

先进制造与新材料动态

ADVANCED MANUFACTURING AND MATERIALS NEWSLETTER

监测快报

2024 第15期
(总第445期)

本期要目

- 美发布应对塑料污染新战略
- “制造业美国”拟再建新所 聚焦 AI 赋能制造业
- 美 3300 万美元资助面向清洁能源转型的智能制造技术
- 欧韩启动联合芯片项目
- 英资助五个量子研究新中心
- 欧报告显示中国光子产业发展迅猛
- 向金属“借”位错提升陶瓷拉伸塑性

中国科学院武汉文献情报中心

目 录

战略规划

- 美发布应对塑料污染新战略 1
- “制造业美国” 拟再建新所 聚焦 AI 赋能制造业 2

项目资助

- 美 3300 万美元资助面向清洁能源转型的智能制造技术 2
- 欧韩启动联合芯片项目 4
- 美 DOC 投资 4 亿美元增加本土硅片产量 5
- 美 DARPA 拟成立首个国家级 3D 异构集成微电子制造中心... 6
- 新成像技术助力应对气候变化 6
- 英资助五个量子研究新中心 7

行业观察

- 欧报告显示中国光子产业发展迅猛 8

研究进展

- 新型低成本高效丙烯生产催化剂 9
- AI 加快材料热性能预测 10
- 机器学习揭开金属短程有序原子排列 11
- 非破坏性电池阴极材料回收新方法 11
- 高通量计算与原子尺度制造加速量子材料发现 12
- 氮化铝钪薄膜：实现下一代铁电存储器件 13
- 向金属“借”位错提升陶瓷拉伸塑性 13

美发布应对塑料污染新战略

7月19日，美国白宫发布首个针对塑料生产、加工、使用和处理过程中的污染问题的综合性政府战略：《动员联邦行动应对塑料污染：进展、原则和优先事项》(Mobilizing Federal Action on Plastic Pollution: Progress, Principles, and Priorities)，宣布到2027年逐步停止联邦在餐饮服务、活动和包装过程中一次性塑料制品采购，到2035年停止所有联邦业务中的一次性塑料制品¹。

这一政策的基础是“通过联邦可持续发展促进清洁能源产业和就业的行政命令”和“联邦可持续发展计划”。其中，“联邦可持续发展计划”要求政府实现净零采购，逐步淘汰一次性塑料产品。通过选用可重复使用、可堆肥和高度可回收的产品，实现这一新的目标。

根据政策要求，多部门将联手应对塑料污染问题。其中，环境保护署通过向塑料和化学品产地居民提供健康保护、减少有害污染物排放、增加“有毒物质释放清单”等举措来应对化学制造带来的污染问题。内政部发布行政命令，要求减少一次性塑料制品采购、销售和分发活动，并计划在2032年前逐步淘汰这些产品。环境保护署投资2.75亿美元用于建设回收、堆肥、再利用等基础设施，并向废弃物管理工作人员提供技术支持。国家海洋和大气管理局为首批29个海事项目提供近7000万美元资金，用于预防和清除海洋垃圾。

(蒿巧利)

¹ FACT SHEET: Biden-Harris Administration Releases New Strategy to Tackle Plastic Pollution, Takes Action to Reduce Single-Use Plastics in Federal Operations.
<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2024/07/19/fact-sheet-biden-harris-administration-releases-new-strategy-to-tackle-plastic-pollution-takes-action-to-reduce-single-use-plastics-in-federal-operations/>

“制造业美国”拟再建新所 聚焦 AI 赋能制造业

7月22日，美国国家标准与技术研究院（NIST）宣布对一家新的“制造业美国”研究所进行公开竞标，该研究所将专注于利用人工智能（AI）赋能制造业，提升从业人员能力，创建安全、有韧性的供应链²。

NIST 预计在未来五年为研究所提供 7000 万美元的资助，这一额度与之前建立的研究所相同。新研究所重点关注三个主要业务领域：推进技术开发、培养训练有素的从业人员，以及共享基础设施。

（万 勇）

项目资助

美 3300 万美元资助面向清洁能源转型的智能制造技术

美国能源部（DOE）先进材料与制造技术办公室将投资 3300 万美元，加速开发和部署智能制造技术和工艺，提高技术性能、生产力、质量和安全性，推动美国清洁能源转型³。

² NIST Announces Funding Opportunity for AI-Focused Manufacturing USA Institute.

<https://www.nist.gov/news-events/news/2024/07/nist-announces-funding-opportunity-ai-focused-manufacturing-usa-institute>

³ \$33 Million in Funding Available To Advance Smart Manufacturing Technologies To Help Accelerate a Clean Energy Economy.

<https://www.energy.gov/eere/ammt/articles/33-million-funding-available-advance-smart-manufacturing-technologies-help>

本次资助包含以下四个主题。

（1）面向循环经济的智能制造

开发智能制造解决方案，提高循环供应链效率和经济性。具体技术领域包括：①开发用于改进分选和表征的智能制造技术，促进材料回收和循环；②开发更具互操作性和开放性的供应链，促进材料的重复使用、修理、翻新、再制造或再利用；③提升循环回收数据可用性和透明度，提高市场对二次材料的接受度。

（2）面向可持续交通的工具和设备的智能制造

更快、更经济地制造用于电动汽车的工具和设备，同时减少组件缺陷并实现新功能。具体技术领域包括：①将硬件和软件系统集成到制造工具和设备中，提高组件生产率；②提高工具与设备、工业控制和自动化网络的性能，如成本、质量和吞吐量。

（3）面向高性能材料的智能制造

推动清洁能源转型的高性能材料及其制造工艺的开发、验证和原型设计。具体技术领域包括：①为高电导率材料和适应恶劣环境材料的合成/测试开发高通量策略；②利用各种智能制造工具实现高性能材料制造、组装和规模化生产。

（4）面向美国矿业的智能制造

开发新型智能制造技术，提升美国采矿业的可持续性、安全性和竞争力，使关键矿物和材料的美国国内供应更具韧性和安全性。具体技术领域包括：①利用传感器、控制和自动化等智能制造技术提升采矿作业健康、安全、环境和经济效益；②建立低成本、低门槛的传感、分析和数据驱动决策。

（黄 健）

欧韩启动联合芯片项目

作为双边数字伙伴关系的成果之一，欧盟与韩国宣布支持四个联合资助的三年期半导体项目，总资助额约为 1200 万欧元，将推动异构集成技术和神经形态计算技术在下一代人工智能半导体、自动驾驶等领域的应用⁴。

(1) ENERGIZE 项目

开发“薄如晶圆”的智能节能设备及电路，用于边缘人工智能计算，使其能够在现场处理数据，而不需要数据中心，进而提高设备效率和性能。应用领域包括物联网、可穿戴和医疗设备等。

(2) NEHIL 项目

使用类脑计算制造一种超高效的激光雷达 (LIDAR)，将识别物体等任务的电力使用量减少一半，使激光雷达能够在恶劣天气下更好地工作，并提高其性价比。

(3) HAETAE 项目

将开发一个平台，通过整合不同的材料，创建快速、低功耗的 AI 电路，显著提升 AI 芯片性能，使其能够更加广泛用于保护计算机系统免受攻击、通用 AI 任务和光学数字信号处理等领域。

(4) ViTFOX 项目

将开发新型视觉转换器，这是一个智能 AI 模型，可以帮助计算机处理视觉信息。铁电材料能够在断电时记录其电子状态，使用该材料可有效提高 AI 模型的能源效率。该项目将设计与内存一起工作的部件，并对其进行优化，实现低功耗运行。

(尹 伟)

⁴ EU-Republic of Korea Digital Partnership - Joint EU/Republic of Korea Chips Projects announced.
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/eu-republic-korea-digital-partnership-joint-eurepublic-korea-chips-projects-announced>

美 DOC 投资 4 亿美元增加本土硅片产量

7 月 17 日,美国商务部(DOC)与 GlobalWafers 子公司 GlobalWafers America 和 MEMC 签署了一份初步条款备忘录(PMT),这是 DOC 根据《芯片与科学法案》签署的第 13 份 PMT,将向其提供高达 4 亿美元的直接资金,用于建设新的晶圆制造设施,扩大美国国内硅片生产能力,加强美国关键半导体元件的供应链⁵。

GlobalWafers 将在得克萨斯州建立首个用于先进芯片的 300 mm 硅片制造工厂;在密苏里州建立一个生产 300 mm 绝缘底上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)晶片的工厂,SOI 通常用于国防和航空航天领域。GlobalWafers 准备对其位于得克萨斯州的硅外延晶片制造工厂进行改造,将其中一部分转换为碳化硅(SiC)外延晶片制造,用于生产 150 mm 和 200 mm 的 SiC 外延晶片。SiC 外延晶片主要应用于电动汽车和清洁能源基础设施等领域。

此外,GlobalWafers 还将支持得克萨斯州和密苏里州当地半导体劳动力的发展,参与北得克萨斯州半导体劳动力发展联盟,并与多个学院合作建立创新合作伙伴关系,提供有针对性的技术人员认证培训,为维修技术人员制定学徒计划等。

【快报延伸】

硅片是半导体生态系统中的关键组件,包括 GlobalWafers 在内的五家公司目前占据了全球 300 mm 硅片制造市场的 80%以上,而目前约 90% 的硅片来自东亚。

通过 13 份 PMT,DOC 计划提供高达 301 亿美元的拟议资金,以振兴美国半导体产业。这些拟议投资预计将释放 3000 多亿美元的公共和私人投资。

(董金鑫)

⁵ Biden-Harris Administration Announces Preliminary Terms with GlobalWafers to Significantly Increase Production of Silicon Wafers in U.S.
<https://www.commerce.gov/news/press-releases/2024/07/biden-harris-administration-announces-preliminary-terms-globalwafers>

美 DARPA 拟成立首个国家级 3D 异构集成微电子制造中心

7 月 18 日，美国国防部先进研究计划局（DARPA）网站发布消息称，“下一代微电子制造计划”（Next-Generation Microelectronics Manufacturing program, NGMM）拟通过新协议建立首个国家级中心，推进美国本土的微电子制造，并实现未来芯片的便捷原型设计⁶。

DARPA 将与得克萨斯大学奥斯汀分校及下属的得克萨斯电子研究所研究中心合作，建立一个合作联盟，支持 3D 异构集成（3DHI）微系统的研究、开发和小批量生产。DARPA 微系统技术办公室表示，首要任务是建立一个本土、开放的 3DHI 微系统原型设计和试验线制造中心。

（尹 伟）

新成像技术助力应对气候变化

英国工程与自然科学研究理事会（EPSRC）出资 500 万英镑，用于资助斯特拉斯克莱德大学建设高速成像设施 IM3AGES⁷。

该设施利用 X-射线计算机断层扫描（XCT）变革观察、理解材料和过程及其与环境相互作用的方式，以及它们随时间的变化情况。XCT 通过四维（三维+时间）成像技术，能够更加深入地了解材料随时间推移如何与环境相互作用，并捕捉这些相互作用对材料性质和性能的影响。

该设施可以帮助研究人员通过新的材料及回收技术，减少 CO₂ 含量，实现更加可持续地物品制造。包括：从垃圾填埋场回收材料；塑料的低碳替代品；制造业脱碳、扩大 CO₂ 存储能力；利用余热和地热能等。该设施还将发现新方法，延长材料使用寿命，并更好地应对气候变化，如低碳方法修复建筑物中的钢筋蒸压加气混凝土（Reinforced Autoclaved Aerated Concrete, RAAC）；提升防洪能力；寻找预防山体滑坡的方法等。

（尹 伟）

⁶ DARPA Brings Next-Gen US Microelectronics Manufacturing Closer to Reality.
<https://www.darpa.mil/news-events/2024-07-18>

⁷ New imaging tech will help in fight against climate change.
<https://www.ukri.org/news/new-imaging-tech-will-help-in-fight-against-climate-change/>

英资助五个量子研究新中心

7月26日，英国政府宣布向五个新的量子研究中心提供超过1亿英镑的资金支持，用于挖掘量子技术在医疗扫描仪、安全通信网络和下一代定位系统等领域的应用价值，推动医疗保健、网络安全和交通运输等领域的突破性进展⁸。

五个新中心将设在英国五个地区，包括格拉斯哥、爱丁堡、伯明翰、牛津和伦敦，具体情况如下。

（1）英国量子生物医学传感研究中心

伦敦大学学院和剑桥大学牵头，探索用于疾病诊断的超灵敏量子传感器，包括快速血液检测和生物医学扫描仪，促进癌症和阿尔茨海默病等疾病的早期诊断和治疗。

（2）英国传感、成像和计时量子技术中心

伯明翰大学牵头，重点开发量子传感的实际应用，包括用于痴呆症和癌症诊断的大脑扫描仪，以及先进的安全和基础设施监控。

（3）集成式量子网络量子技术中心

爱丁堡赫瑞瓦特大学牵头，旨在为英国未来的“量子互联网”提供技术支持，实现面向未来的网络安全和强大的分布式量子计算。

（4）基于集成和互联的量子计算中心

牛津大学牵头，开发用于构建量子计算机的技术，提高英国在硬件和软件方面的能力，并致力于在各行业领域的广泛应用。

（5）英国量子定位、导航和授时中心

格拉斯哥大学牵头，为关键基础设施、自动驾驶汽车以及室内和水下导航创建基于量子的定位和导航系统。

（蒿巧利）

⁸ Over £100 million boost to quantum hubs to develop life-saving blood tests and resilient security systems.
<https://www.gov.uk/government/news/over-100-million-boost-to-quantum-hubs-to-develop-life-saving-blood-tests-and-resilient-security-systems>

欧报告显示中国光子产业发展迅猛

7月，欧洲光子学技术平台 Photonics21 发布主题为中国光子产业的市场研究报告（*Political Steering Processes in China in Core Segments of the Photonics Industry*）。该报告由国际管理咨询公司 EAC 完成。报告指出，中国光子产业发展迅猛，在过去 20 年中，全球市场份额从 10% 增长到了 30% 以上，而美国和欧洲均仅占 15%。预计到 2025 年，中国光子产业将达到 3150 亿欧元⁹。

该研究预测，未来几年，中国地方政府、投资机构和企业将向光子领域提供约 50 亿欧元的资金。这其中，公共资金仅占 20%-30%，剩下的 70%-80% 主要来自投资机构和企业。报告指出，中国光子产业集群主要坐落在苏州、无锡、武汉、北京、西安、上海和粤港澳大湾区等八个区域，每个地区都有各自的发展重点和战略。

报告显示，中国将在 2024 年进入“国家集成电路产业投资基金”第三期，该阶段的预算为 390 亿欧元，集成光子学是受资助的技术之一。研究报告敦促欧洲及时采取措施，围绕关键行业和技术的关键材料及器件，实施欧盟层面的宏观战略，加大资金投入，确保经济竞争力和技术独立性，并缩小与中国的差距。

（陈安邦、万勇）

⁹ Experts Urge EU to Increase Investment in Photonics or Risk Falling Behind China.
<https://www.photonics21.org/2024/experts-urge-eu-to-increase-investment-in-photonics-or-risk-falling-behind-china>

新型低成本高效丙烯生产催化剂

丙烯是重要的石油化工中间体，聚丙烯、聚丙烯腈、丙烯醛及丙烯酸快速发展极大地促进了全球丙烯需求量的快速增长。丙烷是价格低廉且资源丰富的自然资源，利用催化剂将低价值丙烷转化为经济价值更高的丙烯一直是化学界研究热点。

目前将丙烷转化为丙烯的催化剂通常以氧化铝或二氧化硅为载体材料，铬或铂等金属颗粒作为催化材料。美国阿贡国家实验室 David Kaphan、Massimiliano Delferro 领导的研究团队发现，将四苄基锆($ZrBn_4$)化学吸附在 Si_3N_4 上构建的催化剂，在将丙烷转化为丙烯过程中具有更优良的催化效果¹⁰。

实验结果显示，该催化剂可将反应的转化温度从 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $450\text{ }^\circ\text{C}$ ，能耗更低；而在同一温度下，比其他催化剂具有更快的转化速度。此外，与铂等贵金属相比，利用锆作为催化材料的成本更低。艾姆斯实验室使用动态核极化增强核磁共振技术，分析了 Si_3N_4 与金属位点的反应机理，深化了对锆/ Si_3N_4 催化剂结构的了解。

上述研究工作发表在 *J. Am. Chem. Soc.* (文章标题: Silicon Nitride Surface Enabled Propane Dehydrogenation Catalyzed by Supported Organozirconium)。

(黄 健)

¹⁰ Researchers discover faster, more energy-efficient way to manufacture an industrially important chemical.
<https://www.anl.gov/article/researchers-discover-faster-more-energyefficient-way-to-manufacture-an-industrially-important>

AI 加快材料热性能预测

声子是携带热量的亚原子粒子，材料的一部分热特性就取决于声子色散关系测量值。然而，该测量值很难获得，更不用说在系统设计中使用。人们一直尝试使用机器学习来预测声子色散关系，但涉及的高精度计算太多，使得模型陷入困境。

美国麻省理工学院 Ryotaro Okabe 团队建立了一个新的机器学习框架，可以帮助工程师设计出更高效的能量转换系统和更快速的微电子设备，并减少废热的产生。通过预测热量中的声子色散关系，这种方法将有助于工程师设计出更高效的发电系统¹¹。

研究人员通过在固定晶体结构中添加一系列灵活的虚拟节点来代表声子，创造出虚拟节点图神经网络（virtual node graph neural network, VGNN）。虚拟节点可以改变神经网络的输出大小，因此不受固定晶体结构的限制。在估计声子色散关系时，VGNN 可以跳过许多复杂的计算，使得该方法比标准图神经网络更高效。实验显示，该框架速度比其他基于人工智能的技术快 1000 倍，而且精度更高；与传统的、非人工智能方法相比，更是快 100 万倍。在一些情况下，该技术的预测误差比其他方法要低两个数量级。此外，虚拟节点技术并非声子独有，还可用于预测光学和磁学特性等。

上述研究工作发表在 *Nature Computational Science*（文章标题：Virtual node graph neural network for full phonon prediction）。

（尹 伟）

¹¹ AI method radically speeds predictions of materials' thermal properties.
<https://news.mit.edu/2024/ai-method-radically-speeds-predictions-materials-thermal-properties-0716>

机器学习揭开金属短程有序原子排列

破译金属合金中的“短程有序”（short-range order, SRO）是开发更坚固、耐热等高性能合金的关键一步。然而，了解原子排列方式并非易事，需要通过大量实验或者基于尚不完美模型的计算机模拟来进行验证。

麻省理工学院 Rodrigo Freitas 团队利用机器学习，逐个原子地量化了构成 SRO 的复杂化学排列，这对于航空航天、生物医学、电子等领域定制材料的设计至关重要¹²。

研究人员将高熵合金中的晶体结构描绘成图画书中的连线游戏，以便利用机器学习来研究 SRO。通过 3D 欧几里得神经网络，研究人员能够更加精细地识别化学基序（chemical motifs），逐个原子地进行检验。研究团队还将利用全球最快的超级计算机 Frontier，探索 SRO 在铸造、冷轧等常规加工条件下的变化情况。

上述研究工作发表在 *PNAS*（文章标题：Quantifying chemical short-range order in metallic alloys）。

（尹伟）

非破坏性电池阴极材料回收新方法

从废电池回收锂的传统方法通常基于能源密集型的热或化学过程将电池材料分解成元素形式，其成本高昂且对环境有重大影响。美国莱斯大学 James Tour 团队开发出一种从电池废料中提取纯化活性材料的新方法，有望促进电池材料的高效分离和回收，推动电动汽车绿色生产¹³。

研究人员首先将电池阴极废料与导电添加剂混合，然后使用闪光焦耳加热法（FJH）将其加热至高温，形成具有磁性外壳和稳定内核结构的独特材料。随后，利用磁分离技术可以轻松地将正极材料钴酸锂与其他成分分离。经过一系列优化步骤后，最终实现了高达 98% 的电池金属回

¹² Machine learning unlocks secrets to advanced alloys.
<https://news.mit.edu/2024/machine-learning-unlocks-secrets-advanced-alloys-0718>

¹³ Rice researchers develop innovative battery recycling method
<https://news.rice.edu/news/2024/rice-researchers-develop-innovative-battery-recycling-method>

收率，并且有效降低了金属杂质含量。该方法还保持了电池材料的原始结构和功能，意味着回收的材料可重新用于生产新电池或其他电子产品。

上述研究工作发表在 *Nature Communications*（文章标题：Nondestructive flash cathode recycling）。

（董金鑫）

高通量计算与原子尺度制造加速量子材料发现

美国劳伦斯伯克利国家实验室领导的联合研究团队展示了一种加速量子材料发现的新方法。该方法将高通量计算和原子尺度制造技术相结合，提高材料筛选效率并降低实验成本，加速发现具有特定功能的量子材料，在计算、电信和传感器等领域实现颠覆性应用¹⁴。

研究人员以发现高性能量子缺陷为目标，聚焦二维材料中的二硫化钨（WS₂），综合考虑杂质原子类型以及量子缺陷位置，利用自主开发的最先进的高通量计算方法，快速筛选并准确预测了数百种材料的特性，确定了最有前途的材料清单，比如发现了一个用钴原子替换硫原子而形成的缺陷具有特别好的量子性质。然后，研究人员开发并应用具有原子精度的制造技术来制造清单上的材料，并进一步通过实验评估其特性。在超低温真空中加热二维 WS₂ 样品，使用氩离子以适当的角度和能量喷射其表面弹出一小部分硫原子，在材料中留下微小孔洞。然后在材料表面施加钴原子雾，同时利用扫描隧道显微镜金属尖端找到一个小孔，将钴原子推入其中，类似于打高尔夫球。最后，研究人员利用显微镜尖端测量了钴缺陷的电子特性。

上述研究工作发表在 *Nature Communications*（文章标题：A substitutional quantum defect in WS₂ discovered by high-throughput computational screening and fabricated by site-selective STM manipulation）。

（蒿巧利）

¹⁴ A New Approach to Accelerate the Discovery of Quantum Materials.
<https://newscenter.lbl.gov/2024/07/17/a-new-approach-to-accelerate-the-discovery-of-quantum-materials/>

氮化铝钪薄膜：实现下一代铁电存储器件

东京工业大学 Kazuki Okamoto、Hiroshi Funakubo 团队的研究显示，氮化铝钪（AlScN）铁电薄膜在 600 °C 的高温下仍能稳定存在，并保持铁电性能，有望用于下一代铁电存储器件¹⁵。

为了使铁电材料与氢气氛围下的高温制造工艺实现相容，剩余极化（ P_r ）和矫顽场（ E_c ）是两个关键参数。研究人员在 400 °C 下，利用溅射方法在硅衬底上沉积了 $(Al_{0.8}Sc_{0.2})N$ 薄膜，并置于铂（Pt）和氮化钛（TiN）两个电极之间。在 800 Torr 压力的氢气和氩气环境下，在 400 °C-600 °C 温度范围内，对薄膜进行了 30 分钟的后热处理。实验结果显示，薄膜保持了稳定的铅锌矿型晶体结构， P_r 稳定在 $120 \mu C/cm^2$ 以上，分别是 HfO_2 薄膜和 PZT 的 3 倍和 5 倍；而 E_c 仅略微增长约 9%。

上述研究工作发表在 *Applied Physics Letters*（文章标题：High stability of the ferroelectricity against hydrogen gas in (Al,Sc)N thin films）。

（陈安邦、万 勇）

向金属“借”位错提升陶瓷拉伸塑性

北京科技大学陈克新、北京工业大学王金淑、香港大学黄明欣等组成的联合团队首次实现陶瓷的室温大变形拉伸塑性，标志着在结构陶瓷领域取得重要进展¹⁶。

研究团队首创性提出向金属“借位错”的策略。在之前的工作基础上，进一步实现了陶瓷的大变形拉伸塑性，陶瓷的拉伸形变量达 39.9%，强度约 2.3 GPa。研究人员在金属和陶瓷之间设计了一种有序结合的共格界面，该界面通过化学键结合的方式，有效提高了界面的结合强度，确保界面不开裂。同时，该有序界面还保证了金属-陶瓷晶面的连续性，有效降低位错传递的势垒，使金属位错可以轻松地“借”到陶瓷内部。

¹⁵ Aluminum Scandium Nitride Films: Enabling Next-Gen Ferroelectric Memory Devices.
<https://www.titech.ac.jp/english/news/2024/069677>

¹⁶ 我校新金属材料国家重点实验室陈克新研究员团队在《Science》刊发重磅成果，世界上首次实现该突破！
<https://skl.ustb.edu.cn/xwzx/sysxw/f60049afb295401fb9d3e1f24b7f2698.htm>

上述研究工作发表在 *Science* (文章标题: Borrowed dislocations for ductility in ceramics)。

(北京科大)

中国科学院武汉文献情报中心
先进制造与新材料情报研究



微信扫一扫，关注我们

编辑：中国科学院武汉文献情报中心战略情报部
地址：湖北省武汉市武昌区小洪山西 25 号
电话：027-8719 9180
传真：027-8719 9202
邮箱：[amto at whlib.ac.cn](mailto:amto@whlib.ac.cn)