



## 马宗义 MA Zongyi

“中国科学院百人计划”专家

Expert of Hundred Talents Program  
(Chinese Academy of Sciences)

中国科学院特聘研究员

Distinguished Research Fellow of CAS

2005年“中国科学院百人计划”入选者,2005年度“国家杰出青年科学基金”获得者,辽宁省“百千万人才工程”百人层次人选,现任中国复合材料学会金属基及陶瓷基专业委员会副主任。

主持国家“863”、“973”、国家自然科学基金重点基金以及国防军工等30多项国家项目,获26项国家发明专利授权。发表期刊论文290篇,SCI收录250篇,出版英文专著1部。2000和2005年两次执笔为著名综述期刊 *Materials Science & Engineering R-Reports* 撰写金属基复合材料与搅拌摩擦焊的长篇特邀综述论文。发表论文被SCI他引6000多次,H指数为37。2篇论文分别被评为2007年中国百篇最具影响国际学术论文和2004~2008年工程技术领域研究论文中引用数最多的中国学者论文。

# 先进材料与先进工艺的融合

——访“中国科学院百人计划”专家,中国科学院金属研究所研究员马宗义

Integration of Advanced Materials and Advanced Technology

本刊记者 玲 犀

**玲犀:**您组建了“金属基复合材料与搅拌摩擦焊课题组”,形成了“金属基复合材料”与“搅拌摩擦焊”两个研究方向并举的格局。请您介绍下近几年来课题组在相关研究领域开展了哪些工作?

**马宗义:**我在2004年回国后,在

国家杰出青年科学基金与中科院百人计划支持下,创建了搅拌摩擦焊接研究组。随后根据所学科规划,与我原来从事多年的金属基复合材料研究方向整合,形成两个研究方向并举的研发格局。经过10余年的发展,研究队伍从刚回国时的单枪匹马,发

展到目前20人的研发团队,团队先后承担了国家863、973、国家自然科学基金、民口配套项目等30多项国家项目。目前在研项目有国家973项目、民口配套项目、国家自然科学基金重点项目等10项国家项目。研发工作覆盖基础研究、应用开发及小

批量产品供货。


在金属基复合材料方面,从原材料到制备工艺进行了系统的优化,突破了吨级复合材料坯锭高质量制备难题,为大型复合材料件的制备奠定了基础。通过优化成分、热加工与热处理工艺,使复合材料塑性得到改善,为变形加工提供足够的余量,使复合材料的冷成型及冷矫形成为可能。在此基础上开发出复合材料薄壁管的冷轧工艺,制备出壁厚 1mm 的高精度薄壁管材。通过优化热加工工艺、改进模具设计等,使复合材料轧制、锻造、挤压的成材率与质量明显提高,实现了复杂薄壁复合材料异型材的挤压成型。针对传统金属基复合材料的不足,在常规 SiC、B<sub>4</sub>C、TiB<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等陶瓷相增强复合材料基础上,开发了新型碳纳米管、石墨烯增强铝、铜、镁基复合材料,实现了高效增强与综合性能的明显改善,部分材料已实现工程应用。我们目前的复合材料产品包括热压锭、锻件、板材、型材、棒材、管材等;增强相最高体积含量可达 65%。目前每年为航空航天、电子、核电等用户提供多个批次的各类板、管、型材及锻件,应用于多个重点工程型号上。

针对复合材料变形加工难的问题,开展了加工仿真研究。首先,建立了多种复合材料的本构关系,对其变形机制、缺陷形成条件等内禀加工性进行物理模拟;其次,构建了与试验结果吻合良好的复合材料三维逼真数字材料模型。在此基础上建立了复合材料宏观等效性能预测的计算均匀化模型;结合损伤准则和逼真三维模型进行多尺度模拟,对变形工件不同部位的组织特性(如缺陷、颗粒分布与取向等)和残余应力实现了可视化与连续化预测。

搅拌摩擦焊接方面,主要针对铝、镁、铜、钛、钢以及异种金属进行焊接,系统研究了工艺参数对接头组织与性能的影响,并对材料流变、再

结晶与加速扩散机制等共性科学问题进行了细致分析。建立了特征微观结构(洋葱环、S 线、第二相偏析带等)与材料周期性流动的内在联系,并构建了三维解析模型,为焊接接头的缺陷控制与组织调控提供了依据。通过试验研究与模拟仿真,揭示影响热处理强化铝合金搅拌摩擦焊接接头强度的主导因素是焊接速度,建立了热源区-等温溶解层模型,合理解释了工具转速、焊接速度、工具尺寸对接头性能的影响机制。以搅拌摩擦焊衍生的搅拌摩擦加工技术为基础,实现了材料组织重构、缺陷修复与材料的可控制备,从而为铸造合金的性能改善、低温/高应变速率超塑性、纳米复合材料制备等提供了技术原型,使搅拌摩擦加工发展成为集加工、制备、合成及热处理于一体的多功能材料改性技术。其中,采用搅拌摩擦加工制备的碳纳米管与纳米原位粒子增强铝基复合材料,显示出良好的强度塑性配合,具有良好的工业应用前景。

针对复合材料发展需求,我们主动迎接其焊接挑战,研发了具有自主知识产权的高韧耐磨金属陶瓷焊接工具,实现了中低体积分数 SiC、B<sub>4</sub>C 等颗粒增强铝基复合材料的长距离焊接,并突破了复合材料高速焊接(800~1000mm/min)瓶颈,连接强度可达母材的 90% 以上。在此基础上,我们采用中子衍射测量与多尺度模拟方法,建立了简单可靠的残余应力计算模型,实现了复合材料焊接接头残余应力的可靠预测,为促进复合材料焊接应用奠定了基础。目前我们研制的 B<sub>4</sub>C/Al 中子吸收材料焊接筒已用于核燃料元件贮运容器。

: 研究和发展有效的制备技术是金属基复合材料研究中最重要的问题之一,请问金属基复合材料的关键制备技术及阻碍其应用的瓶颈主要体现在哪些方面?可采取哪些有效的措施解决这些难题?

**马宗义:** 金属基复合材料由物理化学性质差异巨大的增强相和金属基体构成,这种差异在造就复合材料优异综合性能的同时,也使其制备难度远大于常规金属材料。经过数十年发展,已形成了较成熟的金属基复合材料的设计理论,并发展了包括粉末冶金、搅拌铸造、液态浸渗等复合材料主流制备技术。目前已有部分复合材料获得商业化应用,如铝基复合材料已广泛应用于航空航天、交通运输、核电、电子以及兵器等领域。然而,金属基复合材料的发展与规模化应用仍受到很大的制约,主要体现在以下几个方面。

第一,金属基复合材料产能低下。无论是单件坯锭规格还是总体产量均与传统金属材料有较大差距,难以满足应用所需。复合材料的两相或多相特性导致其组织比较复杂,因此制备加工工艺窗口狭窄。小尺寸复合材料坯锭工艺控制相对容易,一旦坯锭尺寸放大,很容易出现缺陷。简单照搬实验室或小试条件参数,对边界条件考虑不够充分,导致成品率和再现性难尽人意。应建立适用于复合材料的制备加工仿真手段。传统复合材料的仿真要么采用简单等效连续介质,忽略其微观尺度的多相性;要么采用单胞模型,无法考虑材料加工的宏观边界条件。基于逼真数字材料模型,建立复合材料的多尺度加工仿真模型,打破传统加工仿真无法兼顾宏观和微观的局限,充分考虑基体、颗粒和界面的不同,精确预测复合材料在制备过程中宏观和微观的组织演化;逐渐量化影响复合材料性能的关键因素,形成可靠的数学理论模型,用于指导复合材料的设计、优化和工业生产。以上这些是实现未来复合材料高效和低成本制备的关键突破口。

第二,复合材料与传统金属材料的制备加工技术不完全适应。随着装备性能的整体提升,复合材料零件


向大型化与形状复杂化发展,传统的成形与加工工艺很难满足需求。如典型的薄壁加强筋结构采用机械加工成型,而对复合材料难度却很大。复合材料通常由硬质相增强,难于机加工,加工成本与周期都不理想,一些形状复杂的结构件,甚至无法进行机加工。此外,复合材料制备成本较高,机加工成型导致材料利用率低,进一步增加了消耗。因此,除了持续完善传统制备加工技术外,开发近终成型或快速成型技术也十分重要。例如,目前备受关注的3D打印,如果能开发出适合复合材料的原材料与工艺,则可以大幅缩短复合材料制备流程,并降低加工难度,同时可实现复杂结构件的制备。

第三,缺乏有效、可靠的复合材料连接技术。单件复合材料受设备与工艺条件限制,难以做大。如果能实现高效、可靠连接,则可以拓宽复合材料的应用。从复合材料研发伊始,各种连接技术(包括焊接)就被尝试用于复合材料的连结,随着新型焊接技术(如搅拌摩擦焊技术)的发展,可对复合材料的实际应用起到明显的促进作用。

第四,新的复合材料种类与构型发展需要更先进的制备技术。目前发展的纳米复合材料、仿生结构以及多模态构型复合材料等,传统工艺很难进行可控制备。因此,在新型复合材料的制备加工方面还有待广泛探索并进行优化。例如,针对碳纳米管增强复合材料所使用的机械与化学介质结合分散方法、搅拌摩擦加工方法等,都是有意义的突破,但还有很大的改进与完善的空间。


最后,复合材料的配套加工技术有待加强。主要包括机加工、去应力/稳定化处理、表面处理等。多数工厂对复合材料不熟悉,简单沿用传统金属材料的方法或照搬实验室的复合材料工艺,而且缺乏专用工具与辅助材料,增加了加工/处理难度,

使工期和质量难以保证。在此方面,需要工业部门与材料研发单位紧密结合,根据实际需求开展有针对性的研究。

: 金属基复合材料的焊接是国内外焊接领域的难题,请问制约金属基复合材料焊接的关键技术瓶颈是什么?该如何从焊接技术及装备方面进行突破?

**马宗义:** 金属与增强相物化性质差异巨大是造成复合材料难焊接的根本原因,同时增强相自身特点也降低了复合材料的可焊性。传统的熔焊技术因复合材料熔池粘度高、增强相与基体差异大,极易导致凝固缺陷、严重界面反应及颗粒偏聚等。钎焊因钎料与复合材料的润湿性差等原因也很难获得理想的焊接接头。摩擦焊作为固相焊接技术,有望获得高性能的接头,但工艺窗口因复合材料流动性差而变窄,难以获得高质量的接头。以往研究对焊接工艺和焊料等进行了改进,取得一定成效,但实用性还有待验证。

实际上,最重要的是在前人研究基础上,根据复合材料焊缝的形成特点及焊接缺陷的形成机制,发展出专用的焊接设备与工艺。例如,能对熔池进行搅拌以减轻颗粒偏聚和凝固缺陷、采用辅助手段加速气体逸出以及对焊缝实施强制快速冷却等;控制液相的数量与高温停留时间;发展适用于复合材料焊接的焊丝、钎剂等,以达到抑制界面反应、促进浸润与结合的目的;开发适用于复合材料的搅拌摩擦焊工艺与工具,克服塑性流变性能差及工具磨损的制约瓶颈。相关研发需要焊接、复合材料以及机电领域研发人员的通力合作。

: 搅拌摩擦焊技术发明至今,无论在国外还是国内,已经发展成为工业化实用的固相连接技术,在航空航天飞行器等轻量化结构以及各种铝合金型材拼焊结构制造中,已经展示出显著的技术和经济效益。请问搅拌

摩擦焊技术在复合材料焊接中有哪些优势和重要应用?还存在哪些问题?该如何解决这些问题?

**马宗义:** 根据搅拌摩擦焊的基本原理,凡是材料在高温下具有一定的塑性变形能力,就有可能取得良好的连接效果。搅拌摩擦焊作为一种固态焊接技术,能够克服传统熔焊的凝固缺陷、严重界面反应及颗粒偏聚等不足,是复合材料最可行的高质量连接手段。高强铝基复合材料在硬态下进行焊接,接头强度通常可达母材的80%以上,目前还没有其他焊接技术能够达到这样的水平。然而复合材料的搅拌摩擦焊接面临两个严峻考验:第一,复合材料中的硬质增强相导致钢质工具严重磨损,无法实现长距离焊接。此外,磨损造成的工具搅拌作用降低易于导致缺陷的形成,且磨屑污染还会降低接头性能;第二,复合材料的流变性不佳,导致焊接工艺窗口狭窄,不仅易于出现焊接缺陷,而且焊接工艺优化受到极大局限。

目前复合材料的搅拌摩擦焊仍处于研发阶段,主要为薄板焊接及低速焊接,对中厚板,无论焊接工具还是焊接工艺优化都存在很大挑战。研发耐磨、高韧以及具有合理形状的焊接工具是解决这些问题的主要途径。然而,通常硬质工具材料难以加工,而且韧性差。像传统金属材料那样加工成螺纹类的复杂结构不仅难度大,而且焊接时工具易于发生损伤。因此,一方面需要开发新型的耐磨材料和配套的工具加工技术,另一方面需要优化工具设计。在此基础上,还需对缺陷形成原因和组织演化进行更深入的研究,从而优化焊接工艺并对工具选材、设计提供反馈。只有工具材料研发、工具结构设计、工具加工成型与焊接工艺密切配合或形成一条龙的研发模式,才有利于突破复合材料搅拌摩擦焊的制约瓶颈。

(责编 玲犀)