

403 信息功能材料

59. 压电材料军民融合项目

负责人:徐卓

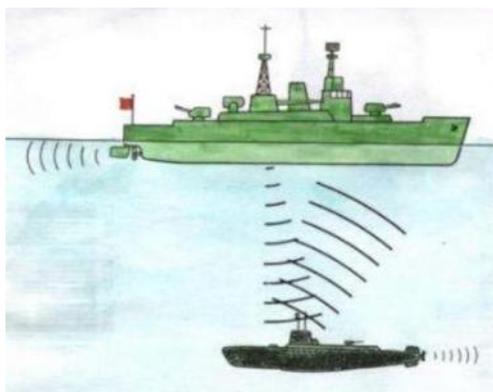
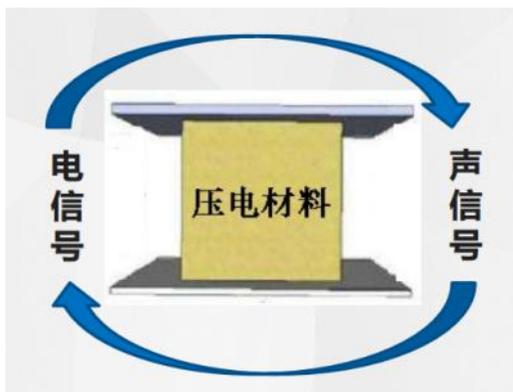
所在学院: 电信学院

技术领域: 电子信息技术

一、产品与市场

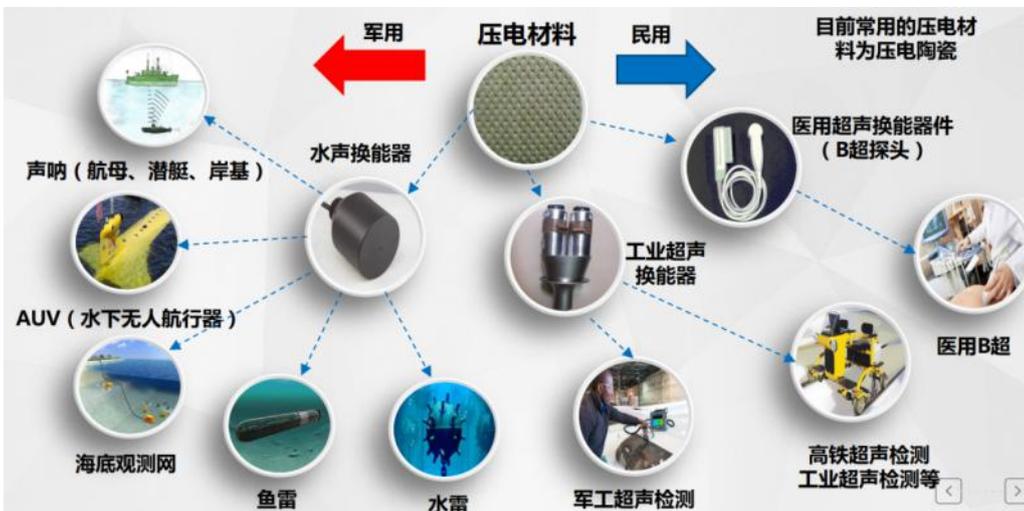
1. 压电材料: 实现电信号与声信号相互转换的材料;

压电器件: 利用压电材料制成的器件(换能器), 实现对目标的感知、探测和侦查。



2. 压电材料的应用: 军用水声、工业超声和医用超声。

- 军用水声-水声换能器
- 工业超声-超声检测



● 医用超声-超声探头

3. 压电材料的市场需求

(1) 军用水声领域：市场巨大、需求急迫、意义重大；应用于声呐、鱼雷、水雷、海底观测等，关乎军工国防和装备能力提升。

(2) 工业超声领域

■ 车身探伤、自动化车轨探伤：依赖进口。

■ 航天航空、核电等核心军工领域探测设备无法进口。

两点结论：采用压电单晶将大幅提高性能（探测精度等）；该领域市场规模大于医用超声。



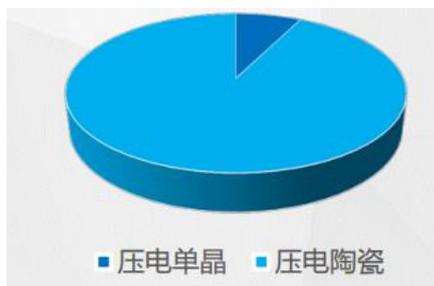
德国 TUV（莱茵）双轨超声探伤设备车



美国 sperry 自力推进式超声波探伤车

(3) 医用超声领域

市场规模估算：截至 2016 年末，国内共有三甲医院 1300 左右，按照每家三甲医院 50 台 B 超机，每台 B 超机配 4 支探头，国内三甲医院探头需求总量为 26 万支。国内单晶探头、单晶材料的需求市场规模分别为 470 亿、26 亿（三年）。中国占全球超声市场规模的 1/5，则全球医用超声单晶探头市场规模为 2280 亿元。医用超声单晶材料市场规模为 43 亿/年(26 亿*5/3，探头为消耗品)，2016 年仅为 1.6 亿人民币。



目前单晶在探头材料市场占比仅为 4%。

二、项目介绍

1. 研究内容

该项目以研发生产高门槛、高收益的新型压电单晶为核心业务，面向军用水



声、工业超声市场，定制并销售单晶材料和超声探头。

2. 技术优势及研究成果

课题组先后研究了直径1~5英寸的单晶生长，生长出压电性能优异的 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT) 和 $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PIN-PMN-PT) 单晶材料，目前已实现了3英寸、4英寸单晶的小批量生产，实现了5英寸单晶的实验室生产。单晶生长技术达到国际先进水平。

(1) 1英寸和1.5英寸压电单晶



(2) 2英寸和3英寸压电单晶



(3) 4 英寸和 5 英寸压电单晶



(4) 单晶切片



3. 核心团队

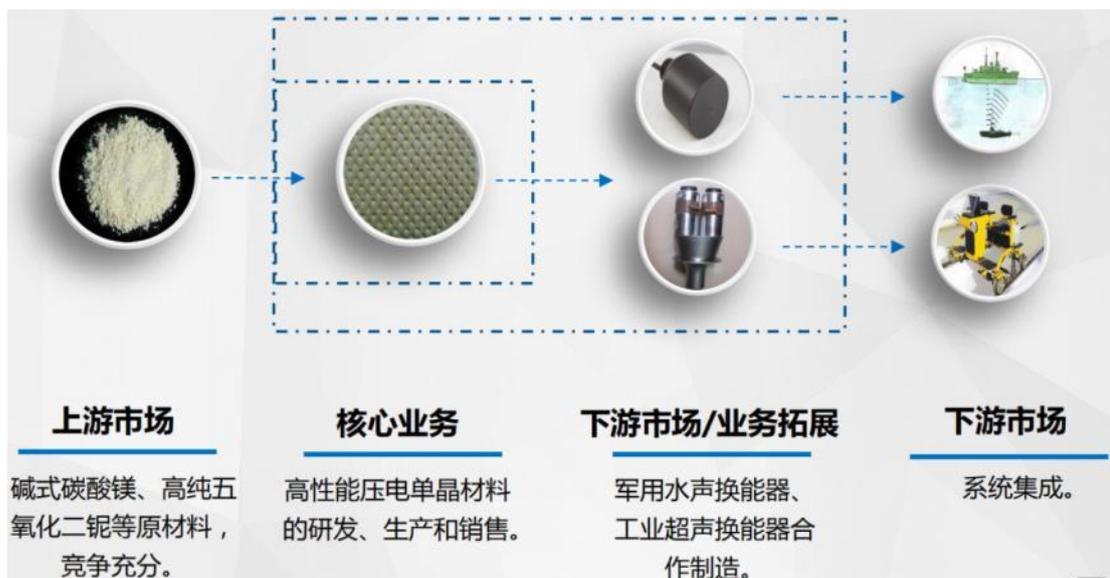
(1) 领军任务---徐卓教授

(2) 专业的运营、技术团队

栾鹏博士：负责项目管理、资源对接；

王三红博士：负责质量体系管理、器件研发；

李飞副教授：负责压电单晶材料生产制造。



4. 业务模式：高技术含量的核心业务+广阔的业务拓展空间

5. 项目优势

(1) 成本优势：20 年研究成果与产业化经验的结合；与其它平台资源协同合作，降低初期投入。

(2) 技术优势：技术门槛高；有望成为细分市场国际寡头。

(3) 市场优势：即将迎来市场需求爆发期；作为换代产品，具有不可替代性。

(4) 政策优势：核心团队关于压电单晶材料发展报告多次获得中央、省、市级领导圈阅及批示；拟落地地方，符合各项政策条件。

三、技术成熟度

概念验证 原理样机 工程样机 中试 产业化

目前已实现了 3 英寸、4 英寸单晶的小批量生产，实现了 5 英寸单晶的实验室生产。

四、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权（许可） 面议

60. P(VDF-TrFE)压电膜及树脂化学合成技术

负责人：张志成

所在学院：化学学院

一、项目简介

聚偏氟乙烯（PVDF）基氟聚合物具有优良的耐候、耐腐蚀、耐酸碱性能，以及优异的介电、铁电、压电、热释电性能，在电子信息、电气系统、新能源等领域被广泛应用。近年来研究表明，此类聚合物具有很高的电能存储能力，在高储能电介质中具有非常诱人的应用前景。同时，其良好的耐腐蚀、耐酸碱及耐候性也为其在新能源（如锂离子电池、燃料电池、太阳能光伏电池等）领域的应用赋予光明前景。然而现有的PVDF压电膜制备工艺苛刻，拉膜工艺难以掌控，产品质量稳定性不好，影响长期工作稳定性。

VDF与三氟乙烯（TrFE）的共聚物P(VDF-TrFE)无需拉伸即可获得很好的铁电压电性能，但是，由于TrFE短缺、稳定性差等原因，使得P(VDF-TrFE)难以工业化，成本极高，苏威量产价格依然要5万元/kg。

二、产品性能优势

（1）合成树脂

本项目采取商业的氟橡胶P(VDF-CTFE)（CTFE为三氟氯乙烯）为原料，通过还原反应，合成出P(VDF-TrFE)，工艺简单、条件温和、原料丰富且廉价，制备的P(VDF-TrFE)树脂性能与直接共聚的树脂一致（ d_{33} 达到 -23pC/N ）。



图1 P(VDF-TrFE)树脂

(2) 集成压电膜

➤ 产品性能指标

指标	P(VDF-TrFE)压电膜	指标	P(VDF-TrFE)压电膜
有效电极面积	$\geq 25 \times 25 \text{ mm}^2$	声阻抗	$2.5 \sim 3.0 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$
膜厚	$25 \pm 2 \text{ } \mu\text{m}$	声速	$2000 \sim 2500 \text{ m/s}$
密度	$1.8 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$	机电耦合系数	$K_{33} \sim 0.16$
平整度	$\leq 5\%$	体积电阻率	$10^{13} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$
有效压电常数	$d_{33} \leq -25 \text{ pC/N}$; $d_{31} > 25 \text{ pC/N}$	表面电阻	任意两点之间 $< 5 \text{ } \Omega$
相对介电常数	$10 \sim 15$	泊松比	0.35
压电电压常数	$250 \times 10^{-3} \text{ Vm} / \text{N}$	弹性模量	$\sim 2000 \text{ MPa}$
使用温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$-20 \sim 90$	断裂拉伸强度	$\sim 50 \text{ MPa}$
拉伸强度	$\geq 5.7 \text{ MPa}$	电极剥离强度	$\geq 10 \text{ kg/cm}^2$

➤ 各种压电材料的优缺点

压电材料	优点	缺点
压电陶瓷	种类多样、压电系数高、价格低廉、耐高温、应用广泛。	无法大面积和薄膜化制备、易碎、应力响应精度低、与水声阻抗匹配性不好。
石英 (或者其它无机盐)	应力响应精度高、频率特性好。	压电系数低、耐温度湿度性能差、制备难度高。
压电聚合物	易大面积制备、压电系数较高、模量小、应力响应精度高、柔韧性好、易图案化和极化、与水声阻抗匹配性好。	耐高温性能差、压电系数低于陶瓷、未工业化生产应用。

➤ 各压电材料参数比较

材料	密度 /kg·m ⁻³	介电常数 (ϵ_r)	压电常数 d ₃₃ /pC·N ⁻¹	热释电系数 /μC·m ⁻² ·K ⁻¹	机电耦合 系数 (kt)
PVDF	1.76	12	-20	40	0.16
P(VDF-TrFE)	1.9	13-20	-25~-30	30~40	0.20~0.30
PZT-5	7.75	1700	374	60~500	0.34
BaTiO ₃	5.7	>2000	191	200	0.21
石英	2.66	4.5	2.31	-	0.09



图 2 P(VDF-TrFE) 压电膜



图 3 极化后压电膜样品



图 4 传感器小样

三、市场前景及应用

与传统的单晶和陶瓷压电材料相比，它具有良好可塑性、较低的弹性模量，可以通过简单的制备工艺做成各种形状，如薄膜、纤维和块体等。P(VDF-co-TrFE) 压电膜主要应用于以下领域：

1) 水声传感器和换能器

压电聚合物 P(VDF-co-TrFE) 水声换能器研究初期均瞄准军事应用，如用于水下探测的大面积传感器阵列和监视系统等，随后应用领域逐渐拓展到地球物理

探测、声波测试设备等方面。美国曾把水声与雷达、原子弹并列为三大发展计划。随着潜艇技术的发展,潜艇噪声越来越小,用被动拖曳线阵列声纳探测目标越来越困难。为此,各国海军又把目标投向了主动式探测声纳,开始研制低频主动拖曳线阵列声纳。经过高能射线辐照的 P(VDF-co-TrFE) 聚合物材料的声阻抗与水数量级相同,使得制备的水听器可以放置在被测声场中,感知声场内的声压,且不致由于其自身存在使被测声场受到扰动。因此是非常理想的主动式声纳传感器材料,目前我国船舶总公司这方面的需求非常迫切。

2) 超声传感器和换能器

机器人安装接近觉传感器主要目的有以下三个:其一,在接触对象物体之前,获得必要的信息,为下一步运动做好准备工作;其二,探测机器人手和足的运动空间中有无障碍物。如发现有障碍,则及时采取一定措施,避免发生碰撞,其三,为获取对象物体表面形状的大致信息。超声波因其波长较短、绕射小并定向传播,利用 P(VDF-co-TrFE) 聚合物制造的超声传感器,使得机器人能够灵活地探测周围物体的存在与距离,该领域蕴藏着巨大的市场潜力。

3) 医疗传感器和换能器

PVDF 及其共聚物与压电陶瓷相比,其声阻抗(约 4MRayls)与人体组织(约 1.5MRayls)相当,在超声成像方面具有明显的优势。具有宽频响应、强度和稳定性良好的优点,在超声成像中有助于实现短脉冲响应,提高轴向成像分辨率。利用延时频谱方法可使聚合物传感器的信噪比在 1 到 40MHz 之间不低于 60 到 75dB 。压电聚合物在生物医学领域的应用可以分为探头、超声源和成像系统三类。非介入聚合物探头心肺检测系统可以重复可靠地检测心肺功能。PVDF 薄膜较高的机械损耗使得 PVDF 超声发射源在较宽频率范围内具有比较平坦的发射电压响应,使其在宽带超声频率绝对校准应用中具有优异特性。其超声发射源可以发射频率超过 30MHz 的超声冲击波,在非介入肾结石超声破碎和超声应用中具有良好前景。由其拍摄的甲状腺超声图像大大优于压电陶瓷传感器的结果。采用 P(VDF-co-TrFE) 共聚物,可以进一步增强聚合物的压电效用,由工作频率为 7.5MHz 的 P(VDF-co-TrFE) 传感器获得的乳房超声图像表明,由于采用共聚物,图像质量获得了显著提高。

3) 驱动器

压电/电致伸缩驱动器已成功地应用在精密定位、精密加工、智能结构、生物工程、航空航天、电子通讯、汽车工业、机器人关节、医疗器械等众多技术领域，并已经形成一个巨大的产业。电子束辐照的 P(VDF-co-TrFE) 含氟共聚物具备弛豫铁电体特征，使该材料具备了产生大伸缩应变的能力，最大应变可超过 4%，大大超出传统压电陶瓷材料 0.2% 的应变水平，这一优异特性赋予了该材料在微驱动领域的应用潜力。医疗上的应用主要是人工器官的驱动。例如人工肺(氧合器)、人工心脏(血泵)、人工肾(血液透析器)以及定向给药等，市场前景非常广阔。

四、技术成熟度

实验室阶段 工程化阶段 产业化阶段

目前该项目已完成公斤级中试，压电膜正在工艺升级中。

已有知识产权：

专利号	专利名称	专利类型	发明人
ZL201210086186.8	制备聚(偏氟乙烯-三氟乙烯)或聚(偏氟乙烯-三氟氯乙烯-三氟乙烯)的方法	中国发明专利	张志成, 朱智刚
ZL201410132737.4	可交联耐高电压高储能聚偏氟乙烯塑料薄膜的制备方法	中国发明专利	张志成, 谭少博
ZL201210408794.6	头-头连接的氢化 P(VDF-TrFE) 制备驻极体压电材料的应用和方法	中国发明专利	张志成, 夏卫民
ZL201310294444.6	高储能密度聚偏氟乙烯基接枝改性聚合物的制备方法	中国发明专利	张志成, 李俊杰
ZL201510430455.1	由聚(偏氟乙烯-三氟氯乙烯)制备荧光聚合物的方法	中国发明专利	张志成, 汪佐辰
ZL201611033072.1	一种制备聚(偏氟乙烯-三氟乙烯)和聚(偏氟乙烯-三氟氯乙烯-三氟乙烯)的方法	中国发明专利	张志成, 张婉婉
ZL201611022592.2	一种表征电介质极化、铁电相弛豫和漏导的方法	中国发明专利	张志成, 刘晶晶
ZL201710855370.7	制备 P(VDF-DB)-g-S-C3H6-SO3H 质子交换膜材料的方法	中国发明专利	张志成, 牛之静, 李欣慰, 谭少博
ZL201810103782.X	制备聚(偏氟乙烯-三氟乙烯-三氟氯乙烯)和聚(偏	中国发明专利	张志成, 谭少博

	氟乙烯-三氟乙烯)的方法		
ZL201810210696.9	一种反铁电聚(偏氟乙烯-三氟乙烯-三氟氯乙烯)接枝聚合物的制备方法	中国发明专利	廖煜, 张志成, 刘晶晶
ZL201810350541.5	还原制备聚(苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯-甲基丙烯醇)玻璃态聚合物的方法	中国发明专利	张志成, 刘晶晶

五、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权(许可) 面议

- (1) 可提供 P(VDF-TrFE) 压电膜;
- (2) 可联合开发、委托开发压电传感器。

61. 多用途纳米复合粉末材料

负责人: 宋晓平

所在学院: 物理学院

一、项目简介

发展面向市场的新型功能材料是响应国家科技产品创新、大力推进科技成果产业化的重要举措。本项目依靠团队成员多年的功能材料研发、生产及加工经验, 聚焦特种粉体材料行业的前沿理论研究, 掌握最新技术和产品动态, 在粉体产品自主研发、工艺生产上不断取得突破, 形成了一系列具有自主知识产权的创新产品和技术, 随着应用市场的扩张, 业务模式、生产销售模式的变化, 深入了解客户需求, 为客户研发、生产多种规格和性能指标的产品并提供个性化的解决方案。

二、产品性能优势

本项目包含以下关键技术:

- 1、纳米粉末制造技术;
- 2、复合粉末中针对不同用途添加的银、铬、铜、镍、钛、钴、锌等元素, 添加的份额、方式等关键技术
- 3、球形粉末成形关键技术;
- 4、纳米粉末特殊加热处理(包括加热温度, 加热时间和冷却步骤等)等关键技术;
- 5、后续酸洗, 粉末收集的关键技术。

本团队集多年实验研究成果, 已充分掌握上述关键技术, 并可实现小规模化生产。

三、市场前景及应用

1、大健康领域的粉体材料具有日常清洁、杀菌、祛除异味等功效, 可用于诸如果蔬、衣服、家具环境等, 目前已经打开市场, 产品供不应求, 现在月销售在 50 公斤, 市场潜力巨大。

2、两种环保领域的粉体材料，一是具有祛除厨余垃圾异味及治理垃圾霉变危害的作用，目前正在市场开发阶段，月销售在 20 公斤，该产品也市场潜力巨大。二是用于治理扬尘污染 PM10 的功能性粉体材料，该种材料已通过路级现场考核，目前正在市场开发阶段。

3、特种涂料领域的粉体材料，该产品不仅拥有氢氧根活性颗粒，而且还具有分解甲醛、苯、TVOC 的光催化作用，可用于高端装修领域特种墙面涂料。该产品具有以下功效：a. 吸附、分解（甲醛、苯、TVOC）的作用；b. 祛除家居环境所散发的气味以及室内杂味异味，尤其对烟在室内所散发的一氧化碳和浮游粉尘量具有吸附作用；c. 涂有微米级复合贝壳粉末的墙面具有调节空气湿度的“水呼吸”功能；d. 具有防火阻燃的功效。该产品属于新型涂层材料，需要加大广告宣传，开发市场，市场潜力巨大。

4、生物基 3D 打印球形粉体材料目前客户群不固定，目前尚不能计算营销利润，也不能估计出市场价值。

四、技术成熟度

概念验证 原理样机 工程样机 中试 产业化

已可实现小规模化生产，并已产生经济效益。目前的月销售为 50 公斤，计划第一步扩大到月生产 500 公斤，每公斤销售 1800 元，年销售额为（按 10 个月生产计）900 万元。第二步扩大到月生产 1000 公斤，年销售额为 1800 万元，符合技术成熟度等级的十二级，即累计净利润 \geq 总投入的 50%。

五、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权（许可） 面议

62. 可降解支撑粒子植入技术与装置

负责人: 宋晓平

所在学院: 物理学院

一、项目简介

发展面向市场的新型功能材料是响应国家科技产品创新、大力推进科技成果产业化的重要举措。本项目依靠团队成员多年的功能材料研发、生产及加工经验, 聚焦特种粉体材料行业的前沿理论研究, 掌握最新技术和产品动态, 在粉体产品自主研发、工艺生产上不断取得突破, 形成了一系列具有自主知识产权的创新产品和技术, 随着应用市场的扩张, 业务模式、生产销售模式的变化, 深入了解客户需求, 为客户研发、生产多种规格和性能指标的产品并提供个性化的解决方案。

二、产品性能优势

本项目包含以下关键技术:

- 1、纳米粉末制造技术;
- 2、复合粉末中针对不同用途添加的银、铬、铜、镍、钛、钴、锌等元素, 添加的份额、方式等关键技术
- 3、球形粉末成形关键技术;
- 4、纳米粉末特殊加热处理(包括加热温度, 加热时间和冷却步骤等)等关键技术;
- 5、后续酸洗, 粉末收集的关键技术。

本团队集多年实验研究成果, 已充分掌握上述关键技术, 并可实现小规模化生产。

三、市场前景及应用

1、大健康领域的粉体材料具有日常清洁、杀菌、祛除异味等功效, 可用于诸如果蔬、衣服、家具环境等, 目前已经打开市场, 产品供不应求, 现在月销售在 50 公斤, 市场潜力巨大。

2、两种环保领域的粉体材料，一是具有祛除厨余垃圾异味及治理垃圾霉变危害的作用，目前正在市场开发阶段，月销售在 20 公斤，该产品也市场潜力巨大。二是用于治理扬尘污染 PM10 的功能性粉体材料，该种材料已通过路级现场考核，目前正在市场开发阶段。

3、特种涂料领域的粉体材料，该产品不仅拥有氢氧根活性颗粒，而且还具有分解甲醛、苯、TVOC 的光催化作用，可用于高端装修领域特种墙面涂料。该产品具有以下功效：a. 吸附、分解（甲醛、苯、TVOC）的作用；b. 祛除家居环境所散发的气味以及室内杂味异味，尤其对烟在室内所散发的一氧化碳和浮游粉尘量具有吸附作用；c. 涂有微米级复合贝壳粉末的墙面具有调节空气湿度的“水呼吸”功能；d. 具有防火阻燃的功效。该产品属于新型涂层材料，需要加大广告宣传，开发市场，市场潜力巨大。

4、生物基 3D 打印球形粉体材料目前客户群不固定，目前尚不能计算营销利润，也不能估计出市场价值。

四、技术成熟度

概念验证 原理样机 工程样机 中试 产业化

已可实现小规模化生产，并已产生经济效益。目前的月销售为 50 公斤，计划第一步扩大到月生产 500 公斤，每公斤销售 1800 元，年销售额为（按 10 个月生产计）900 万元。第二步扩大到月生产 1000 公斤，年销售额为 1800 万元，符合技术成熟度等级的十二级，即累计净利润 \geq 总投入的 50%。

五、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权（许可） 面议

404 涂层及焊接技术

63. 基于热（冷）喷涂和超高速激光熔覆的精细制造/再制

负责人: 李成新

所在学院: 材料科学与工程学院

一、项目简介

热喷涂是通过对传统激光熔覆的光学准直、聚焦和整形以及与之配合送粉头的重新设计从而实现均匀薄涂层的高速熔覆技术, 目前受到广泛关注。由于兼具热喷涂快速沉积涂层特性以及激光熔覆冶金结合的特点, 有望成为规则表面实现替代电镀硬铬的新方法。冷喷涂是利用超音速气流获得高速粒子使其通过固态塑性变形沉积而制备技术的方法。

超高速激光熔覆相比于传统激光熔覆, 激光能量主要作用粉末, 能量分配: 基材 20%, 粉末 80%, 粉末温度高于熔点, 修复产品表面粗糙度可小于 20 微米, 修复厚度可低至 30 微米。

二、产品性能优势

项目组拥有超高速激光熔覆全套技术, 从喷嘴设计、材料选型以及工艺研发方面全流程覆盖, 确保从源头把握制备工艺。前期已经实现钛合金防腐涂层制备, 达到涂层厚度 $50\sim 150\ \mu\text{m}$, 表面光滑, 无明显裂纹、孔隙; 在叶片等金属表面的超高速激光熔覆Stellite6合金, Stellite6合金单层厚度约 $380\ \mu\text{m}$, 稀释率5%; 铝合金高速激光熔覆铜基合金, 实现了材料表面高硬度、高剪切强度、高冲蚀磨损。在精细制造方面能够按需修复; 高性能修复; 高效自动化; 在冷喷涂工艺方面实现了长时连续喷涂, 高送粉速率; 高沉积速率。

三、市场前景及应用

可应用于大型高价值零件修复, 野外金属制品快速修复, 大型承力件修复, 镀铬工艺友好环境替代, 高耐磨涂层。



修复前



修复后

四、技术成熟度

实验室阶段 工程化阶段 产业化阶段

五、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权（许可） 面议

64. 一种超硬非晶碳薄膜的制备装置和工艺

负责人：赵玉清

所在学院：电信学院

一、项目简介

1. 基本情况

碳基薄膜包括种类很多，例如石墨、金刚石、非晶碳、石墨烯、碳纳米管、碳化硅、碳化钛等，因此碳基材料具有非常丰富的物理化学特性，一直是科学家研究的重点。

碳基薄膜中C有四个价电子，可以有包含 sp^3 、 sp^2 和 sp^1 三种杂化方式。在 sp^3 键组态中，碳原子的4个价电子分别与相邻碳原子结合，形成一个正四面体取向的 sp^3 杂化轨道，形成加强的 σ 键；在 sp^2 组态中，4个价电子中的3个与相邻碳原子结合，形成平面三角形的 sp^2 杂化轨道，也是 σ 键，第4个价电子则处在垂直于平面的轨道，形成较弱的 π 键；而在 sp^1 组态中，只有两个价电子形成 σ 键，其它的两个则形成 π 键，根据 sp^3 、 sp^2 和 sp^1 三种杂化方式的组合构成碳基材料的结构和物理特性。

当薄膜中以 SP^2 杂化键为主时，呈现出石墨的特性，当薄膜中以 SP^3 杂化键为主时，呈现了金刚石特性，通常称为金刚石或类金刚石膜(DLC)。

金刚石薄膜具有高硬度、低摩擦系数、导热、绝缘、吸收紫外、抗辐射损伤、耐腐蚀等诸多优良的物理化学特性一直是科学家研究的热点课题。

金刚石薄膜分为单晶、多晶和非晶态材料，单晶和多晶金刚石材料常常是在高温下形成，而 DLC 是在常温下形成的一种亚稳态的非晶态材料，可分为含氢类金刚石膜(hydrogenated amorphous carbon, 简称 a-C:H)和不含氢类(amorphous carbon, 简称 a-C)。一般 a-C 的 sp^3 键含量高于 a-C:H，所以也具有更高的硬度。当 a-C 中 sp^3 键含量达70%以上，被称为非晶四面体碳(tetrahedral amorphous carbon, 简称 ta-C)。

本项目即为 ta-c 薄膜制备技术。

衡量金刚石薄膜质量的方法主要是看其 SP^3 结构含量，含量越高，其性质越接近天然金刚石，如何得到高含量的 sp^3 键是科学家们研究的重点。而目前国际

上制备的金刚石薄膜以 ta-c 的 SP³ 含量最高，可以达到 85% 以上，因此其性质最接近天然金刚石。

本项目目前达到的水平为：SP³ 结构达到 87%，薄膜硬度 HV ≥ 85Gpa，平整度 0.2nm，摩擦系数 ≤ 0.08，紫外吸收 97% 以上。

2. 国内外技术发展现状与趋势

本技术自从 1991 年由澳大利亚的 D. R. Mckenzie 和 D. Muller 研制成功，目前美国、英国、德国、新加坡、日本、韩国、澳大利亚、以色列、香港各国科学家都在努力将该技术应用于工业生产中。

二、技术性能指标

1. 该技术与市场现有的部分硬质镀膜技术的比较

该膜层可沉积在金属、陶瓷和介电材料等基体上，膜厚可从几纳米到几微米，均匀度误差达 ±1%，是目前其它方法无法达到的。采用该方法镀制的膜层，其硬度和耐磨性能高于其它方法。表 1 为目前国内常用的一些耐磨损涂层的显微硬度和摩擦系数。

表 1 目前市场使用的常用的薄膜材料特性

涂层	摩擦系数 (以玻璃为底材)	显微硬度 Gpa	抗高温氧化性能
TiN	0.84	20~25	一般
TiC	0.6-0.7	25~30	一般
CrN	0.83	15~20	一般
TiCN	/	25~30	一般
CrAlN	0.66	/	/
CrTiAlN	0.55~0.6	/	很好
TiAlN	0.77	28~32	很好
Al ₂ O ₃	0.5	25~30	很好
DLC	0.09~0.1	35~40	/

表 2 为 ta-c 薄膜的物理特性

膜层厚度	2nm~1 μ m	镀层结构	sp ³ ≥80%	硬 度	HV≥80Gpa
表面平整度	0.2nm	膜的纯度	99.99%C	均匀度	±1%
沉积温度	< 80℃	沉积速度	1nm/s	电阻率	108-1010 Ω .cm
光学带隙	2.6eV	摩擦系数	≤0.08	热导率	18w/cm ² .k
耐磨性试验	采用摩擦磨损仪，加载 500 克，压头为 4 毫米直径钢球，样品台转速 500 转/分钟，出现磨痕为止进行实验，未镀膜高速钢为 15 分钟，硬质合金 25 分钟；镀膜后分别超过 30 小时和 40 小时；其他耐磨性能分别提高：玻璃 1219 倍，聚酯镜片 14.7 倍，不锈钢 278 倍，镀金试件 167 倍。				
结合力试验	划痕法测定镀膜剥离临界载荷：高速钢和硬质合金上，达到 125N；200℃加热，自来水中激冷，20 次热震循环，镀膜未见剥落。				
切削实验	成都刀具量具研究所检测结果，6-8 的丝锥，涂层 200-300 纳米，攻碳钢可提高 4-6 倍使用寿命，攻不锈钢可提高 2-4 倍使用寿命；片铣刀涂层 300 纳米，可提高可提高 4-6 倍使用寿命，硬质合金刀头涂层 300-400 纳米，可提高 2-4 倍使用寿命。				
耐候试验	用功率为 3300W/m ² 强紫外线照射 240 小时后，不鼓泡、起皮，耐磨性不变。室外暴露 100 天，不鼓泡，不起皮剥落，耐磨性不下降。5%盐水煮沸 4 小时，取出冷至室温，2 个循环，不起皮剥落。				

通过比较可以看出，ta-c 薄膜的特性远远优于目前市场使用的各种涂层。

2. 该技术达到的主要技术指标

(1) 装置的技术水平达到国际先进

制备的薄膜均匀，重复性好、工艺稳定。

(2) 制备的非晶碳薄膜 SP³ 结构超过 85% 以上，摩擦系数小于 0.1 以下，并可达到沉积工作条件为常温（80℃）以下。

(3) 可以根据不同基体设计不同涂层组合的复合涂层结构，并具有良好的附着力、耐磨损、摩擦系数小的良好特性。

(4) 镀膜的均匀性在 1%。

三、技术依托

课题组依托电子物理教育部重点实验室，具有人才、测试等方面的优势，每年招收十几个博士和四十几个硕士，具有教授 10 人，副教授 20 余人。具有齐全的薄膜检测设备，供课题使用。

目前实验室具有各种镀膜装置 4 台，扫描隧道显微镜一台，电子显微镜和俄歇谱仪各一台，X 射线衍射仪一台，椭圆偏光薄膜测试仪一台，四极场质谱分析仪和超净台等设备。

电子材料教育部重点实验室具有英国 VG 公司生产的多用表面分析仪，英国 CAMSCAN 公司生产的扫描电子显微镜。

金属材料国家重点实验室具有透射电子显微镜，X 射线衍射结构分析仪等也可使用。拉曼光谱测试可以在西安交大能源与动力工程学院、理学院和材料科学与工程学院完成。

四、市场前景及应用

本课题为赵玉清教授团队经过近十年研究开发，形成了一些列成果包括：

- (1) 离子镀膜装置；
- (2) 离子源技术；
- (3) 薄膜技术。

在实验和设备工艺方面具有丰富的实践经验和很高的造诣，先后获的国家和陕西省重大科技专项资助。目前已实现 ta-c 的部分工业产品的产业化生产。

应用领域：

(1) 工业领域

本项目也被广州钢铁集团在全国调研 2 年后选中的转型转产的重点项目，目前已为广钢集团研制 6 台设备。

(2) 医疗领域

义齿、牙托和人造关节涂层及医用不锈钢刀具。

(3) 切削刀具

本项目不仅可以实现硬质合金金属切削刀具,而且已推广到高速钢刀具金属切削、木材和家具加工的高速钢和碳钢刀具。ta-c 刀具已得到部分单位应用,如:陕西百纳科技,关中工具厂,东方机械厂五分厂,成都光华数控刀具厂,陕西重型汽车有限公司,标准集团股份有限公司,长岭机器有限公司,神龙汽车有限公司。

五、技术成熟度

概念验证 原理样机 工程样机 中试 产业化

六、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权(许可) 面议

附,获奖情况及专利列表:

1、获奖情况:

(1) 陕西省高等学校科技成果一等奖(带电粒子束源系列关键技术及其应用)2008

(2) 陕西省科技成果二等奖(带电粒子束源系列关键技术及其应用)2008

(3) 2008年度国际电工技术委员会特别贡献奖(IEC1908奖)

(4) 四川省科技成果奖三等奖,RKDZQ270-1A型电子束蒸发源

(5) 中国标准创新贡献奖一等奖,(IEC 60519-7:2008 电热装置的安全第七部分对电子枪装置的特殊要求、IEC60703:2008 具有电子枪的电热设备的试验方法)(中国国家标准化管理委员会;中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局)

(6) 电工行业国际标准化贡献突出奖,中国电器工业协会,2009

2、专利列表:

(1) 赵玉清 沈伯礼 赵鑫 朱克志 李冬梅 专利号: ZL2004 1 0026395.6
一种金属离子源,授权日:2007,3,7(发明专利)

(2) 赵玉清 专利号: ZL012 47041. 4 一种用于工业省生产中制备超硬薄膜的离子源装置, 授权日: 2002, 6, 26 (实用新型)

(3) 赵玉清 专利号: ZL012 47038. 4 制备超硬薄膜的离子源装置的滤质器 授权日: 2002, 7, 31 (实用新型)

(4) 赵玉清 专利号: ZL012 47042. 4 阴极靶修磨器, 授权日: 2002, 6, 19 (实用新型)

(5) 朱克志, 李东生, 赵玉清, 专利号: ZL012 65913. 4 固体离子源支撑支架, 授权日: 2002, 9, 18 (实用新型)

(6) 朱克志, 李东生, 赵玉清 专利号: ZL012 65931. 2 一种用于离子镀膜室的分度回转工作台, 授权日: 2002, 9, 11 (实用新型)

(7) 赵玉清等, 硬质合金、高速钢材料表面制备非晶碳复合涂层的方法 (发明专利, 已授权): ZL 2011 1 0136163. 4

(8) 赵玉清等: 一种树脂镜片、有机玻璃片表面超硬涂层方法 (发明专利, 已授权时间: 2011, 7, 27)

(9) 赵玉清等: 一种医用不锈钢刀锯表面制备非晶碳涂层的方法 (已授权 2011, 7, 27)

65. 基于一种搅拌摩擦钎焊制备双金属复合板专利的技术及产品

负责人：张贵锋

所在学院：材料科学与工程学院

一、项目简介

针对搅拌摩擦搭接焊焊道狭窄、驱除与分散界面氧化膜能力差、对界面处压入深度敏感、针的恶性磨损等问题，开发了搅拌摩擦钎焊专利技术（2012年授权）。该技术的优点有：采用简单的无针工具可免除钢质母材对搅拌针的磨损；单道焊接宽度取决于轴肩的直径，远大于针的直径；能打碎并分散界面金属间化合物层。大气环境施焊、免用钎剂、利用旋转工具的机械作用与钎料的冶金作用的综合作用实现界面去膜、挤出多余低熔低强钎料、打碎并分散界面脆性金属间化合物层、节能环保。在界面焊接质量方面，FSB的突出技术优势在于：氧化膜能随共晶液相被挤出，所以界面去膜效果优异；在低熔低强液态钎料被挤出后，最终所得为母材间扩散形成的扩散焊组织。2011年发表于美国冶金与材料学报（MMTA, 2011, 42(9): 2850）等FSB相关论文已被美、欧、日、韩、伊朗、中国台湾、中国大陆等研究人员广泛引用。本组关于铝/钢组合的FSB的论文获得2015年全国钎焊年会优秀论文奖，该文对1060/16Mn（3+18mm）组合，剪切强度已达55.5MPa。

二、技术指标（性能参数）

搅拌摩擦钎焊可用于双金属复合板的制备、异种金属的焊接、大面积异种或同种金属的搭接焊及修复，并在此基础上开发了铝基活性钎料。

1、双金属复合板和异种金属焊接

(1) Al/steel、Cu/steel、Al/Ti、Al/Cu双金属复合板制备；
制备贵、窄、薄、细、小、双金属复合板（代替爆炸焊与轧制焊）。

优点：焊后材料塑性不受损害，对塑性无苛求；去膜能力强，润湿性好，再现性好；无边缘效应；基板厚度不受限制；节材节能环保；方便灵活。

(2) 异种金属焊接（Al/X与Cu/X组合：X= Al、Fe、Cu、Ti、SUS）。

课题组已完成 Al/X 与 Cu/X 组合的复合实验 (X = Al, Fe, Cu, Ti, SUS)。

2、大面积异种 (如 Al/Ti) 或同种 (如 Cu/Cu) 金属的搭接焊接或修复

优点: 润湿性好; 可在大气中施焊; 尺寸不受限制; 节能 (焊速约 300mm/min)。

3、铝基活性钎料

铝基活性软钎料: Al-Mg-X, 适于铝基复合材料 (SiCp/ZL101)、结构陶瓷 (SiC、Al₂O₃)、功率模块 (power module) 电子封装用陶瓷、高体积分数复合材料软钎焊用。

该系铝基活性钎料熔点低, 导热性好, 润湿性优良, 即使对 SiC 陶瓷也能在 425°C 低温下良好润湿。该系钎料既可用于直接钎焊, 也可用于陶瓷表面金属化预处理、高体积分数铝基复合材料表面金属化预处理 (代替电镀)。

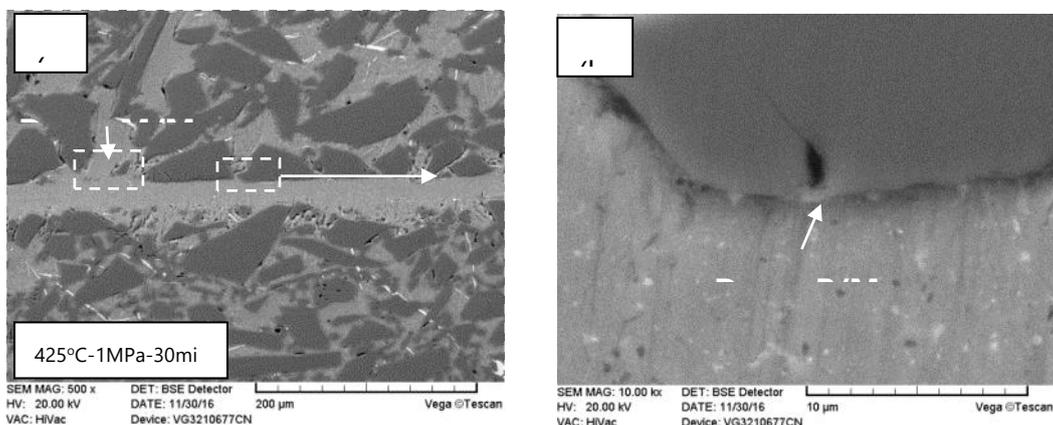


图 1 采用铝基活性软钎料焊接的微观组织照片

(a) 为采用 Al-Mg-Ga 活性软钎料钎焊 70 vol.% SiCp/ZL101 复合材料接头的微观组织 BSE 照片 (425°C-1MPa-30min); (b) 为图 (a) 中 b 区域放大 BSE 照片, 即使一万倍 P/M 界面依然致密, 证明该钎料在低温 (425°C) 对高体积分数 SiCp 增强铝基复合材料有良好润湿性



图2 户外开关用铝软联接（外包不锈钢抗风片——供应西电公司）

三、技术成熟度

实验室阶段 工程化阶段 产业化阶段

专利：一种搅拌摩擦钎焊制备双金属复合板的方法 ZL. 200910021918.3

四、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权（许可） 面议

66. 高强韧钢焊接质量控制关键技术及其智能化设备开发

团队负责人：张建勋

所在学院：材料科学与工程学院

一、项目简介

项目背景随着控轧控冷和高纯净冶金技术的发展，高强韧钢在大型工程建设中得到规模化使用，如石油天然气管道工程、核能电力装备、船舶工程、海洋平台与陆地钢结构工程等，高强韧钢焊接技术已成为保证复杂严酷工况下工程结构服役性能的关键技术之一。本项目以国家大型工程为载体，在**高强韧焊接材料、焊接工艺与设备、焊接变形及焊接过程可视化**等关键技术领域进行了多方位的创新研究。

获得成果本项目授权国家发明专利 11 项，软件著作权 3 项，发表论文 30 余篇，开发了系列焊接操作模拟与仿真设备，焊接裂纹智能插销试验设备、新型辉柱焊设备及**高强帮 X80 管线钢专用埋弧焊丝**等四类十余种布新技术产品，达到国际同类产品水平。

二、产品性能优势

项目内容本项目在国家自然科学基金、国家科技支撑计划和企业科技发展等项目的支持下，开发了智能化焊接裂纹插销试验装置及其控制软件，解决了**高强韧钢超低氢焊接冷裂纹、再热裂纹和层状撕裂敏感性的定量评价**难题；发明了**裨接楼微仿真装置焊条电弧焊和 TIG 焊模拟仿真设备、网格法焊接成形可视化技术**，解决了在无污染与节能环境下有效掌握焊接操作技术的难题，实现了多种焊接技术的模拟仿真，其焊接熔池、焊缝成形与焊接操作过程逼真度高；开发了基于螺柱与基体熔池接触力检测自动螺柱焊设备，解决了**穿透薄壁蒙皮进行基体螺柱焊**的技术难题；开发了基于焊接电流波形特征的快速检测产品，实现了螺柱焊在线无损检测；提出了基于顺态焊接变形梯度与温度梯度的检测与协同控制的技术策略，实现了核电厂主蒸汽厚壁管道安装过程焊接变形的有效控制；发明了**在焊缝中添加微量致裂合金元素并控制焊接工艺参数**等技术措施，实现了焊接接头中焊接

裂纹产生位置及尺度的精确控制,解决了超声和渗透等无损探伤中无法直接对比真实裂纹位置和尺度的技术难题。

三、市场前景及应用

已在石油天然气、核能电力、工程机械与钢结构等领域得到广泛应用,为多种高强韧钢的焊接工艺评定提供了重要技术支撑,并产生了显著的经济效益和广泛的社会效益。

四、技术成熟度

概念验证 原理样机 工程样机 中试 产业化

五、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权(许可) 面议

405 有机高分子材料

67. 树脂基超疏水涂层材料

团队负责人：李瑜

依托单位：西安交通大学

所在学院：化学学院

一、项目简介

本项目采用具有微/纳米两级结构的低表面能复合微球，与水性丙烯酸聚氨酯(APU)构成反应性高分子纳米复合体系，制成超疏水涂层材料。优化复合微球的尺寸、用量和表面性质，构建低表面能的微/纳米复合结构；以复合粒子增强的树脂三维网络为中间层，固定粗糙结构；以丙烯酸聚氨酯(APU)为底层，保证涂层附着力的多层次结构。采用本身具有微/纳两级结构的复合微球，更有利于涂层表面微/纳米复合的粗糙结构，提高疏水粒子的利用率，增大涂层的水接触角，赋予涂层良好的附着力、耐冲击性和耐磨性等。

该超疏水涂层主要性能参数及优势如下：

- (1) 水接触角 $>160^{\circ}$ ；
- (2) 滚动角约 7° ；
- (3) 附着力 0 级；
- (4) 柔韧性 1mm、耐冲击性极佳；
- (5) 固定载荷（100g）下，采用 2000 目砂纸打磨 200 次后，水接触角仍 $>150^{\circ}$ ；
- (6) 合成工艺简单，易于放大生产，涂料施工方便，生产周期短，约 6h/釜，工艺条件易于工业化；
- (7) 原料易得，成本与市售产品价格相当。

二、产品性能优势

该超疏水涂层主要性能参数及优势如下：

- (1) 水接触角 $>160^{\circ}$ ；

- (2) 滚动角约 7° ；
- (3) 附着力 0 级；
- (4) 柔韧性 1mm、耐冲击性极佳；
- (5) 固定载荷（100g）下，采用 2000 目砂纸打磨 200 次后，水接触角仍 $>150^{\circ}$ ；

(6) 合成工艺简单，易于放大生产，涂料施工方便，生产周期短，约 6h/釜，工艺条件易于工业化；

(6) 原料易得，成本与市售产品价格相当。

三、市场前景及应用

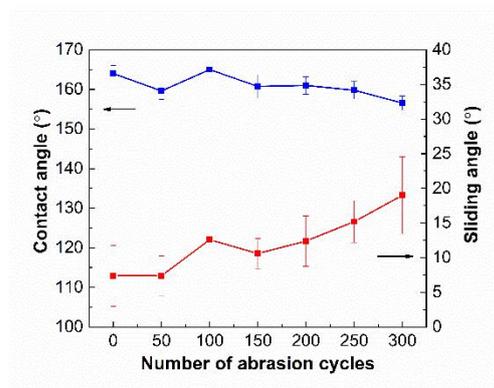
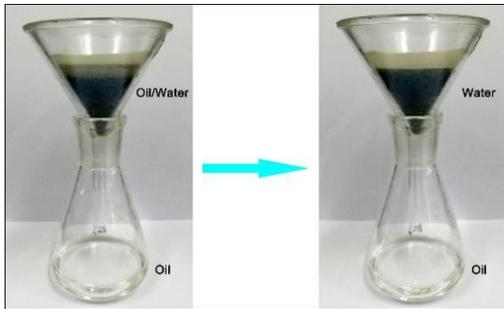
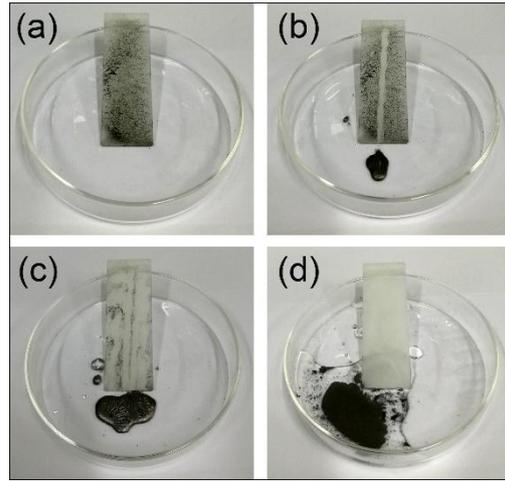
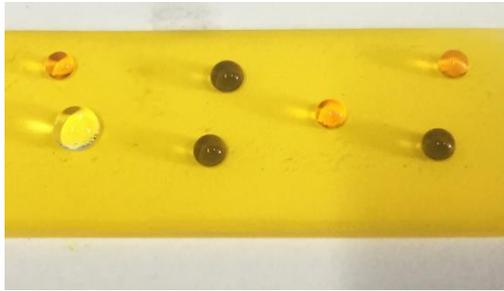
超疏水材料基于其独特的表面微观结构和优异的超疏水性能，在建筑物、汽车、卫星天线、高压电线，管道运输、医疗以及船舶等方面具有重要应用前景，应用领域的需求促进疏水涂料市场的稳健发展，同时技术上的突破使其疏水性和耐久性得到提升，进一步刺激市场需求。

四、技术成熟度

概念验证 原理样机 工程样机 中试 产业化

五、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权（许可） 面议



68. 磁性纳米智能窗

团队负责人：张垠

所在学院：物理学院

一、项目简介

本项目提供一种具有快速,高对比度光学开关的新型磁性可调智能光学材料,该材料将一维结构的大形状各向异性和 Fe₃O₄ 的超顺磁特性集于一体。可用非接触磁力实现材料透明度的变化,当在施加磁场的条件下将纳米链条平行于观察方向排列时,该材料显示出透明的透明状态,而当纳米链条在去除磁场后随机取向时,则显示出良好的屏蔽效果。在较小的外加磁场调节下(0-100 Oe)可以实现光透射率 20-80%的变化。其大调控范围和低触发条件使其在光学开关和传感等其他领域中具有较为广阔的应用前景。

本项目技术提供方为西安交通大学物理学院张垠副教授、杨森教授团队,张垠副教授入选陕西省高校杰出青年人才计划和江苏省双创优秀博士,杨森教授入选国家万人计划“领军人才”。项目团队在磁性纳米材料制备及智能器件的相关领域具有多年的研发经验,已掌握了磁性智能窗关键材料的制备技术和原型器件的封装技术,同时通过光学性能测试实现了智能窗的多功能行,基本上具备项目产业化的能力。

二、产品性能优势

1. 制备粒度均匀的无磁滞,零矫顽力的超顺磁 Fe₃O₄ 纳米颗粒,并通过自组装制备出长度为微米级的磁性纳米链条,其长度可控,半径均匀,具有优良超磁性能。

2. 通过不同溶剂实现纳米颗粒的有效分散,进而在浓度、溶剂和链条长度的控制下实现多种场景下的应用。

三、市场前景及应用

随着全球能源危机和人们保护环境的意思加强,人们对窗户的功能性要求越来越高,因为窗户有高透光率和视觉美化的要求,成为现代建筑物节能指标的一

个难题。随窗户的发展，人们也开始重视窗户调光功能，如采用液晶实现电调光的智能玻璃已经在建筑或装修市场出现。目前的热致变色、光致变色智能窗户，由于它们的制造工艺复杂，制造成本大大增加，反应时间慢等缺点阻止它们在建筑节能市场上的使用。目前有关智能窗的研究及开发主要集中在电、热、力响应型智能窗。电、热响应智能车窗作为研究较为广泛的两种类型，已成功地应用于许多领域。然而热响应型智能窗周期稳定性差、响应时间长、制造和实施复杂等特点限制了其广泛应用。此外，电热响应型智能窗通常需要外部能量来维持状态，从而造成能源的二次消耗。

基于此，我们开发了一种一维（1D） $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2$ 纳米链条，该顺磁磁性材料具有极大的各向异性性能，在磁场下可实现快速且高灵敏的光学开关响应。当在施加磁场的条件下将纳米链条平行于观察方向排列时，该材料显示出透明的透明状态，而当纳米链条在去除磁场后随机取向时，则显示出良好的屏蔽效果。在 0-100 Oe 的外加磁场下可动态调节光的透射率。另外，通过将链条定向并分散于网状结构的水凝胶或其他溶剂中，可实现上述智能窗的固态化，从而在改善其液相不稳定的同时，使其具有更广泛的工作场景。

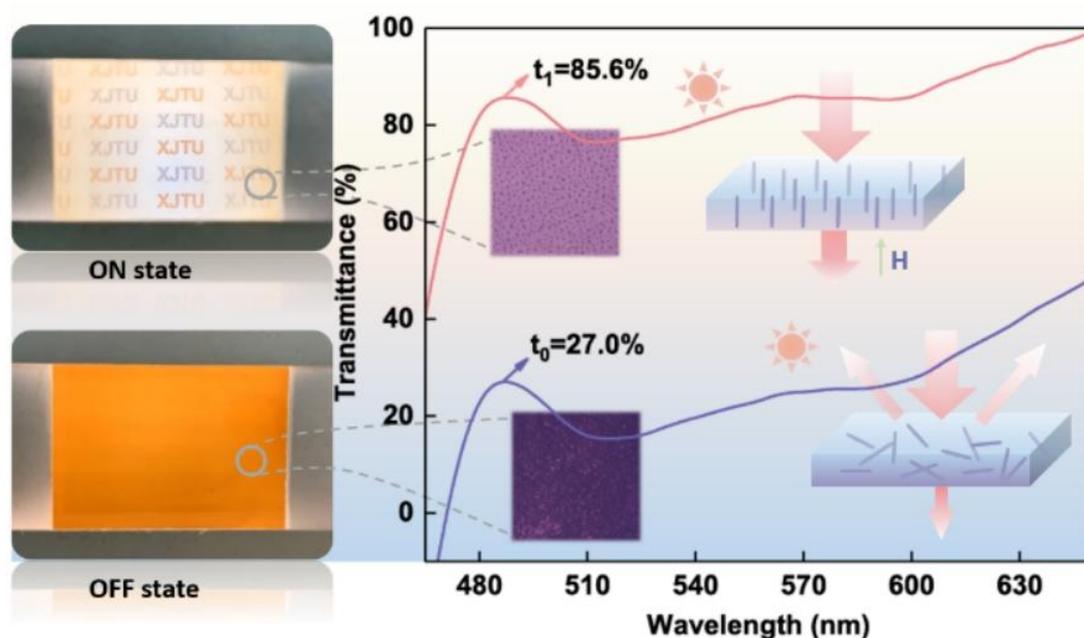


图 1 基于一维磁性纳米链条的智能窗

四、技术成熟度

目前技术成熟度六级，已实现智能窗演示样品的制备，并测试合格、工艺验证可行。

概念验证 原理样机 工程样机 中试 产业化

五、合作方式

联合研发 技术入股 转让 授权（许可） 面议