

金属之光

3

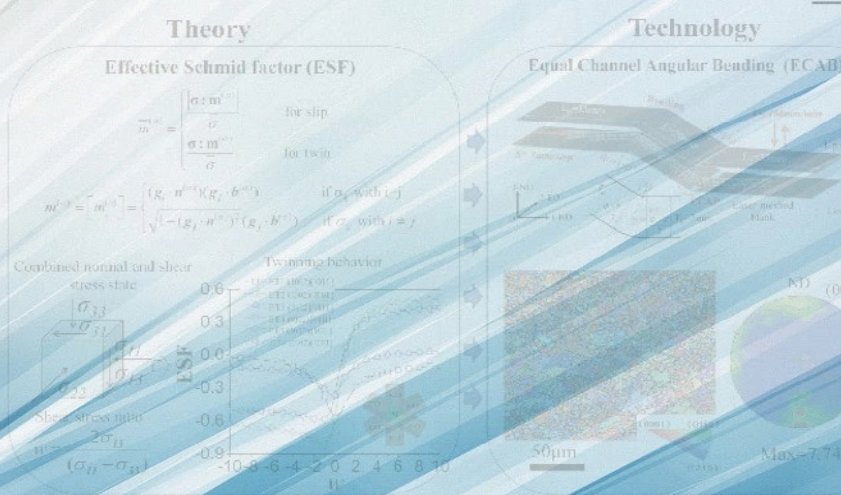
中国科学院金属研究所
2020年 第3期 (总第220期)

INSTITUTE OF METAL RESEARCH, CHINESE ACADEMY OF SCIENCE

2020年 7-12月科研进展概览



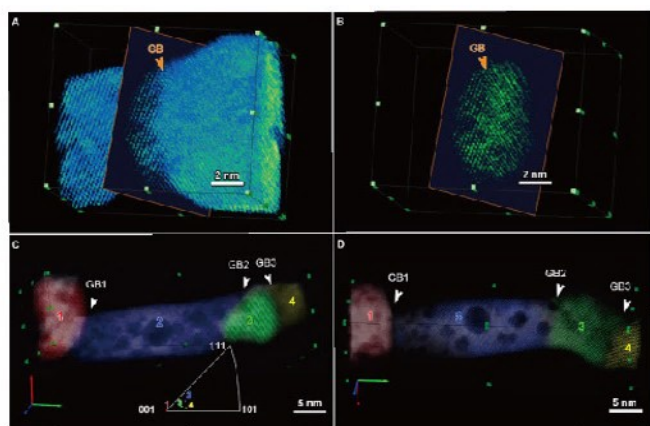
出版日期: 2020年12月



2020年7—12月科研进展

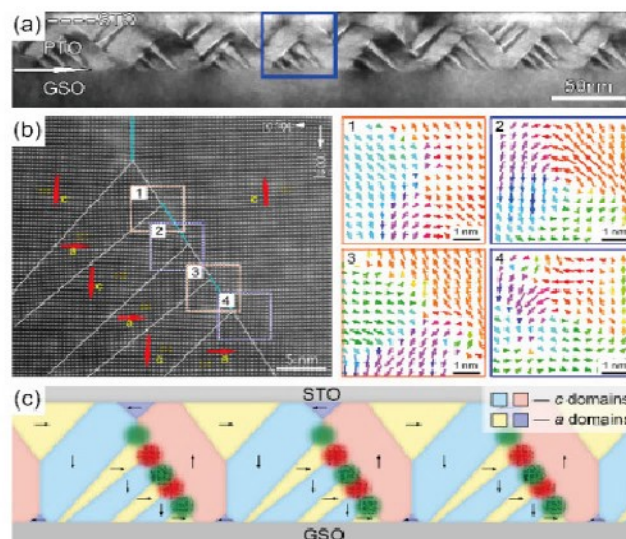
新材料探索及材料基础研究

实现金属晶界三维原子结构成像：国研中心材料结构与缺陷研究部杜奎团队与合作者实现了原子分辨率电子层析三维重构技术，并成功地解析了金属晶界的三维原子结构，包括大角的结构单元型晶界和小角的位错型晶界。与传统研究中普遍认为的晶界具有一维平移周期性不同，该研究表明，实际晶体材料中大角晶界的结构单元在三维空间不具有平移周期性。晶界原子配位数分析与曲率分布表明大角晶界的结构单元分布与晶界局部曲率有关。小角晶界的三维重构结果表明，晶界位错形成了大量割阶和扭折。从三维原子尺度对割阶和扭折直接成像，在实验上证实了半个多世纪前理论上提出的位错割阶和扭折模型。基于晶界原子坐标，可以同时获得晶界的晶体学信息与三维原子结构，由此能够全面解析晶界结构信息。通过电子层析三维重构技术所获得的晶界三维原子结构为后续晶界实验研究与计算模拟提供了重要参考，可以推动晶界结构与行为、晶界一位错交互作用的研究。相关成果发表在Matter。



双晶及多晶金属的原子分辨率电子层析三维重构

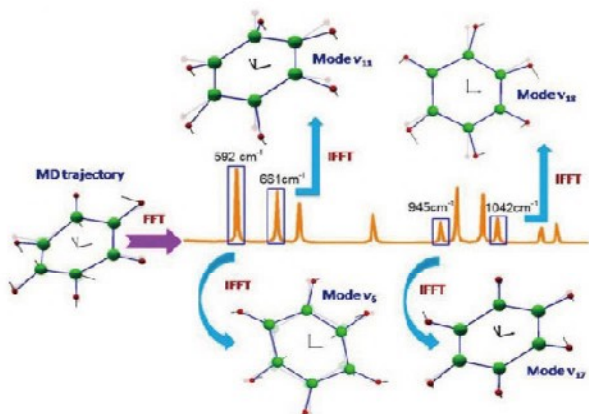
在铁电多层膜中发现周期性的涡旋—反涡旋对：国研中心材料结构与缺陷研究部朱银莲团队在铁电多层膜中发现周期性的涡旋—反涡旋对，填补了之前实验上原子尺度观察涡旋反涡旋对的空白。研究表明，随着 PbTiO_3 层厚度的增加，在全闭合结构的三角形a畴中会形成包含次生c畴的a/c畴结构，在次生c畴和全闭合结构的交界处形成了涡旋—反涡旋对，进而在整个 PbTiO_3 层中形成了周期性的涡旋—反涡旋阵列。这一结果加深了人们对铁电薄膜中拓扑结构的理解，对基于畴壁和拓扑结构的纳米器件的发展具有重要意义。相关研究成果在Applied Physics Letters在线发表，并经编辑推荐入选editor's pick，在APL期刊官网进行重点推介。



(a) $\text{PbTiO}_3/\text{SrTiO}_3$ 多层膜的TEM暗场像。(b)图(a)中蓝色方框区域的HAADF-STEM像，白色、蓝绿色虚线分别表示 90° 和 180° 畴壁，红色箭头指示该区域的Ti离子位移方向。(1)-(4)图(b)中方框1-4的Ti离子位移图，1、3为反涡旋，2、4为涡旋。(c) PbTiO_3 层中周期性涡旋-反涡旋阵列示意图，红色、绿色的圆分别指示反涡旋、涡旋所在位置。

分子振动频率的精准计算与频谱标定研究取得突破：进行粒子振动频率的精准计算是实现材料热

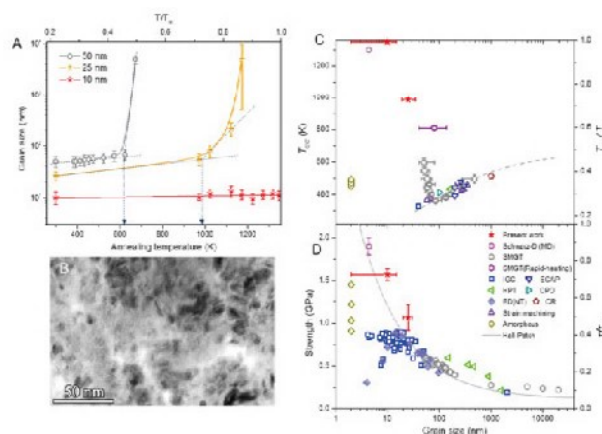
力学性质理论研究的最关键步骤。常用的简谐近似和准简谐近似方法由于无法充分考虑粒子间相互作用的非简谐效应，导致明显的计算误差。国研中心材料结构与缺陷研究部王绍青团队近期发展了基于第一原理分子动力学模拟原子运动轨迹的振动频率严格计算和谱标定算法，彻底解决了分子振动谱准确标定难题。该研究重新标定了对于理解苯分子结构和性质具有决定性意义的 a_{2g} 和 b_{2u} 振动IR实验频率。由此突破了一个当代光谱学领域的著名僵局，同时驱散了长期笼罩在密度泛函理论应用于有机化学研究的一片乌云。该工作作为第一原理光谱学研究的全面实现铺平了道路，并为解决Kekule共振、 π 畸变和芳香性的本质等困扰当代物质科学研究领域的世纪难题提供了重要的线索。相关成果在Scientific Reports在线发表。



分子振动谱准确计算与严格标定的第一原理分子动力学算法

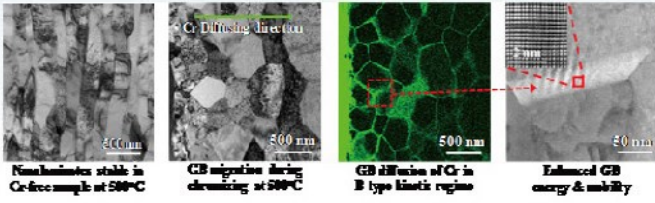
在极细多晶体铜中发现新型亚稳结构：金属通常以多晶体形式存在，受热或受力都会导致晶界迁移、材料结构变化（软化），晶粒尺寸越小多晶体稳定性越低。铜的熔点约1084℃，多晶纯铜加热到200–300℃之间即软化，纳米晶软化温度更低，有的室温下就软化。国研中心纳米金属材料研究部卢柯、李秀艳团队研究发现，将纯铜薄片的晶粒尺寸降低到10纳米以下时，纯金属铜多晶体会形成一种新型亚稳结构—受限晶体结构，加热到1084℃仍不软化，强度接近理论强度，表现

出极高的热稳定性、力学稳定性。该成果解决了材料科学和凝聚态物理领域的重要基础性问题，为探索固态物质结构基本特征及其新性能开辟了新空间，为研发高稳定性金属材料及制造工艺提供了新方向。相关研究成果发表在Science。



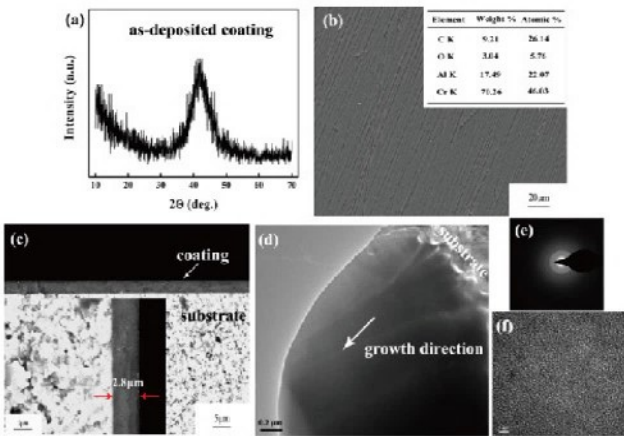
A: 晶粒尺寸分别为10nm、25nm、50nm的纯铜晶粒尺寸随退火温度的变化情况；B: 纯铜受限晶体加热到接近熔点温度（1348K）晶粒尺寸没有明显变化；C和D: 分别为纯铜中晶粒粗化温度与强度随晶粒尺寸的变化图，受限晶体呈现出接近熔点的超高稳定性和接近理想强度的高强度。

纳米层片IF钢在渗Cr过程中的快速晶界迁移行为研究：通过晶界偏聚或者形成层状组织，可以大幅提高纳米金属材料的热稳定性。国研中心纳米金属材料研究部王镇波团队研究发现，具有纳米层片结构的IF钢在500℃退火12小时后仍保持很好的结构稳定性，不发生粗化。然而，经相同温度渗Cr处理相同时间后，晶粒尺寸发生明显长大。分析表明，渗Cr过程中Cr元素由表面向材料内部沿晶界快速扩散，并在晶界富集，造成晶界能量和迁移率的提高，导致结构稳定性降低。此外，纳米结构表层在样品制备和渗Cr过程中引入了高的应力，也加快了晶界的迁移。本研究表明，与常规的晶界偏聚提高热稳定性不同，Cr元素由外部扩散进入材料而导致的在晶界上的富集将加快晶界迁移，造成纳米层片结构IF钢热稳定性的降低。相关研究成果在Materials Research Letters发表。



渗Cr对纳米层片结构IF钢中晶界迁移的影响

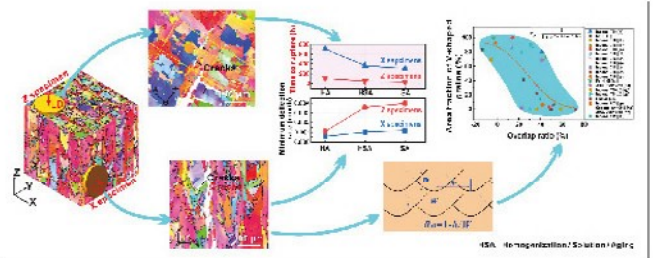
Cr₂AlC非晶态涂层相与结构转变及其耐腐蚀性机理研究：国研中心陶瓷及复合材料研究部李美柱团队首次沉积了非晶态MAX相涂层，研究了涂层晶化过程中微观结构与相演化，及其耐腐蚀性。该研究采用磁控溅射以及低温热压Cr-Al-C多相复合靶，在室温下沉积了Cr₂AlC非晶态涂层。在后续500-700℃真空热处理时，随温度或时间增加，非晶态涂层首先发生部分晶化，形成(Cr,Al)₂C_x固溶体，后转变为完全晶态的Cr₂AlC，甚至部分发生Al挥发诱导的分解，出现TiC_x。非晶态、部分晶化、完全晶化涂层在3.5wt.%NaCl水溶液中表现出不同的腐蚀行为，部分晶化涂层的耐蚀性最差，非晶态涂层的耐蚀性最好，原因是非晶态涂层上形成的具有双层结构和p-型半导体特征的钝化膜含有较多Cr₂O₃。研究对于深入认识材料的微观结构与其耐蚀性的本征关系以及开发新型耐腐蚀材料具有重要意义。



制备的Cr-Al-C涂层的 (a) XRD图谱, (b) 表面形貌, (c) 截面形貌, (d) 截面的TEM明场像, (e)SAED像, 以及(f) HRTEM 像。

异质晶粒结构主导的选区激光熔化成形Inconel

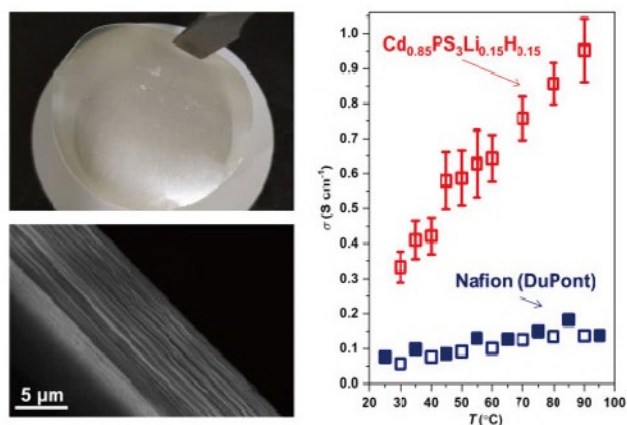
718合金的高温蠕变性能：如何澄清选区激光熔化 (SLM) 成形高温合金蠕变性能与组织结构间关系，进而优化SLM成形工艺参数是一个有待解决的关键问题。国研中心陶瓷及复合材料研究部张广平团队系统地研究了热处理条件和加载方向对SLM成形Inconel 718合金在650℃、400N下小冲杆蠕变寿命与损伤开裂行为的影响。研究发现，SLM成形Inconel 718合金中呈现由“V”型晶粒和柱状晶组成的空间异质晶粒结构分布特性，这一异质晶粒结构导致具有相同强化相分布特征的样品在不同加载方向上呈现出蠕变性能的各向异性。热处理参数的调控发现，均匀化/时效处理态样品的蠕变寿命最长，而固溶/时效处理态样品的蠕变寿命最短。为此，建立了SLM成形合金晶粒结构与成形工艺条件间的理论模型。为了进一步提高SLM成形合金蠕变寿命，提出了需采用较高能量输入或较大熔池重叠率的SLM成形工艺参数的指导思想。相关研究成果发表在Mater Des。



异质晶粒结构控制的SLM成形IN 718在650℃下蠕变性能的各向异性及最佳成形工艺参数的获得

发现高性能离子传导膜：国研中心先进炭材料研究部任文才团队制备出一类由二维过渡金属磷硫化物 (MPX₃, 其中M=Cd、Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Cr等, X=S或Se) 纳米片组装而成的膜，发现其过渡金属空位使该类薄膜具有超快的离子传输性能。纳米孔道中的离子传输对能量存储和转换应用至关重要，如质子和锂离子传导膜分别是燃料电池和锂离子电池的关键材料。研究发现，Cd_{0.86}PS₃Li_{0.15}H_{0.15}薄膜为质子传输占主导的离子导体，在90℃和98%相对湿度条件下的传导率高达

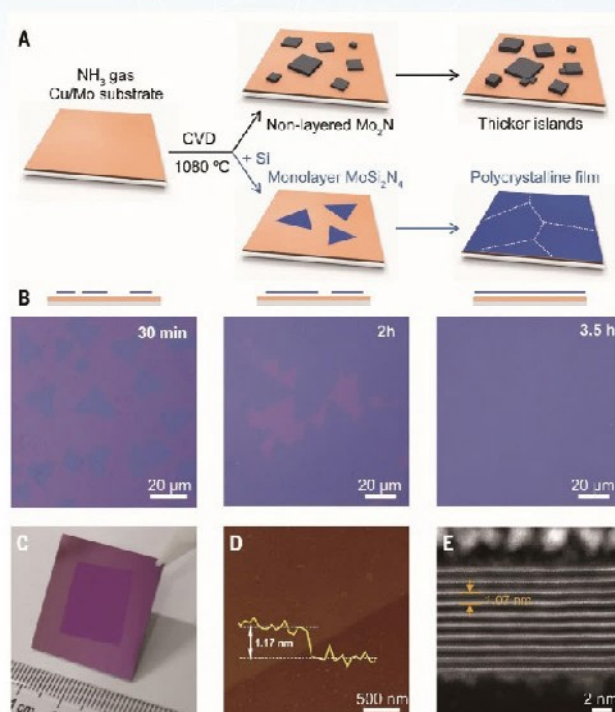
0.95 S/cm，是目前已报道的水相质子传输材料的性能最高值，并且在低温、低湿条件下仍保持了很高的质子传导率。进一步研究发现，Cd空位不仅提供了大量的质子供体中心，而且使该薄膜具有优异的水合性质，且质子在水分子的存在下易于从空位处脱附，从而使薄膜表现出优异的质子传导特性。此外，还发现 $\text{Cd}_{0.85}\text{PS}_3\text{Li}_{0.3}$ 和 $\text{Mn}_{0.77}\text{PS}_3\text{Li}_{0.46}$ 薄膜具有超快的锂离子传导特性，证明了空位诱导离子快速传输的普适性。相关研究成果发表在Science，同期“观点文章”对该工作进行了评述。



$\text{Cd}_{0.85}\text{PS}_3\text{Li}_{0.15}\text{H}_{0.15}$ 纳米片组装膜及其离子传输性能 (98%相对湿度)

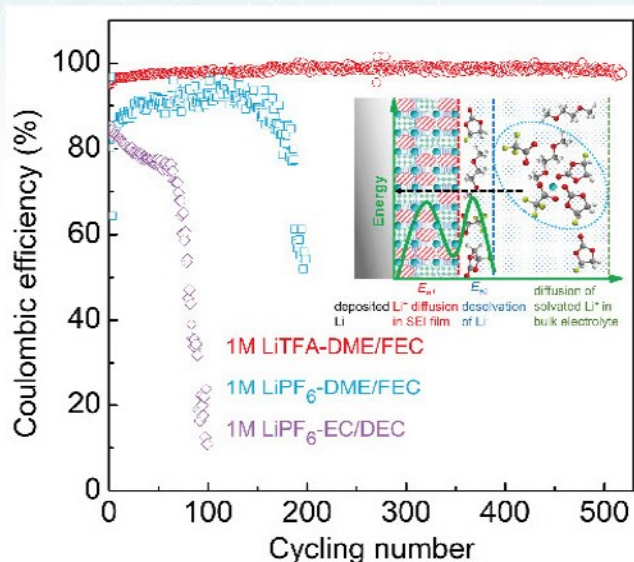
发现二维层状 MoSi_2N_4 材料家族：国研中心先进炭材料研究部任文才团队在CVD生长非层状二维氮化钼的过程中，引入硅元素可以钝化其表面悬键，从而制备出一种不存在已知母体材料的、全新的二维范德华层状材料 MoSi_2N_4 ，并获得了厘米级单层薄膜。单层 MoSi_2N_4 包含N-Si-N-Mo-N-Si-N 7个原子层，由两个Si-N层夹持单层MoN (N-Mo-N) 构成。进一步研究发现，该材料具有半导体性质 (带隙约1.94 eV) 和优于 MoS_2 的理论载流子迁移率，还表现出优于 MoS_2 等单层半导体材料的力学强度和稳定性；并通过理论计算预测出了十多种与单层 MoSi_2N_4 具有相同结构的二维范德华层状材料，包含不同带隙的半导体、金属和磁性半金属。相关研究成

果发表在Science。



CVD生长二维层状 MoSi_2N_4

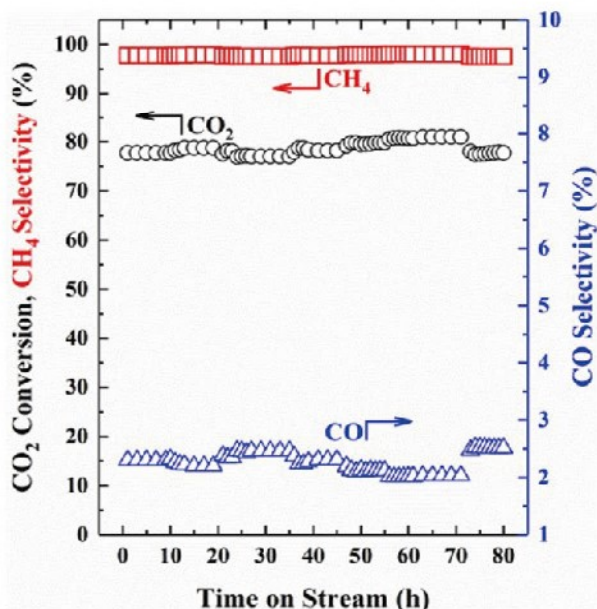
锂金属负极用电解液研究取得进展：国研中心先进炭材料研究部李峰团队在锂负极用电解液方向取得了新的进展。针对一般电解液中形成的固态电解质膜 (SEI) 锂离子传导率低下的问题，采用三氟乙酸锂调控锂表面SEI膜的成分，实现锂负极库伦效率和循环稳定性的大幅提升。由于具有相对较低的LUMO (最低未占据轨道) 能量，锂离子溶剂化层中的三氟乙酸阴离子会优先在锂负极表面发生分解，进而生成富含LiF和 Li_2O 等无机物的SEI膜。SEI膜中丰富的纳米无机粒子为锂离子的传输提供更多的晶界传输通道，并降低锂离子在SEI膜中扩散的能垒。在该SEI膜的保护下，锂金属负极以平均98.8%的库伦效率稳定循环超过500圈。研究还系统总结了有关锂负极的现有问题及其根本原因，并重点介绍了新型电解液和先进表征方法在锂负极方向的最新进展，并且为未来实用化电解液的研究提供了方向。



三氟乙酸锂为锂盐电解液的锂负极电化学

结构化催化剂催化二氧化碳加氢制甲烷取得重要进展

催化二氧化碳加氢制甲烷是转化二氧化碳的方法之一，但由于受到动力学的限制，目前催化剂尚难以实现二氧化碳热力学平衡转化。国研中心生物基材料与仿生构筑研究部矫义来团队与合作者开发了结构化Ni@NaA-SiC催化剂，显著强

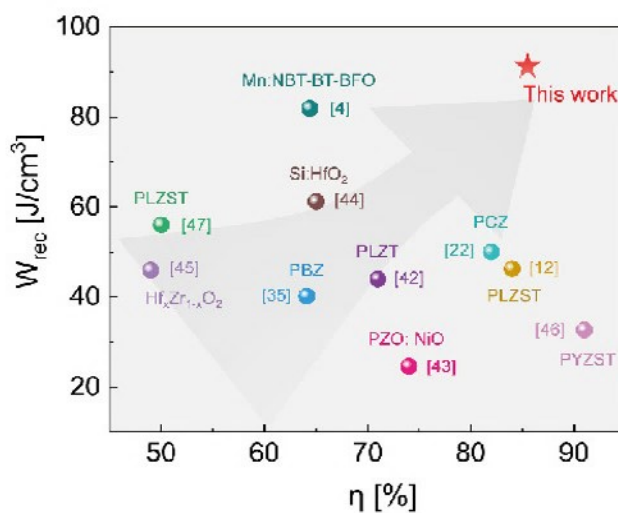


结构化Ni@NaA-SiC催化剂催化二氧化碳加氢制甲烷稳定性实验结果 (experimental condition: T=400°C, feed gas composition H₂/CO₂=4, flow rate=50ml (STP) min⁻¹, GHSV=1875 hr⁻¹)

化传热、传质，降低反应激活能，实现了二氧化碳的热力学平衡转化 (~82%)，甲烷的选择性达到95%；在80小时的使用寿命测试中，催化剂显示了良好的热稳定性和抗积碳能力。研究为开发具有实际应用价值的二氧化碳转化技术奠定了良好的基础。上述研究结果发表在AIChE Journal。

通过构建烧绿石相纳米晶结构实现反铁电薄膜的超高能量存储性能

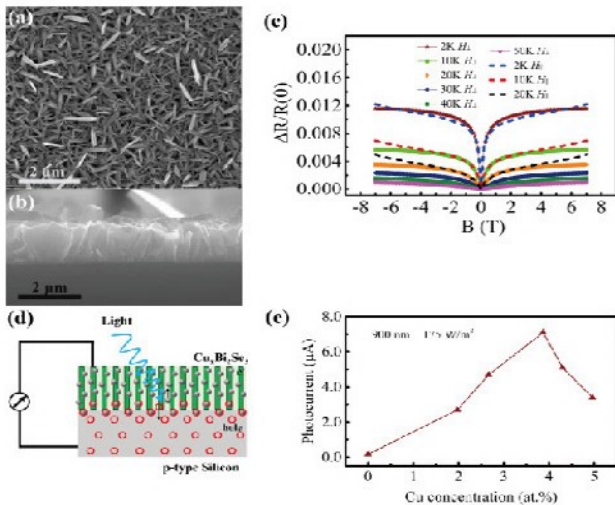
反铁电材料由于具有较高的充放电速率和能量存储性能，因此在脉冲电力系统中吸引了研究人员的广泛兴趣。国研中心功能材料与器件研究部由李异卓、王占杰、张志东等组成的研究团队通过化学溶液沉积和快速退火方法在不同退火温度下制备了Pb_{0.88}Ca_{0.12}ZrO₃(PCZ)反铁电薄膜。通过精细调节退火温度调控PCZ薄膜的微结构，系统地研究了微结构对PCZ薄膜的电学性能和能量存储性能的影响。研究表明，在550°C退火的PCZ薄膜基本为烧绿石相的纳米晶结构，同时表现出最高的可循环储能密度和效率(91.3J/cm³和85.3%)。超高的能量存储性能得益于致密的纳米晶结构导致的电击穿场强的提高。该工作有助于阐明能量存储性能与薄膜微观结构之间的关系，并且提供了一个有效提高反铁电薄膜材料能量存储性能的方法。该工作发表于ACS Nano。



制备的Pb_{0.88}Ca_{0.12}ZrO₃(PCZ)反铁电薄膜的可循环储能密度和效率与其他反铁电薄膜的比较

Bi₂Se₃垂直纳米片薄膜运输及光电特性探索研究:

拓扑绝缘体是一种表面导电、体态绝缘的材料，由于受时间反演对称性保护，有望实现表面无能耗的运输。但制备过程中受本征缺陷的影响，体态载流子过高，表面态特性不显著。国研中心功能材料与器件研究部王振华、张志东团队采用一种简便的方法制备出由垂直Bi₂Se₃纳米片组成的连续膜，实现了对其表面态的有效调控。由于它具有极高的比表面积，表面态占比大大增加。低温运输性质的研究表明，其表面态特性相比于传统的Bi₂Se₃薄膜得到了极大的增强。同时这种垂直的纳米片生长结构也提高了有效光吸收面积，结合Cu掺杂元素的调控，光电流提升42倍。这种非传统结构的拓扑绝缘体薄膜为实现拓扑绝缘体的无能耗运输以及在光电性质方面的研究开辟了一个新的途径。研究成果发表在Journal of Physical Chemistry C (2020)、Nanotechnology (2018)。

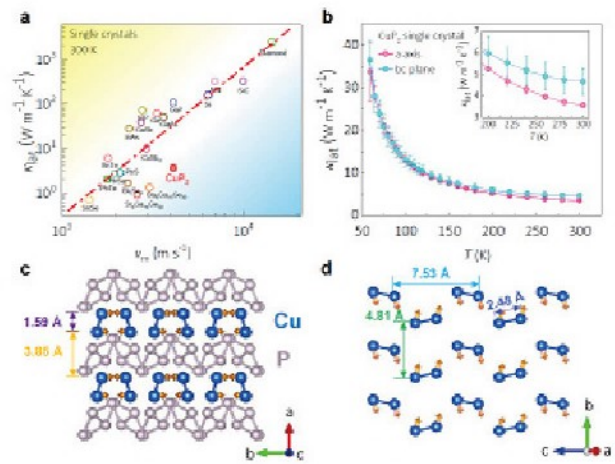


垂直Bi₂Se₃纳米片薄膜的运输性质以及Cu元素调控下的光电性质

发现兼具低热导率和高刚性的新材料:

国研中心功能材料与器件研究部李昶、张志东团队与合作者研究发现，CuP₂晶体兼具高声速和低热导率，与常规低热导率材料低声速、材料较软的特点形成了鲜明反差。高热导率材料在制冷系统散热、电子元器件热管理等方面具有重要应用，

而低热导率材料则常常用来构建绝热环境。电子、磁振子、晶格均可导热，晶格作为固体材料最基本的导热载体，其声速越大，热导率也越大。研究发现层状晶体材料CuP₂具有与经典半导体材料GaAs相仿的声速，但热导率却低一个数量级。针对这一反常行为，科研人员利用非弹性中子散射技术系统研究了该晶体的晶格动力学，从原子层次揭示了这一反常行为来源于Cu原子对的弱键合局域振动模式。该研究呈现了完整的晶格动力学图像，为深入理解材料的反常热传导行为提供了保证。这一研究结果发表在Nature Communications。



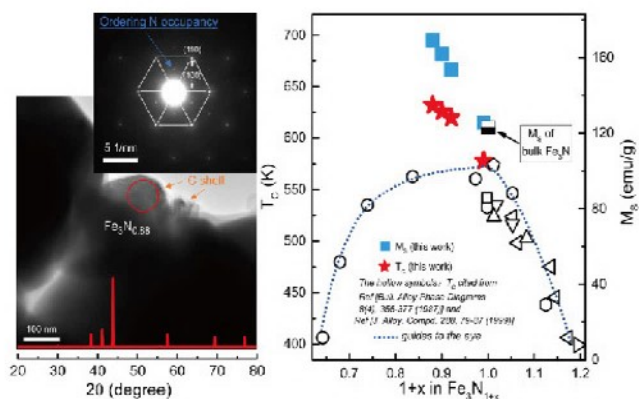
CuP₂晶体的热导率和晶体结构。a: CuP₂与其它不存在原子无序的化合物的对比b:CuP₂单晶的热导率。c:CuP₂的晶体结构。d:略去P原子的晶体结构。

化学液相法低温合成具有优异磁性能的 ε-Fe₃N

纳米颗粒:

铁氮化合物在无稀土永磁、信息存储、化学催化和生物医药等领域具有广阔应用前景。传统上采用氨气对铁进行氮化的方式合成铁氮化合物，合成温度高于300℃。该方法合成单相困难，具有高污染、高耗能等缺点。由于大量氮原子无序占位，很难获得良好的磁性能。铁-氮相图表明，当x<0时，ε-Fe₃N_{1+x}在合成温度以下不稳定，难以得到单相材料。国研中心功能材料与器件研究部李达、张志东团队创造性的采用化学液相法，在260℃氮化合成了碳包覆ε-Fe₃N/α-Fe

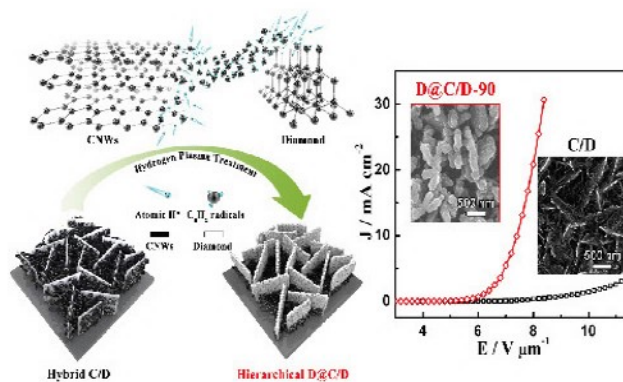
纳米颗粒，热处理得到室温稳定的 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}_{1+x}\text{@C}$ ($-0.12 \leq x \leq 0.01$) 纳米颗粒。团队进一步采用中子粉末衍射等技术研究了其晶体结构和磁性能之间的关系。结果表明 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}_{1+x}$ 具有空间群为 $P6_322$ 的密排六方晶体结构，氮原子占位高度有序，使 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}_{1+x}$ ($-0.12 \leq x \leq 0.01$) 在 775K 以下保持物相稳定。与之前块体研究的结论不同，发现 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}_{1+x}$ 纳米颗粒的居里温度 (TC) 和饱和磁化强度 (MS) 随着氮含量的降低而增加。其中 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}_{0.88}$ 的 TC 和 MS 分别达到 632K 和 192emu/g，是迄今该体系中报导的最大值。相关研究成果发表在 *Nanoscale*。



碳包覆 $\epsilon\text{-Fe}_3\text{N}_{1+x}$ ($x < 0$) 纳米颗粒因为高度有序的氮原子占位而具有优良的内禀磁性和热稳定性

分层金刚石/碳纳米墙的场发射阴极结构设计：阴极场发射器件具有易于小型化、响应迅速、低能耗的特点，在真空微电子器件领域具有重要作用。金刚石材料导热性好、机械性优异、具有负电子亲和势等优点，是极佳的阴极场发射电极材料。然而，本征金刚石是绝缘体，如何在金刚石材料中构建快速电子传输通路是开发金刚石基场发射电极的关键。国研中心联合研究部姜辛团队提出通过设计纳米金刚石/碳纳米墙复合结构来提升电子传导效率，构建高性能场发射电极的策略。利用等离子体处理技术，通过原子氢将碳纳米墙中的 sp^2 -碳转化为 sp^3 -碳并在金刚石纳米片两侧生长，表层氢终端金刚石发射位点被极大丰富，分

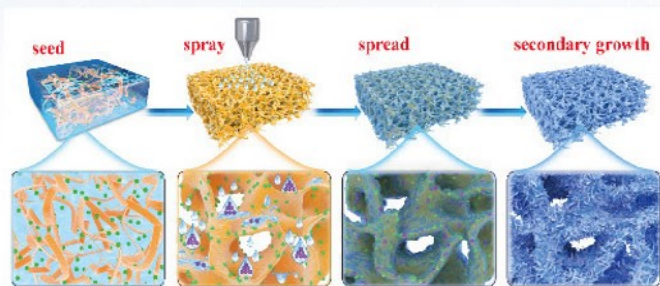
布于金刚石晶界处的石墨可以形成电子传输的快速通道，能够有效地促进发射位点上的电子发射。该电极开启电压降低、寿命显著延长，在 $8\text{V } \mu\text{m}^{-1}$ 场强下的电流密度提升了约 60 倍。上述工作作为开发高性能金刚石基场发射阴极材料提供了新的思路。该工作发表在 *ACS Applied Materials & Interfaces*。



氢等离子体处理纳米金刚石/碳纳米墙电极材料的构建和场发射性能

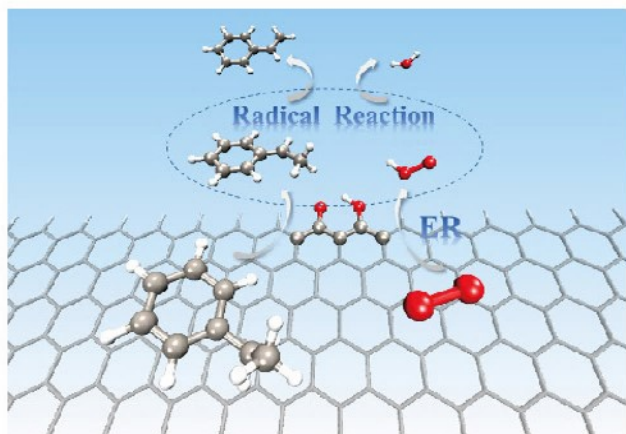
利用预播种—二次生长方法给碳材料穿上活性“外衣”：金属有机框架 (MOFs) 是一种新兴的有机—无机杂化多孔材料，其化学组成、结构、孔道环境和尺寸等可以在分子水平上实现调控，被认为是理想的催化活性材料。然而作为一种粉体无机材料，MOFs 的加工性、导热和导电能力以及稳定性严重制约了其催化应用。国研中心联合研究部齐伟团队与合作者开发了一种新颖的 MOFs/纳米碳复合催化材料制备方法。经过简单的预种 (seed) 配体，喷涂 (spray)、铺展 (spread) 金属离子和二次生长 (secondary growth) 过程 (简称为“4s”过程)，连续的 MOFs 薄膜活性“外衣”可以被均匀地负载在纳米碳材料表面。该复合材料兼具两组分高活性、易加工、稳定性好、导电能力强的优势，在温室气体二氧化碳的高效转化和利用以及电催化水分解反应中展示出优异的催化反应活性。该喷涂技术制备方法简单易行，利于放大，有望在化工领域获得应用和推广。相关成果发表在

Angew. Chem. Int. Ed, 并申请中国发明专利一项。



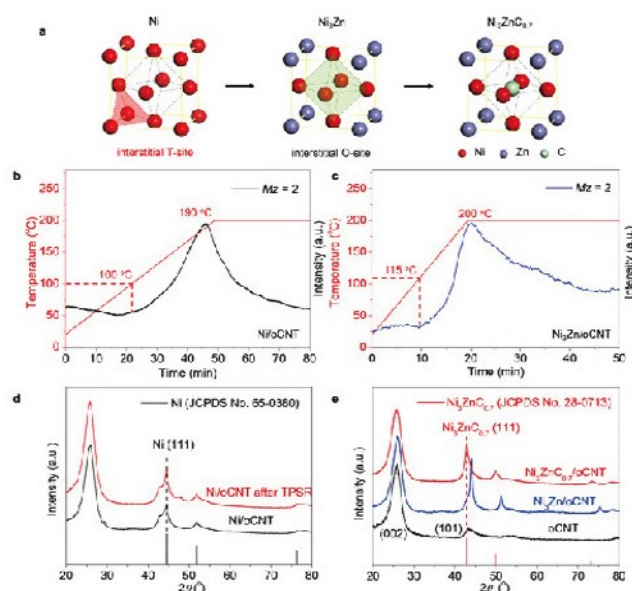
预播种—喷涂—铺展—二次生长方法制备金属/碳复合催化材料过程示意图

催化脱氢反应过程理论计算模拟取得新进展：催化脱氢反应是制取化工基本原料烯烃的重要途径，开发新型催化剂来应对其面临的选择性低、积碳及高能耗等挑战极其关键。国研中心联合研究部李波团队的前期研究成果揭示了碳材料 sp^2/sp^3 核壳结构的独特催化性能，及铂催化剂上抑制积碳的方法。近期，该小组采用微观反应动力学模拟方法，系统研究了纳米碳催化乙苯氧化脱氢的机理。该工作考虑了活性位点再生的三种可能的机理，此外，创新性地考察了弱吸附物种与自由基之间的反应。结果表明酮羰基和弱吸附的 $HO_2\cdot$ 自由基均具有催化脱氢的活性，而反应主要通过ER机理发生，自由基反应在特定条件下起到了重要作用。该成果为新型催化剂的理性设计及反应条件的优化提供了指导。相关成果发表在ACS Catal.



纳米碳催化乙苯氧化脱氢反应的机理示意图

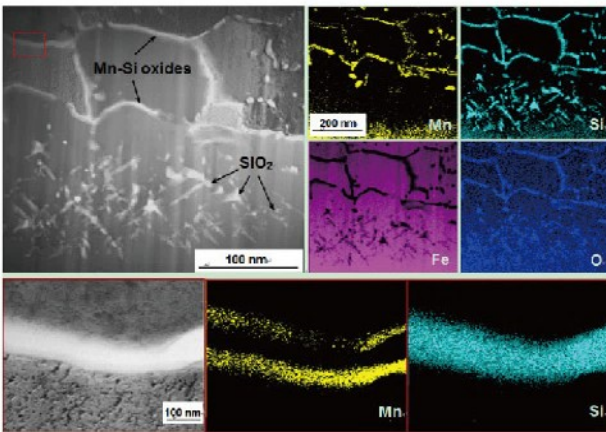
高效非贵金属乙炔加氢催化剂研究进展：国研中心联合研究部张炳森团队与合作者，通过引入锌原子对镍的电子结构和八面体间隙体积进行精确调控，捕捉了乙炔在镍基纳米粒子表面自发吸附、解离并进入形成间隙碳化物 $Ni_3ZnC_{0.7}$ 结构的完整过程。采用原位X射线衍射、原位同步辐射和透射电子显微等研究手段对催化剂结构及其演变进行了表征，发现间隙碳原子通过与六个镍原子的配位，可有效调控镍的原子间距离和电子结构，提高其在乙炔选择性加氢反应中的选择性和稳定性，该工作为高效非贵金属加氢催化剂的设计和制备提供了新思路。相关研究成果发表在Nature Communications。



锌元素调控镍八面体间隙影响乙炔的吸附、解离及碳原子溶解和渗入

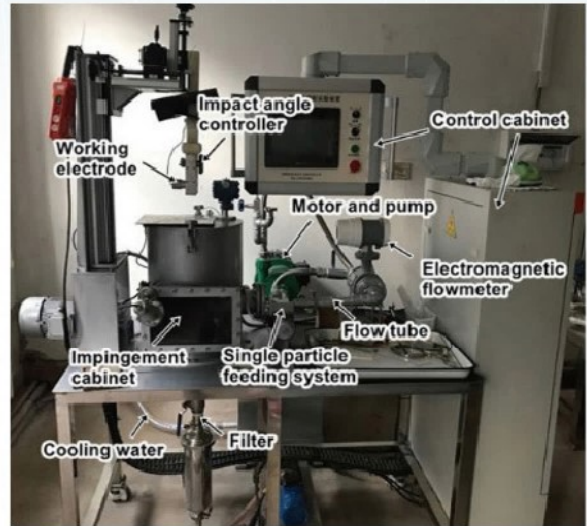
高强钢退火处理过程中的选择性氧化机制：高强钢热浸镀锌前退火处理过程中不可避免地会发生合金元素的选择性外氧化，成为生产高质量镀锌高强钢的“卡脖子”问题。传统高强钢热浸镀锌前退火处理工艺都是基于Wagner理论进行调整，即通过一定程度上提高氧分压，以牺牲内氧化的方式来抑制选择性外氧化。然而，该理论的应用有一个重要的前提—扩散过程是氧化反应的速

率控制步骤。金属腐蚀与防护实验室李瑛团队与合作者研究发现，高强钢的选择性氧化过程遵循直线规律，即氧的摄取过程是速率控制步骤，而非扩散过程；研究指出，某些合金元素显著促进选择性氧化反应，影响机制为氧化物形成氧分压低的合金元素的优先氧化诱导了其它合金元素氧化物的附着形核与生长。本工作对于调整退火处理工艺参数以有效抑制合金元素的选择性外氧化，进而提高先进镀锌高强钢质量具有重要的理论与实际意义，相关研究成果发表在Corrosion Science。



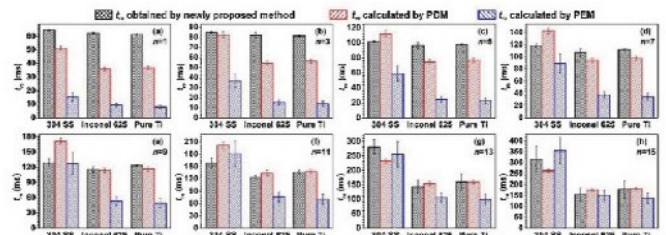
高强钢模型合金Fe-Mn-Si在700℃退火气氛中氧化2h后的形貌与成分图。SiO₂的优先形成促进了含Mn氧化物的附着生长。

冲刷腐蚀临界流速研究进展：材料环境腐蚀研究中心郑玉贵团队利用单颗粒冲蚀装置，首次提出了一种快速、简单、普适的再钝化时间获取方法，为揭示冲刷腐蚀临界流速本质及基于再钝化性能开发耐磨耐蚀合金奠定了基础，发表在Corrosion Science上。冲刷腐蚀是影响泵、阀、管道、螺旋桨等过流部件安全服役的顽疾，临界流速现象是解决这一顽疾的重要切入点。该课题组长期关注此临界现象，发展了临界流速精确测定方法，积累了临界流速数据，明确了外界因素的影响机制，澄清了临界流速现象本质，探索了提高临界流速的表面处理技术，为解决过流部件的冲刷腐蚀问题提供了指导。上述系列成果应油气及管线腐蚀领域加拿大国家首席特聘教授程玉峰的邀请，撰写了英文综述文章。



单颗粒冲刷腐蚀实验装置

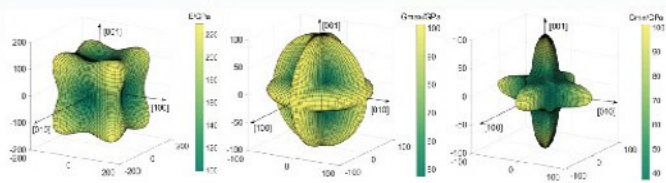
再钝化时间获取方法（表达式）： $i_{re} = 0.989i_s + 0.011i_p$



再钝化时间获取方法的可靠性验证

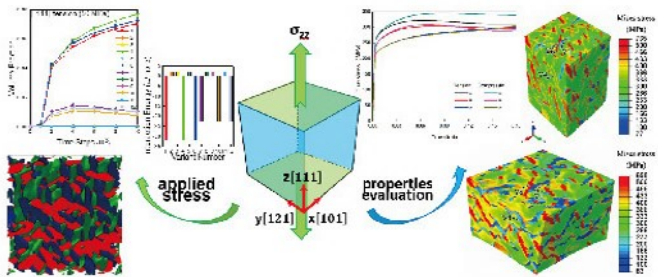
单晶叶片三维取向控制：单晶叶片共振是导致其疲劳断裂的重要原因之一。在单晶叶片形状尺寸固定的前提下，其弯振频率取决于杨氏模量，扭振频率取决于剪切模量，而模量值依赖单晶叶片的三维取向，为优化调控单晶叶片的振动频率从而避免共振风险，师创中心高温结构材料研究部周亦青团队对单晶叶片的三维取向控制进行了研究。采用衍射仪测定选晶法制定的[001]取向单晶棒的欧拉角并计算两轴样品台的转动角度，通过两轴样品台将单晶棒的方向转至特定的一次和二次取向所需的方向，利用线切割切取所需的三维取向的籽晶；通过Bridgman法进行定向凝固，制备三维取向与籽晶一致的单晶铸件。通过制备三维取向可控的单晶铸件，实现了铸件杨氏模量和剪切模量的精确控制，从而严格控制单晶叶片的振动频率，使每级单晶叶片的振动频带收窄，避

免二次取向不加控制时易引起振动频带太宽而导致共振断裂的危险。



单晶叶片杨氏模量和剪切模量的空间分布(a) 杨氏模量的空间分布；(b) 剪切模量最大值的空间分布；(c) 剪切模量最小值的空间分布。

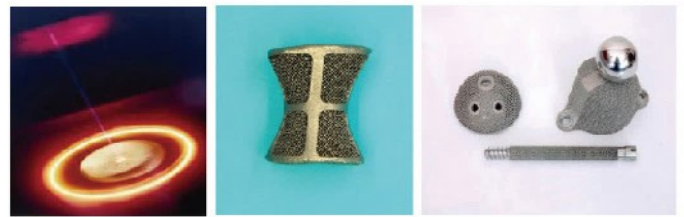
应力下钛合金微观组织演化规律及性能的计算评估：热加工过程中的微观组织演化及结构形成是材料性能控制的关键，但由于组织形成的影响因素复杂，机理不清，其精确控制并非易事。师创中心轻质高强材料研究部徐东生团队采用相场方法对钛合金在不同应力下的相变微观组织演化进行模拟，揭示了应力下 α 相变过程中变体选择及结构的形成机制；进而采用晶体塑性有限元方法对形成的各种微观组织的力学性能进行评估，实现微观组织及工艺的计算优化。模拟发现，与正应力相比，外加切应力对加速 β 向 α 相变更有效，且对变体选择的作用更强；模拟还发现，采用特定处理方式获得的多级微观组织可具有更好的强韧性，这些研究为航空及深潜钛合金的组织性能控制奠定了重要基础。



应力下钛合金微观组织与结构的形成及力学性能的计算预测

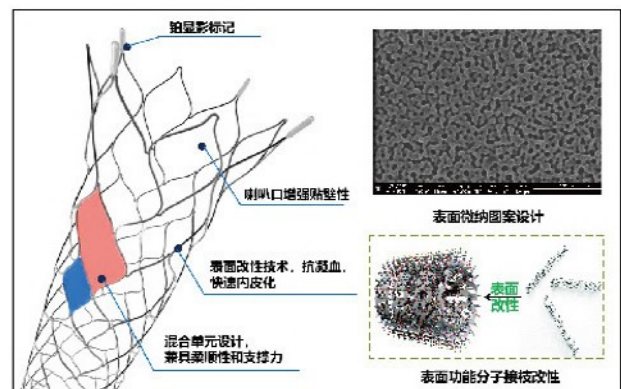
3D打印高强韧钛合金多孔植入器械研制：钛合金多孔材料具有与人体骨组织匹配的弹性模量，可有效解决金属植入物与人体骨弹性错配，其内部存在的大量孔隙有利于周围细胞长入和新骨生长，从而显著促进骨组织的形成能力，在医疗领

域具有广泛的应用前景。师创中心轻质高强材料研究部郝玉琳团队采用电子束选区熔化技术（3D打印），通过优化制备工艺参数，结合高强韧单元孔型设计和孔壁组织调控等技术，实现了低密度、高韧性、高疲劳强度钛合金多孔材料制备。该工作基础研究成果已近期发表在Sci. Adv. Acta Biomater. Addit. Manuf. 等期刊。与企业合作开展钛合金多孔植入器械研发工作，已向企业批量提供了高强韧钛合金多孔椎间融合器、骨小梁涂层髌臼杯等3D打印骨科植入器械，目前正在开展临床试验。



3D打印钛合金多孔植入器械

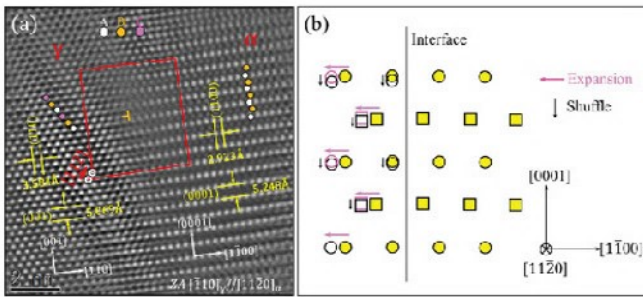
新型NiTi合金脑血管支架研发：我国心脑血管病患者数量巨大，每年约有170万出血性或缺血性脑血管疾病患者，而微创介入治疗已成为出血性或缺血性脑卒中的主要治疗手段，现今我国这类医疗器械产品还主要依赖进口，且临床应用中仍存在再狭窄等风险。针对上述问题，师创中心轻质高强材料研究部张兴团队承担了科技部重点研发计划课题“脑血管支架表面抗凝血功能涂层的技术研发”，与四家合作单位密切合作，开发了分别用于颅内出血性和缺血性疾病治疗的NiTi合



表面功能化镍钛合金脑支架

金支架，通过结构优化设计，新型NiTi合金支架兼具较好柔顺性以及一定支撑力。此外，利用电化学方法在支架表面构建微纳图案以及化学接枝生物功能分子，显著改善了NiTi合金支架抗凝血及促内皮化功能。本项目研究对高值医疗器械国产化具有重要意义。

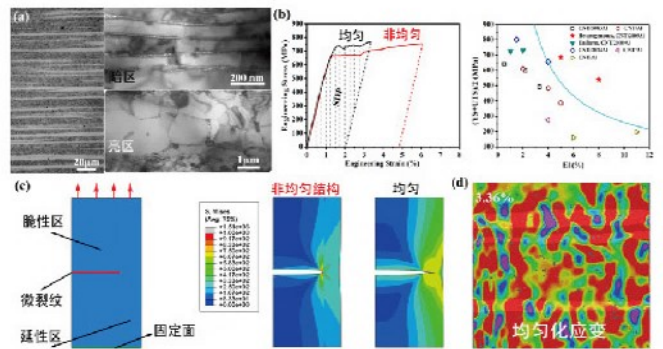
P型FCC-Zr形成机理取得新进展：师创中心轻质高强材料研究部李阁平团队针对完全再结晶锆基体中的P型FCC-Zr做了深入观察和探讨，发现当沿着 $[11\bar{2}0]_{\alpha} // [\bar{1}10]_{\text{FCC}}$ 晶带轴观察FCC-Zr时，FCC-Zr与基体的长轴界面呈现半共格关系，会在FCC-Zr一侧引入周期性的失配位错（周期为56层 $\{0002\}$ ）。通过FCC-Zr与基体的晶格参数比较发现， $\alpha \rightarrow \text{FCC}$ 相变的体积膨胀为19.8%，这主要是来源于相变过程沿着 $[1\bar{1}00]_{\alpha}$ 晶格膨胀（约22.0%）。为此，针对界面失配位错和晶格膨胀提出了 $\alpha \rightarrow \text{FCC-Zr}$ 相变的新机制：相变时，FCC-Zr片层的长轴方向通过失配位错与基体形成半共格界面，短轴方向通过晶格膨胀（热处理时的自发过程），基体中原子堆垛逐渐向FCC结构的堆垛过渡，最后通过原子的局部协调形成了P型FCC-Zr。以上提出的模型还可以推广到钛、锆和钪等金属及其合金中，对于P型FCC相打开了全新的认知。研究成果发表在Journal of Materials Science。



P型FCC-Zr形成机理

碳纳米管/铝复合材料的非均匀构型强韧化：师创中心材料制备与加工研究部马宗义团队将非均匀构型理念引入到金属基复合材料结构设计中，构

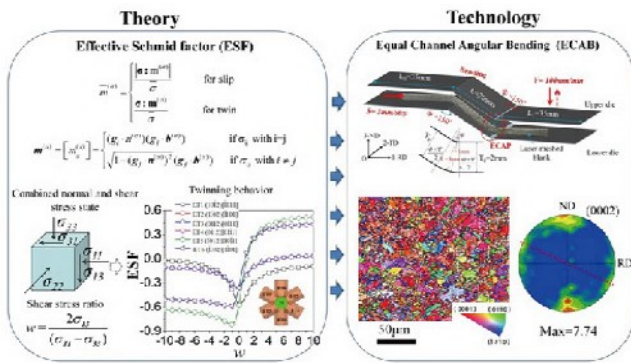
建出由富集碳纳米管的超细晶“脆性区”和不含碳纳米管的粗晶“延性区”组成的非均匀碳纳米管/铝复合材料。相比常规均匀分布的碳纳米管/铝复合材料，经结构优化的非均匀复合材料抗拉强度基本不变，而延伸率提高了一倍以上。其强韧化机理主要是“延性-脆性”非均匀构型的存在极大抑制了微裂纹扩展，并促进了复合材料微区应变的均匀化。基于该技术制备的碳纳米管/铝复合材料构件密度低、强韧性好、模量高、机加工性能优良，并取得应用验证，有望作为新型轻质高强材料在航空航天等领域取得应用。相关研究成果在Carbon、Composites Part A上发表。



(a)非均匀构型碳纳米管/铝微观结构，(b)非均匀构型碳纳米管/铝的强韧性，(c)延性-脆性非均匀结构抑制微裂纹扩展，(d)非均匀结构促进应变均匀化。

镁合金板复杂加载变形机制判断及性能调控方法研究取得进展：Schmid因子是目前最为广泛应用于金属变形机制启动判断的参数，但其只适用于单向应力加载。师创中心材料制备与加工研究部张士宏、宋鸿武团队陈帅峰等针对现有Schmid因子存在的不足，创新性提出“等效Schmid因子”概念，可以准确预测复杂应力状态金属变形机制的启动，并从物理意义和实验验证证明了其正确性和有效性。“等效Schmid因子”被认为是本研究领域的重要进展，且具有普适性。团队利用“等效Schmid因子”揭示了不同剪切变形类型、方向和比例下镁合金变形机制的启动规律以及剪切变形对镁合金板材组织和织构演化的作用本质。在此

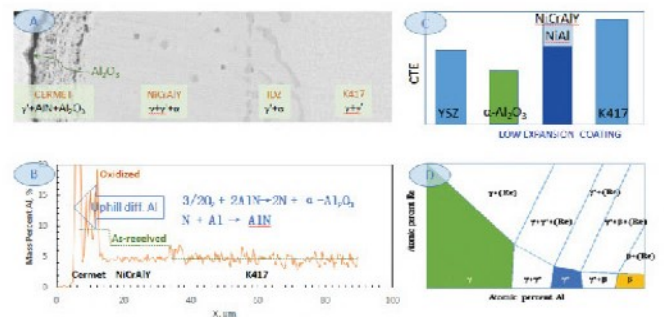
理论上，提出的等通道弯曲变形技术结合了弯曲和动态等通道挤压工艺，巧妙利用弯曲变形调节晶粒取向，再通过施加剪切变形，灵活调控材料变形模式启动。等通道增量弯曲变形技术是一种具有工业应用前景的大尺寸金属薄板材改性技术。实验表明，镁合金热轧薄板材经过单道次等通道弯曲变形后，基面织构明显弱化，延伸率大幅提升（可达61.6%），同时抗拉强度基本不变。相关研究成果已发表于Script Mater.、J. Alloy.Comp.、Materials letters、J. Mater.Sci. Technol.和 Int. J. Plast.等。



提出等效Schmid因子新参数，准确预测复杂应力状态下金属变形机制的启动规律，并指导开发等通道增量弯曲加工新技术，揭示剪切施加、孪生启动和织构弱化之间的定量关系。

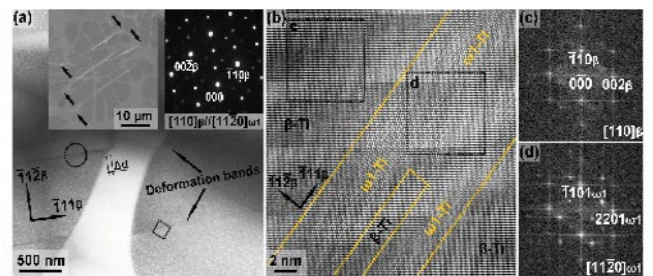
热障涂层设计新思想：师创中心材料表面工程研究部朱圣龙团队经多年探索，提出热障涂层粘结层设计新思想，他们在低膨胀纳米金属陶瓷涂层、低互扩散高强度 γ' 相涂层的研究中，发现低膨胀纳米金属陶瓷结构可降低氧化膜热应变并减轻粘结层褶皱， γ' 相结构可完全抑制二次反应区的形成，进而提出了双层结构设计和简便巧妙的制备方法。首先用标准的多弧离子镀方法制备 γ' 相底层，然后再通入氧气和氮气，制备 γ' 相基金属陶瓷纳米表层。Al分布证明，氧化过程中出现了Al的上坡扩散，因此纳米 γ' 相基金属陶瓷不仅是一种不易褶皱的氧化铝形成物，而且能把底层的Al抽取到表层，弥补AlN的消耗，维持AlN陶瓷含量，即保持强度、低膨胀、氧化铝生长能力。这一设计思想，将粘结层的功能设计拆分为

两部分，底层负责涂层—基体化学兼容功能，并提供Al源，表层负责提供氧化膜—涂层化学和力学兼容功能，并具有Al泵作用，把储存在底层的Al逐渐抽取到氧化膜—涂层界面。这一设计思想有很好的工业放大性，既保持了涂层结构的简洁性，又保持了涂层制备工艺的简洁性。相关研究成果发表在Corros. Sci.、Appl. Surf. Sci.、Surf. Coat. Technol.、J. Mater. Sci. Technol.。



A: 涂层氧化后的结构；B: 氧化过程中Al上坡扩散机制；C: 膨胀系数差异减小，强度提高；D: $\beta/\gamma+\gamma'$ 界面结构互扩散可导致富镍针状相析出，而 $\gamma'/\gamma+\gamma'$ 界面结构互扩散不会。

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。师创中心前沿材料研究部张海峰团队与合作者发现当内生 β -Ti 相具有临界的亚稳定性时，非晶复合材料的拉伸应力-应变曲线上会出现明显的锯齿。变形带同时贯穿了 β -Ti 枝晶和局域非晶基体，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 带的协同剪切机制。剪切带



非晶内生亚稳 β -Ti 复合材料中剪切带与 ω -Ti 带的协同剪切可导致了拉伸锯齿行为和剪切破坏模式

与 ω 带协同剪切机制的发现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

钛合金载人舱顺利完成“奋斗者”号万米深潜任务：师创中心轻质高强材料研究部雷家峰团队采用自主发明的Ti62A钛合金新材料，为“奋斗者”号建造了世界最大、搭载人数最多的潜水器载人舱球壳。由金属所牵头组成的研制团队攻克了载人舱材料、成形、焊接等一系列关键技术瓶颈：在国际上首次提出一种满足长期应用要求的增强增韧合金设计方案，设计并实现了具有独创性的钛合金两级片层状显微结构，发明了一种具有良好热加工成形和焊接成形性能的Ti62A钛合金，在韧性和可焊性与Ti64相当的前提下，强度提高20%，使我国全海深载人舱材料跃居世界领先地位；攻克了宽幅超厚板材组织和性能均匀性控制难题，确保了载人球舱材料微观组织和力学性能稳定，创造了国内钛合金铸锭重量、钛合金锻件单件重量和截面尺寸、钛合金冲压成型半球壁厚等多项纪录；突破了超大厚度钛合金窄间隙焊接、半球焊后变形控制及赤道焊缝预热电子束焊



金属所人员在“奋斗者”号返航欢迎仪式上

接等焊接成形瓶颈技术，确保了焊缝质量和强韧性全面达到设计要求。其中大厚度半球赤道焊缝预热电子束焊接技术国际领先。

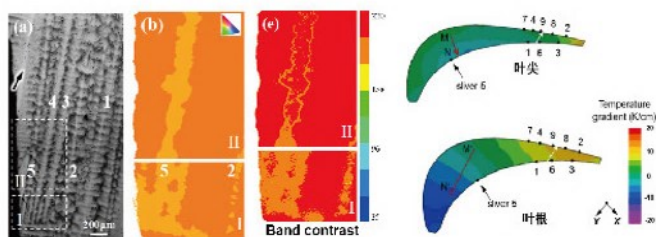
铝基复合材料制造“嫦娥五号”月球钻土钻杆：师创中心材料制备与加工研究部马宗义团队研制出“嫦娥五号”月球钻取采样机构中的关键部件——钻杆及其结构件，满足了“嫦娥五号”在月球表面苛刻工况下的采样需求，为“嫦娥五号”钻采任务的顺利完成提供了重要支撑。通过研发铝基复合材料大尺寸坯锭及多道次变形加工工艺，研制出高强韧铝基复合材料挤压棒材、锻件和厚壁管材，实现材料性能和稳定性的大幅提升。尤其针对钻杆用材开展材料高取向微观结构设计，在保证耐磨性的同时，实现材料高强塑性匹配，先后突破了复合材料内孔高精度、高直线度加工、热处理强化与矫直等关键技术，研制的钻杆耐磨性和强度可与钢材媲美，实现减重65%，解决了月壤钻杆“无材可用、有材难加工”的困境。



金属所研制的钻杆钻取月壤

单晶叶片批产合格率提升：师创中心高温结构材料研究部张健团队重点分析了影响单晶叶片批产合格率的主要因素，针对条纹晶、缘板疏松等问题开展了相关机理和控制技术研究。在此基础上，针对批产过程中人工记录数据不全，可靠性、可追溯性差等问题，联合天津工业大学、沈

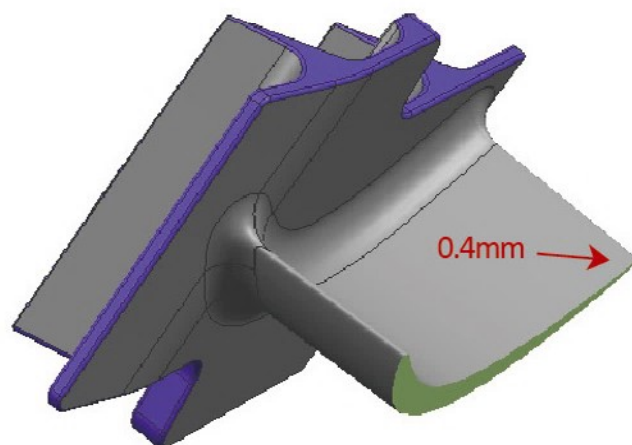
阳自动化所等单位，初步建立了单晶叶片制造全流程参数采集、分析与追溯系统，初步实现了叶片制造过程参数实时、自动记录，建立了单晶叶片的数字档案。结合实验研究，建立了部分工艺参数波动与单晶叶片合格率之间的关联，使条纹晶和缘板疏松问题得到有效改善，单晶叶片合格率由年初的30%–50%提高到60%。课题组2020年累计完成10台份3种发动机5类复杂单晶叶片的研制生产任务，共交付1000余件合格单晶叶片，保证了单晶叶片按节点、高质量顺利交付。



单晶高温合金中条纹晶缺陷的形成和演化：(a) 定向凝固中靠近型壳表面的枝晶5发生变形，诱发条纹晶，Metall. Mater. Trans. A；(b) 在叶盆位置，横截面温度梯度方向自下而上发生MN到M'N'的旋转，影响条纹晶的生长，Metall. Mater. Trans. A。

中国商用发动机用TiAl合金低压涡轮叶片研发取得新进展：TiAl合金低压涡轮7级工作叶片已成为CJ-1000发动机的优选方案，TiAl合金材料性能一致性、表征叶片性能的TiAl合金全面性能测试及TiAl合金低压涡轮叶片的研制和产业化成为叶片在CJ-1000发动机上应用的关键。师创中心轻质高强材料研究部崔玉友团队在对叶片显微组织表征的基础上，完成了模拟叶片组织的拉伸、持久、蠕变和疲劳等性能测试用和材料一致性评估用TiAl合金试样铸坯制备。开发出适于TiAl合金低压涡轮叶片批生产的TiAl母合金制备技术，通过中国航发商用发动机有限公司的首件评估和质量一致性评估，成为继美国Howmet和德国GFE公司后第3家可批量生产TiAl合金的单位；针对7级工作叶片尾缘更薄（0.4mm）及商发要求叶冠和封严齿为无余量制备带来的技术难题，团队进一步提升了净尺寸TiAl合金低压涡轮叶片离心精密

铸造的技术能力，突破了叶片成形、冶金质量和尺寸精度控制的关键技术，通过了TiAl合金低压涡轮7级工作叶片制备工艺评审和无损检验的特种工艺评审。计划分两次提供80片和200片部件考核叶片；如通过考核，金属所研制的TiAl合金低压涡轮工作叶片将应用于CJ-1000发动机，为我国商用发动机的研发做出贡献。



SiC_f/Ti复合材料整体叶环研制成功：SiC纤维增强钛基（SiC_f/Ti）复合材料整体叶环是一种针对高性能航空发动机结构设计提出的全新转子结构形式，代替传统钛合金/高温合金整体叶盘或盘片分离结构，最高可实现结构减重70%，是下一代新型发动机的潜在减重方案之一。师创中心轻质高强材料研究部自本世纪之初开始SiC_f/Ti复合材料整体叶环的试制工作，2008年研制出了国内首件全尺寸整体叶环，随后十余年间，不断有新材料和新结构的整体叶环诞生并相继通过考核试验，逐步奠定了金属所在钛基复合材料构件研制领域的国内领先地位。2019年，王玉敏团队又研制出了SiC_f/Ti60双肩结构整体叶环，并于今年10月完成了加温超转破裂试验，取得了良好的预期效果，标志着我国600℃用整体叶环一体化成型技术取得了关键性突破，SiC_f/Ti复合材料结构件整体研制水平又上了新一台阶，在装备应用进程中迈出了坚实的一步。



SiC_x/Ti复合材料整体叶环在“中国央企双创工作成就展”中展出

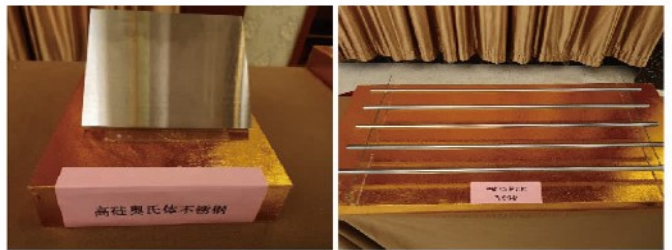
我所中标“耐铅（铅铋）腐蚀结构材料及匹配焊材研发”项目：2020年12月9日，师创中心特种合金部戎利建研究员组织所内多个课题组成功中标中科信招投标公司公开招标的“耐铅（铅铋）腐蚀结构材料及匹配焊材研发（实验室阶段）”项目，并在日前与中国院子能科学研究院签订了合同，合同金额为8647.96万元。项目团队将负责铅铋快堆中5种结构材料和3种配套焊接材料的研发。

铅铋快堆是四代先进堆的堆型之一，而小型铅铋快堆更是新一代反应堆的领先堆型，目前国际上只有个别国家掌握了该技术，相关材料和技术对外严格保密，国内还没有应用的先例。铅铋快堆所需的金属结构材料面临严峻的挑战，是制约铅铋快堆建设的关键。组成钢及合金的主要元素在高温液态铅铋合金中都会发生不同程度的溶解，从而造成材料的腐蚀和性能的显著恶化，不能满足在高温液态铅铋合金中长期应用的需要，同时结构材料还要满足长期的耐高温和抗辐照的核环境应用要求。

特殊环境材料、先进特殊钢和特种焊材创新课题组经过前期一年多的攻关，成功研发出耐铅铋腐蚀的奥氏体不锈钢、铁素体/马氏体钢原型材料，通过在钢中加高活性元素，利用其在高温下能在材料表面形成致密、稳定的氧化膜，从而有效隔离液态铅铋与材料的直接接触，同时该氧化

膜破损后还具有自愈合功能。通过合金化的设计，制备的奥氏体不锈钢、铁素体/马氏体钢保持了其耐高温、抗辐照的特点。相关性能测试表明，研发材料的室温、高温力学性能以及考核的高温持久、蠕变性能满足设计的需求，可作为反应堆容器、包壳、堆内构件、换热器等的候选材料，基本掌握了相关材料的板、棒、管及配套焊材的加工工艺，并为后续耐铅铋腐蚀结构材料及配套焊材的工程化奠定了坚实的基础。

2020年12月11日，在第八届中国快堆论坛暨快堆产业联盟大会上我所联合中国院子能科学研究院进行了“新型长寿命耐铅铋腐蚀材料型号”发布，展出了制备的部分材料和样管。



快堆产业联盟大会上展出的材料（左）和样管（右）

钠冷快堆控制棒动导管材料及部件研制取得新进展：

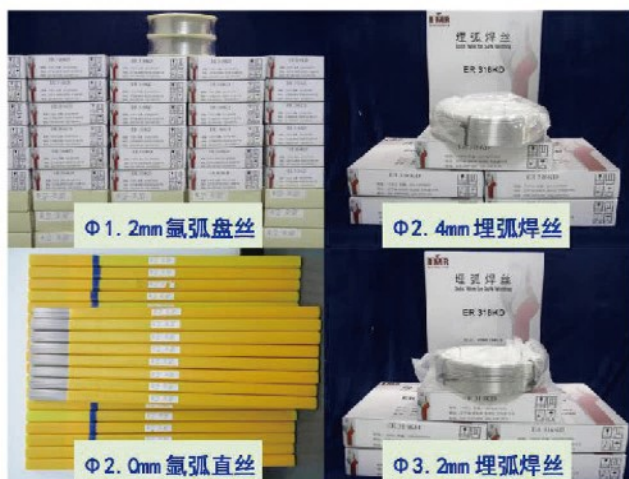
在钠冷快堆中，控制棒动导管位于堆芯钠液出口部位，受高温、多重应力、腐蚀及辐照等作用，其组织和

性能会随时间推移持续退化。控制棒动导管一旦出现破损或断裂，将严重威胁整个反应堆的安全。目前，我国钠冷快堆控制棒动导管材料及部件研究尚处于起步阶



段。研发出合格的动导管，可以满足我国示范钠冷快堆建设的迫切需要，并突破欧美技术封锁。2018年9月，师创中心由高温结构材料研究部周兰章团队与合作者联合攻关开展了动导管材料及部件的研发工作。经过两年多攻关，成功研发出动导管材料及相关工艺，并在大生产车间挤压出短尺寸模拟管件（外径135mm，壁厚16mm），组织和性能完全满足指标要求。

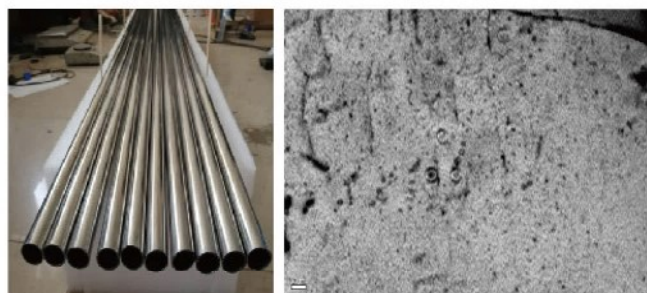
钠冷快堆用不锈钢焊材研制取得新进展：钠冷快堆是四代核电的重要堆型，堆容器和堆内构件是由不锈钢零部件（如内外容器、堆内支撑结构、堆芯围桶等）焊接而成。在快堆运行过程中，堆内材料长期处于高温、高腐蚀、高辐照苛刻环境，为保证快堆运行的安全可靠，对融敷金属和焊接接头的综合性能提出了严格要求。按照设计指标要求，国研中心先进钢铁研究部陆善平团队系统开展了钠冷快堆专用不锈钢焊材研制工作，揭示了长期高温服役过程中熔敷金属组织性能演变机理，并在采购技术条件中明确了焊缝金属组织控制方法，开发了 $\phi 0.9\text{mm}$ — $\phi 3.2\text{mm}$ 不同规格的钠冷快堆用ER316H(KD)奥氏体不锈钢专用焊材，同时满足了钠冷快堆对大厚度（ $>50\text{mm}$ ）奥氏体不锈钢板焊接裂纹敏感性低、高温强度高及耐晶间腐蚀等要求。团队完成了



不同规格钠冷快堆用ER316H(KD)焊材

CFR600钠冷示范快堆用不锈钢焊材的设计、研制、试制、工程监造到直接供货的全流程工作。截至2020年10月，累计供货20余吨，在堆容器、中间热交换器、钠管道、堆内构件全面应用，有力保障了首个钠冷示范快堆建造。

ODS铁素体不锈钢薄壁管材的制备完成阶段性目标：ODS钢具有优异的高温力学性能和抗辐照性能，是先进核能系统中极具竞争力的结构材料之一。师创中心特种合金研究部戎利建、严伟团队，在成分优化后，利用机械合金化方法为中国核动力研究设计院制备了最长可达2.6m、规格为 $\phi 20\text{mm} \times 1.25\text{mm}$ 的ODS钢薄壁管材。在 800°C 高温真空整管拉伸条件下，屈服强度 $\geq 150\text{MPa}$ ，抗拉强度 $\geq 200\text{MPa}$ ，满足用户提出的高温力学性能的要求。该项目的完成为后续ODS钢薄壁管材的焊接性能研究及应用奠定了前期基础。



精密薄壁管件 $\phi 20\text{mm} \times 1.25\text{mm}$ 及钢中细小弥散的氧化物

耐超高温低热导隔热涂层研究与应用取得重大进展：师创中心材料表面工程研究部常新春团队在耐超高温低热导隔热涂层方面研制与应用工作取得重大进展，陶瓷粉体材料研制和窄内腔复杂型面零部件喷涂工艺研究取得诸多创新性科研成果，解决了装备研制中“卡脖子”共性关键技术难题，在应用上取得重大突破。新型隔热涂层通过技术验证飞行试验，这是我国隔热涂层材料和涂层制备工艺水平的制高点，具有里程碑意义，获得用户高度评价并收到感谢信，认为：“金属所提供的特种涂层性能稳定、质量可靠、表现优异，对试验成功起到了十分重要的作用。”

重点行业关键材料技术研究

高速列车关键构件疲劳寿命预测软件系统开发成功：师创中心材料使役行为研究部张哲峰团队与中车长春轨道客车有限公司合作，针对国产高速列车材料及焊接结构寿命预测需求，联合开发的“轨道客车常用材料和焊接结构疲劳分析平台”顺利通过验收。团队将十余年来在疲劳性能预测与优化理论方面的系列研究成果首次集成于疲劳分析软件中，解决了材料疲劳性能大都依靠“试错”的问题。在此基础上，通过建立基于国产材料与焊接接头的组织与性能数据库，解决了国际主流商业疲劳分析软件中材料性能及理论参数不适用于国产材料的问题。此外，通过在算法上集成十余种高速列车焊接接头及母材常用标准，大大简化了高速列车焊接接头及母材评价流程，为高速列车关键构件可靠性设计提供了便利。



轨道客车常用材料和焊接结构疲劳分析平台

请输入用户名

请输入密码

登录

主要功能模块

- 组织及性能数据库模块
- 材料性能优化模块
- 构件寿命预测模块
- 构件疲劳评价模块

特色一：集成原创理论

- 低周疲劳寿命预测
- 高周疲劳强度预测
- 疲劳裂纹扩展速率预测
- 拉伸性能预测
- 断裂韧性预测
- 小样本疲劳性能评价

特色二：集成经典理论



特色三：集成国际标准

ISO 12107	Eurocode 3
Eurocode 9	BS 7608
BS 7910	DVS 1608
DVS 1612	IHW
prEN 17149	FKM

轨道客车常用材料和焊接结构疲劳分析平台主要模块与特色

开发出航空发动机用叶片楔横轧制坯技术：航空叶片精确塑性成形技术是先进动力系统用高温结构材料塑性加工领域亟待突破的关键技术之一。师创中心材料制备与加工研究部张士宏团队在研究 δ 相精确调控方法、深入理解冷轧变形对GH4169合金叶片振动疲劳性能提高机制的基础上，提出一种板式楔横轧高效制坯—精密辊轧复合成形新技术，解决了叶片制造过程中加工效率低、精度差、产品一致性和使役性能不佳等问

题。程明副研究员已与合作者研制成功新型伺服液压板式楔横轧机，成功制出高温合金和钛合金叶片坯料产品。该技术已列入航发集团十四五规划。



航空发动机用叶片楔横轧制坯技术与装备：(a) IM500型伺服液压板式楔横轧机；(b) 航空发动机用高温合金叶片坯料的板式楔横轧加工；(c) 从左到右分别是高温合金棒料、板式楔横轧件、叶片终锻件和成品。

发动机转子用耐磨封严涂层技术取得新进展：在发动机转子和静子之间建立封严涂层体系是延长工件使用寿命、提高发动机推重比和降低油耗的重要措施。目前，国内外对涂覆在机匣等静子部件上的可磨耗封严涂层的研究和应用已形成较为成熟的体系，但是对于篦齿、叶片叶尖等转子部位的耐磨封严涂层研究较少，磨损与氧化腐蚀问题突出。师创中心材料表面工程研究部宫骏团队研制出镍包覆立方氮化硼颗粒的cBN/Ni耐磨封严



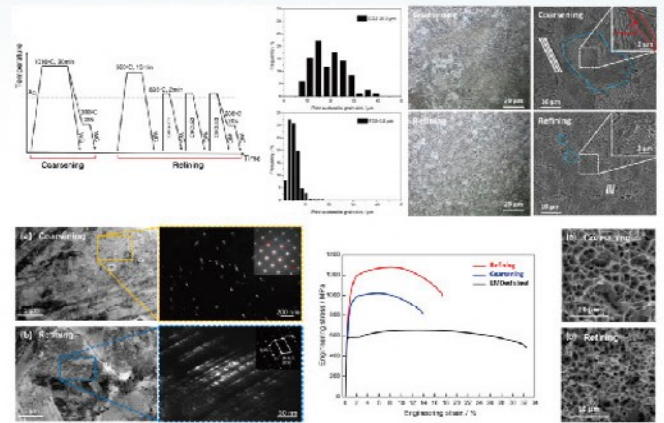
镀制的转子部件及涂层微观结构

涂层，解决了0.5 mm超薄篦齿表面cBN颗粒的均匀分布控制等关键技术难题，研制的cBN/Ni封严涂层成功用于发动机的篦齿盘、涡轮后轴颈、甩油盘等转子部件篦齿的封严。

装备关键零部件表面涂层技术取得新进展：师创中心表面工程研究部熊天英、崔新宇团队针对装备关键零部件中最苛刻的等离子体辐射与强腐蚀性气体交互作用下腔体内零部件的腐蚀问题，研发了高致密Y、Y₂O₃、Y/Y₂O₃、Y₂O₃/ZrO₂以及SiC复合防护涂层，突破了涂层与Al合金基体结合、热匹配性以及涂层致密性等关键技术难题，研制的表面高纯高致密Y₂O₃涂层通过用户考核验证和应用；研制的腔体内表面Y₂O₃/ZrO₂涂层通过用户考核验证和应用，实现工艺超低污染、抗强腐蚀的技术要求，在国内首次实现批量供货。针对镀膜设备用纯Al射频基片使用温度低、寿命短的问题，提出在Ni合金基片表面冷喷涂纯Al涂层，解决了0.2mm超薄基片表面涂层厚度均匀控制和基片反复弯曲过程中涂层易脱落等多项技术难题。开发的新型基片使用温度由300℃提高到400℃，使用寿命由1-2个月提高到6个月以上，达到国际先进水平。目前批量供货5万余件。

激光增材制造合金钢后热处理增强、增韧调控取得新进展：激光增材制造是快速成形复杂零件的先进制造技术之一。针对在国民经济和国防诸多工业领域发挥重要作用的高性能合金钢零件的激光增材制造成形，仍面临成分变化大、组织可控性差、缺陷多、残余应力高、力学性能不稳定等问题，后热处理改善性能是必要步骤。师创中心材料表面工程研究部鲍泽斌团队在深入理解合金钢的相变及微结构形成机制的基础上，针对激光增材制造成形的低碳低合金钢设计并开发了增强、增韧热处理工艺，控制合金钢固态相变产物的形核与生长方式，获得显著细化的、并含有大量孪晶的贝氏体组织，合金钢的抗拉强度和屈服强度明显提高，分别达到1276.8 MPa与893.1 MPa，

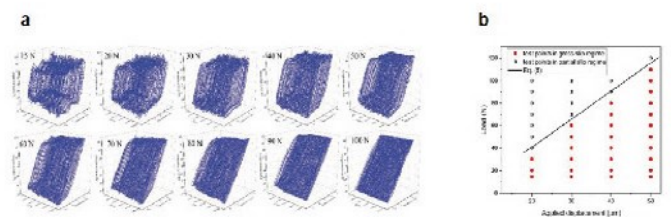
延伸率也有改善，达到16.6%。



激光增材制造合金钢后热处理增强、增韧调控：(a)热处理工艺；(b)显微组织及晶粒尺寸分布；(c)精细结构；(d)应力-应变曲线。

航空发动机典型材料微动磨损研究取得新进展：

作为一种危害性很大且不易发觉的磨损形式，微动磨损广泛存在于航空发动机的各种榫连接结构、机匣的安装边螺栓连接、盘和轴过盈配合连接、叶片缘板阻尼和叶冠阻尼台等位置。师创中心材料使役行为研究部段德莉团队一直致力于航发材料的摩擦学研究，先后获批成立了沈阳市和辽宁省航发材料摩擦学重点实验室，开展了典型叶片材料的微动磨损行为研究，考察了载荷和位移对微动运行工况的影响，在国内外首次提出了“系统形变率”预测指标，对微动运行工况的预测结果与实验一致。相关文章发表在Journal of Tribology。



(a)不同在载荷下的运行工况 (b)“系统形变率”对微动运行工况的区分与实验结果一致

关于“十四五”发展规划的若干思考

谢光锋

2020年11月4—25日，在纪检与审计处协调下，我与有关职能处室的同志一起先后到特种合金研究部、材料结构与缺陷研究部、前沿材料研究部，围绕研究编制我所“十四五”发展规划、做好院党组巡视整改“后半篇”文章开展调研，了解一线科技工作者所思所忧所盼，听取三个研究部科学家意见和建议。参加座谈交流的共有47位老师，其中正高级职称20人，副高级职称18人，中级及以下职称9人，三个研究部的正副主任、党支部书记和主任助理均到会。我在座谈中着重就学习贯彻党的十九届五中全会精神、把好未来发展的“势”与“略”，推进形成系统性可持续发展能力的学科体系、科研体系、话语体系等问题，与参会各位老师作了面对面的交流研讨，在先前个别交流的基础上获得了更多的第一手材料，进一步深化了对我所“十四五”发展规划所作思考的认识。现将我在与老师们交流过程中有关发言和思考整理如下，有些看法不一定对，权供同志们参考。

一、关于发展之“基”

到所里工作之前，应该说我对所里大面上的情况还是有所了解的，这主要来源于过去我与所里很多老先生的长期交往和院机关同事及许多院士的交谈交流。到所里工作后，通过调研座谈、谈心谈话等形式在面对面互动过程中，更是深切地体会到金属所的确是个“宝库”，发展基础还在、不出成果才怪，也更深切地感受到许多老师忧人才流失、忧发展失衡、忧成果不彰、忧后劲乏力、忧内斗内耗。故此，谋划我们未来的发展既要有信心有底气、不妄自菲薄，也要有忧患意识和紧迫感、不盲目乐观，“鸵鸟”取向不可有，战略定力不可无。在主题教育调研中，我曾就规章制度基础、思想文化基础、社会政治基础作了分析，从做好发展规划角度，还应特别注重学科“硬基础”和环境“软基础”建设。

对于学科而言，分科而学、分科而治，其发展

和建设是有规律的：第一是要有一批人，要么有共同的研究对象，要么有共同的研究范式 and “语言”，要么有共同的研究手段和仪器设备等等；第二这批人还很“活跃”，要经常开展研讨活动、相互交流；第三这批人有自己的交流“园地”和平台，譬如期刊、论坛等等；第四这批人建立起学会、协会等“共同体”组织，可以是国际性的，也可是国内的。体现学科地位和实力的，还是要看这些，看相应的挂靠或依托机构，看其中旗帜性标志性人和事。从我们所67年发展历程看，从李薰先生等老一辈科学家建所以来，凝聚和培养了一批优秀科学家，建立和壮大了一批优势学科，积累和迭代了一批材料工艺，创办和发展了几种品牌期刊，至今还在发挥作用，问题是不能老吃老本，还需要不断创新，不断奋进，不断为国家作出新的贡献。

对于环境而言，主要是科技创新制度保障、文化氛围和精神支柱，既要“风清气正”又要“凝神聚力”，既要继承老传统又要发展新文化，不能表现上经费上去了、事业发展了，而实际上人心散了、激情没了。落实习近平总书记反复强调的“大力弘扬科学家精神”要求，的确需要进一步发掘和凝练我所优良传统和学风所训，力求简洁明了、广泛认同、深入人心、导向鲜明。我曾在到所里报到的发言中，归纳我们金属所人的“金属质”用了“爱国奉献、忠诚担当，宅心仁厚、刚正质朴，严谨内敛、追求卓越，顶天立地、虚怀若谷”几个字，感到这是所里老先生们给我留下的深刻印象。在与老同志的座谈会上，我曾讲了四句话：发展是硬道理，高质量发展是新要求，“金属所人讲的话可信、金属所人干的事可靠”是老传统，承担和完成国家战略任务、啃得下硬骨头是真本事。继承和弘扬老一辈科学家精神，夯实“风清气正、凝神聚力”的科研环境，锻造“勇攀高峰、追求卓越”的科学文化，是面向“十四五”发展十分重要的基础性工作。

二、关于发展之“势”

党的十九届五中全会深刻分析了国家发展面临的形势与任务，明确了“十四五”时期经济社会发展指导方针和主要目标，对强化国家战略科技力量做出了战略部署，为我所做好“十四五”发展规划、谋划好未来发展提供了根本遵循和方向指引。顺势而为也好，乘势而上也好，借势而起也好，造势而进也好，关键还在把握好“势”，要讲政治、讲科学，总结经验、遵循规律。

一是更加强调对接需求。习近平总书记在科学家座谈会上讲“科研选题是科技工作首先需要解决的问题”，强调“研究方向的选择要坚持需求导向，从国家急迫需要和长远需求出发，真正解决实际问题”，还专门引用了恩格斯的话“社会一旦有技术上的需要，这种需要就会比十所大学更能把科学推向前进。”明晰定位、需求牵引，任务带学科、学科促任务，这些应该是新型举国体制的应有之义。党中央明确提出增强产业链供应链自主可控能力，实施好关键核心技术攻关工程和产业基础再造工程。材料科技具有基础性、先导性、应用性特征，材料研究更是应该强调来源于需求、着眼于先行、落脚在应用，在实际应用和工程建设中不断迭代不断创新不断满足新的需求。

二是更加注重基础研究。习近平总书记指出，基础研究是整个科学体系的源头，是科技创新的源头，我国面临的很多“卡脖子”技术问题，根子是基础理论研究跟不上，源头和底层的东西没有搞清楚。党中央已对抓紧制定实施基础研究十年行动方案作出了部署，可以预期基础研究将迎来又一个“春天”。过去我曾多次听师昌绪先生讲，搞材料没有基础研究就没有后劲，就会“知其然不知其所以然”，从事基础研究的人和从事应用研究的人应相互欣赏。我感到“知其然不知其所以然”“知其然知其所以然”“知其然知其未然”都是科研的不同境界或不同阶段，既要有用新工艺新手段发明新材料发现新现象，又要有用新理论新方法解释新材料新现象进而预测新材料新现象，这些都离不开基础研究，要充分认识到基础研究前瞻性、先导性、变革性特点，发挥其

在知识体系和学科建设中引领、基础、融通作用。

三是更加凸显范式变革。材料既是人类文明进步的基础，也是人类文明进步的标志。人类文明进步从科技角度看一定程度上讲，无非是物质流、能源流、人口流、信息流的协同作用。历史上第一次科学革命以来的前两次技术革命，可以说是集中体现在能源与动力方面；第三次技术革命即带来信息化社会和知识经济时代，并还在不断深化、拓展、延伸，可以设想其与新一轮科技革命和产业变革一起，应该是集中体现在信息和数据方面。我感到要把握创新的多点突破、交叉融合、数据驱动和伦理规约等一些新特点和趋势，在我们的科研布局中强化材料科学与工程等优势学科的同时，前瞻凝聚制造、计算、信息、设计等方面的人才，特别应关注生命科学、能源科技和算法算力领域的进展，下好先手棋、打好主动仗，自觉适应研究范式变革、赢得未来发展先机。

四是更加突出国家作用。第二次世界大战以来，科技越来越成为国际竞争的焦点和国家核心竞争力的关键要素，越来越成为体现国家意志的国家战略和国家行为，越来越需要大投入、大协同、大开放。刚刚结束的中央经济工作会议强调充分发挥国家作为重大科技创新组织者的作用，强调发挥新型举国体制优势，强调发挥企业在科技创新中的主体作用，强调落实好攻关任务“揭榜挂帅”等机制。国之强者要做到心中有数，我们把握好这些“势”，研判和分析“活”从哪里来、“钱”从哪里来、“人”从哪里来，就能更清楚我们应往哪里去、做到科学前瞻精准施策。

三、关于发展之“略”

在调研和交流中，许多老师对未来发展提出了一些具体的、很好的意见建议，应予积极采纳和吸收。从总体上讲，我感到我所“十四五”发展规划还是应坚持目标导向、问题导向、成果导向，用好系统观念、强化“顶层设计、应用牵引、整体带动”意识，抓住系统性、体系化、可持续要义谋划好“略”，可考虑重点把握好以下几个关键：

一是着力加强和抓好党的建设。一些老同志告诉我，我所初创时期的发展既离不开李薰先生

等大科学家，也离不开首任党委书记高景之的贡献。有同志还告诉我，在给李薰、葛庭燧、郭可信、师昌绪等先生树塑像时，不应该忘了高景之同志，不应该忘了当时党组织在科研组织和人才凝聚中起到的关键作用，特别是应把我所在“两弹一星”研制中的作用发掘出来。新时代推进我所科技创新，更是应该加强党的全面领导，大抓党的建设，大树基层典型，发挥党组织在明晰使命定位、谋划发展战略、对接国家需求、抢担重大任务、建设创新文化、凝聚激励人才等方面的作用，当“主心骨”、做“贴心人”、搭“连心桥”、干“暖心事”，同时发挥好党员同志的先锋模范作用，使得关键岗位有共产党员在示范，创新前沿有共产党员在冲锋，重要任务有共产党员在攻关，紧要关头有共产党员在坚守，每个支部都是战斗堡垒，一个党员就是一面旗帜，让党旗始终在科研一线高高飘扬。

二是恪守国家战略科技力量定位。习近平总书记在致我院建院70周年贺信中，明确希望我院“勇立改革潮头，勇攀科技高峰，加快打造原始创新策源地，加快突破关键核心技术，努力抢占科技制高点”，这也为我们发挥国家战略科技力量作用指明了方向。院党组强调，要准确把握好、切实履行好我院作为党领导下的国家战略科技力量的使命定位，牢记“国家队”、心系“国家事”、肩扛“国家责”。具体对我所而言，就是要当好材料科技领域“国家队”、关键技术攻关“集团军”、基础材料创新“策源地”，聚焦主责主业，修枝剪叶塑形，组织起来主动走进国家部委和政府机关、走进领军企业以及产业联盟和行业协会、走进创新要素集中和活跃的区域、走进金融系统和各类基金机构，对接国家战略需求敢于“揭榜挂帅”，在过去我院强调基础性、前瞻性、战略性贡献的基础上，进一步突出系统性贡献，代表国家水平、体现国家意志、满足国家需求，决不能成为沈河区“小作坊”、文化路“打工者”、五爱街“地摊商”。

三是争创和用好国家级创新平台。当代经济越来越表现为“平台经济”，当代科技与创新也越来越表现出“平台科技”“平台创新”特征，二者关联互动、相互激荡在应用性强的学科领域更为突显。党的十九届五中全会对强化国家战略科技力量作出了战略部署，对国家创新体系及国家级创新平台建设提出了新的要求。我们所已有国家研究中心、师昌绪先进材料中心等国家级平台，在“十四五”时期还应及时谋划和争取国家工程中心等新平台，强化各平台与研究所一体发展，强化各平台争取和勇担国家任务之责，强化各平台相互开放形成合力“打仗”意识，力促从“打工式”科研向“系统性”创新的转变，力戒各平台相互割裂、徒增管理层级和“一篮子螃蟹”局面。

四是坚持“人才是第一资源”打造人才强所。科技创新，人才为本。习近平总书记强调，要狠抓创新体系建设，进行优化组合，克服分散、低效、重复的弊端；要有一批帅才型科学家，发挥有效整合科研资源作用。强化国家战略科技力量，离不开科技帅才、将才、英才的脱颖而出和群英荟萃。在调研和交流中，许多老师对人事人才问题比较忧虑甚至是焦虑，对所里能不断有科学家脱颖而出而当选院士给予了期待。从根本上讲，人才是勇攀科技高峰“冒”出来的，是厚实创新土壤“长”出来的，是承担重大任务“压”出来的，是冲在一线实践“练”出来的。国家科技体制改革探索“揭榜挂帅”制度，有利于打破条块分割、提升创新链整体效能，一旦“榜”挂出来了，我们的“帅”有没有、敢不敢冲上去揭下来。这些都值得我们深思、谋划，在想清楚根本问题基础上，再分析到底是采取“补短”战略还是“扬长”战略，是“觅天下英才而挖之”还是“聚天下英才而用之”，是定向“锦上添花”政策还是普惠“厚植土壤”政策，是“本地化”策略还是“飞地化”策略，是支持“个人”还是支持“团队”等，同时研究与著名高校的竞争与合作关系，从而制定出对应的精准性和有效性策略和举措。