

立足材料前沿 勇攀科技高峰

——记西北工业大学凝固技术国家重点实验室

国家重点实验室作为国家科技创新体系的重要组成部分，是国家组织高水平基础研究和应用基础研究、聚集和培养优秀科技人才、开展高水平学术交流、科研装备先进的重要基地。作为目前我国顶尖的科研平台，国家重点实验室在科学前沿探索和解决国家重大需求方面发挥了非常重要作用，在科学研究方面取得不少具有国际先进水平的成果。

西北工业大学一直坚守为国防服务的办学理念，凝固技术国家重点实验室的主要研究方向都是针对国防装备技术的前沿。对前沿科学技术的认知和掌握需要科研人员重复做上千次、上万次的试验，默默地攻克一个又一个技术难关，正是他们的坚持、坚守和不懈努力，才会使我们的科研成果成功地运用到国家的高端装备制造业中，才能够兴国、兴邦，实现伟大的中国梦。凝固技术国家重点实验室自建成以来，一代代的科研人，薪火相传，不断地积累，才有了今天令人瞩目的成绩，他们充分发挥平台的作用，面向国际科技前沿、学科发展以及国家重大战略需求，凝炼发展目标和研究方向，开展了原创性、系统性的科学研究，打造了一支支高水平的研究团队，培养和汇聚了一批批高层次的学科领军人才，在探索材料科学的道路上，不断前行，勇攀高峰。

1 实验室概况

凝固技术国家重点实验室是在西北工业大学原铸造专业国家重点学科基础上建立的，于1989年由原国家计委和国家教委批准建设，1995年建成并通过国家验收；1998年4月通过原主管部门中国航空工业总公司组织的自评估；在国家科技部组织的评估中，2003年和2008年取得排名前列的良好成绩，2013年被评为“优秀类实验室”，2018年评估结果为“良好”。

凝固技术国家重点实验室定位于凝固与相关科学技术领域的应用基础研究，主要研究方向为现代凝固理论、材料精确成形和航空航天先进材料。现任实验室主任为李金山教授，学术委员会主任为中国科学院院士魏炳波教授。实验室现有固定人员共94名，其中两院院士5人，国家级杰出人才13人，国家级青年人才11人；拥有国家自然科学基金委优秀创新群体1个，长江学者创新团队2个，国家科技工业优秀科技创新团队1个。

凝固技术国家重点实验室以航空航天为代表的国防重大材料技术需求为主要服务对象，在不断形成具有重大原始创新、高影响力理论成果、实现技术创新的同时，充分发挥在材料科学技术研究领域的综合性和集成性优势，提供从基础理论、新技术原理、材料设计、制备成形、成套装备到使用效能的完整技术方案，建成在凝固与相关科学与技术领域代表中国学术水平，在国际凝固及相关领域具有重要影响的科学研究基地、人才培养基地、技术创新基地、学术交流基地和国家公共研究平台。

本着“向世界开放，创国际一流”的宗旨，凝固技术国家重点实验室与国内外高水平研究机构 and 知名学者保持着长期频繁的合作交流，每年向国内外发布开放课题指南，接受国内外访问学者和客座研究人员。实验室还是中国材料研究学会凝固科学与技术分会、西安市铸造学会等多个学术机构的理事长单位。

2 主要研究进展与成果

从周尧和、傅恒志和张立同三位院士创建至今20余年，凝固技术国家重点实验室一直以来以“传帮带”的优良传统为团队文化，形成了老中青相结合的学术梯队。目前实验室围绕三个研究方向上设置了7个



研究团队和1个材料分析研究公共平台。2013年至今,实验室共主持和承担包括国家973、863、重点研发计划、国家自然科学基金等国家及省部级各类科研项目700余项,获国家级科技奖励6项(国家自然科学基金二等奖1项,国家技术发明二等奖5项),如表1所示,省部级一等奖9项(表2);发表学术论文2 500余篇,授权国家发明专利250余项;培养博士282名,硕士900余名。同时,实验室在金属增材制造、陶瓷基复合材料、铝合金/钛合金热加工、化合物半导体探测器材料和碳/碳复合材料等方面的专利成果还支撑了铂力特、鑫磊、超晶、迪泰克、航津等5个高技术创新企业,其中铂力特已成为具有显著世界影响力的中国3D打印龙头企业。

2.1 现代凝固理论

凝固是物质从液相转变为固相的过程,水结冰、金属铸造、焊接、半导体晶体的熔体生长过程等自然界和工业过程中普遍发生的现象都属于凝固过程。凝固理论研究不仅提供对凝固过程的科学认识和深刻见解,而且还是发展先进凝固技术和先进材料的基础。将凝固理论发展到能够精确描述复杂的实际材料组织,使其能更有效指导工业实践,是现代凝固理论研究团队多年来的主要目标。近年来,团队取得的成果主要体现在:

(1) 建立了更精确描述实际生产复杂过程的凝固与固态相变一体化理论,大幅度松弛了经典凝固理论

的一些约束性假设,提出了热力学-动力学相关性理论并建立了适用于工业合金凝固的非平衡演化方程,可以精确描述多元合金浓溶液体系的凝固与固态相变行为,包括深过冷动力学、非晶合金形成动力学、扩散控制相变中界面迁移、热变形中的动态再结晶等(图1)。应用上述理论,建立了铝合金、镁合金、高强度低合金钢和非晶合金的组织性能调控方法,以及纳米材料晶粒控制理论与调控方法。

(2) 建立凝固组织精确数值仿真方法(图2)。采用连续相场模型系统研究了定向凝固双晶晶粒竞争生长过程中组织演化及溶质输运过程,阐明了定向凝固晶粒竞争生长过程、机制及控制;建立了精确描述界面特性的晶体相场模型,在原子尺度上研究了形核问题,确定了过冷度及过饱和度对形核路径的影响规律,阐明了分步形核中亚稳相的存在机制及其对形核过程的影响,揭示了不同过冷度下bcc结构及fcc结构的形核过程及其结构转变机制。

(3) 搭建了强磁场条件下金属非平衡凝固与相变研究平台;发现了比固态磁性更强的纯金属熔体,并观察到了正常场不稳定效应;基于铁磁流体磁性与界面稳定性理论,考虑熔体强磁性引起的梯度场受力情况,提出了适用于磁场下金属熔体磁性和界面稳定性的新判据(图3)。

2013年以来,现代凝固理论研究团队共发表SCI收录论文320篇,其中,《Acta Mater》20篇,《Scripta

表1 获国家科技奖励情况

奖项	名称	时间
国家技术发明二等奖	XXX材料(第一完成人)	2018年
国家自然科学基金二等奖	长寿命耐高温氧化/烧蚀涂层防护机理与应用基础(第一完成人)	2016年
国家技术发明二等奖	碳陶飞机刹车功能复合材料的研制与应用(第一完成人)	2016年
国家技术发明二等奖	高性能轻量化构件局部加载精确塑性成形一体化制造技术(第一完成人)	2016年
国家技术发明二等奖	新型合金材料受控非平衡凝固技术及应用(第四完成人)	2016年
国家技术发明二等奖	高能射线探测器用碲锌镉晶体材料及制备技术(第一完成人)	2013年

表2 获省部级科技奖励情况

奖项	名称	时间
国防技术发明一等奖	XXX材料	2017年
陕西省科学技术一等奖	高性能轻量化构件局部加载成形一体化制造技术	2014年
陕西省科学技术一等奖	碳纤维增强湿式摩擦材料制备技术及其工程化研究	2014年
陕西省科学技术一等奖	大型轻合金结构件数字化无冒口精密铸造技术	2015年
陕西省科学技术一等奖	连续纤维增韧陶瓷基复合材料的强韧化基础研究	2016年
陕西省科学技术一等奖	超高温氧化物共晶陶瓷及其凝固制备技术	2017年
陕西省科学技术一等奖	钛基非晶合金及其复合材料组织调控及制备技术	2018年
教育部自然科学一等奖	结构功能一体化陶瓷基复合材料的设计、制备与应用基础	2016年
教育部技术发明一等奖	高温抗氧化抗烧蚀涂层关键技术及应用	2014年

Mater》16篇，《Inter. Mater. Rev》综述1篇，ESI高被引论文4篇；极端非平衡凝固理论奠基人之一、俄罗斯科学院S.L. Sobolev教授长期跟踪本项目成果，在《Acta Mater》等刊物9次引用及肯定性评价。



刘峰教授

学术带头人：刘峰，教授，德国洪堡学者，中国科协全国委员。入选2012年度“长江学者”特聘教授，2011年获得国家杰出青年科学基金；获2013年中国青年科技奖，入选2013年“百千万人才”工程国家级人选、2013年中青年科技创新领军人才及2016年中组部“万人计划”领军人才；享受国务院政府特殊人才津贴。主要研究方向为非平衡凝固理论与技术，非平衡凝固与固态转变的统一理论，热力学/动力学相关性，纳米等亚稳材料制备及稳定性研究，先进钢铁材料、高强度铝镁合金制备等。带领团队发表SCI论文280余篇，包括本领域著名期刊《Acta Mater》34篇，《Inter Mater Rev》3篇；获陕西省科学技术一等奖一项、二等奖两项。主持及参与国家自然科学基金杰出青年科学基金、973专题、重大项目2项、重点项目2项、面上项目3项、霍英东青年教师基金等30余项基金及人才项目。

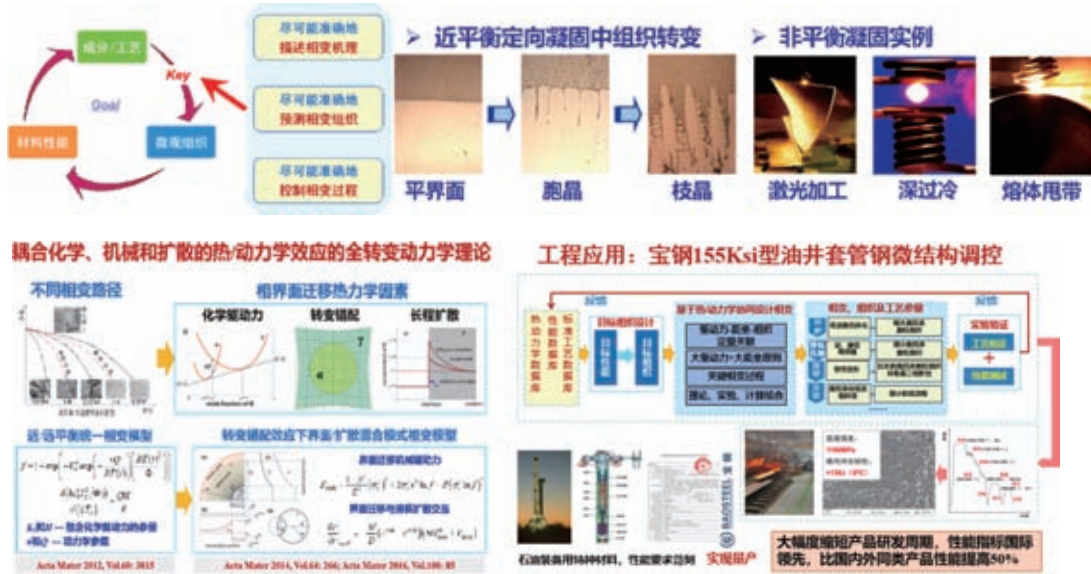


图1 相关凝固理论

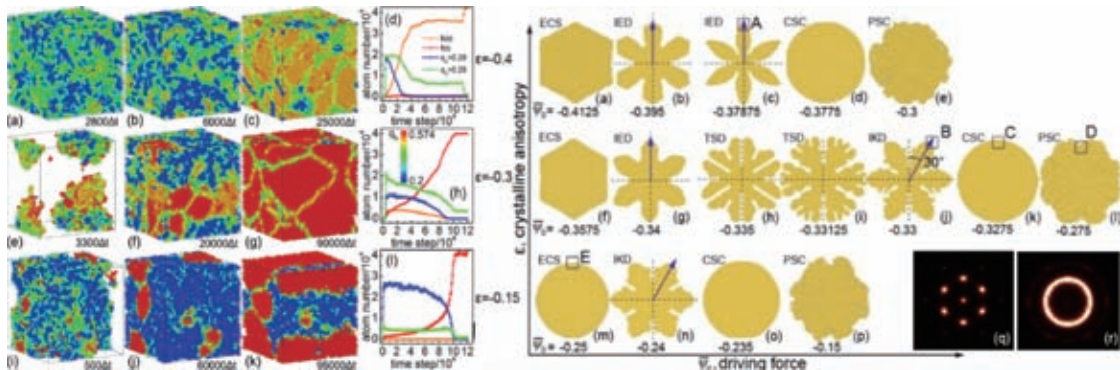


图2 凝固组织数值仿真

2.2 材料精确成形

实验室在材料精确成形的多个方向上做出了代表国家最高水平的重大进展,显著提升了金属结构件精确成形的国家能力,在我国各型先进战机、航空发动机、超高速导弹、空间站、卫星、核电、燃机等大量型号任务中发挥了关键作用。

2.2.1 精确凝固成形研究团队

(1) 进一步发展了大型复杂薄壁构件的反重力铸造工艺与装备技术,研发出3D打印辅助造型的真空增压石膏型精铸技术,可生产最大尺寸3~5 m、壁厚1.5~40 mm不等的各类高质量铸件,尺寸精度较传统铸造技术提高2~4级,形成了目前世界上最大尺寸铝合金

结构件精密铸造能力,并在航空航天等领域获得广泛应用(图4)。

(2) 在金属高性能增材制造技术方面,开发出达到世界先进水平的系列金属增材制造装备和成套先进工艺技术,实现了兼顾高性能和高精度的金属增材制造(图5)。2017年3D打印制造了2万多个金属零件,服务于100余家航空航天军工单位,为我国先进飞机、空天发动机、航天飞行器研制生产提供了可靠的技术保障,并与空客、通用电气、赛峰等世界500强企业开展了民用飞机和航空发动机构件激光增材制造的国际合作研究。

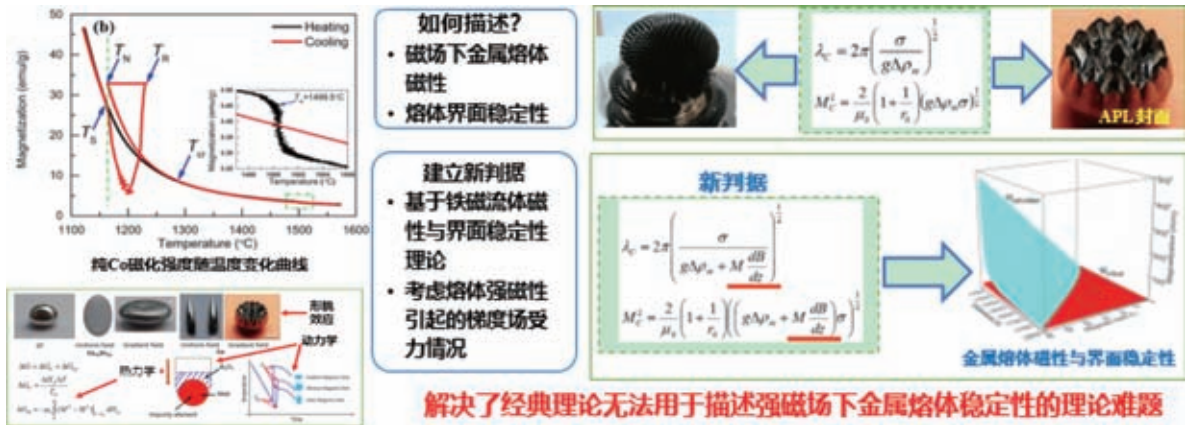
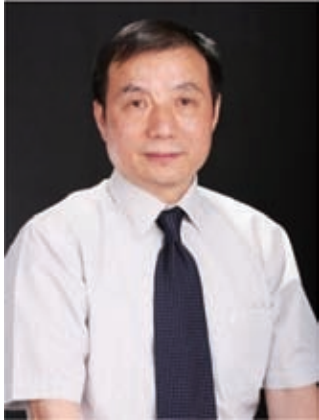


图3 强磁场条件下金属非平衡凝固与相变研究



图4 大型复杂薄壁轻合金结构件



黄卫东教授

学术带头人：黄卫东，教授，博士生导师。国家杰出青年科学基金获得者，教育部“长江学者”特聘教授。主要研究领域：金属高性能增材制造技术（3D打印），凝固与晶体生长理论，大型复杂薄壁铸件精密铸造技术。发表学术论文450篇，其中SCI收录297篇，EI收录243篇，出版国防重点专著《激光立体成形》，主编大飞机丛书《民用飞机构件先进成形技术》。授权中国发明专利21项，国防发明专利1项，实用新型专利3项。培养硕士生45人，博士生30人。获

得省部级科技一等奖3项，二等奖3项，三等奖1项。主要学术兼职：中国机械工程学会理事，增材制造分会副理事长；国家科技部3D打印专家组首席专家，国家智能制造重大项目总体专家组成员，国家增材制造创新中心副主任；曾任《CHINA FOUNDRY》和《铸造》杂志编委会主任，《3D Printing and Additive Manufacturing》编委，国际半固态会议科学委员会委员，旅英中国材料协会顾问。

2.2.2 定向凝固研究团队

(1) 发展了高梯度定向凝固方法和工艺，成功研制温度梯度100~500 K/cm系列定向凝固试验装置；提出了晶粒竞争生长的三维模型，阐明了螺旋选晶结构和凝固条件对晶粒取向偏差以及选晶效率的影响，优化设计了高效的螺旋选晶器，实现了单晶取向偏差控制在5°以内，发展了局部冷却、变速抽拉、添加引晶辅助系统的控制杂晶技术。从合金熔体内禀特性入手，深入研究了高温合金熔体状态和凝固特性、组织缺陷控制的影响规律，发展了微量元素调控、熔体超温处理、新型热控等工艺（图6）。

(2) 针对航空航天、能源国防和其他高技术领域等对1600℃以上长时、稳定工作的轻质超高温结构材料的重大战略需求，从冶金液固相变基本原理出发，



图5 金属高性能增材制造技术

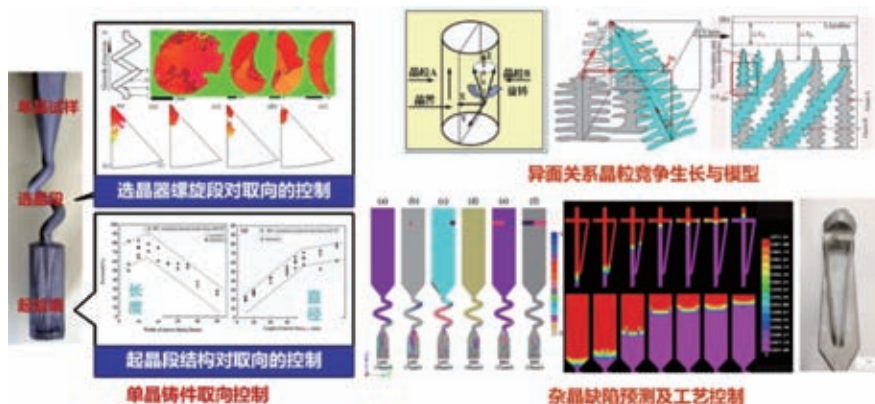


图6 高梯度定向凝固工艺

发明了高温难熔氧化物陶瓷高效纯净熔化和组织控制的快速凝固新技术，研制了具有战略自主知识产权的激光悬浮区熔高梯度定向凝固装备，开发了系列具有优异力学性能的新型氧化铝基共晶陶瓷，实现了从基础理论、制备技术、工艺装备到实际应用的原創性关键技术突破（图7）。



傅恒志院士

学术带头人：傅恒志，中国工程院院士，国际高校科学院院士，俄罗斯宇航科学院外籍院士。在凝固理论和新材料加工方面有重要贡献。在非平衡凝固理论、亚快速定向组织及组织超细化、高温合金、稀土

永磁合金的凝固组织与性能、电磁约束成形定向凝固技术等方面进行了开创性研究。领导研制的超高梯度定向凝固装置的温度梯度可达1 300 °C/cm，超出当时国际最好水平达三倍之多；主持创建了枝胞转换及亚快速定向凝固的理论框架，开辟了单晶及定向组织超细化研究的新领域。在此基础上，又提出了电磁成形定向凝固新技术。先后获国家科技进步二等奖1项，国家发明奖3项，国家优秀教学成果二等奖1项，省部级奖12项，发表论文1 100余篇，出版专著7本。

2.2.3 精确塑性成形研究团队

(1) 创立了局部加载主动控制和利用不均匀变形实现难变形材料复杂构件精确成形制造的关键技术，从点、线、面、体局部加载所决定的不均匀变形调控难点出发，形成高性能轻量化构件精确塑性成形工艺、模具装备和技术体系，实现了难变形材料大口径薄壁弯管件、钛合金复杂大件、板带面内弯曲件和大型薄壁异形件等四大类构件的高端制造。实现了我国先进军机和C919飞机等迫切需要的关键高性能轻量化弯管件和管路系统的规模化制造，应用于先进军机关键承力件—高筋薄腹结构钛合金整体隔框的制造，在通用小吨位装备上将能成形的构件投影面积从<1 m²提高到2.1 m²，载荷由原所需的8 000 t降低到3 000 t以下，材料利用率从不到5%提高到30%，将我国小吨位通用装备成形钛锻件的能力提高了2倍多（图8）。

(2) 发展了航空航天大型锻件环件高精度高稳定

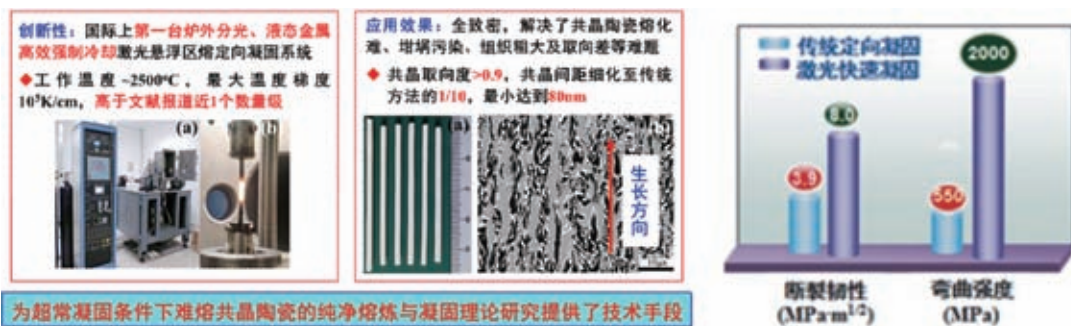


图7 高温难熔氧化物陶瓷高效纯净熔化和组织控制的快速凝固技术

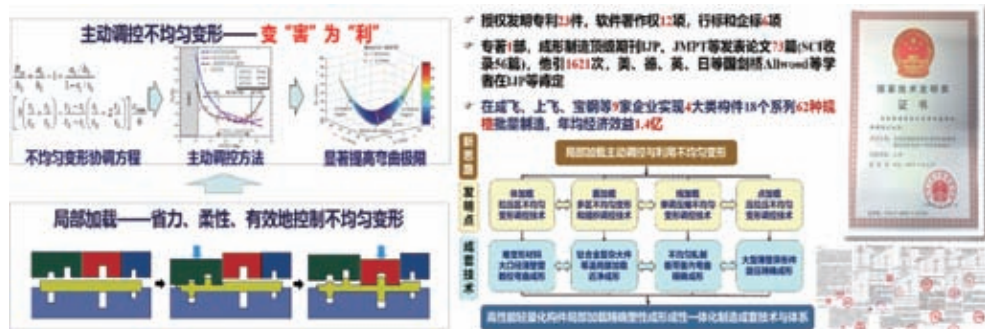


图8 精确塑性成形研究团队的成果

性锻造技术,实现了世界最大线性尺寸的10 m级超大环件锻造(图9)。



詹梅教授

学术带头人:詹梅,教授,博士生导师。国家“万人计划”领军人才入选者,国家杰出青年科学基金获得者,教育部“长江学者”特聘教授。现任中国塑性工程学会副理事长、中国塑性工程学会青年工作委员会主任委员、国际期刊《Manufacturing Review》副主编。主要从事难变形材料薄壁构件不均匀变形机

理与精确塑性成形规律研究。主持国家杰出青年科学基金、国家航天联合基金重点项目、国家863计划等项目20余项。发表论著150余篇,获授权国家发明专利20多项,软件著作权10多项。获国家自然科学基金和技术发明二等奖各1项,省部级一等奖2项、二等奖1项。

2.3 航空航天先进材料

国防高技术武器装备的跨代发展对超高温热结构材料、先进功能材料和金属材料提出越来越苛刻的要求,如温度更高、航时更长、强度更高、功能更强等,实验室持续致力于从科学基础、关键技术到工程化应用的全链条研究,形成了重大基础→预研→型号应用的可持续发展链,成果在航空、航天和兵器领域获得广泛应用。

2.3.1 高性能热结构材料研究团队

(1)创新发展了C/C复合材料高效低成本制备工艺和性能稳定性控制方法,在长寿命耐高温氧化/烧蚀涂层研究取得理论创新与技术突破(图10)。揭示了原位生长SiC纳米线形貌控制与强韧涂层机制,创立了纳米线增韧抗氧化/烧蚀涂层体系;揭示了涂层高温氧化防护机理,提出钉扎缓冲界面层与多相镶嵌涂层结构设计新思路,实现了涂层与基体界面匹配相容;发展了粗糙层热解碳涂层与超高温陶瓷协同抗烧蚀方



图9 超大环件锻造



图10 碳/碳复合材料及制备技术

法。研制的C/C复合材料喉衬、烧蚀环等热防护系统关键件已在多种型号高新武器定型列装，应用于某型导弹发动机热防护系统，该导弹参加了抗日战争胜利70周年阅兵。

(2) 突破了碳陶飞机刹车功能复合材料研制与应用的系列关键技术。发明了可控、可调的“反应熔体浸渗碳化硅 (RMI-SiC)” 的批量制造技术，实现了碳陶刹车材料组成、结构与性能的可控、可调；发明了具有高温自愈合功能和碳相活性钝化功能的高B含量Si-O-B/磷酸盐防氧化复合涂层，确保碳陶刹车盘在潮湿/氧化环境的使用寿命和安全性；突破了低密度碳碳坯体密度可控制备、碳陶刹车材料与机轮结构匹配、RMI设备的炉体气氛可控、工作可靠和进出货方便等关键技术，解决了型号可靠应用的问题。使我国成为国际首个将碳陶刹车盘成功用于飞机机轮刹车的国家，研发航空航天发动机热结构件、高超声速飞行器外防热构件、卫星光机系统构件和飞机刹车盘等各类陶瓷基复合材料构件上百万万余件，支撑了9个国家重大专项的实施 (图11)。



张立同院士

学术带头人：张立同，教授，中国工程院院士。在高温合金和铝合金无余量熔模铸造工艺理论和制造技术、特种高温陶瓷、航空航天结构陶瓷及其复合材料等方面进行了开创性研究。创新发展的无余量熔模

碳陶飞机刹车材料突破系列制备技术 陶瓷基复合材料应用取得突破

使我国成为国际上首个将碳陶刹车盘应用到飞机上的国家
获2016年度国家技术发明二等奖

9个 重大专项

- 航空发动机热结构件 26类472件
- 航天发动机热结构件 26类111件
- 高超外防热构件 32类137件
- 卫星光机系统构件 7类80件
- 飞机刹车盘十多个型号万余件

航空发动机用CSiCS材料突破自愈合改性等关键技术

航空发动机用CSiCS材料突破耐氧化-一体化等关键技术

航空发动机用CSiCS材料突破耐氧化-一体化等关键技术

密封片/调节片已为第四代航空发动机小批量供货可支撑第五代航空发动机发展

重大专项科技工程某型飞行器有动力飞行试验取得圆满成功，标志着我国超音速发动机技术已处于世界领先水平

国家技术发明奖 证书

在7种机型号上装备部队，累计交付120余架份

图11 碳陶复合材料的应用

掌握了II-VI族多元化合物半导体晶体生长的组分分凝规律，提出了点缺陷的准化学计算模型和电阻率变化机制 建立了高可靠性、工业化晶体生长设备和工艺技术，制备出优质的多元半导体化合物晶体材料与探测器件

发表了专著1部，SCI论文200篇，特等报告12次，专利17项
国家重大科学仪器设备开发专项 (2011-2014)

国家技术发明奖 证书

基于II-VI族多元化合物晶体生长了国外同类产品，分辨率提高了5倍

图12 特种功能材料研究团队成果

铸造工艺及其相关熔模和陶瓷型壳材料，取代国家需购买的英国“无余量熔模铸造技术秘密”，成功用于引进的斯贝航空发动机中。自主发展的碳化硅陶瓷基复合材料及其制备技术获2004年国家技术发明一等奖，创建了超高温结构复合材料研究、工程化转化和产业孵化平台。先后获国家科技进步奖4项，省部级二等奖以上15项。合著专著3部，授权国家发明专利60余项，发表SCI和EI收录论文400余篇。培养博、硕士研究生近百名，获国家教学成果二等奖1项。

2.3.2 特种功能材料研究团队

(1) 提出了晶体合成、生长及后续退火处理的热力学与动力学方法，解决了晶体结构、成分与缺陷控制的难题，开发出辐射探测器级CZT晶体等多种II-VI族化合物晶体制备技术，建立了碲锌镉辐射探测材料设计、合成与生长系列技术体系(图12)。探测器级CZT晶体产品性能达到了对 ^{241}Am 的能谱分辨率优于5%，对 ^{137}Cs 的分辨率优于2%的国际最好水平。同时，比国外采用的高压布里奇曼法生长的晶体成品率高2倍以上，比Te溶剂法生产效率3倍，综合成本降低50%以上。研制出探测器级碲锌镉晶体及高效低成本单晶制备设备，组建我国唯一的第三代辐射探测材料、核心器件与部件生产企业，目前已在国内外核科技、空间观测、环境监测等领域40余家单位应用。

(2) 针对现代装备跨代发展对高性能高温功能材料研制的急需，有效解决了高温隐身材料工程应用存在的高温性能易退化和高温热震易损坏等关键难题，研究成功一个完整系列的高温功能材料，填补了国内空白，达到国际先进水平。在发动机高温隐身领域开展了开创性的研究，在高温红外隐身薄膜方面达到国际领先水平，成功应用于多个发动机型号，使我国首次具有了隐身航空发动机，大大提升了先进武器装备的隐身能力(图13)。



介万奇教授

学术带头人：介万奇，教授，博士生导师。国家



图13 高温功能材料的应用

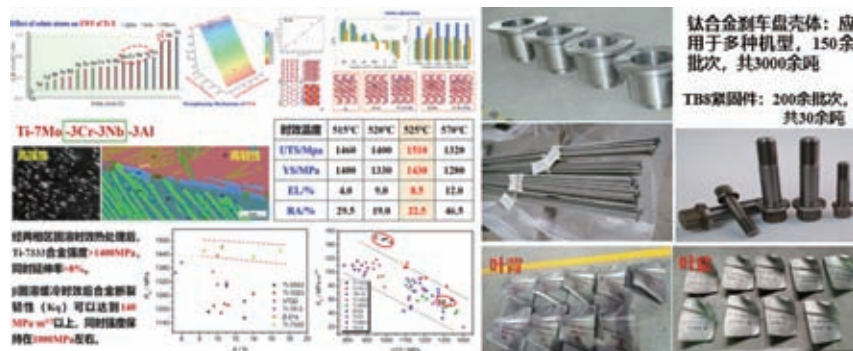


图14 高性能钛合金材料

杰出青年科学基金获得者，教育部“长江学者”特聘教授，国家“百千万人才”工程计划入选人才。现为中国材料研究学会青年委员会常务理事，中国功能材料学会常务理事，中国航空学会航空材料专业委员会委员。主要研究方向：II-VI族化合物光电子材料晶体生长技术、性能表征及应用技术研究；复杂合金凝固过程基本原理与铸造技术研究。获国家技术发明二等奖2项，省部级科技成果奖8项，独著专著1部，合著专著2部，发表学术论文400余篇，获发明专利16项。



李金山教授

2.3.3 先进金属材料研究团队

(1) 针对航空航天等武器装备对高性能钛合金、超高温金属材料的需求，从成分优化设计、制备工艺等方面发展了高性能钛合金、Nb-Si基超高温合金等多种新型合金。设计开发了一种性能优于Ti-5553等国外钛合金的新型高强韧钛合金Ti-7333；高强钛合金紧固件、钛合金刹车盘壳体等多种产品在航空航天多个重要型号上获得应用（图14）；开发了多向锻造法与基于亚动态再结晶的细化方法，制备了组织均匀的国内最大的高温TiAl合金锻饼。

(2) 突破了制约其应用的多项关键技术和理论难题，开发了新型钛基非晶合金及其复合材料成分设计、组织调控及制备技术体系（图15）。发明了具有优异力学性能的Ti-Zr-Nb-Cu-Be系非晶复合材料，建立了适合描述非晶合金晶化过程分析的动力学模型，实现了材料热稳定性的控制，通过调控O、N等间隙元素含量改善合金力学性能，解决了制约非晶合金作为结构材料应用的脆性难题；发明了基于多尺度结构增强的钛基非晶合金及其复合材料组织和性能调控技术，揭示了钛基非晶合金及其复合材料宽温度、宽应变速率条件下的变形机理；发明了钛基合金悬浮熔炼与铸造、半固态处理设备，实现了大尺寸、具有稳定性能的钛基非晶合金及其复合材料的制备。

学术带头人：李金山，教授，“万人计划”中青年科技创业领军人才。现任西北工业大学材料学院院长，凝固技术国家重点实验室主任，中国材料研究学会凝固科学与技术分会理事长，中国机械工程学会铸造分会副理事长。主要从事先进金属材料及其制备成形技术研究。研制了高自动化水平定向凝固连铸单晶铜产业化设备、钛合金冷坩埚感应熔炼-反重力铸造、真空扩散连接等金属材料精密热成形设备。牵头研制的高强钛合金紧固件、钛合金刹车壳体等多种产品在航空航天多个重要型号上获得应用。已发表学术论文300余篇，获授权发明专利40余项，获省部级科技进步一等奖3项，二等奖4项。

3 合作与交流

多年来，凝固技术国家重点实验室围绕凝固与相关科学技术领域的应用基础研究，与国内外开展了广泛的合作与交流。2013年至今，实验室邀请150余名国际高水平学者前来实验室开展国际合作研究，先后承担了中法、中德、欧盟第7框架“玛丽·居里行动”、

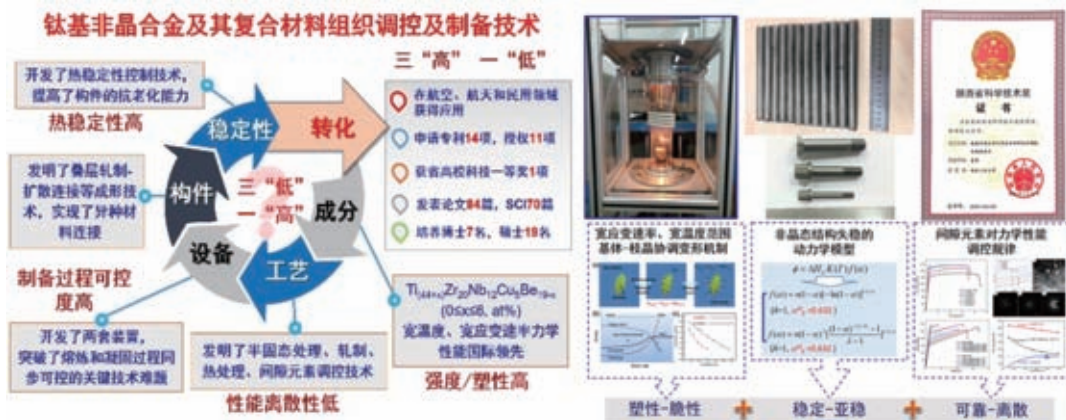


图15 钛基非晶合金及其复合材料组织调控的制备技术

英国GII以及国家重点研发计划项目政府间国际科技创新合作重点专项等15项合作研究项目，并与空客公司建立了西北工业大学-空中客车公司增材制造联合实验室。合作研究成果发表SCI论文341篇，其中包含《Adv. Mater》, 《Energ. Environ. Sci.》, 《Mater. Today》, 《Int. Mater. Rev.》, 《Acat Mater.》, 《Corros. Sci.》等材料、冶金与工程领域著名期刊论文184篇。

实验室科研人员在国内外的学术舞台上表现活跃，先后有122人次在国际学术机构和期刊担任职务；130人次在国内机构和期刊担任职务，服务于学科前沿和重要科研工作中，一级学会（协会）理事及以上，二级组织主任、副主任及以上20人次。2013年至今，实验室在国际机构任职执委及以上职务5人，在国际学术期刊任职31人次。

2013年至今，实验室共派出约200余人次出国（境）访问、讲学、进修、参加国际学术会议或双边学术会议交流，其中150余人次应邀在国际学术研讨会上作特邀、主题报告。实验室主办/承办了第八届高温陶瓷基复合材料国际会议（HTCMC 8, 2013）、第三届凝固过程国际研讨会（2013）、2014国际新材料发展趋势高层论坛、中国材料大会凝固科学与技术分会（2017至今）、“新型电光晶体在太赫兹产生和探测中的应用”国际研讨会（2017）、第四届中德“计算热力学和动力学及其在材料加工中的应用”研讨会（2015）、中国科协第273次青年科学家论坛（2013）、第十六届全国钛及钛合金学术交流会（2016）等重要学术会议及学术活动。2016年以来，连续主办了国际暑期学校、青年学者论坛、高温金属材料发展及其制备高端论坛、新型超高温结构材料高端论坛等系列学术活动，在凝固及其相关领域与国内外学者及科研机构开展了多层次、多方位的学术交流。

此外，凝固技术国家重点实验室依托在凝固理论及其材料制备成形技术等方面的优势，与固体润滑国家重点实验室（中国科学院兰州化学物理研究所）、新金属材料国家重点实验室（北京科技大学）、高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室（沈阳铸造研究所有限公司）等多个国家重点实验室开展了长期而深

入的合作，在航空航天摩擦润滑材料、高温钛铝金属间化合物材料及其制备成形技术、轻合金精密铸造技术等方面共同承担了国家/国防973、国家重点研发计划、装备预研等科研项目，开展先进材料及制备成形技术创新研究，服务国家和国防重大装备发展。

4 结束语

凝固技术国家重点实验室在近30年的发展过程中，以凝固科学与技术为核心，围绕航空航天等装备发展急需的先进材料及其精确成形技术创新，形成了综合集成科学基础、技术创新和工程化应用研究、特色鲜明的发展模式，支撑了西北工业大学“材料科学与工程”双一流A类重点学科的发展，为我国航空航天等装备的发展提供了可靠的材料与技术支撑。

2018年以来，在新一届学术委员会指导下，凝固技术国家重点实验室各研究团队带头人及学术骨干围绕新形势下重点实验室的定位、对接国家重大需求、高层次人才队伍建设、重大成果培育、内部运行管理机制等方面开展了多次讨论与论证，拟在以下几个方面重点开展工作。

（1）充分利用中国材料学会凝固科学与技术分会依托单位的优势，在凝固及相关领域培育重大科研成果的同时，逐步确立实验室在国际凝固科学与技术领域的引领地位。

（2）在对接国家重大需求方面，进一步加强与材料领域其他国家重点实验室及科研机构的深度合作，积极申请并承接航空航天、钢铁冶金、海洋工程、轨道交通、核电等领域的国家重大科研任务，服务于国家经济建设。

（3）在高层次人才引育和学科交叉方面，坚持以凝固科学技术为核心，立足材料学科发展并围绕重大学科前沿，注重与能源、信息、生命、空间科学、物理化学等学科的深度交叉，加强高层次青年人才的引育。

（4）在实验室开放运行机制方面，加强开展科学知识、科学精神和实验室文化的传播工作，加大开放交流力度，积极探索实验室管理新体制、优秀人才引育及激励机制、科研成果共享、分工合作机制等。