

深耕高温材料 助力航空工业

——记西北工业大学高温合金定向凝固研究团队

西北工业大学高温合金研究起始于1963年。著名物理冶金学家、中国工程院院士傅恒志自1962年从前苏联列宁格勒工学院学成回国后，即开创了我国铸造高温合金成分组织研究。1976年，傅恒志主持成立了“高温合金定向凝固与组织控制”科研组，是目前“高温合金定向凝固”团队的前身。该科研组研制出我国第一台快速定向凝固炉，为工业性定向及单晶高温合金的实验研究和凝固理论研究创造了必要条件。1978年，该团队又研制出我国第一台液态金属冷却定向凝固炉，开创了高梯度定向凝固研究先河。1979年，傅恒志在国际上率先发表了“高温合金非平衡凝固特性”论文，奠定了我国高温合金定向凝固的理论基础。

傅恒志院士目前仍然活跃在科研一线，担任西北工业大学材料学院高温合金定向凝固团队的学术顾问。目前该团队以刘林教授为代表的学科带头人，包括张军教授、苏海军教授以及黄太文、杨文超、郭敏、郭跃岭等年轻学者和三名工程技术人员，46名博士、硕士研究生是开展创新研究和开发的主要力量。

主要研究条件

团队拥有2200平方米的实验室，研发的定向凝固实验平台包括材料制备与晶体生长系统（2005年），水冷高梯度定向凝固炉（2006年），2 kg LMC/HRS定向凝固设备（2010年），5 kg LMC/HRS定向凝固炉（2013年），超高温定向凝固设备（2015年）。团队的研究成果形成了从实验室基础研究到工业示范设备的全面覆盖，从而进一步巩固了我国在此领域的领先地位，受到国内外的广泛关注，扩大了学术影响力和技术辐射能力。项目研制的高梯度定向凝固设备群还为国内外众多研究机构和企业制备了大量的单晶和定向高温合金样品和零件。

实验室拥有高温度梯度定向凝固设备共12台套，其中工业示范设备的温度梯度为170~250 K/cm，远超出目前国内外同类设备所能达到的60~80 K/cm，见表1。

除定向凝固设备以外，实验室还具备真空电弧炉和真空感应炉等合金熔炼设备，可以制备各种高温合金及难熔合金母合金；购置了全台进口的高温合金热



团队合照

表1 国内外定向凝固设备的特征参量

定向凝固技术	机构	一次枝晶间距/mm		温度梯度/(K·cm ⁻¹)	
		叶缘	叶身		
HRS		0.60	0.55	20~40	
	德国	ENU ^(a)	0.30	0.25	50~60
		DPC ^(b)	0.38	0.36	40~50
LMC	美国	MU ^(c)	0.39	0.28	60~80
		GE ^(d)	0.26	0.22	-
	俄国	GE ^(d)	-	0.20	40~65
		VIAM ^(e)	-	-	~120
中国	IMR ^(f)	0.35	0.30	80~100	
	NWPU ^(g)	0.26	0.22	170~250	

注：(a) 德国埃尔朗根-纽伦堡大学，(b) Doncasters精密铸造，(c) 美国密歇根大学，(d) 美国GE公司，(e) 全俄航空材料研究院，(f) 中科院金属研究所，(g) 西北工业大学

处理设备以及真空气淬炉；在高温合金铸造方面，具备50 kg三室半连续细晶铸造炉及配套设备。室温和高温的拉伸性能以及蠕变测试条件也完全具备。实验室已经具备了高温合金母合金冶炼-铸造（定向凝固和普通铸造）-热处理-力学性能测试等完整的研发条件。

团队十分重视高温合金设计及制备的计算及模拟，使用TherCal-Dctra、JMatPro、PanDate和ProCast等宏微观模拟软件，可以实现高温合金材料设计、组织预测和工艺优化模拟。

主要研究领域及进展

随着国家大型飞机及“两机”等重大专项的启动，高温合金由于其优异综合性能，迎来了其发展的又一个春天。研究团队在原有的研究基础上拓展了新的研究方向，在高温合金材料发展、凝固特性、组织和缺陷控制、力学性能优化等领域全方位地开展了富有创新性的研究和开发。

(1) 建立了高梯度/超高梯度定向凝固技术。先进高温合金制备依赖于先进的定向凝固技术，目前通用

的定向凝固技术由于温度梯度低，常导致制备材料性能差、制备效率低。团队在国家重大科学仪器项目的支持下，率先研发了系列高温度梯度定向凝固设备，为高性能高温金属材料制备提供了先进手段。目前，实验室的定向凝固设备规模居国内高校首位，成为我国定向凝固研究和高温合金制备的重要基地。这些设备不仅满足了科研急需，还服务于国内外众多的科研院所和高等学校。基于先进的高梯度定向凝固方法，在更宽参数范围（温度梯度30~800 K/cm，抽拉速率1~600 μm/s）探明了单晶高温合金随温度梯度、抽拉速度参数微观组织演化规律；采用高温度梯度、快速抽拉以及熔体超温处理等多种技术措施，实现了高温合金超细枝晶和低偏析制备。相对于传统工艺制备的单晶一次间距为250~400 μm，其研究获得了一次枝晶间距仅为38~123 μm超细枝晶单晶；深入研究了枝晶组织超细化机理，发现了枝晶细化导致微观偏析显著降低，有利于均匀化处理，显著提高了单晶高温合金力学性能；相对于常规定向凝固，高温度梯度制备的试样其持久寿命提高32%。



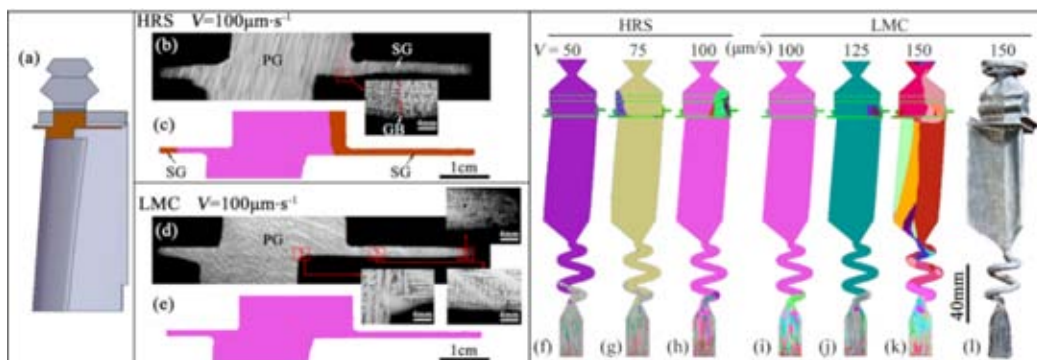
液态金属冷却高梯度定向凝固设备

(2) 发展了单晶高温合金成分体系, 研制出第三、第四代模型合金。优化合金成分设计与制备工艺是目前改善和提高高温合金性能的主要方法。合金成分的显著变化特点是难熔元素含量的增高。通过加入大量的难熔元素, 如Ta, Mo, W, Re等, 能够有效提高合金的承温能力。但难熔元素的添加, 不仅极大地提高了材料成本、增加了合金密度, 而且加重了元素的偏析、晶体缺陷及拓扑密堆相(TCP)有害相的析出几率。因此, 发展高性能、低成本、良好组织稳定性和良好可铸性的新型单晶高温合金, 迫切需要进一步优化成分设计。基于此, 团队对新型单晶高温合金材料发展进行了深入研究。在材料设计方面, 他们吸取国际主流高温合金设计理念, 基于分子轨道计算的d-电子理论、第一原理计算等先进理论和模型, 提出高代次合金设计成分方案, 初步建立了高代次合金设计的数据库。在制备技术方面, 他们利用改进的HRS技术和LMC等高梯度定向凝固技术, 以及新型热处理技术。最终提出有关1 000 °C以上使用先进高温合金成分设计及制备技术若干技术难题的解决方案。

(3) 发现了单晶高温合金晶粒生长竞争淘汰规律, 实现了单晶高温合金晶体取向精确控制。单晶高温合金之所以成为航空发动机材料“皇冠上的明珠”, 一个重要特征就是在特定的晶体取向具有优异的高温力学性能。如果制备单晶叶片中, 晶体取向哪

怕偏离择优方向几度, 材料性能就会明显下降, 造成叶片报废。团队系统研究了定向凝固过程中晶体择优取向、热流方向及晶体生长方向的关系, 探明了不同位向关系枝晶的竞争淘汰规律, 并率先建立了异面汇聚枝晶竞争生长模型, 为单晶起晶阶段的晶体取向演化分析奠定了理论基础。团队结合实验和数值模拟系统研究了螺旋选晶过程晶粒的演变规律, 建立了选晶器结构参数、工艺参数和选晶效率的关系, 优化设计了有效的螺旋选晶器; 发展了获得一致晶体取向的定向凝固工艺规范, 实现了单晶取向偏离控制在5°以内。

(4) 提出了系列控制高温合金晶体取向和铸造缺陷的技术措施, 为叶片合格率提高奠定了技术基础。单晶高温合金叶片形状极为复杂, 如果在界面突变区域场产生杂晶等铸造缺陷, 将造成叶片报废。团队首先研究了截面变化对晶体生长取向的影响。具体分析了突变截面处温度场、枝晶生长和晶体取向演化过程, 分析了温度梯度、抽拉速率、晶体取向等因素对平台杂晶形成的影响, 获得了突变截面处枝晶生长和晶体取向演化的规律。团队进而提出了平台杂晶形核的判据, 并提出了三种控制杂晶技术(即: 定向凝固到平台附近时降低抽拉速率, 在平台与叶身交接位置的热节处放置高效导热体, 从基体设置引晶杆连接到平台边角), 有效避免平台处杂晶的形成。



单晶叶片杂晶缺陷控制

(5) 提出了新型热控高温合金细晶铸造技术, 解决了大型薄壁复杂构件的晶粒控制与充型完整性的难题。团队采用新型热控工艺, 结合化学细化技术, 攻克了高温合金复杂组织控制和细晶铸造难题。高温合金铸件还用于发动机机匣等重要部位, 由于铸件尺寸大、形状极为复杂, 其尺寸超差、晶粒粗大、冶金缺陷居高不下等问题久攻不克。团队首先攻克了晶粒细化难题。他们在高温合金晶粒细化机理的研究基础

上, 采用化学细化与热控技术相结合, 研制出镍基高温合金铸件整体晶粒细化的先进高效、经济实用的铸造技术, 形成了具有我国自主知识产权的高温合金化学细晶铸造工艺规范。原国防科工委组织的成果鉴定认为: “该研究创新了传统的细晶铸造模式, 实现了低成本制备高性能高温合金细晶铸件, 提升了高温合金细晶铸造技术的水平。整体研究成果达到国际先进水平, 所开发的同质细化剂在国际上属首创。”

主要成果及推广

近五年来, 该团队承担了国家“863”、国家“973”、国家重点研发计划、自然科学基金重点项目等多项科研项目。在高温合金领域发表学术论文100余篇, 获得国家发明专利16项, 培养研究生20余名, “单晶高温合金高梯度定向凝固及组织优化”获得2017年度教育部自然科学二等奖。相关成果在航空及航天企业得到应用, 解决了高梯度定向凝固设备研制、单晶叶片晶体取向优化及缺陷控制、高温合金等轴晶铸造组织优化等多项难题。

发展方向及工作重点

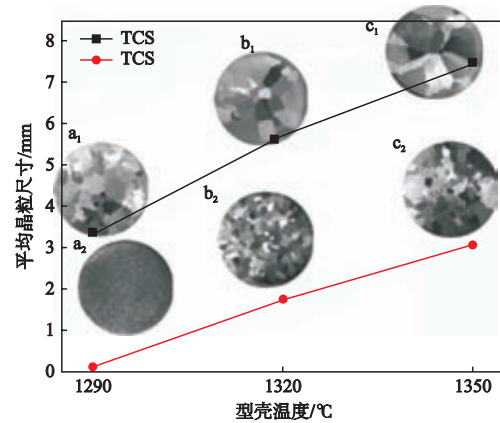
经过六十多年的发展, 我国已经研制出系列的铸造高温合金用于在产和在研的航空发动机。尽管国内外在涡轮叶片的后继材料如陶瓷基复合材料、C/C复合材料等方面开展了广泛的预研工作, 但在目前和今后的十几年内, 单晶涡轮叶片材料仍占有不可替代的主导地位。2016年底, 工信部、国家发改委、科技部、财政部等四部委联合发布的《新材料产业发展指南》指出, “开展高温合金及复杂结构叶片材料设计及制造工艺攻关, 完善高温合金技术体系及测试数据, 解决高温合金叶片防护涂层技术, 满足航空发动机应用需求。”

我国航空发动机和工业燃机用高温合金在设计选材上多以仿制为主, 缺乏对单晶高温合金材料系统性、自主性的研究开发。新型发动机需要第四代单晶高温合金与复杂空心冷却叶片技术相结合。我国的相关研究还处于起步阶段, 距离单晶叶片的组织、晶体取向、铸造缺陷、型腔通道、尺寸精度等参数方面的精确控制还有相当差距。

西北工业大学刘林教授团队以国家重大需求为己任, 在高温合金材料发展、铸造工艺、力学性能等领域继续耕耘, 近期主要的学科和产业化发展方向为:

(1) 高梯度定向凝固技术的工业示范研究。加快实验室的高温度梯度(100~200 °C/cm)和超高梯度(大于200 °C/cm)技术在单晶和定向凝固叶片制备中的应用研究, 制备低偏析、超细化的高性能叶片。

(2) 复杂结构高温合金铸件组织控制研究。目前航空发动机高温合金铸件结构向着大型化、复杂化和



高温合金细晶铸造技术



刘林老师(右一)在指导研究生

薄壁化等方向发展, 带来充型困难、组织粗大、均匀性差、疏松多、尺寸不稳定等诸多问题, 需要从铸件充型及凝固原理入手, 解决其中的关键技术问题, 为大型复杂铸件的结构设计铸造工艺优化提供依据。

(3) 单晶高温合金热处理制度优化。目前镍基单晶高温合金难熔元素含量持续增高, 由于难熔元素扩散系数低, 使铸件产生组织粗大和严重元素偏析, 导致固溶处理出现“难均匀、超耗时、易初熔”三个难题。需要根据组织尺度和元素偏析特点制定优化的热处理制度, 以实现低偏析、无共晶和组织均匀化的目标。