

## 一、项目名称：一维陶瓷材料微纳尺度结构控制与组装技术及应用

## 二、提名者及提名意见

**提名单位：**陕西省教育厅

**提名意见：**

微纳尺度一维陶瓷材料由于其独特的电学、力学、光学、磁学等性能，在结构、功能陶瓷及复合材料中均有着极其重要的应用，进而对国家核心竞争力的提升起到重要推进作用。但受到尺寸限制，目前仍存在应用方式单一、应用领域窄、性能优势无法充分发挥等急迫问题。该项目以国家和企业项目为依托，历经十余年的产学研用协同攻关，先后开发了氧化铝基纤维晶粒形态控制和组织定向工艺、晶须搭接结构多孔陶瓷微观结构控制技术和低成本纤维组装晶须次级结构构建方案，并在飞轮储能设备、高温烟气过滤、柔性保温材料等领域实际应用，拓宽了一维陶瓷材料的应用领域和使用场景，经济、社会效益显著。

该项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术奖提名条件。特提名为陕西省科学技术进步奖三等奖。

## 三、项目简介

晶体沿着线性链方向生长的低维陶瓷材料被称为一维陶瓷材料，包括纤维、晶须、纳米管等多种类型。与传统陶瓷材料不同，低维材料在不同维度方向上生长受限，因此表现出多种特殊性能。尤其一维材料非常容易满足任一维处于1-100nm尺度范围的要求，而被划入纳米材料范畴。纳米级结构材料由于其具有表面界面效应、小尺寸效应、微观量子隧道效应等，而显示出了独特的电学、力学、光学、磁学等特殊性能。持续几十年的纳米材料研究热潮已在信息、绿色制造、生物和医学等领域取得迅猛发展，对国家核心竞争力的提升起到重要推进作用。在这样的双重特殊性叠加之下，一维微纳尺度陶瓷材料在结构、功能陶瓷中都有着及其重要的应用，具有极高的科学研究价值，成为世界范围内的研究热点。

然而微纳尺度一维陶瓷材料也受到尺寸限制，无法单独成型为器件，目前工程上多数作为复合材料增强相使用，应用方式单一，限制了一维陶瓷材料多种优异性能特殊作用的发挥。一维陶瓷材料之间进行相互组装、并在微纳尺度控制其方位和结构，必然可以拓展其使用方式和应用领域，更广、更多元地发挥其优

异性能。因此，开展一维陶瓷材料微纳尺度结构控制与组装技术体系研究，有巨大的社会需求，是亟待解决的工程问题。

项目组以国家和企业项目为依托，历经十余年的产学研用协同攻关，先后开发了氧化铝基纤维晶粒形态控制和组织定向工艺、晶须搭接结构多孔陶瓷微观结构控制技术和低成本纤维组装晶须次级结构构建方案，并在飞轮储能设备、高温烟气过滤、柔性保温材料等领域实际应用，拓宽了一维陶瓷材料的应用领域和使用场景。

主要的科学发现和技术要点有以下 3 方面：

(1) 首次将模板晶粒生长技术 (TGG) 成功应用于陶瓷纤维组织定向，实现了微纳尺度对籽晶晶须位向和纤维基体晶粒形态的双重控制。

针对氧化铝基连续纤维传统等轴晶结构细晶强化方法的不足之处，利用定向的纳米莫来石晶须作为模板籽晶，依据 TGG 原理诱导纤维基体晶粒各向异性生长并随之定向；实现超细直径纤维、超细直径晶须模板籽晶尺寸控制及二者的轴向一致性、氧化铝基纤维强韧化等效果，建立双重尺度调控下氧化物纤维制备工艺、Al-Si-O 陶瓷体系纳米晶粒尺度形态和取向度调控等理论与方法。最终使氧化铝基纤维等轴晶粒组织改变为棒状晶粒定向排布组织，打破传统细化晶粒思路，而是从设计组织形态角度实现力学性能优化。

(2) 多种技术完善晶须搭接框架形成多孔材料制备工艺，攻克了此种结构气孔率不易控制的难题，显著提升高气孔率多孔陶瓷强度。

为制备兼具高气孔率和高强度的理想多孔材料，针对晶须框架结构多孔陶瓷进行了研究。证实了液态催化剂优于固态催化剂的对晶须原位生成的催化效果，并探究了催化机理；改善溶胶-凝胶制备工艺，采用冷冻干燥提高凝胶骨架强度；开发出溶胶混合-细磨-加压的制备技术，打破凝胶多孔结构后，通过原位反应形成的框架重新获得微纳级孔隙，极大增强了对多孔材料气孔率的调控和可获得气孔率的范围，同时分析了框架结构高强度的具体原因和产生机制。

(3) 开发干法粉体烧结工艺构建纤维表面生产晶须次级结构的原位自组装技术，并应用于柔性保温材料，拓宽应用领域的同时降低工艺难度和生产成本。

基于莫来石晶须气固生长机理，提出了粉体烧结纤维-晶须次级结构微纳设计方案，利用原位反应，使纤维的表面生成绒毛状的莫来石晶须，实现纤维、晶

须两种一维陶瓷的新型组装结构。此工艺以更为简单的工艺制备具有晶须次生结构的陶瓷纤维或纤维膜层，达到提升材料比表面积效果的同时大幅降低工艺成本。

项目研究成果获国家核心知识产权 10 项（发明专利 10 项），专利转让 5 项；相关的研究案例选用在 2 部出版教材中；发表科研论文 20 余篇。多名知名专家认为，该成果技术先进，创新性强，总体达到国内领先水平，国际先进水平。研究成果已成功应用于西安斯派新材料科技有限公司、铜川铜瓷特种陶瓷制造有限公司、陕西海创实业发展有限公司等，近三年经济效益上亿元，且社会效益显著。

#### **四、客观评价**

##### **（1）项目验收结题及成果应用情况**

本成果依托国家自然科学基金青年基金（51902241）、陕西省科技厅省部级计划（2019JQ-910）、金属材料强度国家重点实验室开放课题（20171912）等项目凝练而成，三个项目均圆满完成各项考核指标和研究任务，顺利验收结题，并取得重要科技成果，获得显著经济、社会和生态效益，具有广阔的应用前景。该成果被陕西省海创实业发展有限公司、铜川铜瓷特种陶瓷制造有限公司、西安斯派新材料科技有限公司等 10 家企业推广应用。

##### **（2）项目成果、奖励及引用情况**

项目主要在一维定向纤维材料、晶须框架结构多孔材料以及纤维-晶须次级结构微纳设计三方面取得了重要的研究成果，该研究成果获国家核心知识产权 10 项（发明专利 10 项），专利转让 5 项；此项目相关的研究案例选用在 2 部出版教材中；发表科研论文 20 余篇。取得高等学校科学技术研究优秀成果二等奖。成果被国际知名期刊引用，引用次数累计 100 余次。

#### **五、项目的应用推广及效益情况**

该项目研究成果 2020 年在铜川铜瓷特种陶瓷制造有限公司开始应用，2021 年至今在陕西省海创实业发展有限公司、西安斯派新材料科技有限公司、江苏泰芯源科技有限公司推广应用。使用情况表明：一维陶瓷材料提升制品的韧性与延性，为公司节约了成本，创造了良好的经济和社会效益。通过棒状晶粒定向互锁结构设计，结合三维立体织构结构，获得具有高强韧性的氧化铝块体陶瓷。

产品主要应用于异型设备保温材料、飞轮储能系统中的结构支撑部件等产品中，各项技术均能满足用户单位要求，其中异型设备保温材料可以提高产品使用温度，属于节能降耗产品，经济和社会效益显著；飞轮储能系统中的结构支撑部件具有超高的力学性能外，还需要具备良好的电绝缘性能，该成果应用提升氧化铝陶瓷绝缘子品质，降低成产成本，增强企业核心竞争力，推动中国高端装备行业发展，强化我国绝缘子产业链的健康稳定，助力制造业转型升级与新质生产力发展。

六、主要知识产权

序号	知识产权类别	知识产权名称	国家（地区）	授权号（批准号）	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	带有绒毛状晶须的莫来石纤维及制备方法	中国	ZL201310508337.9	2015.05.27	1678926	西安交通大学	杨建锋，张海鸥，林光，王波，王继平，史忠旗，王红洁
2	发明专利	一种由原位生成的晶须搭接而成的多孔莫来石的制备方法	中国	ZL201610074192.X	2018.02.16	2821820	西安航空学院	张海鸥，谢辉
3	发明专利	溶胶混合-细磨-加压法提高莫来石多孔材料强度的方法	中国	ZL201811121708.7	2019.09.27	3543531	西安航空学院	张海鸥，于方丽，唐健江，谢辉
4	发明专利	一种纤维增韧多孔氮化硅陶瓷的制备方法	中国	ZL201910382836.5	2021.06.01	4456700	西安航空学院	于方丽，张海鸥，唐健江，谢辉，张阔，程娅伊，罗西希，张亚龙
5	发明专利	一种多孔氮化硅陶瓷的制备方法	中国	ZL201910382733.9	2021.07.27	4571694	西安航空学院	于方丽，张海鸥，唐健江，谢辉，张阔，程娅伊，罗西希，张亚龙
6	发明专利	一种多孔氮化硅陶瓷的制备方法	中国	ZL201910382825.7	2021.11.05	4774410	西安航空学院	于方丽，唐健江，张海鸥，谢辉，张阔，程娅伊，罗西希，张亚龙
7	发明专利	一种多孔莫来石陶瓷/环氧树脂复合材料的制备方法	中国	ZL201611148190.7	2018.07.17	3003501	西安交通大学	王波，曾德军，孙帆，庾甜甜，赵杉，杨建锋
8	发明	一种纳米氮化硅	中国	ZL20181	2020	4048	西安	王波，李紫璇，智

	专利	纤维/环氧树脂复合材料的制备方法		1459217 .3	.10. 27	508	交通 大学	强,丁克,张建飞, 周小楠,黄鑫,候 宝强,杨建锋
9	发明 专利	包含莫来石晶须第二相的氧化铝基连续长纤维的制备方法	中国	ZL20121 0498828 .5	2014 .11. 05	1516 450	西安 交通 大学	杨建锋,张海鸥, 杭勇,丁亚萍,林 光,张亚彬
1 0	发明 专利	一种制备含有莫来石和氧化铝晶相长纤维的方法	中国	ZL20111 0201023 .5	2013 .06. 05	1210 446	西安 交通 大学	杨建锋,杭勇,张 海鸥,丁亚萍,林 光,李春芳,鲍崇 高,韩志海

## 七、主要完成人

排名	姓名	技术 职称	行政 职务	工作 单位	完成 单位	对本项目的贡献
1	张海鸥	副教授	院长 助理	西安航 空学院	西安航 空学院	是本项目的统筹者和执行者,全面负责该项目的整体规划以及具体的实施工作。是西安航空学院对项目的技术创造性贡献中知识产权第二、第三项的主要完成者及第一、第四、第五、第六、第九和第十项的主要贡献者。
2	于方丽	教授	院长	西安航 空学院	西安航 空学院	主要参与技术方案制定、理论研究,研究报告审定等工作,是西安航空学院对项目的技术创造性贡献中知识产权第四、第五和第六项的主要完成者及第三项的主要贡献者。
3	王波	教授	无	西安交 通大学	西安交 通大学	主要负责工艺优化指导工作,是西安交通大学对项目的技术创造性贡献中知识产权第七、第八的主要完成者。
4	曾德军	高级 工程师	无	长安大 学	长安大 学	主要参与科研实验工作。是长安大学对项目的技术创造性贡献中知识产权第七项的主要贡献者。
5	张阔	讲师	无	西安航 空学院	西安航 空学院	主要参与科研实验工作,是西安航空学院对项目的技术创造性贡献中知识产权第四、第五和第六项的主要贡献者。
6	白宇	教授	无	西安交 通大学	西安交 通大学	主要参与技术方案制定、理论研究,研究报告审定等工作。

## 八、主要完成单位情况

排名	单位名称	主要贡献
1	西安航空学院	作为本项目的第一完成单位,提出“一维陶瓷材料微纳尺度结构控制与组装技术及应用”项目并负责组织实施。在项目的实施过程中负责项目的支持、管理和监督等工作。自本项目立项以来,作为项目的第一承担单位,在人力、物力、财力等方面给予了全面的支持,在人员、工作安排、

		研究条件、实验设备、分析检测、场地等方面给予了大力的支持，确保了项目的按时完成。
2	西安交通大学	作为第二完成单位，在本项目实施过程中，我校教师积极参与项目的策划、预研、可行性和申报等工作，并承担了项目主要的实验室研究工作。
3	长安大学	作为第三完成单位，在本项目实施过程中，我校教师积极配合该项目的工作，并在设备使用等方面给予积极的支持与配合。

## 九、完成人合作关系说明

本成果共有 6 位主要完成人。其中，第一、第二、第五成果完成人均毕业于西安交通大学，现工作单位均为西安航空学院，长期以来建立了良好的合作关系；第四成果完成人毕业于西安交通大学，现工作单位为长安大学；第三、第六成果完成人均来自西安交通大学。西安航空学院、西安交通大学和长安大学共同推动了“一维陶瓷材料微纳尺度结构控制与组装技术及应用”。

第一、第二完成人共同完成了 ZL201811121708.7，第一、第二、第五完成人共同完成了 ZL201910382836.5，ZL201910382733.9 和 ZL201910382825.7，第一、第三完成人共同完成了 ZL201310508337.9，第三、第四完成人共同完成了 ZL201611148190.7，第二、第六完成人共同发表论文，并以协作开展调研等多种方式参与该成果的理论框架构建与研究内容开展。