

项目名称:

新型金属间化合物多孔材料/多孔膜及其制备方法

推荐单位意见:

针对传统无机多孔材料存在性能与苛刻环境之间不匹配的难题,该项目团队经过十多年研究,提出新型金属间化合物多孔材料概念和反应合成制备方法,建立了多孔材料近净成形和孔隙形成理论,揭示了孔结构控制规律和材料性能特征,实现了在苛刻环境领域的工业化应用,取得重要的原创性研究成果。该项目的科学价值在于,提出的金属间化合物多孔材料为多孔材料中新的材料体系;提出的反应合成方法为新的多孔材料和膜制备方法;揭示了该新型多孔材料的性能特征,为其工业化应用提供了重要支撑。以团队成员第一或通讯作者在 **ADV MATER**、**ENERGY** 等知名期刊上发表相关论文 60 余篇,8 篇代表性论文 **SCI** 总引用 287 次,**SCI** 他引 154 次,单篇 **SCI** 他引最高 42 次。团队核心贺跃辉教授被特邀在美国材料研究协会国际会议 **MRS** 上担任 4 位组织者之一,团队成员获得国际先进金属间化合物及金属材料研讨会唯一的最佳论文奖。德国亚琛工业大学 **B. Friedrich** 评价为“所开发的多孔材料作为有潜力的工程材料可应用在许多工业领域,特别是过滤领域”,法国国家科学研究中心 **E.Schumann** 评价为“发现了非常显著的 **Kirkendall** 效应,创造性的制备了一种呈现开孔显微结构的金属间化合物多孔材料”。

经审阅,该项目申报材料内容属实,相关栏目符合填写要求,经公示,目前无异议。对照湖南省科学技术奖授奖条件,特推荐该项目申报 2018 年度湖南省自然科学奖。

项目简介

多孔材料在过滤分离、化工催化与环境净化等工业领域发挥着核心作用。传统的多孔材料主要包括高分子、金属和陶瓷。高分子难以抵抗高温高压、力学性能较差；陶瓷本征脆性，抗热震性能差，难以机加工；金属高温稳定性较差，不耐苛刻环境腐蚀。本项目突破传统材料限制，提出新型金属间化合物多孔材料概念以及元素粉末反应合成的制备方法，建立多孔材料近净成形和孔隙形成理论，揭示孔结构控制规律和材料性能特征，进而实现在苛刻环境领域的工业化应用。主要研究内容和科学发现包括：

1. 新型金属间化合物多孔材料的概念、材料设计和制备方法。提出新型金属间化合物多孔材料概念，突破有机、金属或陶瓷材料限制，引入具有金属和陶瓷性能优点的金属间化合物；提出反向利用元素的不对称扩散现象，完成了该新型多孔材料及多孔膜的材料设计和元素粉末冶金制备工艺设计，建立了该新型多孔材料的材料体系。

2. 金属间化合物多孔材料的反应合成及孔隙形成理论基础。揭示了反应合成过程的高温自蔓延抑制判据、Kirkendall 孔隙的形成条件及动力学机制、以及金属间化合物多孔材料 Kirkendall 孔隙的变化规律。

3. 金属间化合物多孔材料的孔结构特征和量化控制。系统表征了该新型多孔材料的孔结构性能，揭示了孔结构的影响因素及其变化规律，建立了孔结构参数和反应合成参数之间的定量关系。

4. 金属间化合物多孔材料的材料性能。系统揭示了新型多孔材料的材料性能特征，包括材料的抗强酸/强碱腐蚀性能、高温氧化/硫化性能、力学性能、机加工性能、焊接性能、抗热冲击性能和电催化性能等。

5. 金属间化合物多孔材料的工业化应用。实现了该新型多孔材料在诸多工业领域的应用，特别是苛刻环境下的固液分离和固气分离，解决了传统多孔材料无法应用的材料难题，提升了产品品质，避免了严重的环境污染。

项目的科学价值在于：1.提出的金属间化合物多孔材料为多孔材料中新的材料体系；2.提出的元素粉末反应合成方法为新的多孔材料和膜制备方法；3.提出的反应合成及孔隙形成理论揭示了近净成形合成下材料孔结构的形成和演变机理，实现了孔结构的量化控制；4.揭示了该新型多孔材料的性能特征，为其工业化应用提供了重要的理论支撑。

本项目得到国家 973、863、国家自然科学基金等资助，在 *Advanced Materials*、*Intermetallics*、*Energy* 等知名期刊上发表并被广泛引用，8 篇代表性论文总他引 274 次，SCI 他引 147 次。授权发明专利 6 项。团队核心被特邀在本领域高级别学术会议-美国材料研究协会国际会议 MRS 上担任 4 位组织者之一，团队成员获得本领域高级别学术会议-国际先进金属间化合物及金属材料研讨会唯一的最佳论文奖。德国亚琛工业大学的 B. Friedrich 学者评价为“所开发的多孔材料作为有潜力的工程材料可应用在许多工业领域，特别是过滤领域”，英国谢菲尔德大学的 Russell Goodall 学者评价为“提出了在粉末和薄膜的粉末冶金工艺中利用及深度利用 Kirkendall 效应来制备多孔材料”，法国国家科学研究中心的 E.Schumann 学者评价为“发现了非常显著的 Kirkendall 效应，创造性的制备了一种呈现开孔显微结构的金属间化合物多孔材料”。

客观评价

研究成果以本团队成员第一作者或通讯作者在 ADV MATER、Intermetallics、Energy 等国际知名期刊上发表金属间化合物多孔材料相关论文 60 余篇，其中 8 篇代表性论文总他引 274 次，SCI 他引 147 次，单篇 SCI 他引最高 39 次。团队核心被特邀在本领域高级别学术会议-美国材料研究协会国际会议 MRS 上担任 4 位组织者之一(附件 4.7)，团队成员获得本领域高级别学术会议-国际先进金属间化合物及金属材料研讨会唯一的最佳论文奖(附件 4.8)。被法国、英国、德国、瑞典、加拿大、澳大利亚、荷兰、中国等国内外材料学者广泛引用和积极评价。本项目理论研究成果的重要学术评价如下：

法国国家科学研究中心的 E.Schumann 学者在材料学知名期刊 Mater Chem Phys 上发表文章，引用论文 1，介绍了本团队利用 Kirkendall 效应合成金属间化合物多孔材料的研究成果。针对材料的孔结构特性和应用进行了评价，指出该团队“发现了在 Ti、Al 元素粉末的反应合成过程中的非常显著的 Kirkendall 效应，利用 Kirkendall 效应，创造性制备了一种呈现开孔显微结构的 Ti-Al 金属间化合物多孔材料，可以用来作为一种渗透性材料进行应用”。(见附件 2.1)

英国著名大学谢菲尔德大学 Russell Goodall 学者在材料学知名期刊 Mat Sci Eng C-Mater 上发表文章，引用了 4 篇本团队的论文。在针对论文 1 的引用中，重点介绍了本团队提出的孔隙形成机理，认为“较低熔点元素在合金体系中的快速扩散过程造成了原子扩散流被反方向的空位流平衡的行为，导致了 Kirkendall 孔隙的形成”，该团队“提出了在粉末和薄膜的粉末冶金工艺中利用这种 Kirkendall 效应来制备材料，包括针对 Kirkendall 效应的深度利用来制备多孔结构”，并直接引用本团队报道的在合成过程中的体积膨胀特征。(见附件 2.2)

德国顶尖理工类大学亚琛工业大学的 B. Friedrich 学者在冶金和合金工程国际权威期刊 J Alloy Compd 上发表文章，共 6 次引用论文 1 和 2，详细介绍了本团队在金属间化合物多孔材料的材料设计、孔隙形成微观机制、反应合成工艺特点以及性能和应用等方面的研究成果。针对材料的提出和应用，指出该团队“所开发的多孔材料作为有潜力的工程材料可应用在许多工业领域，特别是过滤领域，这归因于这种材料具有的许多独特性能，比如冲击能量吸收能力、热和电性能等，特别是良好的气体和液体渗透性能，引起了研究者们非常广泛的兴趣”；针对材料的结构和性能，指出该团队“提出了 TiAl 金属间化合物体系，包含了不同的晶体结构，具有金属键和共价键混键结合特征，进而表现出良好的物理和化学性能”，“提出了不同物相结构和性能特征的金属间化合物材料”，该团队“开展 Al 含量对多孔材料孔结构和过滤性能影响的研究，是非常有价值的”；在材料合成方面，指出该团队“在 TiAl 金属间化合物多孔材料的反应合成过程中，发现了多孔材料体系的尺寸变化行为，这是 TiAl 合成研究中的最引人注目的现象”；在孔隙形成微观机理方面，认同本团队提出的 Kirkendall 效应成孔机制，直接引用本团队的理论研究论点“大量的空位在快速扩散组元 Al 原子的扩散区域形成，过饱和的空位塌陷形成孔隙，由此降低体系的吉布斯自由能”。(见附件 2.3)

瑞典顶级名校隆德大学 S. Iyengar 学者在冶金和合金工程权威期刊 J Alloy Compd 上发表文章, 共 7 次引用论文 3, 介绍了本团队在金属间化合物多孔材料合成过程中的放热行为、物相形成和体积膨胀之间规律的研究成果。认为“提出采用 Fe-40at.%Al 混合粉末合成 FeAl 金属间化合物, 并发现了在加热过程中放热规律”, 该团队“描述了在不同加热阶段孔隙的形成过程, 发现了烧结坯体非常显著的膨胀现象”, 认可并直接引用了本团队提出的关于中间物相的形成机制和膨胀现象产生的原因, “Al 元素相对于 Fe 元素的快速扩散, 促进了 Fe_2Al_5 相的形成”, “这种膨胀行为主要归因于孔隙在 Al 颗粒区域的形成”。(见附件 2.5)

加拿大著名大学拉瓦尔大学的 Fariba Safizadeh 学者在能源与燃料领域国际权威期刊 Int J Hydrogen Energ 上发表综述文章, 引用论文 4, 重点介绍了本团队开发的金属间化合物多孔材料在合成方法、孔结构、电催化性能等方面的研究成果。指出该团队“合成了 Ni_3Al 金属间化合物多孔电极, 该电极具有较小的孔径和较高的析氢反应活性”, “这种多孔阴极在工业条件下表现出良好的长期稳定性和高的催化性能”; 针对金属间化合物多孔材料良好的材料性能, 认为该团队“合成的多孔材料具有有趣的力学性能, 以及高的抗碱溶液腐蚀性能, 引起了研究者的关注”; “所合成的电极具有高的析氢反应催化活性, 归因于这种材料具有高的孔隙度、高的电化学表面积和纳米结构”。(见附件 2.6)

澳大利亚顶尖学府新南威尔士大学的 Chuan Zhao 教授在材料学知名期刊 SMALL 上发表文章, 引用论文 5, 指出该团队制备的“NiCu 合金多孔电极在碱性溶液的析氢反应中表现出巨大的潜力, 这归因于这种材料具有高的抗腐蚀性能, 优异的稳定性和高的析氢反应效率”。(见附件 2.7)

荷兰研究企业 Syngaschem BV 的 Sapountzi FM 学者在国际顶级综述类期刊 PROG ENERG COMBUST 上发表文章, 引用论文 6, 介绍了本团队开发的金属间化合物多孔材料的电催化性能。指出该团队制备出了金属间化合物多孔电极, “研究了 $\text{NiAl}_3\text{-Mo}(10\text{wt}\%)$ 电极在长期水电解过程中的析氢反应活性和抗腐蚀性能”, “这种含钼电极电催化性能的提升与电子效应相关”, 文章引用了本团队关于针对析氢反应活性随时间提升的关系图, 并引用了论文 6 的观点“这种激活归因于电解对烧结过程中形成的氧化层的去除”。(见附件 2.8)

973 计划首席科学家林均品教授在材料学知名期刊 Mater Design 上发表文章, 多次引用论文 1 和 2, 介绍了本团队在金属间化合物多孔材料的提出、孔隙形成机理、性能和应用等方面的研究成果。指出该团队“提出的金属间化合物多孔材料, 具有金属键和共价键混键结合特征, 具有良好的力学性能、抗氧化和抗腐蚀性能, 在室高温多种结构领域获得应用”, “弥补了多孔金属和金属泡沫等抗氧化性能不足和抗腐蚀性能较弱等缺点, 改变了传统多孔金属不能用于高温和腐蚀性环境的现状”, “发现了金属间化合物多孔材料的孔隙形成主要归因于 Kirkendall 效应, 这些孔隙出现在 Al 向 Ti 基体扩散的区域”。(见附件 2.4)

代表性论文专著目录

序号	论文专著 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	第一 作者	国 内 作 者	SCI 他 引 次 数	他 引 总 次 数	知识 产权 是否 归国 内所有
1	Fabrication of Ti-Al micro/nanometer-sized porous alloys through the Kirkendall effect. ADVANCED MATERIALS. He, Yuehui; Jiang, Yao; Xu, Nanping; Zou, Jin; Huang, Baiyun; Liu, Chain T.; Liaw, Peter K.	19. 791	2007, 19: 2102	2007, 8,17	Zou Jin	贺跃 辉	贺跃辉; 江焘; 徐 南平; 黄 伯云	39	88	是
2	Effects of the Al content on pore structures of porous Ti-Al alloys. INTERMETALLICS. Jiang, Y.; He, Y. H.; Xu, N. P.; Zou, J.; Huang, B. Y.; Liu, C. T.	3.1 4	2008, 16:32 7	2008, 2,1	贺跃 辉	江焘	江焘; 贺 跃辉; 徐 南平; 黄 伯云	19	46	是
3	Porous FeAl intermetallics fabricated by elemental powder reactive synthesis. INTERMETALLICS. Gao, Haiyan; He, Yuehui; Shen, Peizhi; Zou, Jin; Xu, Nanping; Jiang, Yao; Huang, Baiyun; Liu, C. T.	3.1 4	2009, 17:10 41	2009, 12,1	贺跃 辉	高海 燕	高海燕; 贺跃辉; 沈培智; 徐南平; 江焘; 黄 伯云	26	54	是

4	Electrochemical performance of porous Ni ₃ Al electrodes for hydrogen evolution reaction. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY. Dong, Hongxing; Lei, Ting; He, Yuehui; Xu, Nanping; Huang, Baiyun; Liu, C. T.	3.5 82	2011, 36:12 112	2011, 9,1	贺跃辉	董虹星	董虹星; 雷霆; 贺跃辉; 徐南平; 黄伯云	27	43	是
5	Characteristics of a sintered porous Ni-Cu alloy cathode for hydrogen production in a potassium hydroxide solution. ENERGY. Yu, Linping; Lei, Ting; Nan, Bo; Jiang, Yao; He, Yuehui; Liu, C. T.	4.5 2	2016, 97: 498	2016, 2,15	江垚	喻林萍	喻林萍; 雷霆; 南博; 江垚; 贺跃辉	12	14	是
6	The stability of hydrogen evolution activity and corrosion behavior of porous Ni ₃ Al-Mo electrode in alkaline solution during long-term electrolysis. ENERGY. Wu, Liang; He, Yuehui; Lei, Ting; Nan, Bo; Xu, Nanping; Zou, Jin; Huang, Baiyun; Liu, C. T.	4.5 2	2014, 67: 19	2014, 4,1	贺跃辉	吴靓	吴靓; 贺跃辉; 雷霆; 南博; 徐南平; 黄伯云	10	12	是
7	Characterization and application of porous Ti ₃ SiC ₂ ceramic prepared through reactive synthesis. MATERIALS & DESIGN. Liu, Xinli; Zhang, Huibin; Jiang, Yao; He, Yuehui	4.3 64	2015, 79: 94	2015, 8,15	江垚	刘新利	刘新利; 张惠斌; 江垚; 贺跃辉	8	11	是

8	Pore evolution regulation in synthesis of open pore structured Ti-Al intermetallic compounds by solid diffusion. JOURNAL OF ALLOYS AND COMPOUNDS. Chen, M. R.; Jiang, Y.; He, Y. H.; Lin, L. W.; Huang, B. Y.; Liu, C. T.	3.1 33	2012, 521:1 2	2012, 4,25	江垚	陈慕容	陈慕容; 江垚; 贺 跃辉; 林 良武; 黄 伯云	6	6	是
合 计								147	274	

主要完成人情况

姓 名	江 垚	排 名	1	行政职务	无
技术职称	副研究员	工作单位	中南大学	完成单位	中南大学
对本项目主要学术贡献： 本项目主要完成人，实现了该新型多孔材料的材料设计和制备工艺设计，构筑了金属间化合物多孔材料反应合成的理论基础，揭示了金属间化合物多孔材料的孔结构和材料性能特征。对所列 5 个重要发现点皆有创造性贡献，为代表性论文 1 的第二作者，代表性论文 2 的第一作者，代表性能论文 5、7、8 的通讯作者。本人在该项研究中的工作量占本人工作量的 80%。					

姓 名	贺跃辉	排 名	2	行政职务	无
技术职称	教授	工作单位	中南大学	完成单位	中南大学
对本项目主要学术贡献： 本项目研究团队核心，全面主持本项目的研究工作，提出了新型金属间化合物多孔材料的概念，实现了该新型多孔材料的材料设计和制备工艺设计，建立了反应合成金属间化合物多孔材料的材料体系，构筑了金属间化合物多孔材料反应合成的理论基础，揭示了金属间化合物多孔材料的孔结构和材料性能特征，实现了金属间化合物多孔材料的工业应用。对所列 5 个重要发现点皆有创造性贡献，为代表性论文 1 的第一作者，代表性论文 2、3、4、6 的通讯作者。本人在该项研究中的工作量占本人工作量的 80%。					

姓 名	高海燕	排 名	3	行政职务	无
技术职称	研究员	工作单位	中南大学	完成单位	中南大学
对本项目主要学术贡献： 本项目主要完成人，主要负责 FeAl 金属间化合物多孔材料的研究，揭示了 FeAl 多孔材料的造孔机理，并研究了该材料的应用性能，主要包括：孔结构性能、室\高温力学性能、焊接性能、高温抗腐蚀性能等。对科学发现 1、3、4、5 有重要贡献，为代表性论文 3 的第一作者，本人在该项工作中的研究量占本人工作量的 80%。					

姓 名	喻林萍	排 名	4	行政职务	无
技术职称	副教授	工作单位	长沙理工大学	完成单位	长沙理工大学

对本项目主要学术贡献： 项目主要完成人，揭示 Ni-Cu 基合金多孔材料体系偏扩散造孔机制，以及造孔的热力学条件和动力学行为，通过偏扩散-反应合成-烧结的方法制备 Ni-Cu 基合金多孔材料及多孔膜材料的技术，建立了 Ni-Cu 基合金多孔材料及多孔膜的制备工艺、孔结构、物理性能、化学性能、力学性能和抗相关介质腐蚀性能的数据库。对项目所列的第 4、5 条科学发现点有重要贡献，是代表性论著 5 的第一作者，本人在该研究中的工作量占本人工作量的 60%。					
---	--	--	--	--	--

姓 名	吴靓	排 名	5	行政职务	无
技术职称	副教授	工作单位	湘潭大学	完成单位	湘潭大学
对本项目主要学术贡献： 项目的主要完成人，实现了新型多孔材料的材料设计和制备工艺设计，建立了反应合成金属间化合物多孔材料的材料体系。制备了 Ni₃Al 多孔金属间化合物，研究表明 Ni₃Al 多孔材料拥有丰富的孔结构，反应造孔机理生成孔隙，在酸碱溶液中表现出优异的抗腐蚀性能，在长期电解析氢中能够保持很好的稳定性。实现了反应合成金属间化合物多孔材料在诸多工业领域、特别是苛刻环境条件下的应用。对科学发现 1、3、4、5 有重要贡献，为代表性论文 6 的第一作者，本人在该项工作中的研究量占本人工作量的 80%。					

姓 名	刘新利	排 名	6	行政职务	无
技术职称	副研究员	工作单位	中南大学	完成单位	中南大学
对本项目主要学术贡献： 项目的主要完成人，系统研究了多孔 Ti₃SiC₂ 的物相演变过程和造孔机理；用多孔 Ti₃SiC₂ 替代传统布袋过滤，改善了传统过滤需要加絮凝剂、Cd 返溶等不足，缩短了过滤工艺，提高电解锌纯度品位至最高级别。对科学发现 1，4，5 有重要贡献，是代表性论文 7 的第一作者，本人在该项研究中的工作量占本人工作量的 75%。					

完成人合作关系说明

本项目完成人共 6 位：江垚、贺跃辉、高海燕、喻林萍、吴靓、刘新利。其中，完成人贺跃辉是本研究团队的核心，同时也是其他 5 位完成人江垚、高海燕、喻林萍、吴靓和刘新利在博士研究生阶段的共同的导师。

完成人贺跃辉和江垚分别是本项目代表性论文 1 的第一作者和第二作者，同时也分别是本项目代表性论文 2 的通讯作者和第一作者，以及本项目代表性论文 8 的第三作者和通讯作者。完成人高海燕、贺跃辉、江垚分别是本项目代表性论文 3 的第一作者、通讯作者和第六作者。完成人喻林萍、江垚、贺跃辉分别是本项目代表性论文 5 的第一作者、通讯作者和第五作者。完成人吴靓、贺跃辉分别是本项目代表性论文 6 的第一作者和通讯作者。完成人刘新利、江垚、贺跃辉分别是本项目代表性论文 7 的第一作者、通讯作者和第四作者。

完成人贺跃辉、江垚和高海燕是本项目获得授权的国家发明专利的主要发明人。其中，完成人贺跃辉、江垚和高海燕分别是国家发明专利 ZL200410003041.2、ZL200410002601.2 和 ZL200410003039.5 的第一发明人、第二发明人和第六发明人。并且，完成人江垚和贺跃辉分别是国家发明专利 ZL201010595732.1 和 ZL201610146684.5 的第一发明人和第二发明人。

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	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	共同知识产权	贺跃辉/1, 江 垚 /2, 高海燕/6	2004.01- 2016.02	氢分离用钪基合金_孔径梯度钛铝金属间化合物均质支撑体的过滤膜的制备方法(ZL200410003041.2)	附件 4.2	
2	共同知识产权	贺跃辉/1, 江 垚 /2, 高海燕/6	2004.01- 2016.02	孔径梯度均质钛铝金属间化合物过滤膜的制备方法(ZL200410002601.2)	附件 4.3	
3	共同知识产权	贺跃辉/1, 江 垚 /2, 高海燕/6	2004.01- 2016.02	钛_铝元素粉末反应合成制备钛铝金属间化合物过滤膜的方法(ZL200410003039.5)	附件 4.4	
4	共同知识产权	江 垚 /1, 贺跃辉/2	2004.01- 2016.02	一种制备泡沫 TiAl 金属间化合物的方法(ZL201010595732.1)	附件 4.5	
5	共同知识产权	江 垚 /1, 贺跃辉/2	2004.01- 2016.02	一种三元化合物基柔性多孔陶瓷复合材料的制备方法(ZL201610146684.5)	附件 4.6	
6	论文合著	贺跃辉/1, 江垚/2	2004.01- 2016.02	Fabrication of Ti-Al micro/nanometer-sized porous alloys through the Kirkendall effect.	附件 1.1	
7	论文合著	江 垚 /1, 贺跃辉/2	2004.01- 2016.02	Effects of the Al content on pore structures of porous Ti-Al alloys.	附件 1.2	
8	论文合著	高海燕/1, 贺跃辉/2, 江垚/6	2004.01- 2016.02	Porous FeAl intermetallics fabricated by elemental powder reactive synthesis.	附件 1.3	
9	论文合著	喻林萍/1, 江 垚 /4, 贺跃辉/5	2012.01- 2016.02	Characteristics of a sintered porous Ni-Cu alloy cathode for hydrogen production in a potassium hydroxide solution.	附件 1.5	

10	论文合著	吴靓 /1 , 贺跃辉 2	2008.01- 2016.02	The stability of hydrogen evolution activity and corrosion behavior of porous Ni ₃ Al-Mo electrode in alkaline solution during long-term electrolysis.	附件 1.6	
11	论文合著	刘新利/1, 江 垚 /3 , 贺跃辉/4	2008.01- 2016.02	Characterization and application of porous Ti ₃ SiC ₂ ceramic prepared through reactive synthesis.	附件 1.7	
12	论文合著	江 垚 /2 , 贺跃辉/3	2002.01- 2016.02	Pore evolution regulation in synthesis of open pore structured Ti-Al intermetallic compounds by solid diffusion.	附件 1.8	