

金属之光

2

中国科学院金属研究所
2020年 第2期 (总第219期)

INSTITUTE OF METAL RESEARCH, CHINESE ACADEMY OF SCIENCE

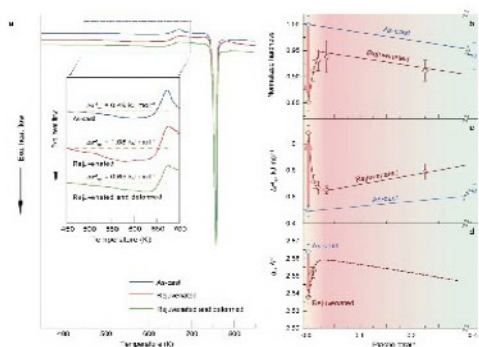
2020年 1-6月科研进展概览

出版日期: 2020年7月

2020年1-6月科研进展概览

新材料探索及材料基础研究

块体非晶态材料中实现加工硬化：材料动力学研究部与合作者，首次在块体非晶态材料中实现加工硬化。研究人员开发出最高能量状态相当于冷速为 10^{10} K/s的非晶合金，研究表明，块体非晶合金的加工硬化是伴随着材料缺陷的湮灭和减少（更驰豫状态），是一个由高能态向低能态的转变过程。

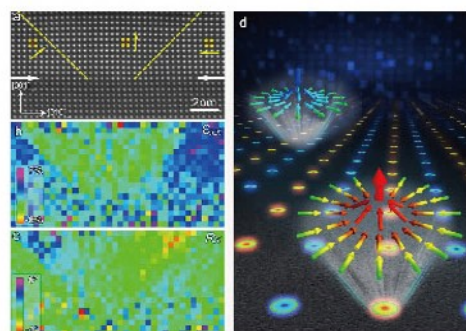


变形过程中块体非晶合金的能量状态和结构的变化。(a)回春态非晶合金在变形前后的DSC曲线和弛豫焓；铸态和回春态非晶合金的(b)归一化硬度，(c)弛豫焓，以及(d)主衍射环位置 q_1 与塑性变形量间的关系。回春态非晶合金在最初变形阶段(<5%)表现出显著的加工硬化，伴随着硬度升高和能量的降低，以及结构的有序化。这完全不同于传统铸态非晶合金应变软化并伴随能量增加过程。

软化行为的固有认识，为开发具有均匀塑性变形能力的非晶合金及其工业应用提供了新思路和方向。相关研究成果在Nature发表。

铁电材料中发现周期性半子晶格：材料结构与缺陷研究部在外延生长在 SmScO_3 衬底上的超薄 PbTiO_3 薄膜(5nm)中发现面内汇聚型和面内发散型半子，而且发现反半子结构，以及半子与反半子组合后发生湮灭所形成的拓扑荷为零的畴结构。通过对像差校正显微图像中离子位移的定量分析，发现半子和反半子按照一定的规律形成晶

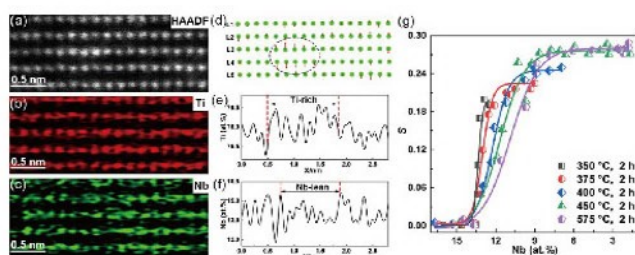
格。该项工作进一步完善了通过失配应变调控铁电材料拓扑畴结构的重要性的有效性，揭示了极化体系



(a, b, c)外延生长在 SmScO_3 衬底上的 PbTiO_3 超薄膜中会聚型半子的面内应变和晶格旋转信息；(d)会聚型和发散型半子交替排列所形成的周期性半子晶格示意图。

中的电偶极子在一定条件下具有类似特殊凝聚结构的准粒子行为，对探索基于铁电材料的高密度非易失性信息存储器件具有重要意义。相关研究成果在Nature Materials在线发表。

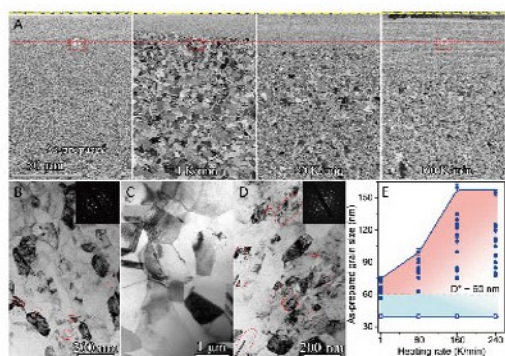
亚稳 β 钛合金中的扩散-位移型相变：材料结构与缺陷研究部与钛合金研究部合作从原子层次定量表征出连续的 $\beta \rightarrow \alpha'' \rightarrow \alpha$ 扩散-位移型相变。结合像差校正透射电镜和原子分辨率的能谱分析，揭示了这一相变是从纳米尺度成分波动开始，然后通过结构和成分连续变化完成，相变过程既包含新相中原子整体在特定方向上的位移，又包括Nb元素的扩散。通过纳米分辨率的旋



左：合金中原子尺度的结构与成分；右：原子位移量与Nb成分变化的关系

进电子衍射技术，从不同取向研究了该相变带来的强化效应。该项工作对于揭示合金中的扩散一位移型相变机制具有科学意义。相关研究成果在Acta Materialia发表。

快速升温可大幅度提高Cu纳米晶的热稳定性：纳米金属材料研究部研究发现，利用快速升温可以在纳米晶铜中引入退火孪晶，从而实现纳米晶晶界的“热弛豫”，提高纳米晶的热稳定性。将晶粒尺寸80nm左右的纯Cu，以160K/min的速率快速升温至523K保温15min再冷却，材料晶粒尺寸没有明显变化，而孪晶数量明显增加。与变形孪晶一



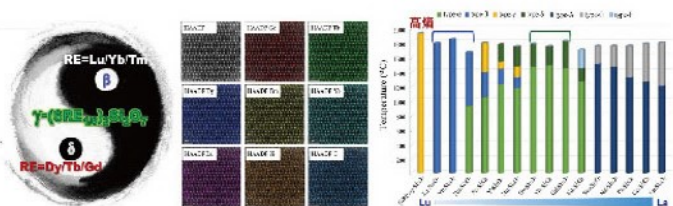
(A) 制备态样品及分别以不同升温速率(1、80、160K/min)加热至523K的样品的表层梯度纳米结构的典型横截面扫描电镜照片。(B-D)制备态样品及不同升温速率加热处理后的样品中距表面~25 μm深度处纳米晶典型透射照片(对应深度如图A中虚线框所示,该深度处制备态样品平均晶粒尺寸约为80nm)。(E)以不同升温速率加热至523K处理后的样品中表层稳定纳米晶对应晶粒尺寸范围。图中实心和空心圆点分别代表实验观察到稳定纳米晶层的上下界所对应晶粒尺寸,虚线表示制备态样品在523K热处理时稳定纳米晶的平均晶粒尺寸上界(D*~60nm),误差棒指平均晶粒尺寸的标准误差。

样,这些生长孪晶也可以弛豫晶界,增强纳米晶的热稳定性。热处理后,纳米晶的明显长大温度从原来的低于393K升高至773K以上。快速升温提高纳米晶稳定性的热弛豫方法可以用于提高一般严重塑性变形所获得的亚微米和纳米晶的稳定性,对于发展高稳定纳米材料和推动纳米金属的应用具有重要意义。相关研究成果在Science Advances发表。

低Pt高效稳定析氢反应：陶瓷及复合材料研究部提出了构建用于电催化析氢反应的多级

Pt-MXene-SWCNTs异质结构催化剂策略。在该结构中,高活性纳米/原子级金属Pt被锚固在Ti₃C₂T_xMXene薄片上(MXene@Pt),并与导电SWCNTs网络相连接。利用MXene的亲水性和还原性,MXene@Pt胶体悬浮液可通过MXene自发还原Pt阳离子制备而成,不需要额外的还原剂或后处理。制成的薄膜状多级电催化析氢反应催化剂展现出较低的析氢过电位和良好的稳定性。相关研究成果发表在Adv. Funct. Mater.上。

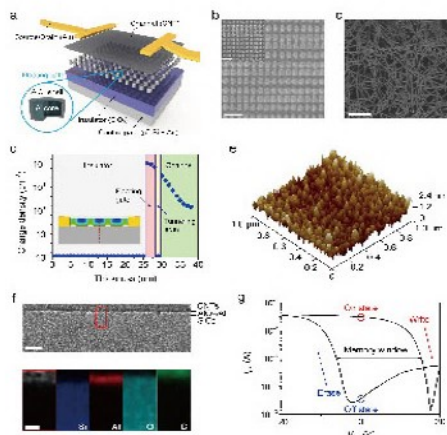
具有超高热稳定性的高熵稀土硅酸盐环境障涂层材料：陶瓷及复合材料研究部基于多稀土组分硅酸盐高熵设计的科学思路,制备出从室温至1900℃保持相稳定的γ晶型(Gd_{1/6}Tb_{1/6}Dy_{1/6}Tm_{1/6}Yb_{1/6}Lu_{1/6})₂Si₂O₇稀土双硅酸盐,其超高热稳定性解决了这类材料在高温至超高温易相变的领域难题,为先进航空发动机热端部件的下一代环境障涂层提供了重要新材料支撑。本工作发现了高熵陶瓷相稳定的新机制,验证了“无中生有”的高熵新化合物设计原理,以高温稳定相只为β或δ晶型的单稀土主元硅酸盐为基础,合理调配稀土离子组合获得了至今唯一的无相变γ晶型高熵稀



发现了高熵复杂化合物设计新原理,制备出具有超高热稳定性的高熵γ晶型(Gd_{1/6}Tb_{1/6}Dy_{1/6}Tm_{1/6}Yb_{1/6}Lu_{1/6})₂Si₂O₇稀土双硅酸盐新材料。

土硅酸盐,为通过高熵工程实现环境障涂层的超优性能设计提供了新方法。相关研究成果在Materials Research Letters在线发表。

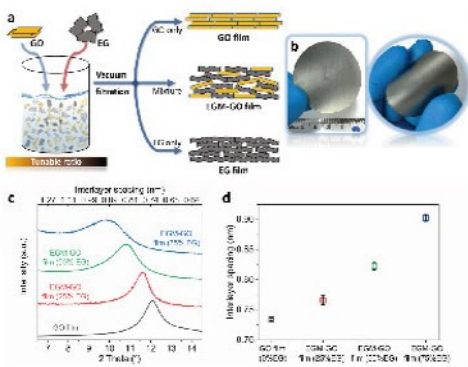
柔性碳纳米管传感存储一体化器件：先进炭材料研究部与合作者制备出一种基于铝纳米晶浮栅的碳纳米管非易失性存储器。其具有高的电流开关比、长达10年的存储时间以及稳定的读写操作，多个分立的铝纳米晶浮栅器件具有稳定的柔性服役性能。特别是电荷在氧化生成的 AlO_x 层中的隧穿机制由福勒-诺德海姆隧穿变成直接隧穿，从



a) 器件结构示意图；b) 均匀离散分布的铝/氧化铝纳米晶点阵结构与c) 碳纳米管薄膜沟道材料的SEM图；d) 沟道中电荷密度分布仿真；e) 铝纳米晶表面形貌图；f) 碳纳米管薄膜与浮栅层结构的截面TEM与元素分布图；g) 存储窗口。

而实现光电信号的传感与检测；基于理论计算分析与实验优化设计，研究人员制备出 32×32 像素的非易失性柔性紫外光面阵器件，首次实现了光学图像的传感与图像存储，为新型柔性光检测与存储器件的研制奠定了基础。相关研究成果在Advanced Materials在线发表。

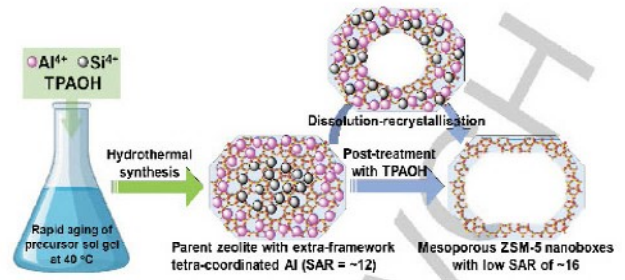
石墨烯基电化学电容器：先进炭材料研究部与合作者研发出片层间距可调节的复合石墨烯基薄膜，通过调控片层间距，实现了优化整个电



片层间距可调节的复合石墨烯薄膜的制备过程

极材料孔隙率的效果。当电极材料的孔隙尺寸与电解液的离子尺寸相匹配时，孔隙的空间利用达到了最优化，从而极大化了体积能量密度。研究人员还设计了全固态柔性电化学电容器，并进一步发展了智能器件，通过根据实际需求改变电路连接方式，实现了不同的输出效果。相关研究成果在Nature Energy在线发表。

高活性低硅铝比中空ZSM-5沸石催化剂：生物基材料与仿生构筑研究部与合作者，通过高温快速老化沸石合成母液制备出含有非骨架铝的沸石母相，而后通过四丙基氢氧化铵溶解、再结晶将非骨架铝转化为骨架铝，同时形成中空结构，从而制备出硅铝比低至16的中空ZSM-5型沸石。低硅铝比中空ZSM-5型沸石在碳氢化合物裂解中，尤



低硅铝比中空ZSM-5沸石合成技术路线示意图

其是在大分子碳氢化合物裂解中表现出高活性、高稳定性和高丙烯选择性的显著优势。该方法不仅适用于合成低硅铝比中空ZSM-5型沸石，也为其它中空杂原子掺杂沸石合成提供了可行的技术路线。相关研究成果在Angewandte Chemie International Edition在线发表。

自旋轨道扭矩磁性随机存储器的无外场磁矩翻转：自旋轨道扭矩磁性随机存储器(SOT-MRAM)因为具有非易失、功耗低、稳定性高、读写速度快的优点，在工业、航天等要求苛刻的领域具有

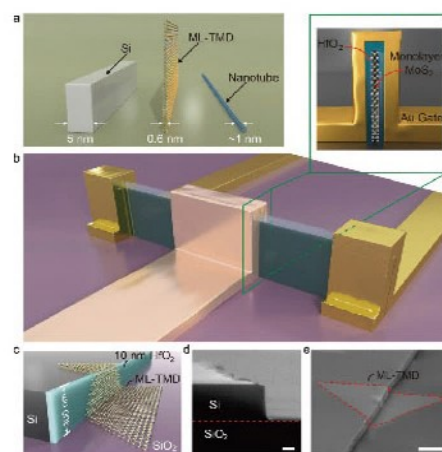
重要优势。然而自旋轨道扭矩需要静态面内磁场辅助才能实现磁性翻转，这一缺陷限制了其应用潜力。因而无外场磁矩翻转成为研究关键。功能材料与器件研究部在自旋轨道扭矩磁性随机存储器中实现无外场磁矩翻转，研究人员利用贵金属钉兼具振荡耦合与抗氧化性的特点，实现了一种无外场翻转的新设计。利用矫顽力不同的亚铁磁薄膜对器件两侧的铁磁层进行钉扎，器件获得了稳定的人工磁畴壁结构。这一畴壁因Dzyaloshinskii–Moriya相互作用具有手性结构，因而可以在加载电流时实现定向移动，完成磁矩的翻转。同时，钉覆盖层的耦合能力使得在这一设计中可以实现对信号读取至关重要的磁性隧道结结构。这一结果对新型自旋电子学器件的设计和應用均具有重要价值。该工作已发表于Physical Review Applied。

材料拓扑声子数据库：材料设计与计算研究部在材料拓扑声子领域进行了系统的研究。近期预测了 MgB_2 中的拓扑声子节线和石墨烯中的拓扑声子，相关研究成果相继发表在Physical Review B。在此基础上，基于高通量计算和拓扑声子代码的开发，计算和筛选了一万三千个材料的声子谱，构建了材料的拓扑声子数据库，进一步通过与内华达拉斯维加斯大学大数据团队合作，实现了材料声子和拓扑声子数据的在线可视化和构建数据库网站。数据库测试版已经发布（<http://www.phonon.imr.ac.cn>），当前该数据库提供了5000余种材料的晶格结构，包含空间群、点阵常数、原子位置等结构化基础数据；提供了声子色散谱、声子态密度、拓扑声子等物性基础数据；提供了结构模型构建和关键计算参数设置等一共

40万余条相关基础数据。该工作弥补了材料声子数据库的空白，扩充了声子材料备选库，为实验提供了一批理想的材料。

单原子层沟道的鳍式场效应晶体管问世：联合研

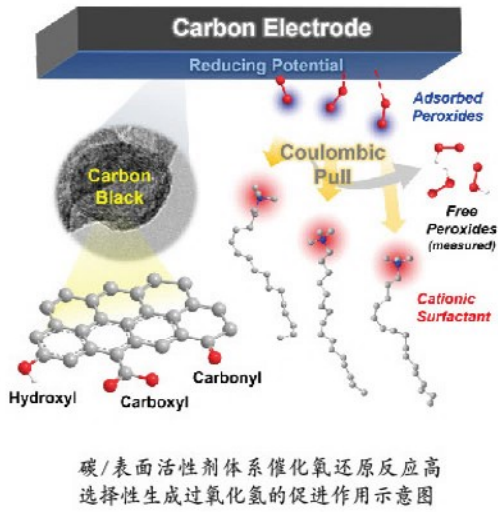
究部与先进炭材料研究部及合作者首次演示了可阵列化、垂直单原子层沟道的鳍式场效应晶体管。该项工作将鳍式场效应晶体管的沟道材料宽度减小至单原子层极



单原子层沟道的鳍式场效应晶体管。a)硅工艺FinFET的沟道材料、垂直二维原子晶体与单根碳纳米管尺寸对比示意图。b)器件结构示意图。插图为截面示意图。c)台阶共生长的单层二维过渡族金属硫化物示意图。d-e)台阶模板扫描电镜照片，其中标尺分别为100纳米（左）和1微米（右）。

度(0.6nm)，同时，获得了最小间距为50nm的单原子层沟道鳍阵列，该研究作为后摩尔时代的场效应晶体管器件的发展提供了新方案。相关研究成果在Nature Communications在线发表。

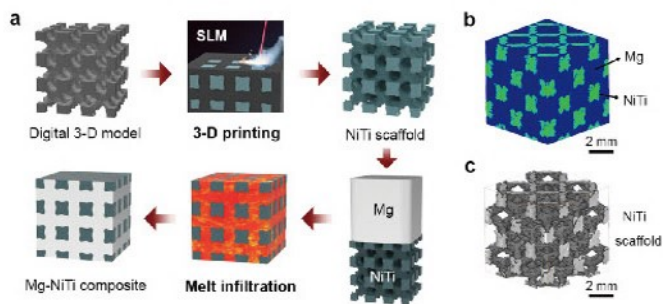
纳米碳催化过氧化氢电合成：联合研究部在纳米碳材料高效催化过氧化氢电合成领域取得重要进展。对碳催化氧气电化学还原活性中心和反应动力学的研究表明，该反应的选择性主要取决于过氧化氢与羧基活性中心之间的结合能力。基于上述机理分析结论，研究人员成功实现利用界面工程手段调控碳催化电化学氧还原反应选择性的创新研究思路。碳/表面活性剂复合催化材料体系展现出目前已知最高的 H_2O_2 选择性(>96%)、最宽的过电位窗口(>0.8V)和



可观的稳定性。整个反应体系具有能耗低、绿色、可持续、稳定性好的特点，展示出巨大的

实际应用前景。上述两部分系统工作分别以全文形式发表在Journal of Colloid and Interface Science和Chem杂志。

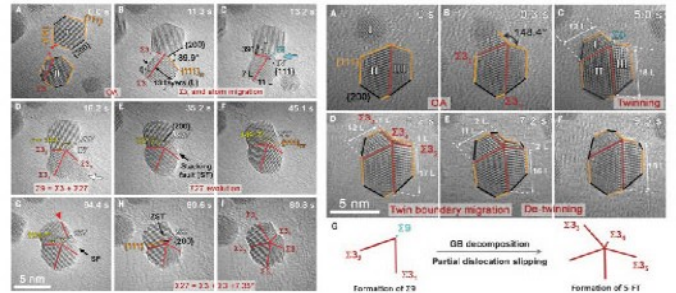
新型镁基仿生材料：材料疲劳与断裂实验室与钛合金研究部合作，借鉴天然生物材料三维互穿微观结构的理念，将镁熔融浸渗至增材制造的镍钛合金骨架，构筑成轻质、高强、高阻尼、高吸能镁-镍钛仿生复合材料，其综合性能优于目前已知的工程材料，有望成为精密仪器、航空航天等



新型镁-镍钛仿生复合材料的制备工艺及其微观三维互穿仿生结构领域需求的新型阻尼减震材料。相关研究成果在Science Advances发表。

五重孪晶形成机理研究：钛合金研究部采用高分辨原位透射电镜和分子动力学模拟方法，在原子尺度揭示了两种五重孪晶的形成机理。研究发

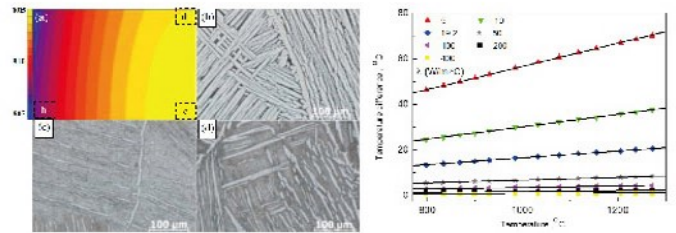
现，在~3nm Au、Pt和Pd纳米颗粒的聚集生长过程中，纳米颗粒可以通过颗粒间的取向粘附形成起始的两个孪晶界面，然后经原子表面扩散和高能晶界形成及分解或不全位错的滑移，形成五重



左图：五重孪晶形成机理1：通过取向粘附、原子表面扩散以及随后的高能晶界的形成和分解（零应变孪晶成核和生长）；右图：五重孪晶形成机理2：通过取向粘附和不全位错的滑移或晶界分解。

孪晶结构。两种形成机理主要取决于颗粒取向粘附后所形成的表面结构。相关研究成果在Science在线发表。

基于有限元模拟的本构关系优化：热加工过程的有限元模拟对工艺优化有重要意义，而材料本构关系是模拟的关键输入，其准确性对模拟结果有决定性影响。目前广泛采用的本构关系获取是基于Gleeble热模拟实验机对材料在不同温度和应变速率下变形所得的应力应变关系。尽管实验机的设计采用了多种方法使样品的温度和变形尽可能均匀，但由于散热和摩擦不可避免，导致样品不同部位的温度和变形不均。钛合金研究部开展了

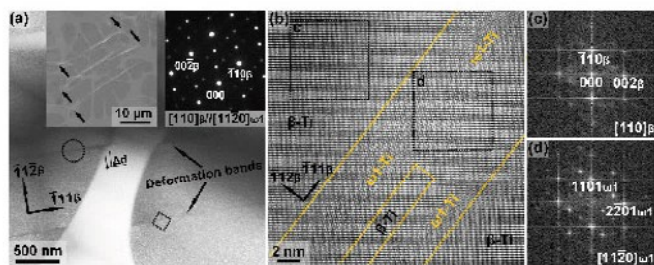


左图：有限元模拟的Gleeble样品纵剖面上的温度分布及其与相应位置的金相对比；右图：计算得到的热电偶传热引起的不同热导率材料的温度测量误差与测量温度的关系。

Gleeble热压缩变形及相关有限元模拟。研究表明，样品的温度和变形远非均匀，特别是对低热导材料的高温变形，所得本构关系存在显著误差。模拟中考虑了热电偶散热、表面辐射等的影响。并基于模拟提出了相应的修正方法，可大幅度提升本构关系的精度。

非晶内生亚稳 β -Ti复合材料中的协同剪切机制：

非晶内生 β -Ti复合材料因具有优异的性能，如释能特性，具有广阔的应用前景。前沿材料研究部与合作者发现，当内生 β -Ti相具有临界的亚稳定性时，复合材料的应力-应变曲线上会出现明显的锯齿，并且呈现剪切破坏模式。变形带同时贯穿了 β -Ti枝晶和局域非晶基体，并且枝晶中的变形带主要由 ω -Ti组成，厚度约为10nm。非晶内生复合材料的“锯齿”行为起源于剪切带与 ω -Ti



左图：有限元模拟的Gleeble样品纵剖面上的温度分布及其与相应位置的金相对比；右图：计算得到的热电偶传热引起的不同热导率材料的温度测量误差与测量温度的关系。

带的协同剪切机制，并且与 β 相的亚稳定性密切相关。剪切带与 ω 带协同剪切机制的发现不仅丰富了非晶复合材料的变形机制，也为开发兼具拉伸塑性和剪切破坏方式的高释能非晶内生复合材料提供了理论基础。相关研究成果发表在Physical Review Letters上。

重大工程关键材料技术研究

“两机专项”基础研究项目申报收获可喜：在今年举行的“两机专项”第二批基础研究项目评审会中，金属所牵头申报的9项项目有7项申报成功，参研申报的21项项目有11项申报成功，经费共计3.38亿，答辩通过率在各申报单位之中名列前茅。本轮两机专项的成功申报为金属所“十四五”期间高温结构材料的发展与应用奠定了重要基础。

长征五号系列运载火箭工程发射：由我所研制的Ti-5Al-2.5Sn ELI粉末冶金氢泵叶轮、高强镁合金惯组支架、GH4169导管，成功应用于长征五号系列运载火箭。长征五号运载火箭型号办公室、天津航天长征火箭制造有限公司分别向我所发来感谢信，感谢金属所对长征五号B运载火箭研制和首飞任务圆满完成做出的贡献。

“天问一号”火星车车身材料：材料制备与加工研究部针对“天问一号”火星车不同结构部件的要求，开发出新型铝基碳化硅复合材料，相关产品用于火星车结构、机构、仪器等几十种零部件。与传统铝基碳化硅复合材料相比，新型复合材料塑性提升一倍以上，同时保持高强度、高各向同性、高耐磨性和稳定性。通过解决大尺寸坯锭制备、材料塑性成形等技术瓶颈，研制出不同规格的复合材料样件。金属所研制的新型铝基碳化硅复合材料通过了近工况条件下的严苛地面模拟考核，相关技术方案得到用户高度认可，使得金属所成为火星车铝基复合材料唯一供货单位。

北斗组网卫星用材料器件：专用材料与器件研究部研制的长寿命管式铠装加热器，成功应用于北斗MEO卫星单组元肼推力器中，对保障推力器长寿命安全可靠运行起到关键作用，中国航天科技

集团五〇二所向我所发来贺信表示祝贺和感谢。

复杂结构空心单晶叶片铸件批量生产：高温合金研究部完成了某型号用单晶叶片的批量生产任务，标志着我所已具备了复杂结构空心单晶叶片铸件的批产供货能力，实现了从科研到生产的转变。研究人员揭示了单晶凝固缺陷的形成机理，突破了单晶叶片定向凝固的缺陷控制瓶颈，利用自主研发的定向凝固设备，掌握了高质量复杂结构空心单晶叶片铸件的全流程制备技术，建设了完整的单晶叶片研制生产平台，具备了多种复杂结构空心叶片铸件毛坯和成品的研制和交付能力。

航天瞬时高强粉末成形支板实现小批量生产：轻质高强材料研究部完成了某型号用 Ti_2AlNb 粉末成形支板的小批量生产任务，标志着我所已具备了航天用装备的批产供货能力。针对粉末合金的特点开展了面向应用的粉末合金致密化机理分析，



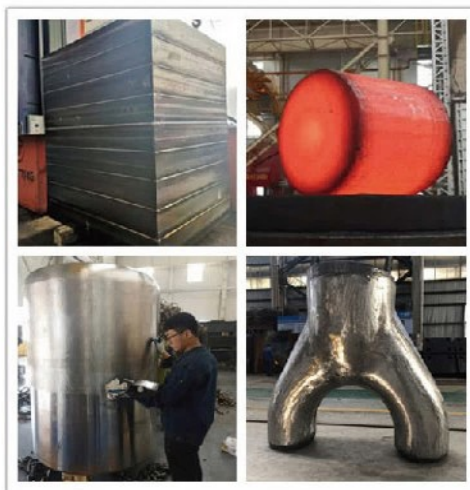
航天某型号用的 Ti_2AlNb 粉末支板

完善了 Ti_2AlNb 合金的热等静压工艺途径，彻底解决了部件本体高温性能离散和热处理变形等难题，发布企业标准3项。研制的粉末冶金 Ti_2AlNb 支板替代锻件，在保证质量的同时实现了加工效率的30%以上的提升，率先将粉末冶金 Ti_2AlNb 合金在航天重点型号上应用。建设了完整的 Ti_2AlNb

粉末近净成形复杂部件研制生产平台，为中国航发各主机厂等单位提供了多个品种、小批量的试车考核件。

316DK奥氏体不锈钢完成供货：特种合金研究部研发的钠冷快堆用316DK奥氏体不锈钢，由国内企业完成了我国第一座二代核电项目——福建霞浦钠冷示范快堆主设备的钢板供货任务，比约定交货期提前两个月。实现了316DK钢板在示范堆项目上的系列化、批量工业化及全覆盖，目前企业累计向快堆项目供货4000多吨，有力支撑了国家重大工程建设。

核电大型铸锻件：先进钢铁材料研究部利用首创的金属构筑成形技术，完成了直径5米、高度3米的SA508-3钢压力容器筒体和直径715毫米大口径316奥氏体不锈钢三通压力管的研制，在国际上尚属首次。研究人员采用金属构筑成形制坯—大口径管坯挤压—中频热推弯的工艺方案，完成了压力管弯管模拟件的制造；采用金属构筑成形制坯—一体化正挤压—反挤压冲孔工艺方案，完成了压力管三通模拟件的制造。采用该工艺制造的压力管成形完整、过程可控，且外表面加工余量小，显著提升了压力管的致密性和均质



示范快堆大口径压力管三通制造过程 (a) 压力管三通构筑坯料 (b) 采用构筑成形方法制造的锻坯 (c) 锻坯无损检测 (d) 压力管三通挤压成品

性。对压力管的力学性能测试显示，其室温拉伸、高温拉伸、冲击、疲劳、晶间腐蚀等均满足设计要求。尤其是与压力管实际服役状态相对应的高周疲劳性能，在126MPa下循环周次大于4.2亿次仍未断裂，远高于美国ASME曲线该循环次数对应的98MPa，这说明构筑成形工艺制备的压力管高周疲劳性能大幅超过设计要求，具有很高的服役安全性。

重点行业关键材料技术研究

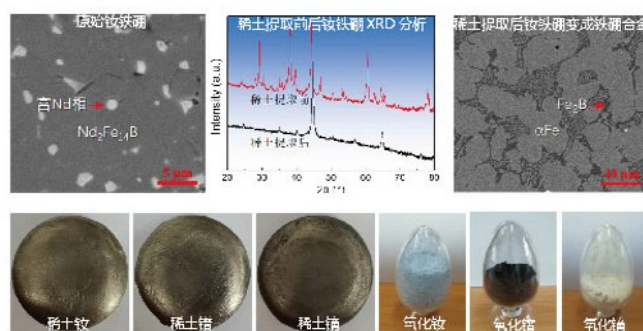
国产第一款可降解镁基金属骨钉获得欧盟CE认证：由专用材料与器件研究部作为技术支持方、东莞宜安科技股份有限公司作为产品申报方的可降解高纯镁骨内固定螺钉获得欧盟CE认证证书，表明该产品符合欧盟相关要求，已经具备欧盟市场的准入条件，可以在欧盟及相关海外市场销售。这是国内在可降解镁基金属III类植入器件领域获得的首个批准证书。由我国自主研发和生产的可降解镁基骨钉产品开始正式临床应用，并有望成为中国第一个在海外上市的可降解镁基金属植入产品。

钛/钢层状金属复合材料：针对层状金属复合材料制备工艺存在的效率低、尺寸受限和界面氧化等问题，表面工程研究部在钢板表面冷喷涂增材制造纯Ti层结合热轧制的方法制备出钛/钢层状金属复合材料。该方法利用冷喷涂低温高速的特性实现钛/钢两种材料的无氧化紧密结合，具有无尺寸限制，无真空要求，可连续生产等优势。通过系统研究冷喷涂、轧制和热处理对钛钢层状复合材料界面、组织结构和力学性能的影响，阐明了轧制变形过程中复合材料的塑性变形行为与组织演

变规律，揭示了层间界面的扩散相变与微观结合机理，制备的钛钢层状复合材料的综合力学性能明显高于传统制备方法。相关研究结果发表在Materials & Design和Materials Science and Engineering。

铝基复合材料应用创多项历史新高：材料制备与加工研究部承担研制与供货产品再创多项历史新高。其中光机结构用高尺寸稳定性铝基复合材料（SiC体积含量55%~65%）用量急增，上半年度最大订货产品单件重量为1.46吨，创铝基复合材料单件重量应用之最；作为首次承制，顺利交付方形整体框架（1000mm×900mm×360mm，壁厚50mm）结构件订制任务，替代用户原有钎焊拼接方案，可大幅提高框架尺寸稳定性和可靠性；完成了我国首批三台国产化乏燃料运输容器用中子吸收板供货任务，这是继为高温气冷堆核燃料元件贮运容器供货后，国产化中子吸收材料在核工程设备中的又一次标志性应用，为该设备的全面国产化制造奠定了坚实基础。

“一步式”绿色高效稀土回收方法：材料制备与加工研究部开展了稀土永磁材料钕铁硼废旧料回收新技术研究，提出了钕铁硼稀土绿色高效分离回收和净化提纯一体化新方法。实现了钕铁硼中所有稀土元素在数分钟内“一步式”选择性提



取，总提取率大于97%，钕铁硼中稀土镨/钕/镱等以金属单质或氧化物形式回收，其纯度约为99.5%，而残留的钕铁硼以铁硼基合金形式再利用，对钕铁硼废料实现了“零污染”“零废”回收，如图所示。该方法避免了传统工艺中铁、硼等与稀土元素一同氧化焙烧、强酸浸出、液相/酸浸渣分离等工序，不但可缩短生产周期，而且大幅减少强酸等化学试剂使用量和废液排放量，实现了二次固废酸浸渣（ Fe_2O_3 ）零产生以及有价金属铁、钴、铜、铝、硼等资源的无浪费再利用，有效提高了金属资源回收率和利用率。整个回收过程工艺简捷、绿色环保、无废物产生，突破了传统技术瓶颈。该方法普适性强，不仅可处理稀土永磁材料钕铁硼和钕钴合金，也可回收由稀土RE和3d过渡金属TM构造的其它RE-TM基稀土磁性材料，以及镍氢电池电极材料。在我国环境保护和资源节约意识增强的背景下，开展战略性关键稀土金属的循环再利用新技术研发，具有环境、经济和社会效益，同时对持续我国稀土资源的全球优势具有长远的战略意义。

我国首个核用先进钢铁结构新材料专用类标准获批：特种合金研究部以耐高温抗腐蚀低活化结构用铁素体/马氏体钢为主体申报的国家标准《核电用耐高温抗腐蚀低活化马氏体结构钢板》，于2020年6月2日作为首个核电材料



《核电用耐高温抗腐蚀低活化马氏体结构钢板》国家标准

国家标准获得国家市场监督管理总局（国家标准化管理委员会）批准，标准号：GB/T 38875-2020，自2021年1月1日开始实施。标准规定的技术指标先进，达到法国核电标准RCC-MRx中同类材料水平，综合技术水平达到国际先进水平，解决了我国核电结构材料领域的共性技术标准水平低、标准缺失、标准制定与科研工作不同步的问题，填补了我国核电结构材料标准的空白，核电产业中重要结构材料的生产将有标可依。

国内首套核电堆芯熔化模拟试验平台成功实现含铀工况试验：

2018年，在国家核电重大专项《大型非能动核电厂熔融物滞留措施研究》支持下，中科院核用材料与安全评价重点实验室克服



核电堆芯熔化模拟试验平台

了氧化物超高温熔化（ $>2800^{\circ}C$ ）、温度测量和放射性物质回收等技术难题，搭建出了国内首台2kg容量堆芯熔化装置。近期，研究团队已在中核北方核燃料元件有限公司成功模拟了 UO_2 燃料、Zr包壳管和不锈钢堆内构件的堆芯熔化事故，重现了堆芯熔化熔融物的相互作用、分层和传质、传热行为，为提升核电安全提供了坚实理论依据。

一位退休不退色的优秀共产党员

中科院金属所 李依依

身材不高、两眼炯炯有神，每天晚上在金属所大院里总能看到一队人，放着音乐大步流星地快走，而前面带队的是一位银发满头、精神饱满的老人，他就是曾经在2007—2009年间经历两次肠癌手术、6次化疗和28次放疗，2016年第三次患癌症做了手术的王崇琳研究员。

王崇琳毕业于北京航空学院（现北京航空航天大学）材料系，读书时他是班长，至今同学们仍爱称他为小班长，1962年毕业后分配到金属所



图一 1983年王崇琳（第三排左四）回国前在马普金属所

从事粉末合金研究。1978年，德国马普金属所Petzow教授率领科技代表团访问我所，提出派科学家访问德国、派年青学者去马普所进修和开办金相和相图学习班等三项建议，都被所里接受。

1981—1983年，王崇琳被所里公派到德国马普金属所做访问学者进修相图理论和粉末材料（图一），回国后除继续粉末材料研究外兼任金属所研究生部（现中国科大材料学院）相图课的授课老师（图二）。相图是从事材料科学研究的一门专业基础课，对学生理解材料科学中的有关理论非常重要。王崇琳在德国马普金属所研究生教材的基础上，每年都要花费大量的时间阅读有



图二 2019年11月王崇琳在教授相图课

关文献，收集相图研究的最新成果，整理加工后补充到课程教学中。学生们反映听王老师的课最大的特点就是：不管原来基础如何，都会受益非浅。

他边教学，边进行开发研究，还要照顾身患重病的老伴，然而他却从未因开发工作和家庭负担而影响了课程教学工作，近二十年来为13届学生授课，为金属所的研究生课程教学工作做出了突出的贡献。

王崇琳的授课风格为德国式授课方式，理论讲授与课堂练习相结合，成绩考



图三 中科院研究生院优秀教师奖

核被分解在平时的每一次练习中，彻底改变了应试教育的模式。他除了主讲相图课，还出版了《相图理论及其应用》教材一部。2006年，经金属所学位委员会推荐，中科院研究生院授予王崇琳为优秀教师（图三）。2010—2011年度学生网上评课得分97.2，全所排名第一，获得年度优秀教学奖。

王崇琳注重教书育人，言传身教，用他的实际行动把金属所严谨扎实、严肃认真、实事求是



图四 朱李月华优秀教师奖

的优良作风传给了学生们，赢得了大家的尊敬和爱戴。在他撰写《相图理论及其应用》一书时，忍受着癌症的病痛折磨，学习相关理论，查阅参考文献，完成书稿后才去医院检查治疗。这本由高等教育出版社出版的教材，在社会上产生了非常好的反响，成为材料学科广受欢迎的教材，他为此也获得朱李月华优秀教师奖（图四）。



图五 2015年杰出贡献人物奖

2016年第三次患癌症手术使他难于正常生活，甚至难于坚持讲完一两个小时的课程，他以常人难以做到的毅力和责任心坚持至今，2019年他还为新入所研究生讲授了相图课。2015年9月王崇琳获粉末冶金产业技术创新战略联盟和台湾粉末冶金协会颁发给他的1995-2015年海峡两岸粉末冶金技术合作交流20周年杰出贡献人物奖（图五）。

他退休后还应邀自费或会议赞助出席了多次国际会议，其中两次



图六 王崇琳获得国际粉末冶金大会PM2018组委会的国际合作



图七 2018年国际合作奖

获得了奖状。他利用与国际粉末冶金界的多年合作关系，2012年和同事出席日本横滨国际粉末冶金会议，为我国粉末冶金界争取到2018年在北京召开粉末冶金国际会议的机会。他积极参与会议筹备工作，组织、接待并邀请国际友人参会，在这次会议上王崇琳又获得国际粉末冶金大会PM2018组委会的国际合作奖，以表扬他的杰出贡献及热诚的服务（图六/图七）。

王崇琳还是一位很重情谊的学者。2016年7月是Prof. Petzow教授九十大寿，王崇琳在女儿陪同下重返德国斯图加特，



带去所里的贺信和红漆花瓶，向这位金属所的老朋友表示祝贺（图八）。德国同事都称赞中国学者尊重老师的优良传统。

王崇琳以科学的态度、惊人的毅力和乐观向上的品质对自己的病情数据做出各种曲线，提供给医生、家人进行分析研究，认真对待术后的调养与锻炼。你可以看到每天晚上他带领的走路队伍不断扩大，许多健康的人都跟不上他的步伐呢！

王崇琳是一位值得我们学习的退休而不褪色的优秀共产党员。