




2018 年度国外国防 先进材料重大进展

中国航空工业发展研究中心



2018 年度国外国防先进材料 重大进展

2018 年 12 月 · 北京



前言

材料是武器装备的物质基础。提高国防材料技术的自主保障和创新能力已成为我国新时期提高装备国产化率破在眉睫的任务。

2018 年国外国防材料技术继续保持日新月异的发展势头，充分展现了复合化、微纳化、可设计化的发展趋势，不断向高性能、高可靠性、长寿命、低成本的发展目标迈进。为及时准确了解和把握国外国防材料领域的科技战略计划情况和最新技术进展，我们组织相关力量，聚焦复合材料、金属结构材料、特种功能材料、电子信息功能材料、基础材料等五个材料技术领域，经过系统对比分析和专家评审，遴选出 2018 年度 4 项产业发展动向和 34 项材料技术进展，形成《2018 年度国外国防先进材料重大进展》报告，供国防材料管理部门和科研生产一线人员参考。

Contents

目 录

一、国外国防先进材料年度发展综述

国外国防先进材料年度发展综述.....	3
---------------------	---

二、国外国防先进材料产业发展动向

1. 欧盟公布未来和新兴技术项目资助方向.....	17
2. 美高端智库提出加强超材料制造竞争力的建议.....	20
3. 美高端智库发布高熵合金制造分析报告.....	29
4. DAPRA 寻求高超飞机超热前缘材料系统设计方案	43

三、国外国防先进材料技术进展

（一）先进复合材料

1. 日本新型固化工艺开启低成本复合材料时代.....	51
2. 美公司联合推出新型复合材料智能固化装置.....	53
3. 美大学聚合物固化新技术可降低十个数量级能耗.....	55
4. 美空军研究实验室推动树脂基复合材料增材制造.....	58
5. 英国研发出全球首架石墨烯蒙皮无人机.....	60
6. 美海军为驱逐舰发动机装备复合材料罩壳.....	62

（二）高性能金属材料

1. 俄航空发动机高温合金粉末涡轮盘迈入第四代.....	65
------------------------------	----

2. 瑞典开发出一种制备抗腐蚀高温合金的新技术..... 67
3. 计算材料技术加快金属玻璃材料的发现速度..... 69
4. 美艾姆斯实验室实现高熵合金元素成分预测..... 71
6. 俄开发出可使 3D 打印铝合金强度提升 1 倍的方法..... 75

(三) 特种功能材料

1. 俄罗斯核反应堆燃料元件包壳材料取得突破..... 79
2. 日本开发新型聚变堆包层材料..... 81
3. 欧洲高超声速飞行器用高温材料迈向 3000 83
4. 美国黑硅超材料可实现近乎完美的红外隐身..... 85
5. 英开发出用于飞机驾驶舱窗户的革命性疏水涂层..... 88
6. NASA 使用 3D 编制材料开发新的热防护系统..... 90
7. 美杜克大学开发可控制声波的超材料装置..... 93
8. NASA 研发出新型微纳卫星辐射防护材料结构..... 95
9. 英合成全球首个液晶拉胀材料有望用于防弹衣..... 97

(四) 电子信息材料

1. 液态电池为飞机提供更安全清洁和安静的推进动力..... 101
2. 新型二维超薄超晶格材料革新传统超晶格构造概念..... 103
3. 原子级二维镓大幅提高半导体器件效率..... 105
4. 英与美空军研究实验室签署氮化镓技术转化协议..... 107
5. 美橡树岭国家实验室制备出大型单晶石墨烯..... 109
6. 日本掌握高质量薄膜单晶硅低成本技术..... 111

7. 日本发明整合硅芯片的高速石墨烯基黑体光发射器..... 113
8. 拓扑绝缘材料可以提高计算机处理和存储的效率..... 115
9. 美研制将中红外光转换为电信号的石墨烯器件..... 117
10. 比利时首次在 300 毫米晶圆上直接生长二维材料..... 119

（五）基础材料

1. 东丽高强高模 MX 系列碳纤维强度提升 30%..... 123
2. 德国大丝束碳纤维性能达航空航天级..... 125
3. 瑞典开发世界上最强生物纤维优于钢铁和蜘蛛丝..... 127

国外国防先进材料 年度发展综述

国外国防先进材料年度发展综述

材料是国防现代化的重要支柱。进入新世纪以来，质疑、挑战、颠覆、引领成为新材料领域发展的核心词。2018年，发达国家军工材料技术进展迅速，研发模式更新显著。主要表现为规划制定、前沿材料探索、传统材料挖潜以及研发模式更新等全方位的进步。

一、制定顶层规划，统筹安排新材料创新活动

2018年，发达国家一如既往地出台顶层战略规划，以根据发展环境的变化，调整乃至引领新材料创新方向，主要包括如下四个方面。

一是七类材料。3月，美国矿物、金属与材料协会（TMS）发布题为《利用材料创新支持下一代制造技术》的研究报告。报告凝聚了40余位专家的智慧，遴选出七大支持下一代制造技术的机遇领域及其相关支撑技术。它们是：无损评估及传感器分析、不同材料的连接、机器学习加速材料发现和设计、新材料及工艺的认证、下一代导电材料、用于智能制造和数字

线程技术的材料以及智能材料等七大类。该报告的出台，全面描画了目前及未来新材料创新的各领域，既是国防材料发展的基础，其尖端成果亦会首先应用于国防。

二是超材料。4月，美国“制造业前瞻联盟”（MForesight）发布《超材料制造——通向工业竞争力之路》，认为超材料2025年前将形成超过数十亿美元的市场，为美国创新和经济增长提供大量机遇，政府应采取各种措施推动超材料制造的研发及推广；在欧委会发布的《纳米结构超材料》报告中建议：针对专家观点总结的超材料制造优先技术领域设立统一协调的全国超材料制造研究计划；降低企业使用联邦研究设施和专家资源的门槛；加强联邦政府对关键原料的支持；建立跨学科专家咨询小组；打造国家超材料制造卓越中心。

三是高熵合金。9月，美国“制造业前瞻联盟”与密歇根大学联合发布了《高熵合金制造：通向工业竞争力之路》报告。这是继4月“超材料制造”主题之后，该联盟发布的第二份“通向工业竞争力之路”

系列报告。此次报告探讨了美国在高熵合金领域面临的挑战和机遇，并提出了实现高熵合金预期前景的可行性发展建议，希望增强美国在高熵合金制造领域的竞争优势，确保技术领先。

四是超高温材料。12月，为应对高超声速飞行器前缘部位耐热问题，DARPA 公布了其高超声速飞行器材料系统和表征（MACH）项目。该计划将包括两个技术领域：第一个领域旨在开发并加快完全集成的被动热管理系统的成熟，通过可扩展的近净制造和先进的热设计来冷却前缘；第二个技术领域将专注于下一代高超声速材料研究，应用现代高保真计算能力，为未来高超声速飞行器的前缘冷却应用开发新的被动和主动热管理概念、涂层和材料。该计划寻求热工程和设计、先进计算材料开发、材料体系设计、制备和测试（包括高温金属、陶瓷及其复合材料的近净制造）、高超声速前缘设计和性能以及先进的热防护系统方面的专业知识。

二、积极开展探索研究，抢占前沿技术制高点
在前沿技术领域，发达国家仍不遗余力地坚持

探索，以期寻找突破性进展。2018 年主要技术进展表现在如下三个方面。

一是超材料领域持续出新，声学超材料进展显著。本年度最引人瞩目的进展集中于声学超材料，美国杜克大学采用 3D 打印制造出一种纤薄的工程材料，可控制声波使其重定向和反射，可以将直线传播的 300 赫兹声波，重新定向以 60 度入射角传播，效率约为 96%，远高于此前类似设备的 60%。此外，比较重要的进展还有美加州大学首次利用量子力学原理，创造了一种系统设计力学超材料的方法，其核心是其中的微小粒子和微小粒子之间的连结，共同构成功学超材料的结构单元，为超材料技术更进一步发展带来无限可能；马萨诸塞大学发明一种新的超材料，可通过“调谐”来改变光的颜色。通过将电信号转换成光脉冲，片上光通信将取代传统硅芯片的铜线通信，使并行计算速度大大提升；哈佛大学开发出一种“宽带消色差超透镜”超材料，是世界上首个几乎覆盖整个可见光光谱的单体超透镜，可望应用于可见光隐身。

二是新型量子材料问世，量子材料具备独特性

能。首先，以色列理工学院两个研究团队首次提出了一个新的研究领域：量子超材料。到目前为止，超材料的实验一直局限于使用经典光操作，现在该研究团队首次表明，使用超材料作为量子光学和量子信息的构建模块在实验上是可行的，使用超材料可产生和操纵纠缠。该研究成果引出了新的研究方向，例如在芯片上制造量子信息系统并在设计时控制量子特性。将有可能应用于量子信息和计算领域，例如开发不可破解的加密等；其次，美国莱斯大学和奥地利维也纳科技大学组成的联合研究团队创造出一种名为“外尔-近藤半金属”的量子材料，具有拓扑绝缘体、重费密子金属和高温超导体等各种不同材料的特性。这些奇特的行为只有在非常低的温度下才会出现。在这些材料中，电子似乎比正常情况下的质量要高出数百倍，同样不寻常的是，有效电子质量似乎随着温度变化而剧烈变化；最后，美国佛罗里达大学开发出一种 $\text{Hf}_2\text{Te}_2\text{P}$ 量子材料，是具有多种量子性能的首个材料。这意味着在电子结构中存在不止一种电子模式，赋予其一系列电子特征，有望成为开发量子计算机和长效

存储器件技术的基础，以提升计算功率，降低能耗。

三是二维材料研究向纵深发展，双层石墨烯超导性引人注目。首先，美国和日本研究人员报告，他们发现两层相对扭曲的石墨烯具有超导性，类似于高温超导体的超导性。由此扭曲的石墨烯可作为研究超导性的代表性体系。该成果引起了一系列理论研究，研究人员试图解释这一非常规现象。其中，有一个猜想是扭曲石墨烯的超导性可能也具量子计算机所需要的拓扑性；其次，新型二维超晶格材料改变传统光电超晶格构造。2018年3月美加州大学洛杉矶分校开发了一种采用“电化学插层”法制备的，由超薄二维薄片交替组成，厚度仅有一个或几个原子厚的新型人造“超晶格”。与常规方法相比，新法很容易产生数十至数千个交替层的超晶格，有助于制造低耗能、快速的晶体管或高效发光器件；第三，原子级稼显著提高半导体器件效率。2018年3月，美国莱斯大学等用热替代力，制备出原子级别二维稼。特殊的稼单原子层基底组合具有不同的电子特性，并且这些特性可被应用于不同的半导体器件。这种制备方法也适用于

其他低熔点金属和化合物。

发达国家企业已意识到上述新型电子功能材料的潜力，并开展相关研发，如微软已在站点 Q 投资，后者是专门研究拓扑量子计算领域的实验室，谷歌已与量子 AI 实验室合作研究，量子计算和人工智能如何融合。一旦量子现象被很好地理解并被工程化，新技术有望改变世界。

除此之外，在智能材料领域，开发出世界首个合成拉胀材料，有望用于防弹衣等领域；采用高熵合金制备的高温形状记忆合金，可在 500℃、甚至 700℃ 以上环境下工作，为航空发动机应用提供了可能；利用 3D 打印制造的空心管，管内填充有磁流变流体，当暴露在磁场中时可立即变硬，潜在用途包括柔性机器人和智能装甲等。在仿生材料领域，开发出分子结构与蛛丝完全相同、利用仿生学技术的高性能复合材料纤维生物钢[®] (Biosteel[®]) 纤维。与碳纤维材料相比，提供了更加优越的弹性，可在不降低强度的前提下，满足未来飞机的结构设计和制造要求。

三、聚焦重点领域，进一步挖掘传统材料潜力

在传统材料潜力挖掘方面，主要表现在碳纤维出现新品种，通过 3D 打印制备技术，一些传统金属材料性能不断改进。特种功能材料也取得重要突破，主要表现为如下四个方面。

一是高性能复合材料快速发展，碳纤维出现新品种。日本东丽公司报道其开发出新型的 TORAYCA[®] MX 系列碳纤维，同时具有高拉伸强度和拉伸模量。这种碳纤维将开辟其新的产品系列。该公司将利用这种 MX 系列碳纤维制造预浸料（高性能树脂浸渍织物），促进其在多个领域的应用。碳纤维的高拉伸强度与高拉伸模量不可兼得，市场应用强烈要求在碳纤维中同时实现更高的拉伸强度和拉伸模量，此前东丽公司推出的高拉伸模量碳纤维 TORAYCA[®] MJ 系列，已被用于需要高拉伸模量的应用。T1100G 纤维，具有世界上最高的抗拉强度。在新推出的 TORAYCA[®] MX 系列中，东丽公司通过严格控制纳米级石墨晶体结构，进一步将碳纤维强度和拉伸模量并行提高到最大限度。成功将首个 TORAYCA[®] MX 系

列碳纤维 M40X 的抗拉强度提高了约 30%，同时保持了与传统碳纤维相当的拉伸模量。预计将在高模碳纤维领域应用潜力巨大。

二是粉末高温合金技术创新，俄罗斯第四代粉末盘开展评估。近年，全俄轻金属研究院新的 VVP 系列粉末高温合金研究工作活跃。2018 年 4 月，该院展出了未来航空发动机和舰船燃气涡轮发动机用高温合金涡轮盘和轴的毛坯。当前工作集中在：VV751P 820 持久强度评估，拟用于 PD-14；VV752P 研发，计划用于直升机发动机；采用 VVP 系列合金，如 VV753P 制造双金属盘，并开展验证。

三是金属材料持续改进，3D 打印成为性能提升重要途径。近年金属材料的 3D 打印在提高材料性能方面的例子不胜枚举，2018 年更是大量出现。例如，莫斯科国立科技大学通过利用经过燃烧获得的氮化物和氧化铝的 3D 打印的新改性前驱体以显著提高铝的强度，可将原有的强度提升一倍，有望代替钛合金。此外，由 3D 打印的 Inconel625 高温合金有望代替铸件在航空发动机上获得应用。

除 3D 打印提升材料性能外，其他金属材料也在持续改进。例如，核反应堆燃料元件包壳和包层材料也取得了技术突破。前者用同位素改性钼代替锆合金，可大幅提高核电站安全性，后者开发出高纯度钒合金，显著改善了其延展性。

四是特种功能材料获得长足进步，黑硅用于红外隐身材料。继各种红外隐身材料相继发现的基础上，2018 年，美国威斯康星大学麦迪逊分校首次发现黑硅具有吸收红外线的潜力，开发出一种由其制成的新型红外隐身薄片，其厚度不到 1 毫米，但可吸收约 94% 的红外光。相比其他屏蔽技术有着显著改进，在各类装备的低可探测方面展示出巨大潜力。

四、全面夯实支撑技术，研发模式大幅改进

近年来，先进的材料设计、检测评价技术在人工智能技术发展热潮的引领下，正处于高速发展阶段，带来了研发模式的根本变化。2018 年，该领域进展迅速，主要表现在如下两个方面。

一是建模仿真技术高速发展，材料成分和性能预测成为可能。美国艾姆斯实验室开发出一种分析方

法，可以帮助在高熵合金开发中预测尚未制成的高性能合金的成分和性能。采用该法，可缩小组分材料系统的设计空间，并围绕最有前景的材料区域开展研究；美麻省理工学院开发出可自动设计材料结构的新系统。传统的材料科学需要先找到具有理想特性的生物材料，再对其进行逆向工程来确定材料的微观结构，研究人员尝试利用计算机直接产生具有特定特性的材料结构；2018年4月，美国西北大学等利用机器学习算法在更短时间和更低成本下发现和改进金属玻璃的新途径。

二是新的检测技术不断进步，可实现新材料在线检测。材料在极端环境的检测技术和设备是重要发展方向。美国北卡罗来纳州立大学研发出一种新的显微镜技术，可在极端高温环境下实时跟踪材料的微观组织变化，可研究用于核反应堆中的合金。

五、总结

通过对2018年国外先进材料技术和研发模式进步的盘点，可看出以下趋势：首先，在新材料领域，电子功能材料的重要作用日益显著，本年度新型超材

料、量子材料以及二维材料的大量涌现，代表了未来新材料发展的方向，对装备制造影响意义重大。其次，学科交叉点成为创新的土壤，材料技术与信息技术、纳米技术、生物技术、自组装技术等新技术的交叉融合孕育着新材料的产生，今年出现的超材料与量子材料、智能材料与高熵合金的交叉融合即为最好例证；在研发手段方面，在近年人工智能技术的引领下，材料的设计、制备与检测评价发生了颠覆性变化，有力地支撑了新材料发展；最后，在管理层面，设立统一协调的研究计划、降低研究设施和专家资源的门槛、打造材料制造卓越中心、企业积极投资前沿技术领域等，对于促进先进材料的发展具有重要借鉴意义。

国外国防先进材料 产业发展动向

1. 欧盟公布未来和新兴技术项目资助方向

欧盟“地平线 2020”未来与新兴技术创新启动计划在第二轮中新批准 19 个创新项目，使得在 2016~2017 年工作计划下项目数量达到 35 个，资助金额达到 350 万欧元。从 2018 年到 2020 年，未来和新兴技术创新启动项目将成为欧洲创新理事会试点计划的一部分。在此期间，欧盟还将投资 820 万欧元资助 82 个优秀的颠覆性技术项目。

另外，未来与新兴技术开放研究与创新行动计划新批准了 27 个新项目，使得该项目在 2016~2017 年工作计划下项目数量达到 123 个，资助总金额达到 4 亿欧元。从 2018 年到 2020 年，该项目也将成为欧洲创新理事会试点计划的一部分，欧盟还将投资 6.5 亿欧元资助约 200 个优秀的颠覆性技术项目。以下重点列举新批准的材料和制造领域的研究项目：

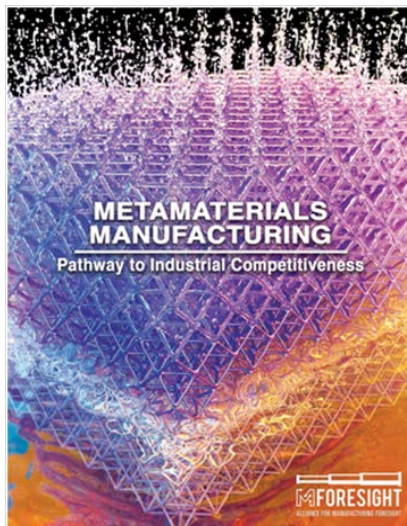
项目名称	研究内容或方向	协调机构
DeLight	超高分辨率激光打印技术将实现大规模定制，应用领域包括眼科镜头、先进光学过滤器和物联网光学传感器等。	丹麦技术大学

E-SPECTR	发展面向全球市场战略目标的传感器设备，实施光谱传感器原型项目。	德国 Cybertronica
GFAB	推出新的石墨烯电子设备工厂业务，将石墨烯电子设备制造工业化，重点关注石墨烯场效应晶体管。	希腊赫拉斯研究和技术基金会
NanoMAGIQ	为半导体行业提供分析工具用于设计测试和故障分析，帮助研究人员探索新材料和生命科学。	瑞士 Qnami
SMARCOS	为新物理人机交互带来智能、安全、低重量、能源高效和模块化的致动器。	比利时布鲁塞尔自由大学
BioWings	将智能驱动材料集成到生物相容性微机电系统中，使诊断、预后和治疗功能设备小型化。	丹麦 Tekniske 大学
CHIRON	引入颠覆性技术限制电子器件的电力消耗，优化每个电路区域的性能。	比利时国际航空微型电子中心
EVO-NANO	建立综合的跨学科平台，对纳米颗粒的药物输送系统进行人工进化和评估。为新的癌症治疗创造一个全新的纳米颗粒设计平台，能够自主地发展创新性和适应性的解决方案。	塞尔维亚
HyPhOE	开发基于光合生物和智能材料与设备的先进生物混合系统。	瑞典林雪平大学
LEAF-2D	开发基于激光传输技术的新型纳米制造技术，将能够快速、完整地传输和设计光电、光子和有机电子设备的二维堆叠和异质结构。	希腊雅典国家技术大学

MAGNIFY	设计并实现机器人系统的新一代人工肌肉，具有高强度重量比、高灵活性、快速反应特性和内在刚性调节等性能。	荷兰格罗宁根大学
SPRINT	开发室温和压力条件下多基质非晶态和调谐晶体的通用沉积技术。	法国国家科学技术中心

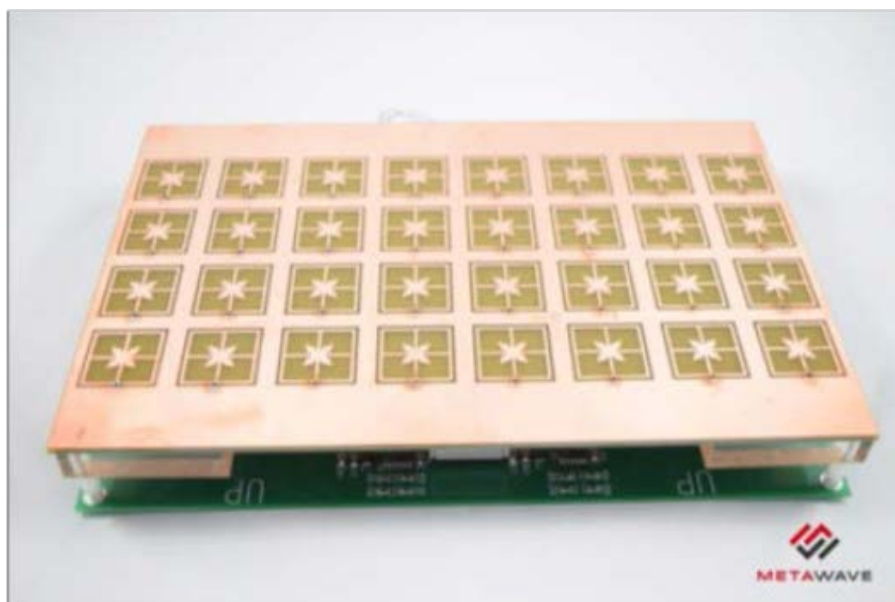
2. 美高端智库提出加强超材料制造竞争力的建议

美国“制造业前沿联盟”是美国国家标准与技术研究院（NIST）会同国家科学基金会（NSF）牵头组建的制造领域高端智库，针对特定的新兴技术面向政府提交关于开发、应用和经济影响等技术路线图及报告。2018年4月17日，美国“制造业前沿联盟”发布《超材料制造——通向工业竞争力之路》，认为超材料2025年前将形成超过数十亿美元的市场，为美国创新和经济增长提供大量机遇，美国政府应采取各种措施推动超材料制造的研发及推广。

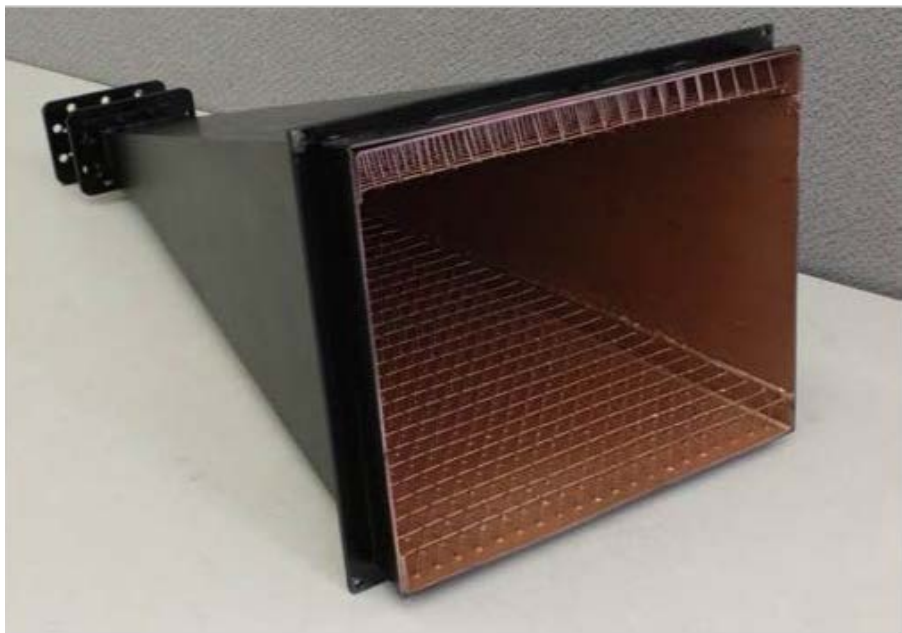


欧委会发布的《纳米结构超材料》报告

在欧委会发布的《纳米结构超材料》报告中，将超材料定义为“将人造微观单元结构以特定方式排列，形成的具有特殊电磁特征的人工合成材料”。特殊性质来自材料的特殊微观结构而非材料本身。超材料包括光学超材料、声学超材料、力学超材料、热学超材料、声子晶体等类型，可广泛应用于微型天线及无线互联、光电磁隐身、医学完美成像、国防民用各种交通工具的智能蒙皮、其他精密仪器制备和片上实验室等领域，对未来国防及民生经济具有深远的影响。



可以改变天线声波频率的超材料



安装有电磁超材料的天线

报告建议： 针对专家观点总结的超材料制造优先技术领域设立统一协调的全国超材料制造研究计划； 降低企业使用联邦研究设施和专家资源的门槛； 加强联邦政府对关键原料的支持； 建立跨学科专家咨询小组； 打造国家超材料制造卓越中心。

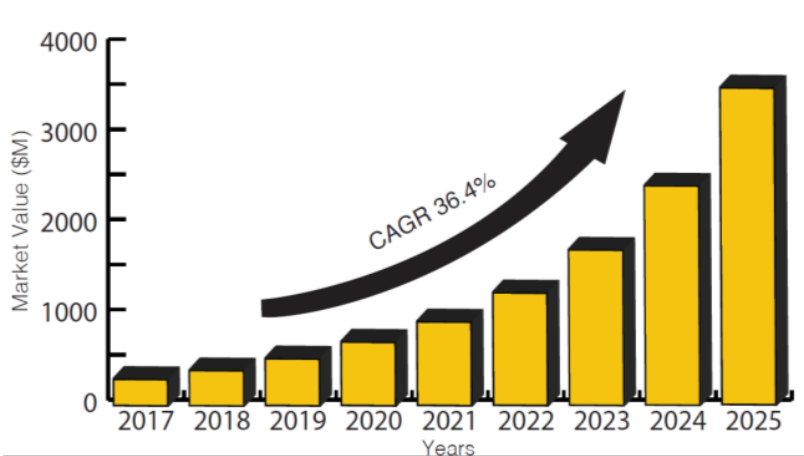
一、设立全国超材料制造研究计划

联邦机构协调一致的超材料制造研究计划应侧重于竞争前期研究课题，以解决超材料制造的关键障碍。具体优先技术见下表。

领域		优先技术
规模化制造技术	纳米压印光刻	热和紫外线辅助纳米压印光刻
		特征刻蚀掩膜
		金属化纳米压印光刻图案化表面
		新型纳米压印光刻兼容材料套件
	图案转移	图层对齐方法
		残余应变补偿和缓解
	增材制造	多喷嘴阵列
		光聚合材料自蔓延波导结构
		大规模平行 3D 打印
	自组装技术	不受物理尺寸影响的自下而上工艺
		导向装配工具
		自组装过程模型和有序模型
		新型自下而上工艺方法
	周期性结构高通量制造方法	步进技术
		快速、实时传感和调整技术
		自对准技术
将重复与变化相结合的方法		
利用多种不同材料制造超材料		高效材料制造工艺
		新型材料工艺
		材料连接技术
		通过分子设计或新合金开发识别新材料
测量		先进的多尺度计量方法
		多材料结构的评估方法
设计及仿真		多尺度仿真能力
		周期性设计和仿真代码
		工艺技术模型
		为可制造性设计的代码
		多重物理量计算代码
		有效的逆设计方法（自上而下）

二、降低企业使用联邦研究设施和专家资源的门槛

超材料制造领域的许多先行者通常是在有限的研发资源条件下运营，中小企业往往无法获取最先进的制造设备、价格高昂的表征工具以及需要超强计算能力驱动的复杂建模和模拟能力。



2017-2025 年超材料全球市场市值

例如一家致力于开发新型电磁超材料的小型创业公司可能不具备验证其产品所需的复杂且昂贵的表征工具。他们也可能缺乏计算能力和专业知识来更新他们的产品。而联邦政府资助的研发机构拥有这些研发资源，降低这些资源的使用门槛将有助于推动超材料走向商业应用。报告建议联邦政府采取以下行动：

鼓励联邦研究机构解决超材料制造挑战；推出新的联邦超材料制造计划的同时扩展联邦现有相关计划，推动行业研究人员及其需求与联邦政府专家及关键的国家资源（如高端设备和高性能计算机）的对接。

三、加强联邦政府对关键原料的支持

超材料的制造需要可靠且价格合理的高质量纳米材料和衬底供应。尽管纳米材料商业化正慢慢铺开，但其质量远远低于制造超材料所需的规格。用于超材料生产的纳米材料必须具有最高纯度，具有一致的组成、形态和表面特征。目前实验室用于制造超材料的纳米材料原料是以毫克数量为单位生产的，纳米材料原料生产扩大到千克（或更高）单位时，质量可能会大幅度下降。

大多数超材料制造方法采用衬底。衬底的平面性、均匀性和表面质量对于制造工艺的精度和最终成功至关重要。保持对最高表面质量的精确控制是至关重要的，因为缺陷会直接导致位错、缺陷、不良粘附以及一般无法控制后续超材料结构的制造。硅、砷化镓和磷化铟因为有稳定的军事和消费电子产品需求支撑因而技术发展较为成熟，非传统衬底材料如蓝宝石

和氧化锌却没有得到同样的关注，质量和尺寸一直无法达到实用需求。

此外，如果不能获得必要纯度和质量的原料，研究人员就无法创建功能原型，验证中试规模试验，并最终推动对原料的大规模需求。缺乏大量的需求反过来又会阻碍供应商（尤其是美国供应商）的投资，从而影响超材料大规模商业应用。最终导致对超材料至关重要的纳米材料和基底不可能大规模使用，而仅能作为昂贵的定制批量生产。

报告指出优先发展的纳米技术（包括新型低损耗等离子体材料、纳米冷粘合、对环境不敏感的纳米材料、用于有源和可重构超材料结构的材料等）和衬底技术（包括纳米选择性外延生长和掺杂图案化、图案功能化表面、将传统工艺扩展到非传统衬底材料、曲面衬底等）。

为了实现超材料制造技术的实用化，需要通过一系列行动来提供和支持关键的纳米材料和衬底开发：统一协调联邦政府的资助活动，以规模化生产对美国超材料至关重要的原料；将对超材料制造至关重要的原材料开发纳入到现有的联邦纳米制造研发

工作中，并扩展相关的表征工具、标准和认证；资助研究开发和处理新型纳米材料和衬底，以提高超材料的可制造性和功能性。

四、建立跨学科专家咨询小组

展望未来，需要建立一个跨学科专家咨询小组以监测美国超材料制造的发展进程，并就不断变化的机遇和挑战提供最新建议。该小组应包括来自工业界、学术界、联邦实验室和政府机构的成员。他们应该代表化学、物理、材料科学研究人员和工程领域的设备供应商、制造商、最终用户、项目经理等。

美国超材料制造面临的障碍之一是缺乏专业化和协调的技术发展战略。建议由专家咨询小组牵头制定超材料制造技术研究和重点的路线图，并跟踪克服技术障碍的进展情况，确保超材料制造技术突破主要由美国企业实现。该任务应包括：明确规模化生产最有前途的工艺技术；将新兴制造技术解决方案与美国国家优先目标应用领域（如国防、能源和健康）进行对接；制定长期战略，协调资源、加速创新；收集并及时提供关于超材料技术和制造路线图的进展情报。

专家组还应就可能阻碍或加速研发进展的知识产权分类等问题提供政策指导。尽管美国专利商标局在新技术分类和相关技术识别方面具有相当丰富的经验，但超材料存在独特的困难。目前美国专利商标局没有将超材料进行单独分类，而是将新的基于超材料或超材料的发明划入物理学、电磁学、声学 and 力学类别，因而给未来的专利纠纷埋下了隐患。跨学科咨询小组应召开研讨会，研究如何针对超材料进行科学分类，使得美国专利商标局能够更好地了解这一新兴技术。

五、打造国家超材料制造卓越中心

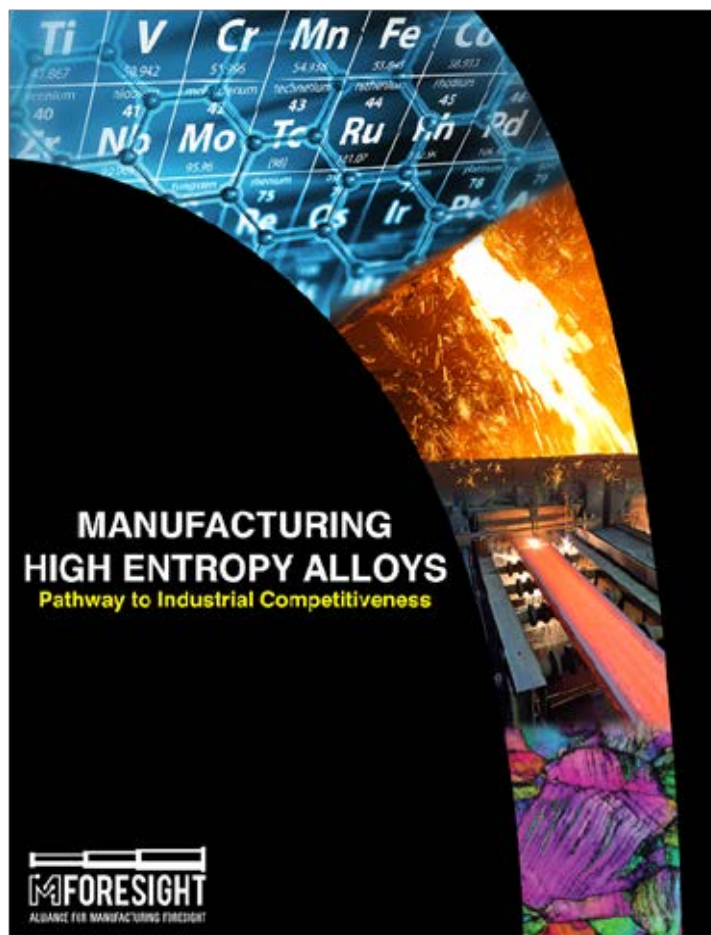
超材料制造卓越中心将通过公私合作伙伴关系协调全美超材料制造研发及应用活动，以保证美国技术领先地位，并提高美国制造业在超材料制造领域的竞争力。该中心将通过以下行动支持国家的努力：协调行业参与和需求；支持并加速合作研究；提供共享的制造设备和计算资源；为竞争前期技术发展共享知识产权；创建和促进劳动力培训计划。

3. 美高端智库发布高熵合金制造分析报告

2018年9月，美国“制造业前瞻联盟”与密歇根大学联合发布了《高熵合金制造：通向工业竞争力之路》报告。这是继4月“超材料制造”主题之后，该联盟发布的第二份“通向工业竞争力之路”系列报告。

高熵合金是由多种比例大致相等的金属形成的合金，具有许多卓越性能，如抗断裂能力、抗拉强度、抗腐蚀及抗氧化特性等，为定制满足不同应用需求的材料提供了变革机会，将“应用已有材料”范式转移到“按需设计材料”。高熵合金将凭借卓越的材料性能，使其高性能制品在国际市场上具有竞争力。高熵合金还可为制造商提供新的选择，以生产稀有的、危险的、昂贵的、或受国际限制或具有利益冲突影响的材料的替代品。高熵合金在多个不同领域都具有潜在优势，不仅可加速经济增长及提升美国国内竞争优势，而且还将有助于应对紧迫的社会挑战。高熵合金主要应用领域包括固态冷却、液化天然气处理、抗降解核

材料、耐腐蚀热交换器、高温能源效率的提升、高性能航空航天材料、超硬弹道、坚固耐腐蚀的医疗设备和磁共振成像技术等。



《高熵合金制造：通向工业竞争力之路》报告

一、美国高熵合金制造业发展面临的八个挑战
制造商和高熵合金专家认为美国在高熵合金制

造流程、测试、数据以及必要的知识、工具和资源获取方面遇到了一些挑战。主要表现为以下 8 个方面：

(1) 工艺限制：从温度到杂质再到氧化，高熵合金需要面临独特的制造工艺挑战，而传统工艺如铸造、热机械加工、连接和增材制造还没有克服这些挑战。

(2) 合金识别：为了快速经济地制造出满足需求的合金，研究人员需要用于合金识别、建模和设计的相关工具。但是目前的工具缺乏准确性、速度和可靠性。

(3) 杂质：目前的制造方法不能生产具有所需纯度的高熵合金。

(4) 原料和原材料：元素、纳米颗粒和母合金的质量不高，或者对于研发人员和制造商来说开发和量产高熵合金的制造成本太高。

(5) 高通量实验表征：合金的实验表征从发现到开发再到放大是至关重要的。现有的实验设备要么不足，要么难以让研究人员对高熵合金进行表征。

(6) 建模和仿真数据：从理解微观结构到优化制造过程，数据对于建模和模拟高熵合金是必不可少

的。但目前数据尚未集中，数据之间不一致且不能随时可用。

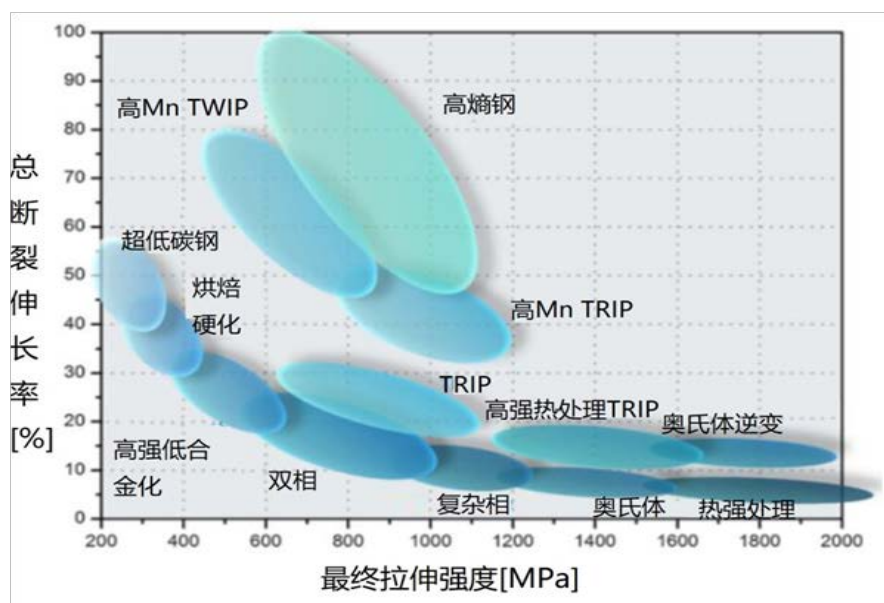
(7) 中级规模示范：虽然高熵合金制造界在生产小型合金样品方面取得了进展，但是制造工艺规模化所需的设备却非常缺乏。

(8) 与行业保持一致：高熵合金制造业界之间缺乏合作，使得高熵合金制造研究与行业需求很难保持一致。资源、工具和数据不能在整个业界中实现很好地共享和使用。

二、提出的四项可行性建议及相关注意事项

为确保美国高熵合金领域的科学发现带来新的经济机会和技术优势，需要进行战略投资和协调。本报告为提高美国制造业在高熵合金中的竞争力提出了4条可行的建议。

(1) 通过投资推动高熵合金制造关键技术的转化研究。主要包括合金识别、熔化、铸造、热机械加工与连接、基于粉末线材和涂料的制造、建模等。这需要一项多机构联邦研究计划，以集中精力推进最有前途的新兴制造技术，并解决商业化生产和使用之间的障碍。



高熵合金与传统钢铁相比具有更强的极限抗拉强度和断裂总伸长率

合金识别：需要更好的工具来探索高熵合金的广泛设计空间，以识别具有所需特性的可制造合金。具体的研究主题包括：以多种复杂性和准确性链接多保真模型和实验相关的工具。最优方案是计算密集型模型与快速、低成本的实验相结合，以适度的时间和成本费用提供适度的准确性和确定性，这就需要研究多保真层之间的连接优化方案同时对数据进行集成；简化工具以期发现性能优异的合金，连接和集成原有孤立的建模工具和数据集。在考虑了制造因素的同时实现无缝、快速、有效的基于标准的成分和微观结构

空间探索；研制用于识别可制造的耐火合金的工具，以满足合金独特的性能要求和制造要求。

熔化：高熵合金的复杂化学成分对熔化提出了独特的挑战。具体的研究主题包括：扩展现有熔体工艺的能力，包括熔点高于 1500℃ 的合金技术，间隙合金及具有复杂成分的化学品的处理技术，以及可以提高电磁搅拌均匀性的相关技术；新颖的电磁和定向能量感应，以确保熔融合金具有均匀的化学成分及对不需要的相态进行控制；标准化、更清洁的母合金，可简化熔化过程并减少杂质；分析工具可将熔体加工参数与杂质积累和夹杂物的形成相关联。

铸造：将熔融合金铸造成最终形状或铸锭，以便后续加工。具体研究主题：应扩展热顶铸造方法，以解决高熵合金铸造的独特凝固途径和动力学；应该进行流变铸造，在铸造中使用半固态合金，以实现铸造高熵合金的低孔隙率、低收缩率和良好的机械性能；在大温度范围内需要高精度冷却速率控制方法，以在高熵合金铸造和热处理过程中严格控制凝固路径，以减少孔隙率、偏析等铸造挑战。

热机械加工与连接：合金通常通过热处理和机

械加工进行精炼，以获得所需的合金性能。

存在的不足：尚未全面理解杂质对高熵合金形变的影响；尚未充分研究焊接性和整体性，使其无法为连接技术提供信息；缺乏焊接和连接高熵合金的工艺模型；缺乏高熵合金的热机械加工策略。

具体的研究主题：高温热轧技术和模具材料，包括允许加工高温高熵合金的润滑剂；可增加高熵合金均匀性的热轧方法；用于高熵合金的可快速启动和停止“小型轧机”，可快速测试小批量生产的产品质量；理解从热机械和连接过程中微观结构的变化，包括焊接，轧制和成形对其产生的影响，以克服传统加工和连接方法的局限性。

基于粉末、线材和涂料的制造：除了解决熔铸工艺中的挑战外，还要集中精力研究以下主题：粉末和线材生产工艺的进一步优化，包括新型非雾化粉末制造途径、表面钝化方法和雾化工艺，这些工艺在与高熵合金相关的粉末生产方面表现优异。当前对耐火材料和活性颗粒的相关研究比较缺乏，但该项研究却至关重要；粉末和涂层质量的模型化，包括制造工艺和合金性能之间关系的模拟。研究还应确定适用于

增材制造工艺的合金组合；新颖的添加工艺，包括对传统粉末添加工艺的修改，以及高熵合金的热、冷喷涂、等离子涂层和机械合金化工艺的优化；能有效控制沉积速率和混合剂量的多种元素溅射喷涂技术。

建模：高熵合金的复杂性需要改进现有模型并制定基准模型。具体的研究主题为：与高熵合金相关的制造工艺模型，包括高温下合金的粘度、扩散性、焊接和钎焊对微观结构、能量使用、成本和比例定律的影响。可靠的工艺配方，标准的制造实践和高度的可行性可促进模型向产品过渡；关键高熵合金特性和工艺的模型，包括相体和整体微观结构的稳定性、高温热力学、凝固路径、氧化物形成和 Hall-Petch 强化。应考虑其他结构和制造工艺，扩展现有模型；与制造、微观结构和性能相关的模型，包括动力学和微观结构之间的关系，以及所得微观结构如何改变延展性、断裂、韧性和蠕变等机械性能。缺陷和微观结构演变（例如晶格和相稳定性）之间的关系以及由此产生的对机械性能的影响也需要模型。从制造经济学的角度来看，还需要模型来评估不同的原料杂质水平对合金性能和成本的影响程度；开发和扩展新颖的建模方法，包括

改进 PHase Diagrams 计算方法和工具在高熵合金中的应用，提高准确性，评估不确定性和数据库响应能力。其他重要的新兴建模方法包括密度泛函理论、特殊准随机结构方法、原子势方法、空位扩散率、从头算分子动力学、混合蒙特卡罗 / 分子动力学和相干电位近似。机器学习和深度学习提供了另一条新兴路径，它具有建模高熵合金行为和与各种建模方法集成的巨大潜力；基准模型用于验证其他模型的准确性和范围。

(2) 建立国家测试中心，建立国家测试中心，开发新型高通量测试方法，并进行合金发现和表征的高通量测试。重要的进展将包括自动化的大规模并行机械、环境和功能测试，如纳米压痕、自动化 X 射线表征和并行剪切冲压。该中心将与管理机构合作，制定标准和基准，并通过国家测试合作实验室，建立和协调材料测试能力。

从最初的合金发现到模型开发，再到制造过程的改进和验证，再到零件认证，实验测试渗透到高熵合金制造过程的所有部分。高熵合金拓宽了材料科学的范畴，同时也拓宽了当前可用的机械和功能测试的局限性。高熵合金独特的成分复杂性使得难以使用诸

如层析成像和 X 射线衍射这样的传统工具来评估和表征。目前还没有用于高通量机械测试的实用的、省时且低成本的方法。

实现机械和功能测试还存在一些挑战：

样品制造：高熵合金研究和制造的利益相关者一直在寻求可以消除样品测试不确定性的合适的测试方法；

尺寸规模：实验方法不能提供高通量实验所需的小尺寸测量，特别是拉伸强度和延展性等关键性能领域的测量。机械性能对长度尺度敏感，克服此挑战可以增进对材料性能的全面理解；

复杂性测试：很难测试高温环境中合金的复杂载荷，与环境相互作用等性能；

高通量测试方法：预测相平衡阶段和相图的高通量计算能力正在迅速发展并且已经取得了长足进步，但一些严重的材料缺陷仍然需要高通量实验来评估。由此关键数据的缺失将继续阻碍建模、模拟及合金识别的相关进展。

高通量测试领域发展存在的不足之处为：缺乏可同时测量合金强度和延展性、蠕变、疲劳、断裂韧性、

弹性模量和平行韧性转变温度 (DBTT) 的测量方法；还需进一步研究径向分布函数 (RDF) 的有序性和合金结构，以及中等规模合金的同质性测试，优化材料的化学和微观结构；了解合金对高温、快速氧化测试及对辐射的响应能力；改进对合金的热，电，磁和磁热等性能的测量方法。

标准化：测试和结果数据不一致，缺乏共同的分类法和不同利益相关者之间通用的语言。此外，缺乏关于这些复杂合金的化学验证的可靠标准。

需要注意 9 个领域的发展：薄膜的高通量测量与块体材料特性的相关性；低温测试与高温测试的相关性，以此实现性能提升的同时降低成本；与实现批量生产性能相关的常见测试方法的不确定性分析；用于测试的通用分类法和语言以及高熵合金的结果数据；高熵合金的化学验证标准；用于认证和验证高熵合金的无创评估结果的标准；建立原料（粉末和线材）的标准并明确其定义，以确定产品的关键参数；实现自动化的标准化测量；为高熵合金制造流程建立基准。

(3) 为高熵合金数据建立中央数据库。包括合

金性能、制造工艺、参数和模型的理论 and 实验数据，以最大限度减少重复工作，并加速美国研究人员和制造商创新。

建立包括合金属性，制造工艺和参数以及模型理论和实验数据的高熵合金中央数据库。验证并组织从公共和私人利益相关者处收集得到的数据，然后将其提供给美国研究人员。

建立数据库的必要性或作用有以下几点： 避免重复工作：避免每个研究小组为了解该领域的发展状况而进行冗余的文献综述； 扩展分析方法：增强使用高级分析（如机器学习）方法来提升高熵合金设计的能力； 改进复杂分析模型：只能从综合数据分析中发现合金的物性变化趋势，强化机械建模功能对于相图的化学和热力学数据非常重要； 考虑不利的结果：不总是公布不利的结果，但它们对于推进该领域发展和确保有效的资源分配至关重要； 促进领域发展：数据通常通过实验和设备（例如同步加速器）以高速率生成，并且分析必须保持同步，得到的分析结果有利于促进该领域的发展。

建立数据库主要包括搜集数据、数据的验证、数

据的组织及获取等四个部分。

(4) 通过降低先进制造方法、表征工具和计算能力相关联邦设施和专业知识的获取门槛以加强合作。实验室之间以及工业界和学术界之间的合作将推动高熵合金的商业化生产。此外，成立一个跨学科的工作小组加强协作，就制造技术路线图、研究重点、标准、知识产权、技术转让等问题提供实时信息，以促进领域发展。

建立咨询组。建立咨询组是促进高熵合金在多个领域发展和商业化的理想方法。咨询组将协调资源分配，并提供一种机制来识别和关注共同的竞争前挑战。建议首先组建一个行业范围的专业咨询小组，由来自行业界（大型、小型和初创公司）、学术界、联邦实验室和相关联邦机构的成员组成。该小组的目标是在跟踪研究和开发进展的同时，识别和确定技术挑战与市场机会。该小组的两项具体任务是制定路线图以指导短期、中期和长期的研发工作，并根据对一系列高价值应用、生产成本和竞争环境的有效分析，确定商业机会的优先顺序。

路线图。高熵合金涉及广泛的材料和应用，这

使得在研究和资源分配上很难达成共识。然而，在明确了解成功的可能性及有效途径的专家的适当参与下，指导投资的路线图对于推动该领域的发展既可行又必不可少。路线图至少应该解决以下任务：确定并评估最有前途和最先进（接近生产）的工艺技术，以实现不同类型高熵合金的可扩展性和适用性；将特定的新兴制造技术解决方案与具有国家优先权（例如国防、能源和健康）的目标应用领域相匹配；制定协调资源和加速创新的长期战略。在制定路线图后，咨询小组将跟踪实现路线图目标的进展情况。该小组还将直接与相关研究人员和行业参与者合作，以确定行业参与早期研究的机会，并加速向美国公司的许可和技术转让。

4. DAPRA 寻求高超飞机超热前缘材料系统设计方案

2018年12月17日，美国国防部国防高级研究计划局（DARPA）指出，高超声速飞行器以马赫5或以上的极高速度在大气中飞行，其机身与周围的空气产生强烈的摩擦。开发出能够在如此高的速度下承受高温的结构是一项技术挑战，尤其是对于承受热量冲击的前缘部位。

为了应对这一热学挑战，DARPA最近宣布了其“高超声速飞行器材料系统和表征”（MACH）项目。MACH项目旨在为高超声速飞行器开发和展示新的设计和材料解决方案，用于飞行器尖锐的前缘，实现前缘的形状稳定、可冷却。该计划的提案将于2019年1月22日在弗吉尼亚州阿灵顿举行。

DARPA国防科学办公室的项目经理比尔·卡特（Bill Carter）说：“几十年来，人们一直开展高超声速飞行器冷却方案的研究，但未能给出在实际飞行中可用的实用概念。冷却技术的关键是要开发可扩展的材料系统，能更好地实现热量的大规模输运、传导和

排放。近年来，我们已经看到热工程和制造方面的进步，这些技术可以实现过去无法实现的非常复杂的结构设计和制造。如果成功，我们可以看到在减少飞行器前缘气热效应方面的突破，这将提高高超声速性能。”



DARPA“战术助推滑翔”（TBG）项目中正在发展的
高超声速助推滑翔弹弹头想象图

MACH 计划将包括两个技术领域：

第一个领域旨在开发并加快完全集成的被动热管理系统的成熟，通过可扩展的近净制造和先进的热设计来冷却前缘；

第二个技术领域将专注于下一代高超声速材料研究，应用现代高保真计算能力，为未来高超声速

飞行器的前缘冷却应用开发新的被动和主动热管理概念、涂层和材料。

DARPA 计划于 2019 年 1 月中旬，在美国联邦政府“联邦商机”网站发布有关这两个技术领域的跨部门公告。

MACH 计划寻求热工程和设计、先进计算材料开发、材料体系设计、制备和测试（包括高温金属、陶瓷及其复合材料的近净制造）、高超声速前缘设计和性能以及先进的热防护系统方面的专业知识。

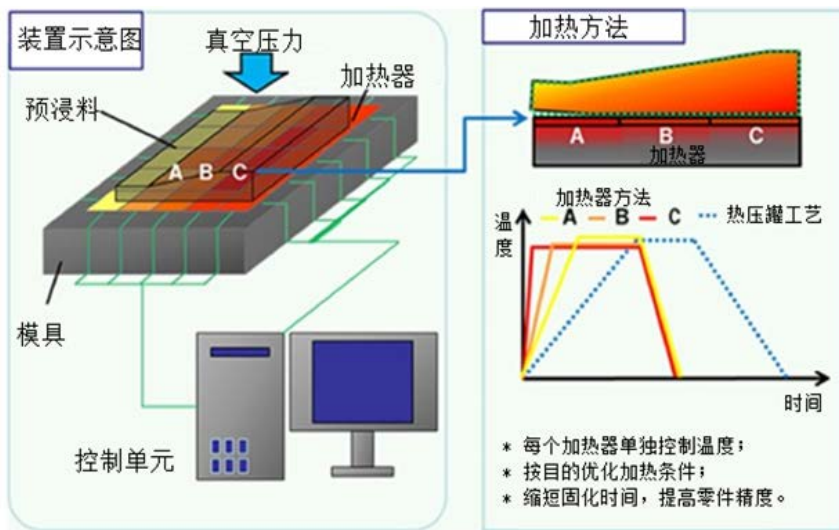
国外国防先进材料技术进展

2018年，国外国防材料技术继续保持稳步推进。在先进复合材料、高性能金属结构材料、特种功能材料、电子信息材料、基础材料领域取得了大量的研究成果和应用进展。

(一) 先进复合材料

1. 日本新型固化工艺开启低成本复合材料时代

碳纤维增强树脂基复合材料（CFRP）通常采用热压罐固化工艺制造。但是，由于热空气导热效率低且模具比热容大，导致加热和固化时间很长；用于大型、厚度变化大的复杂外形零件时，零件内部的问题分布很难控制，产生不均匀的残余应力并且有时使零件变形，存在尺寸精度问题。



东丽开发的新固化技术示意图

针对上述问题，2018年4月日本东丽公司宣布成功开发CFRP新型非热压罐固化工艺技术，在模具

表面上嵌入了多个加热器板。每个加热器独立控制，真空状态下的零件被直接接触的加热器有效加热。控制每个控制器，实现在各个位置的最佳热量分布，提供了均匀的残余应力。

目前，东丽已经安装了一个原型制造设备并正在执行验证试验，有望将热压罐固化工艺的 9 小时减少到 4 小时，50% 的能耗降低，因为不再需要压力和加热媒介（如热空气）。新技术还有望减少装配时间，提高部件精度。

2. 美公司联合推出新型复合材料智能固化装置

传统的复合材料热压罐固化工艺大都是将待固化的部件在某个标准温度下固化成型，耗时较长，已成为复合材料部件生产工艺优化的瓶颈。



传统热压罐固化装置

2018年1月，美国思普瑞特航空系统公司和苏格兰传感与成像系统创新中心合作推出一种新型复合材料智能固化装置，以替代传统热压罐固化工艺。该种新装置分为若干个加热区，通过一套监控 - 反馈系

统对整个固化过程进行实时跟踪，并可根据部件的几何形态，更加灵活地调整固化时间。

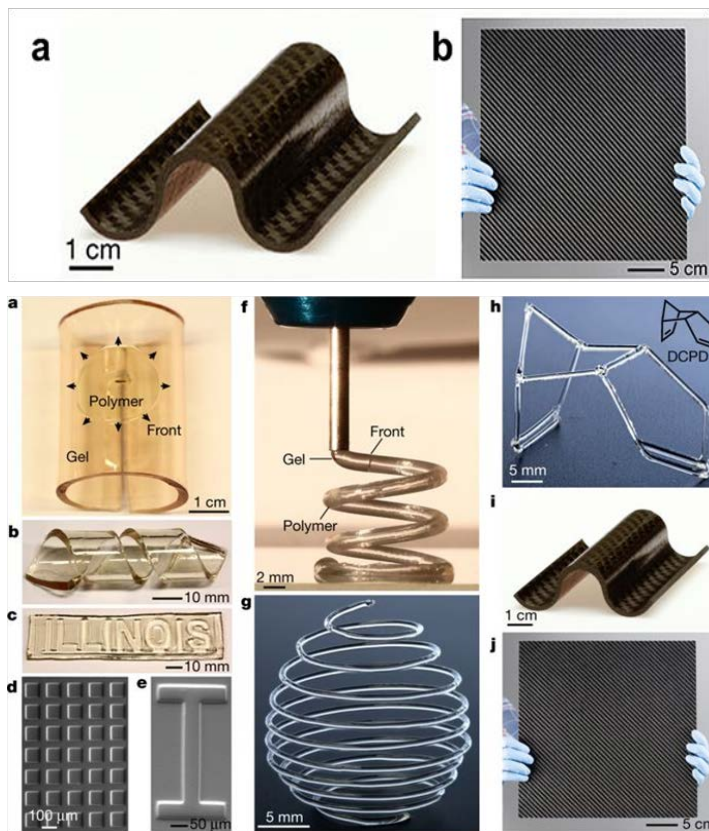
据悉，在不使用热压罐基础上，该装置可将复合材料部件固化时间缩短 40%，成本降低 50%。该种新型智能固化装置非常适用于风机叶片、新一代飞行器等诸多复合材料应用领域。

3. 美大学聚合物固化新技术可降低十个数量级能耗

聚合物固化耗时耗力已成为目前树脂基复合材料领域亟待解决的问题。以飞机组装为例，大型商用客机的一个部件固化过程需消耗超过 96000 千瓦时的能量，产生 80 多吨二氧化碳。客机制造使用的固化炉，直径约 60 英尺（约 18.3 米）、长度约 40 英尺（约 12.2 米），并布满了加热元件、风扇、冷却管等复杂设备。在大约 24 小时的周期内，通过一系列非常精确的步骤，固化炉温度上升到约 176.7°C 属于能源密集型工艺过程。

2018 年 1 月，美国伊利诺伊大学前端聚合固化策略用于制备高性能热固性聚合物及其碳纤维增强复合材料。与常规固化相比，这种前端聚合策略在制备大组件时（比如 900 平方米的波音 787 机身组件）能够将反应时间缩短 2 个数量级，能耗降低 10 个数量级。

作为一种热固化的替代方案，前端聚合具有节能、快速、无需搅拌等优势。这是因为在前端聚合中，反应伴随着热量的释放，因而只需要在初始阶段短时间



前端聚合获得碳纤维增强复合材料

对某个局部加热引发聚合,反应释放的热向周围扩散,就会形成“自蔓延放热反应波”,持续引发周围单体的聚合,液态单体也就快速转变为完全固化的聚合物。如果液态单体中预先浸渍有例如碳纤维的其他材料,那么得到的就是复合材料。

研究人员对得到的材料的力学性能进行了表征。不管是从液态单体还是凝胶开始进行前端聚合,所得聚合物的杨氏模量、拉伸强度和断裂韧性都与传统固化方法得到的聚合物相当。对于复合材料的制备而言,前端聚合所得碳纤维增强复合材料的杨氏模量和拉伸强度与传统固化方法也是相当的,也与航空级双酚 A 环氧树脂不相上下。这些数据证明它们都可以用做高性能材料。得到的最终产物质量符合标准。

4. 美空军研究实验室推动树脂基复合材料增材制造

采用激光烧结工艺进行聚合物 3D 打印的过程中，通过高温激光穿过聚合物粉末床以形成计算机预先设计的形状。随后利用激光能量成形新的粉末层，这个过程重复多次，直到三维零件完成。在对高温聚合物树脂进行测试时，增材制造技术能够很好地打印聚合物粉末，但是当它们从粉末床上取下零件进行后处理时，材料会发生熔化，因而无法使用。



美空军研究实验室 3D 打印增强树脂基高温复合材料部件

为了解决这一问题并更好地使分子在激光的热量下缠绕并形成，2018年3月，美国空军研究实验室与NASA格伦研究中心和路易斯维尔大学合作，在树脂材料中加入碳纤维填充材料，以更好地将激光的能量转移到基体，成功打印出可承受高于300℃的耐高温聚合物基复合材料部件。

通过吸收激光的能量和传导热量，碳纤维会使激光器加热材料的速度比单独使用聚合物快得多。初步测试数据表明，这种新材料可以承受高温，但在实际应用于空军平台之前还需要对材料进行进一步的测试和验证。这种3D打印高温复合材料未来有望用于涡轮发动机可替换部件或在发动机排气口周围的热区，为满足下一代低成本的空军制造需求奠定了基础。这是复合材料增材制造领域的一个非常重要的突破。这些3D打印的部件在涡轮发动机的可替换部件或在发动机排气口周围的热区具有潜在应用。对于空军来说，这是一个长期的、巨大的、节约成本效益的重大突破，是一项高增值技术。

5. 英国研发出全球首架石墨烯蒙皮无人机

石墨烯被称为多功能神奇材料，其性能远超当前各类材料，目前各国科研人员正在探索石墨烯的应用。



全球首架石墨烯蒙皮无人机“朱诺”

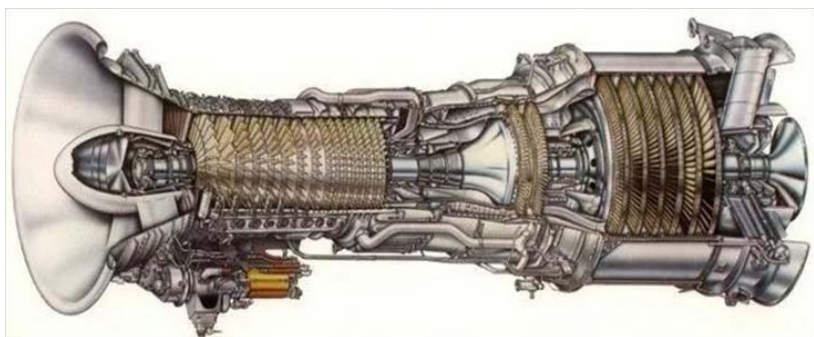
2018年8月，英国中央兰开夏大学与谢菲尔德先进制造研究中心、曼彻斯特大学国家石墨烯研究所等合作，研发出世界上首架石墨烯蒙皮无人机“朱诺”（Juno）。该无人机宽达3.5米，机翼采用由Haydale公司提供的石墨烯纳米增强环氧树脂基复合

材料制造，比标准碳纤维复合材料减重 17%，因此飞行幅度更宽，有效负荷更大。此外，石墨烯具有极强的传导性，可以减弱雷击、飞机积冰带来的危害。项目团队透露，接下来将进行“朱诺”的飞行试验以及相关测试。如果一切顺利，那此类飞机将成为石墨烯相关产业中需求量最大的产品之一。该项目为世界首发，向世人展示了学术界和工业界联合进行创新研究的最新进展，也是石墨烯在航空领域应用的最新成果，代表了工业化石墨烯应用的先进水平。

6. 美海军为驱逐舰发动机装备复合材料罩壳

通用电气航空公司为美国“阿利·伯克”级导弹驱逐舰和其他舰艇提供 LM-2500 燃气轮机，目前的 LM-2500 燃气轮机钢制罩壳采用螺栓连接，重量重，并容易腐蚀。

2018 年 1 月，通用电气航空公司为 LM-2500 燃气轮机研发了一种轻型罩壳，新型罩壳将采用复合材料取代钢材，使重量减少约 50%；并减少了舰艇发动机舱中的热量和噪音，防止起火。罩壳采用无缝连接，既加强了对舰员的保护，也便于维护。



通用电气公司 LM-2500 燃气轮机

通用电气公司正在与海军和巴斯钢铁船厂进行安装新型罩壳的研讨，计划 2019 年交付首台。

(二) 高性能金属结构材料

1. 俄航空发动机高温合金粉末涡轮盘迈入第四代

2018年4月，全俄轻金属研究院展出了未来航空和舰船燃气涡轮发动机用高温合金涡轮盘和轴的毛坯。毛坯采用批产的粉末高温合金 EP741NP 和新耐高温 820℃ 第四代粉末高温合金“VVP”系列制造。



镍基高温合金粉末涡轮盘



新一代俄罗斯 PD14 涡扇发动机

当前，全俄轻金属研究院正在根据联合发动机制造集团的采购进行科研工作。工作集中重点包括：(1) 粉末高温合金 VV751P 820°C 下的持久强度水平评估研究，绘制毛坯盘概率曲线，反映毛坯盘材料的故障分布，用于联合发动机制造集团的未来发动机 PD-14 发动机零件（包括盘）的毛坯制造；(2) 研制新高温合金牌号 VV752P，进行材料试验和 2019 年新合金盘的结构强度性能评估，用于克里莫夫公司未来直升机发动机；(3) 采用粒度级别在 50-100 微米、50-140 微米和 50-200 微米的粉末高温合金 EP741NP 制备毛坯盘，并用这些样品进行专门的试验，延长 RD-33 系列发动机一级高压涡轮盘的使用寿命；(4) 研制一系列新的高强和工作温度达到 800°C 的热强粉末镍基合金，采用最新的镍基粉末高温合金 VVP 系列（如 VV753P）制造双金属可变毛坯盘，并进行验证。

2. 瑞典开发出一种制备抗腐蚀高温合金的新技术

在高温下，高温合金会与环境剧烈反应，导致材料因腐蚀而失效。为了防止腐蚀，通常会在高温合金表面镀上氧化铝或氧化铬保护层。这种保护层对防止金属腐蚀起着决定性的作用。

2018年6月，瑞典查尔姆斯理工大学的研究人员对高温合金做了系统的研究，解释了高温合金保护层形成的原理及其抗腐蚀的原因，并提出了提高合金性能的新方法。



高温合金样品在聚焦离子束铣削显微镜下制成薄片

用于透射电子显微镜（TEM）研究

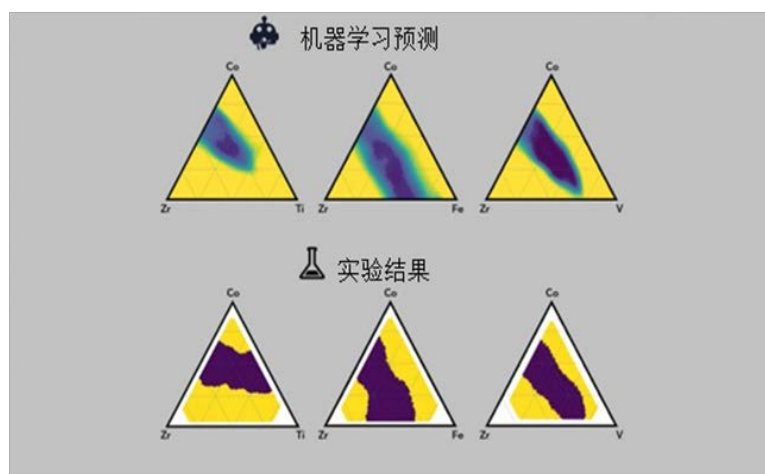
研究人员首先对高温合金领域的两个经典问题做出了解释。高温合金中普遍存在的“活性元素”(通常为钇和锆)的影响；关于水蒸汽在防腐中的作用。研究人员展示了这两种因素之间的联系，并演示了合金中的活性元素是如何促进氧化铝保护层生长的，正是由于这些活性元素的存在，才导致了氧化铝防护层向内生长，从而促进了水蒸汽能从周边环境向合金基底转移。活性元素和水之间的相互作用，又促进了亚稳态“杂乱”纳米氧化铝层的形成。

此外，研究人员还提出通过控制合金中活性元素颗粒的尺寸，可以获得一种更耐腐蚀的高温氧化膜保护层的方法。这意味着随着军用领域对耐高温材料需求的不断增长，该成果既可用于开发新的高温技术，也可用于提高现有高温合金的制备效率。

3. 计算材料技术加快金属玻璃材料的发现速度

金属玻璃由两到三种金属混合而成，比常规合金具有更好的耐腐蚀和耐磨性，但其组分复杂，确定其具体的成分组合成为了制约这一新材料发展的瓶颈。

2018年4月，由美国西北大学、能源部 SLAC 国家加速器实验室和国家标准技术研究所 (NIST) 的科学家领导的研究小组报告了利用机器学习算法在更短的时间和更少的成本下发现和改进金属玻璃的新途径。



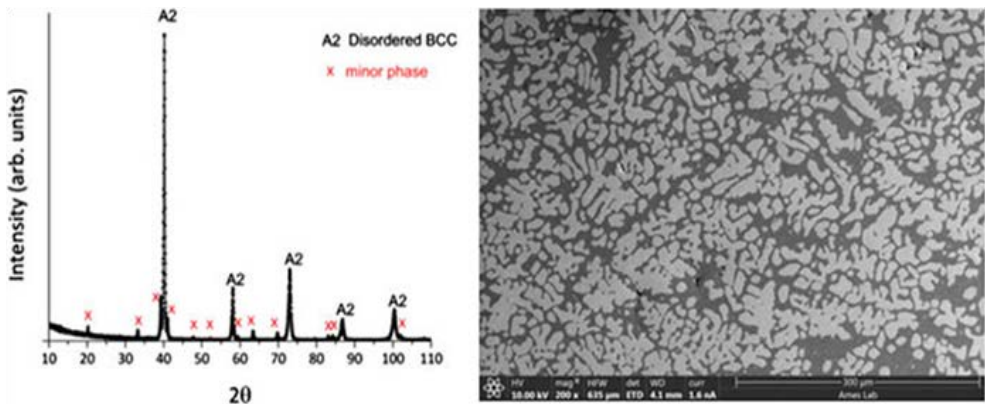
机器学习预测金属玻璃成分与实验结果高度符合

研究人员首先从以往 50 年的材料数据中筛选了近 6000 个金属玻璃的实验结果，然后将其作为样本集用于训练机器学习算法模型，之后研究人员使用了两种不同的方法制作了两套样品合金来测试制造方法对合金变成金属玻璃的影响，然后研究人员用 SSRL(斯坦福同步辐射光源) 的 X 射线束扫描两组合金并将结果输入数据库以产生新的机器学习结果并将其准备用于最后一轮的扫描和计算样本。在最后一轮的实验中，研究人员将从样品中发现金属玻璃的成功率从 $1/300$ 或 $1/400$ 提升到了 $1/2$ 或 $1/3$ 。

研究人员表示，在过去的半个世纪里科学家们仅仅研究了大约 6000 个组成金属玻璃的成分，而借助机器学习算法，可以在一年内制作和筛选 20000 个。在进一步的研究工作中，研究人员将努力使这一过程更加快速，并最终实现完全自动化。

4. 美艾姆斯实验室实现高熵合金元素成分预测

高熵合金由四种或四种以上的元素组成，具有优异性能，是极端使用环境下最有潜力的下一代结构材料。但高熵合金的成分组合数量庞大，科研人员们很难知道究竟可以从哪里找到新型高熵合金。且高熵合金非常难以制造，需要使用昂贵的材料和特殊加工技术。



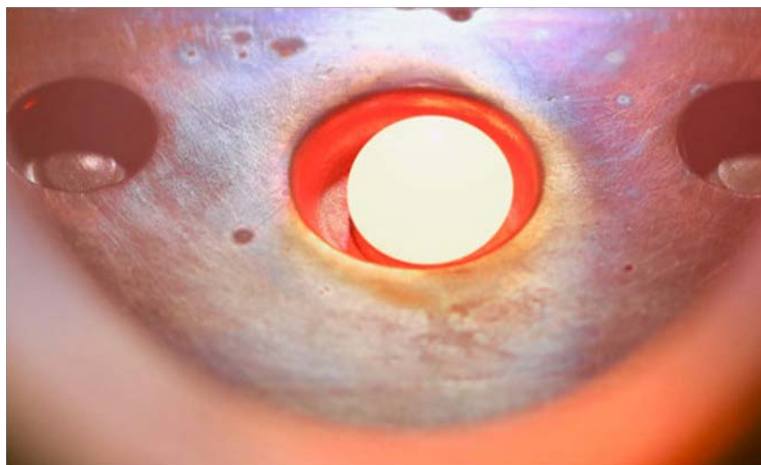
等原子合金的 X 射线衍射图

2018年5月，美国能源部的艾姆斯实验室开发了一种高通量计算分析方法，可以帮助预测尚未制成的高性能高熵合金的成分和性能。利用高通量计算方法，科研人员使用了一种独特的电子结构方法，预测

任意组合高熵合金的性质，同时评估其在简单结构中形成固溶体的能力，原子的排序、化学稳定性以及在不同温度下的机械性能。利用这种方法，科研人员可以缩小多组分材料系统的设计空间，并围绕最有前景的材料区域进行研究和开发进行调整。

5. 美国开发出耐 500℃ 高温的新型形状记忆合金

目前高温形状记忆合金市场上性价比较高的是可在约 400℃ 的温度下工作的合金。添加金或铂等元素可以显著提高温度，但这些材料的成本太过昂贵，因此限制了高温形状记忆合金进一步应用。



真空电弧熔炼机制备新型 NiTiHf 高温形状记忆合金

2018 年 8 月，美国德州农工大学的研究人员等利用高熵合金的工作原理，在不添加了金和铂元素的情况下，创造了由四种或更多已知的可形成形状记忆合金（镍，钛，钎，锆和钇）的元素组成的新型形状记忆合金。这些新型材料可以在 500℃ 高温下工作，其中有一种可在 700℃ 下工作。



熔炼中的高温形状记忆合金

该材料可用于控制涡轮叶片与喷气发动机涡轮机匣之间的间隙或空间。当涡轮叶片和机匣之间的间隙达到最小值时，喷气发动机是最节省燃料的。但是，这个间隙必须预留一个合理的余度来应对某些特殊的工作条件。将高温形状记忆合金结合到涡轮机匣中，可以保证在所有飞行状态下的涡轮叶片与涡轮机匣处于最小间隙，从而有效提升发动机推力效率，减少燃油消耗。

6. 俄开发出可使 3D 打印铝合金强度提升 1 倍的方法

铝合金是航空航天重要轻质材料，目前该材料主要面临的问题之一是与钛合金等相比，该材料强度不高。



俄罗斯国立科技大学的 3D 打印铝基复合材料

2018 年 10 月，莫斯科国立科技大学（MISiS）的团队找到了一种方法，通过 3D 打印铝粉末获得的复合材料，可将原有的铝合金强度提升一倍，使其具有与钛合金相当的特性，并能广泛应用到航空航天领域。



该项 3D 打印技术的关键在于燃烧铝粉获得了前驱体改性剂

该项技术的关键是研究人员通过燃烧铝粉获得了创新的前驱体改性剂——氮化物和氧化铝——专门用于烧结分支表面，在颗粒之间形成过渡纳米层。表面的特殊性质和结构可以使得颗粒牢固地附着在铝基体上，从而使得到的整个复合材料的强度增加一倍。目前用于 3D 打印金属的主要技术是选区激光熔融（SLM）和选区激光烧结，它们都涉及逐层打印金属粉末油墨，以构建给定尺寸结构或图案。这两项技术都是使用高达 500 瓦的激光束逐层烧结粉末材料增材制造技术。研究人员目前正在测试原型样件。

(三) 特种功能材料

1. 俄罗斯核反应堆燃料元件包壳材料取得突破

锆合金是核反应堆二氧化铀芯块燃料元件包壳的主要材料，该材料在水中具有很高的耐冲蚀性和耐腐蚀性，同时具有较低的热中子俘获截面。然而，当温度达到 700°C 以上，锆会和水蒸汽发生反应产生热量并生成氢，并加速燃料元件包壳的恶化，对水冷式核电站非常危险。锆 - 蒸汽反应被认为是 2011 年福岛第一核电站核事故的原因之一。

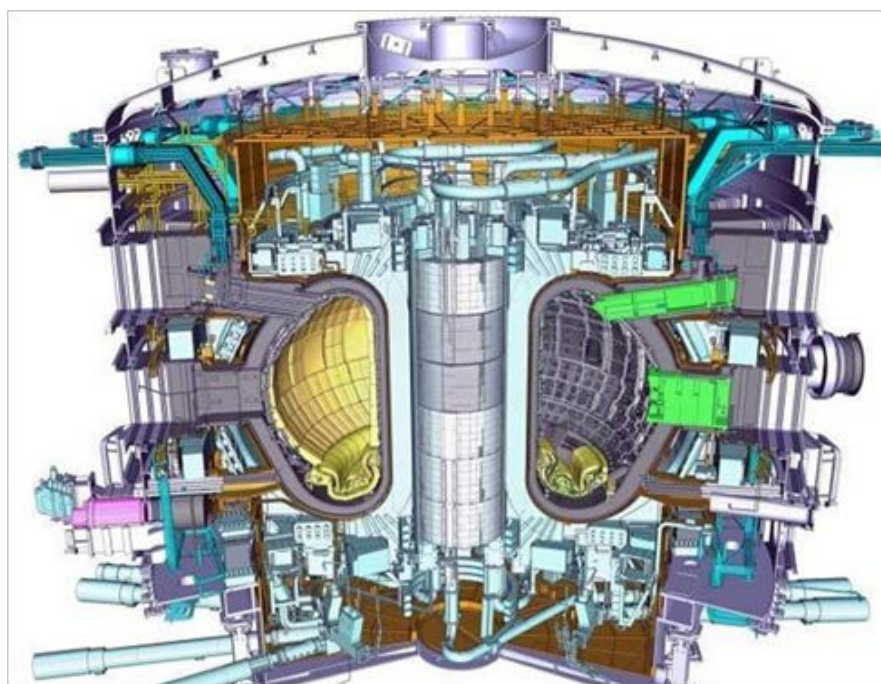


核反应堆燃料元件包壳金属材料

2018 年 1 月，俄罗斯莫斯科工程物理研究院核研究大学利用离心同位素分离技术制造出同位素改性的钼材料。这种材料可制造热中子俘获截面与锆相似甚至更小的合金作为锆合金替代品，用于核燃料元件包壳，具有大幅提高核电站安全性的潜力。该合金用于制造核燃料元件包壳，可使俄罗斯乃至全世界的核反应堆的安全性得到重大改善。

2. 日本开发新型聚变堆包层材料

作为聚变堆包层的钒合金由 92% 的钒、4% 的铬和 4% 的钛组成，与常用的耐热钢相比，它具备聚变堆包层所需的各种特性。但钒合金管件在加工过程中容易断裂，并且在管道焊接之后也容易出现断裂，导致这一问题的原因主要是空气和原料中夹杂了碳、氮、氧等杂质。



核聚变反应堆及其结构

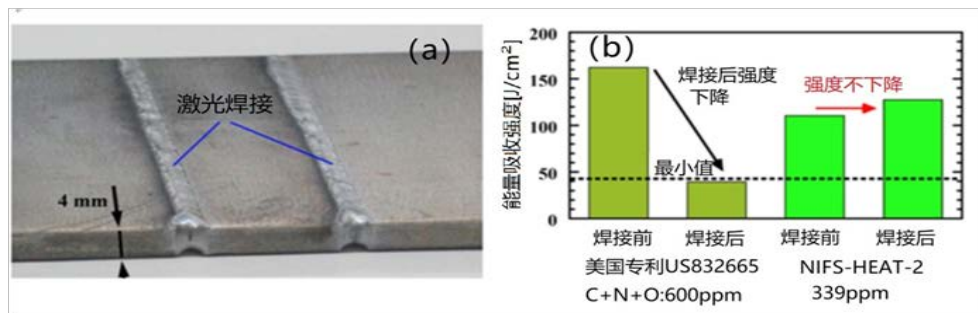


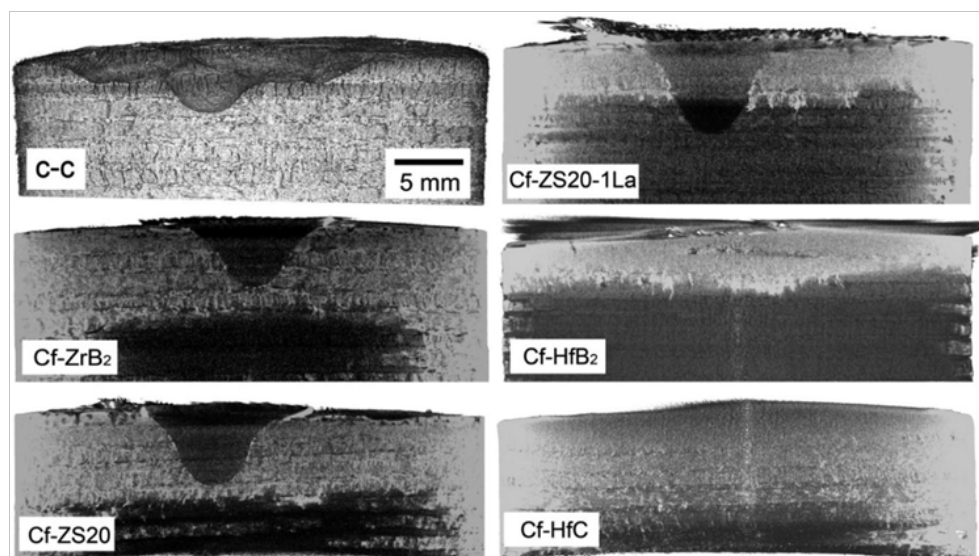
图 a：用惰性气体激光焊接的 4 毫米钒合金 NIFS-HEAT-2 板

图 b：室温冲击试验结果

2018 年 12 月，日本国家聚变科学研究所的科研人员通过评估和选择合适的制造条件，能够去除原材料中的杂质，在真空或惰性气体中生成一种高纯度钒合金 NIFS-HEAT-2，显著改善了合金的延展性，从而克服了钒合金在加工时和焊接后断裂的问题。

3. 欧洲高超声速飞行器用高温材料迈向 3000℃

2018 年 1 月，欧洲导弹系统公司（MBDA）披露了适用于英国 / 法国未来超音速和高超声速武器的高温材料持续研究项目细节。



60 秒氧乙炔火焰试验后超高温复合材料的纤维图像

MBDA 公司的开发方向之一是耐温高达 3000℃ 的纤维增强型高温陶瓷复合材料，当前重点是使用 HfB_2 陶瓷粉浸渍的碳纤维预成型坯料，随后用化学气相浸渗工艺来生产高温陶瓷复合材料。MBDA 公司表示，在样品厚度为 12.5 毫米的样品上进行的氧

乙炔焊接实验表明，该材料具有优异的热保护性能。此外，另一个项目研究小组正对射频透明陶瓷或射频透明陶瓷复合材料在 500 ~ 1000℃ 温度范围的不同选择进行探索，应用可能包括数据链路天线罩，雷达高度计窗口和导引天线罩。

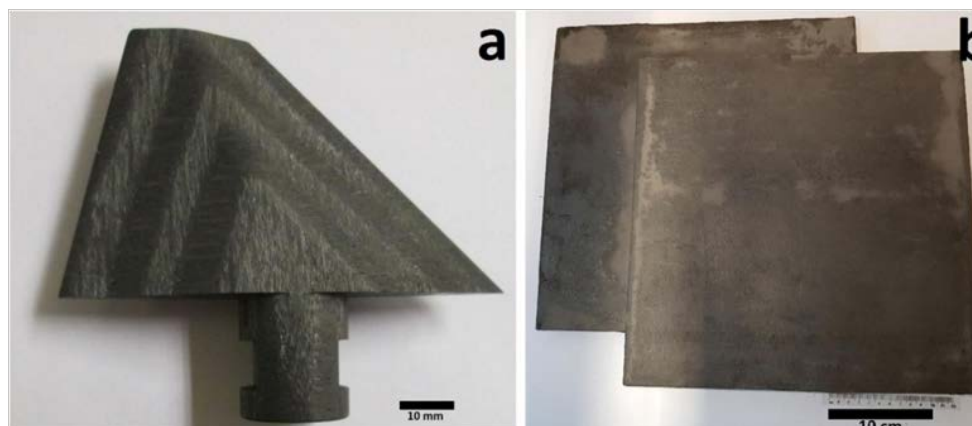
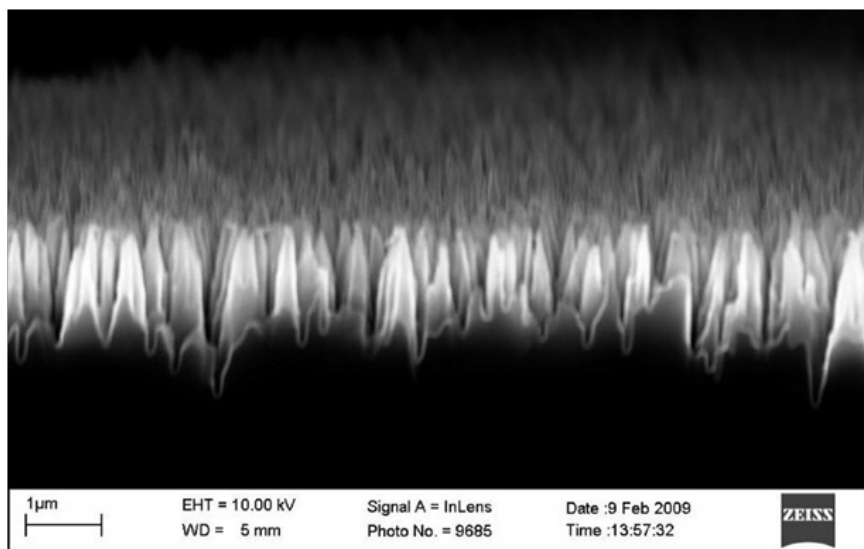


图 a：MBDA 验证件

图 b：采用碳纤维增强 HfB₂ 超高温复合材料制成的板

4. 美国黑硅超材料可实现近乎完美的红外隐身

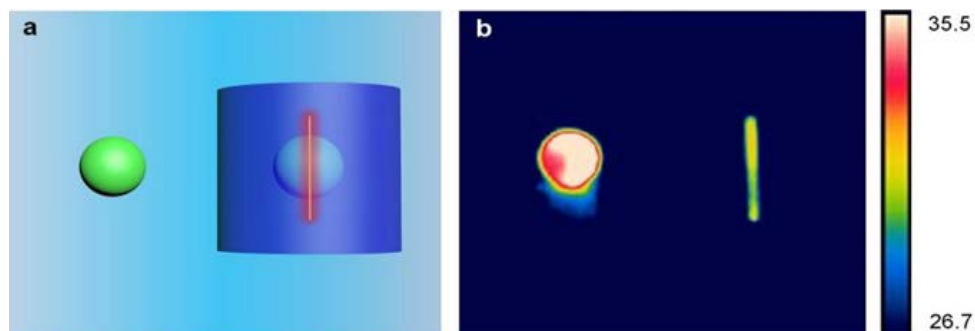
人体或车辆引擎等有温度的物体，会以红外线的形式发热。红外热影像仪通过热感原理有效显示热源，即使在夜间或大雾环境中，也能帮助无人机准确寻找目标。



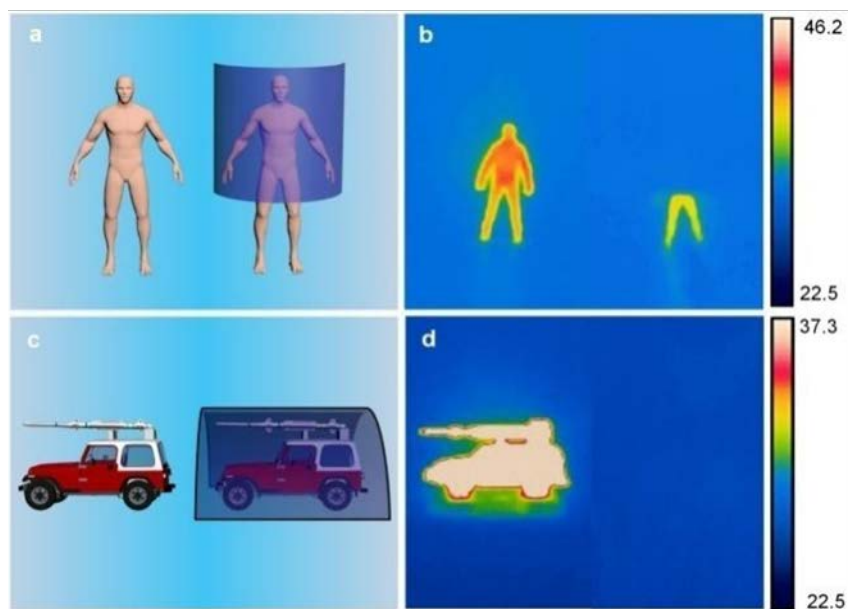
黑硅材料的扫描电镜照片

2018年6月，美国威斯康辛大学麦迪逊分校开发了一种超薄红外隐身薄片。这种薄片采用黑硅材料制成，以硅作为衬底，通过利用微小的银制颗粒刻蚀进入超薄固体硅表面，从而形成茂盛且更细长的纳米

线。纳米线和银颗粒都有助于吸收红外光。衬底上还散布着微小的空气通道，可以防止隐形薄板在吸收红外光线时过快产生热量。在厚度小于 1 毫米时，这种薄片可吸收约 94% 的红外光。



球在经过隐身薄板遮盖后形成伪装在红外探测器中显示为棒状



黑硅超材料可使人 and 车完美多米红外探测器

这种隐身薄片可在中波长到长波长红外波段范围内使被遮挡的物体或人在红外探测器中更容易地实现隐身，几乎无法被察觉到。新型隐身薄片相比其他的热屏蔽技术有着显著的改进。

5. 英开发出用于飞机驾驶舱窗户的革命性疏水涂层

目前市场上的飞机驾驶舱窗户疏水涂层技术仅提供临时解决方案，取决于飞行时间和条件，需要每六到八个月重复一次。



疏水涂层对飞机具有重要意义

2018年7月，英国吉凯恩航空航天公司开发出一种用于驾驶舱窗户的新型疏水涂层。这种涂层可以提供永久性的表面处理，使飞行/地面操作中雨水滑落，并显著增强对表面磨损的抵抗力。该技术正在美国试飞，在空客公司的飞行试验机上进行性能评估。初步测试结果表明，新涂层具有实用性。这种新涂层技术是一种永久性解决方案，只需在窗口使用寿命周期中应用一次，可以无缝地满足使用需求，减少飞机

维护次数，减轻重量和成本，有望消除飞机驾驶舱窗户上挡风玻璃刮水器的需求。此外，这种材料还可用于舰船等对疏水有要求的领域。



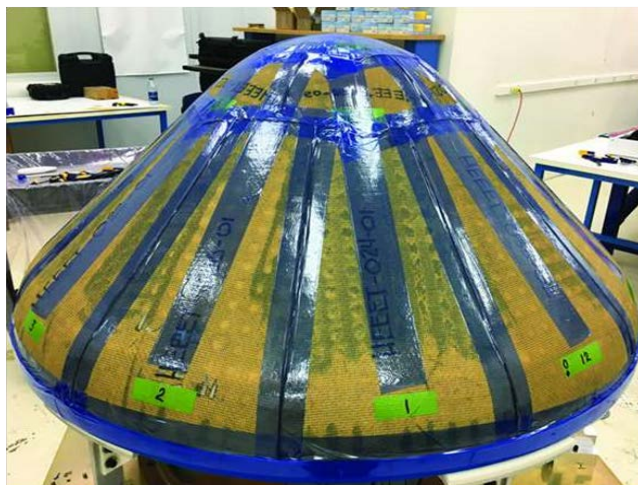
吉凯恩的新型疏水涂层是一种永久性解决方案

6. NASA 使用 3D 编制材料开发新的热防护系统

美国 BRM 公司拥有超过 95 年的设计、开发和制造高度专业化的工程编织织带、磁带、特种织物、编织预成型件、2D 和 3D 结构织物经验。



3D 织物被切割后灌注树脂



3D 织物用薄膜粘合剂粘合到航天器上



BRM 公司获得 NASA 太空技术任务部太空技术大奖

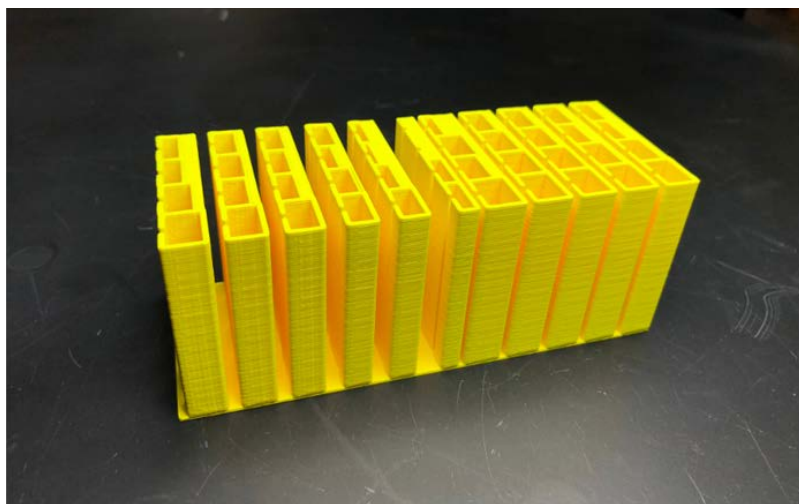
2018 年 4 月，BRM 公司获得美国航空航天局（NASA）太空技术任务部太空技术大奖，为“极端进入环境技术的热防护（HEEET）”项目团队提供 3D 编织材料，以开发新的热防护系统。为制造具有所需性能的热防护材料，BRM 在三维结构中精确地放置了不同成分和可变线密度的纤维，将传统的 2D 编织技术扩展到第三个方向，能够制造比传统 2D 编织材料更坚固的进入环境材料。然后将面板注入树脂并固化，以将纤维锁定到位。BRM 公司利用先进的建模、设计和制造工具来优化织物，以改善整体性能，

为 HEET 项目制造了一个新的热防护系统材料系列，并进行了不同准入条件测试。

BRM 公司和 NASA 的工作是 NASA 与美国小企业合作的一个很好的例子，小企业拥有独特的专业技术能力，这将进一步推动当前和未来的探索计划。

7. 美杜克大学开发可控制声波的超材料装置

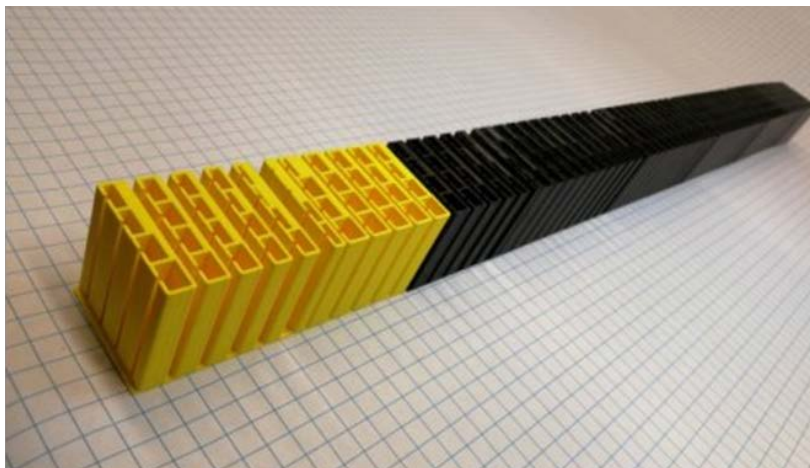
虽然在理论层面，可控制声波的超材料制备方法早已被提出，但这些方法既没有在理论层面对声音传输和反射同时实现精确控制，也不能通过实验来实现。



杜克大学设计制备的可完美控制声波的超材料

2018年4月，美国杜克大学的研究人员设计出了一种新型声学超材料，可近完美地控制声波使其重新定向传播和反射。这种超材料由四排空心柱组成，每列空心柱之间都有一个约半英寸左右的狭窄开口，可利用3D打印技术制成。研究人员演示了超材料如

何通过每一列之间的通道宽度以及每一列内腔的大小来控制声音。根据每个空心柱塑料填充量的不同，每一列产生不同的频率。当声波穿过它时，超材料中的每个谐振腔都以特定的频率产生谐振。振动不仅对声波传播速度产生影响，而且还与相邻的空心柱相互作用，控制传播和反射。此外，振动列不仅与声波相互作用，且与周围的空心柱相互作用。

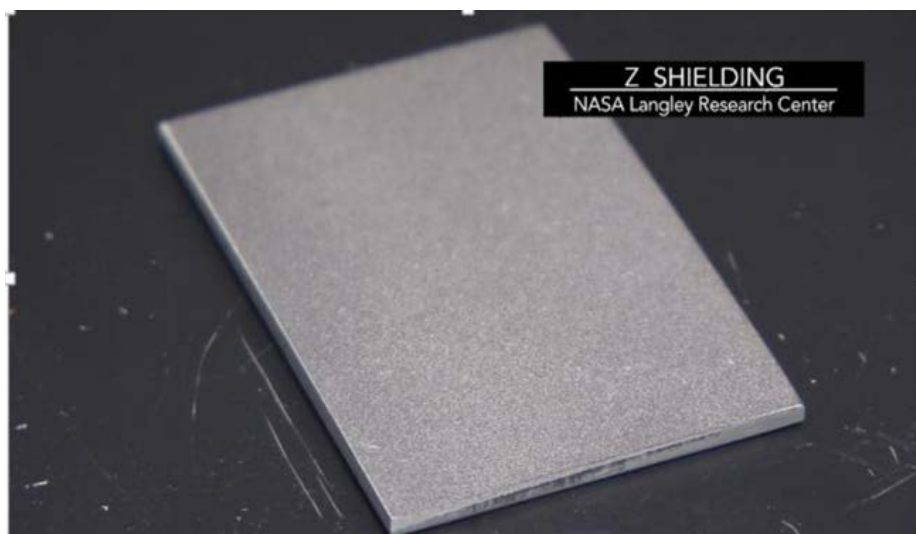


杜克大学超材料显示出了对声波的完美控制能力

据报道，这种超材料可以将直线传播的 3000 赫兹声波，重新定向因导致以 60 度入射角传播，效率约为 96%，远高于此前类似设备的 60%，接近完美。该团队正寻求将该技术应用到更奇特的声音控制形式中，包括在声纳等应用中操纵声波。

8. NASA 研发出新型微纳卫星辐射防护材料结构

立方星任务周期短，大部分处于低速，轨道寿命短。但当前立方星正考虑使用更高的轨道，更长的轨道寿命要求立方星具有更长的使用寿命，这使得其辐射屏蔽成为一个很重要的问题。



NASA 兰利研究中心的 Z 防护结构

2018 年 8 月，NASA 兰利研究中心研发出一种用于微纳卫星辐射防护的新型分层金属材料结构。该结构采用“Z-防护”（Z-shielding）方法，将钽和钨等高密度金属按精确比例和厚度涂在薄铝片上制成。

该结构包裹在立方星等微纳卫星壳体外部，可与卫星设计尺寸等兼容，能保护卫星电路免遭电离辐射。据评估，该结构成本低、制作容易，可将电离辐射剂量降低 100 倍，并极大降低卫星内部充电效应影响。因而有望使立方星的寿命从数月提高至数年，提升效费比。

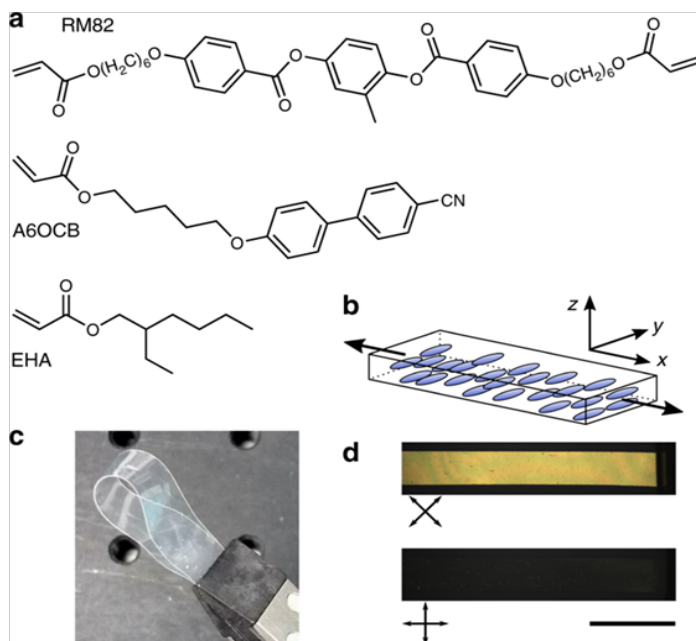
9. 英合成全球首个液晶拉胀材料有望用于防弹衣

与橡胶、钢材等传统材料拉伸后变薄不同，拉胀材料在拉伸后会变得更厚，因此可以吸收能量。但拉胀材料通常需要采用特殊的结构设计，通过制造等复杂的工程技术制备，耗时长、成本高，还可能损害材料性能。



被称作“液晶弹性体”的首个拉胀材料

2018年12月，英国利兹大学首次合成出一种自身具有拉胀特性的新材料，被称为无孔液晶弹性体材料。这种材料具有软弹性，在不消耗能源的情况下就可以进行弹性拉伸，还可以在受到加热等刺激时发生大幅形变，长度可以拉伸400%。



拉胀材料能在不同方向的拉伸时扩展

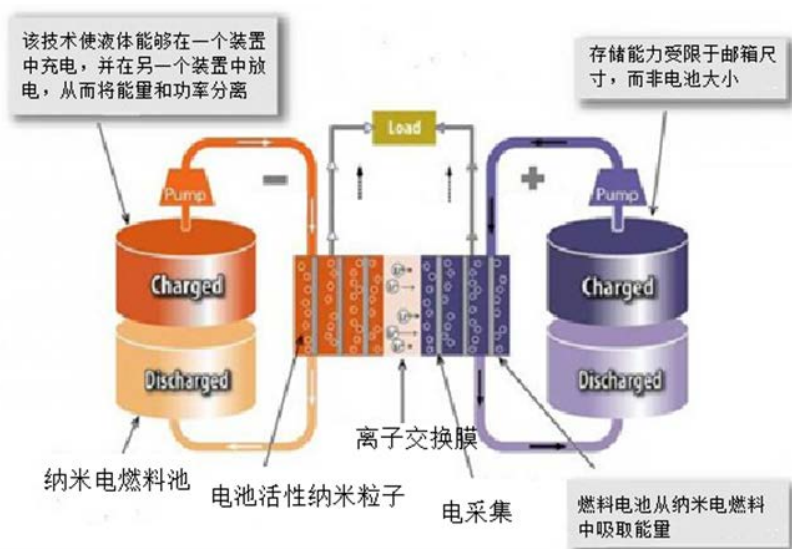
液晶材料可以被看作结构有序的液体，具有棒状的分子结构，并按照特定顺序排列。但与固态晶体不同，液晶材料的分子能够流过彼此，因此表现出液体的性质。当液晶与聚合物分子链结合构成网络后，材料在分子尺度上具备了拉胀特性，从而表现出新的机械性能。

新型拉胀材料具备良好的抗冲击与抗撕裂性能，只需要通过合成制备，更易于生产，在防弹衣、生物医疗设备方面应用前景广阔。

(四) 电子信息材料

1. 液态电池为飞机提供更安全清洁和安静的推进动力

较常规锂电池，液态电池具有能量存储功能非爆炸性、充电速度快的特点，但由于泵送液体的能量储存材料溶解量受到限制，导致液态电池能量密度较低。



活性纳米颗粒从油箱输送、流经离子交换膜实现发电

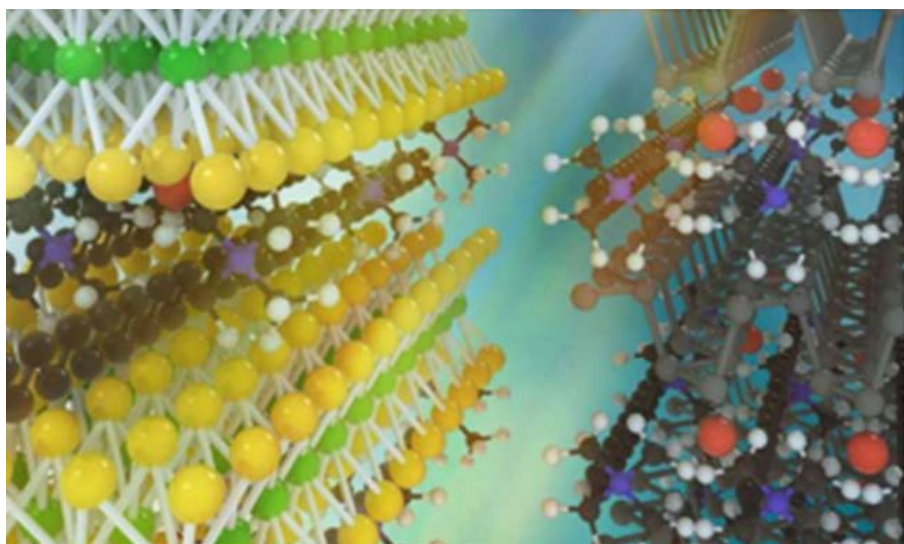
2018年8月，在NASA资助下，美国阿贡国家实验室及其创业公司 Influit Energy 将纳米颗粒悬浮在水基液体电解质中，通过表面处理使纳米粒子浓度达到 80%，制成了活性材料比例达 65% 的纳米电燃料

(NEF) 电池, 较活性材料只有 35% 的固体锂离子电池, 能量密度提高到 1.5 倍以上。该技术使液体能够在—个装置中充电, 并在另一个装置中放电, 从而将能量和功率分离。充电后的液体可以采用跟航空燃油相似的方式进行储存, 实现液体快速重新加注, 而不是在飞行间隔中采用较为缓慢的电池充电方式。

目前, NEF 液态电池原理样件的功率水平为每平方厘米若干毫安级。如果获得资助, 该研究成果将在 2020 财年提供第一代 NEF 技术, 电流密度达到 $100\text{mA}/\text{cm}^2$, 系统级比能量达到 $125\text{Wh}/\text{kg}$ 或 $350\text{Wh}/\text{L}$, 性能优于锂离子电池。由于 NEF 没有火灾危险, 并且可以快速加油, 因此适用于航空于冷却电池和电机, 且对飞机油箱无尺寸和形状要求, 为飞机提供安全、清洁和安静的推进动力。

2. 新型二维超薄超晶格材料革新传统超晶格构造概念

传统超晶格通常只能由具有高度相似晶格对称性的材料制成，材料之间具有相似的电子结构。



新超晶格其交替层被不同分子形状、尺寸的二维原子晶片隔开

2018年3月，美国加州大学洛杉矶分校（UCLA）的研究人员开发了一种由超薄二维薄片交替层组成，厚度仅有一个或几个原子厚的新型人造“超晶格”。研究人员使用“电化学插层”的方法创建单层原子晶体分子超晶格，在创建过程中施加负电压，将负电荷电子注入到二维材料中，随后将正电荷的铵分子吸引

到原子层之间，铵分子会自动组装成有序晶体结构中的新层，从而形成超晶格。

与目前用于创建二维超晶格的常规分层组装或生长方法相比，新方法很容易产生具有数十、数百甚至数千个交替层的超晶格，生产过程速度更快，效率更高。这对于制造耗能更少、更快速的晶体管或高效发光器件具有重要意义。

当液滴冷却下来的时候，再用一块扁平的二氧化硅压在上面，提取几层镓单原子层，成功地将镓单原子层剥离到其他基底上，包括氮化镓、砷化镓、硅酮和镍。二维镓与硅等半导体具有亲和力，可在二维电子设备中产生高效的金属接触，特殊的镓单原子层基底组合具有不同的电子特性，并且这些特性可以被应用与不同的半导体器件。这种制备二维镓的方法同样也适用于其他低熔点的金属和化合物。

4. 英与美空军研究实验室签署氮化镓技术转化协议

氮化镓技术可以以小的尺寸提供宽频带宽、高效率和高发射功率，使之成为下一代雷达、电子战和通信系统的理想选择。目前在研究与发展试验中的毫米波氮化镓技术产量低，成本高，仅在专属工厂中，国防供应商难以广泛获得。



科研人员展示 6 英寸氮化镓晶圆

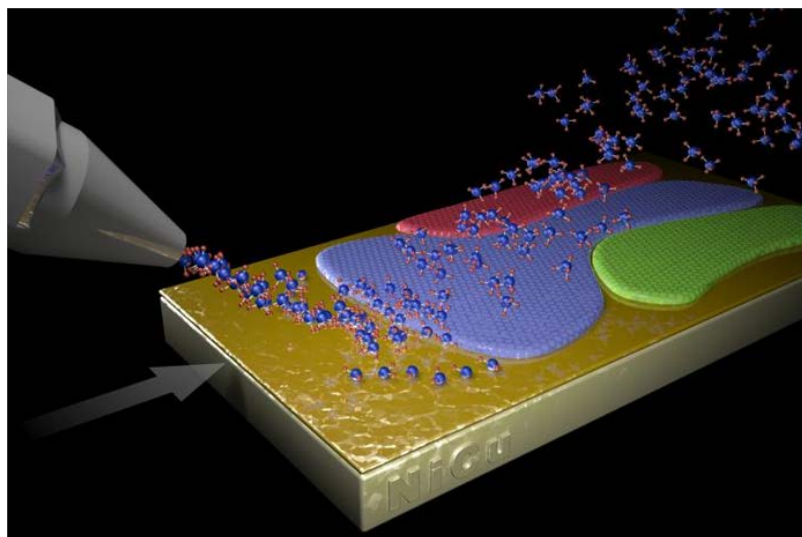
2018 年 9 月，英国 BAE 系统公司宣布与美空军研究实验室签署一项合作协议，开展将后者的氮化镓半导体技术转化到公司“先进微波产品”中心的

第 1 阶段工作。BAE 系统公司将转移并进一步增强该技术，并将其用于 6 英寸的氮化镓晶圆，大幅度降低成本，降低该技术的使用门槛。按照前述协议，BAE 系统公司将与美国空军研究实验室共同工作，在 2020 年之前建立线宽 140 纳米的氮化镓单片微波集成电路（MMIC）制程并通过生产认证，美国防部的供应商将可通过开放式工厂服务机制获得该生产线的产品。

BAE 系统公司将主要在其设在美国新罕布什尔州纳舒厄的微电子中心开展上述工作。该中心自 2008 年以来就是美国防部的 1A 类可信供应商，为美国国防部各个关键计划以生产规模制造集成电路。该中心占地面积约 6500 平方米，承担研究、发展、制造各类微波和毫米波化合物半导体材料、器件、电路和模块的工作。

5. 美橡树岭国家实验室制备出大型单晶石墨烯

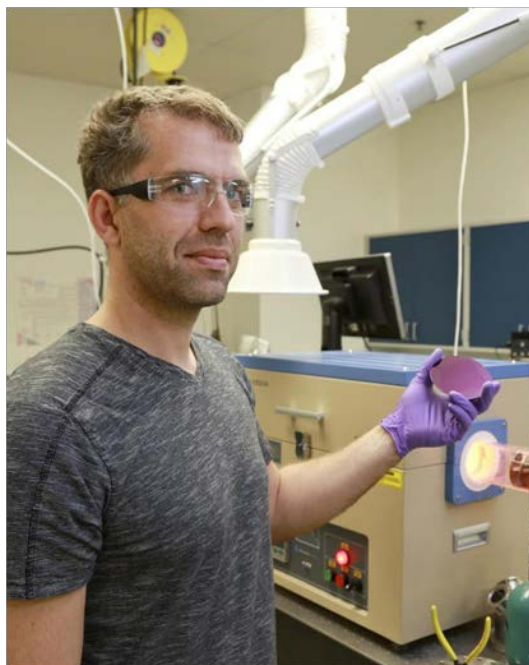
石墨烯被认为具有高强度和高电导率的潜力，并且可以通过简单的方法来制备，但石墨烯制备过程中的缺陷会限制其尺寸大小。



ONRL 新方法可生产超过一英尺长的大型单层单晶石墨烯薄膜

2018年3月，美国能源部橡树岭国家实验室（ORNL）领导的研究小组开发了使用化学气相沉积法，制备出大型单层晶体状石墨烯薄膜，其长度超过1英尺。研究人员发现，在足够高的温度下，石墨烯的碳原子与基体的原子没有关联，从而允许非外延晶

体生长。由于气体混合物的浓度对单晶生长的速度有很大的影响，所以在单层石墨烯晶体的现有边缘附近提供碳氢化合物前躯体，可以更有效地促进其生长。

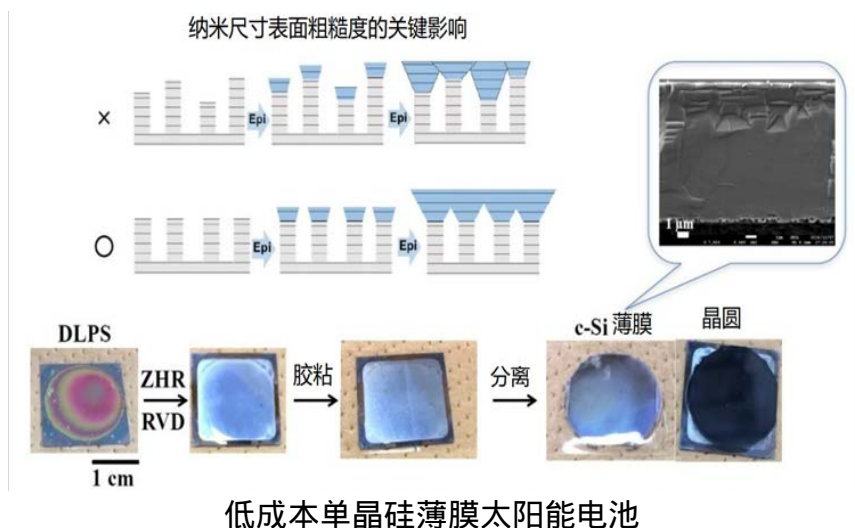


科研人员展示石墨烯单晶样品

研究人员创造了一个环境，在这样一个受控的环境中，石墨烯晶体生长速度最快的方向会超过其他晶体，即使是在多晶硅基体上，也不需要与基体的方向相匹配。虽然使用该小组的方法扩大石墨烯的实际规模还有待观察，但研究人员相信，他们的进化选择单晶生长方法也可以应用于其他 2D 材料，如氮化硼。

6. 日本掌握高质量薄膜单晶硅低成本技术

目前通过剥离使用多孔硅的方法作为一种降低高质量薄膜单晶硅制造成本的方法而备受关注。2018年3月，早稻田大学和东京工业大学的一个研究小组剥离使用多孔硅，成功生产出高质量的薄膜单晶硅，其晶体缺陷密度降低到硅晶圆级而生长速度比以前高出10倍以上。他们使用的方法在原理上能够将原料产量提高到100%，因而可以预测该技术将能够在保持单晶硅太阳能电池的发电效率的同时大幅降低制造成本。

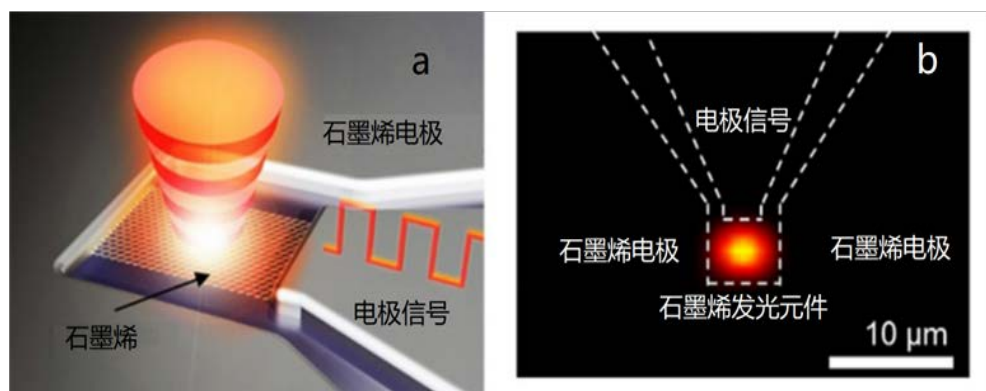


研究人员首先使用电化学技术在单晶晶片的表面上产生双层纳米级多孔硅，随后通过独特的区域加热再结晶法将表面平滑化至 0.2 至 0.3 纳米的粗糙度，并将其作为衬底用于高速生长以获得具有高结晶质量的月形晶体薄膜。改变区域加热再结晶法方法条件降低底层衬底的表面粗糙度时，生长的薄膜晶体的缺陷密度随之降低，最终成功地将其降低至约 1/10 的硅晶片粗糙度的水平。此外，成膜速率和硅源到薄膜硅的转换速率是薄膜单晶硅生产中的瓶颈。研究人员利用用于外延的化学气相沉积方法，使最大成膜速率达到几微米 / 小时，同时产率约为 10%。而在早稻田大学的野田实验室，通过在大于 2000℃ 的温度下蒸发未加工的硅，使得其能够以 10 微米 / 分的速度进行沉积，将硅源转换为薄膜硅。

根据该团队的科研成果，该团队不仅发现了在用于剥离过程的多孔硅快速生长期间提高晶体质量的主要因素，而且成功地控制并应用了这些因素。下一步，研究人员将对直接连接太阳能电池性能的薄膜的载流子寿命以及太阳能电池的制造进行测量，以便将该技术付诸实用。

7. 日本发明整合硅芯片的高速石墨烯基黑体光发射器

高速光发射器整合硅芯片能够构造出新奇的硅基光电子学结构。然而复合半导体光发射器面临的主要挑战是如何整合硅基平台，因为直接制造硅基片十分困难。



石墨烯发光器件

图 a：石墨烯发光元件的示意图

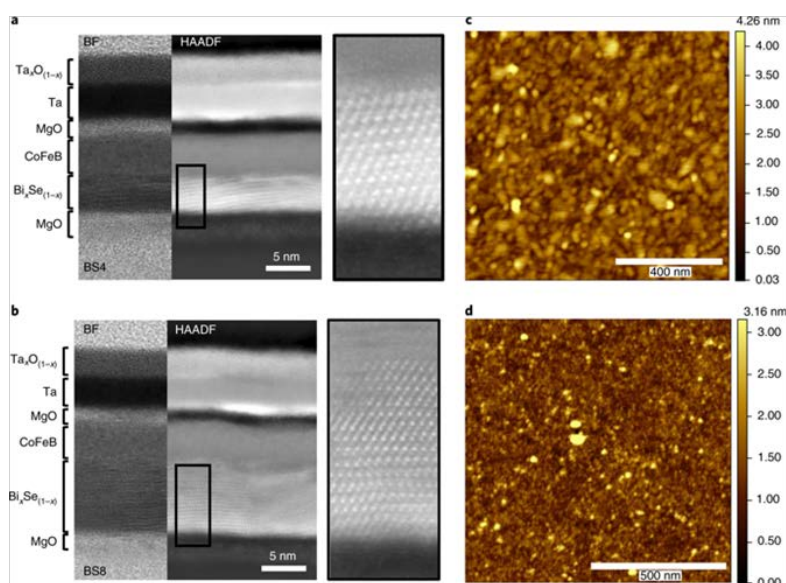
图 b：石墨烯发光元件（红外摄像机图像）的发光状态

2018年3月，日本科学振兴机构的研究人员发明出整合硅芯片的高速石墨烯基黑体光发射器。石墨烯是一种二维纳米碳材料，有着独特的电子、光学和热学特性，能够用于光电子设备。石墨烯基黑体光发射

器能够在硅芯片上发射近红外线光和中红外线光。虽然石墨烯基黑体光发射器被认为状态稳定，调幅值相对较低（10 万赫兹），但是这种光发射器在高速调制的瞬态特性至今还没有被报道过。并且石墨烯基光发射器的光通信也没有被发现过。现在，一个高度整合，高度整合了硅芯片的石墨烯基黑体光发射器，能够发射包括电信波长的近红外线光。快速回复时间是 100 皮秒（一万亿分之一秒），比原来的石墨烯光发射器快 10^5 倍。通过在考虑石墨烯和硅基底的发射器热模型的情况下，对热传导方程进行理论计算能够阐述高速发射的机理。实现模拟结果表示快速回复性质不仅是由于经典的石墨烯表面热传递和基底的散热，也要考虑通过基底的表面极化声子的远程量子热运输。更进一步，研究人员制作了二维序列发射器，发生器整合了通过化学气相沉积方法生产的大规模石墨烯。石墨烯光发射器相比传统的复合半导体光发射器优势巨大，它们能够和硅芯片高度整合，并且石墨烯能够实现高速发射光。石墨烯基光发射器为高度整合光电子学和硅光学开拓了新的道路。

8. 拓扑绝缘材料可以提高计算机处理和存储的效率

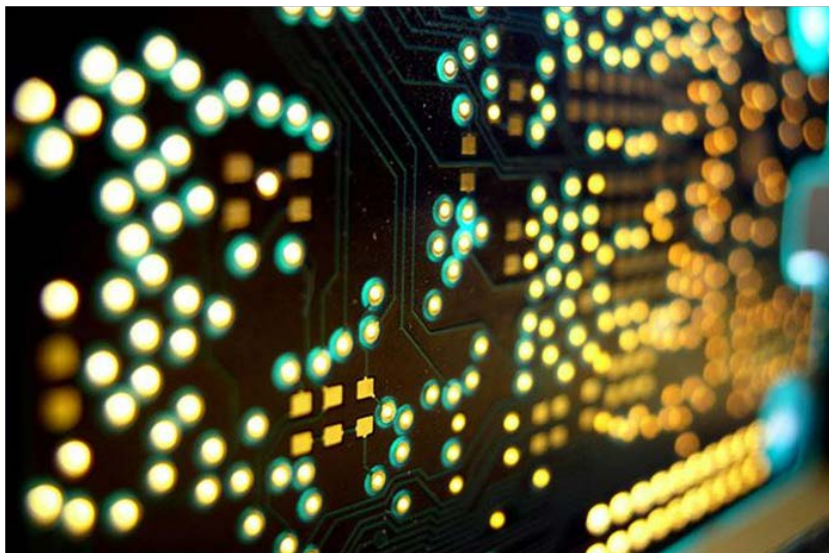
量子材料以独特的方式产生具有新的物理和自旋电子特性，在过去几年中引起了半导体行业的广泛关注。“拓扑绝缘体”材料属于量子材料的一种，通常使用单晶生长工艺和分子束外延工艺制备，但这两种技术都不能轻易扩展用于半导体工业。



新型拓扑绝缘体材料的显微突破和表面形貌

2018年8月,美国明尼苏达大学开发了一种新“拓扑绝缘体”材料,可以提高计算机处理和存储的效率。

研究人员使用铋化硒 (Bi_2Se_3)，然后通过被称为“溅射”的薄膜沉积技术进行制备。虽然溅射技术在半导体工业中很常见，但这是第一次用于制造拓扑绝缘体材料。

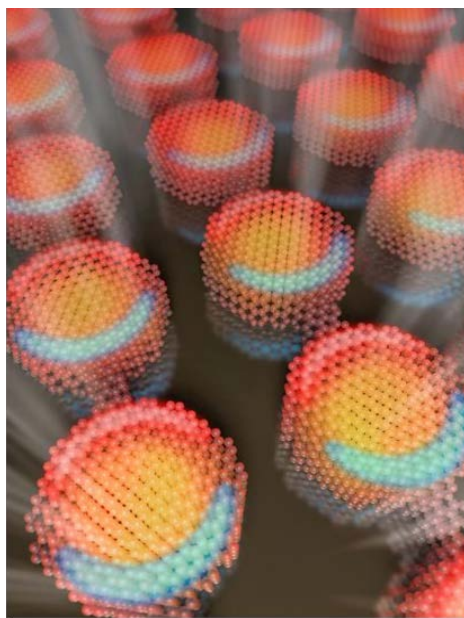


量子材料可为半导体行业带来技术飞跃

溅射的拓扑绝缘体层中出现的小于 6 纳米的晶粒展现了新的物理性质，改变了材料中电子的行为。测试结果表明，与现有材料相比，新材料的计算处理和存储的效率提高了 18 倍。这一发现可以为半导体行业以及相关行业（如磁性随机存取存储器技术）的更多进步敞开大门。

9. 美研制将中红外光转换为电信号的石墨烯器件

8 至 14 微米的中红外辐射在热成像和显示分子特异性光谱信息方面非常有用，可以近似无损地在空气中传播，在自由空间通信和遥感方面具有巨大的应用潜力。石墨烯可以将中红外光转换成等离子体激元，随后等离子体激元会转化为热量，这些等离子体激元衰变引起的电子温度升高远远高于其他材料。但室温条件下，石墨烯的电阻对温度非常不敏感，因此很难对中红外光进行电探测。



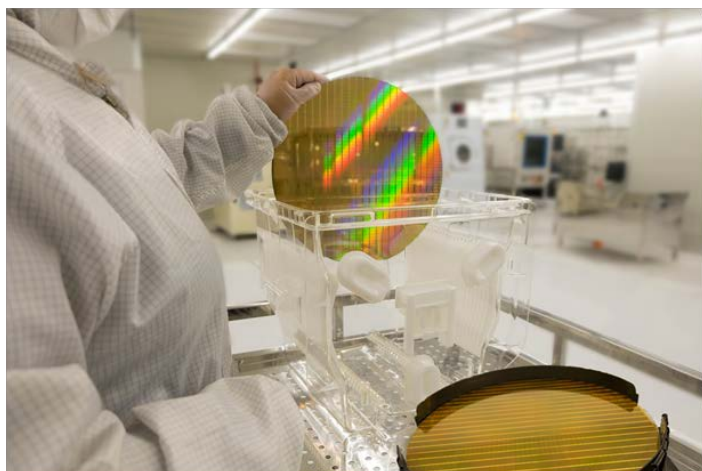
石墨烯中红外探测器的示意图

2018 年 9 月，美国耶鲁大学的科研人员与西班牙光子科学研究所使用准一维石墨烯纳米带来连接等离子体谐振器，合作研制出一种器件，可以在室温条件下使用石墨烯材料探测中红外光并将其转换为电信号。与石墨烯片不同，在窄石墨烯纳米带中，电子传输非常依赖电子的热能，其电阻对温升非常敏感，对中红外辐射的反应非常迅速。现有的室温热传感器具有较大的热容量和精心设计的隔热结构，通常需要几毫秒才能升温。而对于石墨烯，其响应速度是以纳秒计的，这使得石墨烯探测器非常适合中红外的高速自由空间通信应用，这超出了传统的在室温下操作的微测辐射热计的范围。

该器件结构非常简单且可扩展，占位面积甚至可以小于光的波长，在中红外光子学应用方面有很多可能，如制造具有亚波长像素的高分辨率中红外相机，集成到光子集成芯片上实现中红外光谱仪等。

10. 比利时首次在 300 毫米晶圆上直接生长二维材料

二维材料具有原子级精度，几乎不受短沟道效应的影响，可以为大幅缩减电子器件尺寸提供技术途径。



在 300 毫米晶圆上沉积的二硫化钨

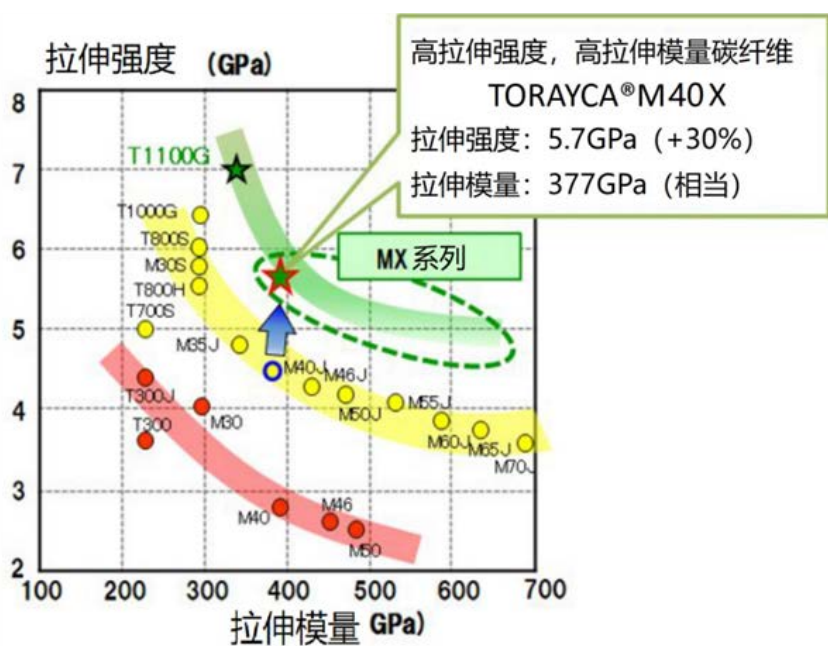


比利时微电子研究中心

2018 年 12 月，比利时微电子研究中心首次展示了在 300 毫米晶圆上，使用 2D 材料制造金属 - 氧化物硅场效应晶体管（MOSFET）器件。研究人员首先在晶圆平台上集成了一个由二硫化钨（ WS_2 ）组成的晶体管沟道。二硫化钨与其他大多数二维材料相比具有更高的导通电流能力和良好的化学稳定性。研究人员采用临时粘结和脱粘技术，将二硫化钨晶圆片使用 Brewer 科学公司的一种特殊配方的材料临时粘附在玻璃载体晶圆片上，再将 0.7 纳米的二硫化钨单层从生长晶圆片上机械剥离，并在真空中再次粘结到器件晶圆片上。载体晶圆片用激光剥离去除。这种脱粘技术是二维材料可控转移的关键技术。目前，这项工作仍然面临的主要挑战包括缩放二维材料栅极电介质的等效氧化厚度，以及降低沟道的缺陷率以提高移动性。

(五) 基础材料

1. 东丽高强高模 MX 系列碳纤维强度提升 30%



东丽新型高模碳纤维 MX 系列较 MJ 系列强度大幅提高

碳纤维的高拉伸强度与高拉伸模量不可兼得，是当前碳纤维研制难点。2018年11月，日本东丽公司通过严格控制纳米级石墨晶体结构，进一步将碳纤维强度和拉伸模量并行提高到最大限度，开发出新型的 TORAYCA® MX 系列碳纤维，同时具有高拉伸强度和拉伸模量，这种碳纤维将开辟其新的产品系

列。在新推出的 TORAYCA[®]MX 系列中，首个碳纤维 M40X 的抗拉强度较 M40J 提高了约 30%，同时保持与其相当的拉伸模量。东丽公司还将推出含有 TORAYCA[®]MX 系列碳纤维的预浸料，鉴于预浸料可以保持理想的刚度设计，同时保持强度，这种新碳纤维系列将有助于减轻航空航天复合材料部件的重量。

2. 德国大丝束碳纤维性能达航空航天级

当前碳纤维市场上，按丝束大小，可分为 12K、24K 等小丝束碳纤维产品和 24K 以上大丝束产品。大丝束碳纤维产品因为性能较小丝束产品低，所以航空航天领域主要采用高性能的小丝束碳纤维产品。



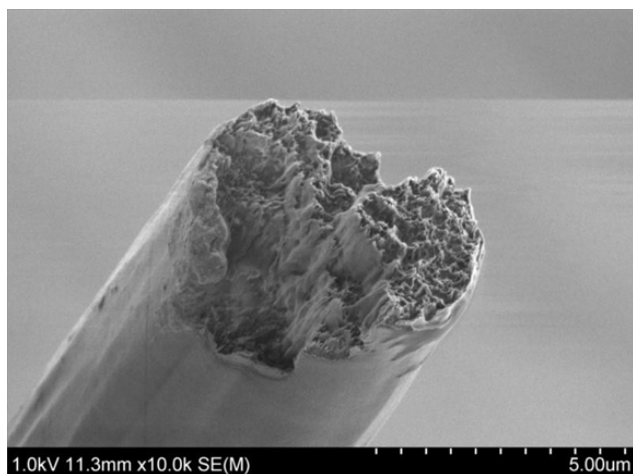
SGL 大丝束碳纤维产品达到了小丝束的性能

2018 年 2 月，德国西格里（SGL）集团开发了一款名为“SIGRAFIL C T50-4.8/280”的新型大丝束碳纤维产品，其特点是具有较高的力学性能，拉伸强度

4800MPa、弹性模量 280GPa，达到了小丝束 T700 级碳纤维性能。该产品是目前市场上唯一具有高杨氏模量的 50k(50000 根单丝)，特别适用于航空航天领域。同时，因其具备高比刚度、高比强度等优异力学特性，也可满足压力容器、驱动轴、型材和片状模塑料等工业产品的性能需要。

3. 瑞典开发世界上最强生物纤维优于钢铁和蜘蛛丝

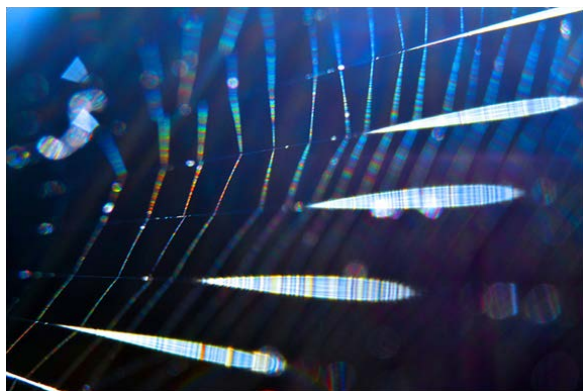
2018年6月，瑞典斯德哥尔摩KTH皇家理工学院生产出了迄今为止最强的造但可生物降解的纤维素纤维，强度大于钢，甚至超过比通常被认为是最强生物基材料的蜘蛛丝。



用扫描电子显微镜观察纤维素纳米纤维制成的人造纤维素纤维

研究人员从市售的纤维素纳米纤维入手，其直径仅为2-5纳米，长度可达700纳米。将纳米纤维悬浮在水中，然后送入一个宽度仅为1毫米的小通道并用钢制磨具进行碾磨。通过额外的去离子水和低pH值的水两组入流从侧面垂直进入通道，将纳米纤维挤压

浓缩到一起并加速这一过程。在整个过程中，不需要胶水或任何其他任何组分，纳米纤维仅通过纳米纤维之间的超分子相互作用力，如静电力和范德华力，完美的装配连接在一起形成更加紧密的超强纤维。制成的超强纤维厚度可达到 15 微米，长度可达数米。测量结果显示，这种生物基纳米纤维素纤维的拉伸刚度为 86 吉帕，拉伸强度为 1.57 吉帕，其强度是天然拉索蜘蛛丝纤维 8 倍，比钢铁、其他金属或合金、玻璃纤维和大多数其他合成材料的强度都要更强。人造纤维素纤维可以编织成织物以扩大器应用范围。研究人员估计，这种新材料的生产成本可以与目前强力合成织物的生产成本相竞争。此外，这种超强纤维原则上还可用于制造可生物降解的零部件。



蜘蛛丝纤维此前被认为是最强的生物基材料

联系人：陈济彬 胡燕萍

联系电话：010-57827746

联系地址：北京市朝阳区小关东里 14 号中航发展大厦

邮编：100029