

2024 年度拟提名陕西省技术发明奖项目公示内容

一、项目名称

高温钛铝合金组织性能调控关键技术与应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该成果针对航空航天重大装备对高温 TiAl 合金的迫切需求，发明了基于胞状反应的高强高塑组织调控与低温热加工、基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造、片层取向强韧化等关键技术，解决了高温 TiAl 合金强塑性匹配差、锻造易开裂与组织不均匀的难题，研制的 TiAl 合金锻件、板材以及压气机内环、进口导流叶片、零级压气机叶片、四级高压压气机叶片等关键耐热部件在航空航天重要型号中获得应用，成果创新突出。该项目获授权国家发明专利 38 项，发表论文 141 篇，SCI 收录 128 篇。培养国家级人才 2 人，国家级青年人才 2 人，博士研究生 19 名，硕士研究生 29 名。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。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省技术发明奖提名条件。特提名为陕西省技术发明奖一等奖。

三、项目简介

高温 TiAl 合金因具有低密度、高比强度、高比模量以及优异的高温抗氧化性能，是高温钛合金使用上限和高温合金使用温度下限区间内重要候选材料，目前，以 γ 相为主的高温 TiAl 合金使用温度可达 700°C 以上，有望替代镍基高温合金与高温钛合金用于制备航空发动机、高超声速飞行器耐热部件，在实现大幅度减重（减重效果可达 40-50%）的同时提高工作温度和热机效率。然而，TiAl 合金具有金属间化合物的本征脆性且成形困难，导致锻件、板材、部件研制与生产过程中极易出现组织不均匀、变形开裂等缺陷，成品率极低（10-20%），成本高昂（单价约为钛合金锻件的 10-15 倍），不仅极大阻碍了 TiAl 合金的工程应用，更制约了新型航空航天武器装备的研制。针对高温 TiAl 合金室温塑性低、变形易开裂以及锻件组织不均匀的国际性难题，该项目在国家 973、国家重点研发计划以及国家自然科学基金等科研项目的持续支持下，历经 10 余年，对高温 TiAl 合金的胞状反应机理、动态/亚动态再结晶协同作用与片层取向强韧化机理开展了大量的创造性研究，突破了高强高塑组织调控方法、细晶均匀组织锻造以及片层取向强韧化等多个关键技术，国内首例实现 TiAl 合金锻件在新型航空发动机高压压气机转子叶片等多种轻质耐高温部件上的应用，取得了重要突破。主要发明内容如下：

(1) 发明了基于胞状反应的高强高塑组织调控与低温热加工技术，解决了

高温 TiAl 合金室温塑性/高温强度难以同时提升与成形温度过高（大于 1200°C）的难题。利用胞状反应生成类珠光体组织，首次在高温 TiAl 合金中提出了三相三态（T-T）与三相双态（T-B）两种新型显微组织结构，发现其具有优异的室温/高温强度-延展性和热成形能力，室温/高温综合力学性能显著优于普遍认可的全片层组织，基于此实现了 TiAl 合金高强高塑组织调控与低温热加工。利用高强高塑组织调控技术将 TNM 合金（Ti-43.5Al-4Nb-1Mo-0.1B）塑性提高 2 倍以上，且从室温到 750 °C 范围内的屈服强度相比全片层组织提高 18% 以上；此外，发现调控后的类珠光体组织在 800°C（通常动态再结晶温度为 1100°C 以上）下即可发生动态再结晶，且具有 70% 以上的塑性，基于此，提出了一种利用 T-T 与 T-B 结构实现 TiAl 合金低温热加工的工艺，应用于 TiAl 合金（近）等温锻造与（近）等温轧制，可将实际成形温度从 1200°C 降低至 900°C，生产效率提高了 25%，能耗降低了 40%。

（2）发明了基于动态/亚动态再结晶的 TiAl 合金细晶锻造技术，解决了 TiAl 合金锻造易开裂与组织不均匀的难题，制备出了国内最大的 TiAl 合金锻件。阐明了 TiAl 合金多道次热变形过程中动态再结晶、亚动态再结晶、相变联合作用机制：动态再结晶具有爆发式形核而有限长大的特征，利于细化晶粒；亚动态再结晶可促进片层分解与晶粒球化，利于提高组织均匀性；热变形过程中发生的应力诱发 $\alpha_2 \rightarrow \beta$ 相转变与 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变分别制约了动态/亚动态再结晶进程。结合多场耦合条件下的缺陷预测技术，克服了 TiAl 合金锻造过程易开裂且在与模具接触端形成变形死区的瓶颈问题，实现了锻件晶粒尺寸与组织均匀性控制，制备出国内最大的 TiAl 合金锻件，直径大于 670mm，平均晶粒尺寸小于 30 μ m。研究成果直接应用于制备航空发动机压气机内环与静子叶环、宽速域航天发动机叶轮等大型环形零件，锻造成品率提高 60% 以上，锻件成本降低 50% 以上。

（3）发明了片层取向强韧化技术，并利用蠕变时效成形过程片层随形取向调控制备变截面部件，国内首例实现 TiAl 合金在高压压气机转子叶片上的应用。将 TiAl 合金超塑变形特征与等温锻造技术相结合，提出了蠕变时效成形方法，并揭示了复杂结构成形过程各向异性调控机理，通过控制蠕变时效过程中片层团的分解与转动，使得片层取向随构件形状演变，实现了片层取向强韧化。针对典型的压气机叶片成形，通过优化蠕变时效成形参数，实现了片层取向随着叶身轮廓渐变，解决了高温 TiAl 合金叶片等复杂构件经传统模锻后强塑性偏低、疲劳性能较差的难题。应用于新一代航空发动机进口导流叶片、零级压气机叶片、4 级高压压气机叶片等关键部件的研制，显著提高了叶片轴向的承载能力，将 Ti-4822 合金（Ti-48Al-2Cr-2Nb）叶片室温强度、室温塑性、高温强度与旋弯疲劳强度等性能提升 20% 以上。

该项目从 TiAl 合金的胞状反应、再结晶、片层转化等基础问题出发，提出了新型组织结构（抗拉强度 > 950MPa，延伸率 > 1.3%，750°C 抗拉强度 > 800MPa，综合力学性能优于国内外同类合金），发明了细晶锻造技术（直径大于 670mm 锻件：平均晶粒尺寸小于 30 μ m，各部位晶粒尺寸偏差小于 5 μ m）与片层取向强韧

化技术。高强高塑组织调控技术与细晶锻造技术应用于陕西宏远航空锻造有限责任公司（148 厂）、中国航空制造技术研究院（625 所）、西部超导材料科技股份有限公司（科创板上市企业）、西安超晶科技股份有限公司（国家级专精特新）、重庆金世利航空材料有限公司（国家级高新技术）等多家主要从事航空航天关键部件制造的企业，提高了生产效率与成品率，降低了研发/生产成本，取得了重要的经济与社会效益。此外，利用细晶锻造技术与片层取向强韧化技术制备的压气机内环、叶轮与叶片等关键耐热部件直接应用于沈阳发动机设计研究所（606 所）、中国航发四川燃气涡轮研究院（624 所）、中国航发动力股份有限公司、北京动力机械研究所（31 所）等航空航天主机设计与制造厂所，为新型航空发动机、高马赫飞行器等国家重大型号的研制提供了重要支撑。

该项目获授权国家发明专利 38 项，发表学术论文 141 篇，其中 SCI 论文 128 篇，中科院 JCR1 区和 2 区论文共 84 篇。论文得到来自美国、英国、德国、俄罗斯、法国、日本、奥地利、韩国等近 30 多个国家和地区 200 多个研究机构的 1000 余名科研工作者，以及国内多个知名研究机构和领域内知名学者的正面引用与评价，先进性得到国内外广泛认可。该项目培养国家级人才 2 人（完成人 1、4），国家级青年人才 2 人（完成人 3、5），博士研究生 19 名，硕士研究生 29 名。多个 TiAl 合金产品为“国内首例”与“国内最大”，近 3 年产生的经济效益超 1 亿元，有力支撑了新型航空航天重大装备研制。主要成果获得了 2024 年陕西省高等学校科学技术奖特等奖。

四、客观评价

1、国内外相关技术比较

（1）该项目利用胞状反应生成类珠光体组织，提出了 T-T 与 T-B 两种新型显微组织结构，将 TNM 合金室/高温力学性能提升为：抗拉强度 $>950\text{MPa}$ ，延伸率 $>1.3\%$ ， 750°C 抗拉强度 $>800\text{MPa}$ ，显著高于国内外同类合金。

（2）该项目发明了 TiAl 合金片层取向强韧化技术，并应用于制备新型航空发动机高压压气机叶片，显著提高了 Ti-4822 合金叶片轴向的承载能力，室温强度、室温塑性、高温强度与疲劳性能等相比于国内外同类合金综合提升 20%以上。

2、应用单位评价

该项目研究成果在陕西宏远航空锻造有限责任公司、中国航空制造技术研究院、西部超导材料科技股份有限公司、西安超晶科技股份有限公司、重庆金世利航空材料有限公司、沈阳发动机设计研究所、中国航发四川燃气涡轮研究院、中国航发动力股份有限公司、北京动力机械研究所、南京航空航天大学等国内多家从事航空航天制造的企业、研究院所以及高校应用后，得到高度认可与好评。部分评价如下：

陕西宏远航空锻造有限责任公司：我公司采用西北工业大学项目团队“高温钛铝合金组织性能调控关键技术与应用”研究成果，解决了高温 TiAl 合金开坯锻造易开裂、成品率低的难题，突破了大规格 TiAl 合金锻坯制备以及锻件组织均匀性控制等关键技术。利用等温锻造设备成功制备出 $\Phi 400$ 、 $\Phi 500$ 、 $\Phi 600\text{mm}$ 等

多个规格的大尺寸 TiAl 合金锻饼，锻造成品率提高 60%以上，锻件成本降低 50%以上。自 2015 年以来，为国内 10 余家科研院所、高校、军工企业提供了质量优异的 TiAl 合金锻件，应用于多个航空航天预研型号，该成果的应用为我公司带来了良好的经济和社会效益。

北京动力机械研究所：我单位采用中科院金属所与西工大项目团队“高温钛铝合金组织性能调控关键技术与应用”研究成果，研制的 TiAl 合金宽速域航天发动机叶轮，不仅减重效果显著，经综合考核与验证，各项力学性能优异，服役稳定性与批次质量稳定性较高，满足型号使用要求，保障了相关型号任务的顺利开展，具有重要的国防意义。

西部超导材料科技股份有限公司：我公司采用西工大项目团队“高温钛铝合金组织性能调控关键技术与应用”研究成果，突破了 TiAl 合金锻造技术，成品率大幅度提高。此外，相关技术拓展应用于 Ti₂AlNb 合金、Ti₃Al 合金以及部分高温钛合金，解决了这些难变形材料锻件组织均匀性控制难题。自 2016 年以来，已为 20 余个研究所、高校与企业开发了 30 吨高质量、高性能的高温钛基合金材料，为多个航空航天型号提供了支撑，保障了新型装备的研制。形成的 TiAl 合金锻造技术已经发展成为我公司的一项具有核心竞争力的重要技术，显著提高了我单位在高端材料热加工方面的技术能力，为我公司带来了良好的经济效益和社会效益。

西安超晶科技股份有限公司：我公司采用西工大项目团队“高温钛铝合金组织性能调控关键技术与应用”成果，对高温 TiAl 合金锻件（部件）的力学性能进行优化，大幅度提高了构件服役性能。此外，利用项目成果解决了 TiAl 合金成形温度高的难题，将部分小型锻件与中小规格板材的成形温度从 1200℃降低至 900℃左右，生产效率提高了 25%，能耗降低了 40%。生产的 TiAl 合金材料力学性能与批次稳定性显著高于国内同类产品，并已经推广至 Ti₂AlNb 等材料，该技术的应用显著提高了我公司在新材料及其制备领域的竞争力。

重庆金世利航空材料有限公司：公司采用西工大项目团队“高温钛铝合金组织性能调控关键技术与应用”成果，解决了 TiAl 系合金成形困难的问题，将 TNM 合金成形温度从 1200℃降低至 1000℃以下，大幅度降低了 TiAl 系合金制造对热成形设备的要求，研制出了多批次 TiAl 合金、Ti₂AlNb 合金等 TiAl 系高温金属结构材料，不仅显著提高了公司在新型金属结构材料方面的研发能力，拓展了公司产品方向，更为多个重要型号的研制提供了支撑，为公司增加了发展潜力。

3、学术评价

该项目共计发表学术论文 141 篇，其中 SCI 论文 128 篇，中国科学院 SCI 期刊 1 区和 2 区论文共 84 篇，发表期刊包括 Acta Mater、Int J Plasticity、J Mater Sci Technol 等材料与加工领域顶级期刊。论文得到来自中国、美国、德国、俄罗斯、法国、日本、韩国、奥地利等近 30 多个国家和地区的 200 多个研究机构科研工作者的正面引用与评价，其中包括德国亥姆霍兹研究所、马克斯-普朗克研究所、德国亚琛大学、美国德克萨斯大学、美国俄亥俄州立大学、日本国立材料

研究所、美国空军研究实验室等国内外金属材料领域知名研究机构，他引总次数达 1200 余次。引文发表于 Prog Mater Sci、Nat Commun、Adv Sci、Acta Mater 等 170 余种材料和物理类主流期刊。其中，中国工程院院士聂祚仁教授等[Rare Metal Mat Eng, 2016, 45(10): 2485-2491]认为项目团队所研究的 TiAl 合金是 833~1073K 温度范围内航空航天和汽车领域的重要候选材料。瑞典皇家工程科学院院士、美国德雷塞尔大学 M.W. Barsoum 教授等[Ceram Int, 2016, 42: 16325-16331]将项目团队在 TiAl 合金力学性能领域的研究成果用于渗硼 Ti₂AlC MAX 表面磨损性能的研究。

4、已获得科技成果情况

该项目主要成果获得了 2024 年陕西省高等学校科学技术奖特等奖。

五、应用情况和效益

1.应用情况

该项目的应用主要分为三个方面：（1）发明的基于胞状反应的高强高塑组织调控与低温热加工技术、基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术主要应用于陕西宏远航空锻造有限责任公司、西部超导材料科技股份有限公司、西安超晶科技股份有限公司、重庆金世利航空材料有限公司等航空航天关键部件制造企业，这些单位不仅利用项目成果制备大规格 TiAl 锻件与板材，也拓展应用于制备 Ti₂AlNb 等高温钛基合金材料。（2）项目组利用基于胞状反应的低温热加工技术与基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术制备出 TiAl 合金板材与细晶锻件，提供给中国航空制造技术研究院、南京航空航天大学等航空航天研究院所与高校，这些单位利用板材和细晶锻件制备新型航空航天重大装备用耐热部件。（3）该项目采用基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术与蠕变时效成形过程片层取向强化技术制造了静子内环、叶轮、进口导流叶片、高压压气机叶片等关键耐热部件，直接为沈阳发动机设计研究所、中国航发四川燃气涡轮研究院、中国航发动力股份有限公司、北京动力机械研究所等航空航天主机厂所提供了零件产品，支撑了新型航空航天重大装备的研制。

从 2015 年开始，项目团队与陕西宏远航空锻造有限责任公司在 TiAl 合金锻造方面开展合作，利用发明的基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术，在 5000 吨、10000 吨等温锻机上成功制备出Φ400、Φ500、Φ600mm 等多个规格的 TiAl 合金锻饼，涉及 TNM 合金、高铌 TiAl 合金等多个牌号。基于此，陕西宏远航空锻造有限责任公司为多个航空航天预研型号提供支撑。

从 2015 年至今，项目团队先后向沈阳发动机设计研究所提供了多批次 TiAl 合金锻件与零部件，包含进口导流叶片 TiAl 合金方坯、等温锻造 TiAl 合金零级/一级/四级静子内环、零级/四级高压压气机叶片。叶片经沈阳黎明发动机制造公司检测，在 1.5×10^7 次循环下，通过了 450MPa 应力水平条件的旋转弯曲疲劳试验，国内首例实现 TiAl 合金锻件在新型航空发动机高压压气机叶片等多种轻质耐高温部件上的应用，支撑了某型核心机的研制。

2020-2022 年，项目团队向北京动力机械研究所提供了 TiAl 合金宽速域航天

发动机叶轮，用于替代高温合金叶轮，在保持服役温度不变的条件下实现了 30% 以上的减重，经综合考核与验证，各项力学性能优异，满足型号使用要求，保障了相关型号任务的顺利开展。

从 2021 年至今，项目团队向中国航空制造技术研究院提供了多批次的 TiAl 合金材料与热处理技术，包含高温高强 TiAl 合金、TiAl 合金板材、叶片均匀热处理技术等，其中 TiAl 合金板材是采用基于胞状反应的低温热加工技术制备，可用于复杂构件超塑成形，支撑了新型飞行器关键耐热部件的研制。

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	陕西宏远航空锻造有限责任公司	基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术	大尺寸 TiAl 合金锻坯： $\Phi 400$ 、 $\Phi 500$ 、 $\Phi 600$ mm 等规格	2015-2023	张飞岳 /17789285695
2	北京动力机械研究所	基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术	TiAl 合金宽速域航天发动机叶轮	2020-2022	王正 /15010502619
3	西部超导材料科技股份有限公司	基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术	TiAl 合金与高温钛基合金锻件： 75 吨	2016-2023	王凯旋 /18182665622
4	西安超晶科技股份有限公司	高强高塑组织调控技术，低温热加工技术	TiAl 合金小型锻件与中小规格板材： 45 吨	2015-2023	吴天栋 /18109211950
5	重庆金世利航空材料有限公司	高强高塑组织调控技术，低温热加工技术	多批次 TiAl 合金、 Ti_2AlNb 合金材料： 13 吨	2020-2023	刘亮亮 /17382331746
6	沈阳发动机设计研究所	细晶锻造技术与片层取向强韧化技术	TiAl 合金静子内环、进口导流叶片、压气机叶片	2015-2019	李惠莲 /15002422296
7	中国航空制造技术研究院	基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术	TiAl 合金板材与热处理方法	2021-2022	李震 /18810735668
8	中国航发四川燃气涡轮研究院	基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术	TiAl 合金 0 级导向叶片： 40 片	2018-2019	陈玉龙 /15802879193
9	中国航发动力股份有限公司	基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术	TiAl 合金锻坯： 15 公斤	2023	朱传志 /18700180956
10	南京航空航天大学	基于动态/亚动态再结晶的细晶锻造技术	TiAl 合金锻坯： 46.5 公斤	2018-2019	刘嘉 /13951699318

2.应用效益

(1) 经济效益

单位：万元人民币

自然年	其他应用单位	
	新增销售额	新增利润
2021	2625	443
2022	3625	587
2023	4545	680
累计	10795	1710

主要经济效益指标的有关说明：

近三年总计新增销售额 10795 万元，总计新增利润 1710 万元。

西部超导材料科技股份有限公司利用相关技术累计多销售 TiAl 合金与高温钛基合金产品 75 吨左右，新增销售额 5250 万元，新增利润 800 万元；西安超晶科技股份有限公司利用相关技术累计多销售 TiAl 系合金产品 45 吨左右，新增销售额 4375 万元，新增利润 750 万元；重庆金世利航空材料有限公司相关技术累计多销售 TiAl 系合金产品 13 吨左右，新增销售额 1170 万元，新增利润 160 万元。

(2) 社会效益

1) 满足了新型航空航天装备研制的重大需求

TiAl 合金具有轻质高强耐高温特性，可替代高温合金用于制备耐热承力部件实现 30% 以上的减重，但是由于其具有本征脆性且成形困难，导致国内外应用进展缓慢，严重制约了新型航空发动机与航天飞行器的研制，该项目在 TiAl 合金性能提升与成形技术上取得突破，研究成果直接应用于制备航空发动机压气机内环与静子叶环、进口导流叶片、零级压气机叶片、四级高压压气机叶片以及宽速域航天发动机叶轮等关键耐热部件，支撑了航空航天重要型号的研制，提高了武器装备的先进性，产生了重要的社会效益。

2) 推动了我国高温金属结构材料的发展

TiAl 合金作为一种重要的高温金属结构材料，具备轻质、高强、高模、耐高温等性质，是高温金属材料重要的发展方向，但是由于存在本征脆性与难变形两大缺陷，迟迟无法大规模应用，导致 TiAl 合金的发展遇到了瓶颈，该项目解决了制约 TiAl 合金发展的瓶颈问题，促进了在航空航天关键部件上的应用，进而也推动了 TiAl 合金材料的研究与发展，丰富了高温金属结构材料体系。

3) 培养了一批专业人才

该项目完成人在中国工程院、中国材料学会、中国有色金属学会、中国机械工程学会、中国航空学会、美国 TMS 等举办的“中国工程院国际科技发展战略高端论坛暨第 6 届材料基因高层论坛”、“2022 国际有色金属新材料大会”“中国材料大会”、“IFAM-2020 新材料国际发展趋势高层论坛”、“TMS 年度会议”、

"PRICM10"等学术会议上做邀请报告 30 余次；牵头举办了“第十六届全国钛及钛合金学术交流会”、“首届特种金属材料与先进制造技术高层论坛”等学术会议。项目团队承担了 TiAl 合金领域多个重大、重点国家级科研项目，引领了国内高温 TiAl 合金相变与变形的研究。该项目培养国家级人才 2 人（完成人 1、4），国家级青年人才 2 人（完成人 3、5），博士研究生 19 名，硕士研究生 29 名，为行业的发展提供了有利的人才支撑。

4) 丰富了 TiAl 合金组织体系，提升了国际影响力

该项目首次提出了 T-T 与 T-B 两种新型显微组织结构，发现其具有优异的室温/高温强度-延展性和热成形能力，室温/高温综合力学性能显著优于普遍认可的全片层组织，相关论文发表于[Acta Mater, 2022, 225: 117585]与[Int J Plasticity, 2023, 170: 103756]，其中[Acta Mater, 2022, 225: 117585]获得高被引。美国国家工程院院士、加利福尼亚大学伯克利分校 Robert O. Ritchie 教授等[Int J Plast, 2023, 171: 103813]认为项目团队所揭示的 TiAl 合金高温强化机理同样适用于片层 CLAM 钢；国家杰青赵永好教授等[Mater Sci Eng A 2024, 893: 146085]指出，“TiAl 合金的新组织 T-T 结构的室温力学性能非常突出，强度接近 PST 单晶，且室温塑性是全片层组织的两倍”；TiAl 合金领域国际知名专家林均品教授等[Mater Charact 2023, 206: 113390]认为，“该工作打破了强塑性相互制约的现象，且类珠光体非常有助于提高热成形性能”。该项目成果增加了 TiAl 合金典型组织体系，产生了重要的国际影响力。

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	一种同时提高 TiAl 合金高温强塑性的方法	中国	ZL202211386082.9	2023年6月16日	第 6053019 号	西北工业大学	唐斌, 郑国明, 孙鹏, 李金山, 王军
2	发明专利	在 TiAl 合金中获得三态组织和双态组织的热处理工艺	中国	ZL202110260634.0	2022年4月19日	第 5091079 号	西北工业大学	唐斌, 郑国明, 李金山, 王军, 王毅, 寇宏超, 陈彪, 樊江昆
3	发明专利	TiAl 基合金叶片毛坯的超塑蠕变时效成形方法	中国	ZL201810267996.0	2019年12月27日	第 3645351 号	西北工业大学	李金山, 楚玉东, 唐斌, 寇宏超, 薛祥义, 王军, 王毅, 孙智刚
4	发明专利	一种 TiAl 合金近等温锻造方法	中国	ZL202010353049.0	2021年10月22日	第 4743714 号	西北工业大学	唐斌, 陈晓飞, 李金山, 寇宏超, 王军, 王毅, 陈彪, 樊江昆, 赖敏杰
5	发明专利	一种组织均匀 TNM 合金锻坯的制备方法	中国	ZL201910214268 .8	2020年11月3日	第 4069261 号	西北工业大学	李金山, 唐斌, 向林, 薛祥义, 寇宏超, 王军, 王毅, 孙智刚

6	发明专利	一种 TiAl 合金开坯锻造的方法	中国	ZL201711081243.2	2019年4月19日	第 3344259 号	西北工业大学	唐斌, 向林, 李金山, 薛祥义, 寇宏超, 王军, 孙智刚
7	发明专利	一种无包套 TiAl 合金大尺寸饼坯的锻造方法及应用	中国	ZL201910277054.5	2022年4月5日	第 5049931 号	中国科学院金属研究所	刘冬;董志国;王鸣;刘亮亮;王亚然;刘仁慈;崔玉友
8	发明专利	一种钛铝合金全片层组织的调控方法	中国	ZL202010816316.3	2022年12月27日	第 5665053 号	西北工业大学	寇宏超, 王艺超, 孙智刚, 刘旭, 高文强, 唐斌, 李金山
9	发明专利	一种能够改善其均匀变形能力的 TiAl 合金及其制备方法	中国	ZL202211113828.9	2023年5月5日	第 5939705 号	西北工业大学, 西北工业大学重庆科创中心	唐斌, 陈晓飞, 李金山, 王军
10	发明专利	一种适用于 TNM 合金板材制备的方法	中国	ZL202111584215.9	2023年11月3日	第 6458769 号	西北工业大学重庆科创中心, 西北工业大学	唐斌, 卫贝贝, 李金山, 陈晓飞, 寇宏超, 王军

七、主要完成人情况（不超过 6 人）

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
李金山	1	凝固技术国家重点实验室主任	教授	西北工业大学	西北工业大学	发明了基于胞状反应的高强高塑组织调控与低温热加工技术，对第 1 项技术发明做出贡献，主要知识产权 1, 2, 10；发明了基于动态/亚动态再结晶的 TiAl 合金细晶锻造技术，对第 2 项技术发明做出贡献，主要知识产权 4, 5, 6, 9；发明了蠕变时效成形方法，揭示了复杂结构成形过程各向异性调控机理，对第 3 项技术发明做出贡献，主要知识产权 3, 8。
刘冬	2	无	研究员	中国科学院金属研究所	中国科学院金属研究所	揭示了高温 TiAl 合金的动态再结晶机制，提出了 TiAl 合金多道次热变形过程中相组成与分布的控制方法，对第 2 项技术发明做出贡献，主要知识产权 7；将 TiAl 合金锻件应用于航空发动机进口导流叶片、零级压气机叶片、四级高压压气机叶片等关键部件，对第 3 项技术发明做出了贡献。
唐斌	3	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	揭示了高温 TiAl 合金的双重时效过程中的胞状反应机理，阐明了类珠光体组织的强韧化机制，对第 1 项技术发

						明做出贡献，主要知识产权 1, 2, 10; 发明了基于动态/亚动态再结晶的 TiAl 合金细晶锻造技术，对第 2 项技术发明做出贡献，主要知识产权 4, 5, 6, 9; 提出了蠕变时效成形方法，对第 3 项技术发明做出贡献，主要知识产权 3, 8。
寇宏超	4	凝固技术 国家重点 实验室常 务副主任	教授	西北工业大学	西北工业大学	发明了大规格 TiAl 合金锻坯制备技术，对第 2 项技术发明做出了贡献，主要知识产权 4, 5, 6; 提出了 TiAl 合金片层组织调控方法，对第 3 项技术发明做出了贡献，主要知识产权 3, 8。
王军	5	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	发现类珠光体组织具有优异的室温/高温强度-延展性和热成形能力，对第 1 项技术发明做出了贡献，主要知识产权 1, 2, 10; 设计开发了多种 TiAl 合金的细晶锻造工艺，对第 2 项技术发明做出了贡献，主要知识产权 4, 5, 6, 9; 揭示了挤压、等温锻造过程中片层组织的形成、偏转与转化规律，对第 3 项技术发明做出了贡献，主要知识产权 3。
陈晓飞	6	无	无	西北工业大学	西北工业大学	提出了利用类珠光体结构动态再结晶特性降低 TiAl 合金成形温度的方法，对第 1 项技术发明做出了贡献，主要

						知识产权 10；提出了多道次换向等温锻造工艺，对第 2 项技术发明做出了贡献，主要知识产权 4，9。
--	--	--	--	--	--	--

八、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	项目负责单位，提出该项目的总体研究思路，制定实施方案。（1）发明了基于胞状反应的高强高塑组织调控与低温热加工技术，解决了高温 TiAl 合金室温塑性/高温强度难以同时提升与成形温度过高的难题。（2）发明了基于动态/亚动态再结晶的 TiAl 合金细晶锻造技术，解决了 TiAl 合金锻造易开裂与组织不均匀的难题，制备出了国内最大的 TiAl 合金锻件。（3）将 TiAl 合金超塑变形特征与等温锻造技术相结合，提出了蠕变时效成形方法，并揭示了复杂结构成形过程各向异性调控机理。
中国科学院金属研究所	2	项目主要成员单位，负责高温 TiAl 合金构件制备与应用推广。（1）将开发的 TiAl 合金细晶锻造技术成功应用于制备航空发动机压气机内环与静子叶环等大型环形零件，取得了突出的经济与社会效益。（2）将开发的片层取向强韧化技术应用于航空发动机进口导流叶片、零级压气机叶片、四级高压压气机叶片等关键部件的研制，支撑了航空航天型号的研制。

九、完成人合作关系说明

本项目成果由项目第一完成人李金山与刘冬、唐斌、寇宏超、王军、陈晓飞等人合作完成。其中李金山与唐斌、寇宏超、王军为西北工业大学材料学院教师，属于稀有金属材料与加工研究团队成员，陈晓飞为唐斌教授的博士研究生。刘冬为中国科学院金属研究所的研究员，长期与李金山、唐斌、寇宏超等合作。

第一完成人李金山教授是西北工业大学材料学院稀有金属材料与加工研究团队的负责人，主持并组织了该项目的研究工作。

第二完成人刘冬研究员是中国科学院金属研究所的青年骨干，长期从事钛铝合金的研究工作，与李金山教授所在稀有金属材料与加工研究所团队有着长期稳定良好的合作，与李金山教授于 2016 年 7 月至 2020 年 6 月共同完成国家重点研发计划《加工过程多场耦合作用下缺陷预测与工艺优化》（2016YFB0701303）。与李金山教授合作发表项目相关论文 4 篇。

第三完成人唐斌教授是西北工业大学材料学院稀有金属材料与加工研究团队的青年骨干，2007 年作为博士研究生加入团队，毕业后留组工作，与李金山教授合作发表项目相关论文 58 篇，共同获授权知识产权 30 项。

第四完成人寇宏超教授是西北工业大学材料学院稀有金属材料与加工研究团队的核心成员，2004 年作为教师加入团队。与李金山教授合作发表项目相关论文 88 篇，共同获授权知识产权 31 项。

第五完成人王军教授是西北工业大学材料学院稀有金属材料与加工研究团队的青年骨干，2008年作为博士研究生加入团队，毕业后留组工作，与李金山教授合作发表项目相关论文9篇，共同获授权知识产权30项。

第六完成人陈晓飞是西北工业大学材料学院的在读博士研究生，2018年作为李金山教授的硕士研究生加入团队，2020年至今作为唐斌教授的博士研究生在团队工作。与李金山教授合作共同获项目相关知识产权6项。