

自然科学奖公示：

项目名称	超高温碳纤维增强碳-陶瓷复合材料研究及其应用
提名者	中国科学院沈阳分院
提名意见	<p>我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目符合填写要求。按照要求，我单位和完成人所在单位都已对该项目进行了公示，目前无异议。</p> <p>该项目以超高温碳纤维增强碳-陶瓷复合材料研究为核心，以独特、新颖的视角对碳-陶瓷复合材料的结构设计、高效制备技术以及工程化应用等进行了深入研究，提出了“超高温零烧蚀”的设计思想，利用超高温陶瓷改性C/C、C/SiC复合材料，大幅提升了材料在超高温氧化环境下的使用温度；揭示出“极性中间基团”在电磁场驱动下加速沉积的物理本源，并据此发明了“直热式化学气相渗制备技术”，建立了高性能碳纤维增强碳-陶瓷复合材料低成本、短周期的可控制备方法；提出了碳纤维增强碳-陶瓷复合材料“宏观构筑”的思想，实现了轻量化、高强度、抗烧蚀的多功能集成，开拓了碳纤维增强碳-陶瓷复合材料的设计新途径。上述成果为本学科及其他相关学科的发展做出了重要贡献，在Carbon、Corrosion Science、Journal of American Ceramic Society等国际期刊上发表了系列高水平论文，受到同行的广泛关注和认可，8篇代表性论文他引456次。</p> <p>上述研究成果已广泛应用于国防和国民经济建设中，研制的飞行器外防热用机头锥、翼前缘、盖板瓦、螺栓，发动机用喷管等构件通过地面风洞考核应用于多个重点国防型号，研制的发热体、扩压器工装、料盘等批量应用于真空热处理、粉末冶金等多个行业。</p> <p>对照省自然科学奖授奖条件，提名该项目为辽宁省自然科学奖 <u>二</u> 等奖。</p>
项目简介	<p>该项目属于材料科学领域之无机非金属材料学科。碳纤维增强碳-陶瓷复合材料是高速飞行器机身及动力系统关键的防热-结构一体化材料，如何提升其超高温抗氧化、抗烧蚀性能以及综合力学性能，并发展相应的控制制备技术直接决定高速飞行器的发展和突破。该项目在国家自然科学基金委、国防科工局、装备发展部等多个项目的支持下，针对超高温碳纤维增强碳-陶瓷复合材料的设计与制备、性能评价及应用等关键问题开展了系统深入的研究，在结构设计、快速可控制备、氧化烧蚀机理、大尺寸防热构件开发等方面取得了系列创新成果，与此相关的8篇主要论文他引456次，其中发表在《Mat Sci & Eng A》（他引203次）、《Corros Sci》（他引64次）的文章分别引领了超高温陶瓷改性碳基、SiC基复合材料的研究方向，极大地推进了超高温碳纤维增强碳-陶瓷复合材料的发展，相关成果在国内外产生了重要影响，并引起了广泛关注。所研制的超高温碳纤维增强碳-陶瓷复合材料现已成功应用于飞行器、发动机等多个重点国防型号，并在真空热处理、粉末冶金等多个行业中获得批量应用，取得了较好的社会效益和经济效益。</p> <p>主要科学发现与价值如下： 1) 首次提出了“超高温零烧蚀”的设计理念，利用超高温陶瓷改性C/C、C/SiC复合材料，大幅提升了材料在超高温氧化环境下的使用温度。从超高温陶瓷与SiC综合性能耦合和多尺度结构调控出发，设计并研制出具有近零烧蚀和零烧蚀特性的系列新型复合材料</p>

	<p>料，其长时抗氧化、抗烧蚀能力大幅提升至2000℃以上；揭示出高熔点氧化物骨架与低氧扩散率硅酸盐网络结构的协同作用是烧蚀性能提升的物理本质，并提出了M-Si-B-C（M=Zr、Hf、Ta）多个体系的超高温氧化烧蚀机理。</p> <p>2）揭示出“极性中间基团”在电磁场驱动下加速沉积的物理本源，并据此发明了“直热式化学气相渗制备技术”。发现了电磁场驱动下极性中间基团的有序加速运动及其与通电纤维表面有效碰撞几率的增加是热解碳和SiC基体快速沉积的物理本质；揭示出多场耦合下热解碳和SiC精细结构的演化规律及其对材料性能的影响；建立了高性能碳-陶瓷复合材料低成本、短周期的快速可控制备方法，C/C、C/SiC复合材料制备周期由原来的800~1000小时分别缩短至20和25小时。</p> <p>3）提出了碳纤维增强碳-陶瓷复合材料“宏观构筑”的思想，实现了轻量化、高强度、抗烧蚀的多功能集成。针对高速飞行器若干部位对防热材料不同的实用需求，通过建立层状结构复合材料的力学模型，从宏观结构设计出发构建了多种层状结构的非均质碳-陶瓷复合材料，在保障结构强度及抗烧蚀的基础上密度降低12-21%，开拓了碳纤维增强碳-陶瓷复合材料的设计新途径。</p>
客观评价	<p>该项目的主要科学发现被来自国际、国内的专家学者发表在 <i>Carbon</i>、<i>Corros. Sci.</i>、<i>J. Eur. Ceram. Soc.</i>等期刊上的论文广泛引用和正面评价，8篇主要论文他引456次（其中一篇论文他引次数≥200次，三篇论文他引次数≥50次），包括10余篇综述论文的正面引用评价；基于所取得的研究成果产生的广泛影响，该项目的主要完成人还受邀为 <i>J Mater Sci Technol.</i>等期刊围绕相关主题撰写了综述论文，受到广泛关注。同时积极推进应用产出，研制的相关材料已广泛应用于国防和国民经济建设，受到用户的高度评价。</p> <p>（1）对科学发现内容（一）（代表性论文1、2、3、4）的代表性评价</p> <p>[1] 英国拉夫堡大学 A.Paul 博士在其 <i>J. Eur. Ceram. Soc.</i>（2013, 33, 423）研究论文中，对超高温陶瓷改性 C/C 相关工作进行了详细介绍：“Tang 等[8]采用粉末渗透工艺，将 ZrB₂、SiC、HfC、TaC 等引入到碳纤维预制体内制备了一系列超高温陶瓷基复合材料，研究了不同条件下的氧乙炔烧蚀性能。当温度 1800℃时，C/C-ZrB₂-SiC 最优；然而在温度 2700℃时，C/C-ZrB₂ 复合材料性能最为优异；……。”（文献 8 为代表性论文 1，参见必备附件 2 第 1 篇）</p> <p>[2] 著名陶瓷基复合材料专家、中南大学熊翔教授在其 <i>Solid State Sci.</i>（2011, 13, 2055）研究论文中介绍了改性 C/C 相关工作：“Tang 等人的研究表明，在 C/C 复合材料内引入 SiC 可以有效提高材料的抗烧蚀性能，这主要得益于 SiO₂ 低的氧扩散率……[10]。”（文献 10 为代表性论文 2，参见必备附件 2 第 2 篇）</p> <p>[3] 意大利陶瓷材料科学研究所 Antonio Vinci 博士在其 <i>Corros. Sci</i>（2017, 123, 129）研究论文中对代表性论文 5 中陶瓷基复合材料研究工作进行多次引用：“Tang 制备的含有 4-18%ZrB₂ 基体的 C/SiC 复合材料……，在 1000℃以上比较了其 C/SiC 的抗氧化性能……[23]”，“Tang 等[23]研究了 C/SiC-ZrB₂ 的氧化性能……。”（文献 23 为代表性论文 3，参见必备附件 2 第 3 篇）</p> <p>[4] 美国著名材料学家、美国陶瓷学会会刊主编、密苏里科技大学 William G. Fahrenholtz 博士在其 <i>J. Eur. Ceram. Soc.</i>（2019, 39, 780）研究论文中指出：“Tang 等[7, 8] 通过在 C/SiC 中引入 4-18 vol.% 的 ZrB₂ 基体，提高了材料的抗氧化性能。材料性能的提高主要得益于 B₂O₃ 和 SiO₂ 的协同抗氧化作用，……。”（文献 7 和 8 分别为代表性论文 1 和 4，参见必备附件 2 第 4 篇）</p> <p>[5] 美国国家航空航天局 Sylvia M. Johnson 博士在 2008 年超高温陶瓷会议上归纳了全球开展超高温陶瓷复合材料研究的四家单位：CAS，Shenyang（该团队），University of Arizona，MATECH/GSM Inc. California，AFRL，并对该团队的工作进行了重点且正面</p>

的评述。(参见其他附件 4 第 1 篇)

[6] 在航天科技第一研究院、中航工业成都飞机设计研究所等单位出具的应用证明中提到, 该团队解决了超高温碳纤维增强碳-陶瓷复合材料改性技术、螺栓连接技术以及复杂结构成型等关键技术, 对国家重大科技工程的立项、实施方案论证和关键技术攻关起到了重要支撑作用, 为推动了飞行器的发展做出了突出贡献, 现已应用于机头锥、翼前缘、端头体、盖板瓦等 (参见应用证明 1~3)。

(2) 对科学发现内容 (二) (代表性论文 3、5、6) 的代表性评价

[1] 世界陶瓷基复合材料奠基人之一, 法国著名化学家、物理学家 Roger Naslain 教授等在《Ceramic Engineering and Science Proceedings》一书第 27 卷 2 期《The CVI process: state of the art and perspective》一文将直热式化学气相渗称为一种新型的 CVI 技术 (New CVI-techniques), 并对其工艺方法和沉积机理进行了详细阐述。在介绍工艺方法时, 指出“在冷壁沉积空间内, 碳纤维通过焦耳效应对其进行通电加热, ……”。在介绍沉积机理时, 指出“……厚度方向上的温度梯度和电沉积现象, 使得 SiC 优先在预制体中心发生快速沉积, 沉积速度高达 0.33 $\mu\text{m}/\text{h}$ [54]。”(文献 54 为代表性论文 5, 参见必备附件 2 第 5 篇)

[2] 韩国首尔大学 Mohammadreza Shokouhimehr 教授在其 Ceram. Int. (2018, 44, 7334) 综述论文中多次引用代表性论文 5, 并指出: “Tang 等首次通过预制体成型技术将连续碳纤维引入到 ZrB₂ 陶瓷中, 并采用 HCVI 技术沉积 SiC 基体对纤维-粉末预制体进行致密化 [68]。碳纤维的引入显著改善了 ZrB₂-SiC 陶瓷材料的断裂韧性 [82] ……”。(文献 68 为代表性论文 3, 文献 82 为代表性论文 6, 参见必备附件 2 第 6 篇)

[3] 在航天科工沈阳航天新光、三院三十一所等单位出具的应用证明中提到, 该团队研制的碳纤维增强碳-陶瓷基复合材料现已装配于发动机, 显著提升了发动机的推力精度和可靠性; 研制的喉衬在超高温下表现出零烧蚀特性, 成为某冲压发动机耐热材料的首选方案; 研制的螺栓等应用于飞行器 (上述材料均由直热式化学气相渗、均热化学气相渗复合工艺制备)。(参见应用证明 1~6)。

(3) 对科学发现内容 (三) (代表性论文 7、8) 的代表性评价

[1] 著名碳基复合材料专家、中南大学黄启忠教授在其 Corros. Sci. (2016, 107, 9) 研究论文中指出: “将碳纤维引入到超高温陶瓷基体中……, 材料具有轻质、耐高温、高热导、好的热震性能等特点, 同时在 2000 $^{\circ}\text{C}$ 以上具有优异的结构强度和抗烧蚀性能 [5-7]。”(文献 7 为代表性论文 7, 参见必备附件 2 第 7 篇)

[2] 著名复合材料专家、西北工业大学李贺军教授等在其《硅酸盐学报》(2018,46,142) 综述论文中, 采用独立段落对代表性论文 8 中材料性能和氧化机理工作进行了详细阐述: “Hu 等[20]在 C/C 基体外层制备 SiC 中温自愈合组元内层和 B₄C-B₂O₃-SiO₂-Al₂O₃ 中低温自愈合复合组元外层, 表现出优异的中低温抗氧化性能……。600~700 $^{\circ}\text{C}$ 的抗氧化性主要是由于……; 800~1000 $^{\circ}\text{C}$ 时的抗氧化性主要是……。”(文献 20 为代表性论文 8, 参见必备附件 2 第 8 篇)

[3] 在航天科技第一研究院、中航工业成都飞机设计研究所等单位出具的应用证明中提到, 研制的螺栓 (C/C-SiC 三明治结构) 应用于飞行器。(参见应用证明 1~3)。

代表性论文专著目录 (不超过 8 篇)

序号	论文专著名称/刊名	年卷页码	发表时间 (年)	通讯作者 (含)	第一作者 (含)	国内作者	SCI 他	他引总	论文署名单位
----	-----------	------	----------	----------	----------	------	-------	-----	--------

	/作者	(xx年 xx卷 xx页)	月 日)	共同)	共同)		引 次 数	次 数	是否 包含 国外 单位
1	Ablation behaviors of ultra-high temperature ceramic composites/ Materials Science and Engineering A/ S.F.Tang, J.Y. Deng,S.J. Wang, W.C.Liu, K. Yang	2007年 465卷1 页	2007 年2 月14 日	邓景屹	汤素芳	汤素芳, 邓景屹, 王石军, 刘文川, 杨柯	175	203	否
2	Mechanical and ablation properties of 2D-carbon/carbon composites pre-infiltrated with a SiC filler/Carbon/ S.F. Tang, J.Y. Deng, W. C. Liu, K. Yang	2006年 44卷 2877页	2006 年7 月21 日	邓景屹	汤素芳	汤素芳, 邓景屹, 刘文川, 杨柯	60	66	否
3	Fabrication and characterization of an Ultra-high- temperature carbon fiber-reinforced ZrB ₂ -SiC matrix composite/Journal of the American Ceramic Society/ S.F.Tang, J.Y. Deng, S.J. Wang, W.C.Liu	2007年 90卷 3320页	2007 年5 月7 日	邓景屹	汤素芳	汤素芳, 邓景屹, 王石军, 刘文川	41	50	否
4	Comparison of thermal and ablation behaviors of C/SiC composites and C/ZrB ₂ -SiC composites/ Corrosion Science/S.F.Tang, J.Y. Deng, S.J. Wang, W.C.Liu	2009年 51期54 页	2008 年10 月17 日	邓景屹	汤素芳	汤素芳, 邓景屹, 王石军, 刘文川	53	64	否
5	Fabrication and microstructure of C/SiC composites using a novel heaterless chemical vapor infiltration technique/ Journal of the American Ceramic Society/ S.F. Tang, J.Y. Deng, H. F. Du, W. C. Liu, K. Yang	2005年 88卷 3253页	2005 年4 月6 日	邓景屹	汤素芳	汤素芳, 邓景屹, 王石军, 刘文川	11	13	否
6	Fabrication and characterization of C/SiC composites with large thickness, high density and near-stoichiometric matrix by heaterless chemical vapor infiltration/Materials Science and Engineering A/ S.F.Tang,J.Y. Deng,S.J. Wang,W.C.Liu	2007年 465卷 290页	2007 年2 月6 日	邓景屹	汤素芳	汤素芳, 邓景屹, 杜海峰, 刘文川, 杨柯	12	15	否

7	Ablation and mechanical behavior of a sandwich-structured composite with an inner layer of C _f /SiC between two outer layers of C _f /SiC-ZrB ₂ -ZrC/ Corrosion Science/ C.L. Hu, S.Y. Pang, S.F. Tang, S.J. Wang, H.T. Huang, H.-M. Cheng	2014 年 80 卷 154 页	2013 年 11 月 25 日	汤素芳	胡成龙	胡成龙, 庞生洋, 汤素芳, 王石军, 黄宏涛, 成会明	22	24	否
8	Long-term oxidation behavior of carbon/carbon composites with a SiC/B ₄ C-B ₂ O ₃ -SiO ₂ -Al ₂ O ₃ coating at low and medium temperatures/ Corrosion Science/ C.L. Hu, S.Y. Pang, S.F. Tang, Z. Yang, S.J. Wang, H.-M. Cheng	2015 年 94 卷 452 页	2015 年 2 月 28 日	汤素芳	胡成龙	胡成龙, 庞生洋, 汤素芳, 杨鸫, 王石军, 成会明	19	21	否
主要完成人情况		<p>1. 姓名：汤素芳</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名：第一 • 行政职务：课题组长 • 技术职称：研究员 • 工作单位：中国科学院金属研究所 • 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：项目主要负责人，共同提出了项目学术思想，组织了项目实施，主导了项目实验工作，对“重要科学发现”中各项科学发现均做出了创造性贡献，是全部代表性论文的作者，第 1、2、3、4、5、6 篇代表性论文的第一作者，第 7、8 篇代表性论文的通讯作者。 <p>2. 姓名：胡成龙</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名：第二 • 行政职务：无 • 技术职称：副研究员 • 工作单位：中国科学院金属研究所 • 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：项目参与人之一，开展了超高温陶瓷改性 C/SiC 复合材料的研究，制备出三明治结构、梯度夹层结构等多功能非均质碳-陶瓷复合材料，并开展了材料烧蚀机理、可重复使用特性等研究，同时参与了碳-陶瓷复合材料应用技术研究。对“重要科学发现”中第一项和第三项科学发现做出了创造性贡献，是第 7、8 篇代表性论文的第一作者。 <p>3. 姓名：邓景屹</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名：第三 • 行政职务：无 • 技术职称：研究员 • 工作单位：中国科学院金属研究所 							

	<ul style="list-style-type: none"> • 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：项目参与者之一，共同提出了超高温零烧蚀碳-陶瓷基复合材料和直热式化学气相渗制备技术的学术思想，对“重要科学发现”中第一项和第二项科学发现做出了重要贡献，是第1、2、3、4、5、6篇代表性论文的通讯作者。 <p>4. 姓名：刘文川</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名：第四 • 行政职务：无 • 技术职称：研究员 • 工作单位：中国科学院金属研究所 • 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：项目参与者之一，共同提出了直热式化学气相渗制备技术制备 C/C 复合材料的学术思想，对“重要科学发现”中第二项科学发现做出了创造性贡献；同时作为学术顾问对“重要科学发现”中第二项科学发现做出了贡献，是第1、2、3、4、5、6篇代表性论文的作者。 <p>5. 姓名：成会明</p> <ul style="list-style-type: none"> • 排名：第五 • 行政职务：研究部主任 • 技术职称：研究员 • 工作单位：中国科学院金属研究所 • 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所 • 对本项目贡献：项目学术顾问，共同提出了复合材料宏观构筑的学术思想，对“重要科学发现”中第一项、第三项科学发现做出了创造性贡献，是第7、8篇代表性论文的作者。
<p>完成人合作关系说明</p>	<p>第一完成人汤素芳为该项目的负责人，提出了项目的学术思想，并组织了项目的实施；第二完成人胡成龙为第一完成人指导的研究生，参与了项目的实施；第三完成人邓景屹为第一完成人的导师，提出了项目的部分学术思想，并部分参与了该项目的实施；第四完成人是该项目的技术顾问，提出了项目的部分学术思想并对其实施进行了指导；第五完成人成会明是该项目的学术顾问，提出了项目的部分学术思想并对其实施进行了指导，共同指导了研究生。</p> <p>该项目中，汤素芳、成会明和胡成龙合作时间为2010.9至今，在胡成龙于2015年7月完成博士学位后，一直保持合作关系，合著了该项目的代表性论文7、8；汤素芳和邓景屹合作时间为2001.9-2011.12，合著了该项目的1、2、3、4、5、6篇代表性论文；汤素芳和刘文川合作时间为2001.9-2008.12，合著了该项目的1、2、3、4、5、6篇代表性论文。</p>