



贺跃辉 HE Yuehui

长江学者特聘教授

Chang Jiang Scholar

国家杰出青年科学基金获得者

Winner of the National Science Fund  
for Distinguished Young Scientists

教授, 博士生导师, 国务院政府特殊津贴获得者。现任中国钨业协会理事会技术顾问, 中国材料学会理事, 中国材料学会超硬材料及制品分会副主任, 中国材料学会金属间化合物与非晶合金分会副主任, 国家特种矿物材料工程技术研究中心、中国核燃料及材料国家国防重点实验室客座教授。曾主持完成国家“863”、“973”、国家自然科学基金及国防重点项目等多个项目的研究工作, 获国家科技进步奖一等奖、国家教育委员会科技进步奖二等奖等多项荣誉。主要研究方向为金属间化合物多孔材料/多孔膜, 金属陶瓷材料, 金属间化合物/超硬材料制品, 粉末冶金高速钢便捷制造, 纳米材料, 湿法冶金金属间化合物惰性阳极材料等。

# TiAl基合金的基础研究与应用

——访中南大学粉末冶金研究院贺跃辉教授

Basic Research and Application of TiAl Alloy

本刊记者 玲 犀

**玲犀**: 您针对 TiAl 基合金的研究取得了系列成果, 针对难热加工塑性变形材料, 提出了“包套锻准等静压快速变形”方法; 建立起包括 Ti-Al、Fe-Al 和 Ni-Al<sub>3</sub> 大类组成的整个 Al 系金属间化合物多孔材料体系框架等, 请简单介绍一下您的主要研究项

目, 您认为 TiAl 基合金近几年的研究热点有哪些?

**贺跃辉**: 本人开展金属间化合物的研究工作多年, 早期主要是针对 TiAl 基合金难热加工变形性问题开展了包套锻热机械复合处理新技术研究, 实现了在普通油压机上对加热

的包套处理 TiAl 基合金坯进行锻压热加工, 具体成果为:

(1) 用简单方法实现了难热加工的 TiAl 基合金铸坯的热加工变形, 打破了原来的 TiAl 基合金开坯必须等温锻造的禁锢。

(2) 包套处理为 TiAl 基合金锻

坯构筑了一个准等静压环境,有效地降低锻坯的最大剪应力。同时,钢外套起到了有效隔热保温效果,由此,获得 80% 变形量的完整锻坯。

(3) 实现了 TiAl 基合金在  $1 \times 10^{-1} \text{S}^{-1}$  下顺利变形,有效地抑制了动态再结晶的发生,储存的变形能为后续的热处理获得细小均匀组织、自主调节显微组织提供了基础。

同时,基于 Al 系金属间化合物兼备金属及陶瓷材料的优点,具有主成分元素之间大的扩散系数差异的特质,提出通过元素混合粉 KirKendall 效应自主控制,制备 Al 系金属间化合物多孔材料/多孔膜,解决极端环境下气/固、液/固分离、净化的多孔材料亟需的难题。完成 TiAl 基合金、NiAl 基合金、FeAl 基合金、Ti-Si 系金属间化合物、Ti-Si-C 系金属陶瓷等一系列金属间化合物及金属陶瓷多孔材料/多孔膜的制备技术研究,实现其孔结构自主可控及大尺寸形状复杂制品的近净成形,进一步发挥金属间化合物的金属键和共价键共存的混键结构特性,开发金属间化合物粘结剂新型超硬材料制品,解决超硬材料制品长期未解的开刃锋利和保型寿命这一对矛盾;研究耐强酸腐蚀,抗大电流电化学腐蚀及新鲜氧原子氧化的金属间化合物,解决溶液电解 Pb 阳极替代材料亟需的问题。

由于 TiAl 基合金具有高的比强度、比刚度,以及较好的高温抗蠕变、耐腐蚀性能,是一种非常有潜力的轻质高温结构材料,所以,近些年来, TiAl 基合金一直是一些高等院校和科研院所的研究热点。研究方向主要集中在以下几方面。

(1) 高 Nb 合金化 TiAl 基合金。通过较高含量 Nb 的添加,进一步提高 TiAl 基合金的高温强度、抗氧化性、抗蠕变强度。需要解决的主要问题有:熔炼、铸造合金的成分均匀性;难热加工变形性和成形性。

(2) 大尺寸类单晶制备,特别是结构均匀、位向一致可控的类单晶材料及铸件。


(3) 无铸造缺陷 TiAl 基合金铸件的制造。

(4) TiAl 基合金服役条件评价及安全设计。

(5) TiAl 基合金多孔材料及多孔膜的制备及应用,解决酸性、含 Cl、含盐、高温等极端服役环境的分离、提取和净化等孔分离材料亟需技术难题。

(6) 表面涂层材料。添加 N、C、Cr、Si、Ta 等合金化元素,形成高抗氧化、热屏障、高润滑、高耐磨的刀具、工具表面涂层材料。

(7) 高品质粉末冶金 TiAl 基合金制品的制造技术路线的打通。

: 我国在 TiAl 基合金的研究方面,已有近 30 年的积累,直到目前, TiAl 合金仍没有得到广泛的工程化应用,是什么制约了 TiAl 基合金的应用? 如果将其推广应用,在基础研究、成形工艺以及其他各方面还需攻克哪些关键技术?

**贺跃辉:** 目前,世界上的主要航空发动机公司(如 GE、Rolls-Royce 和 P&W)都致力于 TiAl 基合金的工程化应用开发,并主要集中在低压涡轮的最后一级或两级的工作叶片开发。中国科学院金属研究所参与了 Rolls-Royce 所开发的 TiAl 基合金低压涡轮叶片的精密铸造工艺的试验研究,我国也具有一定的 TiAl 基合金工程化应用的实力和经验。

经过多年的研究,虽然 TiAl 基合金在性能改善方面取得了很大的进步,并在航空航天和汽车工业等领域得到了一些应用,但是距大规模的工程化应用还有很大的差距,其主要原因包括:(1) 本征室温脆性未能得到解决;(2) 加工成形难的问题;(3) 高温抗蠕变强度不足及抗高温氧化能力不足等问题。

如果将其推广应用,国内还需要

掌握实现 TiAl 基合金工程化应用的关键技术,特别是加强 TiAl 基合金成形和加工方面的相关基础研究。


(1) 新的服役要求评价和材料设计思想的提出,在原来的强度、韧性设计基础上,发展损伤容限等设计方法。

(2) 提高材料制备技术水平,特别是大尺寸 TiAl 基合金铸锭成分均匀性的保障,铸锭的应力控制及消除。

(3) 金属间化合物功能化和功能、结构一体化应用的发展。

(4) 针对 TiAl 基合金实用化的实现,原创性思想的提出。

(5) 坚持不懈地开展 TiAl 基合金应用面临的室温塑性低,难热加工变形、成形,高温抗氧化性不足的 3 大问题研究。

: 增材制造工艺能够适应各种尺寸,不同复杂程度构件,各种难熔、高强度金属材料的直接成形制造。请问增材制造技术在 TiAl 基合金的加工成形中发挥了怎样的作用? 能否解决 TiAl 基合金加工难度大、成形困难的难题? 还存在哪些无法解决的问题?

**贺跃辉:** 增材制造成为当今材料领域热点方向,解决了传统制造很多技术难题。TiAl 基合金属于难加工成形材料,在采用增材制造制备时需要考虑一些特殊技术问题:

(1) TiAl 粉末制备难题,需要发展无坩埚污染熔炼技术;

(2) TiAl 合金粉末的防氧化问题, TiAl 合金粉末表面氧化形成的  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  属于高化学稳定性的氧化物,会造成粉末冶金材料的原始颗粒形成的内界面非冶金结合;

(3) TiAl 基合金属于低塑性材料,其塑性对合金含氧量十分敏感;

(4) TiAl 基合金的主要元素 Ti、Al 蒸汽压差别较大,受电子束或激光束能量高集中度加热,成分准确控制问题。 (责编 大漠)