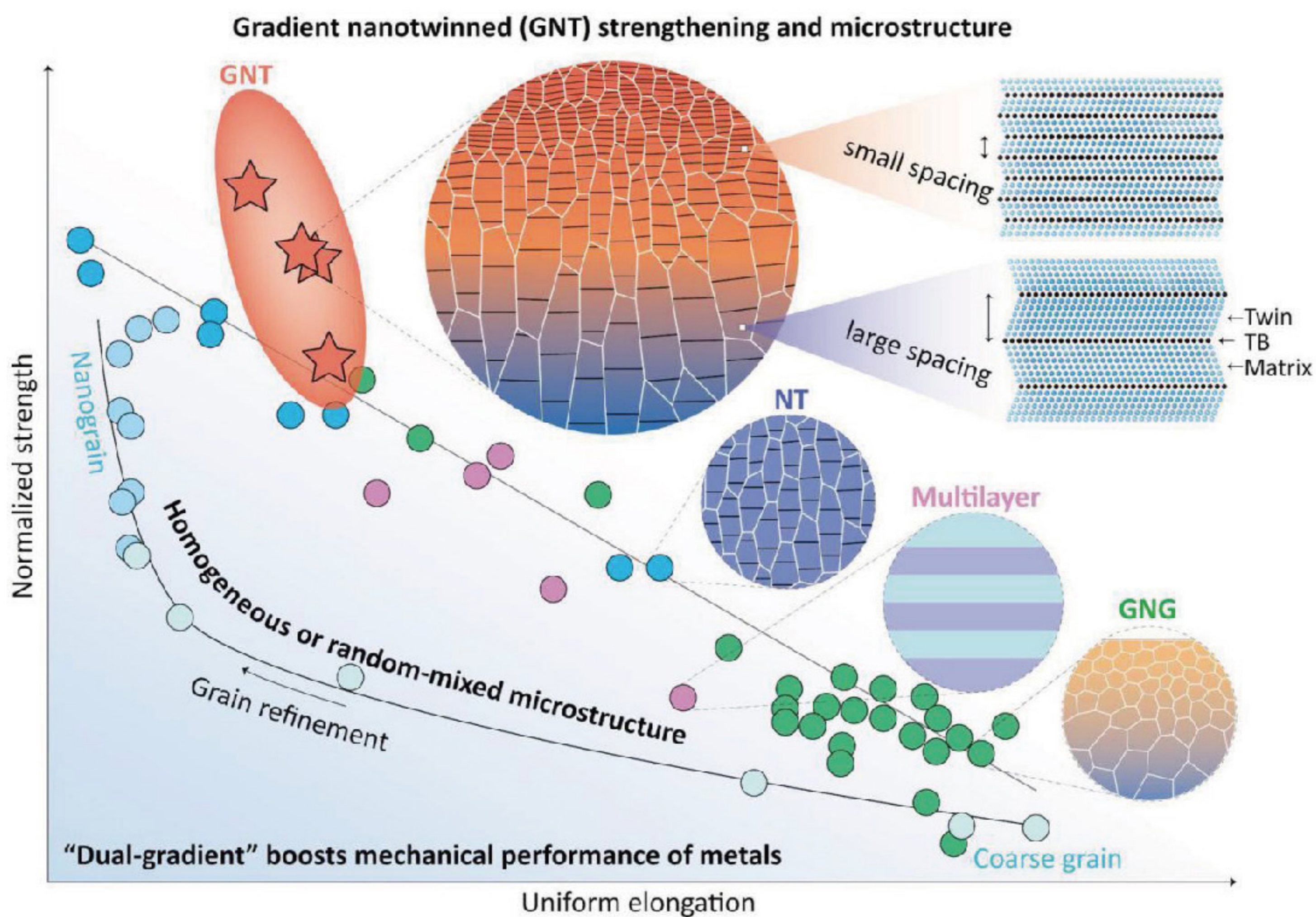


梯度纳米孪晶金属中的额外强化与加工硬化研究取得重要突破



梯度纳米孪晶金属中的额外强化与加工硬化研究取得重要突破

自然界中梯度结构无处不在。近来，微观结构梯度的概念被越来越多地应用于工程材料中。鉴于其独特的变形机制，梯度结构材料普遍表现出较好的强度、硬度、加工硬化及抗疲劳性能等。但如何理解结构梯度对力学性能的影响规律长期以来面临巨大挑战。其原因之一是现有技术很难制备出结构梯度精确可调控的块体材料，如表面加工或机械处理技术所获样品梯度层体积分数及结构梯度均有限，从而严重限制了人们对梯度结构金属内在梯度与力学性能相关性以及其本征变形机制的理解。

最近，中国科学院金属研究所卢磊研究员课题组和美国布朗大学高华健教授研究组合作在这一领域取得突破性进展。他们发现增加结构梯度可实现梯度纳米孪晶结构材料强度和加工硬化的协同提高，甚至可超过梯度微观结构中最强的部分。梯度纳米孪晶强化的概念结合了多尺度结构梯度，进一步提高了材料的强度极限，并为发展新一代高强度/延性金属材料提供了新思路。

研究人员利用直流电解沉积技术，通过调节电解液温度，实现孪晶片层厚度和晶粒尺寸沿样品厚度的梯度变化，获得结构梯度定量可控的纳米孪晶铜材料。随结构梯度增加，梯度纳米孪晶铜强度和加工硬化率同步提高；结构梯度足够大时，梯度材料的强度甚至超过了梯度微观结构中最强的部分。这种独特的强化行为在其它均匀、非均匀微观结构中均未观察到。微观结构分析与分子动力学计算模拟结合发现，梯度纳米孪晶铜

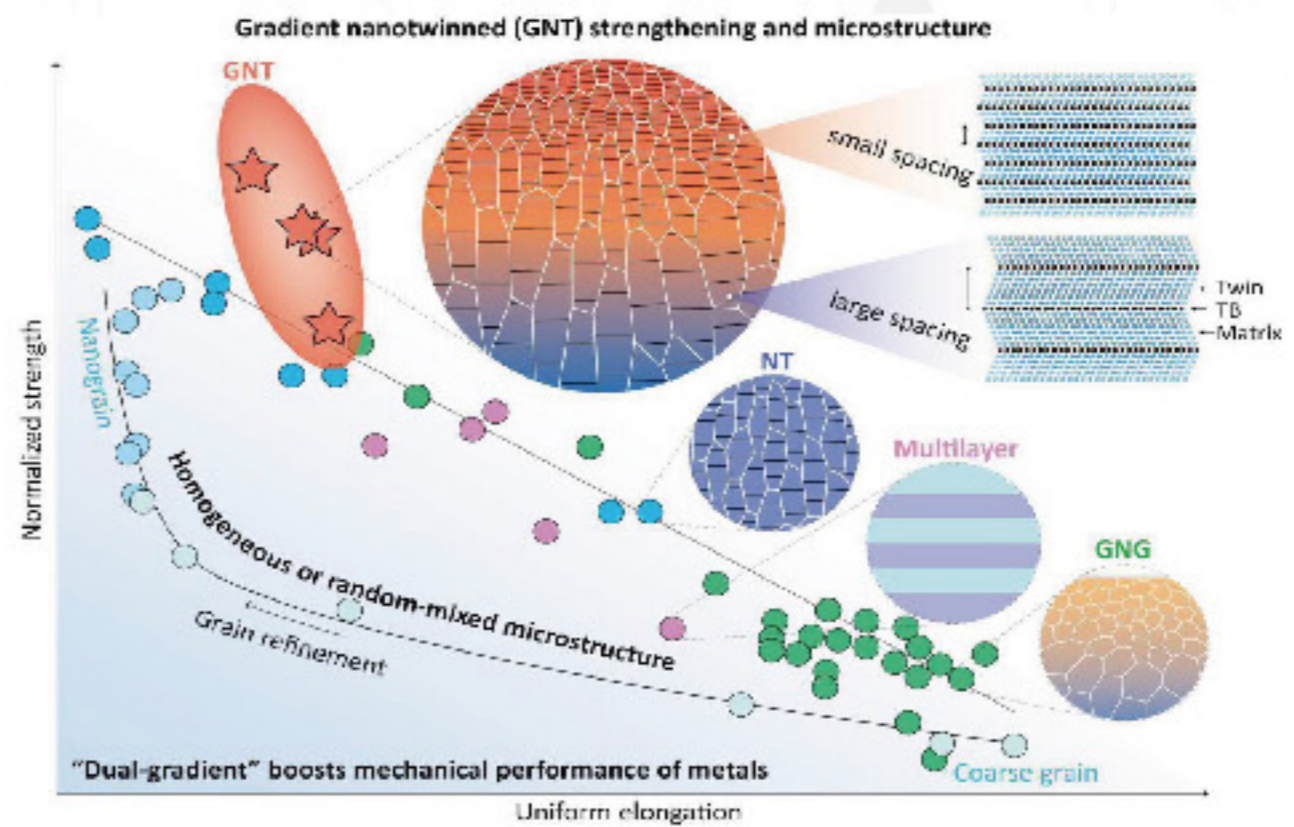


图1 梯度纳米孪晶结构引起金属材料的额外强化和塑性。梯度纳米孪晶结构（GNT）具有孪晶片层厚度和晶粒尺寸的空间梯度结构。该材料表现出了良好的强-塑性协同，其屈服强度甚至超过了梯度微观结构中最强的部分。梯度纳米孪晶结构综合拉伸性能优于及依靠非均匀结构变形机制强化的梯度纳米晶结构（GNG）和层状结构（multilayer）以及均匀纳米孪晶（NT）等结构。

额外的强化和加工硬化归因于梯度结构约束而产生的大量几何必需位错富集束。这些位错富集束在变形初期形成，沿着梯度方向均匀分布在晶粒内部。这种均匀分布的位错束结构与均匀结构材料中随机分布的统计储存位错结构截然不同。具有超高位错密度的位错富集束变形过程中通过阻碍位错运动、有效抑制晶界应变局域化从而提高梯度纳米孪晶结构的强度和加工硬化。

该研究获得国家自然科学基金委国际合作重点项目、科技部国家重点基础研究发展计划、中国科学院前沿科学重点研究等项目资助。该成果在Science发表（2018年11月2日在线Advance Online Publication (AOP) on Science's website）。

高性能柔性复合热电材料研究取得重要进展

热电材料是一种不需任何外力即可将“热能”与“电能”相互转换的“绿色”能源材料，可利用生活、生产中的废热发电，或在施加偏压

条件下实现热量的精准传输，被广泛应用于温差电池供电、微系统芯片控温制冷等领域。传统的热电材料为无机共价键/离子键晶体，例如碲化铋

(Bi_2Te_3)是目前应用最广的热电材料,其周期性层状结构内为共价键/离子键连接,而层间为弱范德华力连接,因而具有本征的脆性,不能发生柔性变形。传统热电材料在实际应用中无法紧密贴合具有复杂曲率变化的热源表面(如热源管道、人体体表等),这种不良热接触导致热量散失和较低的热电转化效率;同时也难以适应热电器件日趋微型化和高度集成化发展的需要。因此,高性能柔性热电材料的研发已成为本领域研究的重点和难点。

近期,中国科学院金属研究所邵凯平研究员课题组、刘畅研究员课题组与合作者研制出一种高性能碲化铋/单壁碳纳米管($\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{SWCNT}$)柔性热电材料。研究人员采用自主设计改进的磁控溅射沉积系统,以具有优异力学和电学性能的自支撑碳纳米管三维网络为骨架,利用亚纳米尺度的碳管束沟槽

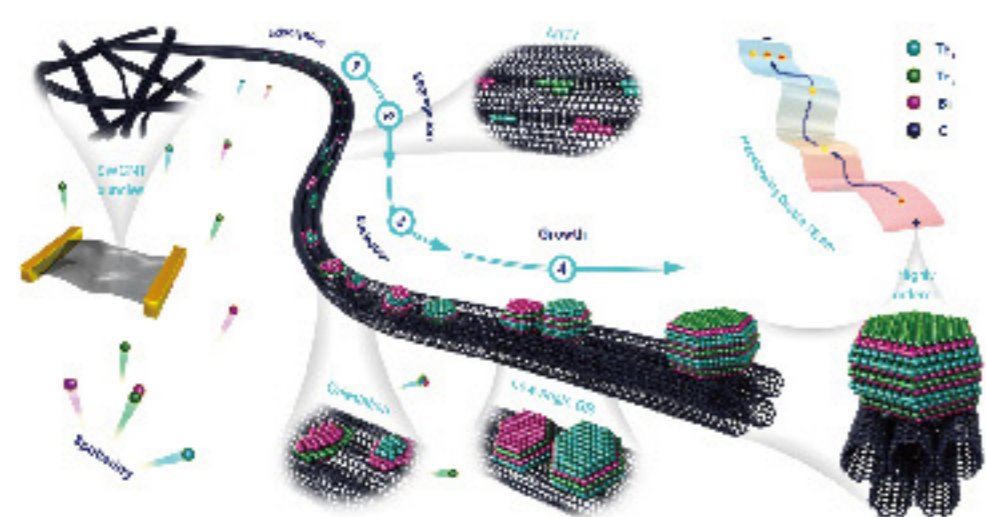


图1 Bi_2Te_3 -SWCNT复合自支撑热电薄膜材料生长结构示意图

限制扩散和诱导有序形核以及薄膜材料的温度选择性晶面生长机理,首次制备出具有高度有序显微特征的 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{SWCNT}$ 复合自支撑热电薄膜材料。该复合材料具有纳米孔隙结构,沉积的 Bi_2Te_3 纳米晶粒紧密附着于碳纳米管束表面,且具有高度(0001)面织构, Bi_2Te_3 $\langle -12-10 \rangle$ 晶向平行于碳纳米管束轴线,相邻 Bi_2Te_3 纳米晶粒间为小角度取向倾转晶界。 Bi_2Te_3 (0001)面织构有利于提高载流子面内传导,小角度晶界能进一步降低其对于传导载流子的散射作用,纳米孔隙结构和 $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{SWCNT}$ 界面等缺陷起到散射声子降低热导率的作用。研究显示在这种(0001)面织构中,经弱范德华力连接的-Te1-Te1-原子面平行于复合薄膜自由表面,范德华力层间的相对运动是复合薄膜沿面外弯曲变形时表现出良好柔性的重要机制,相邻 Bi_2Te_3 $\langle -12-10 \rangle$ 晶向高度取向一致,

且为(0001)范德华力晶面上的易滑移方向,这有利于范德华层间位移在相邻晶粒间的传递。此外,纳米孔隙结构也有利于容纳材料柔性变形时的相对位移,进一步提高柔性变形能力。独特的显微结构赋予该复合材料在室温至100摄氏度范围内,沿(0001)面内方向的热电优值(ZT)高达~0.9,与商用块体脆性热电材料ZT性能相当,同时具有非常优异的弯曲柔性力学性能。进一步研究表明,由于该复合材料具有良好的弯曲柔性与自支撑结构,因此可使用离子束、飞秒激光等微纳加工方法将其裁剪成任意几何形状和转移至各种类型的基底上,有利于灵活方便地制备各种结构的热电器件,甚至可以通过静电力等非接触式方法操控该复合热电材料。同时,研究表明该复合材料的制备原理和技术可同样适用于其他具有弱范德华力连接的层状结构半导体材料体系,在柔性半导体材料和器件领域具有广泛的应用前景。

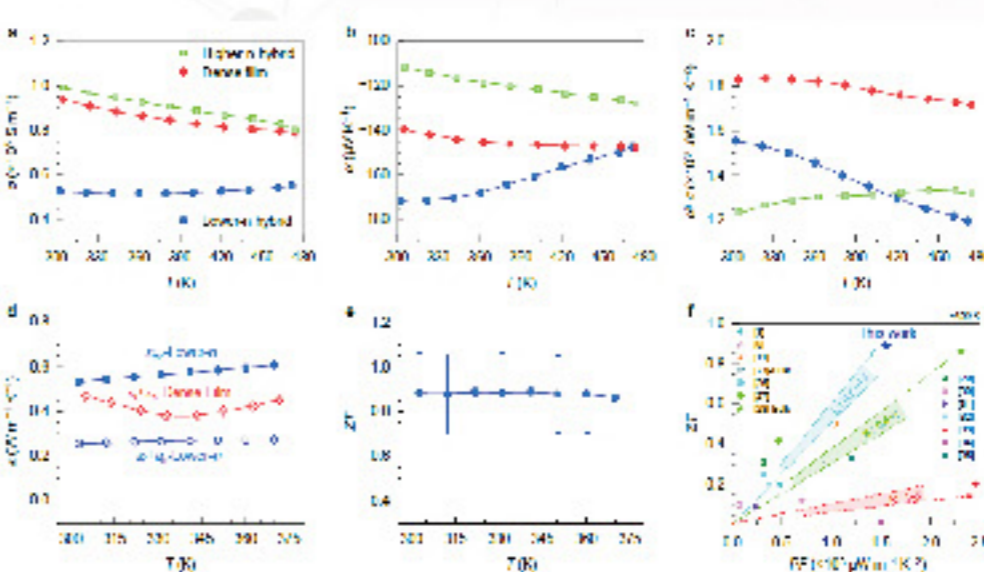


图2 Bi_2Te_3 -SWCNT复合材料热电性能分析

相关研究成果(“Flexible layer-structured Bi_2Te_3 thermoelectric on a carbon nanotube scaffold”)于11月19日在Nature Materials在线发表。该工作获得了国家重点研发计划、国家自然科学基金、中国科学院装备研制项目、中科院百人计划等项目的支持和金属所公共技术服务部谭军研究员的大力协助。

相关研究成果(“Flexible layer-structured Bi_2Te_3 thermoelectric on a carbon nanotube scaffold”)于11月19日在Nature Materials在线发表。该工作获得了国家重点研发计划、国家自然科学基金、中国科学院装备研制项目、中科院百人计划等项目的支持和金属所公共技术服务部谭军研究员的大力协助。

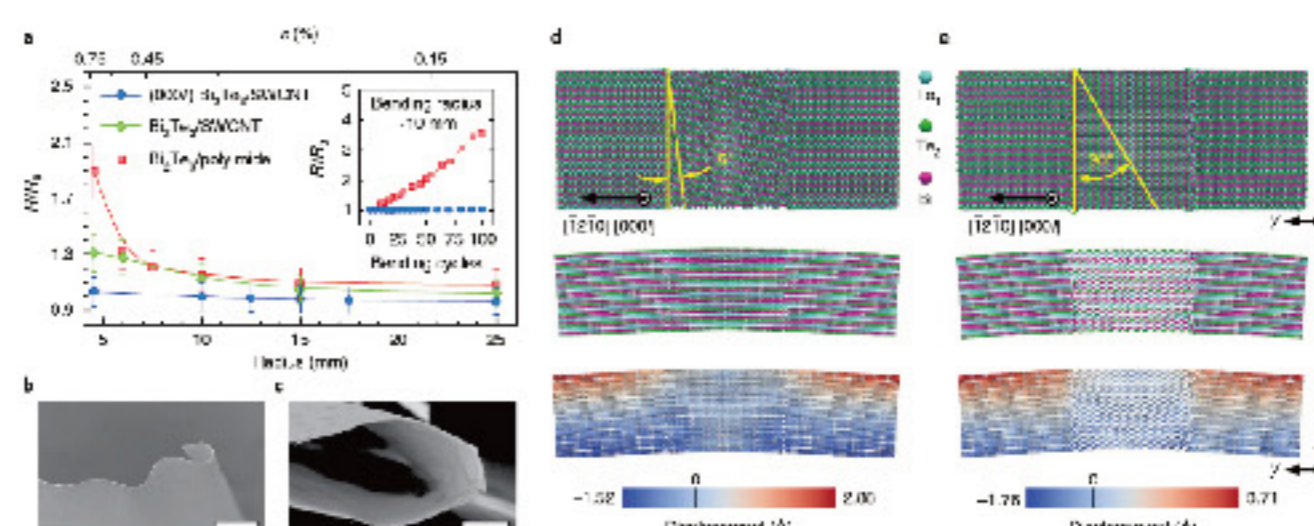


图3 Bi_2Te_3 -SWCNT复合材料弯曲柔性性能分析与MD分子动力学模拟

高性能纳米磷酸铁锂的绿色高效合成研究取得进展

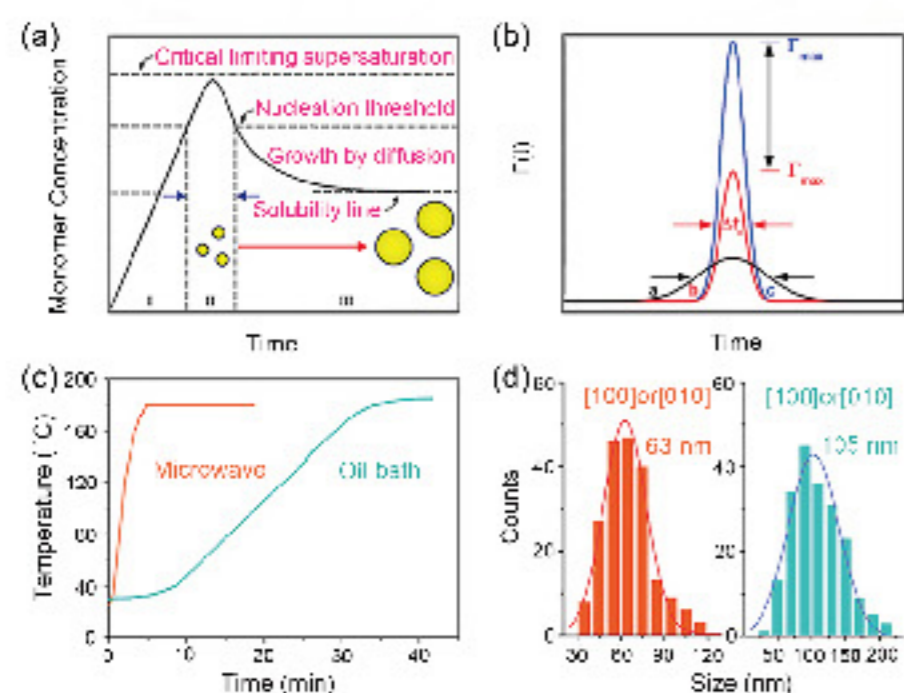


图1 经典的LaMer形核和生长机制以及实验结果。(a) 经典LaMer机理，颗粒在溶液中成核和生长过程中单体浓度变化的示意图。(b) 三个具有高斯分布的形核函数。形核函数的宽度 (t_n) 对应形核时间窗口。(c) 微波加热和油浴加热两种加热模式下的原位温度与时间曲线。(d) 由两种不同的加热模式制备的LiFePO₄沿[100]或[010]方向的尺寸统计。微波加热的尺寸为63nm，而在常规油浴加热的情况下，尺寸为105 nm。

稳定性、高可逆性和可接受的工作电压(3.45V vs. Li⁺/Li)，作为正极性材料具有显著的竞争优势。此前已发表文章多采用溶剂热法制备纳米LiFePO₄，产物具有良好的电化学性能，但该法的产率低、成本过高，无法实现规模化生产。与溶剂热法相比，水热法制备LiFePO₄成本较低，但是产物电化学性能差。而且，无论溶剂热还是水热合成，由于受到反应的局限性 ($3\text{LiOH} + \text{FeSO}_4 + \text{H}_3\text{PO}_4 = \text{LiFePO}_4 + \text{Li}_2\text{SO}_4$)，锂源的有效利用不超过三分之一。因此，如何采用水热法制备具有高性能的纳米LiFePO₄并且能循环利用锂源，不仅是

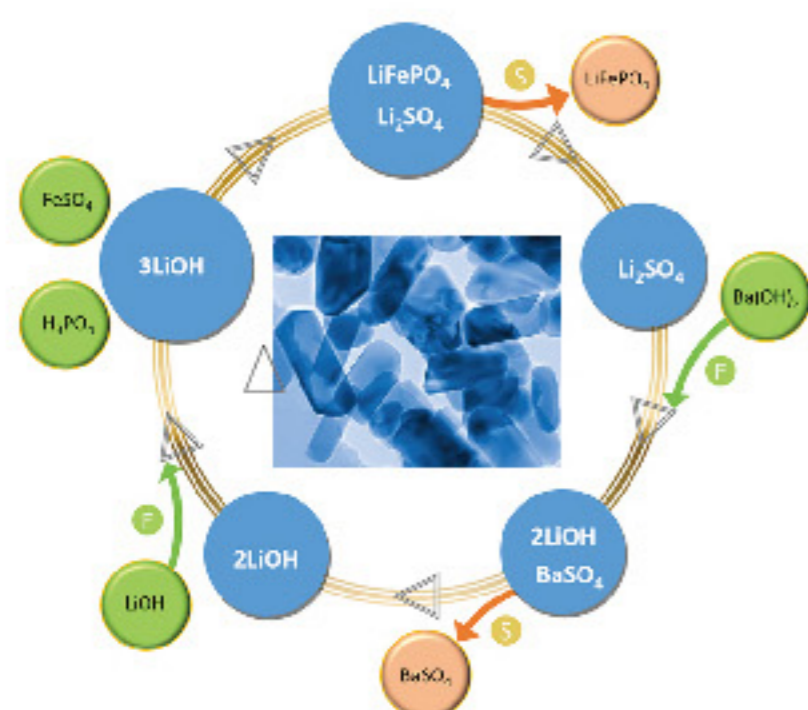


图2 LiFePO₄纳米晶水热合成路线及锂回收示意图。以LiOH、FeSO₄和H₃PO₄为原料制备纳米LiFePO₄。用Ba(OH)₂做沉淀剂与滤液反应，随后进行固液分离，回收LiOH。插图为LiFePO₄的TEM照片。

电动汽车的心脏是由电池或燃料电池驱动的电动机。随着电动汽车需求的增加，对高品质电池的需求也不断提高。锂离子电池作为电池技术发展的首选，其正极材料是决定电池性能的关键部件之一。LiFePO₄同时具有优越的热

实现规模化水热法制备纳米LiFePO₄的技术难题，也是一个重要的科学问题。

最近，中国科学院金属研究所王晓辉研究员课题组与南京航空航天大学朱孔军教授合作，在深入理解LaMer形核生长机制的基础上，通过减小形核窗口时间来增大形核速率，采用微波水热合成法

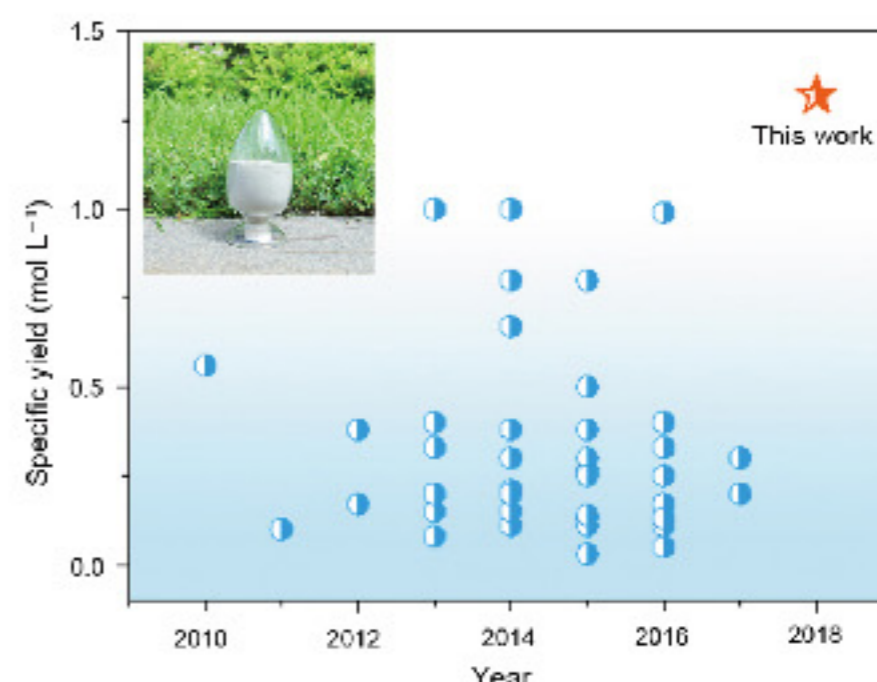


图3 水热/溶剂热合成方法制备LiFePO₄单位体积产率的比较。插图为本工作中合成的LiFePO₄的光学照片。

在纯水的合成环境中制备出纳米LiFePO₄。同时利用沉淀剂将滤液中最有价值的LiOH回收再利用，锂源的有效利用率超过了90%，大幅度降低了生产成本。由该方法制备的纳米LiFePO₄具有迄今为止最高的产率(1.3 mol/L)，且表现出优良的电化学性能，在0.1C倍率下放电比容量为

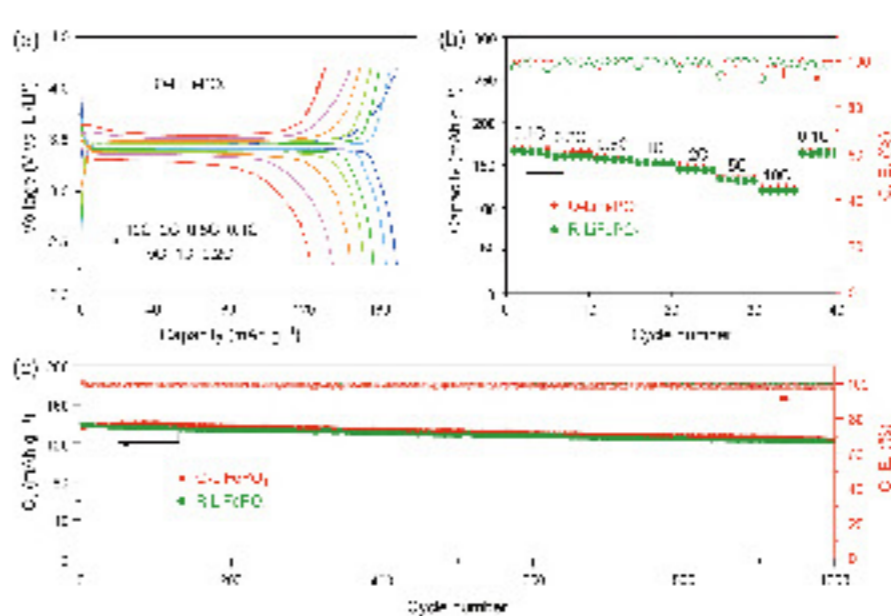


图4 原始的O-LiFePO₄/C和回收的R-LiFePO₄/C的电化学性能曲线。(a) O-LiFePO₄/C在0.1-10C不同倍率范围内的典型充放电曲线。(b) 倍率性能。(c) O-LiFePO₄/C和R-LiFePO₄/C在3C倍率下的长循环稳定性。3C对应的充电或放电时间为20分钟。

167mAhg⁻¹，3C倍率下充/放电循环1000次后，仍能保持初始容量的88%，可以满足大规模储能的实际应用。本工作率先实现了高性能纳米LiFePO₄在纯水的合成环境中的绿色高效合成，将有力推动其规模化生产。相关结果发表在近日出版的Green Chemistry杂志上(2018, 20, 5215-5223)。

聚焦：金属所突破核电关键材料抗腐蚀模拟技术

编者按：11月22日，2018年度中国科学院科技促进发展奖揭晓，共有10个团队获奖。金属所韩恩厚研究员等10名科研人员组成的“核电材料测试技术与成套装备及安全评价应用团队”获此殊荣。

金属所“核电材料测试技术与成套装备及安全评价应用团队”突破技术瓶颈，自主设计并研制出核电关键材料高温高压水环境中受损数据的测试装备和原位测试技术，打破我国长期依赖进口设备甚至到国外做试验的局面。

一、我国核电材料测试技术与安全评价现状与技术难题

国内外统计表明，腐蚀是影响核电站安全运行的最重要因素。为了评定核电材料的抗腐蚀损伤性能，获取各类材料的性能数据，以支撑设计、安全审评、优化制造工艺和运行参数、评价服役安全性与可靠性，需要大量的具备模拟核电服役环境和失效模式的试验设备开展实验研究。

以往我国主要依靠静态高压釜，测试结果与实际差异大。而仅有的少数几台从美国、日本、芬兰等国外公司进口的带高温高压水循环回路的测试系统也只能进行均匀腐蚀和应力腐蚀测试，功能单一，缺乏原位在线测试功能。国外这类设备不仅对我国售价昂贵，而且实行严格禁售。这种受制于人的被动局面不仅严重妨碍我国核电材料研究与核电站安全性、可靠性评价，而且严重阻碍了我国核电技术发展。因此，自主研制模拟核电高温高压水环境中多种腐蚀模式测试装备至关重要。

二、突破技术瓶颈

该团队在国家“973”计划、国家科技重大专项、中科院重大装备研制项目和重点部署项目等

支持下，经过10余年的努力，突破了技术瓶颈，设计并研制了严格模拟核电站高温高压水化学环境中材料在加载条件下的光学、光谱、声发射、电化学、裂纹扩展、应变等原位测量装备；发明了核电高温高压水中多种在线原位测试探头；设计并研制了核电高温高压水中划伤再钝化暂态电化学评价材料应力腐蚀敏感性，使评价时间在数量级上从“年”缩短到“天”；研制了实现核电高温高压水中应力腐蚀、腐蚀疲劳、腐蚀磨损、缝隙腐蚀、辐照促进应力腐蚀等多种材料腐蚀失效行为的原位测试设备。

2016年中国核能行业协会专门组织召开了成果鉴定会，来自中国核能行业协会、中国核学会、中国核工业集团公司、中广核大亚湾核电运营公司、国家核电上海核工程研究设计院、哈电集团（秦皇岛）重型装备有限公司、上海电气核电设备有限公司、国家核安全局核安全司、环保部核与辐射安全中心、清华大学的10余位专家认为：“均是国内首台套，其中4台套为国际首台套”，突破了长期依赖进口甚至到国外做试验获取数据的局面，为核能自主创新能力提升和核电作为国家名片“走出去”提供了重要的科技支撑。

三、应用效果

团队建立的具有自主知识产权的核电材料试验与安全评价平台，已广泛应用于核电研究院所、核电设计院、核电装备制造企业、核电站运行与服务企业、核安全审评机构、行业学会等14家单位。在我国首次实现百万千瓦（下转六版）

沈阳材料科学国家研究中心揭牌 暨新园区开工仪式隆重举行

10月30日，沈阳材料科学国家研究中心揭牌暨新园区开工仪式在浑南创新路园区隆重举行。辽宁省省委副书记、省长唐一军，中国科学院副院长李树深，辽宁省副省长、沈阳材料科学国家研究中心主任卢柯，沈阳市市长姜有为出席仪式。唐一军省长和李树深副院长，共同为沈阳材料科学国家研究中心揭牌。揭牌暨开工仪式由沈阳市副市长阎秉哲主持。



沈阳材料科学国家研究中心揭牌

国家研究中心依托单位负责人、金属研究所所长左良在致辞中表示，沈阳材料科学国家研究中心作为首批启动的6个国家研究中心之一，也是材料领域以及东北地区的唯一一个国家研究中心，充分体现了国家对金属研究所的信任和肯定，更是对金属研究所未来进一步攀登材料领域科技高峰的激励和鞭策。金属研究所将为沈阳材料科学国家研究中心建设提供全面支持和保障，努力为中心人员营造良好的科研、学习及工作环境，全力保障中心科研及建设活动的顺利进行。

姜有为在致辞中表示，沈阳材料科学国家研究中心是我国新材料领域的重要创新平台，也是支撑沈阳建设东北亚科技创新中心的重大标志性工程，对于建设“一带五基地”，实现高质量发展，具有里程碑式的意义。沈阳市将集全市之力

建设沈阳材料科学国家研究中心，努力建成高标准高质量的交钥匙工程。同时还将围绕中心发展需要，不断加强人才引进、成果转化、项目孵化等服务保障，支持材料中心建立“3+3+2”的科技创新体系，不断提升产业技术原始创新能力，加快构建材料科学、材料智造、材料应用及协同创新跨越发展的全新格局，努力打造先进材料和智能制造创新高地。

卢柯在致辞中指出，国家研究中心深度契合辽宁省产业结构调整和未来发展需求。它的建设和发展，对深入贯彻落实习近平总书记考察辽宁和深入推进东北振兴座谈会重要讲话精神，推进辽宁“一带五基地”建设，加速沈阳东北亚科技创新中心建设，具有重要推动和牵引作用。希望国家研究中心要持续瞄准世界材料科技前沿，打造具有国际影响力的新材料及新技术创新高地；要进一步凝聚和培育高端科技人才，形成汇聚国际一流科技人才的智力高地；要不断创新科技运行机制，促进创新链与产业链无缝对接，打造成果转移转化高地。

李树深在致辞中提出，希望国家研究中心能够建设成为我国材料研究领域最具代表性的学术高地，成为具有重要国际影响、特色鲜明、独树



沈阳材料科学国家研究中心新园区开工奠基

一帜的世界级中心，成为重大科技任务的载体、重大原创性成果的发源地、杰出人才的聚集地、体制机制改革的试验田，在事关我国全局和长远发展的战略必争领域成为领跑者，在可能发生新科技革命的新兴交叉前沿方向上成为开拓者，真正建设成为国际一流的综合性材料基础研究平台，为国家科技事业发展和东北老工业基地振兴作为重要贡献。

作为国家级科研创新基地优化整合的重要举措之一，沈阳材料科学国家研究中心于2017年11月21日正式获得科技部批准组建。2018年2月5日，中国科学院、辽宁省及沈阳市人民政府联合签署《共同建设沈阳材料科学国家研究中心协议》。2018年4月14日，沈阳材料科学国家研究中心组建实施方案顺利通过科技部组织的专家论证会，标志着沈阳材料科学国家研究中心进入正式建设阶段。沈阳材料科学国家研究中心将在原沈阳材料科学国家（联合）实验室和已形成优势学科群基础上，优化整合国内外优势科技资源，创新运行机制，努力建成国际一流的综合性材料基础研究平台，成为国家材料重大创新基地。

根据院省市三方共建协议，沈阳市已为国家研究中心建设划拨土地684亩，规划建筑面积35

万平方米。整个工程计划分两期建设完成，其中，一期建设规划建筑面积18万平方米，力争2020年底完成。

辽宁省办公厅、科技厅、财政厅、教育厅，沈阳市办公厅、科技局、发改委、经信委、教育局、国土规划局，浑南区政府，中科院前沿科学与教育局、沈阳分院，上海三盛宏业集团相关负责人，金属研究所党委副书记、副所长徐岩，李依依院士、成会明院士以及我所职工和研究生代表，创新路园区承建单位代表等500余人参加了上述活动。



沈阳材料科学国家研究中心新园区规划图

（上接四版）核电站核岛内关键结构的自主安全评价，打破国外技术的长期垄断。有关成果还直接应用于我国CAP系列、“华龙一号”核电项目以及其他重要型号核关键装备的设计、生产过程、制造评价。相关成果已产生直接经济效益5亿多元，获授权发明专利27件，注册软件著作权1件。

2018年，由金属所牵头编制的4项高温高压水环境下的材料试验中国核学会团体

标准正式发布。在发表会上，中国核学会理事长李冠兴院士指出：“《核电厂金属材料高温高压水中电化学试验方法》等4项高温高压水环境下的材料试验标准，符合我国核电厂材料性能评价和试验研究的需求，具有先进性、科学性、指导性和可操作性，填补了国际上该领域的标准空白，为更好地与国际标准对接、更好地服务“走出去”……”，对我国核电“走出去”具有里程碑意义。



11月15日，纪念两院院士师昌绪先生百年诞辰报告会在金属所举行。李依依院士、刘敏研究员作专题报告，金属所党员、职工、研究生450余人参加报告会。

11月13日，“伟大的变革——庆祝改革开放40周年大型展览”在国家博物馆开展，金属所“SEBF/SLF重腐蚀防护技术”成果参加了展览，国家主席、中央军委主席习近平等党和国家领导人参观了展览。



11月8日至11日，由金属所参与主办的第二届全国搅拌摩擦焊接与加工（FSW/FSP）学术会议在天津市举办。全国80余所高校、科研院所和企业的专家学者共计240多人参加了本次学术会议。



院所和企业的专家学者共计240多人参加了本次学术会议。

11月6日，何梁何利基金2018年度颁奖大会在京举行。本年度共有56位科学家获奖。金属所任文才研究员获科学与技术创新奖。



10月29日，“材料疲劳与断裂研究30周年学术交流会暨第36期SYNL材料力学行为学术报告会”在金属所举行。



近日，马秀良研究员荣获中国电子显微学会“钱临照奖”。