

我校参与完成的项目“粉末放电等离子烧结多场耦合下蠕变致密化动力学”拟由湖南省教育厅提名 2021 年度湖南省自然科学奖。根据《关于做好 2021 年度湖南省科学技术奖提名工作的通知》要求，现将项目有关信息予以公示，公示期为 2021 年 9 月 10 日—2021 年 9 月 16 日。

公示期内，任何个人或单位对项目有关信息持有异议的，请以书面形式实名向科学技术处反映，并提供必要的证据材料，以便于核实查证。提出异议的个人或单位须在书面材料上签名或盖章，并提供有效联系方式。凡匿名、冒名和超出时限的异议不予回应。

联系人：朱宁远，电话：0797-8312061。

2021 年度湖南省自然科学奖提名公示信息

| | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 项目名称 | 粉末放电等离子烧结多场耦合下蠕变致密化动力学 |
| 完成单位 | 中南大学、江西理工大学 |
| 提名意见 | <p>放电等离子烧结（SPS）作为一种粉末冶金快速烧结技术，其独特的升温方式及多场耦合作用，在难熔金属、高性能陶瓷制备领域具有显著优势，被视为下一代新型粉末冶金材料致密化技术。然而，由于“粉末在压力-温度-电流多场作用下致密化机理”等共性基础科学问题没有明确，使 SPS 烧结过程的致密度、孔隙率、晶粒度预测和控制成为难题。针对 SPS 烧结过程致密化理论基础研究相对薄弱、理论体系有待完善、瓶颈技术有待突破的现状，中南大学及江西理工大学自 2015 年起，围绕 SPS 粉末蠕变致密化动力学数理模型、SPS 粉末蠕变致密化的微观机制及粉末致密化过程协同调控微孔及晶粒长大原理开展了深入研究，建立了多场耦合粉末 SPS 致密化动力学模型，阐明了多场耦合蠕变模型粉末致密化微观机制，揭示了 SPS 微孔湮灭与晶粒长大制衡机制。在蠕变致密化理论模型及机理的指导下，项目团队提出了“密度-梯度温度-控制机制”新思路，解决了 SPS 材料的难致密和高温下晶粒异常长大的技术难题；发表的 5 篇代表性论文（其中 1 篇 ESI 前 1% 高被引论文）SCI 他引百余次；形成了金属-非金属粉末 SPS 快速致密化理论-技术-应用的完整体系，研发的超细晶碳化硼材料零件已成功应用于天舟货运飞船、神舟系列载人飞船和空间站等。</p> <p>提名该项目为湖南省自然科学奖二等奖。</p> |
| 项目简介 | <p>本项目属于粉末冶金领域，为应用基础研究。</p> <p>作为一种粉末冶金快速烧结技术，放电等离子烧结（SPS）独特的升温方式及多场耦合作用，在难</p> |

熔金属、高性能陶瓷制备领域具有显著的优势，被视为下一代新型粉末冶金材料致密化技术。然而，由于“粉末在压力-温度-电流多场作用下致密化机理”共性基础科学问题没有得到揭示，SPS 烧结过程致密度、孔隙率、晶粒度的预测和可控成为难题。针对 SPS 烧结过程致密化理论基础研究相对薄弱、理论体系有待完善、瓶颈技术有待突破的现状，项目团队从 2015 年开始，在国家自然科学基金、省科技创新计划等项目的持续支持下，围绕 SPS 粉末蠕变致密化动力学数理模型、SPS 粉末蠕变致密化的微观机制及粉末致密化过程协同调控微孔及晶粒长大原理展开了深入研究，研究成果使学术界对 SPS 粉末烧结机理产生了新的认识，主要发现如下：

(1) SPS 致密化动力学模型：依据电迁移理论和热激活扩散理论建立了电迁移作用下的原子扩散动力学模型，揭示了电流促进粉末致密化的本质，考虑烧结助剂引起的应力偏差对粉末致密化的贡献，构建了综合考虑温度场、应力场和电磁场的多场耦合致密化物理解析模型，结合模型从电场对原子扩散和位错运动的影响角度揭示了电流促进粉末致密化的机理。

(2) 蠕变致密化过程微观机制：发现粉末致密化蠕变机制与动力学参数 n 、 Q 之间的定量关系；通过显微表征证实模型预测的粉末 SPS 蠕变致密化控制机制在低应力指数阶段为晶界扩散机制，高应力指数阶段为位错滑移/攀移机制。构建了粉末 SPS 烧结“应力指数-晶粒尺寸-蠕变机制”图，快速获得“应力-温度-晶粒-致密化”四者平衡规律，为制备高致密细晶材料奠定了理论基础。

(3) 微孔与晶粒协同调控原理：发现 SPS 致密化过程中材料内部微观组织演化的多维相关性，揭示了材料“密度-温度-晶粒演化”之间的关系，同时发现 SPS 成形碳化硼材料形成的纳米孪晶及层错等与细晶强化共同作用，材料强韧性显著提升，进一步提出了“脉冲应力-梯度温度”多级强韧化原理。实现高致密化的同时可抑制晶粒长大，制备出超致密超细晶材料。

本项目 8 篇代表作他引 153 次，包括 1 篇 ESI 前 1% 高被引论文；项目团队在粉末冶金致密化制备领域发表 SCI 论文 35 篇；获授权发明专利十余项，研究成果获得了国际上 38 个国家/地区的 118 个研究机构引用认可。长江学者、国家杰青，武汉理工大学傅正义教授团队评价该项研究工作“是非常稀

| | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | <p>缺的”。在蠕变致密化理论模型的指导下，项目团队提出了“密度-梯度温度-控制机制”新思路，解决了材料难致密和高温下晶粒异常长大的技术难题，形成了金属-非金属粉末 SPS 快速致密化理论-技术-应用的完整体系，研发的超细晶碳化硼材料零件已成功应用在天舟货运飞船、神舟系列载人飞船和空间站等，保障了飞船及空间站长时间在轨稳定运行。</p> |
| <p>客观评价</p> | <p>科学发现 1.1 客观评价：</p> <p>[1] 美国圣地亚哥大学 SPS 学术领域的学者 Geuntak Lee 及圣地亚哥大学工程学院院长及粉末技术实验室主任 Eugene A. Olevsky 教授共同在发表的论文中[Acta Mater, 2018, 144: 524-533]评价了完成人在粉末 SPS 过程电流非焦耳热效应促进致密化机理方面的研究：“作者研究发现了电流作用下材料位错密度降低的现象，表明电流在 SPS 过程中促进了位错运动并加速其湮灭(an increasing electric current density decreased the dislocation density of a tungsten pellet compacted by SPS, which indicated the dislocation mobility enhanced by the electric current influence)”。</p> <p>[2] 南非约翰内斯堡大学纳米工程和摩擦腐蚀中心研究员 Oluwasegun Eso Falodun 在其论文[Inter J Advan Manuf Tech, 2019, 102: 1689-1701]对我们工作进行了高度评价：“邓等将电流的电迁移现象考虑到致密化过程中，构建了粉末 SPS 过程的致密化预测模型，并对其进行了实验验证(...Deng et al. anticipated a densification model by taking electromigration into explanation during the study. They further confirmed the model experimentally...)”。</p> <p>[3] 伊朗阿尔伯兹材料与能源研究中心 Hudsa Majidian 教授在其论文[J Asian Ceram Soc. 2020, (8),4: 1249-1261]中评价完成人在 SPS 制备碳化硼材料的工作“添加低熔点第二相类似润滑剂加速材料的致密化(...the sintering additives with low melting temperature would act as a lubricant and promotes the densification)”。</p> <p>[4] 印度马德拉斯理工学院 Niraj Chawake 等在其论文[Scripta Mater 16 (2019): 36-39]中对完成人研究粉末致密化动力学参数的工作进行了引用评述：“...电流可能通过改变空位的势能或通过影响扩散频率</p> |

因子来影响烧结过程的扩散系数 D 和激活能 Q (...the electric current might affect D and Q of the sintering process, either by means of altering the potential energy of the vacancies or by influencing the jump frequencies of the diffusing species) ”。

科学发现 1.2 客观评价:

[1] 军委科技委基础领域委员会专家, 北京理工大学程兴旺教授团队在论文 [Materials and Design 191 (2020) 108662]中引用了完成人 SPS 致密化的研究工作并指出: “邓等的研究认为电流通过促进位错运动降低位错密度, 从而促使材料回复或提高塑性(...Deng et al. analyzed the XRD pattern...This led to a recovery or improvement of the materials' plasticity)”。

[2] 印度瓦拉亚国立理工学院学者 Ajeet K. Srivastav 在其论文[Scripta Mater, 159(2019): 41-45]中对我们发现电流通过促进粉末致密化过程位错迁移给予了肯定: “最近, 邓等人提出, 外加电流增强了物质扩散和位错迁移, 从而改善了材料在 SPS 过程中的塑性流动(Recently, it has been suggested that the applied current enhances the mass transport and dislocation mobility and thereby improving the plastic flow of the material during SPS)”。

[3] 印度萨斯特拉大学学者 T. K. Kandavel 在论文[Arab J Sci Eng, 42(2017):4917-4927]中引用并参考了完成人提出的 SPS 致密化模型对纯钨粉致密化动力学进行了研究: “邓等研究了钨的致密化及晶粒生长行为...(Deng et al. had studied the densification and grain growth behaviour of pure tungsten powder under plasma spark sintering at the various working parameters...)”。

科学发现 1.3 客观评价:

[1] 长江学者、国家杰青, 武汉理工大学傅正义教授团队在论文[J Eur Ceram Soc 2018,38:4167-4172]中评价了完成人在碳化硼 SPS 烧结动力学方面的工作: “据我们所知, 发表的 B_4C 烧结动力学方面工作, 是少有的(The published works related to the sintering kinetics of B_4C -based composites, to the best knowledge of the authors, are rare.) ”。

[2] 美国海军研究实验室研究人员 Boris Dyatkin 高度评价了完成人采用 SPS 制备碳化硼的方法[J Solid State Chem. 292 (2020): 121659]:“在制备碳化硼方面, 采用 SPS 电场辅助的方法可以有效加快致密化 (Conventional synthesis and compaction of B₄C, ...spark plasma sintering, which pulses electric current through green bodies to promote heating-induced compaction, presents the most promise)”。

[3] 新加坡南洋理工大学 Chennan Sun 教授团队在论文[Additive Manufacturing. 36 (2020): 101466] 中肯定了我们在碳化硼材料性能提升方面的研究:“在这些优化材料中, 碳化硼以其优异的力学性能应用广泛...(Among these reinforcements, B₄C has been widely applied to abrasive materials...)”。

[4] 华南理工大学李博老师团队在论文[Powder Tech 360 (2020): 509-521]中评价完成人在 SPS 添加高熵合金作为烧结助剂的工作:“添加的 HEA 可以与 B₄C 机械合金化,有效提升材料的力学性能 (...and B₄C-based ceramics with CrMnFeCoNi HEA via mechanical alloying and spark plasma sintering, The reinforcements in the composites enhanced the mechanical properties comparing to those of the HEAs matrix)”。

[5] 美国纳尔班扬化学物理研究所 Sofiya Aydinyan 教授团队在论文[J Mater Res Technol 8 (2019):5823-5832]中总结并引用了完成人采用 SPS 制备碳化硼材料致密化方面的工作。 (...summarizes properties of the boron carbides densified by SPS technique...)”。

代表作及论文目录

| 序号 | 代表作及论文名称/刊名/作者 | 影响因子 | 年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页) | 发表时间(年月日) | 通讯作者 (含共同) | 第一作者 (含共同) | 国内作者 (排序) | 他引总次数 | SCI 他引次数 | 知识产权是否归国内所有 | 是否代表作 |
|----|----------------|------|-----------------------------|-----------|---------------|---------------|--------------|-------|----------|-------------|-------|
|----|----------------|------|-----------------------------|-----------|---------------|---------------|--------------|-------|----------|-------------|-------|

| | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------|--------------------------------------------|----|----|---|---|
| 1 | Direct current enhanced densification kinetics during spark plasma sintering of tungsten powder/Scripta Materialia/Deng Shenghua, Li Ruidi, Yuan Tiechui, Xie Siyao, Zhang Mei, Zhou Kechao, Cao Peng | 4.539 | 2018 年 143 卷 25-29 页 | 2018 年 01 月 15 日 | Li Ruidi, Yuan Tiechui | Deng Shenghua | 邓声华, 李瑞迪, 袁铁锤, 谢思遥, 张梅, 周科朝 | 46 | 43 | 是 | 是 |
| 2 | Effect of low-melting point sintering aid on densification mechanisms of boron carbide during spark plasma sintering/Scripta Materialia/Zhang Mei, Li Ruidi, Yuan Tiechui, Feng Xiao, Xie Siyao | 5.079 | 2019 年 163 卷 34-39 页 | 2019 年 04 月 01 日 | Li Ruidi | Zhang Mei | 张梅, 李瑞迪, 袁铁锤, 冯啸, 谢思遥 | 12 | 11 | 是 | 是 |
| 3 | Spark plasma sintering of pure tungsten powder: Densification kinetics and grain growth/Powder | 3.23 | 2017 年 310 卷 264-271 页 | 2017 年 04 月 01 日 | Yuan Tiechui, Li Ruidi | Deng Shenghua | 邓声华, 袁铁锤, 李瑞迪, 曾凡浩, | 36 | 36 | 是 | 是 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------|-------------|------------------------|---------------|-----------------------------|----|----|---|---|
| | Technology/Deng Shenghua, Yuan Tiechui, Li Ruidi, Zeng Fanhao, Liu Guanghong, Zhou Xiang | | | | | | 刘广宏, 周翔 | | | | |
| 4 | Spark plasma sintering of pure TiCN: Densification mechanism, grain growth and mechanical properties/International Journal of Refractory Metals & Hard Materials/Liu Guanghong, Li Ruidi, Yuan Tiechui, Zhang Mei, Zeng Fanhao | 2.606 | 2017年66卷68-75页 | 2017年08月01日 | Li Ruidi, Yuan Tiechui | Liu Guanghong | 刘广宏, 李瑞迪, 袁铁锤, 张梅, 曾凡浩 | 24 | 22 | 是 | 是 |
| 5 | Densification mechanisms and microstructural evolution during spark plasma sintering of boron carbide powders/Ceramics International/Zhang Mei, Yuan Tiechui, Li Ruidi, Xie Siyao, Wang Minbo, | 3.45 | 2018年44期3571-3579页 | 2018年03月01日 | Yuan Tiechui, Li Ruidi | Zhang Mei | 张梅, 袁铁锤, 李瑞迪, 谢思遥, 王敏卜, 翁启刚 | 20 | 20 | 是 | 是 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------------------------------|---|---|---|---|
| | Weng Qigang | | | | | | | | | | |
| 6 | The influence of the local effect of electric current on densification of tungsten powder during spark plasma sintering/Powder Technology/Deng Shenghua, Zhao Hongjin, Li Ruidi, Yuan Tiechui, Li Lanbo, Cao Peng | 4.142 | 2019 年 356 卷 769-777 | 2019 年 11 月 01 日 | Zhao Hongjin, Li Ruidi, | Deng Shenghua | 邓声华, 赵鸿金, 李瑞迪, 袁铁锤, 李澜波 | 3 | 3 | 是 | 否 |
| 7 | Densification and properties of B ₄ C based ceramics with CrMnFeCoNi high entropy alloy as a sintering aid by spark plasma sintering/Powder Technology/Zhang Mei, Li Ruidi, Yuan Tiechui, Feng Xiao, Li Lanbo, Xie Siyao, Weng Qigang | 4.142 | 2019 年 343 卷 58-67 页 | 2019 年 02 月 01 日 | Li Ruidi, Yuan Tiechui | Zhang Mei | 张梅, 李瑞迪, 袁铁锤, 冯啸, 李澜波, 谢思遥, 翁启刚 | 8 | 8 | 是 | 否 |

| | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------|----------|---------------|----------------------------------------------------------|----|----|---|---|
| 8 | Microstructures and mechanical property of AlMgScZrMn – A comparison between selective laser melting, spark plasma sintering and cast/Materials Science & Engineering A/Wang Minbo, Li Ruidi, Yuan Tiechui, Chen Chao, Zhou Libo, Chen Hui, Zhang Mei, Xie Siyao | 4.652 | 2019 年 756 卷 354-364 页 | 2019 年 05 月 22 日 | Li Ruidi | Wang Minbo | 王敏卜, 李瑞迪, 袁铁锤, 陈超, 周立波, 陈慧, 张梅, 谢思遥 | 12 | 10 | 是 | 否 |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------|----------|---------------|----------------------------------------------------------|----|----|---|---|

主要完成人

袁铁锤（中南大学）作为总负责人，提出了多场耦合的 SPS 蠕变致密化动力学模型，为高性能碳化硼材料制备及应用奠定基础。是论文 1、论文 3-5、论文 7 的通讯作者。

张梅（中南大学）对科学发现 1.3 做出了重要贡献。广泛研究了各体系粉末 SPS 烧结温度、压力、电场对致密化过程致密度、孔隙率、晶粒度影响规律，结合获得的 SPS 粉末烧结变形机制图，发现粉末不同致密化动力学阶段的控制机制，形成了基于不同致密化动力学阶段控制的微孔-晶粒度协同调控原理。是论文 2、论文 5 和论文 7 的第一作者。

邓声华（江西理工大学）对科学发现 1.1 及 1.3 做出重要贡献：建立了多场耦合作用下的粉末 SPS 致密化动力学模型，揭示了电流促进粉末致密化的本质，定量评估了温度、压力及电流三大驱动力对粉末致密化的贡献大小，是论文 1、论文 3 和论文 6 的第一作者。

谢思遥（中南大学）对科学发现 1.2 做出重要贡献，建立了非晶材料的致密化动力学模型，依据

| | |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | <p>构建的多场作用下的蠕变致密化动力学模型，深入研究了不同体系粉末在 SPS 烧结过程不同致密化阶段的微观机理，并最终依此构建了粉末 SPS 烧结“密度-温度-控制机制”图。是论文 1 的第 4 作者。</p> <p>王敏卜（中南大学）对科学发现 1.2 做出重要贡献，表征放电等离子烧结金属基材料微观组织，分析研究不同粉末冶金烧结技术成形金属基材料的组织演化规律及变形机制，验证模型预测的粉末 SPS 致密化控制机制。是论文 8 的第一作者。</p> |
| <p>主要完成单位</p> | <p>中南大学：围绕 SPS 粉末蠕变致密化动力学数理模型、SPS 粉末蠕变致密化的微观机制及粉末致密化过程协同调控微孔及晶粒长大原理三个关键科学问题开展研究，取得以下科学发展和贡献：</p> <p>（1）在蠕变理论的基础上，引入电流的电迁移效应的影响，构建了粉末在温度场-电场-力场作用下的蠕变致密化动力学模型及添加烧结助剂的蠕变致密化模型；</p> <p>（2）依据构建的多场作用下的蠕变致密化动力学模型，深入研究了不同体系粉末在 SPS 烧结过程不同致密化阶段的微观机理，并最终依此构建了粉末 SPS 烧结“密度-温度-控制机制”图；</p> <p>（3）广泛研究了各体系粉末 SPS 烧结温度、压力、电场对致密化过程致密度、孔隙率、晶粒度影响规律，结合获得的 SPS 粉末烧结变形机制图，发现粉末不同致密化动力学阶段的控制机制，形成了基于不同致密化动力学阶段控制的微孔-晶粒度协同调控原理，依据上述调控原理最终获得了性能优异的碳化硼材料。</p> <p>江西理工大学：作为重要单位参与致密化模型建立、验证及应用工作，建立了多场耦合粉末 SPS 致密化动力学模型，依据蠕变理论、扩散理论、电迁移理论建立了电流非焦耳热效应作用下粉末的致密化动力学模型，揭示了电流促进粉末致密化的本质；此外，建立了考虑烧结助剂贡献的蠕变粉末致密化动力学模型，发现烧结助剂引起的内应力偏差对粉末致密化贡献；在上述工作基础上，建立了多场耦合下完整的粉末致密化动力学模型，对模型的正确性、普适性进行了验证。</p> |
| <p style="text-align: center;">主要完成人合作关系说明</p> | |

中南大学拟牵头申报 2021 年湖南省自然科学奖项目“粉末放电等离子烧结多场耦合下蠕变致密化动力学”，合作单位为江西理工大学，项目完成人为：袁铁锤、张梅、邓声华、谢思遥、王敏卜。各完成人合作关系情况如下：

1. 论文合著：袁铁锤、张梅、邓声华、谢思遥、王敏卜长期共同研究粉末放电等离子烧结技术，其中第二、三、四、五完成人（张梅、邓声华、谢思遥、王敏卜）均为第一完成人（袁铁锤）已毕业或在读博士研究生。在 8 篇代表作、论文中合著关系如下：

代表作 1：邓声华(1/7)、袁铁锤(3/7)、谢思遥(4/7)、张梅(5/7) Direct current-enhanced densification kinetics during spark plasma sintering of tungsten powder. Scripta Materialia. 2018, 143: 25-29.

代表作 2：张梅(1/5)、袁铁锤(3/5)、谢思遥(5/5) Effect of low-melting-point sintering aid on densification mechanisms of boron carbide during spark plasma sintering. Scripta Materialia. 2019, 163: 34-39.

代表作 3：邓声华(1/6)、袁铁锤(2/6) Spark plasma sintering of pure tungsten powder: Densification kinetics and grain growth. Powder Technology. 2017, 310: 264 - 271.

代表作 4：袁铁锤(3/5)、张梅(4/5) Spark plasma sintering of pure TiCN: Densification mechanism, grain growth and mechanical properties. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2017, 66: 68 - 75.

代表作 5：张梅(1/6)、袁铁锤(2/6)、谢思遥(4/6)、王敏卜(5/6) Densification mechanisms and microstructural evolution during spark plasma sintering of boron carbide powders. Ceramics International. 2018, 44: 3571 - 3579.

论文 6：邓声华(1/6)、袁铁锤(4/6) The influence of the local effect of electric current on densification of tungsten powder during spark plasma sintering. Powder Technology. 2019, 356: 769 - 777.

论文 7：张梅(1/7)、袁铁锤(3/7)、谢思遥(6/7) Densification and properties of B₄C-based ceramics with CrMnFeCoNi high entropy alloy as a sintering aid by spark plasma sintering. Powder Technology. 2019, 343: 58 - 67.

论文 8：王敏卜(1/8)、袁铁锤(3/8)、张梅(7/8)、谢思遥(8/8) Microstructures and mechanical property of AlMgScZrMn - A comparison between selective laser melting, spark plasma sintering and cast. Materials Science & Engineering A. 2019, 756: 354 - 364.

总之，项目完成人相互之间紧密合作，并有共同的研究成果，合作关系是真实且长期的。