

# 中国科学院金属研究所高温合金研究部

## 一、概 况

中国科学院金属研究所成立于1953年,是新中国成立后中国科学院创建的首批研究所之一。创建者是我国著名的物理冶金学家李薰先生。建所以来,一直致力于材料的结构、性能、服役行为及其防护技术的研究,同时注重材料制备与加工及工程化研究。经过老一代科学家的艰苦创业和几代科技工作者的不懈努力,中国科学院金属研究所已经成为我国材料科学与工程领域重要的研究基地和人才培养基地,为材料科学的发展做出了杰出贡献。

金属研究所高温合金研究部由两院院士、2010年国家最高科学技术奖获得者师昌绪先生创建于上世纪六十年代,主要从事高温结构材料的合金设计、制备工艺、微观结构和服役性能等方面的研究工作,多年来研制了系列铸造和变形高温合金,发展了真空精铸、定向凝固和电磁离心铸造等多种先进工艺技术。

目前,高温合金研究部以推进先进高温合金材料与技术的工程化,突破制约国内相关行业发展的技术瓶颈为主要目标,保持基础研究和应用研究均衡发展。近年来高温合金研究部承担了多项高温结构材料的基础科研和工程研制任务。例如,2009年,承担了国家863重大项目“重型燃气轮机关键技术及系统”子课题“透平叶片材料与工艺研究”;2010年,组织实施了国家973项目“高温合金材料设计与制备的基础研究”;2011年,承担了中科院战略先导科技专项“未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统”中“合金结构材料”子课题,同时还承担了国家自然科学基金联合资助基金重点项目2项;近五年来,研究部承担了20余项国家自然科学基金面上项目和青年基金项目。

高温合金研究部现有职工和研究生近200人,其中中国工程院院士1人,研究员14人,副研究员15人;40岁以下的科技人员中,75%以上拥有博士学位。自2003年以来,有3人入选中国科学院“百人计划”引进海外杰出人才项目,到高温合金研究部工作。

目前金属所高温合金研究部研发试验中心已经正式投入使用,试验中心集高温合金母合金熔炼、型壳型芯制造、精密铸造及相关分析检测于一体,为高温合金研究部承担的多项攻关课题提供了先进的制备和检测平台。

## 二、主要研究方向

- 铸造高温合金(等轴晶、定向柱晶、单晶):针对先进动力系统用高温结构材料,开展合金设计、制备工艺、微观结构和服役性能等方面的研究
- 变形高温合金:针对涡轮盘用变形高温合金,开展成分设计优化、制备工艺、微观结构和服役性能等研究
- 金属间化合物: NiAl、Ni<sub>3</sub>Al等金属间化合物的设计制备与组织性能研究
- 高温合金的纯净化冶炼:高温合金的纯净化冶炼技术研究
- 外场作用下的凝固过程控制:电磁离心铸造、超细晶等多种材料凝固过程的模拟和实验研究
- 高温合金的腐蚀与防护研究:复杂环境条件下,高温合金的腐蚀与防护机理、涂层渗层制备技术研究
- 计算模拟:针对凝固过程、缺陷控制及枝晶生长理论、涂层失效机理、材料组织性能演化开展计算模拟研究

## 三、研究成果

上世纪60年代,师昌绪院士带领金属所的科研人员成功研制了K417高温合金,发展了真空精密铸造技术,突破了空心叶片铸造工艺难关,实现了从锻造合金到铸造合金、从实心叶片到空心叶片两个飞跃,仅用一年多的时间



2010年,师昌绪院士获“国家最高科学技术奖”

就研制出了我国第一枚铸造空心叶片,也使中国成为当时世界上除美国之外第二个掌握铸造空心涡轮叶片制造技术的国家。这一成就是中国高温合金发展的一座里程碑,引领了此后几十年中国高温合金研发与应用领域的迅速发展。师昌绪院士因在我国高温合金和新型合金钢领域的开创性贡献,2010 年荣获“国家最高科学技术奖”。

高温合金研究部先后研发了系列(多晶、定向和单晶)铸造高温合金材料,为建立和完善我国高温合金材料体系奠定了基础。以抗热腐蚀高温合金为例,上世纪 70 年代,为了满足 Fx5 系列燃机国产化的需要,高温合金研究部研制出与 IN738 合金相当的 K438 合金,用于制造 Fx5 系列燃机一级涡轮工作叶片;90 年代 K438 合金作为 MS6001 燃机一级涡轮工作叶片材料,进行了约 5 000 小时的运行考核。近年来,针对新型燃气轮机的需求,研究部还研制了 K444、K435、K452、K446 合金,用于制造 R0110 重型燃气轮机的全部四级涡轮工作叶片、四级导向叶片和九个涡轮整流支柱;研制了高强抗热腐蚀定向合金 DZ411,用于 10MW 级燃气轮机和 300MW 级重型燃气轮机的高压涡轮叶片;研制了目前国内强度水平最高的抗热腐蚀单晶合金 DD10,正在准备进行 20MW 级燃气轮机的叶片考核。

先进定向凝固技术是定向和单晶涡轮叶片研发和制造的基础。高温合金研究部从上世纪 80 年代开始高速凝固技术(HRS 技术)的研发工作,目前已经为多型号的中小燃气轮机研制了涡轮和导向叶片。2003 年开始,金属所在国内率先开展了先进高温度梯度定向凝固技术——液态金属冷却(LMC)定向凝固技术的研发工作,先后自主研制了 5 kg、15 kg、35 kg 三台 LMC 设备,突破了低熔点合金污染控制、高强抗热裂陶瓷模壳制备等关键技术。针对具有复杂内腔冷却结构的定向和单晶叶片,通过与国内相关设计、制造单位的密切协作,成功研制了 80~450 mm 长的 DZ411 定向叶片和 80~300 mm 长的 DD10 单晶叶片。研究工作表明,与传统 HRS 定向凝固技术比较,LMC 技术可以显著降低铸件的缩孔、减轻偏析,同时在大型铸件的定向凝固过程中始终保持固/液界面较高的温度梯度,从而避免产生等轴晶、雀斑等常见缺陷。

整体铸造叶轮一般用于中小型发动机、燃气轮机转子,其转速最高可达 50 000 rpm 以上。由于涡轮转子工作状态复杂,为避免叶片根部或轮盘疲劳断裂,通常需要严格控制叶轮的晶粒尺寸。高温合金研究部突破了叶盘整体细晶铸造的关键技术,制备出叶片晶粒尺寸由 0.1~1 mm 均匀过度,叶盘的平均晶粒尺寸小于 2 mm 的整体叶轮。

上世纪 90 年代,高温合金研究部的科研人员研究发现,在 IN718 等高温合金中,磷主要通过晶界和位错等缺陷处偏聚的形式来强化晶界和基体,不改变合金的基本组织和工艺性能,但可以成倍地提高这些合金的持久和蠕变寿命,大幅度地改善疲劳性能,从而显著提高合金的使用温度。据此发展的磷和硼复合强化的 GH4169G 合金已经在航空工业中获得了重要应用。

几十年来,研究部有 20 多项研究成果先后荣获国家、中科院和省(部、委)级奖励,其中包括国家科技进步一等奖,国际材料协会授予的“实用材料创新奖(Innovations in Real materials Award)”等。近年来,研究部的科研人员获授权专利 50 余项,在国际材料领域的知名期刊 Acta Mater.、Metall. Mater. Trans. A、Scripta Mater.、Mater. Sci. Eng. A 等发表文章百余篇,多次受邀参加国际会议并做会议邀请报告。

## 四、交流与合作



2010 年,在日本举行的 ECI 国际高温合金会议上,主办方特别组织了献给高温合金研究部胡壮麟院士的“Honorary section”

中国科学院金属研究所高温合金部在与国内高校、研究院所、企业等建立密切合作关系的同时,也与国际高温合金主要研发机构开展了广泛的交流与合作。目前,研究部已经与英、美、德、日、意、韩等 10 多个国家的研究机构或学术团体开展了学术交流。先后邀请德国 Erlangen-Nuremberg University 的 R. F. Singer 教授,美国 University of California 的 T. M. Pollock 教授,英国 University of Birmingham 的 R. C. Reed 教授等高温合金领域的知名科学家来所交流,并向他们颁发了“李薰讲座奖”。研究部还向日本、德国、韩国等高温合金研发机构派遣了多名研究生,开展合作研究。在长期合作交流的基础上,2003 年以来,高温合金研究部与韩国材料研究所和日本国立材料研究所共同组织了三方高温合金研讨会,迄今已经成功举办了五届。

(中国科学院金属研究所 张 健,王 莉供稿)