

特约专栏

# 金属基复合材料的现状与发展趋势

张 荻, 张国定, 李志强

(上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240)

**摘 要:** 在过去的二十多年里, 金属基复合材料凭借其结构轻量化和优异的耐磨、热学和电学性能, 逐渐在陆上运输(汽车和火车)、热管理、民航、工业和体育休闲产业等诸多领域实现商业化的应用, 确立了作为新材料和新技术的地位。但是, 金属基复合材料的未来发展仍然面临不确定性, 既有可能持续扩大应用领域和市场规模, 也有可能在其它材料和技术的竞争下停滞甚至萎缩。在综述金属基复合材料的研究与应用现状的基础上, 对其可预期的增长点和发展趋势进行了展望。

**关键词:** 金属基复合材料; 性能; 应用

**中图分类号:** TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)04-0001-07

## The Current State and Trend of Metal Matrix Composites

ZHANG Di, ZHANG Guoding, LI Zhiqiang

(State key laboratory of metal matrix composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In the past two decades, metal matrix composites (MMCs) have been established as a new materials and technology. Commercialization of MMCs has been achieved in the field of ground transportation (auto and rail), thermal management, aerospace, industries, and recreational products, due to its excellent performance including light-weight structural efficiency, wear resistance, thermal and electrical properties. However, there are still uncertainties in the future development of MMCs. It is now on the crossroad that the application scope of MMCs continue to expand, or are forced to shrink by rival materials. This article gives a brief review of the state-of-the-art and trend in MMCs application and research.

**Key words:** metal matrix composites; properties; application

### 1 前 言

在过去的二十几年中, 金属基复合材料逐渐地从军事国防向民用领域渗透, 如今已在陆上运输(汽车和火车)、热管理、民航、工业和体育休闲产业等诸多领域实现商业化的应用, 形成年产量近 5 000 t、年产值近 20 亿美元的工业部门, 这种扩张归功于非连续增强金属基复合材料的发展<sup>[1-2]</sup>。相比于长纤维连续增强金属基复合材料, 颗粒、晶须等非连续增强金属基复合材料虽然在性能方面自叹弗如, 但是却提供了更好的性价比和可加工性能, 而这恰恰是实现商业化的前提条件。受商业利益驱动, 许多企业参与到非连续增强金属基复合材料的研发进程中, 攻克了一系列具有挑战性的技术难题, 其中包括基体与增强体之间的相容性问题、界面表

征与控制问题、可调控增强体空间分布的复合技术与二次加工技术等。这一切帮助确立了金属基复合材料作为新材料和新技术的地位。但是, 金属基复合材料的未来发展仍然面临很大的不确定性, 既有可能持续扩大应用领域和市场规模, 也有可能在其它材料和技术的竞争下停滞甚至萎缩。本文将在综述金属基复合材料研究与应用现状的基础上, 对其可预期的增长点和发展趋势进行展望。

### 2 金属基复合材料的应用概况

#### 2.1 金属基复合材料的范畴界定

这是一个长期以来存在争议的话题。从复合材料的定义出发, 凡是包含金属相在内的双相和多相材料都可归于金属基复合材料, 通常包括定向凝固共晶层片或纤维组织(如  $Al_3Ni - Al$ ,  $Al - CuAl$ ,  $Ni - TaC$ ,  $Ni - W$ )、双相金属间化合物层片组织(如  $\gamma - TiAl$ )、珠光体钢、高硅铝合金( $Al - Si$ )等<sup>[3]</sup>。以上材料习惯上被看作是金属合金, 而不是金属基复合材料。然而最近出现并颇受关注的非晶/初晶复合组织(如  $Zr$  基非晶合金)<sup>[4-5]</sup>, 有

收稿日期: 2009-12-02

基金项目: 中法国际合作基金项目(2009DFA52410);

钛合金 973 基金项目(2007CB613806)

通信作者: 张 荻, 男, 1957 年生, 博士生导师, 教授

望帮助人们冲破传统观念的束缚——通过控制凝固和固态相变在非晶基体中原位 (in-situ) 形成的晶相可以发挥增韧/增塑的作用, 从而为本征脆性的非晶合金开辟了实用化途径。总之, 采用复合的思想发展金属材料具有巨大潜力, 值得我们给以足够的重视, 而合金与复合材料的争议本身却无关紧要。

本文涉及的仍然是比较狭义的金属基复合材料, 其增强体要么是从外部引入到金属基体当中 (Ex-situ), 要么是在金属基体内部由一至多种始终独立存在的反应物原位生成 (In-situ)。通常, 金属基复合材料都是以包括颗粒、晶须、纤维等形态的陶瓷相作为增强体, 但是作为特例, 也有一些金属基复合材料是以金属相作为增强体, 例如 Cu - Mo 和 Cu - W 材料。

## 2.2 金属基复合材料全球市场概况

根据美国商业资讯公司 (BCC) 最新的商业调查结果, 2008 年全世界的 MMCs (金属基复合材料) 市场总量达到 4 400 t<sup>[2]</sup>。这样的市场蛋糕虽然还小, 却是由上百家各具特色的 MMCs 公司分享的, 它们或者拥有独家技术 (如 DWA 公司的粉末冶金), 或者以某种材料 (如 Alcan 公司的铝基 MMCs) 见长, 或者专注于特定产品类型 (如 CPS 公司的热封装基板)。

据预测, 2013 年以前全球 MMCs 市场将保持 5.9% 的年增长率<sup>[2]</sup>。根据应用领域不同, MMCs 市场可细分为陆上运输、电子/热控、航空航天、工业、消费产品等 5 个部分, 如图 1 所示<sup>[2]</sup>。其中, 陆上运输 (包括汽车和轨道车辆) 和高附加值散热组件仍然是 MMCs 的主导市场, 用量占比分别超过 60% 和 30%。

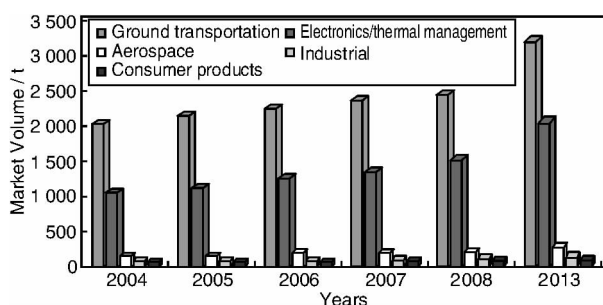


图 1 金属基复合材料全球市场及展望 (2004 ~ 2013 年)

Fig. 1 Global outlook of MMC by application/segment, 2004 ~ 2013

### 2.2.1 MMCs 在陆上运输领域的应用

随着能源和环境问题日益严峻, 世界各国实行越来越严格的燃油效率标准和尾气排放标准, 这迫使各汽车生产商采用轻质的 MMCs 取代目前的铸铁和钢, 实现汽车轻量化的目的。一般认为, 汽车质量每降低 10%, 燃油经济性就提高 5%。而对于成本极端计较的汽车市场, 唯一能接受的只有铝基 MMCs。

无论传统的燃油汽车, 还是混合动力车, MMCs 主要被用于那些需要耐热耐磨的发动机和刹车部件 (如图 2 所示的刹车件), 如活塞、缸套、刹车盘和刹车鼓等; 或者被用于那些需要高强高模量运动部件, 如驱动轴、连杆等<sup>[6-7]</sup>。目前, 在陆上运输领域消耗的 MMCs 中, 驱动轴的用量超过 50%, 汽车和列车刹车件的用量超过 30%。

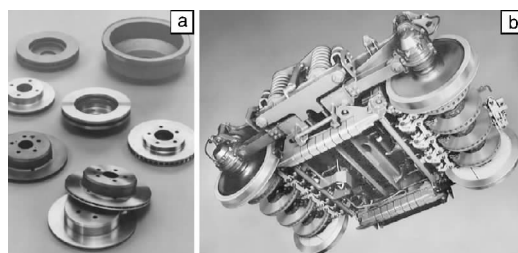


图 2 汽车刹车鼓和刹车碟 (a), 火车转向架及刹车盘 (b)

Fig. 2 Brake drums and brake rotors of automotive (a) and railway bogey with four brake disks (b)

MMCs 驱动轴在大型客车和卡车上尽显优势。与传统的钢或铝合金驱动轴相比, MMCs 驱动轴可承受更高的转速, 同时产生较小的振动噪声。典型的 6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/20p 的比模量明显高于钢或铝, 因此大型客车和卡车可采用较长的单根 MMCs 驱动轴而无需增大轴径和重量。事实上, 用单根 MMCs 驱动轴取代传统的二件式钢轴总成及所必需的支撑附件, 减重效益高达 9 kg。

刹车件是 MMCs 用量增长最快的部分, 年增长率超过 10%。相对于铸铁和钢, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 或 SiC 颗粒增强铝基复合材料用作刹车材料的优势在于高达 50% ~ 60% 的减重效益及高耐磨、高导热等性能特点, 可使惯性力、油耗和噪音都得到下降。目前, 美国汽车三巨头克莱斯勒、福特、通用均在新车型中采用铝基 MMCs 刹车盘和刹车鼓, 例如通用在 2000 年发布的混合动力车 Precept, 前后轮均装配采用 Alcan 公司铝基 MMCs 制造的风式刹车盘, 该刹车盘质量不到原来铸铁刹车盘的一半, 而热传导率却达 3 倍多, 并消除了刹车盘和刹车鼓之间的腐蚀问题。

世界范围内, 建设了许多高速铁路和列车。其中德国 ICE (Inter City Express) 列车尤其以第一次应用 MMCs 刹车盘而著称。ICE 列车的刹车系统原来采用的是 4 个铸铁刹车盘, 每个质量达 126 kg。替换为 AlSi7Mg/SiCp 颗粒增强铝基 MMCs 刹车盘后, 每个质量仅为 76 kg, 带来重大的减重效益<sup>[1]</sup>。

### 2.2.2 MMCs 在电子/热控领域的应用

如果以产值排序, 高产品附加值的电子/热控领域是第一大 MMCs 市场, 产值比例超过 60%。目前, Cu-

W 和 Cu-Mo 等第一代热管理材料仍然占据着市场主导地位。但是, 微波电子、微电子、光电子和功率半导体器件的微型化及多功能化对热管理特性提出了更高要求, 需要低密度、高导热、与半导体及芯片材料膨胀匹配, 能够达到最优功率密度的新型基板和热沉材料。以铝碳化硅 (AlSiC) MMCs 为代表的第二代热管理材料, 密度仅为 Cu-W 和 Cu-Mo 的 1/5, 可提供高热导率 (180 ~ 200 W/mK) 及可调的低热膨胀系数 (CTE), 为电子封装提供了高度可靠且成本经济的热管理解决方案<sup>[8-9]</sup>。因此, AlSiC 虽然进入市场不久, 但用量比例已经突破 10%, 并将保持超过 10% 的年增长率。AlSiC 主要用作微处理器盖板/热沉、倒装焊盖板、微波及光电器件外壳/基座、高功率衬底、IGBT 基板、柱状散热鳍片等。其中, 无线通讯与雷达系统中的射频与微波器件封装构成 AlSiC 目前最大的应用领域, 其第二大应用领域则是高端微处理器的各种热管理组件, 包括功率放大器热沉、集成电路热沉、印刷电路板芯板和冷却板、芯片载体、散热器、整流器封装等 (如图 3 所示)<sup>[10]</sup>。

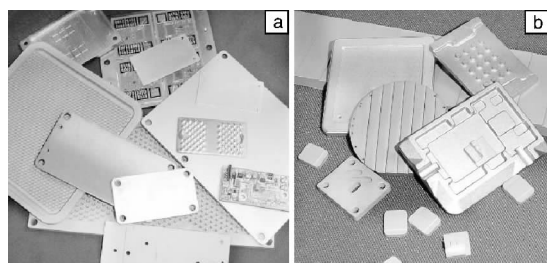


图 3 AlSiC 微处理器盖板(a), AlSiC 光电封装基座(b)  
Fig. 3 Microprocessor lids (a) and Microwave Housings (b)

AlSiC 采用溶渗工艺制造, 因为碳化硅颗粒预制块和溶渗铸模都可针对最终产品形状而设计, 因此可以实现低成本的净成形 (net-shape) 或近净成形制造, 所得产品不需要进一步加工, 或只需要很少的加工。并且近净成形工艺可方便地增加功能选项, 从而满足定制设计要求, 例如微波封装组件可将好的气密性和热管理特性集于一身。

### 2.2.3 MMCs 在航空航天领域的应用

MMCs 最初发展的原动力来自于航空工业领域。目前已用于军机和民机的 MMCs 主要是铝基和钛基复合材料<sup>[11-13]</sup>。DWA 公司最早发展了粉末冶金制备 MMCs 的技术路线并保持领先地位至今。DWA 量产的第一个产品是洛克希德公司的机载电气设备支架, 该挤压态复合材料由 6061/SiC/25p, 替代原有的 7075 T6 态铝合金挤压件, 减重达 17%。总计有超过 3 000 m 的该种复合材料型材在各种洛克希德飞机上服役。DWA 公司铝基 MMCs 的后续应用案例包括 F-16 战隼轻型战斗机的腹

鳍和加油口盖板, Boeing 777 客机 Pratt & Whitney 4084、4090 和 4098 发动机的风扇导向叶片, AC-130 武装直升机的武器挂架, V-22 鱼鹰式倾斜旋翼直升机和 F/A-18 E/F 超级大黄蜂战斗机的液压系统分路阀箱。此外, SiC 铝基 MMCs 在航天领域也已经过实用验证, 例如波导天线、支撑框架及配件、热沉等。以上应用不但克服了原有材料的重大缺陷, 同时也带来明显的减重效益。

1998 年, 钛基复合材料进入航空市场, 当时大西洋研究公司 (Atlantic Research Corporation) 的钛基 MMCs 接力器活塞出现在 Pratt & Whitney F119 燃气涡轮发动机的材料采购单上。F119 发动机为洛克希德/波音联合研制的 F-22 猛禽战斗机提供动力<sup>[12]</sup>。

### 2.2.4 MMCs 在其它领域的应用

MMCs 的其它应用涵盖制造业、体育休闲及基础设施建设领域, 既包括硬质合金、电镀及烧结金刚石工具、Cu 基及 Ag 基电触头材料等成熟市场, 也包括 TiC 增强铁基耐磨材料、Saffil 纤维增强铝基输电线缆、B4C 增强铝基中子吸收材料等新兴市场。这些新兴市场的表现在很大程度上决定着 MMCs 的未来增长点<sup>[3]</sup>。

铁基复合材料的制备和应用是提高钢铁材料性能的重要研究方向。低密度、高刚度和高强度的增强体颗粒加入到钢铁基体中, 在降低材料密度的同时, 提高了它的弹性模量、硬度、耐磨性和高温性能, 可应用于切削、轧制、喷丸、冲压、穿孔、拉拔、模压成型等工业领域。目前应用最多的是 TiC 颗粒增强铁基复合材料, 例如注册商标为 Ferro-TiC®, Alloy-TiC® 和 Ferro-Titanit® 的钢基硬质合金, 用作抗磨材料和高温结构材料, 性能明显优于现有的工具钢 (如图 4 所示的材料)<sup>[3,14]</sup>。



图 4 超硬耐磨的 TiC 增强铁基复合材料  
Fig. 4 Ultra-hard and wear-resistant Fe/TiC MMCs

为支撑传统的高架输电用钢芯铝绞线的质量, 需要

造昂贵的输电塔,这促使人们开发高强、低密度导线。据报道,3M 公司开发的氧化铝纤维增强铝基 MMCs (Al/Saffil)导线,用于取代现有铝绞线的钢芯,经测试比强度提高 2~3 倍,电导提高 4 倍,热膨胀降低一半,腐蚀性也降低。虽然新型 MMCs 导线的价格较贵,但是可以降低建造支撑塔成本的 15%~20%,并且可以提高输电能力并降低电耗(如图 5)<sup>[3,15]</sup>。

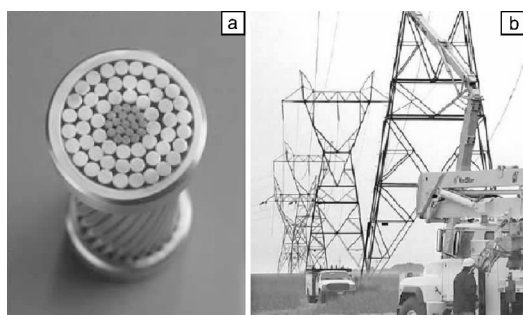


图 5 Saffil 纤维增强铝基输电电缆(a), 输电塔(b)  
Fig. 5 Al/Saffil MMCs conductor cable (a) and Power transmission towers (b)

核能是世界各国应对能源和环境压力的必然选择。为确保安全,贮存及运输高放射性废核燃料的容器在核防护的同时还必须具有耐久可靠的机械性能。 $B_4Cp/Al$  是一种新型 MMCs,具有优异的中子吸收性能,是唯一可用于废核燃料贮存和运输的金属基复合材料(如图 6)<sup>[16-17]</sup>。目前,已有 BorTec™, METAMIC™ 和 Talbor® 等多种  $B_4Cp/Al$  材料获得美国核能管理委员会(NRC)核准,可以用于制造核废料贮存桶的中子吸收内胆、废燃料棒贮存水池的隔板等。

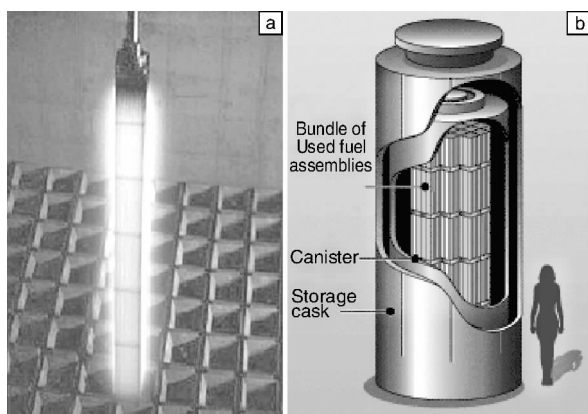


图 6  $B_4Cp/Al$  用于废核燃料贮存(a), 贮存水池(b)贮存桶  
Fig. 4  $B_4Cp/Al$  in spent nuclear fuel pools (a) and spent nuclear fuel casks (b)

## 2.3 中国的金属基复合材料研究现状

实际上, MMCs 应用广度、生产发展的速度和规

模,已成为衡量一个国家材料科技水平的重要标志之一。以用量计算,美国、欧洲、日本是位列前三的 MMCs 消费大国,超过总质量 2/3 的 MMCs 为其所用,这与它们作为发达国家的地位相符。

我国尚未形成金属基复合材料产业及行业标准与军用标准。目前仅少数研制单位具有小批量的配套能力,虽然品种、规格单一,但仍然为国防和军工建设提供有力的支撑。轻质高强多功能金属基复合材料在航天、航空、国防先进武器等军事领域的应用具有不可替代性,是典型的军民两用新材料。也正是由于金属基复合材料特殊的国防应用背景,国外对核心技术和产品严格保密。随着我国在空间技术、航天航空、高速交通、通讯电子等领域的综合实力的提升,对高性能金属基复合材料的需求日益增加,例如汽车发动机零部件、高速列车制动系统、电子封装及核废燃料辐射防护等。近年来,巍巍中国的 MMCs 巨大的市场空间,西方一些 MMCs 公司在中国建立了若干合资或独资企业,但是并没有、也不可能转移相关技术。为了避免受制于人,必须尽快提升我国自主的 MMCs 生产和应用水平。

## 3 金属基复合材料研究的前沿趋势

当代 MMCs 的结构和功能都相对简单,而高科技发展日益要求 MMCs 能够满足高性能化和多功能化的挑战,因此新一代 MMCs 必然朝着“结构复杂化”的方向发展。下面对已经初露端倪的一些研究前沿和趋势进行简要的介绍,希望能够对国内从事 MMCs 研究和开发的同行们有所启发。

### 3.1 金属基复合材料结构的优化

金属基复合材料的性能不仅取决于基体和增强体的种类和配比,更取决于增强体在基体中的空间配置模式(形状、尺寸、连接形式和对称性)。传统上增强体均匀分布的复合结构只是最简单的空间配置模式,而近年来理论分析和实验结果都表明,在中间或介观尺度上人为调控的有序非均匀分布更有利于发挥设计自由度,从而进一步发掘 MMCs 的性能潜力、实现性能指标的最优化配置,是 MMCs 研究发展的重要方向。

#### 3.1.1 多元/多尺度 MMCs

多元复合强化(混杂增强)的研究理念逐渐引起研究者的更大兴趣<sup>[18-19]</sup>。通过引入不同种类(例如 TiB 和 TiC 混杂增强钛基 MMCs)、不同形态(例如晶须和颗粒混杂增强镁基 MMCs)、不同尺度(双峰 SiC 颗粒增强铝基 MMCs)的增强相,利用多元增强体本身物性参数不同,通过相与相、以及相界面与界面之间的耦合作用呈现出比单一增强相复合条件下更好的优越性能。

### 3.1.2 微结构韧化 MMCs

随增强体含量些微增大, MMCs 的强度和韧性/塑性存在着相互倒置关系, 即强度的提高伴随韧性/塑性的降低。通过将非连续增强 MMCs 分化区隔为增强体颗粒富集区(脆性)和一定数量、一定尺寸、不含增强体基体区(韧性), 这些纯基体区域作为韧化相将会具有阻止裂纹扩展、吸收能量的作用, 从而使 MMCs 的损伤容限得到提高。与传统的均匀分散的 MMCs 相比, 这种新型的复合材料具有更好的塑性和韧性<sup>[20-21]</sup>。

### 3.1.3 层状 MMCs

层状金属基复合材料在现代航空工业中的应用十分广泛, 如用作飞机蒙皮的 GLARE 层板是由玻纤增强树脂层与铝箔构成的层状铝基复合材料, 在 A380 上的用量达机体结构质量的 3% 以上。在微米尺度上, 受自然界生物叠层结构达到强、韧最佳配合的启发, 韧脆交替的微叠层 MMCs 研究越来越引起关注, 主要包括金属/金属、金属/陶瓷、金属/MMCs 微叠层材料, 主要目的是通过微叠层来补偿单层材料内在性能的不足, 以满足各种各样的特殊应用需求, 如耐高温材料、硬度材料、热障涂层材料等<sup>[22-23]</sup>。

### 3.1.4 泡沫 MMCs

多孔金属泡沫是近几十年发展起来的一种结构功能材料, 作为结构材料, 它具有轻质和高比强度的特点; 作为功能材料, 它具有多孔、减振、阻尼、吸音、散热、吸收冲击能、电磁屏蔽等多种物理性能, 由于其满足了结构材料轻质多功能化及众多高技术的需求, 已经成为交通、建筑及航空航天等领域的研究热点。目前研究较多的是泡沫铝基复合材料, 大致可分为两个范畴: 一是泡沫本身是含有增强体的铝基复合材料<sup>[24-25]</sup>, 二是泡沫虽然由纯铝基体构成, 但在其孔洞中引入粘弹性体、吸波涂料等功能组分<sup>[26]</sup>。

### 3.1.5 双连续/互穿网络 MMCs

为了更有效地发挥陶瓷增强体的高刚度、低膨胀等的特性, 除了提高金属基复合材料中的陶瓷增强体含量外, 另一种有效的作法是使陶瓷增强体在基体合金中成为连续的三维骨架结构, 从而以双连续的微结构设计来达到这一目的<sup>[27-28]</sup>。

## 3.2 结构-功能一体化

随着科学技术的发展, 对金属材料的使用要求不再局限于机械性能, 而是要求在多场合服役条件下具有结构功能一体化和多功能响应的特性。在金属基体中引入的颗粒、晶须、纤维等异质材料, 既可以作为增强体提高金属材料的机械性能, 也可以作为功能体赋予金属材料本身不具备的物理和功能特性。

### 3.2.1 高效热管理 MMCs

随着微电子技术的高速发展, 微处理器及半导体器件的最高功率密度已经逼近  $1\,000\text{ W/cm}^2$ , 在应用中常常因为过热而无法正常工作。散热问题已成为电子信息产业发展的技术瓶颈之一。新一代电子封装材料的研发主要以高热导率的碳纳米管、金刚石、高定向热解石墨作增强相。其中, 金刚石可以人工合成且不存在各向异性, 将金刚石与 Cu, Al 等高导热金属复合可以克服各自的不足, 可望获得高导热、低膨胀、低密度的理想电子封装材料<sup>[29-30]</sup>。

### 3.2.2 低膨胀 MMCs

低热膨胀 MMCs 具有优异的抗热冲击性能, 在变温场合使用时能够保持尺寸稳定性, 因此在航天结构件、测量仪表、光学器件、卫星天线等工程领域具有重要的应用价值。据研究报道, 在金属基体中添加具有较低热膨胀系数、甚至负热膨胀系数的增强体作为调节 MMCs 热膨胀系数的功能组元, 例如  $\beta$ -锂霞石 ( $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )、钨酸锆 ( $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ )、准晶 ( $\text{Al}_{65}\text{Cu}_{20}\text{Cr}_{15}$ ) 等, 可以有效地降低复合材料的热膨胀系数。相信随着研究的逐渐深入和完善, 这种近零膨胀的金属基复合材料很快将成功应用于实践<sup>[31]</sup>。

### 3.2.3 高阻尼 MMCs

在实际应用中, 不但要求高阻尼材料具有优异的减振与降噪性能, 而且要求轻质、高强的结构性能。然而, 二者在金属及其合金中通常是不兼容的。因此 MMCs 成为发展高阻尼材料的重要途径, 即通过引入具有高阻尼性能的增强体, 使增强体和金属基体分别承担提供阻尼与强度的任务。目前关注较多的高阻尼增强体包括粉煤灰空心微球 (fly ash)、形状记忆合金 (TiNi, Cu-Al-Ni)、铁磁性合金、压电陶瓷 ( $\text{PbTiO}$ )、高阻尼多元氧化物 ( $\text{Li}_5\text{La}_3\text{Ta}_2\text{O}_{12}$ )、碳纳米管等<sup>[32]</sup>。

## 3.3 碳纳米管增强金属基纳米复合材料

在金属基体中引入均匀弥散纳米级增强体粒子, 所得 MMCs 往往可以呈现出更为理想的力学性能<sup>[33]</sup>以及导电、导热、耐磨、耐蚀、耐高温、抗氧化等性能。目前, 金属基纳米复合材料的研究重点主要集中在纳米结构材料和纳米涂层。碳纳米管具有优异的力学、电学、热学等性能, 是制备 MMCs 的最为理想的增强体之一, 特别是随着碳纳米管的宏量制备及其价格的一路降低, 碳纳米管增强 MMCs 日渐成为研究的焦点<sup>[34-35]</sup>, Al, Cu, Mg, Ti, Fe 等基体虽都有涉及, 但是关于 Al 基和 Cu 基的研究相对集中。然而, 一则由于碳纳米管很难均匀分散, 二则由于碳纳米管很难与金属基体形成有效的界面结合, 所以所制备的 MMCs 的性能提高并不是很

大,远没有达到理想值,特别是在力学性能方面。

## 4 总结与展望

经过二十多年的发展, MMCs 已经成功地从实验室走向市场,并在诸多应用领域站稳了脚跟,这受益于广泛而深入的基础研究工作,为低成本、高效率生产 MMCs 提供有力的技术支撑。今后的研发工作主要应着眼于两个方面,即在进一步完善已有 MMCs 材料和技术的同时,寻求新一代 MMCs 设计与制备的突破口,从而为 MMCs 的可持续发展奠定基础。目前 MMCs 研发工作呈现 3 个趋势:① 复合构型设计将受到更多重视,重点是通过调控增强体的空间分布实现强韧化;② 结构功能一体化、多功能化将成为未来 MMCs 高性能化的必然途径;③ 尽管备受争议,以碳纳米管为代表的金属基纳米复合材料终将登上历史的舞台。

## 参考文献 References

- [1] Rittner M N. *Metal Matrix Composites in the 21st Century: Markets and Opportunities*[R]. Norwalk: BCC Inc, 2005.
- [2] Calvin Swift. *Metal Matrix Composites: The Global Market*[R]. Norwalk: BCC Inc, 2009.
- [3] Miracle D B. Metal Matrix Composites: from Technology to Science [J]. *Composite Science and Technology*, 2005, 65: 2 526–2 540.
- [4] Hofmann D C, Suh J Y, Wiest A, et al. Designing Metallic Glass Matrix Composites with High Toughness and Tensile Ductility [J]. *Nature*, 2008, 451: 1 085–U3.
- [5] Lewandowski J J, Shazly M, Nouri A S. Intrinsic and Extrinsic Toughening of Metallic Glasses [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54: 337–341.
- [6] Chawla N, Chawla K K. Metal-Matrix Composites in Ground Transportation[J]. *JOM*, 2006, 58: 67–70.
- [7] Prasad S V, Asthana R. Aluminum Metal-Matrix Composites for Automotive Applications: Tribological Considerations[J]. *Tribology Letters*, 2004, 17: 445–453.
- [8] Occhionero M A, Hay R A, Adams R W, et al. Aluminum Silicon Carbide (AlSiC) Thermal Management Packaging for High Density Packaging Applications[C]//*Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*. Denver: SPIE, 1999, 3 830: 34–39.
- [9] Xiong Degan(熊德赣), Cheng Hui(程辉), Liu Xicong(刘希丛), et al. AlSiC 电子封装材料及构件研究进展[J]. *Materials Review(材料导报)*, 2006, 20: 111–115.
- [10] CPS Technologies. *Alsic Thermal Management Products* [EB/OL]. <http://www.alsic.com/>.
- [11] Rawal S. Metal-Matrix Composites for Space Applications[J]. *JOM*, 2001, 53: 14–17.
- [12] Miracle D B. *Aeronautical Applications of Metal Matrix Composites*. In: *ASM Handbook, Volume 21: Composites* [M]. USA: ASM International, 2001: 1 033–1 049.
- [13] Cui Yan, Wang Lifeng, Ren Jianyue. Multi-Functional SiC/Al Composites for Aerospace Applications[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 21: 578–584.
- [14] Pacific Sintered Metals. *Photographs for Powder Metallurgy Products*[EB/OL]. 2005. <http://www.pacificsintered.com/>.
- [15] 3M. *MMCs Conducts*[EB/OL]. 2005. <http://www.3m.com/>.
- [16] DWA. *Photograph for Neutron Absorbing Products* [EB/OL]. <http://dwatechnologies.com/>.
- [17] Wang Dongshan(王东山), Xue Xiangxin(薛向欣), Liu Ran(刘然), et al. B<sub>4</sub>C/Al 复合材料的研究进展及展望[J]. *Materials Review(材料导报)*, 2007, 21: 388–390.
- [18] Gu J H, Zhang X N, Gu M Y, et al. Internal Friction Peak and Damping Mechanism in High Damping 6061Al/SiCp/Gr Hybrid Metal Matrix Composite[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, 372: 304–308.
- [19] Du Jun(杜军), Liu Yuehui(刘耀辉), Yu Sirong(于思荣). 铸造混杂增强金属基复合材料研究进展[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*, 2002(6): 19–22.
- [20] Peng H X, Fan Z, Evans J R G. Novel MMC Microstructure with Tailored Distribution of the Reinforcing Phase[J]. *Journal of Microscopy*, 2001, 201: 333–338.
- [21] Qin Shuyi(秦蜀懿), Zhang Guoding(张国定). 改善颗粒增强金属基复合材料塑性和韧性的途径与机制[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*, 2000(10): 621–629.
- [22] Yi Jian(易剑), He Xiaodong(赫晓东), Li Zhuang(李垚). 微叠层材料及其制备工艺研究进展[J]. *Aerospace Materials & Technology(宇航材料工艺)*, 2005(5): 16–21.
- [23] Hassan H A, Lewandowski J J. Laminated Nanostructure Composites with Improved Bend Ductility and Toughness[J]. *Scripta Materialia*, 2009, 61: 1 072–1 074.
- [24] Neville B P, Rabiei A. Composite Metal Foams Processed Through Powder Metallurgy[J]. *Materials and Design*, 2008, 29: 388–396.
- [25] Rohatgi P K, Kim J K, Gupta N, et al. Compressive Characteristics of A356/Fly Ash Cenosphere Composites Synthesized by Pressure Infiltration Technique[J]. *Composites A*, 2006, 37: 430–437.
- [26] Wang Zhiyuan(王志远), Yang Liushuan(杨留栓). 泡沫金属基高阻尼尼复合材料的研究进展[J]. *Development and Application of Materials(材料开发与应用)*, 2004, 19: 38–40.
- [27] Peng H X, Fan Z, Evans J R G. Bi-Continuous Metal Matrix Composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 303: 37–45.
- [28] Moon R J, Hoffman M, Roedel J, et al. Evaluation of Crack-Tip Stress Fields on Microstructural-Scale Fracture in Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Interpenetrating Network Composites [J]. *Acta Materialia*, 2009, 57: 570–581.

- [29] Fang Zhenzheng(方针正), Lin Chenguang(林晨光), Zhang Xiaoyong(张小勇), *et al.* 新型电子封装用金刚石/金属复合材料的组织性能与应用[J]. *Materials Review*(材料导报), 2008, 22: 36-39.
- [30] Yoshida K, Morigami H. Thermal Properties of Diamond Copper Composite Material[J]. *Microelectronics Reliability*, 2004, 44: 303-308.
- [31] Tong Linsong(佟林松), Fan Jianzhong(樊建中), Xiao Bolu(肖伯律). 低热膨胀铝基复合材料的研究进展[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属), 2008, 32: 375-380.
- [32] Lu Hui, Wang Xianping, Zhang Tao, *et al.* Design, Fabrication, and Properties of High Damping Metal Matrix Composites—A Review[J]. *Materials*, 2009(2): 958-977.
- [33] Zhang Z, Chen D L. Consideration of Orowan Strengthening Effect in Particulate-Reinforced Metal Matrix Nanocomposites: A Model for Predicting Their Yield Strength[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54: 1 321-1 326.
- [34] Yang Yi(杨 益), Yang Shengliang(杨盛良). 碳纳米管增强金属基复合材料的研究现状及展望[J]. *Materials Review*(材料导报), 2007, 21: 182-184.
- [35] Harris P J F. Carbon Nanotube Composites[J]. *International Materials Reviews*, 2004, 49: 31-43.



专栏特约编辑 张 荻  
张 荻: 男, 1957年3月生, “长江学者奖励计划”特聘教授; 1982年毕业于西安交通大学, 同年考取教育部出国研究生, 1985, 1988年分别获大阪大学硕士、博士学位, 2003年全国优秀博士论文导师; 现任上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室主任, 中国复合材料学会常务理事, 金属基及陶瓷基复合材料专业委员会主任; 先后在日本 Yuasa 中央研究所、大阪大学超高压电镜中心、京都大学材料系、佐贺大学电子系和德国 Max-Planck 金属研究所作访问学者和教授; 主持和承担多项国内项目和政府间国际科技合作项目, 还与多所国际知名大学及公司建立广泛的合作研究关系。



特约撰稿人 马宗义  
马宗义: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师; 1988年获哈尔滨工业大学硕士学位, 2000年获香港城市大学博士学位, 2001~2004年在密苏里大学从事合作研究; 国家杰出青年基金/中国科学院百人计划入选者, 中国复合材料学会金属基及陶瓷基专业委员会副主任。

肖伯律: 男, 1975年生, 研究员; 1996年毕业于吉林工业大学, 1999, 2002年分别获甘肃工业大学、中国科学院金属研究所硕士和博士学位; 2007年作为引进优秀学者进入中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室工作。

姜启川: 男, 1949年生, 教授, 博导, 吉林大学材料科学与工程

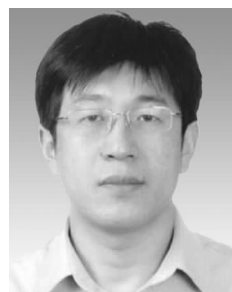


特约撰稿人 肖伯律  
肖伯律: 男, 1982年获吉林工业大学工学硕士, 1994~1995年作为高级访问学者在加拿大 McMaster 大学材料科学与工程系进行合作研究与学术交流, 开辟了变质铸造高碳高合金钢中碳化物团球化的新研究领域; 作为第一获奖人获国家发明四等奖1项、吉林省科技进步奖基础理论类与发明类一等奖各1项。

范同祥: 男, 1971年7月生, 金属基复合材料国家重点实验室教授, 中国材料研究学会青年委员会理事, 中国有色金属学会材料科学与工程委员会委员; 1999年毕业于上海交通大学, 获博士学位; 2002, 2004年分别入选教育部“优秀青年教师资助计划”和“新世纪优



特约撰稿人 姜启川



特约撰稿人 范同祥

秀人才资助计划”; 承担的研究项目曾获上海市自然科学一等奖。

欧阳求保: 男, 1967年出生, 工学博士; 1992年毕业于上海交通大学复合材料专业; 所研制的铝基复合材料已成功应用于我国航天、空间、先进武器、汽车等多个领域; 曾获上海市科技进步一等奖和国防科技进步三等奖。

吕维洁: 男, 1973年2月生, 博士, 金属



特约撰稿人 欧阳求保



特约撰稿人 吕维洁

基复合材料国家重点实验室研究员; 2000年毕业于上海交通大学; 承担和参加了国家 863、973、自然科学基金等 30 多项科研项目研究; 获得全国优秀博士学位论文, 上海市科技进步一等奖、二等奖, 教育部新世纪优秀人才, 上海市科技启明星等奖励; 中国复合材料学会理事, 中国真空学会理事, 上海市真空学会真空冶金委员会副主任委员等。

