

# 陕西省技术发明奖公示信息

(2025年度)

## 一、项目基本情况

项目名称	弹性硅基陶瓷气凝胶的制备与性能调控关键技术
主要完成人	王红洁，苏磊，彭康，牛敏，卢德
主要完成单位	西安交通大学

## 二、提名意见（适用于部门、机构提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input checked="" type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖及以上
<p>提名意见：</p> <p>该成果针对传统陶瓷气凝胶强度低、脆性大、功能单一的问题，结合航空航天等重大装备对耐高温、可变形、功能化陶瓷气凝胶的迫切需求，在国际上率先发明了基于类化学气相沉积的弹性硅基陶瓷气凝胶制备技术；并通过三维网络结构设计，约束纳米线的变形与运动，实现对纳米线气凝胶力学性能的调控；在此基础上，调控纳米线三维网络结构与组分，发明了系列高效隔热、隔热-透波、隔热-吸波一体化多功能陶瓷气凝胶；同时，针对类化学气相沉积过程中，纳米线生长及自组装对设备温度场和气氛场均匀性的特殊需求，率先研发出具有自主知识产权的国内首台高温旋转样品台气压烧结炉，解决了高温、高压下样品台的回转及密封问题，为高性能弹性硅基陶瓷气凝胶的制备提供了关键装备支撑。</p> <p>该项目获授权国家发明专利 28 件，其中转化 2 件，授权使用 1 件，相关成果具有重要应用价值；在 Nature Communications, Science Advances, ACS Nano, Nano Letters 等知名期刊发表论文 40 篇，SCI 收录 40 篇，2 篇入选 ESI 高被引论文，论文他引 2700 余次，研究成果得到国内外广泛认可，产生了重要的经济效益与社会效益。</p> <p>成果材料齐全、规范，经完成单位于 8 月 29 日至 9 月 2 日在创新港涵英楼 5-4060 办公室外公示栏公示，公示期间无异议，符合陕西省技术发明奖推荐条件。</p> <p>提名该项目为陕西省技术发明奖一等奖。</p> <p>说明：省科学技术奖一、二等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“仅提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖。提名项目正式提交后，提名等级建议本年度不得变更。</p>			

## 二、提名意见（适用于专家提名）

[illegible]

### 三、项目简介

(限 2 页)

**发明点一：**发明了由纳米线三维网络构筑而成的弹性硅基陶瓷气凝胶，揭示了弹性陶瓷气凝胶的气-固反应生长机制，建立了弹性陶瓷气凝胶的类化学气相沉积制备新技术，阐明了气凝胶通过纳米线弹性屈曲和协同运动实现大应变回弹新机制。

传统陶瓷气凝胶通常通过超临界干燥工艺获得，微观上由非晶陶瓷纳米颗粒相互搭接而成。由于纳米陶瓷颗粒之间结合较弱，导致气凝胶强度低、脆性大；同时，当温度较高时，纳米颗粒之间还会发生烧结，造成体积严重收缩。

项目创造性地提出了以硅氧烷干凝胶为原料，通过裂解产生 SiO 和 CO 气体，利用气体间化学反应，在石墨基底沉积生成 SiC 晶核并不断生长成超长单晶碳化硅纳米线，在气流作用下，纳米线相互搭接并组装成为高气孔率的三维网络结构，最终获得弹性耐高温 SiC 气凝胶。通过调整前驱体成分及工艺参数，将该工艺拓展至 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 纳米线气凝胶的制备。该方法突破了传统陶瓷气凝胶的制备工艺，形成了一种全新的、具有完全自主知识产权的新型工艺路线，打破了国外对传统陶瓷气凝胶制备工艺的垄断，具有重要的意义。

所获得的硅基陶瓷气凝胶可以在 80% 压缩应变和 20% 拉伸应变下完全弹性回复，显示出优异的弹性，突破了陶瓷气凝胶脆性问题，更新了人们对陶瓷气凝胶固有脆性这一常规印象的认知。采用原位扫描电镜表征技术，发现了气凝胶在压缩过程中，1) 纳米线的柔弹性赋予了其大的弹性屈曲变形；2) 纳米线在外力作用下，产生位移；3) 气孔为纳米线的变形和运动提供了空间，使其产生大宏观变形；4) 卸载过程中，纳米线间丰富的搭接结点确保了纳米线在三维网络空间中的相对位置，使纳米线相互约束、协同运动，从而实现了弹性回复。

**发明点二：**发现通过三维网络结构设计，约束纳米线的变形与运动，实现对纳米线气凝胶力学性能的调控，发明了基于柔性结点强化、二维有序序构和三维周期性序构约束的气凝胶强化新技术，为弹性陶瓷气凝胶的力学性能设计及调控提供了重要的理论和实验依据。

如上所述，纳米线构筑的弹性陶瓷气凝胶克服了传统陶瓷气凝胶的脆性，获得了压缩回弹性，在隔热材料领域展现了巨大的应用潜力，但其模量和强度较低，承载能力有限。因此，提升现有弹性陶瓷气凝胶的承载能力，是满足其实际应用的关键。

仔细分析，在微观结构上，纳米线气凝胶是由大量超长纳米线构筑而成，纳米线间依靠结点实现相互搭接，形成了纳米线、纳米线间搭接结点、以及气孔三种组织。在变形过程中，纳米线的变形和运动为气凝胶提供形变，气孔为纳米线的变形和运动提供空间，搭接结点通过约束纳米线变形和运动，为气凝胶提供强度/模量并保证其协同变形和回弹。因此，要想优化弹性陶瓷气凝胶的力学性能，其关键是协调好“纳米线变形和运动”与“约束”间的关系。

基于纳米线气凝胶的变形机理，首次提出采用可控化学气相浸渗技术，在纳米线间引入刚性搭接结点，获得了兼具低密度和高强度的陶瓷纳米线气凝胶，强度由 20kPa 提高到 1MPa 以上；发明了陶瓷纳米线气凝胶的部分热压技术，获得了具有二维层状序构的气凝胶，通过纳米线层的二维约束，大幅度提升了气凝胶强度至 10MPa 级，是当前气凝胶强度的 50 倍；建立了基于墨水直写 3D 打印多孔碳纤维模板，结合前驱体浸渍裂解、化学气相反应和高温氧化除碳，制备复杂形状和周期性点阵结构弹性 SiC 纳米线气凝胶的新方法，揭示了周期性点阵结构 SiC 纳米线气凝胶桁架单元的“受约束程度”和“变形模式”对其力学性能的影响规律，获得兼具高比强度 (15.94 kPa/(mg·cm<sup>-3</sup>)) 和高回弹率 (70~90%) 的八面体点阵结构 SiC@C 纳米线气凝胶。

**发明点三：**明晰了弹性硅基陶瓷气凝胶独特的纳米线三维网络结构与组分对其隔热、透波、吸波性能的协同强化机制，发明了系列高效隔热、隔热-透波、隔热-吸波一体化多功能陶瓷气凝胶，为未来结构-功能一体化热防护材料研发提供了关键技术支撑。

传统陶瓷气凝胶由于其超高的气孔率和超低的导热系数，主要应用于隔热领域。本项目发明的弹性硅基陶瓷气凝胶，是一种由超细超长的硅基陶瓷 (SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 纳米线构筑而成的

高气孔率、大比表面积三维网络结构。同时，SiC 是一种半导体材料， $\text{Si}_3\text{N}_4$  具有透波功能，如何发挥硅基陶瓷纳米线气凝胶独特的组分和结构优势，拓展其多功能性，是实现其价值潜力的基础。

为此，本项目基于弹性陶瓷气凝胶独特的纳米线三维网络结构，通过成分、结构设计，优化了其隔热性能，拓展了其在吸波等领域的功能应用：

(1) 借助陶瓷纳米线气凝胶的取向冷冻干燥技术，在陶瓷气凝胶中，构筑了由纳米线组装而成的定向管状孔结构，通过各向异性多级结构设计，在气凝胶内部形成了：宏观高气孔率；微观各向异性导热和长热流传输路径；纳观非晶和高密度层错热阻界面。上述多尺度热流屏障，实现了气凝胶隔热性能的大幅度提升，热导率仅为  $0.014\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，约为空气热导率的一半，获得了高效隔热陶瓷气凝胶；

(2) 建立了高纯度氮化硅纳米线气凝胶制备技术，利用高纯度硅蒸汽和高纯氮气之间的化学反应，实现了氮化硅纳米线气凝胶的纯化，借助气凝胶的高气孔率三维网络结构，实现了接近空气的透波性能，其介电常数仅为  $1.00\sim 1.04$ ，介电损耗为  $0.001\sim 0.004$ ，同时兼具优异的隔热性能，获得了隔热-透波一体化气凝胶；

(3) 厘清了气凝胶纳米线三维网络中多组分界面协同增强的吸波机理，提出了利用透波/吸波双相协同，同步优化阻抗匹配和衰减损耗，提升材料吸波性能的新思路，建立了陶瓷气凝胶的两相共生化学气相沉积技术，通过氩气和氮气生长气氛的交替变化，获得了  $\text{Si}_3\text{N}_4$  纳米线/SiC 纳米线复合气凝胶，及交替层状  $\text{Si}_3\text{N}_4$  /SiC 纳米线气凝胶等系列宽频吸波气凝胶，其吸波频段宽度达  $8.4\text{GHz}$ ，最高使用温度高达  $1000^\circ\text{C}$ ，同时兼具低热导率 ( $0.03\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )，实现了高温隔热-宽频吸波一体化。上述关键技术为弹性陶瓷气凝胶的多功能应用奠定了实验和理论基础。

**发明点四：**针对类化学气相沉积过程中，纳米线生长及自组装对设备温度场和气氛场均匀性的特殊需求，率先研发出具有自主知识产权的国内首台高温旋转样品台气压烧结炉，解决了高温、高压下样品台的回转及密封问题，为高性能弹性硅基陶瓷气凝胶的制备提供了关键装备保障。

本项目采用陶瓷气压烧结炉，实现了弹性陶瓷气凝胶的类 CVD 制备，大幅度降低制备成本。但在弹性陶瓷气凝胶制备过程中，由于常规气压烧结炉内温度及气氛不均匀，导致纳米线生长及自组装过程难以控制。

为此本项目创造性地提出通过烧结过程中炉内样品台旋转，实现温度场和气氛场的均匀性。经反复调研，当时国内外均没有该类设备可供采购。于是项目组通过多层迷宫式结构设计控制保温层的间隙和对流、采用高压反应釜密封结构结合水冷，解决高压容器的回转密封、利用特制空心轴液压缸与炉内热电偶连接，解决进出热电偶的移动等关键技术难题，率先研发出具有自主知识产权的国内首台高温旋转样品台气压烧结炉。该思路除可应用于弹性陶瓷气凝胶的制备，经过改进，还可应用于其他气氛、真空、热压烧结炉，有效解决炉内温度均匀性问题，具有重要的使用价值。

## 四、客观评价

（限 2 页。围绕创新性、应用效益和经济社会价值进行客观、真实、准确评价。填写的评价意见要有客观依据，主要包括与国内外相关技术的比较，国家相关部门正式做出的技术检测报告、验收意见、鉴定结论，国内外重要科技奖励，国内外同行在重要学术刊物、学术专著和重要国际学术会议公开发表的学术性评价意见等，可在附件中提供证明材料。非公开资料（如私人信函等）不能作为评价依据。）

### 1. 与国内外技术的比较

陶瓷材料具有耐高温、抗氧化、耐磨损、高强度、轻质等优点，是飞行器高温构件的候选材料。陶瓷气凝胶是一类气孔率大于 90% 的固体材料，具有超低的密度和超低的导热系数，又因其兼具陶瓷材料的高温化学稳定性，是最为理想的高温隔热材料之一。自上世纪 30 年代氧化硅气凝胶问世以来，逐渐引起了广泛的关注，是目前高温隔热材料研究的重点之一。相关研究主要集中在氧化硅气凝胶体系，该类气凝胶由脆性的非晶氧化硅纳米颗粒组成，纳米颗粒之间仅靠缩颈实现搭接，造成气凝胶强度低、脆性大的缺点；同时，当温度大于 650℃ 时，氧化硅纳米颗粒发生烧结，造成气凝胶体积严重收缩，耐温性不足，且功能性单一，这已成为限制其实际应用的瓶颈问题。

本项目研制的弹性硅基陶瓷气凝胶：1）通过基本组成单元的一维化，赋予气凝胶变形能力，克服脆性，获得了弹性；2）通过微观结构设计，约束纳米线的变形和运动，提高其变形和运动抗力，大幅提高了弹性陶瓷气凝胶的强度，解决了陶瓷气凝胶大变形和高承载的矛盾；3）通过结构与组分，实现了高效隔热、隔热-透波、隔热-吸波等功能特性的协同优化，拓展了功能性应用；4）研发出具有自主知识产权的国内首台高温旋转样品台气压烧结炉，突破了国外专利封锁。

该项目获授权国家发明专利 28 件，其中转化 2 件，授权使用 1 件，相关成果获得了重要应用。

### 2. 第三方检测评价

研发的密度为 8mg/cm<sup>3</sup> 的 Si<sup>3</sup>N<sup>4</sup>/SiC 全陶瓷气凝胶材料，经中国电子科技集团公司第 33 所测试，结果如下：采用弓形法测试 200 mm×200 mm 样件，当厚度为 3.2mm 时，室温下有效吸波频宽达到 8.4GHz，最小反射损失为-45dB；室温至 1000℃，有效吸波带宽能够完全覆盖 X 波段（8.2-12.4 GHz）。此外，该气凝胶还具有陶瓷材料耐高温和抗腐蚀的特点，作为吸波材料，可望在高温(1000℃)、腐蚀、振荡等恶劣环境中使用。

### 3. 国内外重要科技奖励

该项目主要成果获 2023 年度陕西高校科学技术研究优秀成果一等奖，项目执行过程中，团队被评陕西省科技创新团队，培养多名发展前景良好的青年人才，获美国陶瓷学会 JACerS 2<sup>nd</sup> Century Trailblazers Finalist（全球 10 位）、陕西省优秀博士学位论文、中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛陕西赛区金奖、第四届全国科学实验展汇演活动一等奖等，第一完成人获 2018 年国家教学成果二等奖（2/8）。

### 4. 相关成果在国际一流期刊发表并获得广泛引用，产生了重要的国际国内影响力

该项目在 Nature Communications, Science Advances, ACS Nano, Nano Letters 等知名期刊发表论文 40 篇，SCI 收录 40 篇，2 篇入选 ESI 高被引论文，论文他引 2700 余次，研究成果得到国内外院士专家的广泛认可，产生了重要的学术影响。

1) ACS Nano 以“让陶瓷气凝胶可压缩”为题进行专栏报道，称本项目：“开发了一种碳化硅纳米线气凝胶，该气凝胶具有优异的弹性、柔性...完全不同于传统碳化硅陶瓷材料的脆性.....这种材料足够轻，可以立在蒲公英种子上而不会压缩它，并且足够柔韧，可以卷起和展开而不会破损...该材料具有优异的耐高温性能和隔热性能”。（附件 4，其它客观性评价，ACS Nano 2018, 12, 3056）

2) 苏黎世联邦理工学院 Raffaele Mezzenga 教授在综述中高度评价代表性论文 1 所制备的 SiC

纳米线气凝胶，认为“其克服了传统陶瓷气凝胶的脆性问题”，并表示“其优异的性能在隔热领域极具应用潜力”。（附件 4，代表性引文 1， Gao Wei, et al. Progress in Materials Science 2022, 125, 100915）

3) 美国科学院院士、材料学家崔屹教授与国家杰出青年基金获得者麦立强教授在其合作综述中高度评价代表性论文 1，认为“SiC 纳米线（气凝胶）具有低密度、高孔隙率以及优异的抗疲劳性能”。（附件 4，代表性引文 2， Zhou Guangmin, et al. Chemical Reviews 2019, 119, 11042）

4) 中国科学院朱美芳院士在其综述中：大篇幅原图引用代表性论文 1，并指出“所制备的 SiC 纳米线气凝胶具有极低的密度，而这种极细的纳米线很难被其他方法制备出来，且所制备出的纳米线的直径分布更为均匀”；原图引用代表性论文 2，认为“得益于提高的阻抗匹配以及多尺度的能量吸收机理，SiC@C 气凝胶具有优异的吸波性能”。（附件 4，代表性引文 3， Jia Chao, et al. Advanced Fiber Materials 2022, 4, 573）

5) 需求单位——航天材料及工艺研究所师建军研究员在其综述论文中评价代表性论文 1、2、3，认为“王红洁课题组通过化学气相沉积法制备出超薄、超轻质、超柔韧的 SiC 陶瓷气凝胶材料，其孔隙率高达 99.8%，表现出优异的耐高温（~1200℃）和隔热性能”。（附件 4，其它客观性评价，师建军等. 材料导报 2022, 36, 22）

6) 纳米材料学专家、美国加州大学洛杉矶分校终身教授段镶锋，在其综述中评价代表性论文 1，认为“课题组开发的模板辅助 CVD 生长的 SiC 纳米线气凝胶具有高的变形能力，最高可达 60% 应变，且几乎没有永久变形。同时，还具有优异的高温抗循环压缩能力和隔热性能”；评价代表性论文 2，“气凝胶具有超低的热导率，体现了各向异性多级结构设计策略的优势”（附件 4，代表性引文 5， Xu Xiang, et al. Materials Today 2021, 42, 162）

7) 世界陶瓷科学院院士，美国陶瓷学会会士和欧洲陶瓷学会荣誉会士 Young-Wook Kim 教授评价代表性论文 1，认为“所制备的 SiC 纳米线气凝胶具有极低的导热系数”。（附件 4，其它客观性评价， Kang Eun Seo, et al. Journal of the European Ceramic Society 2021, 41, 1171）

8) 英国剑桥大学 Tawfique Hasan 教授，欧洲科学院院士、比利时那慕尔大学苏宝连教授在其合作的综述论文中评价代表性论文 2，认为“得益于非氧化物陶瓷优异的高温稳定性，该类气凝胶可在更高的温度下使用”。（附件 4，代表性引文 4， Junzong Feng, et al. Chemical Society Review 2021, 50, 3842）

9) 澳大利亚新南威尔士大学 Anthony Chun Yin Yuen 教授评价代表性论文 2，认为“王红洁教授团队制备的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 纳米带阻燃气凝胶具有良好的极性介电常数和损耗，具有较高的孔隙率。同时，该气凝胶能保持较高的电磁波透过性能，适用于电磁信号的应用发射绝缘体”。（附件 4，其它客观性评价， Yang Wen-Jie, et al. Composites Part B 2022, 237, 109866）

## 五、应用情况和效益

### 1. 应用情况（限 3 页）

#### （1）专利成果转化

2023 年，本项目团队的两项核心专利——ZL202210087356.8《一种耐高温的轻质高强多孔陶瓷及其制备方法》和 ZL201811626361.1《一种氮化硅纳米带气凝胶及其制备方法》转让至深圳紫荆未来科技有限公司，合同金额合计人民币 100 万元。基于项目团队发明的高纯度氮化硅气凝胶的制备技术及力学性能强化方法，深圳紫荆未来科技有限公司成功开发出兼具高强度和高气孔率的多孔陶瓷气凝胶，解决了陶瓷气凝胶长期存在的脆性问题及“强度与气孔率难以兼得”的技术难题。

#### （2）专利成果授权使用

2024 年以来，上海辰荣电炉股份有限公司经西安交通大学授权，使用西安交通大学《一种高温旋转料台气压炉》（ZL2021106631197）专利技术，开发高温旋转样品台气压烧结炉。利用该技术开发的气压烧结炉，最高工作温度可达 2200℃，样品台回转速度 10~30 转/分钟可调，工作压力为 9.8MPa，大幅度提升炉内温度均匀性。除此而外，该技术还可应用于各类真空烧结炉、气氛烧结炉。

#### （3）高温吸波全陶瓷气凝胶

本项目团队向中国电子科技集团公司第三十三研究所提供了尺寸为 200 mm×200 mm 的  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$  全陶瓷气凝胶样件，经综合考核与测试，验证了本项目团队所研制的  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$  全陶瓷气凝胶在室温至 1000℃高温下的有效吸波带宽能给完全覆盖 X 波段（8.2-12.4 GHz）。突破了传统吸波材料在高温环境下失效的局限，有望在高温（1000℃）、腐蚀及振荡等恶劣环境中使用。

#### （4）航天热密封用超弹性气凝胶

2021-2023 年，为解决传统动态热密封材料耐温性不足的难题，采用超弹性陶瓷气凝胶的制备技术，开展了弹性陶瓷气凝胶作为高温动态热密封材料的相关研究，结果表明，超弹性陶瓷气凝胶在高温（1400℃）低氧分压下具备优异的压缩回弹性，在解决动态热密封材料耐高温问题方面具备显著优势，支撑了新型飞行器关键热密封部件的研制。

#### （5）相变介质/气凝胶复合材料

2022 年，团队开发的相变介质/陶瓷气凝胶复合材料，经中国航天科技集团有限公司第四研究院 401 所，西安航天动力测控技术研究所试验测试中心的热载荷试验，相变工质/陶瓷气凝胶复合材料在 200kW/m<sup>2</sup> 石英灯加热 400s 条件下，样件背面温度不超过 350℃，具有明显的主动热防护效果。



## 2. 经济效益和社会效益（限 3 页）

本项目成果已实现专利成果的成功转让，并在企业形成了年产值超过 8000 万元的陶瓷气凝胶产品产线，推动了相关产业规模化发展，产生了持续而显著的经济效益。同时，项目团队自主研发了用于制备单晶柔性陶瓷气凝胶的专用装备，即全球首台高温旋转样品台气压炉，解决了单晶柔性陶瓷气凝胶在规模化生产中的工艺瓶颈问题，降低了制造成本，提升了产线稳定性，为成果的产业化落地提供了完整的技术链和装备支撑。通过技术许可的方式交由上海辰荣电炉股份有限公司生产，有效带动了上下游产业链的发展。在应用层面，该系列成果在航天用全陶瓷气凝胶吸波隔热一体化材料、超弹性陶瓷气凝胶材料及相变介质/气凝胶复合材料的性能验证，有效支撑了我国在高温热防护、电磁隐身材料的自主保障能力。该成果不仅带动了相关企业的技术升级和产业链完善，还为航空航天等关键领域提供了坚实的材料基础和技术支撑，具有重要的经济和社会效益。

## 六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种陶瓷气凝胶的低成本制备方法	中国	ZL2018116204149	2021-9-15	4804695	西安交通大学	王红洁, 苏磊, 卢德, 牛敏, 彭康
2	发明专利	一种氮化硅纳米带气凝胶及其制备方法	中国	ZL2018116263611	2021-08-09	4668203	深圳紫荆未来科技有限公司	王红洁, 于志明, 卢德, 苏磊, 李明主
3	论文	一种大尺寸碳化硅气凝胶及其制备方法	中国	ZL2018116262036	2021-08-03	4654442	西安交通大学	王红洁, 卢德, 苏磊, 牛敏, 蔡志新
4	发明专利	一种耐高温的轻质高强多孔陶瓷及其制备方法	中国	ZL2022100873568	2023-01-11	5864181	深圳紫荆未来科技有限公司	王红洁, 卢德, 庄磊, 苏磊, 牛敏, 彭康
5	发明专利	一种超弹性气凝胶及其制备方法	中国	ZL2022100873676	2022-11-02	5641088	西安交通大学	王红洁, 卢德, 庄磊, 牛敏, 苏磊, 彭康
6	发明专利	一种多级结构弹性碳化硅纳米线气凝胶及其 3D 打印制备方法和应用	中国	ZL2022103424645	2023-09-28	6564131	西安交通大学	王红洁, 郭鹏飞, 苏磊, 卢德, 徐亮
7	论文	一种可压缩回复的氮化硅气凝胶及其制备方法	中国	ZL2018101722234	2020-11-24	4211184	西安交通大学	王红洁, 苏磊, 李明主, 牛敏, 彭康

8	发明专利	一种透波/吸波复合层状气凝胶及其制备方法和应用	中国	ZL2021102966083	2021-11-19	4871112	西安交通大学	王红洁, 蔡志新, 苏磊, 牛敏, 卢德, 彭康
9	发明专利	一种石墨烯/碳化硅三维复合气凝胶的制备及其负载二硫化钼电催化剂	中国	ZL2021102646297	2022-05-31	5306651	西安交通大学	王红洁, 万鹏飞, 彭康, 牛敏, 苏磊, 庄磊, 徐亮
10	发明专利	一种高温旋转料台气压炉	中国	ZL2021106631197	2023-02-23	5929122	西安交通大学	王红洁, 卢德, 贾书海, 彭康, 苏磊, 牛敏, 庄磊

## 七、主要完成人情况表

姓 名	王红洁	排 名	1
行政职务	材料学院副院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 项目总负责人，负责项目的整体设计、重要科学问题的提出、体系的构建与完善，指导研发了弹性陶瓷气凝胶的制备技术，揭示了弹性陶瓷气凝胶的弹性变形机制，提出了弹性陶瓷气凝胶的性能优化设计，指导了弹性陶瓷气凝胶的多功能探索研究和特色装备研发，对 4 个重要发明点均有重要贡献，是主要知识产权 1~10 的第一发明人。基于该项目，建设并发展了以陶瓷气凝胶及其多功能性应用为主要研究方向的研究团队，指导培养了一批优秀研究生和青年教师。			

姓 名	苏磊	排 名	2
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 对发明点 1、2、3 、4 做出重要贡献，是主要知识产权 1~10 的发明人，与第一完成人共同设计并完善了弹性陶瓷气凝胶的制备技术，负责弹性陶瓷气凝胶的力学、隔热性能和吸/透波性能等工作，参与了旋转气压炉特色装备研发。			

姓 名	彭康	排 名	3
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 对发明点 1、2、3、4 做出主要贡献，是主要知识产权 1、4、5、7、8、9、10 的共同发明人，与第 1 完成人共同完成了弹性陶瓷气凝胶制备技术、功能化技术等研究。			

姓 名	牛敏	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
对本项目主要学术贡献： 对发明点 1、2、3、4 做出主要贡献。是主要知识产权 1、3、4、5、7、8、9、10 的共同发明人，与第 1 完成人共同设计并制备了用于 SiC、Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 纳米线生长的聚硅氧烷前驱体溶胶，发明了结合前驱体浸渍裂解、类化学气相反应制备 SiC 块体气凝胶的方法。			

姓 名	卢德	排 名	5
行政职务	无		
技术职称	助理教授		
工作单位	西安交通大学		
完成单位	西安交通大学		
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>对发现点 1、2、3、4 做出主要贡献，是主要知识产权 1、2、3、4、5、6、8、9、10 的共同发明人，与第 1 完成人共同优化了硅基陶瓷纳米线气凝胶的制备技术、力学性能优化技术和特色装备研发。</p>			

## 八、主要完成单位情况表

单位名称	西安交通大学
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安交通大学是本项目的唯一完成单位，为本项目的顺利实施提供了所必需的实验设备、软硬件设施和国际化的平台。依托该平台，近八年来，项目团队在弹性陶瓷气凝胶领域开展了深入系统的创新性研究工作，取得了优异的系列性成果和广泛的国际国内影响。依托西安交通大学提供的成果推广和转化平台，该项目相关技术和成果获得了推广和应用。</p>	

## 完成人合作关系说明

项目完成人全部为西安交通大学的教职工，其中第二、四、五完成人为第一完成人在西安交通大学培养的学生并留校参加工作；第三完成人为第一完成人在西安交通大学培养的青年教师。



完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/ 项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果	证明材料
1	合作研究	王红洁 /1+苏磊 /2+彭康 /3+牛敏 /4+卢德 /5	2015	今	主要知识产权 1、4、9、10	专利证书
2	合作研究	王红洁 /1+苏磊 /2+彭康 /3+牛敏 /4	2017	今	主要知识产权 8	专利证书
3	合作研究	王红洁 /1+苏磊 /2+彭康 /3+卢德 /5	2017	今	主要知识产权 5、6	专利证书
4	合作研究	王红洁 /1+苏磊 /2+牛敏 /4	2015	今	主要知识产权 3、7	专利证书
5	合作研究	王红洁 /1+苏磊 /2+卢德 /5	2017	今	主要知识产权 2	专利证书