发布先进制造业初步调查结果报告
- 韩发布《K-造船超级差距蓝图 2040》
- 德教研部启动两项量子器件与量子材料项目
- 美政府向 12 家技术中心开展新一轮资助
- 加政府投资 1.2 亿加元支持半导体制造及商业化
- 美开发出世界首个无阳极钠固态电池
- 美实验室研制出最准确光学原子钟

目 录

专 题

欧发布先进制造业初步调查结果报告	1
------------------------	---

战略规划

韩发布《K-造船超级差距蓝图 2040》	4
----------------------------	---

项目资助

德教研部启动两项量子器件与量子材料项目	5
加政府投资 1.2 亿加元支持半导体制造及商业化	7
美政府向 12 家技术中心开展新一轮资助	7

研究进展

美开发出世界首个无阳极钠固态电池	9
新型软体致动器模拟肌肉运动	10
新型有机分子打破磷光效率记录	10
美实验室研制出最准确光学原子钟	11
从电子废弃物中回收稀土金属	12
聚合物特性数据库助力塑料化学回收	13
超强铝合金快速成型制造	14
功能型光刻胶实现特大规模集成度有机芯片制造	15

欧发布先进制造业初步调查结果报告

编者按：6 月，欧盟委员会联合研究中心发布了《全球格局下欧盟先进制造业初步调查结果》（*Advanced Manufacturing Study. Preliminary findings on EU's Advanced Manufacturing industry in the global landscape*）报告¹，研究分析了全球先进制造业总体格局，在增材制造、动态数据、人工智能、自主系统和机器人等领域将欧盟与美国和中国等主要竞争对手进行了比较分析。本期专题简要陈述了该报告的主要结论。

一、全球先进制造活动高度集中在中国、美国和欧盟

全球先进制造业企业分布格局高度集中。中国、美国和欧盟先进制造企业数量在 2009 年至 2022 年期间增幅分别为 571%、75%和 130%（图 1）。72%从事先进制造活动的企业位于中国（45%）、美国（17%）和欧盟（10%）（图 2 左图）。欧盟、中国和美国先进制造各有侧重，欧盟在物联网、扩展现实等方面比中国和美国具有更强的相对竞争优势，中国和美国分别在人工智能和先进计算方面处于领先地位。

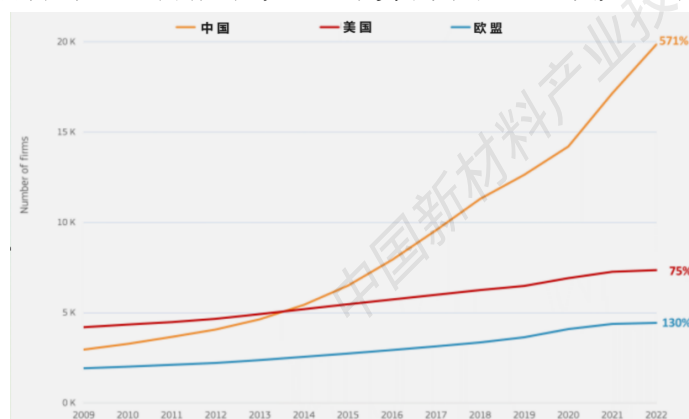


图 1 2009-2022 年，中美欧先进制造企业数量变化情况

1 Advanced Manufacturing Study. Preliminary findings on EU's Advanced Manufacturing industry in the global landscape.
https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/advanced-manufacturing-industry-growing-significantly-eu-2024-07-02_en

中国先进制造企业往往更具创新性，66%的公司至少申请了一项与先进技术在工业制造应用相关的专利，而美国和欧盟的这一比例分别为20%和31%（图2右图）。自2009年以来，全球对先进制造的风险投资流向美国、中国和欧盟的比例分别50%、34%和5%。约60%全球风险投资高度集中在动态数据、人工智能、3D打印和功率电子等四个领域。

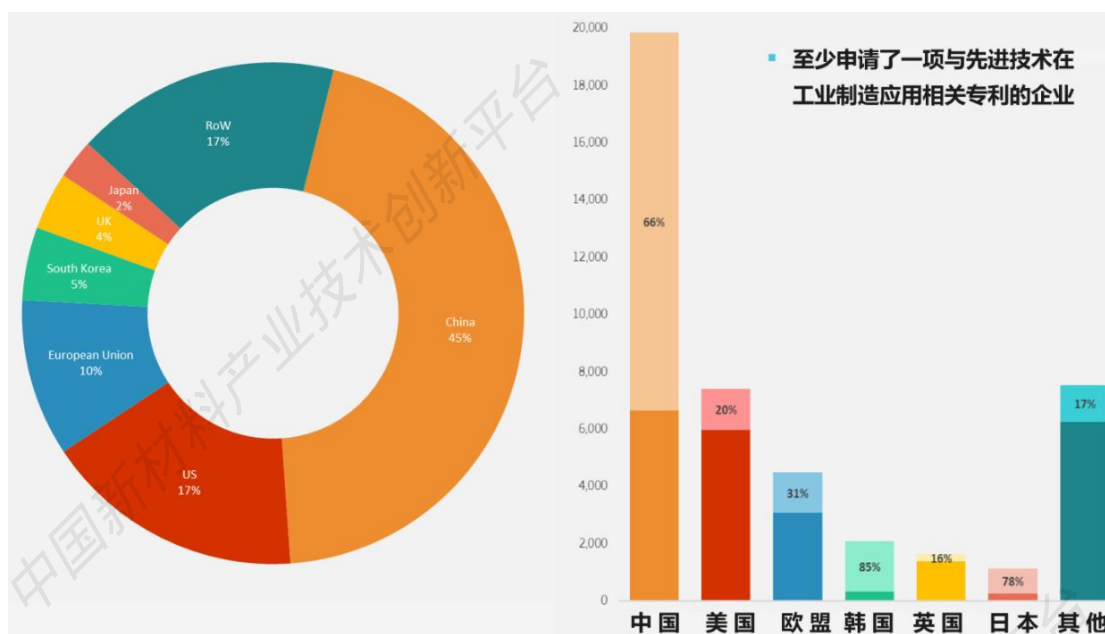


图2 （左）全球先进制造企业分布格局；（右）各国/地区先进制造企业数

二、中国先进制造企业数量和创新活动大幅领先

3D打印和增材制造是先进制造活动占比最高的先进制造技术领域。2009-2023年有超过10000项专利申请，几乎占整个先进制造行业的40%。中国公司占据了其中的绝大多数专利（60%），其次是欧盟（11%）和美国（10%）。全球有近1.2万家增材制造公司，中国、美国和欧盟企业数量分别占比44%、18%和15%。

动态数据是先进制造活动占比第三的技术领域（约15%）。2009年至2023年有超过3000项与先进制造相关的专利申请。其中大部分由中国企业提交（84%），美国和欧盟占比均为2%。全球有近8500家公司积极参与动态数据技术相关的先进制造活动，其中一半位于中国，美国和欧盟分别占比14%和8%。

人工智能是先进制造活动占比第四的技术领域（约 10%）。在 2009-2023 年有超过 2500 项与人工智能在先进制造应用相关的专利申请，其中绝大多数由中国企业提交（69%），美国和欧盟占比分别为 7%和 4%。全球有近 8500 家公司积极参与与人工智能技术相关的先进制造活动，其中约有一半位于中国。

自主系统和机器人技术是先进制造活动占比第五的技术领域（约 9%）。2009-2023 年有超过 1600 项与先进制造相关的专利申请。大多数由中国企业申请（65%），美国企业和欧盟企业专利占比仅为 6%和 5%。全球有近 5000 家公司积极参与自主系统和机器人技术相关的先进制造活动，其中中国、美国和欧盟分别占比 41%、19%和 10%。

战略规划

韩发布《K-造船超级差距蓝图 2040》

7月2日，韩国产业通商资源部（MOTIE）发布《K-造船超级差距蓝图 2040》。该路线图是韩国三大造船厂首席技术官与相关学术、行业和研究机构的大约 100 名专家合作研究制定的，共包含 100 项核心技术及 351 项子技术²。

环保方面，该路线图将开发环保燃料动力系统、绿色创新材料和设备以及海上氢、氨生产装置，目标是到 2040 年完成零碳排放船厂技术研发。重点将聚焦确保液化天然气运输船、大型电动船舶和海上示范的基础技术。

数字化方面，路线图将聚焦从设计到生产再到船厂管理的所有阶段数字化，目标是到 2040 年实现 50% 的过程数字化。重点是针对焊接和容器涂装等高风险、高难度任务开发数字化技术以及协作机器人技术。从中长期来看，MOTIE 计划确保 24 小时自动化船体建造技术，并推动建立试验台。

智能化方面，路线图将聚焦全自动船舶商业化所需智能技术，包括与传感器、材料和设备以及集成管理系统相关技术。此外，还将研究开发为应对紧急情况的安全技术，以及利用人机协作取代船员服务。

MOTIE 在绿色化、数字化、智能化三大领域部署了 10 个超级差距技术旗舰项目，包括氨动力运输船、液化氢运输船、液化二氧化碳运输船、中大型电动船、船舶用碳捕集装置、自主航行平台、液化天然气（LNG）和液化氢货舱国产化、超轻高效协作机器人、无人自主制造工艺技术和码头物流自动化系统等。

韩国政府和三大造船厂认为，必须解决现场问题以提高生产率，并就以下技术签订了谅解备忘录：协作焊接机器人、焊接和涂装虚拟现实

² MOTIE announces K-Shipbuilding Super Gap Vision 2040.
<https://english.motie.go.kr/eng/article/EATCLdfa319ada/1935/view?pageIndex=3&bbsCdN=2>

(VR)教育系统、用于海外人力资源招募的人工智能(AI)聊天机器人、船厂承包商联合生产平台开发等。

项目资助

德教研部启动两项量子器件与量子材料项目

7月，德国联邦教育及研究部(BMBF)在“量子系统—开发尖端技术，塑造未来”研究计划下启动了两个新项目³。

(1) 科学先驱项目：HINODE

BMBF在“科学先驱项目：光子学和量子技术”(WiVoPro)主题下启动HINODE项目，旨在使用工业光刻技术，制造出由氧化钇钡铜(YBCO)高温超导薄膜组成的单光子探测器，并研究其单光子响应的物理机制。目标探测器可以在高达20 K的操作温度下使用低成本、鞋盒大小的制冷机进行冷却。这种紧凑型制冷设备使YBCO探测器能够安装在标准的19英寸电信架上。基于该方法，电信行业有可能广泛采用集成光子元件。

(2) 量子材料项目：LichtBriQ

BMBF在“量子系统的创新材料和工艺”(MaB)主题下启动LichtBriQ项目，旨在开发基于薄膜铌酸锂(LNOI)的集成量子光学工具包，加速LNOI晶圆的制造、结构化和可加工性以及平台扩展，并利用LNOI的特性实现具有无源和有源元件的可重复、可扩展和灵活的光子电路。最终，LNOI平台将成为一个颠覆性的、非基于CMOS的材料平台，用于开发适合工业用途的、可扩展的制造工艺。LNOI平台在量子技术和光子学领域具有巨大的潜力和广泛的应用前景。

³ Neue Projekte im Juli.
<https://www.quantentechnologien.de/artikel/neue-projekte-im-juli-1.html>

【快报延伸】

德国联邦教研部在“量子系统研究计划——开发尖端技术，塑造未来”研究计划框架下，聚焦光子学和量子技术领域启动的“科学初步项目”（WiVoPro）⁴，旨在研究与量子技术和光子学未来工业应用相关的科学问题，在基础研究和行业主导的联合资金之间架起一座桥梁。这些项目最多由两个机构在最长三年内完成，每个项目的资金范围最高为 60 万欧元。

在同一框架下，教研部还启动“量子系统的创新材料和工艺”（MaB）项目⁵，资助面向光子学和量子技术的具体应用开发创新材料和工艺技术的课题，以及探索全新材料和工艺技术以应用于量子技术的课题。重要的原材料和基材有时在全球范围内仅由少数供应商提供，或者只能从一个地区获得。该资助措施旨在加强德国量子系统领域的用户和提供者的竞争力，以巩固和扩大其在国内和国际市场上的地位，目的是优化现有技术，并找到具有卓越性能的现有材料的替代品，加强德国和欧洲的技术主权，减少外部依赖，提高供应链韧性。

铌酸锂被认为是非常有前途的集成光路（PIC）材料。近年来，国际上围绕铌酸锂光子学技术研究和开发呈现你追我赶的景象，欧盟委员会在“地平线 2020”框架下启动了耗资约 500 万欧元、为期 42 个月（持续到 2025 年 6 月）的 ELENA 计划⁶，旨在打造欧洲首个绝缘体上的铌酸锂 PIC 平台，为新一代光子学应用重塑铌酸锂光学器件。

⁴ Wissenschaftliche Vorprojekte (WiVoPro) Photonik und Quantentechnologien.
<https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/wissenschaftliche-vorprojekte-wivopro-photonik-und-quantentechnologien.html>

⁵ Innovative Materialien und Prozesse für Quantensysteme.
<https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/innovative-materialien-und-prozesse-fuer-quantensysteme-1.html>

⁶ <https://www.project-elena.eu/>

加政府投资 1.2 亿加元支持半导体制造及商业化

7 月 4 日，加拿大创新、科学和工业部宣布向 CMC Microsystems (CMC) 领导的“互联网尖端集成组件制造”(FABrIC) 项目投资 1.2 亿加元(约合 8690 万美元)，支持建立泛加拿大半导体生态系统。该项目将来自广泛领域的利益相关方聚集在一起，加速半导体的设计、制造和商业化，以及最先进的智能传感器技术的发展，从而扩大加拿大半导体产业，并增加高技能工作岗位⁷。

FABrIC 是一个为期五年，总投资超过 2.2 亿加元的项目，由 CMC 牵头，旨在通过创建高素质人才库、鼓励半导体制造工艺创新以及为加拿大企业提供代工服务来加强加拿大半导体和智能传感器行业。这项投资建立在加拿大和美国于 2023 年 3 月宣布的推进跨境半导体制造走廊的承诺之上。

美政府向 12 家技术中心开展新一轮资助

美国商务部经济发展管理局将向 12 家技术中心提供新一轮资助，总额约为 5.04 亿美元，旨在扩大关键技术生产，在创新产业中创造就业机会，强化经济竞争力和国家安全，并加速全美各地未来产业的发展⁸。

这 12 家技术中心涉及的技术领域包括：量子信息技术、智能光子传感器系统、生物制造、锂电池与电动汽车材料、半导体制造、清洁能源供应链、可持续与气候适应相关基础设施、可持续聚合物、安全自主系统和个性化医疗等。值得关注的是，总共有三家是“生物制造”方向。预计获得的资助金额在 1900 万美元至 5100 万美元之间。

⁷ Government of Canada supporting manufacturing and commercialization of semiconductors.
<https://www.canada.ca/en/innovation-science-economic-development/news/2024/07/government-of-canada-supporting-manufacturing-and-commercialization-of-semiconductors.html>

⁸ Biden-Harris Administration Announces Next Funding Round of \$504 Million for 12 Tech Hubs Across America.
<https://www.commerce.gov/news/press-releases/2024/07/biden-harris-administration-announces-next-funding-round-504-million-12>

【快报延伸】

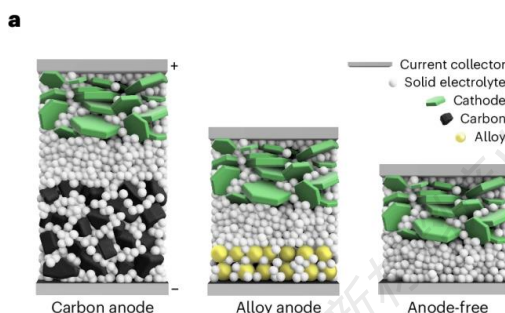
2023 年 10 月，美国在全美范围内设立了 31 家区域技术中心，意在提升美国相关科技领域的竞争力，每家中心首轮获得的拨款在 4000 万至 7500 万美元不等。这些中心将重点发展和壮大各地的创新产业，如半导体、清洁能源、关键矿产、生物技术、精准医疗、人工智能和量子计算等。这些中心横跨美国的 32 个州和波多黎各，打破了“长期以来，经济增长和机遇集中在沿海城市”的局面，以更好地“代表美国的全面多样性”。

研究进展

美开发出世界首个无阳极钠固态电池

由于全球脱碳战略的影响，锂离子电池的需求激增，导致价格飙升。而钠在地壳中储量丰富，其含量是锂的 1000 倍。同时，锂提取容易对环境造成破坏，而钠则可以在从海水和纯碱中提取。因此，钠电池被认为是锂电池的潜在替代方案。为制造出具有锂电池能量密度的钠电池，芝加哥大学和加州大学圣地亚哥分校的研究团队开发出世界首个无阳极钠固态电池，有望加速推动电池产业规模的扩张，进而减少对化石燃料的依赖⁹。

为提高钠离子电池密度，研究人员采用新型无阳极电池结构，使用颗粒状铝作为集电器，并使其与硼氢化钠固体电解质保持紧密接触。通过冷压工艺，使硼氢化钠固体电解质形成致密结构，以抑制钠枝晶的渗透。实验结果显示，以 NaCrO_2 为阴极的无阳极钠全固态电池在 40 °C、10 MPa 堆压以及 6 mA cm^{-2} 的电流密度下循环 400 次，平均库仑效率为 99.96%。



碳阳极、合金阳极和无阳极配置的电池示意图

上述研究工作发表在 *Nature Energy* (文章标题: Design principles for enabling an anode-free sodium all-solid-state battery)。

⁹ UChicago Prof. Shirley Meng's Laboratory for Energy Storage and Conversion creates world's first anode-free sodium solid-state battery - a breakthrough in inexpensive, clean, fast-charging batteries.
<https://pme.uchicago.edu/news/uchicago-prof-shirley-mengs-laboratory-energy-storage-and-conversion-creates-worlds-first>

新型软体致动器模拟肌肉运动

美国西北大学 Ryan Truby 团队开发出低成本、柔软的人工肌肉，可以模仿肌肉提供更安全、灵活的致动解决方案，未来可用于开发廉价、柔软、灵活、安全的机器人¹⁰。

研究人员用热塑性聚氨酯 3D 打印了圆柱形“手性剪切膨胀材料”（HSA），这种材料在受到电机扭矩时会延伸和膨胀。但该材料只能单向延伸和膨胀，因此需要多个电机来模拟肌肉的伸展和收缩。为了解决该问题，研究人员在 HSA 结构中添加了柔软、可伸缩的橡胶波纹管，其性能类似于可变形的旋转轴。当电机提供顺时针或逆时针扭矩时，该致动器可以模拟肌肉实伸展和收缩。

研究人员利用该新型致动器制造了圆柱形蠕虫状软体机器人和人造二头肌。在电机的驱动下，蠕虫状软体机器人可以在狭小的空间中爬行，爬行速度为 32 cm/分钟，二头肌可以轻松举起 500 克的重物 5000 次。单个机器人成本约为 3 美元（不包括电机），显著优于传统刚性致动器数百或数千美元成本。

上述研究工作发表在 *Advanced Intelligent Systems*（文章标题：A Flexible, Architected Soft Robotic Actuator for Motorized Extensional Motion）。

新型有机分子打破磷光效率记录

有机室温磷光（RTP）材料是光电器件的重要组成部分，其性能高低直接关系到显示器、生物成像等设备的应用效果。尽管传统的 RTP 材料由于其优异的光学性能被广泛应用于众多领域，然而这类材料通常基于铱、铂等贵金属配合物，存在高成本、毒性等问题，严重制约了其广泛应用。日本大阪大学 Yosuke Tani 团队合成了一种不含有稀有金属的

¹⁰ Creating artificial ‘muscles’ for safer, softer robots.
<https://news.northwestern.edu/stories/2024/july/artificial-muscles-for-safer-softer-robots/>

新有机分子：噻吩基二酮材料，可实现比传统材料快十倍以上的磷光¹¹。

研究人员通过超快光谱学、单晶 X-射线结构分析和理论计算等方法，对该材料进行了系统的机制分析。数据显示，该材料在各种条件下（包括溶液中）表现出快速且高效的 RTP 量子产率且具有高的色彩纯度。具体来说，在溶液中的 RTP 量子产率（ Φ_p ）达到 38.2%；在空气中的聚合物基质中高达 54%，在晶体固体中可达 50%。有趣的是，该材料的磷光速率常数 k_p 高达约 5000 s^{-1} ，与铂卟啉等重金属磷光材料媲美。该材料展现出了与贵金属配合物相当的 RTP 潜力，有望在 OLED、照明和医疗等领域实现广泛应用。

上述研究工作发表在 *Chemical Science*（文章标题：Fast, efficient, narrowband room-temperature phosphorescence from metal-free 1,2-diketones: rational design and mechanism）。

美实验室研制出最准确光学原子钟

美国国家标准与技术研究院（NIST）与科罗拉多大学博尔德分校联合组成的天体物理联合实验室（JILA）研制出比现有任何时钟都要更准确、更精密的光晶格原子钟，具有重要的应用价值和科学意义¹²。

研究人员首先将铯原子置于超高真空环境中，没有空气或其他气体存在的真空环境有助于保护原子脆弱的量子态。然后，使用被称为“光学晶格”的激光网来捕获并同时测量数以万计的单个原子。拥有如此庞大的原子群在精度方面具有巨大优势。测量的原子越多，时钟就有越多的数据来精确测量秒。与以前的光学晶格钟相比，研究人员使用更浅、更温和的光学晶格激光网来捕获原子，大大减少了光晶格原子钟的两个主要误差来源：激光捕获原子时产生的影响（对应晶格光所引起的斯塔

¹¹ New organic molecule shatters phosphorescence efficiency records and paves way for rare metal-free applications.
https://resou.osaka-u.ac.jp/en/research/2024/20240704_1

¹² World's Most Accurate and Precise Atomic Clock Pushes New Frontiers in Physics.
<https://www.nist.gov/news-events/news/2024/07/worlds-most-accurate-and-precise-atomic-clock-pushes-new-frontiers-physics>

克频移), 以及当原子堆积得太紧时的相互碰撞产生的影响(对应原子间的相互作用), 成功实现了 8×10^{-19} 的系统不确定度。

该新型原子钟不仅可以提高授时、导航和定位精度, 有效探测地下隐藏的矿物。同时由于它突破了计时的极限, 还能够为太空旅行或火星探测提供更精确的导航, 寻找新粒子, 并以前所未有的严格程度检验广义相对论等基础理论。此外, 捕获和控制原子的新技术还可以应用于原子量子计算, 推动量子计算的发展。

上述研究工作发表在 *Physical Review Letters* (文章标题: Clock with 8×10^{-19} systematic uncertainty)。

从电子废弃物中回收稀土金属

瑞士苏黎世联邦理工学院 Victor Mougel 团队受大自然启发, 开发了一种可从旧荧光灯中有效回收稀土金属铕的工艺¹³。

研究小组采用简单的无机试剂就能显著改善分离效果, 只需几个简单的步骤就能获得铕, 而且数量比以前的分离方法至少高出 50 倍。研究人员首次利用四硫代钨配体从复杂混合物中直接分离铕。铕的回收是通过将 Eu(III) 还原为 Eu(II) 配位聚合物来实现的, 这是由四硫代钨配体的诱导内部电子转移驱动的。

这种方法应用于非常规原料, 如废旧节能灯, 可以在分离系数超过 1000 的情况下选择性地回收铕, 回收效率高达 99%, 而无需对废物进行预处理。研究人员还计划将这种分离工艺应用于钹、镱等其他稀土金属。

上述研究工作发表在 *Nature Communications* (文章标题: Recovery of europium from E-waste using redox active tetrathiotungstate ligands)。

¹³ Mining rare earth metals from electronic waste.

<https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2024/07/mining-rare-earth-metals-from-electronic-waste.html>

聚合物特性数据库助力塑料化学回收

聚合物添加剂可分为四类：功能添加剂（包括阻燃剂和增塑剂）、着色剂、填料和增固剂。聚合物添加剂会阻碍聚合物的化学回收，聚合物的物理特性（如分子量和支链密度）也会增加化学回收难度。美国国家可再生能源实验室 Gregg Beckham、Nicholas Rorrer 团队建立了一个聚合物特性数据库，为塑料化学回收研究提供基础支撑。建库过程中发现许多市售聚合物的物理和化学特性与制造商的规格不同¹⁴。

研究人员确定了 59 种市售聚合物的化学和物理特性，并将其数据汇编入在线数据库，包括分子组成、聚合物形态、分子质量分布、热性能、元素组成和添加剂等信息。数据库中的 59 种聚合物约占 2018 年全球聚合物产量的 95%，包括聚烯烃、缩聚聚合物和共聚物。

研究人员利用一系列分析工具对聚合物进行了表征，包括傅立叶变换红外光谱法、凝胶渗透色谱法、差示扫描量热法和电感耦合等离子体质谱法。研究发现，并非所有特性都与报道的一样。例如，有六种聚合物具有双峰分子质量分布，10 种聚合物表现出意想不到的热性能，5 种聚合物的质量分布与供应商的规格不同，有些聚合物还含有二氧化钛和锑等添加剂。该数据库研究有望助力聚合物回收利用。

上述研究工作发表在 *Green Chemistry*（文章标题：Characterization of polymer properties and identification of additives in commercially available research plastics）。

¹⁴ Plastic recycling studies need reliable polymer data. This database is ready to inform them.
<https://www.chemistryworld.com/news/plastic-recycling-studies-need-reliable-polymer-data-this-database-is-ready-to-inform-them/4019769.article>

超强铝合金快速成型制造

轻质高强铝合金被广泛应用于航空航天、汽车制造等各个行业，但却不能用于快速成型制造。美国普渡大学 Xinghang Zhang 团队开发了一种专利工艺，可以制造出具有高塑性变形能力的超高强度铝合金¹⁵。

研究人员使用包括钴、铁、镍和钛在内的几种过渡金属生产了金属间强化的增材制造铝合金。这些金属间化合物的晶体结构对称性较低，在室温下比较脆，但新工艺能将过渡金属元素形成纳米级的金属间薄层，并聚集成细小的簇。纳米层状的金属簇可以在很大程度上抑制金属间化合物的脆性。非均相微结构包含坚硬的纳米级金属间化合物和粗晶铝基体，可产生显著的背应力，从而提高金属材料的加工硬化能力。使用激光进行增材制造可以实现快速熔化和淬火，从而引入纳米级金属间化合物及其纳米层状结构。

研究团队对制造的铝合金进行了宏观压缩试验、微柱压缩试验和变形后分析。在宏观试验中，合金显示出突出的塑性变形能力和高强度（超过 900 MPa）。微柱测试显示所有区域都有明显的背应力，某些区域的流动应力超过 1000 MPa。变形后分析表明，除了铝合金基体中丰富的位错活动外，单斜 Al_9Co_2 型脆性金属间化合物中还形成了复杂的位错结构和堆积断层。

上述研究工作发表在 *Nature Communications*（文章标题：Purdue researchers fabricate ultrastrong aluminum alloys for additive manufacturing）。

¹⁵ Purdue researchers fabricate ultrastrong aluminum alloys for additive manufacturing.
<https://www.purdue.edu/newsroom/releases/2024/Q3/purdue-researchers-fabricate-ultrastrong-aluminum-alloys-for-additive-manufacturing.html>

功能型光刻胶实现特大规模集成度有机芯片制造

当前，集成电路芯片主要采用单晶硅制造。与硅材料相比，有机半导体材料具有本征柔性、生物相容性、成本低廉等优势，在可穿戴电子设备、生物电子器件等领域具有重要应用前景。然而，基于有机半导体制造的有机芯片在集成度方面远远落后于硅基芯片。

复旦大学魏大程团队设计了一种功能型光刻胶，利用光刻技术在全画幅尺寸芯片上集成了 2700 万个有机晶体管，并实现互连，集成度达到特大规模集成度（ultra-large-scale integration, ULSI）水平¹⁶。

研究团队在光刻胶材料中负载了具有光伏效应的核壳结构纳米粒子。光照下，纳米光伏粒子产生光生载流子，电子被内核捕获，产生原位光栅调控，大幅提升了器件的响应度。光刻制造的有机晶体管互连阵列包含 4500×6000 个像素，集成密度达到 3.1×10^6 单元/ cm^2 ，即在全画幅尺寸芯片上集成了 2700 万个器件，达到特大规模集成度，光响应度达到 6.8×10^6 A/W，高密度阵列可以转移到柔性衬底上，实现了仿生视网膜应用。

上述研究工作发表在 *Nature Nanotechnology*（文章标题：Photovoltaic nanocells for high-performance large-scale-integrated organic phototransistors）。

¹⁶ 复旦大学魏大程团队研发功能型光刻胶，实现特大规模集成度有机芯片制造。
<https://news.fudan.edu.cn/2024/0708/c1247a141628/page.htm>