

## 自然科学奖公示：

|      |   |
|------|---|
| 项目名称 | 金属材料的搅拌摩擦焊接与加工基础研究  |
| 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>该项目围绕搅拌摩擦焊接与加工（FSW/FSP）中的材料流动、组织细化、第二相破碎溶解等关键基础科学问题展开研究，阐明组织与性能调控机理，发展出新型制备加工工艺，丰富了经典热加工理论，展现出工业应用价值。研究取得大量原创性成果，第一完成人在该领域共发表 SCI 论文 190 余篇，国际排名第一，出版英文专著 1 部。其中 8 篇代表性论文被 SCI 他引 1136 次，2015-2018 年连续入选 Elsevier 中国高被引学者榜单，4 次应邀为国际著名材料期刊撰写综述论文，发表在 Mater Sci Eng-Reports 上的长篇特邀综述论文在该期刊所有论文中 SCI 引用排名第 3，Scripta Mater 上的论文（代表论文 3）被评选为 2007 年“中国百篇最具影响国际学术论文”，并获该刊 2007-2011 年最高引用奖。第一完成人应邀在第十届国际 FSW 会议上作仅有的四个大会报告之一；获中国 FSW 中心颁发的突出贡献奖；于 2016、2018 年作为大会主席成功主办了第一、第二届全国 FSW/FSP 学术会议。相关成果和理论已在我国核电、航天、轨道交通、国防等领域关键装备中获得示范应用，授权发明专利 15 项。项目入围 2017 年度国家自然科学基金二等奖会评。对照省自然科学奖授奖条件，提名该项目为 2019 年度辽宁省自然科学奖一等奖。</p> |
| 项目简介 | <p>搅拌摩擦焊（FSW）是1991年发明的一种新型固相焊接技术，具有优质、高效、低耗、低排放、适用范围宽等特点，被誉为“世界焊接史上的第二次革命”、“绿色焊接技术”。由FSW还衍生出兼具有多功能特性的加工与制备新技术-搅拌摩擦加工（FSP），可实现材料的组织重构、合成以及缺陷修复。FSW/FSP特有的热、机械过程，使接头/加工区形成独特而多样化的微观组织，深入理解其本质是推动该技术应用与发展的基础。</p> <p>第一完成人于2004年获中科院“百人计划”支持，成立FSW/FSP研究组，并获国家杰出青年科学基金、863、973等项目资助，在国内较早从事FSW研究，并率先开展FSP研究。该项目立项时FSW已有工业应用，但基础理论匮乏，研发大多停留在“试参数”阶段，接头质量控制成为世界性难题。该项目紧扣FSW/FSP的核心：材料流动与温度交变，以实验和数值模拟相结合，深入研究了材料流动、组织演变和元素加速扩散/反应的机制，提出接头/加工区组织与力学行为的调控机理，并发展了FSP改性与材料合成新技术。重要科学发现如下：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. 创新性地以人工氧化膜示踪再现材料流动行为，实现了焊核区典型特征微观结构定量预测，为工具设计和工艺优化提出原理性指导，并突破了84 mm铝厚板和90 mm铜厚板的焊接难题，相关技术与产品成功应用于“复兴号”等高速动车、某</li></ol>   |

|      |  |
|------|--|
|      | <p>尖端国防工程关键装备等型号。进一步提出协调异种金属材料流变的新思路，创建了基于调控中间化合物层厚的异种金属高质量FSW控制技术原理。</p> <p>2. 建立了不改变铸件形状尺寸的“FSP (+时效)”革新性改性工艺、FSP制备纳米复合材料的新技术，阐明FSW/FSP剧烈塑性变形过程中的元素快速扩散机理，揭示了FSP过程中原位纳米粒子的形成、碳纳米管的剪短机制，并由此阐明碳纳米管强化机制，实现了纳米复合材料的可控制备，研究结果被推荐为973计划项目重大研究成果。</p> <p>3. 基于建立的高精度非线性瞬态三维温度场与热源区-等温溶解层模型，提出了沉淀强化铝合金接头性能优化的基本原理，突破以往工艺参数选择的盲目性，为我国大型运载火箭燃料贮箱的焊接工艺优化提供了指导；阐明了颗粒增强金属基复合材料FSW过程中组织演变机理，率先实现了中子吸收复合材料的长距离高质量可靠焊接，成功应用于全球首台第四代高温气冷堆的核燃料元件贮运容器的制造。</p> <p>上述科学发现得到了相关领域的国际著名专家R. S. Mishra, S. C. Tjong, H. Fujii, A. K. Tieu等教授的正面评价。在该领域共发表SCI论文190余篇，国际排名第一，出版英文专著1部。其中8篇代表性论文被SCI总引1300次，他引1136次。第一完成人2004年入选中科院“百人计划”，结题评优；2005年获国家杰出青年基金资助，结题评优；2018年获中国颗粒学会科技进步奖一等奖；被评为“2018中国科学年度新闻人物”；第二完成人入选国家万人计划“科技创新领军人才”。授权发明专利15项。项目入围2017年度国家自然科学基金二等奖会评。</p>                                    |
| 客观评价 | <p>该研究在依托的国家“863”、“973”计划、国家自然科学基金等项目验收中获得好评，并在中科院“百人计划”、国家杰出青年基金验收时获评优秀。主要研究内容取得多项“创新性较为突出”的成果。FSP制备铝基复合材料被评价为“成功的探索”，铸造合金FSP“得到应用”，FSP“可望在工件修复方面得到应用”。FSP制备纳米复合材料的研究成果被国家“973”计划项目“碳纳米管的可控制备方法及规模应用关键技术研究”推荐为项目的重大研究成果；材料流动、热源区-等温溶解层模型、复合材料制备以及异种金属焊接被相关用户认为解决了工程关键问题，具有广泛应用前景。</p> <p>项目组自2004年在国内开展FSW/FSP基础研究，短时间内使我国“在国际上开始有了一定的发言权”，2014年第一完成人在第十届国际搅拌摩擦焊会议上应邀做仅有的四个大会报告之一。在中国搅拌摩擦焊中心成立10周年之际，第一完成人获“搅拌摩擦焊技术应用突出贡献奖”。2016年发起并主持召开了“第一届全国搅拌摩擦焊接与加工学术会议”，并于2018年共同主办了第二届会议。</p> <p>应邀为<i>Mater Sci Eng R</i>、<i>Metall Mater Trans A</i>、<i>Scripta Mater</i>等国际著名期刊撰写了4篇综述论文。发表在<i>Mater Sci Eng R</i>上的长篇特邀综述“Friction stir welding and processing”获得国际同行高度评价：“An excellent state-of-the-art review of FSW technology (<i>Weld J</i>, 2006; 85: 28-35)”，在该刊所有论文中SCI引用排名第三，</p> |

2015-2018年连续入选Elsevier中国高被引科学家榜单。发表在*Scripta Mater*上的一篇文章获“中国百篇最具影响国际学术论文”与“Top Cited”奖。第一完成人在该领域共发表SCI论文190余篇，国际排名第一，出版英文专著1部；其中8篇代表性论文被SCI他引1136次。重要科学发现被国内外同行在公开发表的论文专著中广泛引证评述，代表性评价如下：

#### 1. 国际同行发表论文的代表性评价

科学发现1中的代表论文1被SCI他引64次，代表论文2被SCI论文他引145次，加拿大滑铁卢大学A.P. Gerlich教授多次正面引用代表论文1的结果，并在与南京航空航天大学沈以赴教授的合作研究中引证了关于搅拌区微观特征组织形成的观点“...that the final grain size depends heavily on the FSW/FSP conditions, such as process parameters, tool geometry and dimensions, and heat dissipation of workpiece [36]” (*J Alloy Compd* 2019; 786: 257)。代表论文2中关于Al-Cu异种FSW接头界面化合物的研究受到国内外学者的广泛引证，葡萄牙科英布拉大学A. Loureiro教授在焊接领域著名期刊*Sci. Technol. Weld. Joining*上的铝-铜FSW综述文章中引用申请人的研究结果达到40余处，并给予了高度评价：“Actually, Xue *et al.*<sup>21</sup> found an important relation between interfacial layer properties and tool rotation speed...the formation of thicker and less uniform layers.” (*Sci. Technol. Weld. Joining* 2016; 21: 523)。

科学发现2中的代表论文3、4、5分别被SCI他引132、68、112次，代表论文6被SCI他引429次，为“SCI高被引论文”。本领域著名学者、FSP发明人R.S. Mishra教授在与通用汽车公司的合作研究中，将该研究工作列为镁合金FSP典型代表，并用于解释动态再结晶机制：“Feng *et al.* investigated microstructure evolution of AZ80...twinning DRX (TDRX) and CDRX were the main mechanisms in the FSP alloy...” (*J Mater Sci* 2015; 50: 3212); “Feng and Ma [47] indicated that twin induced DRX was the main mechanism...” (*Mater Sci Eng A* 2012; 543: 200)。复合材料领域著名学者香港城市大学S.C. Tjong教授在*Mater Sci Eng R* (2013, 74: 28)撰写的金属基复合材料长篇综述大篇幅引用了该项目中关于FSP制备纳米碳复合材料的研究工作，并选用两幅图为代表评价FSP分散效果。

科学发现3中的代表论文7被SCI他引109次，代表论文8被SCI他引77次，该项目所提出的热源区-等温溶解层模型被许多学者所证实，其中，该研究作为葡萄牙科英布拉大学A. Loureiro教授的研究提供了指导：“Yet, Ren *et al.* [19] and Feng *et al.* [20] reported that ... Therefore, the effect of the FSW parameters on the joint properties is quite different for various aluminum alloys” (*Mater Design* 2016; 93: 146)。英国诺丁汉大学的D.G. McCartney教授撰写的复合材料FSW的综述论文中大篇幅引用代表论文8的研究结果，并多次给予了正面评价：“Feng *et al.* [32] reported the formation of

elliptical shape of the NZ in AA2009/SiC/15p weldment at 600 rpm. They also noticed ...”; “Feng et al. [32] reported that an obvious reduction in grain size of the NZ reached to about 5  $\mu\text{m}$  ...”; “Feng et al. [32] studied the feasibility of joining AA2009/SiC/15p by FSW under annealed condition and followed by PWHT to T4 condition .... between the tool worn material and the BM.”; “Feng et al. [32] showed that the interaction between Fe from worn tool and AA2009/SiC/15p resulted in the formation of ... and change of failure modes from ductile to brittle.” (*Mater Design* 2015; 86: 61)。

## 2. 出版专著的代表性评价

R.S. Mishra、P.S. De和N. Kumar教授共同出版了专著***Friction Stir Welding and Processing – Science and Engineering*** (Springer Int. Publishing, 2014), 其中在铸件FSP改性 (59-60页)、镁合金FSW接头断裂行为 (177-179)、FSP超细晶铝合金力学行为 (264-265, 291页) 等相关章节多次引用了该项目中关于FSP的研究结果, 以体现FSP作为塑性加工手段在铸件改性、细晶材料制备方面的优势。

R.S. Mishra教授还主编出版了搅拌摩擦焊接与加工系列丛书 (Friction Stir Welding and Processing Book Series), 对过去20年来本领域的重要研究成果进行了汇总与评述, 现已出版5本英文系列专著。鉴于该项目FSP研究方面积累的大量成果和同行的广泛评价, 第一完成人应邀执笔撰写了系列专著: ***Friction Stir Superplasticity for Unitized Structures***, Zongyi Ma, Rajiv S. Mishra, Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc. 2014.

关于铸件FSP的专著 (Saumyadeep Jana, Rajiv S. Mishra, Glenn J. Grant, ***Friction Stir Casting Modification for Enhanced Structural Efficiency***, Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc. 2016) 中主要以该项目中FSP研究结果作为经典案例介绍了铸件FSP过程的微观组织演变与力学行为特征, 专著引用了该项目研究结果中的11幅图 (全书65幅图) 和10个表格 (全书20个表格), 肯定了该项目研究工作所做出的突出贡献 (7-12, 24-26, 29-43页)。

关于异种合金的FSW专著 (Nilesh Kumar, Wei Yuan, Rajiv S. Mishra, ***Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials***, Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc. 2015) 主要以该项目中异种金属FSW的研究结果 (4幅图, 本节共7幅结果图) 为例介绍了Al-Cu异种金属FSW的相关内容 (85-91页)。

代表性论文专著目录（不超过 8 篇）

| 序号 | 论文专著<br>名称/刊名<br>/作者  | 年卷<br>页码<br>(xx<br>年 xx<br>卷<br>xx<br>页) | 发表时间<br>(年月 日)  | 通讯<br>作者<br>(含<br>共同) | 第一<br>作者<br>(含<br>共同) | 国内<br>作者                                    | SCI<br>他<br>引<br>次<br>数 | 他<br>引<br>总<br>次<br>数 | 论文署<br>名单位<br>是否包<br>含国外<br>单位 |
|----|---|--|-----------------|-----------------------|-----------------------|---|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 1  | The origin of nonuniform microstructure and its effects on the mechanical properties of a friction stir processed Al-Mg alloy/Acta Mater./G.R. Cui, Z.Y. Ma, S.X. Li                      | 2009,<br>57:57<br>18-57<br>29            | 2009年<br>11月01日 | Z.Y.<br>Ma            | G.R.<br>Cui           | 崔国<br>荣, 马<br>宗义,<br>李守新                    | 62                      | 64                    | 否                              |
| 2  | Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints/Mater. Sci. Eng. A/P. Xue, D.R. Ni, D. Wang, B.L. Xiao, Z.Y. Ma | 2011,<br>528:4<br>683-4<br>689           | 2011年<br>05月24日 | Z.Y.<br>Ma            | P.<br>Xue             | 薛鹏,<br>倪丁<br>瑞, 王<br>东,<br>肖伯<br>律, 马<br>宗义 | 136                     | 145                   | 否                              |
| 3  | Enhanced mechanical properties of Mg-Al-Zn cast alloy via friction stir processing/ Scripta Mater./A.H. Feng, Z.Y. Ma   | 2007,<br>56:39<br>7-400                  | 2007年<br>03月01日 | Z.Y.<br>Ma            | A.H.<br>Feng          | 冯艾<br>寒, 马<br>宗义                            | 123                     | 132                   | 否                              |
| 4  | Reactive mechanism and mechanical properties of in situ composites fabricated from an Al-TiO <sub>2</sub> system by friction stir processing/Acta Mater./Q. Zhang, B.L. Xiao, W.G. Wang,  | 2012,<br>60:70<br>90-70<br>13            | 2012年12月<br>01日 | Z.Y.<br>Ma            | Q.<br>Zhan<br>g       | 张琪,<br>肖伯<br>律, 王<br>文广,<br>马宗义             | 64                      | 68                    | 否                              |

|         |  |                      |  |         |           |                    |     |     |   |
|---------|--|----------------------|--|---------|-----------|--------------------|-----|-----|---|
|         | Z.Y. Ma  |                      |  |         |           |                    |     |     |   |
| 5       | Singly dispersed carbon nanotube/aluminum composites fabricated by powder metallurgy combined with friction stir processing/Carbon/Z. Y. Liu, B.L Xiao, W.G. Wang, Z.Y. Ma | 2012, 50:18 43-18 52 | 2012年04月01日  | Z.Y. Ma | Z.Y. Liu  | 刘振宇, 肖伯律, 王文广, 马宗义 | 96  | 112 | 否 |
| 6       | Friction stir processing technology: a review/Metall. Mater. Trans. A/Z.Y. Ma  | 2008, 39:64 2-658    | 2008年03月01日  | Z.Y. Ma | Z.Y. Ma   | 马宗义                | 392 | 429 | 否 |
| 7       | Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy/ScriptaMater./S. R. Ren, Z.Y. Ma, L.Q. Chen                | 2007, 56:69 -72      | 2007年01月01日  | Z.Y. Ma | S.R. Ren  | 任淑荣, 马宗义, 陈礼清      | 106 | 109 | 否 |
| 8       | Effect of microstructural evolution on mechanical properties of friction stir welded AA2009/SiCp composite/Compos. Sci. Technol./A.H. Feng, B.L. Xiao, Z.Y. Ma             | 2008, 68:21 41-21 48 | 2008年07月1日   | Z.Y. Ma | A.H. Feng | 冯艾寒, 肖伯律, 马宗义      | 76  | 77  | 否 |
| 主要完成人情况 |  |                      | <p>摘自辽宁省自然科学奖提名书中“主要完成人情况表”中姓名、排名、行政职务、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目贡献。</p> <p>1. 姓名：马宗义</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 排名：1</li> <li>• 行政职务：无</li> <li>• 技术职称：研究员</li> <li>• 工作单位：中国科学院金属研究所</li> </ul> |         |           |                    |     |     |   |

|  |   |
|--|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"><li>• 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所</li><li>• 对本项目贡献：负责项目的总体设计和运行。在《重要科学发现》第 1-3 项中均做出创造性贡献：量化了 FSW/FSP 工艺与特异性组织关系，由此阐明铝合金接头变形与断裂行为，取得异种材料的高强度 FSW；建立了铸造合金 FSP 强化改性新工艺；突破纳米复合材料可控制备的瓶颈；阐明影响沉淀强化铝合金 FSW 接头性能的关键工艺参数及作用机制，突破复合材料长距离高质量焊接。同时，推动了相关研究成果的实际工业应用。是所有代表论文的通讯作者，第 6 篇代表论文的唯一作者。</li></ul> <p>2. 姓名：肖伯律</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 排名：2</li><li>• 行政职务：无</li><li>• 技术职称：研究员</li><li>• 工作单位：中国科学院金属研究所</li><li>• 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所</li><li>• 对本项目贡献：参与了项目的总体运行以及实验方案设计，对《重要科学发现》中第 1-3 项的均做出重要贡献。利用 FSP 的剧烈塑性变形作用，建立了碳纳米管高效、低损伤分散技术，突破以往碳纳米管在铝基体难分散、损伤严重的瓶颈，由此充分体现了碳纳米管的强化作用；发现 FSP 的加速扩散作用对原位反应体系的机械激活作用，在低温与剧烈流变条件下制备出原位纳米粒子增强超细晶铝基复合材料，具有高韧韧性，由此开发出纳米复合材料可控制备技术。是第 2、4、5、8 篇代表论文的作者。</li></ul> <p>3. 姓名：倪丁瑞</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 排名：3</li><li>• 行政职务：无</li><li>• 技术职称：研究员</li><li>• 工作单位：中国科学院金属研究所</li><li>• 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所</li><li>• 对本项目贡献：参与了项目的总体运行以及主体实验工作，对《重要科学发现》中第 1-2 项做出重要贡献。利用 FSP 对晶粒细化与共晶相固溶作用，大幅提升了铸造高铝镁合金的拉伸性能和疲劳性能，并阐明颗粒细化与固溶强化延缓疲劳裂纹形核的主要原因；利用 FSP 的致密化作用消除了镍铝青铜的铸造缺陷，显著提升了合金的耐腐蚀性。是第 2 篇代表论文的作者。</li></ul> |
|--|---|

|                  |   |
|------------------|---|
|                  | <p>4. 姓名：薛鹏</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 排名：4</li> <li>• 行政职务：无</li> <li>• 技术职称：副研究员</li> <li>• 工作单位：中国科学院金属研究所</li> <li>• 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所</li> <li>• 对本项目贡献：参与了《重要科学发现》中第 1 项的实验工作，做出重要贡献。澄清了影响铝-铜异种金属 FSW 接头性能的关键因素，精确表征了界面微观特征，建立了提高异种金属接头性能的界面层微观结构调控技术。是第 2 篇代表论文的第一作者。</li> </ul> <p>5. 姓名：王东</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 排名：5</li> <li>• 行政职务：无</li> <li>• 技术职称：副研究员</li> <li>• 工作单位：中国科学院金属研究所</li> <li>• 完成项目时所在单位：中国科学院金属研究所</li> <li>• 对本项目贡献：参与了《重要科学发现》中第 1、3 项的实验工作，做出重要贡献。系统探索了不同接头形式异种金属的焊接的工艺，首次开展了非晶合金与金属的 FSW，通过优化工艺参数，实现了两者的高强度连接，发现非晶仍保持未晶化状态，建立了非晶合金与金属的连接新方法。通过工艺优化，在高焊速下实现了金属基复合材料的等强焊接，建立了复合材料的高质量焊接工艺。是第 2 篇代表论文的作者。</li> </ul> |
| <p>完成人合作关系说明</p> | <p>第一完成人马宗义为该项目负责人，提出整个项目的主要学术思想，规划研究计划与实施方案。对所有《重要科学发现》均做出贡献，是全部8篇代表性论文的通讯作者。</p> <p>第二完成人肖伯律在马宗义领导的课题组中工作，参与了项目的总体运行以及实验方案设计，对《重要科学发现》中第1-3项均做出重要贡献。是第2、4、5、8篇代表论文的作者。</p> <p>第三完成人倪丁瑞在马宗义领导的课题组中工作，参与了项目的总体运行以及主体实验工作，对《重要科学发现》中第1-2项做出重要贡献。是第2篇代表论文的作者。</p> <p>第四完成人薛鹏在马宗义和肖伯律的指导下完成其博士毕业论文，毕业后继续在马宗义领导的课题组中工作，开展了异种金属搅拌摩擦焊接过程材料流动及工艺优化的研究，对《重要科学发现》1做出重要贡献，是代表论文2的第一作者。</p> <p>第五完成人王东在马宗义领导的课题组中工作，参与了《重要科学发现》中第1、3项做的实验工作，做出重要贡献。是第2篇代表论文的作者。</p>  |