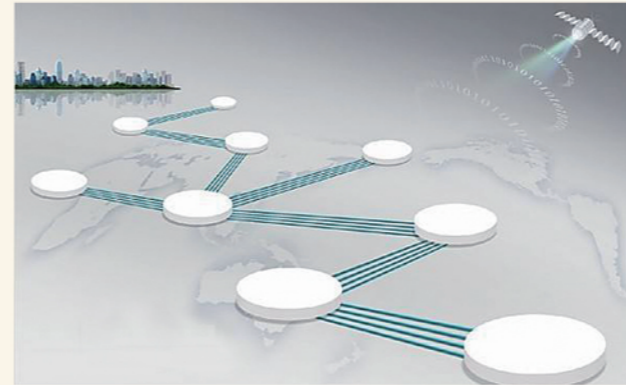




**先进焊接与连接国家重点实验室  
科研成果汇编**

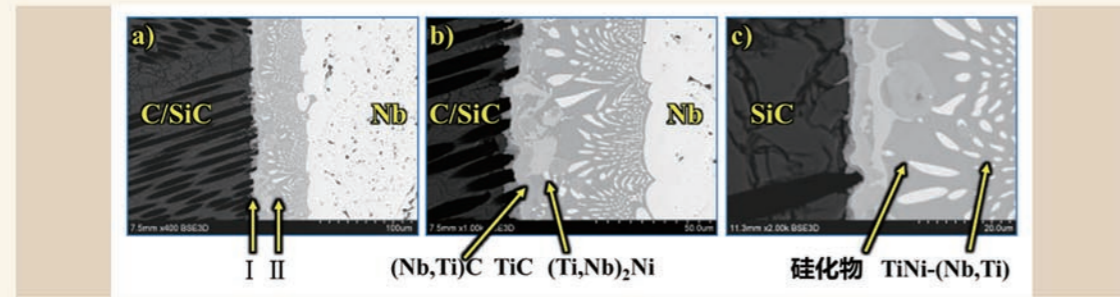


## 新材料制备与连接

### 异种材料先进连接技术及在航空航天发动机中的应用

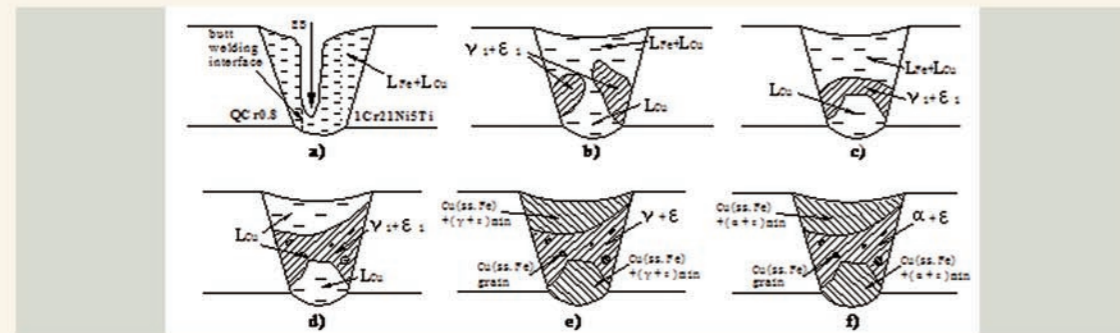
2014 年国家技术发明二等奖，主要完成人：冯吉才、张丽霞、曹健、张秉刚、李卓然、陈国庆

借助中间层及母材的多级接触反应，最终形成高活性液相，实现对复合材料润湿；利用液相凝固形成的高塑性、低模量反应层缓解接头残余应力。



C/SiC复合材料与Nb复合反应连接界面结构

采用可控性好的电子束作为加热源及一侧母材作为钎料被熔化，获得具有熔合过渡层和钎合面的熔钎界面，实现铜 / 钢电子束自熔钎焊。



铜/钢异种金属接头的形成和演变机制

- 发明了一种 Ti-Ni-Nb 高温钎料；
- 发明了提高 C/SiC 复合材料与金属焊接接头强度的方法；
- 发明了一种铜钢异种材料电子束自熔钎焊方法；
- 发明了一种铜钢感应熔铸连接方法及两种中温的铜基无铜钎料；
- 获得国家发明专利 15 项。



铜-钢的连接构件



C/SiC复合材料-Nb的连接

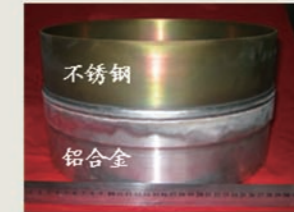
### 异种金属的先进连接技术

主要完成人：曹健、张丽霞、冯吉才

发明了一种铝与钢的 CMT 熔钎焊技术，成功实现了直径 320mm 铝 / 钢管 CMT 焊接；

发明了铜与钢的直接扩散连接技术，解决了界面区扩散激活问题及锡、铅元素的挥发和烧损问题；

用热压扩散连接方法实现了铝与不锈钢、铝与钛的连接，研究了冷热冲击对接头性能的影响，给某型号应用提供可靠依据。



直径320mm铝钢CMT焊接



铝-钛的钎焊



铜-钢止动盘的扩散连接



铝-钛的扩散连接

实现了耐热合金涡轮盘与耐热钢轴的扩散连接，研究中间层形态、厚度、接头微变形量对接头性能的影响；

发明了 TiAl 与钢增压涡轮的钎焊工艺，分析接头脆性层的形成原因，为武器装备的研制提供技术储备；

开发了钛与不锈钢的钎焊与扩散焊技术，焊后构件用于卫星的冷却系统中，接头具有良好的真空密封性和较高的强度。



耐热合金-耐热钢扩散焊



TiAl-40Cr钢增压涡轮



钛-不锈钢的钎焊



钛-钢网-钛的扩散连接

### 陶瓷自身及与金属的先进连接技术

主要完成人：张丽霞、亓钧雷、冯吉才

开发了陶瓷与金属的钎焊技术，确定界面反应相，得到相应的反应模型，探讨反应相的成长规律，为陶瓷金属的连接提供理论基础和基本数据；

发明了陶瓷与金属连接用的复合反应中间层及活性钎料；

围绕陶瓷与金属的连接技术，已授权国家发明专利 28 项。



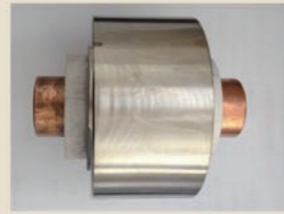
氧化铝陶瓷-Kovar合金



氧化铝陶瓷-不锈钢



氧化铝陶瓷-A505铝合金



氧化铝陶瓷-Cu



碳化硅陶瓷



SiO<sub>2</sub>玻璃陶瓷-TiC4钛合金



氧化铝陶瓷-Cu



ZrO<sub>2</sub>陶瓷-Cu

SiC 陶瓷与 TiAl 合金的扩散连接接头室温抗剪强度达到 240MPa；

采用自行研制的新型钎料可分别获得室温抗剪强度高达 160MPa 和 144MPa，气密性良好的氧化铝陶瓷与可伐、氧化铝陶瓷与不锈钢钎焊接头；

SiO<sub>2</sub> 玻璃陶瓷与 TC4 钛合金接头的室温抗剪强度达到 110MPa。

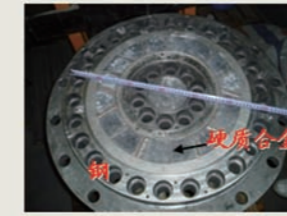
### 复合材料及石墨与金属的先进连接技术

主要完成人：张丽霞、曹健、冯吉才

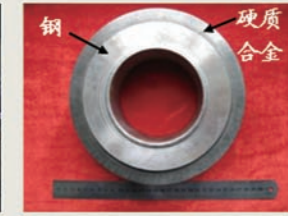
开发了硬质合金与钢连接用钎料及钎焊工艺，实现多种硬质合金与钢构件的可靠连接，满足应用需求；

发明了复合材料表面活化改性技术并设计了低温活性钎料，显著提高了钎料在复合材料表面润湿性及降低焊后残余应力；

围绕复合材料与金属的连接技术，已授权国家及国防发明专利 25 项。



硬质合金-钢造粒机模板的大面积钎焊



硬质合金-钢的复合轧辊的钎焊



硬质合金-钢刀具的钎焊



C/C复合材料-TiC4的钎焊

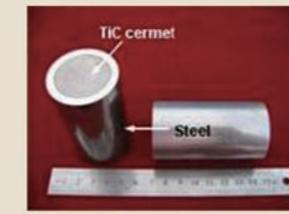


石墨-铜的钎焊

石墨与铜的钎焊接头室温抗剪强度为 26MPa、接头平均电阻为 3.3mΩ；

TiC 金属陶瓷与钢的钎焊接头室温抗剪强度达到 158MPa；

C/SiC 复合材料与金属 Nb 钎焊接头室温抗剪强度达到 182MPa；600°C、800°C 和 1000°C 抗剪强度分别达到 148MPa、128MPa、87MPa。



Ni基TiC金属陶瓷-不锈钢



Cu基TiB<sub>2</sub>金属陶瓷-TiAl

### 先进钎焊与扩散焊设备的开发与制造

主要完成人：宋晓国、曹健、冯吉才、张丽霞

**摩擦辅助扩散连接设备**

Upper pressure-head, Non-rotating shaft, Pre-friction pressure spring (can be changed), BMG specimens, Specimens holder, Rotating shaft, Lower pressure-head

**超声辅助真空钎焊/扩散焊设备**

压力系统, 压头升降, 观察窗, 感应加热电源, 送料门, 电控系统, 真空手套

三维结构示意图

超声辅助真空钎焊/扩散焊设备

发明了一种摩擦辅助扩散连接设备，有效去除待焊母材表面氧化膜。  
发明了一种超声辅助真空钎焊/扩散焊设备，显著提高了铝合金的焊接质量。

离子清洗室, 工件装配室, 溅射镀膜室, 真空焊接室, 工作台, 控制柜

真空多室表面活化及连接一体化设备

发明的真空多室表面活化及连接一体化设备可实现待焊材料表面清理、镀膜及连接在真空室中一次完成，避免二次污染，提高连接质量。

### 石墨烯微连接—超级电容器实际应用

主要完成人：亓钧雷、费维栋、冯吉才

采用原位制备石墨烯技术，实现了集电极表面大面积制备高质量、垂直取向石墨烯电极材料，免去了涂装工艺过程，降低生产成本，提高生产效率，可用于超微型的超级电容器等储能器件领域。

突破了铝表面低温制备石墨烯、石墨烯/铝低阻抗连接、石墨烯/铝连接结构调控等三项关键技术，接触电阻由涂装工艺的12Ω降低至0.1Ω，获得了低成本、低阻抗、高性能的石墨烯/铝基超级电容器电极材料。

**垂直取向石墨烯(VFG)/铝基电极材料的表面形貌**  
Surface morphology of VFG/Al electrode

**垂直取向石墨烯与铝连接界面**  
The interface between VFG and aluminum

**石墨烯与铝连接阻抗谱**  
Nyquist plots of VFG/Al, VFG/3D-Al, RMGO/Al

研制出具有自主知识产权的超级电容器用与动力电池用两种垂直取向石墨烯/铝箔电极材料；攻克了铝表面致密氧化膜刻蚀、二次氧化、集电极表面三维化处理等技术难关，打破了国外技术封锁，该电极材料可替代国外垄断的高价涂炭铝箔电极材料；相关研究成果发表在材料领域知名学术杂志《Nano energy, IF:11.5》上，并得到评审人高度评价，认为“该项研究极大的推动了石墨烯超级电容器的实际应用。”

原始状态集流体, NMP浸泡中, 浸泡1小时后

①—采用本技术的垂直取向石墨烯铝箔  
②—采用浆料涂覆的石墨烯铝箔

**垂直取向石墨烯/铝箔的连接及耐腐蚀性能**  
Join and corrosion performance of VFG/Al electrode

	直流电阻	样件尺寸、规格
纯铝箔	4.5Ω	4×4cm
浆料式涂覆石墨烯铝箔	1.0Ω	4×4cm 涂层1μm
本技术-石墨烯铝箔	0.2Ω	4×4cm 涂层100nm

**石墨烯与铝的接触电阻**  
Contact resistance of graphene with aluminum

## 铝基复合材料设计、制备及其应用

2008 年国家技术发明二等奖，主要完成人：武高辉、姜龙涛

攻克了复合材料热物理性能设计、稳定性设计、高致密制备、及复合材料稳定化处理技术、材料稳定性评价方法等关键技术。

成功应用于在卫星、载人航天等领域的惯导主体结构、替代进口铍材用于高精度加速度计安装板、高精度加速度计过渡环、跟踪反射镜、宇航员舱外服反光镜等。



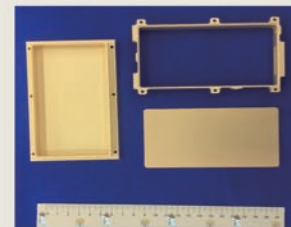
霍尔推进器转向驱动机构



航天舱外服反光镜



T/R模块热沉  
(最小尺寸0.4mm表面镀金)



T/R模块底板及围框

## 电子封装用复合材料的应用

主要完成人：武高辉

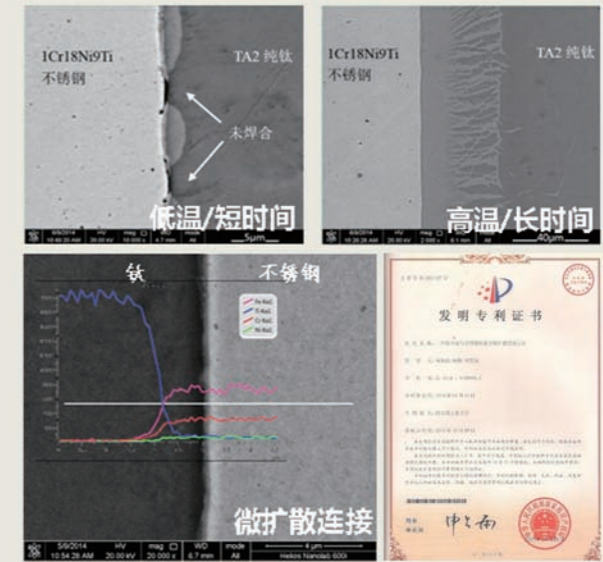
本材料是根据电子封装的低膨胀、高导热以及气密性要求，采用自排气压力浸渗专利技术制备的。由于制备技术特殊，材料致密度高可避免器件漏气；无微观气孔，有利于表面镀膜；通过工艺控制获得了较高的界面结合强度，因此可以进行机械加工，可以加工成 0.4mm 厚的薄片热沉；SiC 的体积分数可以在较大范围调整，从而获得所需的膨胀系数；

提出了高体积分数复合材料等效粒径设计理论；进行了基于器件特性的 SiCp/Al 复合材料的热匹配设计；攻克了 SiC/Al 高气密性制备技术。

## 钛 - 不锈钢复合过渡接头“微扩散”连接技术

主要完成人：何鹏、林铁松、刘贵铭

开发了具有自主知识产权的钛与不锈钢“微扩散”连接技术，解决了常规扩散连接过程中无法平衡焊合率和扩散层厚度之间矛盾的难题，有效地控制了焊缝中金属间化合物的生长，得到了焊合率 100%、扩散层厚度不超过 1 $\mu$ m 的接头。



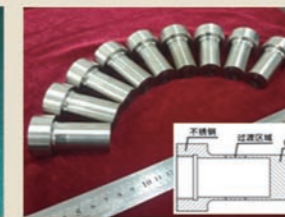
钛-不锈钢接头扫描电镜图像及元素线分布  
SEM and element distribution of titanium-stainless steel joint



钛-不锈钢复合过渡接头管拉伸及弯曲试验结果  
Tensile and bending test results of titanium-stainless steel transition joint tube



钛-不锈钢复合过渡接头管胀破试验结果  
Bulge test result of titanium-stainless steel transition joint tube



钛-不锈钢复合过渡接头管  
Titanium-stainless steel transition joint tubes

### 技术指标

<b>强度</b>	抗拉强度超过500MPa
<b>弯曲</b>	达90°仍无可见裂纹
<b>疲劳</b>	在应力为7.84MPa-78.4MPa，循环速度为110-140Hz的条件下循环10 <sup>7</sup> 次，不发生破坏
<b>气密性</b>	承受90MPa气压而不泄漏

该技术已成功应用于某型号飞行器推进系统的管路连接，该技术也可应用于钛-铝、铝-钢、铜-钢、铜-铝等异种金属构件的制造

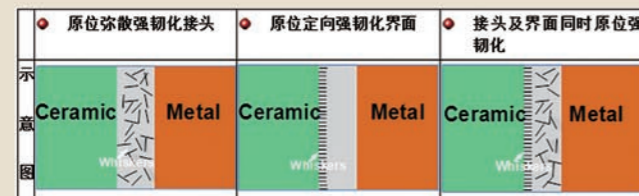
## 陶瓷 / 金属异质连接接头原位强化技术

主要完成人：何鹏、林铁松

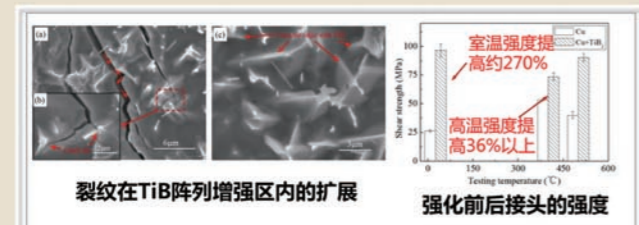
提出了异质接头界面原位强化的设计思想及相关理论，开发了具有自主知识产权的陶瓷 / 金属异质连接接头原位强化技术。

相关研究成果已在 J. Am. Ceram. Soc.、J. Eur. Ceram. Soc.、等刊物上发表 SCI 收录论文 20 余篇。

相关技术授权专利 8 项，技术转让 1 项，已成功应用于电气贯穿接头、电气开关管等实际产品的应用。



接头界面微观结构的原位调控原理



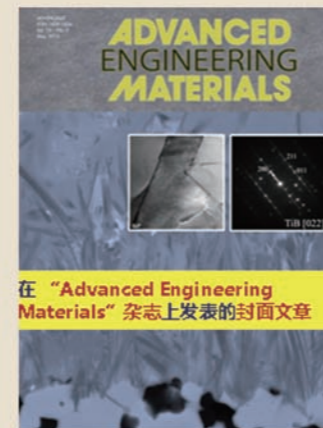
裂纹在TiB阵列增强区内的扩展

强化前后接头的强度

陶瓷/金属接头的强化机制和效果



该技术衍生的技术成果



在“Advanced Engineering Materials”杂志上发表的封面文章



电气贯穿接头  
Electrical connection joint

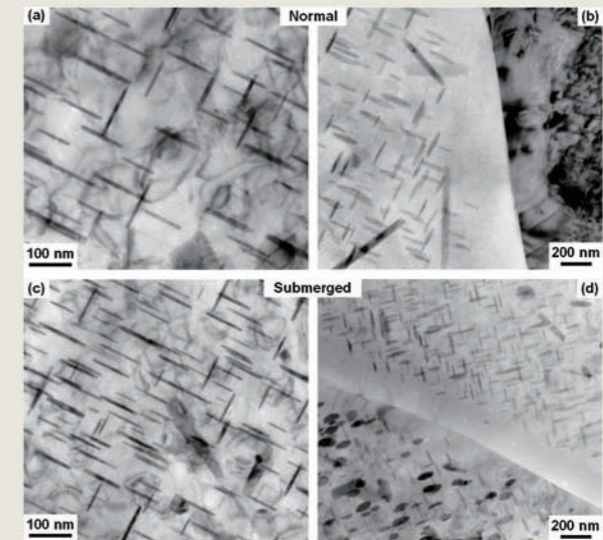
## 多能场复合搅拌摩擦焊接 (FSW) 新技术

国家 973 计划、国家科技重大专项和国家自然科学基金支持项目，主要完成人：刘会杰

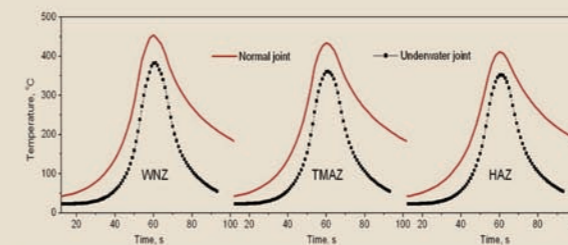
在国际上率先提出了包括水浸冷却、逆向差速及预热辅助等多能场复合搅拌摩擦焊接新方法；

解决了搅拌摩擦焊接头由于受焊接热影响而使力学性能降低的关键科学问题；

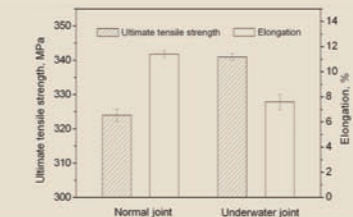
阐明了复合能场作用下的搅拌摩擦焊接机理及接头强化机制，实现了接头组织结构和力学性能的优化调控，发表相关 SCI 检索论文近 20 篇。



常规和水浸FSW接头的沉淀相形貌



常规FSW和水浸FSW接头各区的热循环特征



常规和水浸FSW接头的力学性能

研究了水浸冷却对 FSW 接头微观组织和性能的作用效果，揭示了沉淀强化相在不同焊接环境下的形成机理及其强化效应。

阐明了水浸冷却 FSW 接头微观组织和性能随工艺参数的演变规律，为改善接头性能提供了理论依据；

建立了水浸冷却 FSW 工艺参数与接头性能之间的数学模型，实现了搅拌摩擦焊接工艺参数的优化，获得了高强度系数的 FSW 接头。

### 高功率脉冲放电磁控溅射薄膜制备技术

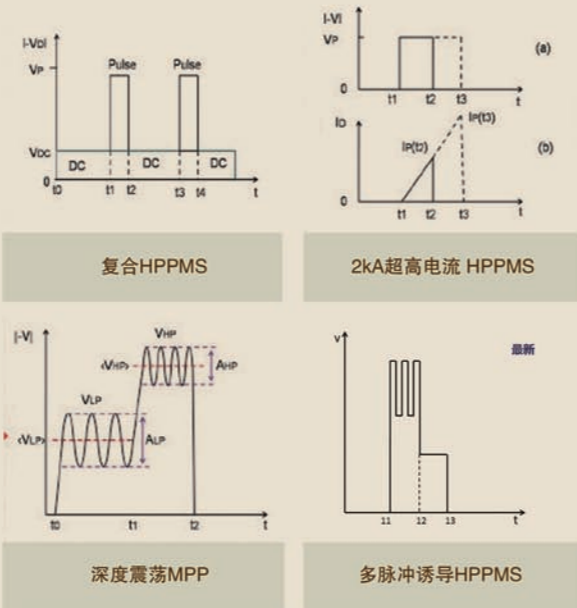
主要完成人：田修波、巩春志

提出了“预电离”高脉冲放电模式，实现了 2000A 超高电流脉冲磁控溅射放电，电弧残余能量释放时间低于 800ns，性能优于美国 AE、德国 Hutinger 等电源

Ti 靶等磁控溅射放电中不仅金属离子率大于 60%，而且沉积速率比传统脉冲磁控溅射技术提高了 3.9 倍

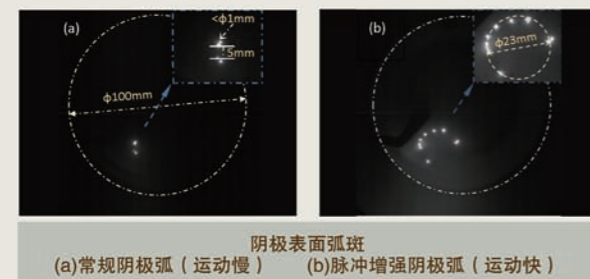
高速钢上 200oC 低温 TiN 结合力大于 70N

已应用在海洋工程防腐及高速铁路等领域



### 脉冲增强真空阴极弧薄膜制备技术及应用

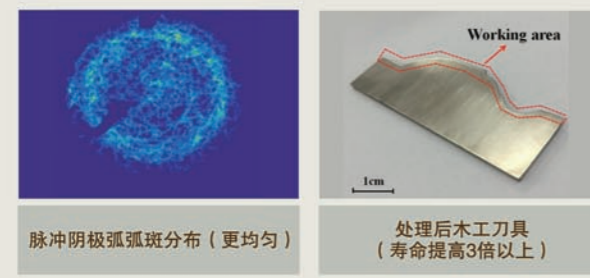
主要完成人：田修波、巩春志



研制出脉冲增强的真空阴极弧电源，电流上升率超过  $2 \times 10^7 \text{A/s}$ ，弧斑运动速度提高 1 倍以上，靶材利用率更高

采用该技术制备的 TiN 薄膜硬度可达 40GPa，结合力超过 100N

成功应用于木工刀具、手术针等领域



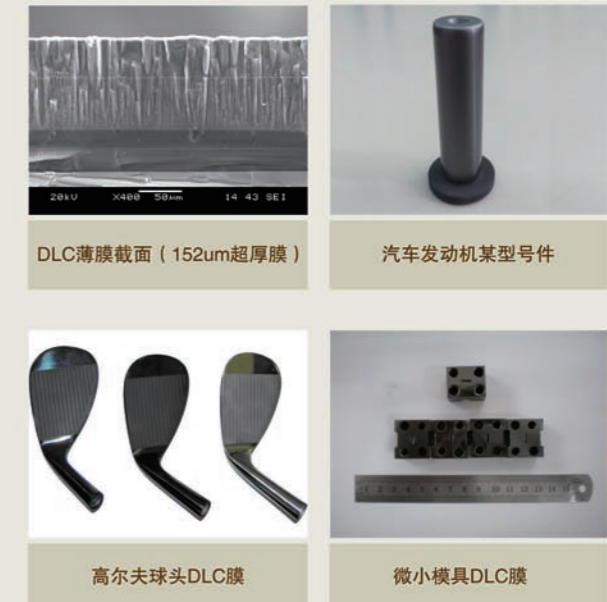
### 等离子体增强 PVD 制备超厚 DLC 薄膜技术及应用

主要完成人：田修波、巩春志

提出了采用偏压调控的笼形空心阴极沉积 DLC 膜层方法，实现了等离子体密度和离子能量独立调控，有效改善了膜层结构和性能

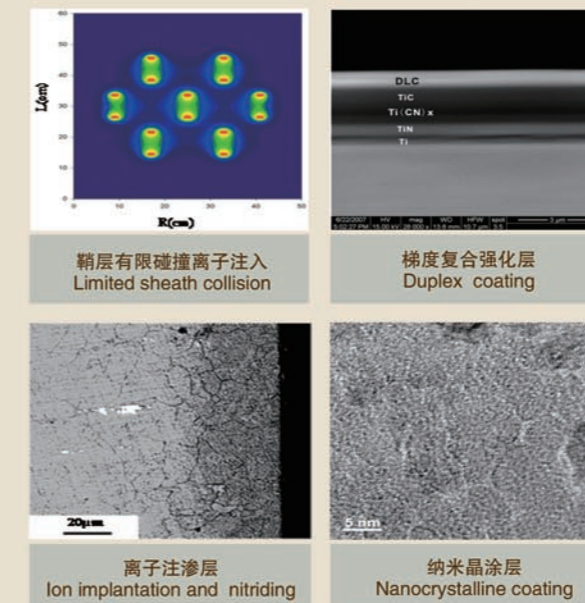
成功制备出 152um 厚的具有高韧性和高膜基结合力的软硬交替 Si-DLC 多层膜

Si-DLC 膜成功应用于刀具、模具及汽车发动机等领域



### 离子注入与沉积技术

2016 年国防技术发明二等奖，主要完成人：王浪平，唐光泽



实现了基于鞘层有限碰撞的高效离子注入，在复杂形状零件表面制备出均匀的强化层，是精密零件制造必备的最后一道关键工序；

攻克了离子注渗、梯度复合、纳米晶等高性能强化层的制备技术，获得了耐高温、超硬、高承载等表面性能。

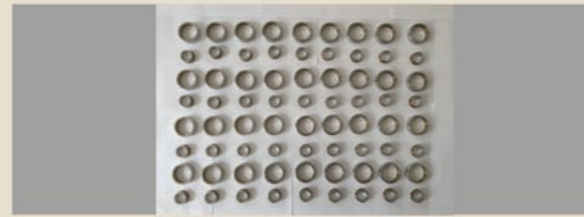


### 离子注入与沉积技术

2016 年国防技术发明二等奖，主要完成人：王浪平，唐光泽

应用到到运载、武器、卫星、载人航天等国防关键领域，成为北斗导航卫星等 20 余个生产与研制型号精密运动部件的关键工艺。

突破了大面积等离子体源、固态高压调制器等关键核心装备技术，研制出系列化离子注入与沉积装备，在国际上率先实现了该技术的工程化应用。



长寿命轴承 Long life bearing



离子注入与沉积工业化装备 Ion implantation equipment



固态高压调制器 Solid state modulator

### 铝基复合材料超声波辅助钎焊技术及其应用

主要完成人：闫久春、许志武



超声波激励作用下液态钎料的铺展与界面结合特征 Solder spreading and interface bonding under ultrasonication



典型铝基复合材料超声波辅助钎焊构件 Typical ultrasonically soldered components of AlMMCs

揭示了超声波激励下液态钎料在液 - 气 - 固三相线处雾化和波动复合作用机理，雾化消减了界面张力，波动促进了液态钎料的铺展。

提出在 SiC/Al 界面形成 Al-Si-SiC 或 Al-SiC 界面的结构，改善了 SiC 陶瓷 / Al 的界面结合能力。

发明了超声波振动辅助钎缝复合化技术。得到的是性能与复合材料接近、结构与复合材料一致的焊缝。

发明了超声波振动辅助系列钎焊技术，批量生产了大尺寸复杂铝基复合材料构件。

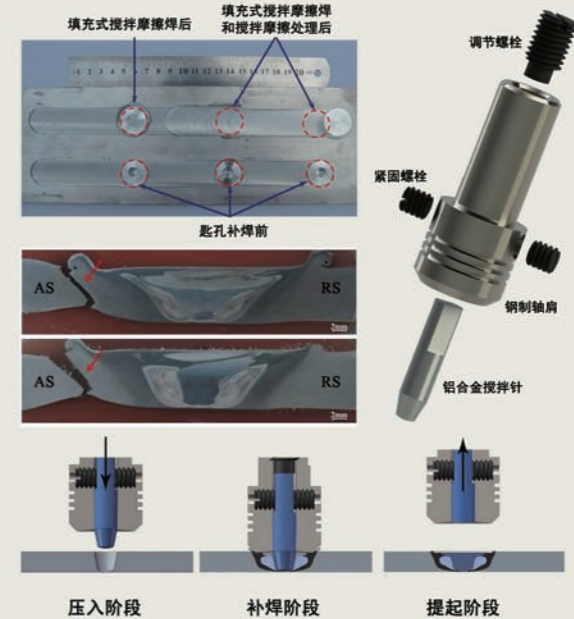
### 填充式搅拌摩擦焊技术

GE 基金会科技创新大赛一等奖，主要完成人：黄永宪、韩冰

FSW 接头质量高，在世界主流运载火箭、高速列车等领域应用前景广阔。焊缝尾部匙孔短板效应亟待解决，研发了新型固相焊接技术，实现 FSW 焊缝匙孔和缺陷等强修复；

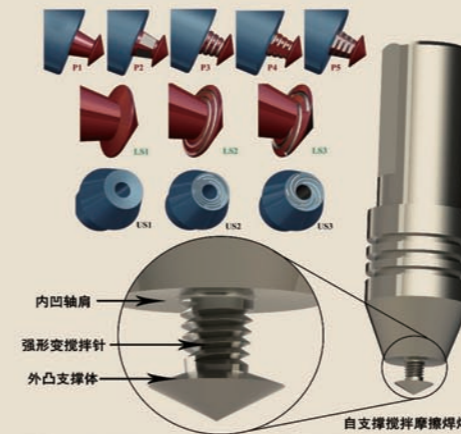
提出了填充式搅拌摩擦焊方法，突破了焊具为非消耗结构的固有模式，搅拌针与匙孔摩擦形变产热、金属塑性流变和填充，实现固相修复；

揭示了填充式搅拌摩擦焊过程多组元三维工作面同质材料间的摩擦形变产热和材料塑变流动行为，阐明了其固相连接机制，为无匙孔搅拌摩擦焊和焊缝缺陷及匙孔等强修复奠定了理论基础和提供了技术途径。



### 自支撑搅拌摩擦焊接头几何学与结构效应研究

挑战杯全国特等奖，主要完成人：黄永宪、万龙



针对高铁和大运载火箭的中空型材和密闭结构 FSW，为解决 FSW 无支撑焊缝难成形、弱连接、双轴肩 FSW 热输入大和需预制导引孔且倾角不可调等问题，提出自支撑搅拌摩擦焊。

实现了中空型材和密闭结构的焊接，拓展了 FSW 应用，为高铁车体、火箭贮箱、飞机壁板等部件的焊接奠定基础。

通过轴肩优化设计，实现了焊缝减薄量控制和热源调控，阐明了其连接机制。

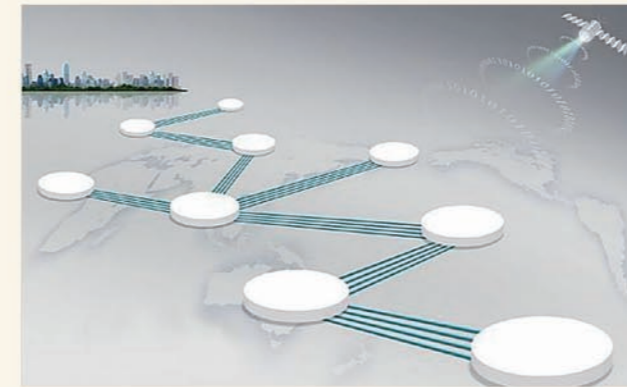
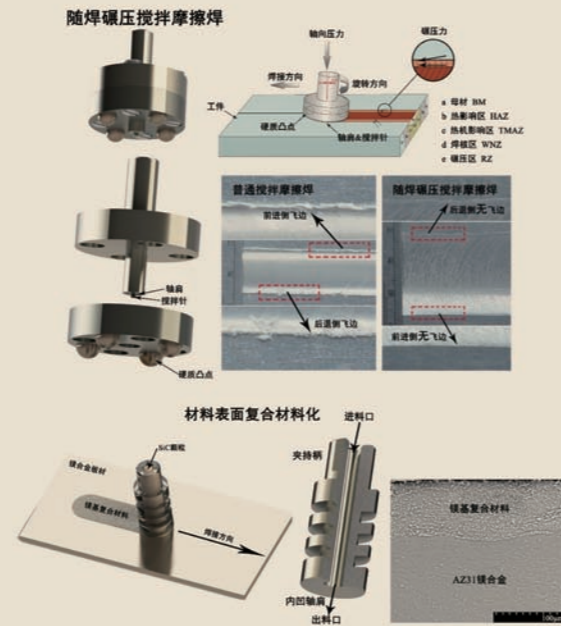
## 搅拌摩擦焊接头形性共控及搅拌摩擦处理技术

中国青少年科技创新奖，主要完成人：黄永宪、万龙

提出了随焊碾压搅拌摩擦焊方法，消除焊缝飞边，改善残余应力和变形量，优化焊缝耐腐蚀性，实现焊缝形性共控。

大幅薄板搅拌摩擦焊，焊缝变形量降低了 2/3，并改善成形，控制残余应力，甚至由拉应力向压应力转变，提升耐应力腐蚀性能。

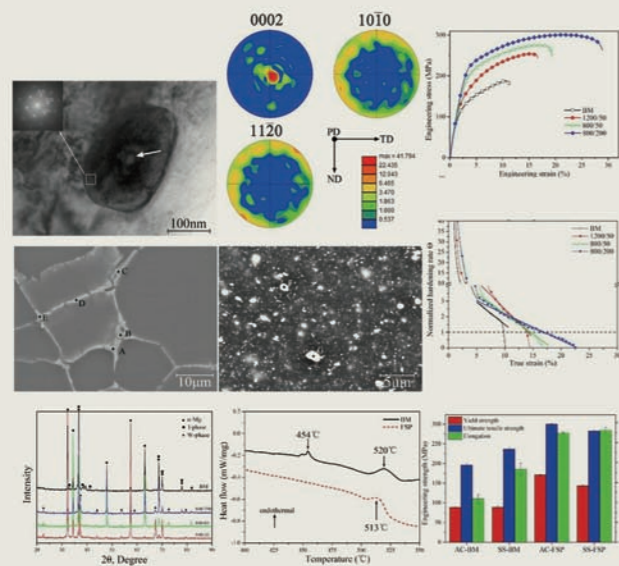
提出了“播种机式”表面原位复合材料化方法，实现了镁合金表面亚毫米尺度颗粒增强复合材料化，可调控增强相的体积分数和选区制备。



高效智能焊接

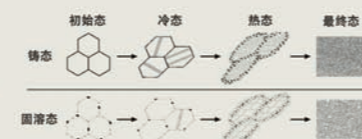
## 镁合金搅拌摩擦处理强韧化技术

中国青少年科技创新奖，主要完成人：黄永宪、王耀彬



揭示了镁合金搅拌摩擦处理形变条件下管道扩散致稀土元素第二相颗粒快速相转变过程，明晰镁合金强韧化机制（强度和塑性均提高 1 倍）；

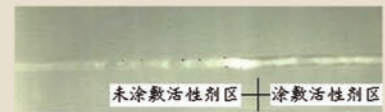
阐明了稀土元素对镁合金动态再结晶行为，为高强高韧镁合金制备提供了理论基础。



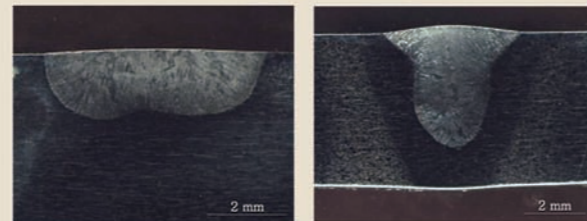
### 活性剂 A-TIG 焊接

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊

研制了不锈钢、钛合金、镍基合金、低碳钢活性剂组分配方；在相同焊接参数下，A-TIG 焊提高熔深一倍以上，焊接效率大幅提高。薄板（4-6mm）一次焊透，厚板减少焊道层数。钛合金同时还起到消减焊缝气孔的效果。已经应用到航天、船舶、化工等行业。



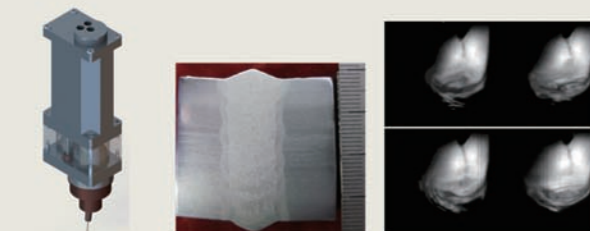
5mm厚304不锈钢TIG和A-TIG焊对比  
Cross Sections of A-TIG VS TIGwelding: (a) TIG (b) A-TIG



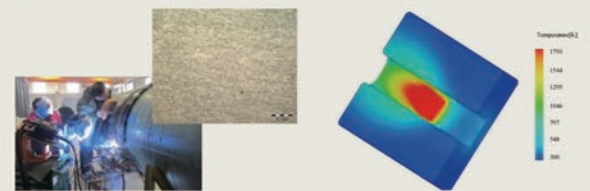
5mm厚GH4169镍基合金TIG和A-TIG焊对比  
Cross Sections of A-TIG VS TIGwelding: (a) TIG (b) A-TIG

### 摆动电弧窄间隙 GMA 焊接

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊



窄间隙GMA焊枪 Welding torch of NG-GMAW  
35mm高强度钢横截面 Welding torch of NG-GMAW  
窄间隙GMA熔滴过渡 Metal transfer of NG-GMAW



X80钢全位置焊接  
窄间隙GMA熔池流动 Weld pool flow of NG-GMAW

窄间隙 GMA 焊接用于厚度为 30mm 以上的厚板焊接，降低填充金属量 50% 以上，减少焊道数量，提高焊接效率和焊缝质量；

研制了外置式摆动电弧窄间隙 GMA 焊枪（国家发明专利）；

研究了不同焊接位置下的摆动电弧窄间隙 GMA 的熔滴过渡规律和熔池行为；

开发了低合金高强度钢窄间隙焊接工艺。

### 铝合金变极性等离子弧焊技术

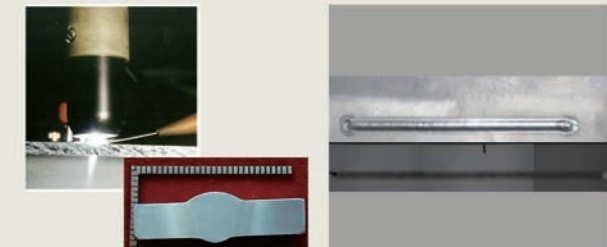
主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊

VPPA 采用穿孔法一次焊透 3-10mm 铝合金，实现零缺陷单面焊双面成形焊接。

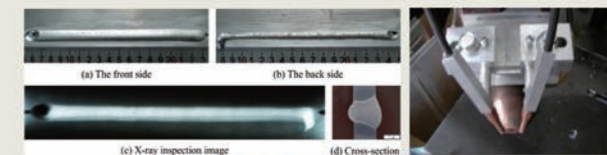
开发了 5A06、2219、2195、5B70 等铝合金 VPPA 焊接工艺；

创新性提出柔性等离子弧解决中厚板铝合金横焊熔池下塌难题；

提出了双丝填充 VPPA 方法解决 VPPA 对错边和间隙敏感导致成形稳定性差的难题。



6mm 2219铝合金VPPA焊接 VPPA welding of 6mm 2219 Al  
6mm 2219铝合金VPPA立焊 Vertical VPPA welding of 6mm 2219 Al



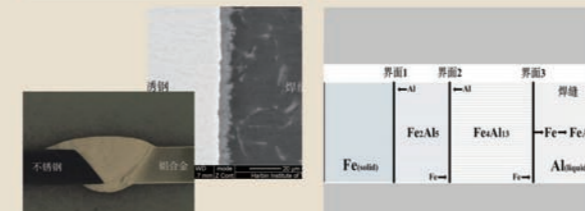
(a) The front side (b) The back side  
(c) X-ray inspection image (d) Cross-section  
6mm 2219铝合金VPPA横焊 Horizontal VPPA welding of 6mm 2219 Al  
双丝VPPA VPPA welding with twin wires

### 铝合金 / 不锈钢 TIG 熔钎焊技术

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊



铝/不锈钢热丝TIG熔钎焊  
焊缝成形



接头横截面接头及微观组织照片  
金属间化合物的演变机制

以 TIG 电弧为热源，通过采用自行研制的特种钎剂及双送丝技术，可获得 1-4mm 不同厚度铝合金 / 不锈钢熔 - 钎焊优质成形接头；

配合使用高频感应热丝技术，有效控制界面金属间化合物生长、可将界面 Fe-Al 金属间化合物厚度控制在 2-3 $\mu$ m，接头强度达 200MPa 以上。

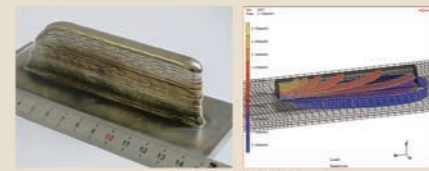
### TIG 电弧增材制造技术

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊

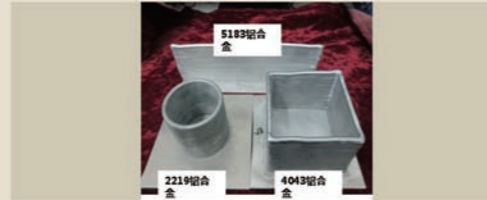
电弧增材制造相比于其它 AM 方式具有效率高、成本低的优势。

以 TIG 电弧为热源，对铝合金、钛合金进行了增材制造的工艺优化，获得了不同参数下对沉积层高度和宽度的影响规律；

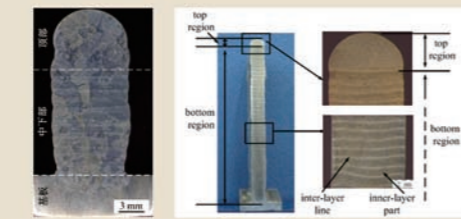
系统性的阐明了铝合金增材制造过程中微观组织演变机制；



铝合金增材制造



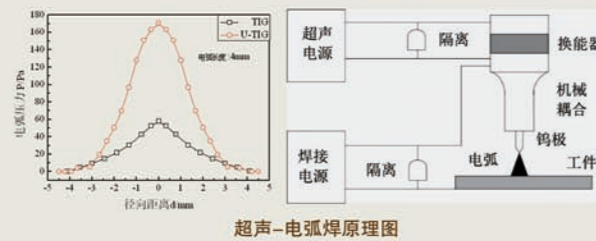
铝合金增材制造



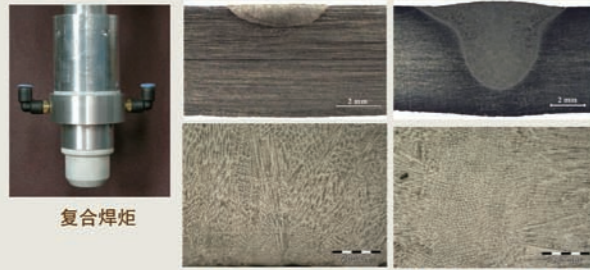
铝合金增材制造过程的微观组织演变机制

### 超声波辅助电弧焊技术

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊



超声-电弧焊原理图



复合焊炬

不锈钢150A电流，(左)常规TIG(右)超声TIG

将超声能量引入到电弧焊中,利用超声特性改善焊缝组织、缓解残余应力,增加焊缝熔深,实现优质高效焊接。

先后获得三个国家自然科学基金面上项目及一个重点项目资助,2013 年获得美国焊接学会 A F Davis 银奖。

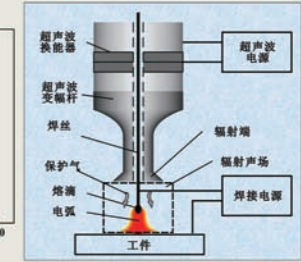
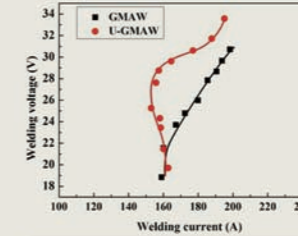
超声与 TIG 电弧耦合,提高电弧力,增加焊缝熔深,细化焊缝晶粒。

### 超声波辅助电弧焊技术

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊

超声与 MIG 复合,超声振动改变了熔滴的受力状态,增加过渡频率。

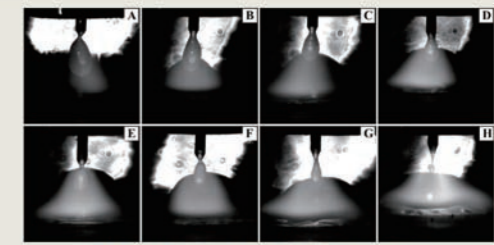
普通 GMAW 熔滴过渡过程中,熔滴呈球状,脱落时体积很大;U-GMAW 过程中,熔滴沿焊丝轴线方向拉长,逐渐呈椭球状,脱落时体积明显减小。



超声-电弧焊原理图



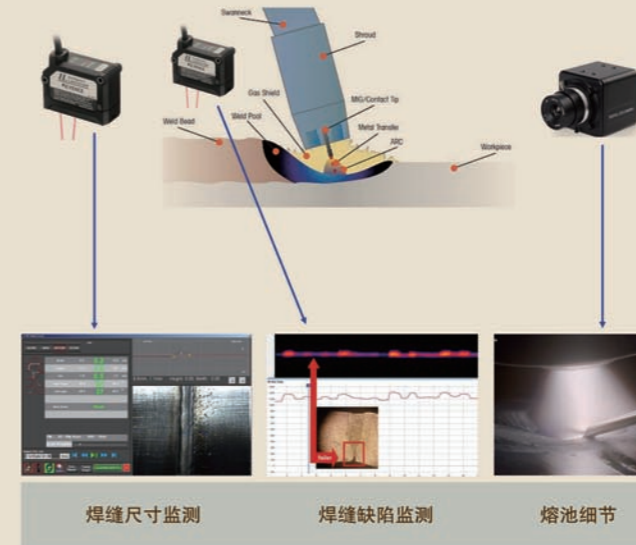
复合焊炬



超声辅助,不同送丝速度下的熔滴过渡

### 焊接过程可视化与信息化

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊



综合采用 CMOS 高动态相机、中波红外相机及结构光传感器,以及电流、电压及流量传感器,实时实现:

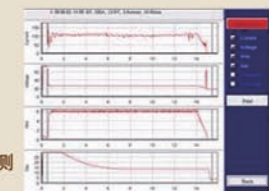
- 焊接区域电弧熔池可视化;
- 焊缝尺寸测量;
- 焊接参数采集;
- 焊接缺陷判断;
- 车间网络化。

焊缝尺寸监测

焊缝缺陷监测

熔池细节

过程参数监测



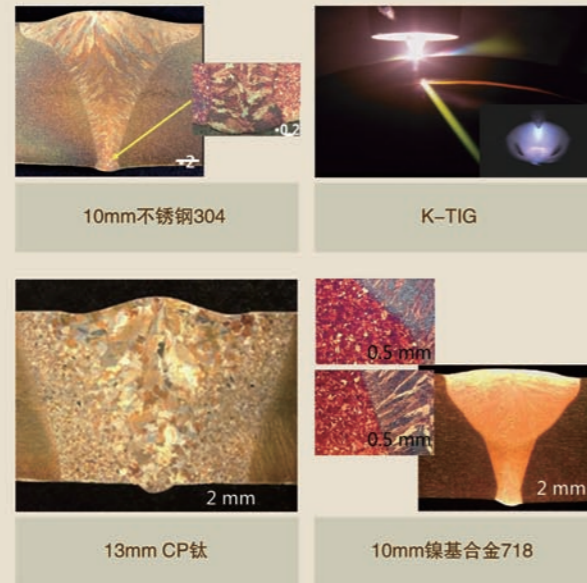
### 高频大电流匙孔 TIG 焊接技术

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊

KTIG 中，电弧深深地扎入到母材中去，将熔融的金属排挤到熔池四周侧壁，形成匙孔。随着电弧前进，熔池金属在电弧后方弥合并冷却凝固成焊缝。

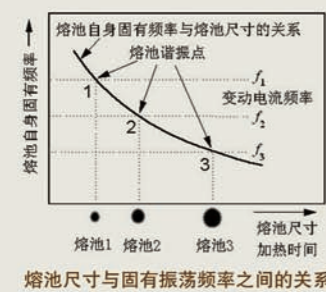
K-TIG 中采用高频 TIG，高频能够大幅度增加电弧挺直性及电弧力，小电流下形成匙孔；

5-14mm 不锈钢、钛合金、镍基合金能够不开坡口一次焊透，从而提高焊接效率。



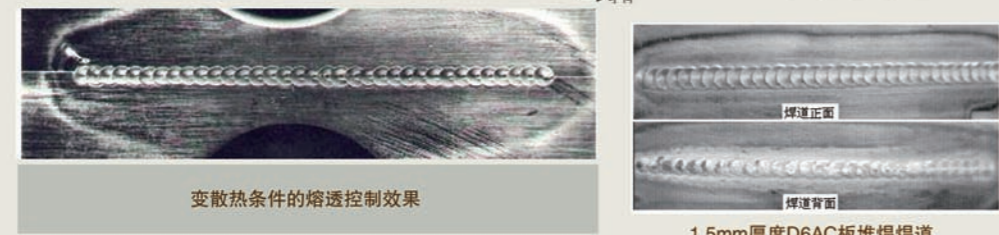
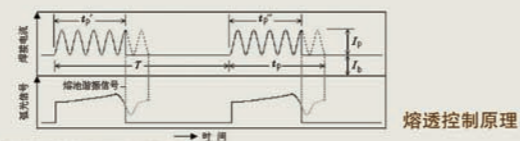
### 薄壁件 TIG 焊熔透控制

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊



采用脉冲电流使熔池产生振荡，当熔池振荡频率与脉冲频率相同时，熔池产生谐振，熔透发生。

利用传感器检测熔池检测熔池振荡频率，当发生谐振时，控制焊接电流及行走，实现熔透控制。

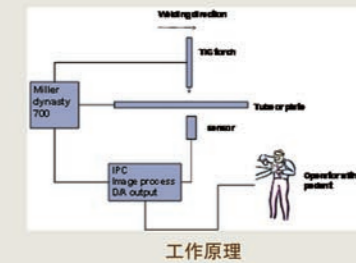
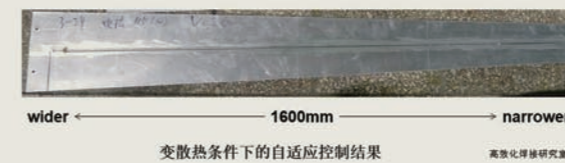


### TIG 焊背面熔宽自适应控制系统

主要完成人：杨春利、林三宝、范成磊

利用激光视觉传感器，检测焊缝背面的熔宽。开发熔宽自适应控制算法，所测量的焊缝背面熔宽与目标熔宽进行比较，调节相应的焊接电流，实现 3-8mm 铝合金的背面熔透控制，保证焊缝成形的均匀一致；

构建了铝合金背面熔宽自适应控制系统，通过大量的工艺试验，实现了焊缝熔宽的自适应控制。系统能够适应被焊工件由于夹具散热等因素造成的熔宽不均匀一致的问题。已经交付给用户使用。



工作原理



控制软件

### 电弧增材制造关键技术研究

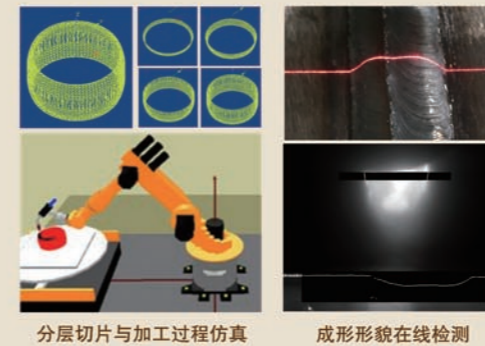
主要完成人：张广军



突破了电弧增材制造涉及的零件三维形貌检测建模、分层切片、路径规划、成形形貌在线检测与控制、装备集成等关键技术。

形成了具有自主知识产权的机器人电弧增材制造完整系统。

获得软件著作权 2 个，国家专利 2 项。



分层切片与加工过程仿真

成形形貌在线检测

电弧增材制造典型成形件

## 机器人焊接离线编程系统 iROPS

主要完成人：高洪明、李海超

将焊接工件的 CAD 模型转换成机器人焊接路径，适用于焊接、切割的生产，机器人虚拟操作训练、机器人焊接单元设计。

软件具有强大的多机器人及外部轴的离线编程能力；

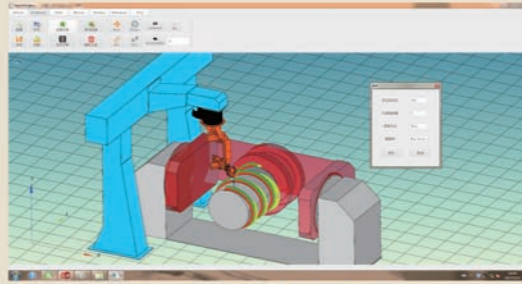
极大的减轻操作者进行机器人示教的时间，提高焊接效率；

原来程序数据的重复有效利用；

丰富的路径补偿功能；

软件功能模块化设计，操作简单，人性化；

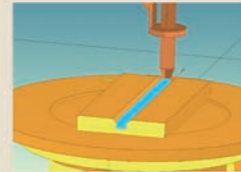
- 单元布置
- 自动编程
- 碰撞检测
- 特征建模
- 路径规划
- 标定
- 运动仿真
- 参数规划
- 协调运动
- 轨迹补偿
- 离线示教
- 放置规划



机器人离线编程系统软件界面



路径规划



焊道仿真

## 机器人型钢切割离线编程系统

主要完成人：高洪明、李海超

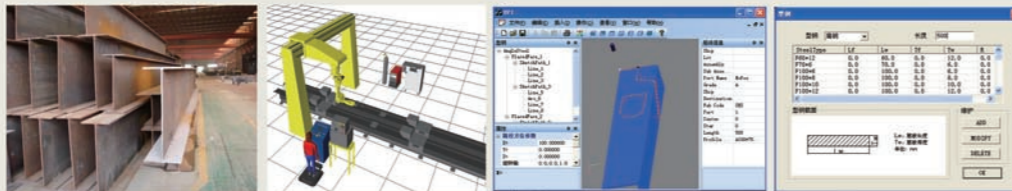
系统用于型钢、方管材、圆管材的机器人切割。机器人系统基于离线编程系统运行。能够实现切割特征建模、特征编程、套料编程。用户可以实现切割特征设计；CAD 建模；切割单元编程；切割特征套料；切割补偿；切割特征布局；运动仿真。

技术特点：

能够根据切割图纸进行切割特征的编程和套料；参数化建模和套料；

人机交互式型材类型库和切割特征库；实现切割路径的三维图形仿真；

实时监控机器人系统的运行状态



## 便携式机器人

主要完成人：高洪明、李海超

外形尺寸：290\*112\*250

工作尺寸：70\*80\*1200（可选）

易于安装，搬运，能够焊接大尺寸工件；

采用电弧传感自动检测焊接初始位置，提高了自动程度，保证高质量焊接；

免示教功能，极大简化了操作；

焊接过程能够适应坡口的变化，调整焊枪位姿和摆动参数；

能够实现多个位置的焊接作业，配合软件自动规划焊接参数。



## 机器人智能焊接系统

主要完成人：高洪明、李海超



用于各种管板焊缝类型的机器人焊接  
由机器人系统，焊接系统、视觉传感系统，机器人离线编程，自动翻转系统组成；

自动识别焊缝，自动引导机器人运动到焊接位置焊接，适用于 TIG 焊，MAG 焊；

具有工程图纸导入功能，把零件的图纸转化成机器人工作程序；

机器人不需要示教，大幅节省编程时间，提高工作效率；

对于大直径环焊缝，能够实现焊缝的自动纠偏功能，消除变形引起的程序误差；

具有焊接参数专家数据库，提高工作效率。



### 先进激光熔覆工艺技术

主要完成人：李俐群

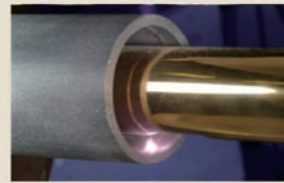
与德国 Fraunhofer ILT 合作开发不同材料精密激光熔覆工艺技术,包括 3D 曲面激光熔覆、超高速激光熔覆、内壁激光熔覆等先进表面涂层技术;

研制开发专用熔覆喷嘴、实现不同材料、工艺条件下粉末流汇聚行为的精确控制,有效提高粉末利用率与成形精度。

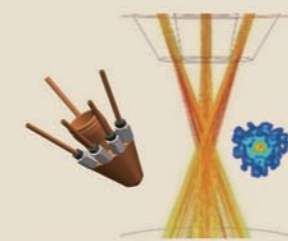
定制化研发不同材料的激光熔覆工艺参数包,建立科学的工艺 & 性能数据管理平台。



超高速激光熔覆  
(20-200m/min)



内壁激光熔覆  
(最小内径55mm)



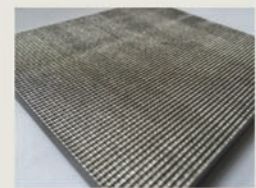
粉末流控制技术



激光熔覆工艺数据参数包

### 激光熔化沉积过程的控形与控性

主要完成人：李俐群



精密激光熔化沉积制造的样件



激光增材复合制造的泵轴零件  
(SLM & LMD & LBW)



叶片的叶尖激光修复

针对高温合金、钛合金、铝合金、金属基复合材料、梯度材料,开发激光熔化沉积工艺技术,实现薄壁零件制造成形精度、内部质量、力学性能的控制。

突破双相粉末流浓度分布调控、粉末熔化行为控制、热变形控制等关键技术;采用激光复合制造技术实现大型复杂构件的快速成形。

相关项目:大飞机新型发动机机匣修复、发动机叶片叶尖修复、不同类型航天发动机进气道的精密修复与制造、铝合金油箱构件的激光修复。

### 中厚板激光焊接技术

主要完成人：李俐群

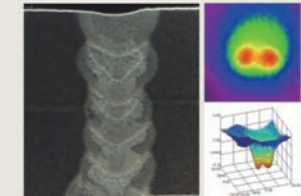
超窄间隙双焦点激光填丝多层焊、摆动光束激光填丝多层焊、双侧激光-电弧复合热源焊接等新技术应用于中厚铝合金、高强钢材料的焊接,有效提高焊接质量与焊接效率。

突破复杂热场协调控制、多层焊熔池稳定性控制、焊接裂纹与变形控制等关键技术问题。

应用于船体、管道、战车、压力容器等构件的焊接。



30mm厚铝合金  
摆动激光填丝焊



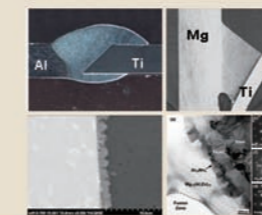
16mm厚高强钢  
双焦点激光填丝焊



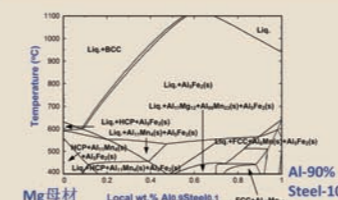
30mm厚舰船高强钢激光-电弧双侧复合焊

### 异种材料激光熔-钎焊接技术

主要完成人：李俐群



异种材料激光熔-钎焊接头与界面



界面可能生成相的计算与调控

异种材料激光熔-钎焊的主要热源类型:双焦点光束、高频摆动光束、矩形光斑等。

针对 Al/Fe、Al/Ti、Al/Mg 等金属间熔点差异大、易形成脆性金属间化合物的问题,应用光束成形技术设计适合于不同类型接头的有效热源,成功抑制反应层脆性化合物的生长,获得与熔焊等强的高质接头。

针对 Ti/Mg、Fe/Mg 等非互溶异种金属的连接,开发了高能束作用下的界面微合金调控技术,建立薄且连续的优质界面反应层作为非互溶金属间过渡层,实现了不可焊金属之间的可靠连接。

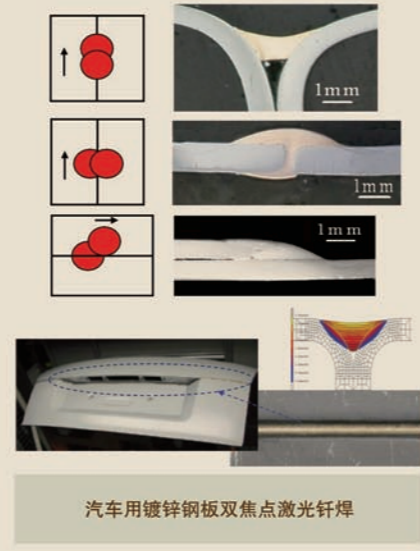
## 双焦点激光焊接技术

主要完成人：李俐群

激光填丝钎焊技术能够完全解决汽车用镀锌钢板焊接表面镀锌层受热蒸发带来的飞溅、表面成形差问题；

利用双焦点激光能量、间距、排布灵活可调的优越性，可实现不同类型接头的激光钎焊有效加热区温度场的灵活设计，获得成形美观、性能稳定的优质接头。

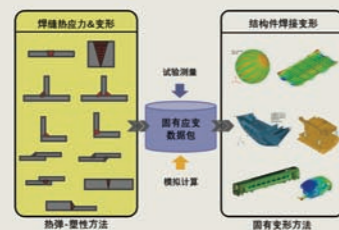
双焦点激光焊接还应用于不等厚板拼焊、异种材料焊接、中厚板多层焊中，在汽车、轨道交通、航空、船舶等多个领域均有广泛的应用空间。



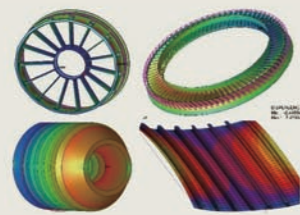
汽车用镀锌钢板双焦点激光钎焊

## 基于固有应变理论的大型复杂构件焊接变形预测

主要完成人：李俐群



精密激光熔化成形制造的样件



大型复杂构件的焊接变形预测与焊接顺序优化

基于固有应变理论进行大型构件焊接变形预测、装配及焊接顺序优化，极大减少计算时间，解决大型复杂构件计算精度与效率难以兼顾的难题；

与大阪大学接合研究所合作开发不同类型材料与接头的固有应变数据包、不同激光焊接工艺的热源计算模型；

为工业界定制研发专用固有应变数据包，进行大型构件焊接变形预测的快速计算，实现有限元模拟仿真技术的工程化应用。

## 激光加工过程传热传质行为计算分析

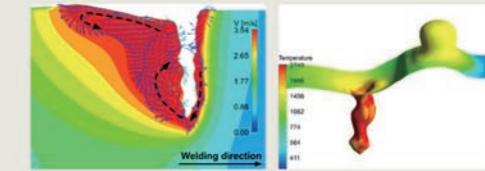
主要完成人：李俐群

基于有限元数值模拟方法，研究激光焊接、激光熔覆、激光修复、激光增材制造等不同加工方法物理过程的热 - 力、热 - 流交互作用机制。

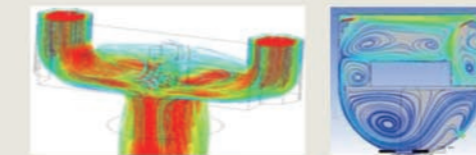
优化受限位置、封闭舱体内保护气流的运动轨迹；

分析激光焊接过程不同类型热源作用模式下的熔池温度场、流场特征及匙孔动态行为；

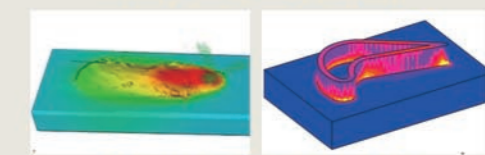
调控激光熔覆过程粉末与熔池的交互作用，提高粉末利用率；预测激光增材制造零件的残余应力分布状态。



激光深熔、填丝焊的熔池与匙孔行为



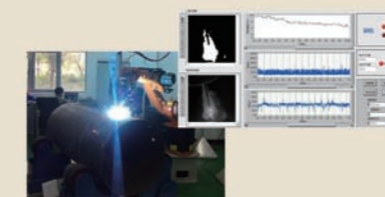
焊接过程保护气氛中气体流动特性



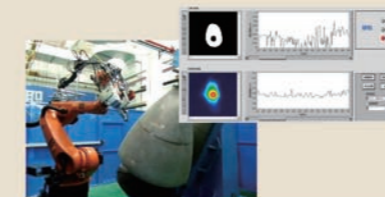
激光增材制造过程熔池行为与应力分析

## 激光焊接过程质量监测与控制

主要完成人：李俐群



管线激光-GMAW复合焊接质量在线监测系统



火箭尾喷管激光焊接质量在线监测系统

基于同轴 / 旁轴焊接熔池视觉传感、温度或光强信息、电流与电压参数的实时监测，实现激光焊接、激光 - 电弧复合热源焊接过程焊缝质量的在线监测；

开发专用焊缝质量监测软件，同步分析焊接过程的特征信息，实现焊缝缺陷的在线诊断与识别，并提供详细的产品焊接质量报表。

成功解决激光等离子体干扰、特征信息提取等关键技术。只需重新标定传感信息、设定判据，系统即可应用于其它激光焊接、激光熔覆、激光增材制造等加工过程。

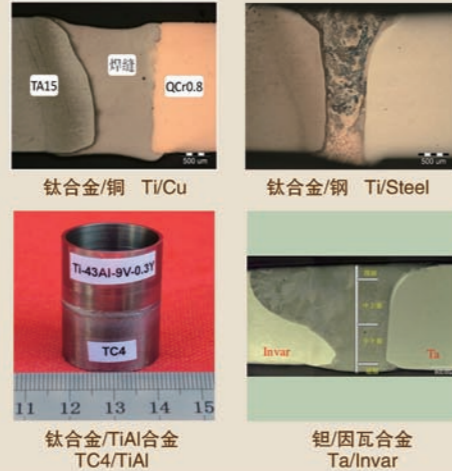


### 异种材料电子束焊接技术

主要完成人：张秉刚、陈国庆

利用非平衡能量分布及复合焊接方法等，实现了对异种材料的电子束焊接，消除了异种材料焊接产生的裂纹等缺陷。

解明了熔池内部传热传质，揭示了异种材料焊缝中组织转变规律，阐明了异种材料焊接过程中裂纹产生机制并提出了相应的解决措施，实现了异种材料的可靠连接。



异种材料电子束焊接接头  
Joints of dissimilar material for electron beam welding

### 新材料电子束焊接技术

主要完成人：张秉刚、陈国庆



Ti600电子束焊接接头成形  
Appearance of Ti600 electron beam welding joints



TiAl电子束焊接接头成形  
Appearance of TiAl electron beam welding joints

考虑航空航天减重及高温服役性能，针对研制出的新兴材料，研究其电子束焊接性能，实现新材料的可靠连接。

揭示了 TiAl 合金电子束焊接过程中组织演变规律，阐明了产生焊接裂纹的组织因素及应力因素，采用复合焊接方法成功实现了 TiAl 合金无裂纹焊接。

### 电子束熔丝沉积设备开发及材料制备

主要完成人：张秉刚、陈国庆

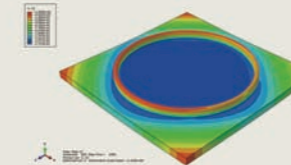
采用二级自适应送丝系统，避免了沉积过程送丝速度不稳定问题，提高了送丝精度，改善成形；

揭示了熔丝沉积过程中熔滴过渡形式对沉积体成形的影响，阐明了层间组织生长规律及异种材料界面处原子扩散行为；

通过有限元分析手段，优化工艺参数及沉积路径，减小沉积体整体变形。



不锈钢墙体结构沉积体  
Deposition of wall structure for stainless steel



环形沉积路径变形优化分析  
Optimization analysis of annular deposition path



铜/钢梯度复合材料  
Copper-steel composite material

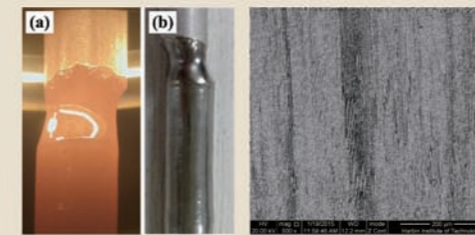
### 自增韧 Ni-25Si 合金电子束区域熔炼技术

主要完成人：张秉刚、陈国庆

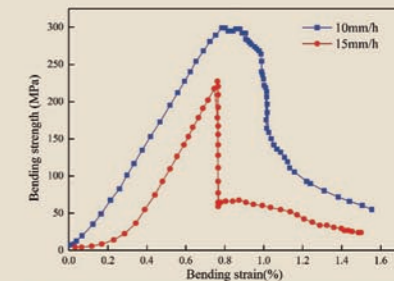
采用电子束区域熔炼技术成功制备自增韧 Ni-25Si 合金自生共晶复合材料，具有组织均匀、性能优异的优点；

揭示了自增韧 Ni-25Si 合金自生共晶复合材料的动力学及热力学形成机制；

通过自增韧模式，在保持良好抗氧化性的同时，显著提高室温断裂韧性，揭示了其强韧化机制。



Ni-25Si合金电子束区域熔炼试样宏观形貌及显微组织  
Macrostructures and microstructures of Ni-25Si alloy



自增韧Ni-25Si合金复合材料的载荷-位移曲线  
Load-displacement curves of self-toughening Ni-25Si alloy

## 高效、高质、低成本激光 - 电弧复合焊接技术

主要完成人：雷正龙

利用激光产生的锁孔效应吸引、压缩和稳定焊接电弧，使得电流密度显著提高，从而建立一种全新的高效热源，具有熔深大、焊速快、成本低等显著优势，非常适合于薄板高速焊及大型厚壁构件的焊接；

提出了“激光-TIG 电弧复合焊接能量有限增强”、“附加机械力控制激光-GMA 电弧复合焊接熔滴稳定过渡”的新理论；

突破了中、厚板激光-电弧复合多层焊接方法、全位置激光-电弧复合焊接熔滴过渡稳定性控制等关键技术，目前已应用于航天、船舶、兵器、高铁、石油管道等领域。



中厚壁高强度机器人激光电弧复合焊接



贮气罐产品不预热复合焊接焊缝



管道全位置激光电弧复合焊接



X70钢管道焊缝成型及其横截面

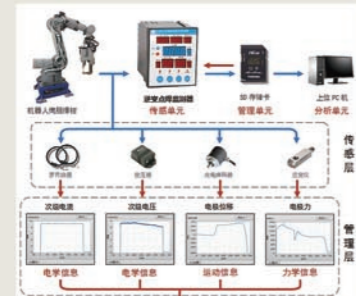
## 车身点焊过程稳定性在线评价技术与装置

主要完成人：张忠典

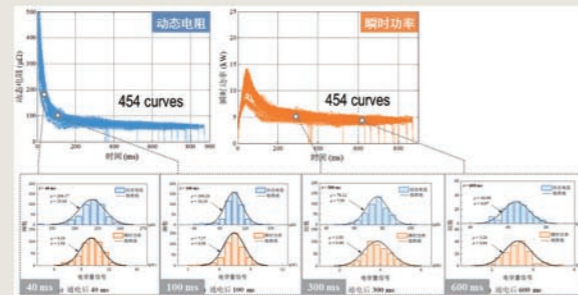
通过多传感融合技术同步提取了中频逆变直流电阻点焊过程的电流、电压、电极力和电极位移瞬时曲线信息，兼顾测量准确性与安装实施性；

提出了求解动态电阻的迭代算法，有效减少了焊钳电感对电阻计算值的影响，无论在恒流模式还是变电流模式下的理论计算误差均不超过 0.075%；

揭示了大批量点焊生产数据的演化规律，提出了基于瞬时值离散性的稳定性评价方法，能够准确表征焊点质量的一致性。



车身电阻点焊过程监测方案  
Scheme of RSW Monitors for Auto-body



大批量电阻点焊生产数据的演化规律  
Evolution trend of mass production data of RSW process

## 车身点焊过程稳定性在线评价技术与装置

主要完成人：张忠典

基于 32 位 ARM 单片机和嵌入式 LINUX 系统研发了具有自主知识产权的“CH C-D/AWM 型电阻点焊监控器”产品，具有车辆焊点计数、漏焊语音报警、点焊过程监测、稳定性分析、数据本地记录、网络通讯等一系列功能；

相关产品已应用与长春一汽轿车股份有限公司和一汽集团红旗事业部生产现场，共计安装 147 台，实现了车身点焊过程 100% 在线监测，极大地减少了漏焊、虚焊等质量问题的发生，提高了焊接质量与效率，大幅降低了焊后人工检测成本。

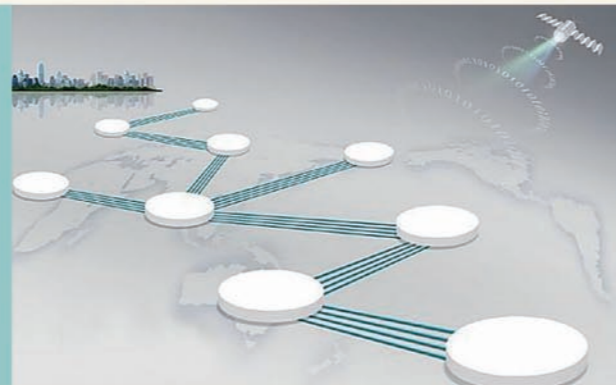


车身电阻点焊过程稳定性评价装置产品  
Products of RSW monitors for Auto-body



车身电阻点焊过程稳定性评价装置在整车厂的应用  
Application of RSW monitors in Auto-manufacturing

## 复杂结构成形及可靠性



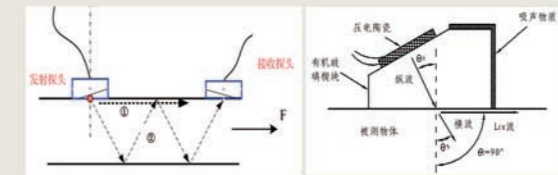
## 基于声弹性理论的超声波法应力测试方法及系统

主要完成人：方洪渊、刘雪松

本研究以具有平面应力特征且带有曲率的板状焊接件为研究对象，在理论上探索出声弹性方程式的合理简化途径；

研制双轴加载装置和设计专门试验，结合先进的信号处理策略，有效拓展了现有的声弹性理论方程式的适应能力，突破了焊接残余应力测试中的关键技术瓶颈；

技术设备已经在国防产品制造领域及高速列车可靠性评价领域推广应用。



超声波法应力测试技术原理



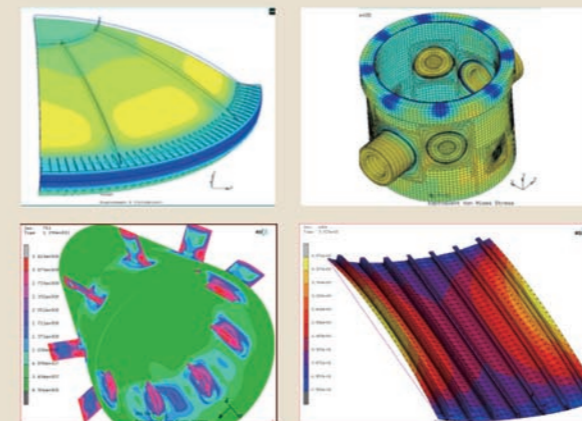
基于声学原理的国际先进超声波技术设备及在高速列车中应用

## 重大装备焊接结构制造仿真

主要完成人：方洪渊、董志波、王苹、刘雪松

本研究以重大装备焊接结构为研究对象，在理论上解决大型焊接结构仿真模型大，单元数量多，模拟精度低，计算效率慢等技术难题。

技术成果具有基础理论原创性，相关研究获得国家国际科技合作项目及国家自然科学基金项目资助。该技术已经在国防产品制造领域、舰艇、飞机和核工业领域推广应用。



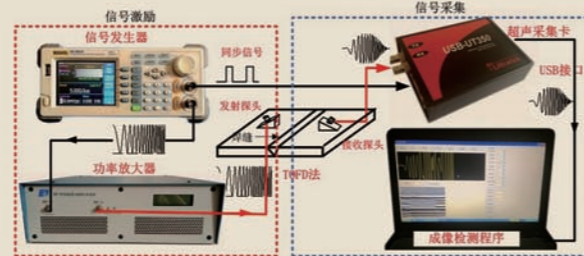
大型结构焊接应力变形分析实例

### 基于调频信号激励的高时间分辨率超声 TOFD 检测方法

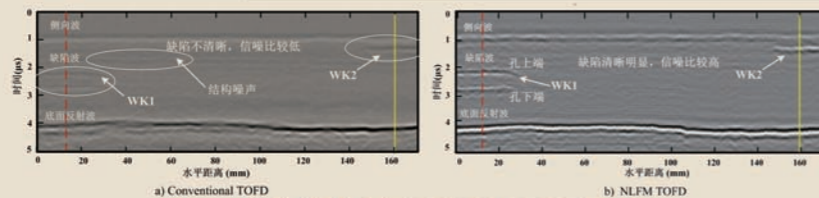
主要完成人：刚铁，张佳莹，丛森

开发了基于调频信号激励的超声成像检测系统以及基于 Lab-View 的成像检测程序。

相比于传统窄脉冲激励的超声检测方法，采用调频激励的超声检测方法可以有效地提高检测结果的时间分辨率和信噪比，有助于更加精确的定位和测量焊缝中的缺陷。



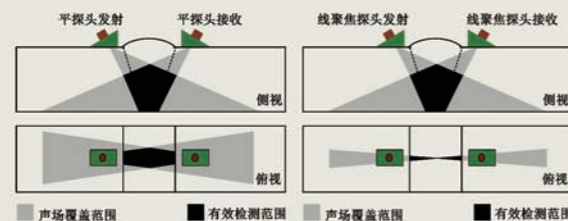
基于调频信号激励的超声 TOFD 成像系统  
Ultrasonic TOFD testing based on frequency modulation excitation



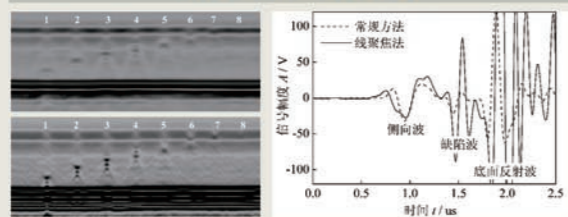
调频信号激励与传统窄脉冲激励的超声 TOFD 检测结果对比  
Comparison of frequency modulation excitation TOFD results and conventional excitation TOFD results

### 线聚焦超声 TOFD 检测方法

主要完成人：迟大钊，刚铁



声场分布对比  
Comparison of sound field



缺陷试件检测对比结果  
Comparison of artificial defect block tested results

针对超声 TOFD 法存在超声衍射声场能量低、检测回波信号弱带来检测灵敏度不足的问题，提出一种线聚焦超声 TOFD 缺陷识别方法。

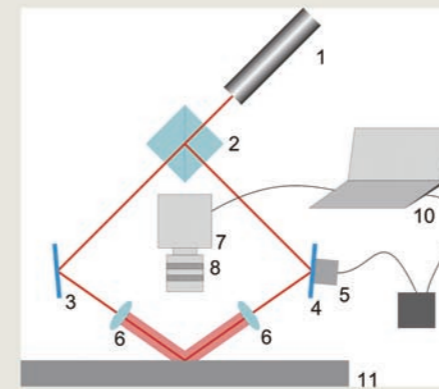
线聚焦超声 TOFD 法采集的图像具有更好的对比度，同时能较好地保持图像边缘，在改善缺陷分辨力、提高缺陷检出率及降低漏检等方面具有很好的使用价值。

### 基于激光散斑计量原理的应力测试技术及设备研发

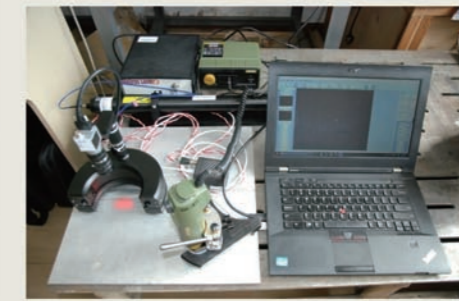
主要完成人：刘雪松、潘海博、闫忠杰

通过国际合作开发的先进技术。将传统的小孔法与先进的散斑干涉计量技术相结合，通过应用高精度光学测微技术和计算机图像处理技术，以光学干涉条纹的形式反映钻孔前后孔周应变全场分布信息，无需粘贴应变片，解决了传统小孔法钻孔位置偏差、电阻应变仪误差和应变片粘贴质量引起的测量误差，国际焊接学会 (IIW) 组织的几十个国际机构进行的各类应力测试方法评比结果证实，该技术应力测试精度可达 6%，为国际最高精度。

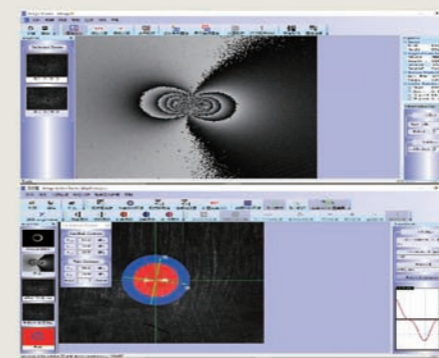
该技术设备在航空发动机部件、导弹弹翼样件、高了速列车承载结构、装甲车炮塔结构等军民品中获得了应用。



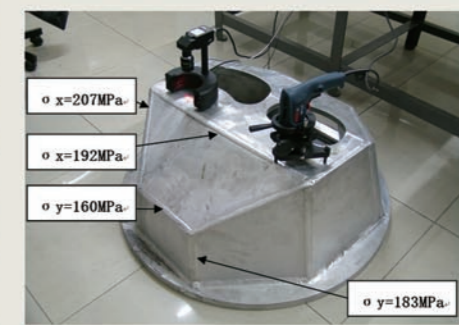
激光散斑-小孔法残余应力测试系统光学原理



激光散斑-小孔法应力测量系统



散斑干涉条纹图像分析处理软件系统



军品863项目装甲车高强铝合金炮塔结构的应力测试

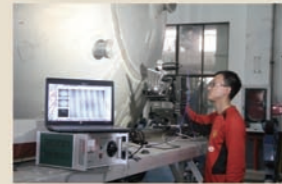
### 电子错位散斑法制造缺陷及焊接接头连接质量无损检测技术

主要完成人：刘雪松、潘海博、闫忠杰

本研究利用具有国际先进水平的光学测微理论及相应的技术方法，利用计算机图像分析处理技术，将不规则的散斑光信号转化成精确反映材料表面微小位移的干涉条纹图样，并运用光波相移等技术实现了材料表面变形和缺陷几何位置信息的——对应。

该研究成果可用于薄壁结构和厚壁结构近表面缺陷的无损检测，以及电阻点焊、激光焊等复杂结构焊接质量检测。

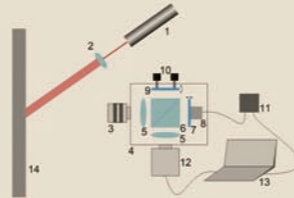
将该技术与缺陷服役可靠性评价技术相结合，实现了对多个型号运载火箭燃料贮箱缺陷检测及产品服役可靠性的科学预测。



航天产品焊缝缺陷检测及质量评价



XX军机翼板电阻点焊点质量检测



位错散斑干涉光路原理图



位错散斑干涉硬件装置

### 焊接应力、变形及热裂纹的随焊控制技术

主要完成人：方洪渊、刘雪松、董志波、王苹



随焊旋转挤压新技术



随焊冲击旋转挤压新技术



随焊机械冲击碾压新技术

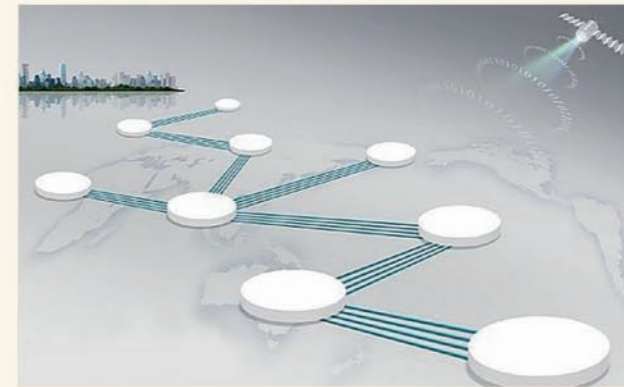


新技术在航天产品中应用

本研究基于焊接应力变形的动态演变和控制原理，提出了随焊冲击碾压、随焊旋转挤压及随焊冲击旋转挤压等多项新技术用于控制薄壁构件焊接应力变形、防止焊接热裂纹。

新技术特点：

- 1、焊缝部位的残余应力控制在  $0.1\sigma$  以内；
- 2、焊接纵向及横向收缩变形均控制在常规焊情况的 1/10 之内；
- 3、新技术有利于配合自动化焊接。



## 微纳连接与加工

### 超饱和固溶银铜纳米颗粒低温纳米连接机理及应用

主要完成人：王春青、刘晓剑

突破了 Ag-Cu 合金的固溶度极限，成功制备共晶比超饱和固溶体 Ag-Cu 纳米颗粒；揭示了超饱和固溶银铜纳米颗粒低温连接机理，提出“颗粒尺寸限制纳米冶金”的新概念。过饱和固溶体 Ag-Cu 纳米颗粒在低于共晶温度 (779°C) 低温烧结后 (350°C)，形成具有均匀共晶显微组织的 Ag-Cu 微米颗粒。

该研究对新型纳米材料的研究进步具有极大的学术推动作用。

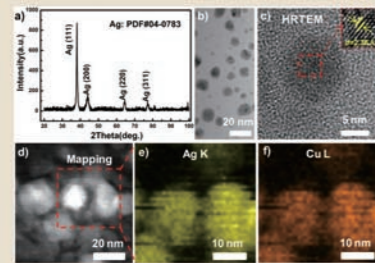


图1. a) Ag-Cu 纳米颗粒的XRD图谱；b) TEM形貌；c) 单个Ag-Cu纳米颗粒的高分辨图像；d) 高角环形暗场像模式下Ag和Cu元素面扫结果

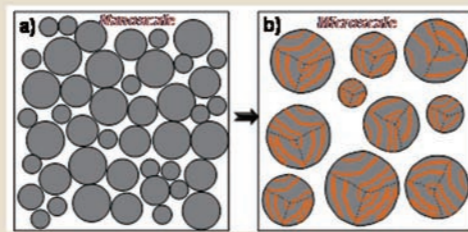


图2. 超饱和固溶银铜纳米颗粒低温纳米连接机理模型

制备了新型超固溶体 Ag-Cu 纳米焊膏，利用纳米效应，实现了低温连接、高温服役目标 (200~300°C 烧结连接，>500°C 高温服役)，Cu-Cu 连接接头剪切强度达到 110MPa，远高于传统的 SnPb、SnAgCu 及纳米银焊膏等焊料，且热电性能优良；具有很好的抗电化学迁移性能，其短路失效时间为纯 Ag 纳米焊膏的 5 倍；

该研究对于工业应用同样具有深远的创新意义。已成功应用于第三代宽禁带半导体 SiC 器件的封装材料，并将在 3D 打印、柔性器件制造、航天航空、军事武器系统器件纳米连接等领域具有广阔的应用研究前景。

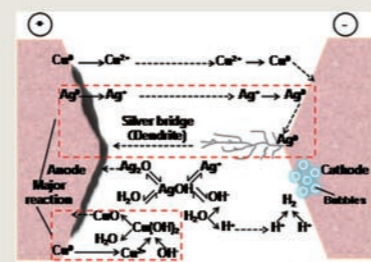


图1. Ag-Cu 纳米焊膏烧结电极ECM机理模型

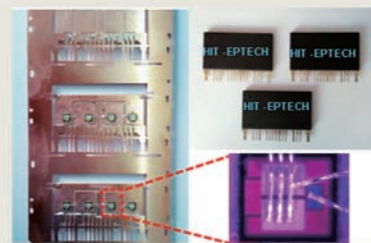


图2. 宽禁带半导体SiC器件的封装应用

### 低温烧结 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 制备纳米晶耐高温接头及烧结机理

论文发表于 Small (IF: 8.36), 主要完成人：王春青、钟颖

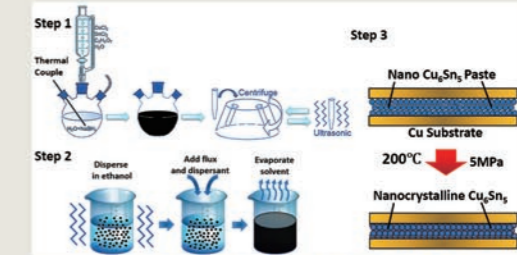
提出“低温连接、高温服役”新型互连材料及方法；

由于 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 块体熔点远低于较难烧结的高熔点 Ag、Cu 等金属，所需烧结温度及时间大大降低或缩短；

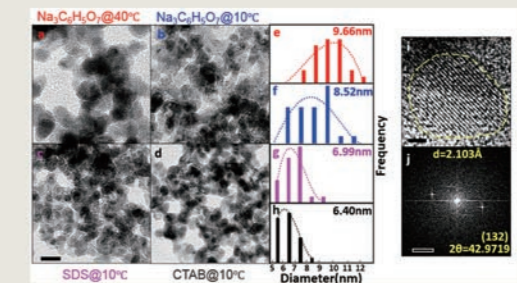
Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 与 Cu 基板 CTE 高度匹配，可最大程度消除热失配；

实现了 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 纳米颗粒的尺寸可控化，最小达 ~4 nm，可充分发挥纳米颗粒的尺寸效应；

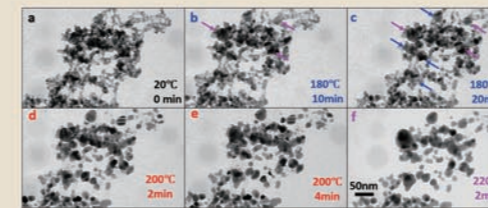
Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 纳米颗粒在 125 °C 左右即可开始烧结，比块体熔点低 290 °C；



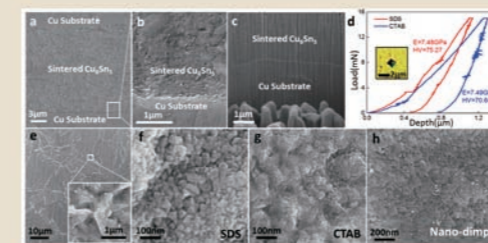
共沉淀还原法制备Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>纳米颗粒，并烧结



实现纳米颗粒尺寸可控，最小达~4 nm



Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 纳米颗粒在原位TEM加热过程中的融合过程



Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 纳米晶接头的微观结构

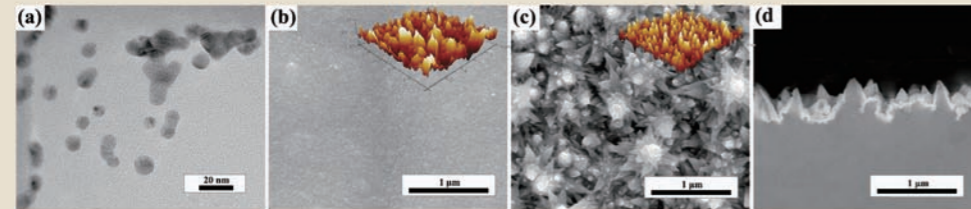
原位 TEM 实验发现：Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 纳米颗粒烧结起始温度远低于块体熔点，烧结中存在预熔化、Ostwald 熟化、位错移位、颗粒间融合、单颗粒消失等多种机制；

接头显微结构为纳米晶，可克服 IMC 固有脆硬性，且无明显各向异性；

Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 纳米焊膏可实现低温连接 (< 200°C)、高温服役 (> 250°C)，成本低，可防电迁移，导电、导热性能优良。制作出的 SiC 模块具备优良的高温工作性能。

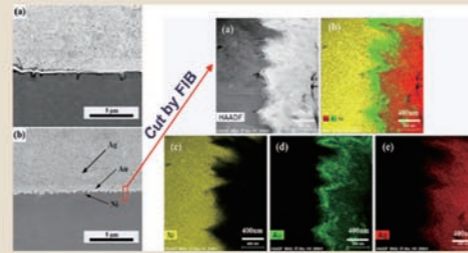
### 纳米化焊盘与纳米银焊的料兼容性烧结

ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(5): 4798-4807(IF=7.145), 主要完成人: 王春青、周炜

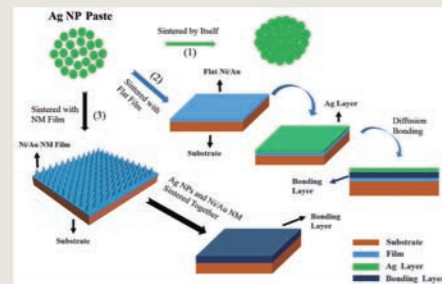


纳米银(a)、flat Ni (b)、Ni Nanomace(NM)(c)和Ni/Au NM(d)的显微形貌

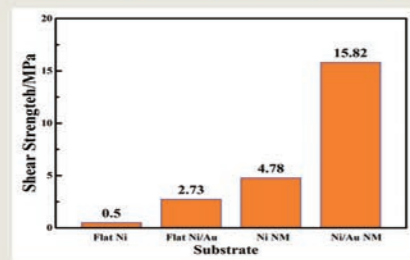
采用液相法合成纳米银焊料；  
 开发出无模板直接电沉积方法，在传统铜焊盘表面制备三维纳米狼牙棒阵列结构，具有形貌均匀、容易制备的优点；  
 首次提出并解决了传统焊盘结构与新型纳米连接材料在连接过程中微观尺度不兼容的矛盾。



不同形貌基板与纳米银焊料烧结界面及界面元素分布



纳米银自烧结(1)、纳米银与传统焊盘(2)、纳米银与纳米结构焊盘(3)烧结示意图



不同形貌基板与纳米银连接强度对比

通过实验和化学势的计算，证明了相较于传统焊盘，纳米阵列与纳米连接材料更加兼容，揭示了纳米阵列可以将纳米连接材料自烧结过程转变为纳米阵列与纳米连接材料的连接和纳米连接材料自烧结同时进行并相互竞争的过程。

成功实现了纳米阵列和纳米连接材料之间的快速、高可靠冶金互连，并将接头的剪切强度提高6倍。

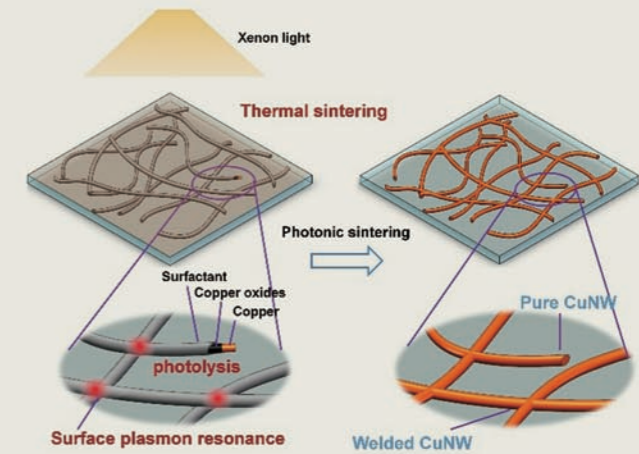
该研究成果为第三代半导体的功率/高温器件封装、三维立体封装制造提供了新型互连技术。

### 铜纳米线导电薄膜光烧结法制备机理及器件应用

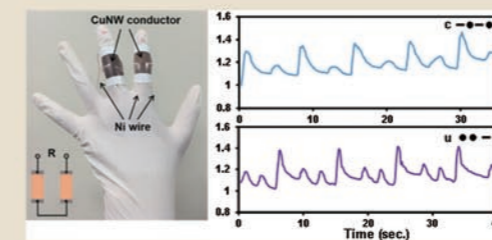
国家优秀青年基金项目，负责人：田艳红教授

首次使用一种快速的光烧结技术制备了铜纳米线透明导电薄膜，对光烧结机理进行了深入的分析。

揭示了铜纳米线导电薄膜的光烧结制备机制是光-热转换效应、表面等离子激元共振效应和光致去氧化效应的共同作用，获得了透光率85%、方阻为34.1 Ohm/sq的铜纳米线透明导电薄膜。



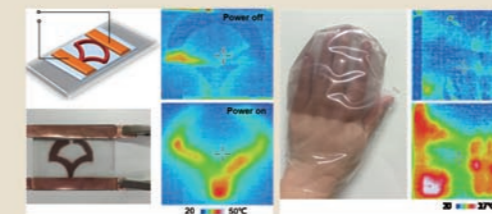
铜纳米线导电薄膜制备过程  
Schematic illustration of photonic sintering process of Cu NW conductive films



基于铜纳米线的应力传感器  
Cu NWs based stress sensor

首次使用一步光烧结法在PU基底上制备了埋入结构的铜纳米线可拉伸导电薄膜，并成功应用于可穿戴的应力传感器和加热器。

制备了可传递摩斯密码的应力传感器以及可穿戴的加热器，为铜纳米线可拉伸导电薄膜在柔性电子器件中的应用奠定了基础。



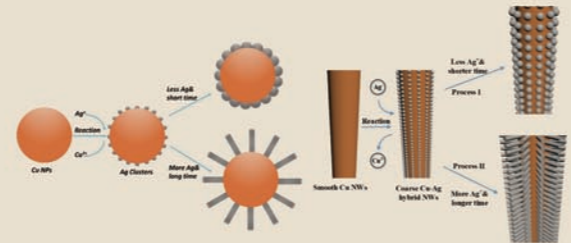
基于铜纳米线的加热板(左)与加热手套(右)  
Cu NWs based heater (left) and heatable gloves

### 低温烧结铜银复合纳米焊膏的制备及高温使用

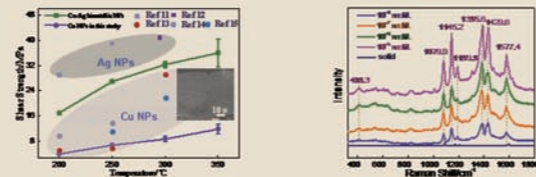
国家优秀青年基金项目，负责人：田艳红教授

针对目前应用于高频、大功率 SiC 芯片与基板的高温互连材料纳米银 / 铜焊膏存在的问题，制备了一种兼顾铜和银纳米材料的优点（电学、热学性质），同时克服两者缺点（电迁移、氧化）的铜银复合纳米材料。

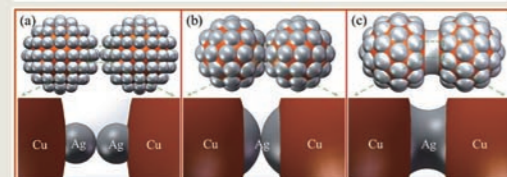
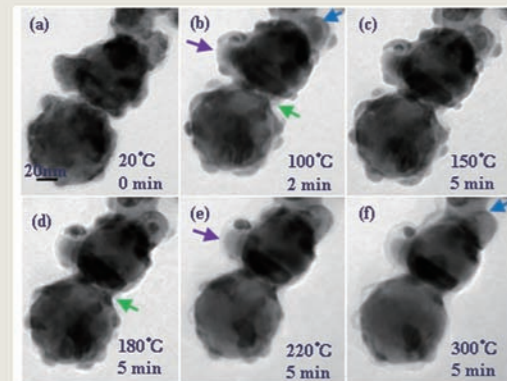
研究了低温烧结铜纳米颗粒焊膏和铜银复合纳米颗粒焊膏烧结的差异性，在 250°C 烧结铜银复合纳米焊膏可得到强度为 26.9MPa 的致密焊点。



铜银复合纳米结构的生长示意图 (a) 纳米颗粒 (b) 纳米线  
Growth schematic of the copper-silver composite nanostructures (a) nanoparticles (b) nanowires



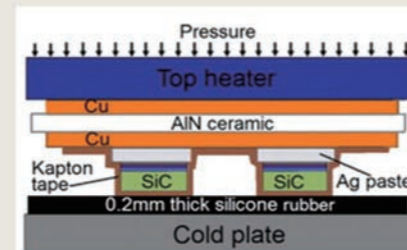
纳米Cu和Cu@Ag核壳纳米颗粒焊膏键合铜基板对比  
Comparison of the shear strength values between Cu/ Cu-Ag core-shell NP paste/Cu sandwich structure and CuNP paste  
基于SERS现象检测4-ATP分子  
Detecting 4-ATP molecules based on SERS phenomenon



铜银复合纳米颗粒原位加热的TEM像和连接过程示意图  
Joining process of two adjacent Cu-Ag core-shell NPs during in situ TEM heating

研究了铜银复合纳米颗粒烧结过程中颗粒的烧结机制：铜银复合纳米颗粒烧结后银元素主要分布于烧结颈和铜纳米颗粒表面，前者促进铜银复合纳米颗粒之间的烧结，后者为原理烧结颈处银纳米颗粒在铜纳米颗粒表面熔化再结晶铺展所致。

发表 SCI 论文 3 篇，专利 1 项。



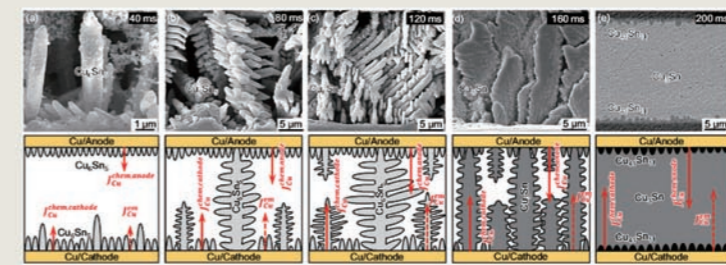
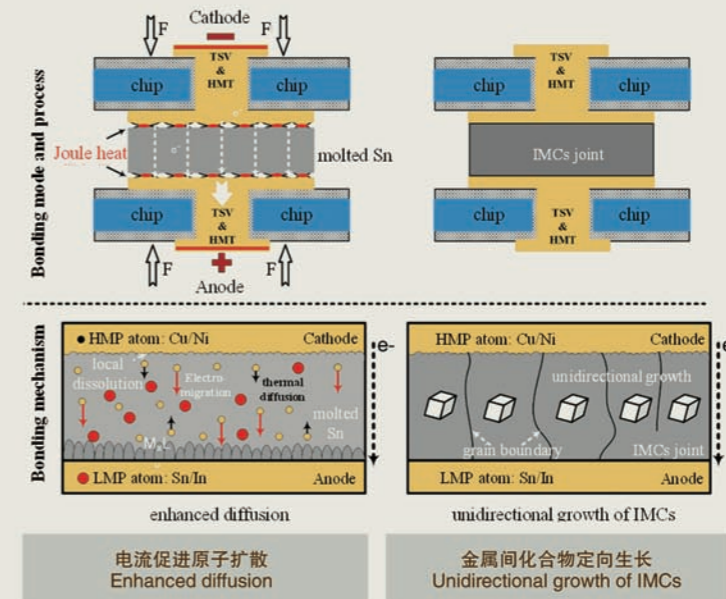
### Cu-Sn 全金属间化合物微焊点电流瞬态键合技术

国家自然科学基金项目，负责人：田艳红教授

基于电流焦耳热和电迁移效应促进金属原子溶解及扩散原理，提出了一种全 Cu-Sn 金属间化合物焊点的瞬态键合新方法，实现了金属间化合物的电流辅助定向生长。

可在较小的键合压力下局部焦耳加热，200ms 内实现 [100] 定向生长全 Cu<sub>3</sub>Sn 微焊点键合。

焊点中形成了金属间化合物的互锁结构，在受到横向的剪切力作用时，树枝状的 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 与 Sn 钎料相互之间形成强烈的互锁效应，进而能够有效的抑制裂纹的扩散，提高焊点的剪切强度。



金属间化合物互锁结构  
Cu-Sn intermetallic interconnects with interlocking dendrites

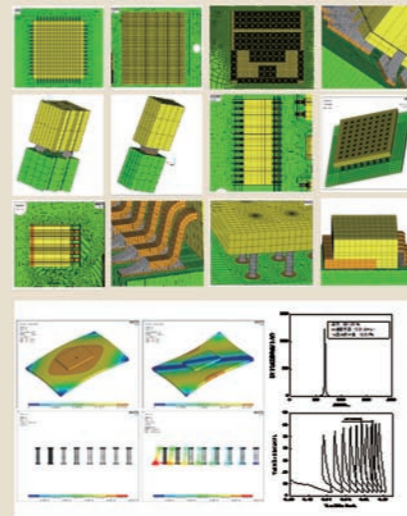


## 有限元模拟技术在电子封装领域的应用

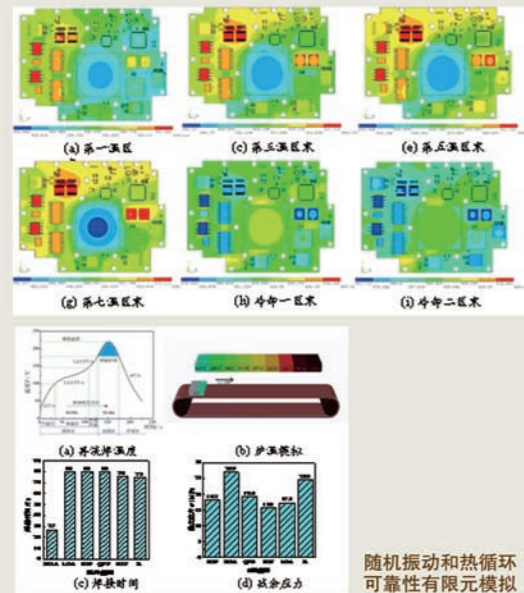
项目负责人：田艳红

封装技术向高密度、轻薄化发展的同时对封装可靠性的要求也越来越高。有限元模拟的方法为封装可靠性研究提供了一种新思路，其具有高效、便捷、直观的特点。

建立了 BGA、LGA、PGA、SOP、QFN、SOT 等多种封装类型的有限元模型，并进行了器件级的热循环可靠性和随机振动可靠性有限模拟，分析了其可能的失效位置，预测了可靠性寿命，有限元模拟结果与试验结果符合良好。



随机振动和热循环可靠性有限元模拟



随机振动和热循环可靠性有限元模拟

建立了包含 11 种封装类型 104 个器件的 PCB 板有限元模型，并对其进行了再流焊工艺模拟，分析再流焊过程中 PCB 板的受热情况和应力分析。

根据模拟得到的焊接时间和残余应力的大小，设计了正交试验，并一一测试，对工艺曲线进行优化。

有限元模拟结果为实际生产提供了指导意义，并节省了大量的时间和资源。

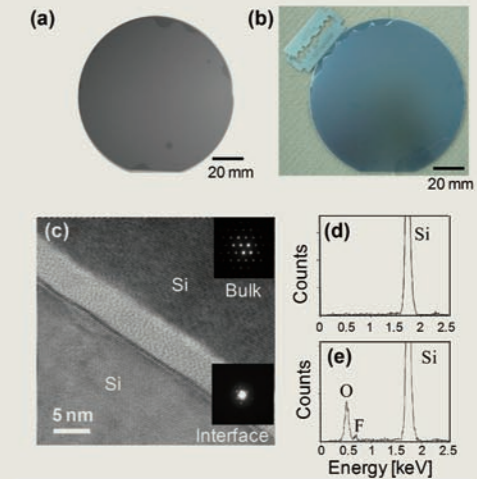
## 半导体晶圆室温键合

2011 年国际电子封装会议杰出论文奖，2017 年 1 月 JSS 期刊封面图片，主要完成人：王晨曦

采用含氟等离子体对硅晶圆进行表面活化，将活化后的晶圆在大气环境中室温 (~25°C) 下键合无需加热获得了与硅母材断裂强度相匹敌的键合强度；

阐明了界面水分子在键合过程中的重要作用，揭示了室温条件下键合界面共价键的形成机理；

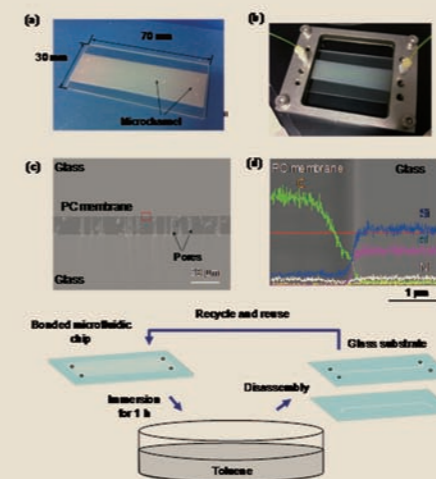
该方法是一种无需中间层的直接键合技术，亦适用于硅基晶圆（如石英、氮化硅）等异种材料的键合，具有简单易行、绿色环保、低成本等优点。



4英寸硅/硅晶圆的室温键合及界面分析  
Room-temperature direct bonding of Si/Si wafers

## 低温键合技术在三维微流控芯片制作中的应用

论文发表于 J. Electrochemical Soc. (IF=3.0)，主要完成人：王晨曦



基于玻璃/多孔聚碳酸酯/玻璃的三维微流控芯片的开发与回收  
Glass/porous PC/Glass 3D microfluidic chip and recycle

采用表面活化的方法在大气环境中低温 (~110°C) 条件下实现了石英玻璃与多孔聚碳酸酯膜的键合，获得了牢固可靠的无机/有机键合界面；

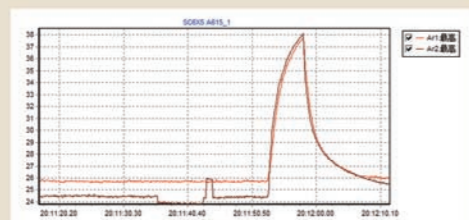
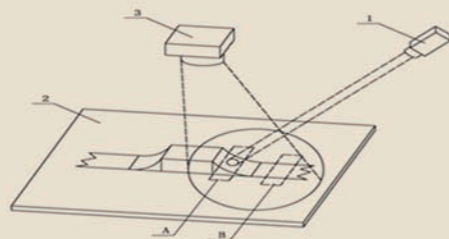
该方法用于构建过滤型三维微流控芯片，满足长时间的使用要求，应用于人造肾脏等生物医疗器件的开发；

该键合方法是一种简单易行、绿色环保、低成本的技术，通过对键合界面的分离可实现低成本石英玻璃材料的循环利用。

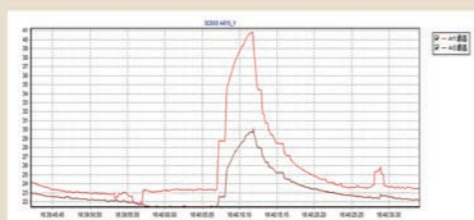
## HY-1000 电路板焊点虚焊红外检测仪

主要完成人：孔令超

本发明是以一红外激光器定时定量照射焊点钎料处，使其快速升温，同时利用红外热像仪将焊点和靠近焊点的引线处以及器件引线处温度曲线同时测量，并将曲线叠加，根据其相吻合程度来判断焊点连接质量。



良好焊点升温曲线

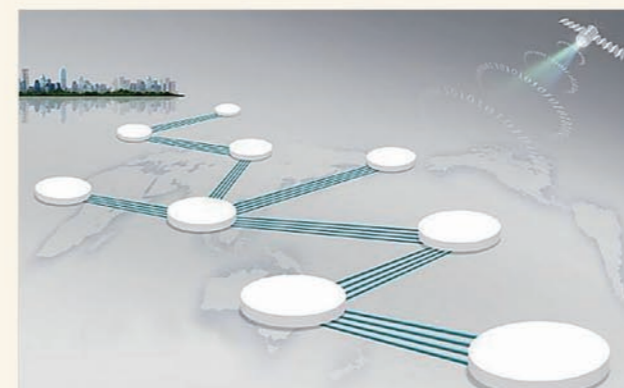
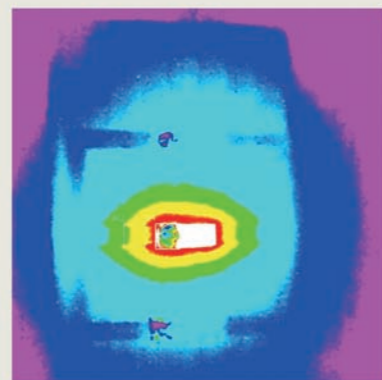


有缺陷虚焊焊点升温曲线



本技术获得两项国家发明专利，初步实现了产品化（半自动）。

研究成果在航天、火箭军等行业项目中获得应用，检测结果优秀。



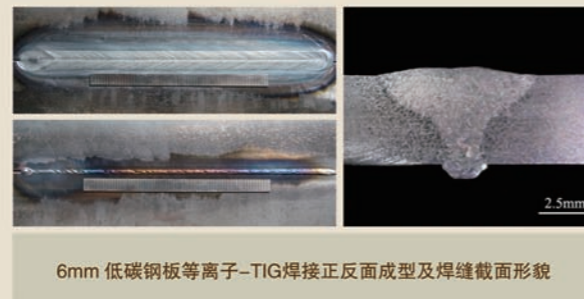
哈尔滨工业大学（威海）

### 等离子 -TIG 复合技术

主要完成人：张洪涛

基本原理：将等离子焊接时热输入量大、熔敷速度快、熔透能力强的优点与 TIG 焊接电弧稳定、飞溅小，盖面能力强的优点相结合，兼顾两者的优势，克服各自的不足之处，从而获得优良的焊接效果。

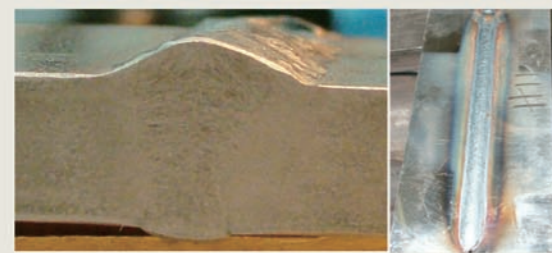
等离子 -TIG 复合焊接技术在 3-6mm 的碳钢 / 不锈钢的焊接中表现出了独有的优势，既控制了焊接热输入同时提高了焊接效率和焊缝质量。



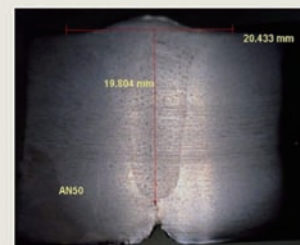
6mm 低碳钢板等离子-TIG焊接正反面成型及焊缝截面形貌

### 等离子 -MIG 复合技术

主要完成人：张洪涛



10mm 低碳钢板 2mm 间隙无坡口对焊一次完成  
焊接速度: 0.9 m/min



25mm厚不锈钢板 SAE 321对焊试验  
Plasma340A, MIG 534A., 焊丝1.6mm  
焊接速度: 0.39 m/min

等离子 -MIG 复合技术适用于各种厚度的碳钢、不锈钢等材料的焊接，熔深大，焊接过程稳定，操作比较简便

在中厚板材料的焊接方面表现出巨大优势，在焊接效率上高于常规 MIG 和埋弧焊 SAW2~3 倍以上，焊缝质量优良。

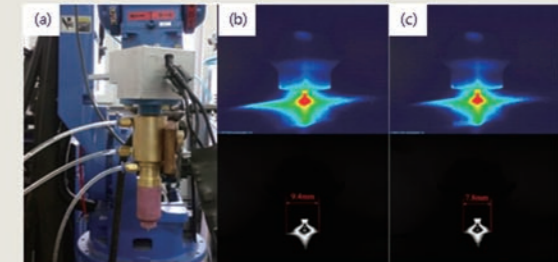
### 钨极高速自转 TIG 焊接技术

主要完成人：张洪涛

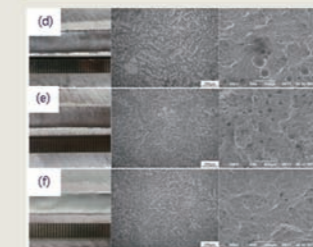
钨极高速自转 TIG 焊接技术是通过一个高速旋转的无刷电机带动钨极高速自转，可实现 0~30000r/min 无极调速。

钨极的高速旋转使得电弧高速旋转，电弧在旋转的过程中可以起到搅拌熔池、细化晶粒的作用。同时，焊缝中气孔的数量明显减少，特别是大中型气孔。

该种焊接技术特别适合与铝合金的优质焊接能够减少焊缝气孔，提高焊接质量。



钨极高速自转TIG焊炬  
(a)旋转电弧焊炬 (b)0转 (c)10000转



不同转速焊缝成形、  
微观组织和端口扫描对比  
(d)0转  
(e)5000转  
(f)10000转

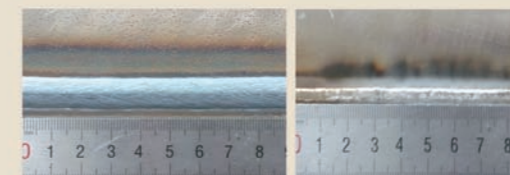
### 等离子弧与 MIG 电弧距离可调式智能复合焊炬

主要完成人：张洪涛

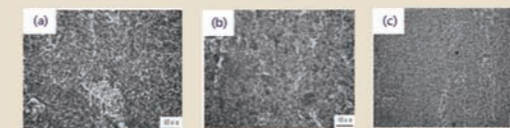


焊炬实物图

焊炬原理图



8mmQ345钢板单面焊双面成型



不同运动频率焊缝组织对比 (a)0Hz (b)100Hz (c)200Hz

该技术是把等离子焊枪和 MIG 焊枪进行复合，MIG 焊枪固定在一个小型的可往复运动的运动系统中，可以与 MIG 电弧的脉冲频率实现协同动作。

脉冲电弧的往复运动对熔池有搅拌作用，可以改善熔池冶金性能、细化晶粒组织实现稳定、高效、高质量的焊接。

## 水下焊接技术

主要完成人：郭宁、刘多、冯吉才

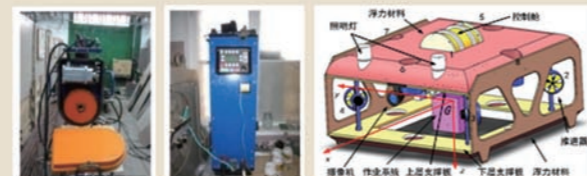
开发海洋工程水下湿法焊接专用焊接切割材料，30 米水深 360MPa-420MPa 级专用焊条，200 米水深 390MPa 级药芯焊丝、60 米水深电氧割条及割丝；

开发 200 米水下焊接设备，包括：专用焊接电源、送丝机构、水下焊接机器人、控制系统等。

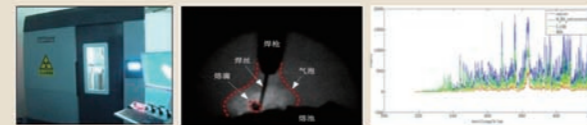
开发水下焊接过程控制技术，包括 X 射线高速成像技术与装备、水下焊缝跟踪技术、水下信号采集技术等。



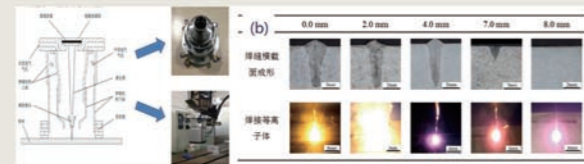
水下焊接切割材料



水下焊接切割设备



水下焊接过程监控技术



水下激光焊接技术



水下焊接技术应用

开展了水下激光焊接技术与理论的研究工作，设计开发了水下激光焊接专用焊炬，揭示了水深对直接水下激光焊接质量的影响；开展了不锈钢、钛合金以及镍基合金的焊接工艺研究。

水下焊接技术在港珠澳大桥岛隧工程 22m 直径钢桩切除工程、胜利油田海上平台牺牲阳极焊接、烟台打捞局沉船打捞方案设计等工程得到应用，受到用户一致好评。

## 新一代核电大型结构自动化焊接的应用

主要完成人：孙清洁、刘一搏、冯吉才

发明了多种结构形式的自动化焊枪、以适应大型结构的原创性工艺方法。

实现了核电钢制安全壳建造过程自动化焊接，突破 CV 安全壳压力容器手工焊的局限，焊材节省 40%，人工节省 50%，施工质量明显改善。

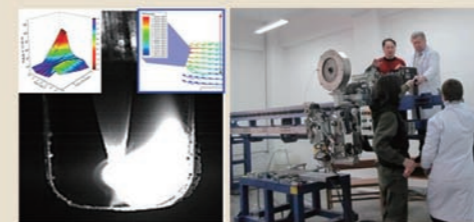
系统地开展厚板高效焊接应用研究。研究成果在中核二三、中核二四、中核华兴、中广核、海阳核电设备厂等，累计设成 3 个批次，近 15 套自动化装备。



AP1000/CAP1400核电CV安全壳自动化焊接

## 大厚板钛合金磁控电弧窄间隙焊接的应用

主要完成人：孙清洁、冯吉才、刘一搏



厚板磁控电弧窄间隙焊接设备



4500米深潜器耐压壳体窄间隙焊接

在引进自动化焊接设备的基础上，完成了设备的国产化工作。厚板钛合金最大焊接厚度 110mm 坡口宽度不大于 12mm。

揭示了磁场与 TIG 电弧的作用机理，阐明侧壁熔合的决定因素，获得了优良的焊缝成形。

研究成果实现了 4500 米深水潜器耐压球壳的焊接：厚度 60mm；强度母材 90%；延伸率 11.8%。

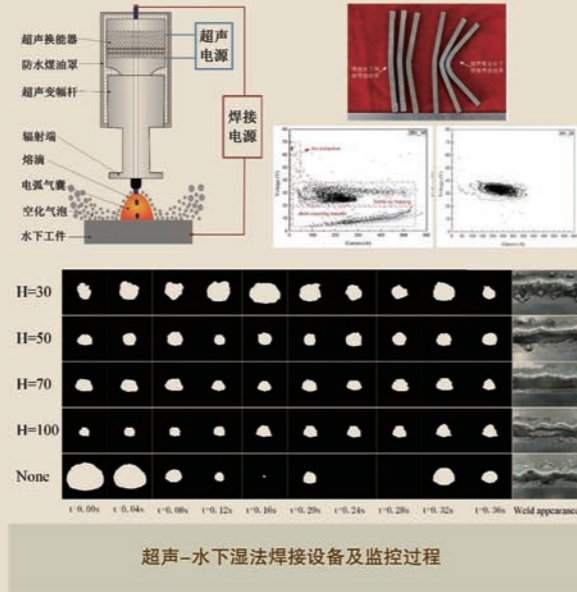
### 超声辅助水下湿法焊接方法及理论的应用

主要完成人：孙清洁、刘一搏、冯吉才

发明了超声与焊接电弧复合的多种焊接方法。水下湿法焊接中，接头平均抗拉强度提高24%。

实现了在役核电站的水下洁净作业，设计了专用水下机器人，引导焊枪实现焊缝的跟踪和 underwater 焊接修复。

构建了水下超声作用模型，获得不同辐射端高度的声场分布，并从水下电弧气囊受力状态出发，实现了气囊反悬浮。



### 真空超声辅助连接装备及技术

主要完成人：宋晓国、曹健、冯吉才等



真空超声辅助连接装备

开发了国内首台真空超声辅助连接装备，在真空条件下采用超声辅助实现了核反应堆发射极的高效可靠焊接。

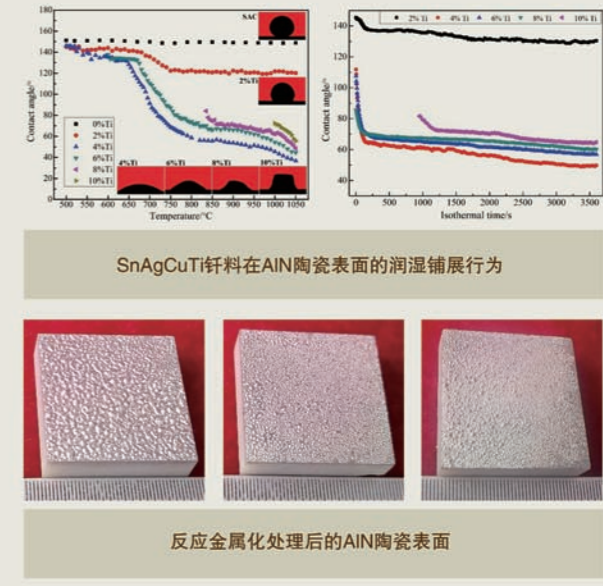
实现了铝 / 铜、铝 / 钢、铝 / 钛、TZM / 氧化铝等异形管状构件的钎焊连接；揭示了真空超声辅助连接机理。

### 陶瓷表面反应金属化及其连接技术

主要完成人：宋晓国、曹健等

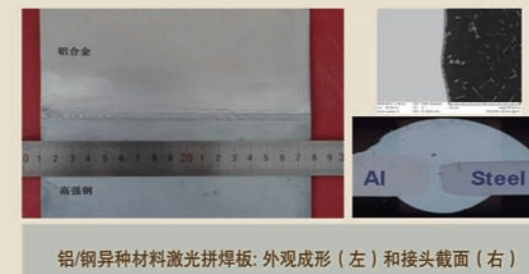
开发了含 Ti、Zr、Cr 等活性元素的 Sn 基钎料，实现了陶瓷表面的反应金属化及其与铜、钛、铝等金属材料的低温连接。

阐明了活性元素与石墨及陶瓷材料的反应行为，揭示了表面反应金属化及其与金属材料钎焊机理。

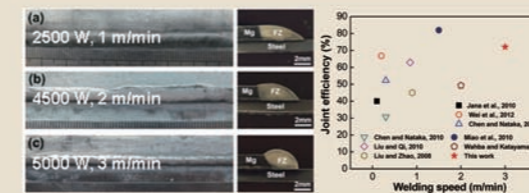


### 汽车轻量化结构件的异种材料激光焊接技术

主要完成人：檀财旺，陈波、冯吉才



铝/钢异种材料激光拼焊板: 外观成形 (左) 和接头截面 (右)



镁/钢高效焊接接头形貌 (左) 及焊接效率比较 (右)

提出了非互溶金属间过渡反应层再生理论，开发了激光作用下的界面合金元素调控技术，揭示了合金元素参与下铝 / 钢、镁 / 钢、镁 / 钛异种金属界面反应行为与调控机理，实现了异种材料接头的可靠连接；

攻克铝 / 钢薄板激光拼焊过程中易形成脆性金属间化合物、接头强度低、焊接不稳定等技术难关；

研制出不开坡口的铝 / 钢、镁 / 钢、镁 / 钛激光焊接接头，接头性能达到铝母材和镁母材的 80% 以上。

### 激光增材制造装备及工艺研究

主要完成人：陈波，檀财旺

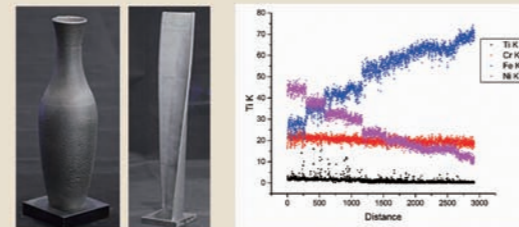
研制开发了真空激光增材制造系统，氧水含量 $\leq 50\text{ppm}$ ，可实现大气环境及惰性气体保护环境下不同金属材料的增材制造；

实现了不锈钢、镍基合金、铝合金、马氏体钢、工具钢等单一材料的激光增材制造，通过工艺参数优化、热处理等手段达到同种材料锻件强度水平；

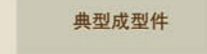
采用多路同步送粉的方式实现了不锈钢、镍基合金、铝合金等梯度功能材料的激光增材制造，梯度材料成分过渡均匀。



激光增材制造装备及过程



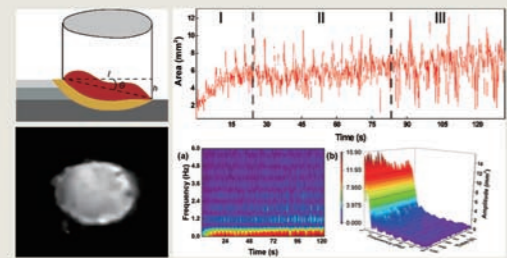
316L/Inconel718梯度材料成分分布



典型成型件

### 激光增材制造质量在线监测与控制

主要完成人：陈波，檀财旺



图像传感激光增材制造质量控制



光谱传感激光增材制造质量监测

开发了基于视觉传感的激光增材制造质量自动判别系统，通过基于时域及频域的图像处理算法，实现了激光增材制造外观成形质量的在线监控；

开发了基于光谱诊断的增材制造质量在线监控系统，实现基于等离子体温度及电子密度在线计算的增材制造过程缺陷自动诊断；

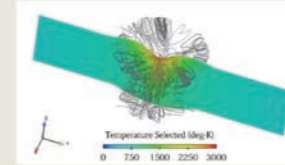
利用光谱实现了激光增材制造过程不同元素成分的在线诊断，实现梯度功能材料制造过程状态的在线判别。

### 空间焊接关键设备研发与地面模拟技术

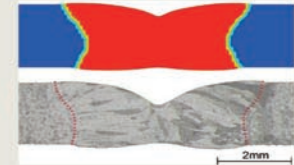
主要完成人：王廷、张秉刚、冯吉才

模拟太空微重力条件下空间电子束焊接、切割、增材制造中的流场及成形过程仿真计算，解决地面微重力试验难度大、成本高、周期长的难题。

建立了空间焊接地面模拟试验平台，可进行模拟太空真空、冷热循环条件下的空间电子束焊接及熔丝增材制造试验，研发了微重力落管试验系统，用于研究模拟微重力环境下的熔池凝固及组织演化过程。



熔池温度场与流线



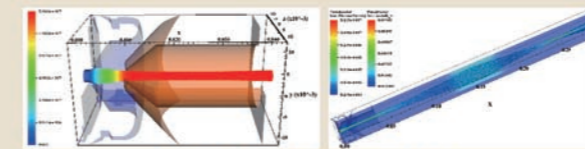
微重力下焊缝成形仿真



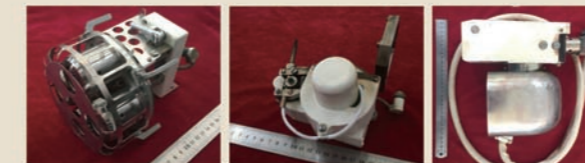
空间焊接地面模拟试验装置



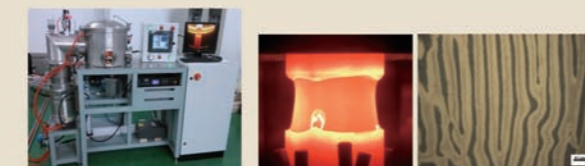
微重力试验系统 (高度35m, 真空度10-3Pa)



空间电子束发射电子光学仿真设计



小型化多功能空间电子束工具



无坩埚电子束区域熔炼装置

定向生长试验

针对空间环境、空间能量及体积约束，突破空间电子束发射与集成控制技术，开发了低能耗、小型轻量化、多功能空间电子束发射装置，实现在轨组装与维修。

针对空间在轨优势制造需求，开发了低能耗、轻量化空间电子束无坩埚区域熔炼系统，进行特种合金、单晶、半导体材料的在轨熔炼与提纯。该系统也可用于地面的单晶制备及定向生长等无容器凝固科学试验。

## 搅拌摩擦焊技术与装备

主要完成人：周利、王瑞

自主开发了龙门搅拌摩擦焊等设备，与专用集成式焊具系统配合，可进行不同材料及结构常规搅拌摩擦焊及双轴肩搅拌摩擦焊、搅拌针/轴肩独立可控搅拌摩擦焊、热源辅助搅拌摩擦焊等新工艺研发。

设计了适用于铝、镁、铜等低熔点材料和钢、钛、高温合金等高熔点材料的搅拌摩擦焊具系统，成功将该技术用于相关领域轻质高强材料重要结构的连接。



龙门搅拌摩擦焊设备



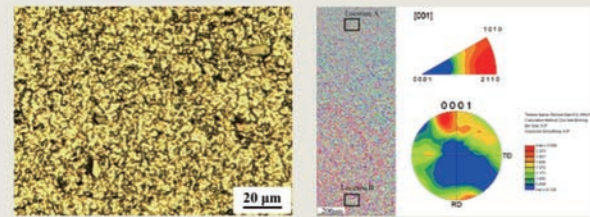
冷却气保集成式焊具系统



低熔点材料用搅拌头



高熔点材料用搅拌头



阻燃镁合金焊核区组织及过渡区晶粒取向



搅拌摩擦焊技术在重要产品关键结构中应用

针对典型材料与结构搅拌摩擦焊技术开展系统应用基础研究，揭示了材料的搅拌摩擦焊行为及连接机理，为工程化应用奠定理论基础。

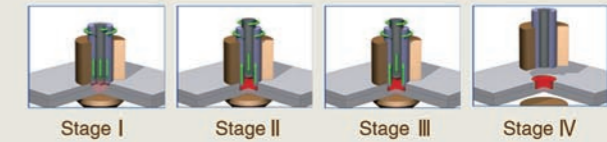
面向航空、航天、轨道车辆、核电等行业需求开展搅拌摩擦焊工程化应用研究，提高重要产品关键结构的连接质量和可靠性。

## 回填式摩擦点焊技术与装备

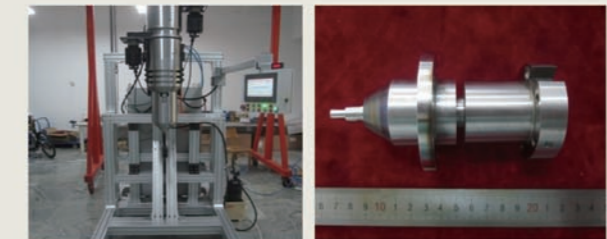
主要完成人：周利、王瑞、冯吉才

回填式摩擦点焊技术是搅拌摩擦焊技术的新的的发展，与常规搅拌摩擦点焊相比可获得接头美观、性能优良的无匙孔点焊接头，可用于搭接结构的优质高效连接。

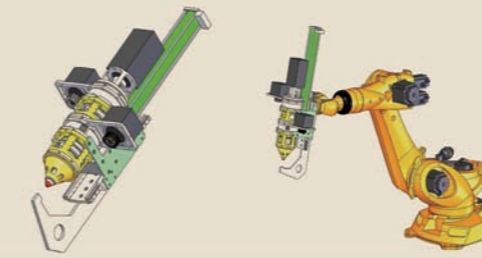
自主开发了台式回填式摩擦点焊设备及相应的焊具系统，针对同种及异种材料轻量化结构开展回填式摩擦点焊应用基础研究，为工程化应用奠定基础。



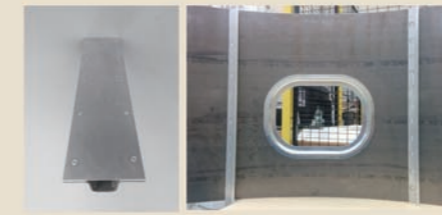
回填式摩擦点焊技术基本过程原理



回填式摩擦点焊设备与焊具系统



机器人回填式摩擦点焊装备及小型化主轴



汽车车身中立柱及机身蒙皮桁条结构应用

针对实际结构应用对回填式摩擦点焊设备小型化、适应性、高效率等需求，完成了回填式摩擦点焊主轴小型化及机器人回填式摩擦点焊系统的方案开发，具有较好的应用前景。

针对航空、航天、汽车等行业铝合金以及铝/钢、铝/钛等轻量化结构开展回填式摩擦点焊试制，取得了较好的效果，有望取代电阻焊及铆接技术。

## 柔性电弧增材制造装备及工艺研究

主要完成人：刘一搏、孙清洁、冯吉才

研制出基于串联机器人和并联臂机构的电弧增材制造设备及轨迹规划程序。

通过建立熔融金属空间位置关系数学模型，提高了电弧增材成形精度；利用热处理、超声辅助的方式优化了增材制件的力学性能。

提出基于过渡金属层间调控的多能场辅助铝/钢、铜/钢异种金属构件一体化制造方法，实现大型部件的低成本、快速制造。

