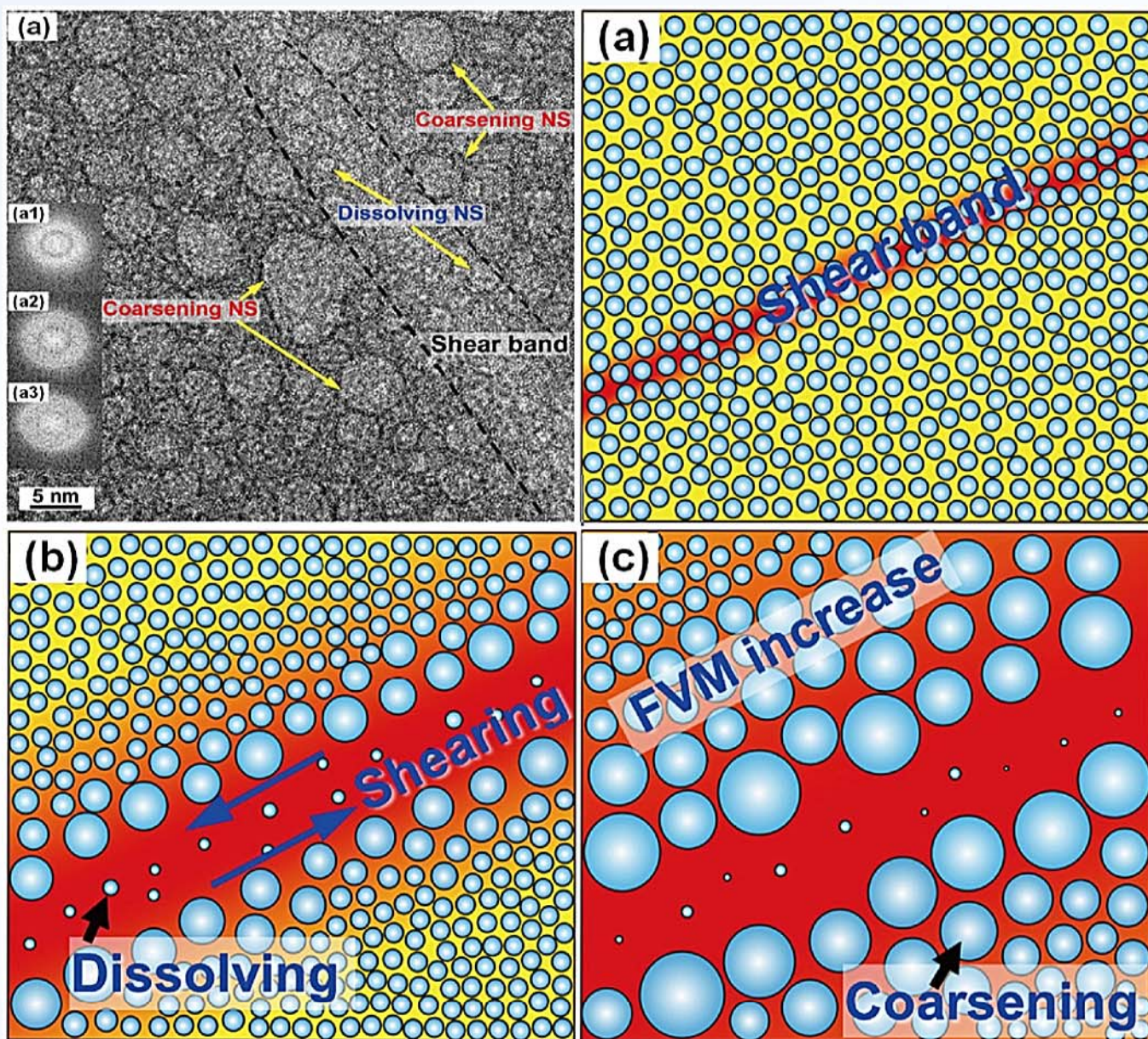


金属所在金属液相分离研究方面 取得重要进展



金属所在金属液相分离研究方面取得重要进展

液相分离是一种常见的自然界现象，广泛存在于冶金、材料、化工、食品等领域中。一些体系的组元（原子或分子）之间相互排斥，组元之间混合焓为正，其相图存在液相不混溶区域。均一液体冷却进入液相不混溶区将分解成两个互不相溶的液相，即发生液相分离。对合金材料而言，约1/5的二元体系具有液相分离特征，这些合金通称为“液相分离合金”。它们在地面常规凝固条件下极易形成比重偏析严重、乃至两相分层的组织。近年来，人们先后在空间和地面对液相分离合金凝固过程开展了大量实验，并进行了深入的建模与模拟研究，发现液相分离过程是多种因素共同作用的结果，十分复杂。如能有效地控制液-液相分离的过程，不仅可以研制高性能相分离金属复合材料，而且可以进行诸如电子废弃物混合金属资源的富集、分离与回收处理。

金属所材料特种制备与加工研究部赵九洲课题组长期从事合金液相分离研究，近来何杰、江鸿翔等人在相分离合金凝固组织与相结构调控方面取得了主要进展，主要包括：

1. 基于Zr-RE (RE = Ce、La、Nd等) 液相分离合金系，利用原子间相互作用理论开展多元相分离合金设计，成功研制了Zr-RE-Al-Cu-Co块体非晶复合材料，弥散相以微纳米非晶粒子形式分布于非晶基体中（图1[a]），揭示了该合金液-液相分离机理、组织演变规律及其控制途径；提出了利用液-液相分离现象制备双非晶相块体合金材料的思路与合金设计方法（图1[b]）。

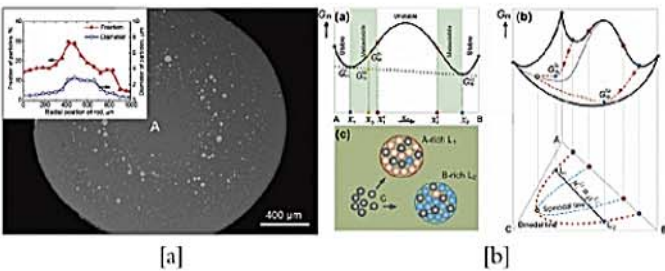


图1 [a] Zr-RE-Al-Cu-Co相分离块体非晶合金。白色和灰色分别表示为Ce基和Zr基非晶相；[b] 基于合金热力学设计相分离非晶合金思路。

2. 基于以往对Cu-Fe亚稳液相分离合金的研究（Acta Materialia, 54: 1749 (2006)），设计了新型内生高数量密度球形纳米粒子的Cu-Fe-Al-Zr相分离块体金属玻璃材料（图2[a]）。该材料展现出优异的压缩塑性变形能力（图2[b]）。研究发现，该相分离

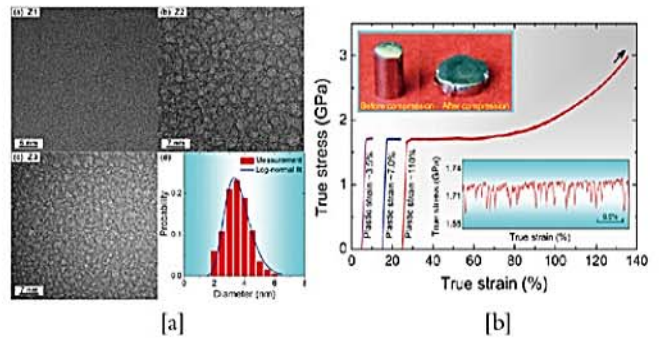


图2 [a] (a-c) 不同Cu和Fe原子比的Cu-Fe-Al-Zr块体非晶合金组织(Z1, Z2, Z3)和(d)相分离块体非晶合金Z2中球形非晶粒子的尺寸分布；[b] 相分离非晶合金Z2样品的压缩变形。

金属材料在压缩变形过程中，剪切带内部的纳米非晶粒子在剧烈剪切作用下逐渐溶解，剪切带两侧相邻区域的纳米粒子发生Ostwald熟化（图3、4）。这些非晶粒子作为记录器（local internal recorder），清楚展

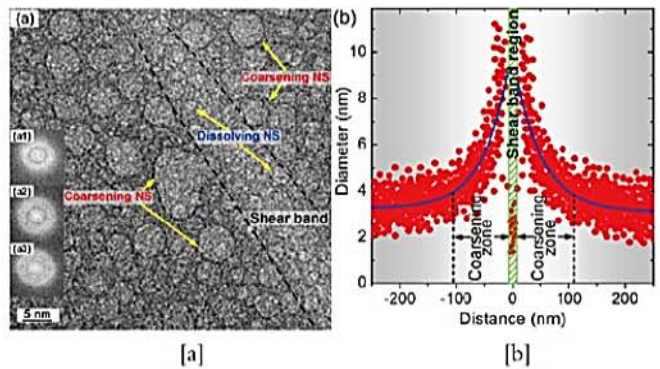


图3 [a] 相分离块体非晶合金Z2样品经~7%压缩塑性变形后局部组织结构，(a1)、(a2)和(a3)分别为剪切带、球形粒子和基体的FFT；[b] 剪切带附近区域球形非晶粒子尺寸的2D统计。

现了塑性变形导致微结构的演化和剪切带附近基体原子运动的增强；提出了剪切带附近基体存在相对较厚的变形影响区域，相分离金属玻璃材料优异的力学性

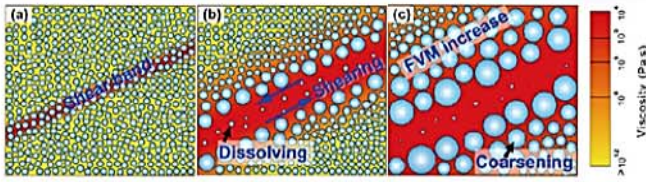


图4 相分离非晶合金剪切带内部和毗邻两侧区域的局部组织结构演化示意图。

能不仅源于剪切带本身，而且还有其相邻基体的贡献。

3. 提出了利用脉冲电流来控制液相分离合金凝固组织过程、制备原位自生复合材料的方法(图5)，建立了脉冲电流作用下的液相分离合金的凝固模型。模拟与实验相结合，深入研究了脉冲电流的作用下液

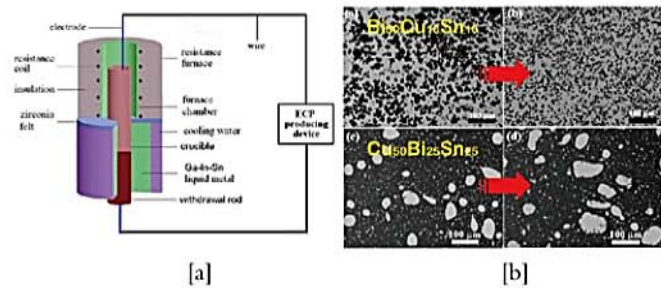


图5 [a]脉冲电流(ECP)作用下液相分离合金连续凝固示意图; [b] 液相分离合金Bi₈₀Cu₁₀Sn₁₀在(a)无ECP和(b)有ECP作用下的凝固组织, 液相分离合金Cu₅₀Bi₂₅Sn₂₅在(c)无ECP和(d)有ECP作用下的凝固组织。

相分离合金凝固组织形成过程，揭示了脉冲电流的影响机理(图6)。研究表明，脉冲电流主要通过改变弥散相液滴形核能垒来影响液相分离合金凝固过程和组织(图6)，当弥散相液滴电导率大于基体熔体电导率时，脉冲电流能有效地促进弥散相液滴形核和细

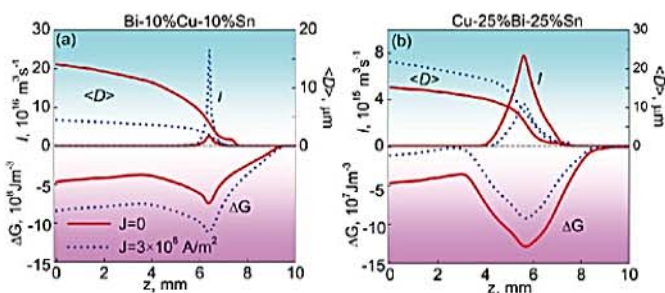


图6 脉冲电流作用下液相分离合金(a) Bi₈₀Cu₁₀Sn₁₀和(b) Cu₅₀Bi₂₅Sn₂₅定向凝固界面前沿弥散相液滴形核驱动力(ΔG)、形核率(I)及平均直径(<D>)随位置的变化曲线。

化，有利于弥散型液相分离合金复合凝固组织的获得；当弥散相液滴电导率小于基体熔体电导率时，脉

冲电流抑制弥散相液滴形核，促进弥散相液滴的粗化和两液相的分离(图5[b])。

4. 提出了利用微量表面活性元素或微量金属间化合物形成元素调控液相分离合金凝固过程与组织的方法(图7)，建立了微量元素作用下液相分离合金凝固

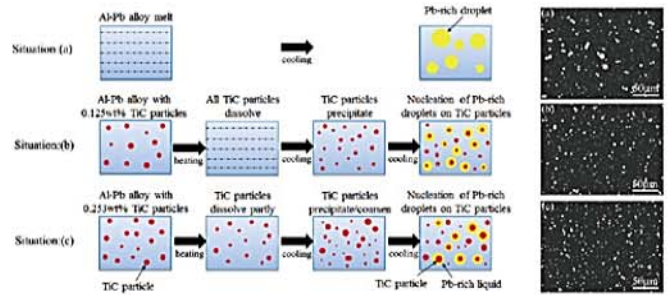


图7 不同TiC颗粒添加量下TiC颗粒的动力学行为和Al-Pb合金液-液相变过程。(a)无添加; (b)0.126 wt.%TiC; (c)0.253wt.%TiC

模型。实验与模拟相结合，揭示了微量元素的作用机理和添加量的确定原则。研究表明，对于Al-Bi、Al-Pb液相分离合金，TiC颗粒可做富Bi、富Pb相液滴的异质形核基底，添加适量的Ti和C(或TiC)能大幅度提高其形核率，促进弥散型复合凝固组织的获得(图8)。

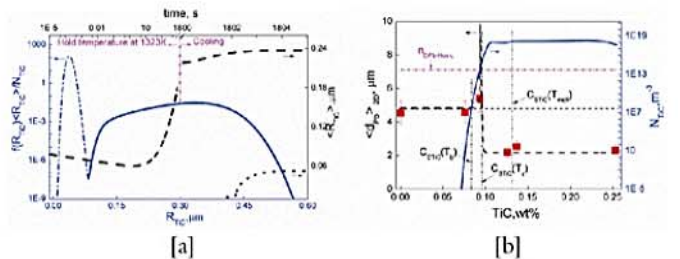


图8 [a] Al-5%Pb-0.253wt%TiC合金熔体冷却至液态组元互溶温度时熔体内沉淀析出的TiC颗粒(蓝色点虚线)和未溶解的TiC颗粒(蓝色实线)的半径(R_{Ti})分布, 沉淀析出的TiC颗粒(黑色点线)和未溶解TiC颗粒(黑色虚线)的平均半径随时间(time)的变化; [b] 凝固样品内富Pb相颗粒二维平均直径(方块或虚线)和冷却至液态组元互溶温度时合金熔体内TiC颗粒数量密度随TiC添加量的变化。

上述成果发表在Scientific Reports 6: 25832 (2016)、Acta Materialia 61: 2102 (2013)、Scientific Reports 5: 12680 (2015)和Materials and Design 91: 361(2016)等期刊上。研究工作得到了国家自然科学基金(51271185, 51471173, 51374194, 51574216, 51501207)和中国载人空间站工程(TGJZ800-2-RW024)的资助。

装备制造类成果推广

超（超）临界机组关键铸锻件的制备技术

技术简介及应用领域

高参数、高效率和大容量的超（超）临界发电技术，是我国电力发展方向。基于前期对超（超）临界机组一些关键部件选材的材料研究及其产品研发，金属所系统地形成了超（超）临界机组关键铸锻件的制备技术，如超（超）阀体、缸体铸件和三



通、高中压转子锻件等全流程热加工制备技术。用于超（超）临界汽轮机组关键部件的热加工制造。

技术特点（包含主要技术指标）

通过纯净冶炼技术、铸造/锻造工艺优化设计、中间退火与阶梯型回火热处理等工艺，控制关键铸锻件内部产生的气孔、偏析、夹杂或粗晶、混晶、白点等缺陷，实现超（超）临界机组关键铸锻件组织细化与均匀化，满足温度范围为567~650℃内长期服役的各项性能要求。

合作方式

联合开发、技术入股、技术转让

联系人

项目负责人：胡小强

电话：024-23971127

邮箱：xqhu@imr.ac.cn

矿山机械新型耐磨材料及其应用

技术简介及应用领域

挖掘机、破碎机、半自磨机、球磨机和再磨机是矿山机械领域的主要耐磨设备，其核心工作部件，如斗齿、履带板、锤头和衬板等铸件的使用寿命，直接关系到这些设备的维修频次与生产效率。金属所基于各耐磨部件的实际使用工况，通过材料研究与工艺开发，成功研制出系列高效率、长寿命的耐磨部件，适用于矿山机械耐磨部件的制造。

技术特点（包含主要技术指标）

通过钢水纯净化、组织细晶化和综合热处理等工艺控制技术，形成的系列新型耐磨钢种及其制备的耐磨部件，经实际工况上机试用表明，均达到甚至超过相应的进口部件。

合作方式

联合开发、技术入股、技术转让

联系人

项目负责人：胡小强

电话：024-23971127

邮箱：xqhu@imr.ac.cn



材料加工技术类成果推广

高性能热喷涂涂层技术



过渡段和火焰筒

叶片

技术简介及应用领域

金属所以国家重大工程装备和市场需求为导向，进行高性能热喷涂涂层的研发、中试和工业化生产，建立了“辽宁省高性能热喷涂涂层工程技术研究中心”，实现了科研和生产相互促进的良性循环，研发能力和生产技术水平居国内领先，高性能涂层在发动机、燃气轮机、透平压缩机、烟气轮机、干燥机、膨胀机等均取得成功应用并批量生产，经济社会效益显著。可在装备制造、航空航天、冶金、石化、能源等领域广泛应用。

技术特点

热喷涂涂层赋予金属部件和结构以特殊性能，使产品具有更高的性能和使用寿命，是应用广泛的表面工程技术之一。针对特殊应用环境、服役条件，金属所研发了系列高性能热喷涂涂层包括热障、封严、耐磨、耐蚀、自润滑、绝缘涂层等，研发成果已被哈汽、沈鼓和中航世新等国内知名企业所采用，为企业解决表面防护领域的技术难题。

合作方式

联合开发、技术入股

联系人

项目负责人：常新春

电话：024-23971865

邮箱：xcchang@imr.ac.cn



技术简介及应用领域

真空

电弧离子

镀是将镀膜材料作为靶极，借助触发装置使靶表面产生弧光放电，膜材料在电弧作用下，产生无熔池蒸发并沉积在基片上。设备可根据用户要求配置多个小多弧源、大面积矩形电弧源或旋转柱状磁控电弧源，以实现多层复合膜及梯度功能膜的制备。偏压电源采用最新直流脉冲叠加式开关型偏压电源，可实现低温沉积（ $\sim 200^{\circ}\text{C}$ ），大大扩大了镀膜工艺的应用范围，并且使膜层质量以及膜与基体的结合强度大大提高。

此技术可以制备多种硬质涂层，如TiN、TiC、ZrN、CrN、TiCN、(Ti、Al)N、 Al_2O_3 、DLC膜以及多层复合膜等。研究的离子镀仿金装饰镀层经久耐用，广泛用于日用饰品、建筑五金等领域，离子镀TiN系列耐磨涂层及其复合涂层具有高硬度、良好的结合强度和耐磨性，广泛用于高速钢、硬质合金刀具、模

电弧离子镀制备硬质涂层及MCrAlY涂层

具，可显著提高其使用寿命，提高切削效率和加工工件表面质量。可制备MCrAlY等抗腐蚀、抗高温氧化涂层和其他功能涂层，应用于燃汽轮机叶片。

技术特点(包含主要技术指标)

(1)蒸发源不产生熔池、绕镀性好：可任意设置于镀膜室适当位置，提高沉积速率使膜层厚度均匀，并可简化基片转动机构

(2)入射粒子能量高：膜的致密度高，强度和耐磨性好。工件和膜界面有原子扩散，膜的附着力高。

(3)离化率高：可达80%以上，镀膜速率高，有利于提高膜基附着性和膜层的性能

(4)一弧多用：电弧既是蒸发源和离化源，又是加热源和离子溅射清洗的离子源

合作方式

联合开发、技术入股、技术转让

联系人

项目负责人：宫骏

电话：024-83978232

邮箱：jgong@imr.ac.cn

让航空发动机的心脏激情燃烧

——记辽宁省直属机关五一劳动奖章获得者、 金属所高温合金研究部周亦青研究员

航空发动机是防空器不可或缺的先动力推进系统，被誉为“工业皇冠上的明珠”。衡量航空发动机先进性的关键指标是发动机的推力和“推重比”，提升这两项指标的主要技术途径是提高发动机燃烧室后的涡轮前进口温度。目前，世界上先进航空发动机的涡轮前进口温度均在1600℃以上，远远超过了常用工业金属材料的熔化温度。如何避免在涡轮燃烧室后工作的叶片发生烧蚀和熔化，是保障发动机心脏正常工作的必要前提。为了解决叶片在发动机高温燃烧环境中的烧蚀和熔化问题，同时要保证叶片在高温下具有足够的强韧性，当前唯一的办法就是制备具有复杂气冷通道结构的单晶高温合金叶片。与美、欧、俄等发达国家相比，我国在航空发动机制造技术上存在很大差距，其中一个重要因素就是单晶高温合金叶片制造技术明显落后。在中国科学院金属研究所，却有这样一位致力于让航空发动机心脏激情燃烧的科研工作者——单晶高温合金叶片制造技术专家周亦青研究员。

发动机的老大难问题

大部分金属材料在制备成形过程中需要从高温熔体凝固成固体。如果完全按照“天性”凝固，金属材料凝固后将由许多细小的单元晶体组成，这些晶体的边界在高温下非常容易断裂。如果控制金属熔体冷却过程中晶体的生长方向，让它们都朝一个方向生长，形成如同一捆整齐排列筷子那样的柱状晶体，金属材料高温下的强度会显著增大。如果继续改变定向凝固约束条件，保证只有一个柱状晶体生长，就可以获得只有一个晶体的单晶金属材料，这种单晶材料在高温下具有更高的强度。单晶高温合金叶片就是采用定向凝固工艺制备出的只有一个晶体的叶片。单晶叶片的晶体生长工艺十分复杂，尤其是具有复杂气冷通道结构的单晶叶片制备难度更大，经常会出现杂晶、偏离

预定晶体取向、显微孔洞、金属熔体与陶瓷模壳高温反应等问题。在航空发动机极端苛刻环境下，存在这些缺陷的单晶叶片非常脆弱，在极短的时间内就会发生断裂或者熔化，造成发动机出现严重的安全事故。因此，在制备单晶叶片过程中，要严格控制这些缺陷。以前，由于缺少对单晶凝固缺陷形成机制的深入认识，长期以来我国主要是靠经验积累和反复试制来减少这些缺陷，导致单晶高温合金叶片铸件的合格率非常低。对于一些使用新型合金铸造的复杂结构单晶叶片，在各种缺陷的交织作用下，我国甚至不能铸造出符合发动机设计要求的单晶叶片。

攻坚克难 助力发动机腾飞

2009年，周亦青研究员从英国伯明翰大学归国，入选中国科学院“百人计划”，来到中国科学院金属研究所开展高温合金研究工作。刚刚回国时面对国内外航空发动机的巨大差距，周亦青研究员感到痛心的同时，更坚定了他要做点事情的决心。他带领研究团队系统地开展了单晶高温合金叶片凝固缺陷形成机制的基础科学研究。他查阅大量国内外文献，在海量的信息中他以敏锐的洞察力和高超的智慧，设计出科学合理的实验方案。实验过程中为了全面、快速地掌握第一手实验结果，他坚持深入一线进行模具设计、蜡模组合、铸造实验、样品制备以及观察分析。在完成实验室研究工作后，他又带领科研团队到发动机叶片制造厂进行更为全面的生产性验证。周亦青常跟他的团队成员说，“理论必须和实际相结合，只有实际生产中用上了才是有用的材料和技术”，他们根据单晶叶片凝固缺陷的形成机制提出了多项工程上行之有效的凝固缺陷控制措施，并形成了一套单晶叶片规模化制造的全流程控制技术，改变了过去靠经验积累和反复试制的局面。

在他的带领下，研究团队为中航工业、航天科工集团等单位研制出了多种单晶高温合金叶片，解决了多种单晶叶片从无到有的问题。其中标志性的一项成果就是首次采用我国最新型的第二代单晶高温合金成功铸造出了先进航空发动机中的高压涡轮转子单晶叶片。该叶片在发动机试车考核中表现优越，标志着我国在复杂结构单晶叶片制造技术上取得了重要进展，该项研究成果受到了发动机设计单位的高度评价。鉴于周亦胄研究员在单晶高温合金及单晶叶片方面卓有成效的研究工作，他在2014年中国科学院“百人计划”终期评估中获得优秀，在2016年入选了“国家中青年科技创新领军人才”。

妙手巧回春 成果落辽沈

高温合金叶片铸造时需要通过浇道与冒口设置来保证叶片中不出现凝固缺陷。铸造后浇道与冒口内的高温合金不允许在航空发动机零部件制造中重复使用，因此高温合金叶片铸造过程中产生出的废料常高达总用料的70%以上。单晶高温合金材料的基体为镍元素，其中含有铌、钒、钽、钨、钼、钴等稀有贵金属。铌作为一种重要的战略稀缺金属，在世界范围内储量不足1万吨，而我国的保有储量仅为200余吨，价格约为5万元/千克。这使含铌单晶高温合金材料的价格非常昂贵，例如含铌的第二代单晶高温合金价格为300万元/吨，含铌的第三代单晶高温合金价格达到约500万元/吨。如此高昂的材料价格对我国以及美欧俄等国来说都是巨大的经济压力。目前我国已开始大量采用第二代单晶高温合金制造航空航天发动机单晶叶片，在生产过程中产生出大量含铌高温合金废料。由于缺少相关分离提取技术，使得合金废料中铌、钒、钽、钨、钼、钴等高价值元素只能被当作普通金属材料对待，造成了极大的资源浪费和经济损失。

为了缓解这种高昂的材料价格给我国航空发动机单晶叶片制造带来的巨大压力，周亦胄研究员提出了从高温合金废料中回收再利用稀有贵金属元素的思路，并开始酝酿在金属研究所组建稀有贵金属资源再生循环利用实验室。由于国外封锁这方面的研究成果与技术看方案，我国在从高温合金废料中回收稀有贵金属方面的积累几乎是零。作为开拓者，采用何种技术路线成为

他组建这个新实验室所面临的重大难题。为了少走错路与弯路，他不辞辛苦地到全国各地找资源循环利用专家进行讨论，分析各种方法回收处理高温合金废料的可行性。经过反复论证，他最终确定了采用电化学溶解法多步分离提取高温合金废料中稀有贵金属元素的技术路线。随后，他在金属研究所组织起一支具有电化学腐蚀与化学分离提取研究背景的科研队伍，探索了高温合金废料电化学溶解、沉淀分离、萃取分离、离子交换分离、金属化合物重结晶提纯、金属化合物气体还原等环节中的关键科学与技术问题。经过反复的实验摸索，他与研究团队建立起了从高温合金废料中分离回收稀有贵金属元素的技术路线，实现了从高温合金废料中分离回收铌、钒、钽、钨、钼、钴、镍等稀有贵金属元素的目标，同时形成了与之配套的高温合金低成本制造技术，该技术可使第二、三代单晶高温合金的制造成本分别降低20%和30%。

为了尽快把研究成果推广到其它领域，他还牵头成立了沈阳市稀有贵金属再生循环利用工程技术研究中心，为沈阳市的汽车、电子、能源等行业提供从废弃物中获取稀有贵金属资源的相关技术和看服务，为推动辽宁地方经济的可持续发展发挥了重要作用。



所内动态



5月21日至23日，2016亚太材料科学院先进材料研讨会在金属所顺利召开。会议期间，两届

院士为金属所科研人员作了精彩的学术报告，内容包括先进功能材料、先进结构材料的设计制备、材料使役性能与表征及其它相关内容。

5月14日，金属所举办2016年度公众科学日和家属日活动，来自沈阳市第二中学的360余名学生代表，以及沈阳理工大学和社会公众



近800人参加了活动。张健副所长为公众科学日活动作了科普报告。

5月5日，歌尔声学董事长姜滨、副总裁吉永和良、蒋洪寨、冯蓬勃等一行7人到访金属所开展交流与合作，就共建研发平台、人才培养、新形势下院地合作及成果转化模式等议题与我所进行了广泛交流和探讨，并就未来可能的合作方向与科研人员开展了深入的交流。



交流。

5月17日，中国科学院党组副书记、副院长刘伟平在辽宁省委书记李希的陪同下到金属所调研指导工作。在钛



合金实验室，刘伟平书记听取了杨锐所长关于金属所总体情况、钛合金研究部及钛合金研究成果的汇报。刘伟平书记对金属所在钛合金研究方面的科研实力和取得的成绩给予了充分肯定。他希望金属所继续坚持与国内外相关企业的开放合作，不断提升自主创新能力，为满足国家重大战略需求和壮大辽宁的经济实力做出新的贡献。

5月9日下午，金属所党委组织召开党支部书记会议，结合“两学一做”第一专题学习情况，对学习



教育进行再动员、再部署。会议由党委副书记郝欣主持，党总支和党支部书记参加了会议。

4月28日，中国科学院二期档案进馆及数字化工作第一批总结表彰暨第二批启动培训班会议



在南京召开，金属所荣获中科院二期档案进馆及数字化工作先进集体奖。