

# 装备升级换代背景下金属基复合材料的发展机遇和挑战

武高辉, 匡泽洋

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 本文从产业化发展战略的角度出发, 对我国金属基复合材料的形成和发展进行了评述。简要总结了我国金属基复合材料的发展历程, 梳理了当前快速发展阶段中金属基复合材料在几个主要制备方法, 如原位自生法、搅拌铸造法、粉末冶金法、压力浸渗法中取得的关键性技术突破。在此基础上, 列举了对装备升级换代产生显著推动作用、具有代表性的金属基复合材料工程应用案例, 预测了未来 5~10 年金属基复合材料的发展趋势。针对当前国防与国民经济领域装备技术发展对材料技术提出的挑战, 分析了金属基复合材料在军民两用市场的发展机遇与前景, 同时就产业化技术和产业环境的不足, 从夯实国家级产业化平台和壮大人才培养基地、加大国家投入、加快标准和数据库体系建设、开发低成本高品质材料制备技术 4 个方面提出了发展建议。

**关键词:** 金属基复合材料; 产业化应用; 装备发展; 材料制备

**中图分类号:** TG151   **文献标识码:** A

## Opportunities and Challenges for Metal Matrix Composites in the Context of Equipment Upgrading

Wu Gaohui, Kuang Zeyang

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In this paper, the application progress and development of metal matrix composites (MMCs) are reviewed from the perspective of industrialization strategy. The development process of MMCs in China is briefly summarized. The key technological breakthroughs in the main preparation methods of MMCs, such as in-situ synthesis, stirring casting, powder metallurgy, and pressure infiltration, are introduced. Typical engineering application cases of MMCs that promote equipment upgrading are listed. The development trend of MMCs in the next five to ten years is prospected. In view of the challenges posed to material technology by the development of equipment technology in the field of national defense and national economy, the development opportunities and prospects of MMCs in the civil-military dual-use market are analyzed. Moreover, to overcome the deficiency of industrialization technology and industrial environment, development suggestions are put forward, including consolidating national industrialization platforms and talent cultivation bases, increasing national investment, speeding up the construction of standards and database systems, and developing low-cost and high-quality material preparation technology.

**Keywords:** metal matrix composites; industrialized application; equipment development; materials preparation

收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-02-20

通讯作者: 武高辉, 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院教授, 研究方向为金属基复合材料; E-mail: wugh@hit.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新兴产业发展战略研究(2035)”(2018-ZD-12)

本刊网址: [www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae](http://www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae)

### 一、前言

金属基复合材料是指采用人工方法,将不同尺寸、不同形态(包括纤维、晶须、颗粒、纳米颗粒等)的无机非金属(或金属)增强体添加到金属基体中制成的新型材料[1]。通过合理的设计,金属基复合材料可以发挥出增强体和基体各自的性能优势,获得“合金”材料所不具备的特殊性能,如比强度、比刚度、低膨胀、高导热、耐高温等,但在塑性等指标方面有所损失。美国国家航空航天局(NASA)于1963年首次研发了金属基复合材料。界面反应控制、制备工艺是金属基复合材料的关键技术。

新一代装备技术的提升,对基础材料的性能要求愈加苛刻。在传统金属材料不能满足要求的状况下,金属基复合材料已经成为不可替代的战略性新材料,其应用广度、发展速度和生产规模已成为衡量一个国家材料科技水平的重要标志之一[2]。目前,全球金属基复合材料市场基本上被西方发达国家所垄断,超过总质量2/3的金属基复合材料为美国、欧洲、日本等发达国家或地区所使用。

我国在1981年启动了金属基复合材料研究,经历了艰难的起步阶段和初期工程验证阶段,目前步入普及与快速发展阶段。若干种金属基复合材料在尖端国防领域的成功应用,显著提升了重大装备的精度和效能,也为装备换代和技术升级提供了坚实保障。随着国家军民技术一体化发展的实施,金属基复合材料产业面临着“重要战略机遇期”,未来5~10年金属基复合材料有望拓展并广泛应用于民生领域装备。在新的产业形势下,针对军民两用市场急剧增长的现实需求,分析金属基复合材料技术及其产业环境存在的不足、探讨协调解决发展速度与发展质量的措施,相关研究显得尤为迫切。

### 二、国外金属基复合材料发展与应用概况

2014年全球市场报告指出[3],金属基复合材料在航天器结构、电子封装热管理、汽车和轨道交通车辆刹车制动盘等工业方向的应用前景广阔;预计2012—2019年,金属基复合材料全球需求将从5496 t/a增加到近8000 t/a,材料产量呈线性增长趋势,年销售额从2.3亿美元增加到近4亿美元。

2019年,美国海军ManTech计划投资的项目集中在六大技术方向:复合材料加工和制造、电子加工和制造、自动化工具、焊接和修复、设备和工业化生产、缺陷检测,投资总额为2514万美元[4]。金属基复合材料的代表性工业产品应用见表1[5]。

### 三、我国金属基复合材料发展与应用情况

我国金属基复合材料的研制进展主要分为起步、工程验证、普及应用等3个阶段。

#### (一) 艰难起步阶段

1980—1999年为金属基复合材料的起步阶段,受限于薄弱的研究基础,过程较为艰难。20世纪80年代初,国内学术界对于金属基复合材料还十分陌生,无经验无设备。1982年,哈尔滨工业大学采用手工铺设、胶黏剂黏接的方法试制出钨丝增强铜复合材料板材,研究了复合材料拉伸强度与纤维方向的依赖关系[6]。1984年,哈尔滨工业大学从日本引进了压力浸渗技术,试制出SiC晶须增强铝复合材料( $\text{SiC}_w/\text{Al}$ )样品。1985年,北京航空材料研究院报道了利用滚轧金属箔扩散黏接方法,制备硼纤维/铝复合材料板的研究结果[7]。金属基复合材料制备工艺复杂,成品率很低、性能离散度很大,材料制备技术是制约其发展的第一障碍。

#### (二) 工程验证阶段

2000—2010年,我国突破了大气环境下压力浸渗、真空无压浸渗等材料制备技术,金属基复合材料开始在航天、航空装备上进行小范围应用,部分代表性应用见表2[8~10]。

金属基复合材料的探索性工程应用,解决了传统铝合金所不能解决的若干问题,建立了结构设计师的选材信心,获得了航天、航空、兵器等国防军工领域的大范围关注。

#### (三) 普及与快速发展阶段

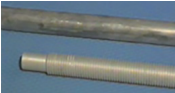


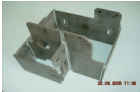
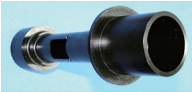
2010年前后,我国金属基复合材料进入普及应用与快速发展阶段,在电子封装领域、航天装备领域的应用规模逐步扩大,出现了若干金属基复合材料高新技术企业,形成了小批量生产配套的能力。

国外已形成规模化生产的技术主要是粉末冶金

表 1 金属基复合材料在工业产品中的代表性应用

	组件	产品
空间结构	波导天线桅杆	哈勃太空望远镜 (Hubble space telescope)
	微波热封装	商用低轨道卫星 (Commercial LEO satellites)
	功率半导体基座	商用高轨通信卫星 (Commercial GEO comsats)
汽车	驱动轴	雪佛兰克尔维特皮卡 (Chevy Corvette Pickup)
	排气阀	丰田 Altezza 汽车 (Toyota Altezza)
	发动机缸套	本田序曲汽车 (Honda Prelude)
	刹车片	普利茅斯猎兽汽车 (Plymouth Prowler)
航空动力	风扇出口导向叶片	普惠 4XXX 发动机 (Pratt and Whitney 4XXX engines)
航空结构	腹鳍	洛克希德·马丁 F-16 战斗机 (Lockheed Martin F-16 Fighter)
	燃油通道门盖	洛克希德·马丁 F-16 战斗机 (Lockheed Martin F-16 Fighter)
	转子叶片套筒	欧洲 EC-120 直升机 N-4 发动机 (Eurocopter EC-120 N-4 Engine)
热管理	功率半导体元件	摩托罗拉电源芯片 (Motorola power chip)
民用结构	自行车架	闪电山地车 (Specialized mountain bike)
	制动器鳍片	迪士尼观光塔 (Disney Thunder Mtn thrill ride)

表 2 我国金属基复合材料工程验证阶段的典型应用

时间/年	研制单位	产品	意义	实物图片
2000	哈尔滨工业大学	SiC <sub>w</sub> /Al 卫星展开丝杠	解决了铝合金刚度低的问题, 开启我国金属基复合材料航天应用的先例	
2003	哈尔滨工业大学	仪表级 SiC/Al 平台惯导姿态角传感器	解决了高精安装基准的微变形、低频谐振、大过载冲击等问题, 推动了惯性器件的更新换代	
2004	哈尔滨工业大学	光学级 SiC/Al 红外反射镜	解决了玻璃镜刚度低、钛合金镜密度高、镀膜成本高等问题, 成为我国反射镜材料新品种	
2005	北京航空材料研究院	高体分 SiC/Al 光电稳定平台框架	解决了铝合金构件比刚度低的问题	
2007	哈尔滨工业大学	C <sub>r</sub> /Al 卫星红外相机镜筒	实现了抗辐照、低膨胀、成像精度高的工程目标	
2009	北京航空材料研究院	电子封装 SiC/Al 卫星微波器件	实现了器件减重、可靠性提高的应用目标	

技术、搅拌铸造技术和无压浸渗技术。我国目前研究较深入的技术有 10 多项 (见图 1), 每种技术方法都有其适用范围, 所制备的材料也有不同的特性和用途。按照金属基复合材料增强体的体积分数从低到高顺序, 概要介绍以下 4 种主要技术。

### 1. 原位自生法

原位自生法 (in-situ synthesis) 是指通过金属盐与液态金属的高温化学反应原位生成特定陶瓷增强体的制备方法, 基体金属常见的有铝合金、镁合

金、钛合金以及钢铁合金等 [11,12]。原位自生法的优点在于陶瓷相与基体合金界面结合好, 增强相尺寸可以控制到纳米级别, 在提高基体合金强度的同时塑性损失不大。制备的金属基复合材料可以后期轧制成型, 或重熔铸造成型, 增强体的体积分数较低, 通常在 10% 以下时可获得较好的性价比, 民用市场潜力很大。

安徽相邦复合材料有限公司研发了原位自生纳米陶瓷颗粒增强铝基复合材料 (简称为陶铝新材

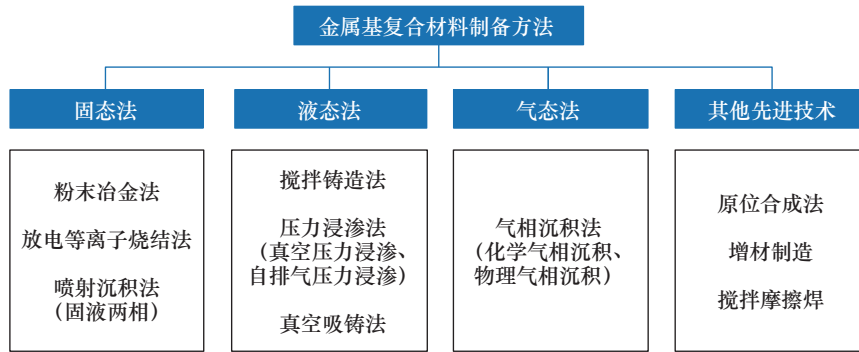


图1 我国在研的金属基复合材料制备方法

料), 形成了铸造材、挤压型材和增材制造等多个不同性能级别的材料品种, 在航空、航天、发动机、汽车、轨道交通等领域已经开始应用。西安工业大学研制的  $TiB_2/Al$  原位自生复合材料已应用于军用汽车发动机的活塞。河北省材料研究中心研制的原位自生  $NbC$  和  $V_2C$  纳米陶瓷颗粒增强铁基弹簧钢, 弹性极限提高 18%, 拉伸强度达 2300~2400 MPa, 2012 年起在邢台钢铁有限责任公司投入应用。

### 2. 搅拌铸造法

搅拌铸造法 (stirring casting) 是将颗粒状的陶瓷增强体加入到熔融态或者半熔融态的金属中, 然后借助机械搅拌或超声搅拌使增强体颗粒均匀分散并随后凝固成型的方法。为保证金属熔体的流动性, 增强体体积分数一般不超过 20%。搅拌铸造工艺装备简单, 成本低, 可制备大体量复合材料胚体, 并且可以重熔铸造成型。

上海交通大学、北京有色金属研究总院、哈尔滨工业大学在颗粒增强铝基、镁基复合材料方面的工作具有代表性, 已形成系列产品并走向产业化进程 [13]。

### 3. 粉末冶金法

粉末冶金法 (powder metallurgy) 是将粉末状的增强体与粉末状的金属基体按照一定比例混合, 先在模具中冷压成型, 然后真空除气, 再热压烧结合成型的方法, 这是目前国内外普及程度最高的技术。为了保证复合材料组织中基体的连续性, 目前批量化应用的复合材料体积分数通常在 20% 左右。制备材料经过后期的真空热等静压、轧制以及热挤压成型, 可以获得较高的力学性能。

中国科学院金属研究所采用粉末冶金技术生产的 17%  $SiC/Al$  复合材料列入航天材料采购目录, 已

经批量用于空间飞行器结构; 在大尺寸  $B_4C/Al$  复合材料方面突破了轧制成型、搅拌焊接等关键工艺, 实现了核反应堆选材的批量应用。中南大学采用喷射沉积法制备的  $Si/Al$  复合材料已经批量用于功率电子器件封装壳体。北京有色金属研究总院采用粉末冶金方法研制的  $SiC/Al$  复合材料、 $B_4C/Al$  复合材料以及喷射沉积法制备的  $Si/Al$  复合材料, 已经在直升机、战斗机、相控阵雷达、核反应堆等装备上批产应用。北京航空材料研究院研制的  $SiC/Al$  复合材料在直升机夹板上得到应用, 华南理工大学采用粉末冶金法制备的铝基和铁基复合材料等均走向了产业化。

### 4. 压力浸渗法

作为液态法制备技术, 压力浸渗法 (pressure infiltration) 又称挤压铸造法, 将液态金属通过外界压力强行突破表面张力浸渗到增强体预制件中, 随后凝固成型获得金属基复合材料。压力浸渗法的优势在于适用于纤维、晶须、粉末、纳米颗粒等各类增强体, 适用于各类基体合金, 可获得较好的界面强度, 材料可设计性强。通常颗粒增强复合材料的体积分数在 40%~70%。

根据工艺环境不同, 压力浸渗分为真空压力浸渗和大气环境下压力浸渗两大类。真空压力浸渗法为保证在较低压力下克服浸渗阻力, 通常颗粒尺寸较大 (比表面积较小); 为保证毛细管作用的必要间隙, 体积分数较高 (60% 左右)。这种方法易于获得高刚度、高导热、低膨胀等特殊性能的金属基复合材料, 可以实现复杂构件的免加工一次成型, 广泛应用于大功率电子器件热沉。北方工业大学、国防科技大学、北京有色金属研究总院、中南大学、湖南浩威特科技发展有限公司采用该类方法

实现了产业化。

哈尔滨工业大学发明了自排气压力浸渗技术 [14,15], 为解决大气环境下制备复合材料时气体夹杂缺陷等问题, 在钢模具的适当部位开出排气孔, 控制液态金属浸渗方向, 利用液态金属的浸渗压力挤出预制体中的气体, 最后在 10~50 MPa 的静水压力下凝固成型。与国外的真空浸渗相比, 该方法设备简单、工艺流程短, 工艺参数控制灵活, 适合制造体量更大、粉末更细小的复合材料。自排气压力浸渗技术已成为我国独有的一项先进技术。在大气环境下得到了致密度接近 100% 的光学级 SiC/Al 复合材料、超大尺寸 (直径大于 900 mm) 仪表级 SiC/Al 复合材料 (见图 2), 已经形成 SiC/Al 复合材料、碳纤维增强复合材料、功能复合材料、热管理材料等系列产品。

#### 四、金属基复合材料推动装备发展的典型案例

与合金化的技术方法不同, 金属基复合材料的组织结构特点决定了它对基体合金性能的提升不是百分之几, 而是几倍甚至十几倍, 从而显著提升装备的总体性能指标。本文通过调研, 梳理了近年来我国在金属基复合材料研发和工程应用方面的 9 个典型案例, 直观展示相关领域的技术进展。

##### (一) 仪表级 SiC/Al 复合材料保障了惯性器件和空间光学装备精度的跃升

高精度惯性仪表零件要求在长期时效、温度扰动、振动冲击等环境下保持尺寸形状不发生纳米量

级的变化, 而铝合金、钛合金均难以满足要求。文献 [16] 基于惯性器件服役环境下的材料响应特性分析结果, 提出了金属基复合材料稳定化设计原理, 包括组织稳定、相稳定、应力稳定、结构热稳定等。

基于上述技术原理研制的仪表级 SiC/Al 复合材料, 在温度扰动、振动冲击、长期静载荷下的关键性能指标优于进口铍材; 用于液浮陀螺样机, 随机漂移精度达到目前国内最高精度指标; 制造的空间运动光学系统应用于卫星激光通信指向机构 (见图 3), 整机减重 36.8%、刚度提升 53.3%、基频提高 62.0%, 实现了设计精度要求且保障了精度的天地一致性。国外在相关精密零件上使用铍材或者铍铝合金, 我国则探索出一条精密零件材料的低成本、高性能的技术途径。

##### (二) 金刚石 /Cu (Al) 复合材料成为第三代半导体技术发展的基石

第三代半导体材料 GaN 的功率密度、热流密度较第二代 GaAs 材料高出 2~3 倍, 而目前先进的第三代热管理材料 Si<sub>p</sub>/Al、SiC<sub>p</sub>/Al 的热导率仅能达到 220 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, 远不能满足 GaN 的散热要求, 因此热管理材料已成为 GaN 芯片的发展瓶颈。2017 年, 国家重点研发计划设立了“战略性先进电子材料”重点专项, 支持开展新型高效导热材料的制备与性能调控技术研究 [17]。哈尔滨工业大学采用压力浸渗方法, 成功解决了界面反应难题, 稳定制备出热导率不低于 650 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> 的金刚石 /Al 复合材料, 用于 GaN 芯片热沉后使结温降低 18.6 °C、可靠性增长 50%。目前金刚石 /Al

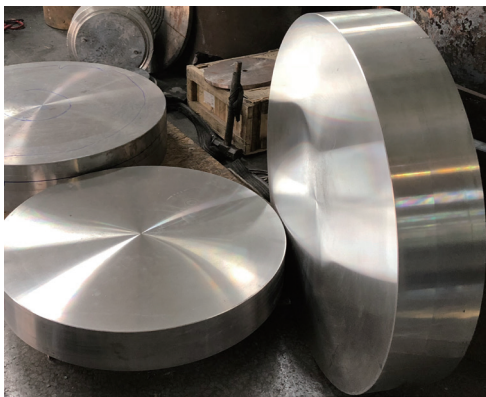


图 2  $\Phi 900$  mm 仪表级 SiC/Al 复合材料坯体

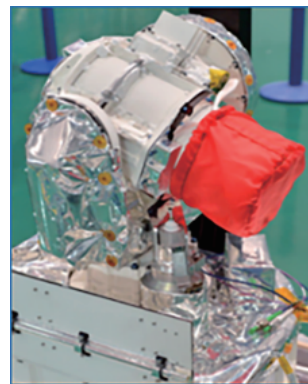


图 3 SiC/Al 复合材料制造的空间运动光学系统

复合材料已批产用于卫星海量处理器等大功率器件（见图4）。我国金刚石/Cu复合材料的研究进展较快，已经形成产业能力的单位包括北京科技大学[18]、北京有色金属研究总院、哈尔滨工业大学、湖南浩威科技发展有限公司等。

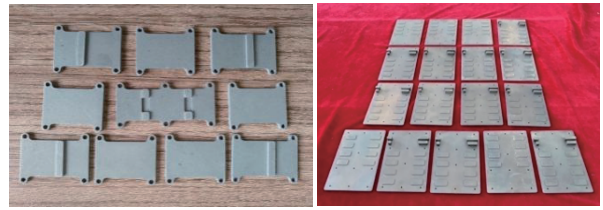


图4 金刚石/Al复合材料电子器件产品

### （三）主动防热结构功能一体化复合材料突破了传统防热材料的性能极限

固体火箭发动机是航天运载器的关键设备，喉衬作为关键部位，要在约2700 K高温、超过10 MPa压力的条件下工作，材料烧蚀将直接影响发动机性能指标。国际上普遍采用的C/C等防热材料，成本较高且烧蚀问题不可避免。哈尔滨工业大学因势利导提出主动防热的材料设计方案[19]，采用低熔点、低沸点的还原性金属作为耗散剂，渗入多孔石墨中制成碳基复合材料，成为应对固体火箭发动机高性能/低成本的材料需求、原创提出的全新技术方案。

材料方案原理为：高温烧蚀过程中耗散剂首先汽化形成蒸汽膜并降温；气态的耗散剂与边界层氧元素反应，耗散掉氧，从而消除碳基体氧化烧蚀条件；同时氧化后原位生成陶瓷膜，抵抗冲刷。所制备的固体火箭发动机喷管喉衬（见图5）烧蚀率低于C/C喉衬两个数量级，而成本降低50%、制备周期缩短90%。



图5 主动防热结构功能一体化复合材料样件

### （四）自润滑复合材料改变了传动机构设计观念

全世界每年因摩擦消耗的能源大约占总量的1/3~1/2，由于各种形式的磨损引起的零件损坏比例高达80% [20]。高精度滑动摩擦副要求高洁净、无溅落的自润滑材料，而传统自润滑材料（如软金属、石墨、MoS<sub>2</sub>、聚四氟乙烯等）因摩擦副存在磨损物溅落而降低了可靠性。

哈尔滨工业大学率先发明了TiB<sub>2</sub>/Al自润滑复合材料。在材料制备过程中，先将微纳米尺寸的TiB<sub>2</sub>颗粒预氧化，使表面生成B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>；再采用自排气压力浸渗技术制备，获得界面均匀分布B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的TiB<sub>2</sub>/Al复合材料。摩擦磨损过程中B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与空气中的水分反应生成H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>，而H<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>是优于石墨的优异润滑剂，起到减磨作用。将TiB<sub>2</sub>/Al材料应用于缝纫机滑动轴承，可以突破喷油润滑的复杂连杆机构和相应传动系统的传统设计，而直接由伺服电机

驱动缝纫机，相关产品通过了应用环境考核。

### （五）<sup>10</sup>B/Al复合材料突破了传统中子屏蔽材料的轻量化极限

2020年，我国核电规划的装机总容量约为5.8×10<sup>7</sup> kW [21]。随着核电站建设和使用数量的增加，大量乏燃料运输和核废料安全处置问题成为当务之急。在传统的中子屏蔽材料中，含硼聚乙烯在辐照环境下易脆化，且不能在高温下使用；硼钢中的<sup>10</sup>B易形成脆性网状硼化物，降低材料韧性。

哈尔滨工业大学研制的超高屏蔽效能<sup>10</sup>B/Al复合材料，与传统硼钢相比，在相近的屏蔽效能下，重量减轻30倍、厚度减小10倍，突破了传统中子屏蔽材料的性能极限。<sup>10</sup>B/Al复合材料在核反应堆的实验装置上获得成功应用，从而为新一代轻量化、小型化核防护结构设计提供了新型材料方案。

### （六）C<sub>f</sub>/Al成为航天飞行器高刚度精密结构件的新型材料

新型航天飞行器速度快、控制精度高，要求主体结构必须高刚度以避免振动、耐高温以承受气动加热、高强度以承受大过载。C<sub>f</sub>/Al是现有比强度、

比刚度最高的复合材料,但是 C 和 Al 界面反应十分严重,成为制备和批量生产的技术障碍。国外通过表面涂覆处理来抑制界面反应,工艺复杂、成本高且污染环境。

哈尔滨工业大学深入研究了 C 和 Al 反应的热力学和动力学基础问题,发明简捷的工艺方法,无污染地解决了界面反应难题;通过基体合金成分调整,使界面产物由有害的  $Al_4C_3$  转变为可强化的  $\beta$  相  $Al_3Mg_2$ ,低成本地解决了  $C_f/Al$  复合材料横向强度问题 [22]。 $C_f/Al$  复合材料已经用于复杂薄壁舱体结构,显示出优异的静态和动态力学特性(见表 2),解决了对重量、强度、刚度、空间耐候性等综合性能有着严格要求的航天结构件材料选用问题。

### (七) $SiC_f/Ti$ 复合材料应用于航空发动机

$SiC_f/Ti$  复合材料是适用于 600~800 °C 高温的轻质结构的理想材料,可以大幅减少结构重量,在航空航天领域应用前景广阔。与钛合金相比, $SiC_f/Ti$  复合材料具有良好的高温性能、抗蠕变和抗疲劳性能,减重增强效果明显,是新一代航空发动机的良好材料。

近年来,北京航空材料研究院、西北工业大学、中国航空制造技术研究院和中国科学院金属研究所在  $SiC_f/Ti$  复合材料研究方面分别获得技术突破 [23,24]。中国科学院金属研究所提出气体还原清洗技术和基于气流控制的温度调控技术,生产的 W 芯  $SiC$  纤维强度大于 3800 MPa,在 1000 °C 以下环境基本保持稳定;实现批量化生产,典型结构件通过强度考核 [25];所制备的  $SiC_f/Ti$  复合材料结构件,如全尺寸整体叶环(见图 6),室温实验最高转速可达 15 000 r/min,达到预期效果。



图 6  $SiC_f/Ti$  复合材料结构件

### (八) $B_4C/Al$ 复合材料为装甲防护材料提供了新方案

面向未来陆战场对抗,装甲车辆的高机动性、强防御性对装甲防护提出了既要降低密度又要提高抗侵彻能力的苛刻要求。相比合金化的方法,材料复合技术可以兼得高硬度、高强度、高冲击韧性、低密度等综合性能,是目前唯一可行的技术方案。

哈尔滨工业大学通过多尺度和梯度结构设计,发挥陶瓷密度低、抗侵彻能力高和金属高韧性的特性,制备了高抗侵彻能力梯度  $B_4C/Al$  复合材料(见图 7)。实验表明,相比于现役金属装甲,在相同抗弹能力下,面密度降低 50% 以上,可以抗多次打击,解决了传统陶瓷装甲破碎严重而不能抵抗多次冲击的问题,为提升装甲车辆的作战机动性和快速反应能力提供了全新的材料技术方案。

### (九) $C_f/Mg$ 复合材料成为高比强度构件的潜力之选

镁基复合材料有望提升镁合金基体的比模量、比强度以及耐磨、减振、耐高温等性能,一直是高性能材料领域的研究热点。国内在颗粒与纤维增强镁基复合材料的研究方面具有丰富的研究数据积累,在成型技术方面实现了复杂铸件的浇注成型,制成了颗粒增强镁基复合材料飞机液压分油盖、卫星遥感镜镜身和镜盒等样品,有关火箭发动机用延伸喷管动作筒的应用研究也取得了一定进展 [26]。

镁合金作为结构材料的弱点是塑性低、耐腐蚀性差,而加入陶瓷颗粒强化之后这些性能将进一步降低,因此其工程应用进展较为缓慢;若采

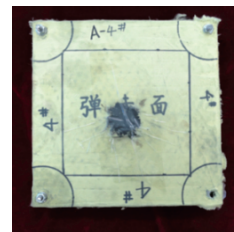


图 7 梯度  $B_4C/Al$  复合材料弹击后靶板及钢背板

用长纤维增强，则可以适应某些特殊需求，获得高比强度材料。为了研究二维抗张强度材料，哈尔滨工业大学选择了  $C_f/Mg$  复合材料设计方案，通过优化纤维编制方式实现了服役条件下的等强度设计。为提高界面强度，通过基体合金化的方法，在  $C-Mg$  表面形成  $Mg-Y$  固溶体界面，界面剪切强度由 8 MPa 提高到 107 MPa，单向拉伸强度达到 1.3 GPa，弹性模量为 230 GPa [27]。采用圆盘样件（见图 8）进行高速离心试验，边缘线速度较目前最高强度的铝合金样件提升近一倍，从而为新型镁基复合材料研发、新型高比强度结构设计提供了极具潜力的技术路径。

### 五、未来 5~10 年金属基复合材料发展趋势

#### （一）纳米增强体和专用基体合金的运用

不同于微米级增强体，纳米增强体颗粒的表面效应、尺寸效应以及原子扩散行为会对金属基复合材料强化行为带来新的表现，催生新的理论与技术。石墨烯作为纳米碳材料的典型代表，是目前各类纳米增强体中具有最高强度、刚度、导热、导电和低膨胀等特性的增强体 [28]。石墨烯与铝的界面反应以及石墨烯均匀分散是当前的主要技术障碍。利用大数据技术、仿真模拟技术，以及开发新型制备工艺，重新设计新的专用基体合金成分，预期可以解决上述问题，有望在二维方向上获得强度、塑性、导热、导电、阻尼等的优越性能，获得不同用途的石墨烯增强金属基复合材料 [29]。

#### （二）金属基复合材料性能设计理论与技术成熟化

在早期，金属基复合材料技术仅仅是在现有合金的基础上加入陶瓷增强体来改进基体合金的物理和力学特性。未来的金属基复合材料技术将根据零件使役性能分析的结果，从材料纳观、微观、介观



图 8  $C_f/Mg$  复合材料圆盘样件（高速离心试验后）

以及宏观尺度进行设计，获得预期性能。我国在金属基复合材料设计理论与技术方面已经取得诸多经验，列举若干成功案例如下。

#### 1. 尺寸稳定性设计

经过 20 余年的研究，国内相关单位建立了金属基复合材料尺寸稳定性设计理论与方法，仪表级、光学级  $SiC/Al$  复合材料的实际应用已经显现出材料精细化设计的成效。例如，专门面向精密仪表服役条件设计的仪表级  $SiC/Al$  复合材料，克服了铝合金、钛合金、铍材等的性能缺陷，能够综合地满足各项指标要求，成为“指哪打哪”材料设计理念的范例。

#### 2. 仿生设计

物竞天择，经历了亿万年进化而生存下来的生物具有最合理的微观组织和宏观结构。从微观结构与形态层面上进行仿生设计，这是金属基复合材料性能与功能设计的创新思路之一，目前发展较快的有层状结构、网状结构、微孔结构、梯度结构等。

中国科学院金属研究所从自然界中的竹子结构中获得灵感，成功将多种金属材料进行梯度复合，制备了梯度结构金属基复合材料，在一定程度上打破了“强度和塑性”的倒置关系，获得优异的强塑性（见图 9）[30]。

上海交通大学的遗态材料研究，通过直接以生物结构为模板，选择合适的物理化学方法，在保持模板精细分级结构的同时，将自然生物组分转化为目标材质，制备具有生物精细分级结构的新型功能材料。以贝壳仿生叠层思路为借鉴，采用片状粉末冶金方法制备石墨烯增强铜基复合材料（见图 10）[31]，为复合材料的强韧化设计提供了可行的技术方案。

啄木鸟的颅骨是一种微孔结构材料，具备高强度、耐冲击、减振等特性。微孔结构的金属基复合材料在减震、吸声、吸能方面有着特殊的功效，比如多孔泡沫金属材料，广泛应用于交通运输、工程结构、机械设备、航空航天、兵器工业等工业领域装备的抗冲击载荷构件。

#### 3. 晶界强韧化设计

哈尔滨工业大学为解决粉末冶金钛合金晶界强度问题，提出了一种晶界强韧化设计的方法，将  $TiB_2$  与 TC4 钛合金粉末混合，控制烧结工艺，巧妙地利用  $TiB_2$  的界面反应，在晶界处原位生成网



状 TiB 晶须,使其均匀交织于晶粒之间。这种三维立体网状微观结构的钛合金,在室温下的拉伸强度提升超过 30%,耐热上限提升 200 °C [32]。

### (三) 新型复合材料制备技术

制备技术是金属基复合材料实用化的基础,也是成本链的关键环节,发展方向是低成本、高效能、低消耗。增材制造基于计算机辅助设计(CAD)数据,主要以层的形式构建三维对象,逐步从创建基本模型或快速原型发展到近净成形工艺,在复杂形状物体生产方面可部分取代传统的机械加工方法 [33]。相关技术发展较快的有:电子束熔化沉积 (EBM)、激光选区熔化成型 (SLM)、光固化成型 (SLA)、熔融沉积成型 (FDM)、选择性激光烧结 (SLS)。

金属基复合材料属于难加工材料,在空间光学

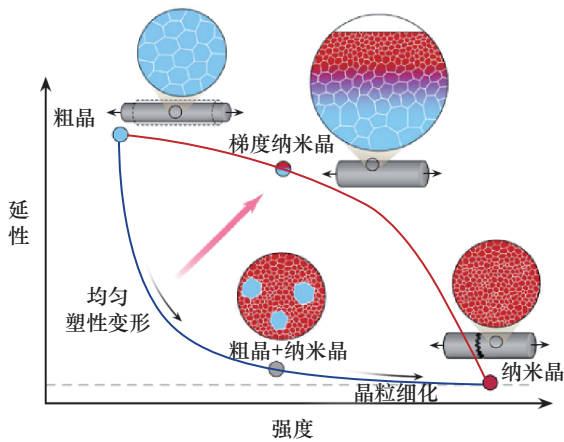


图9 梯度材料与粗晶、纳米晶材料的强韧性匹配

结构的零件制造方面,传统机械加工方法的加工去除量超过 90%。增材制造为高效率地生产中小批量、几何形状复杂的金属基复合材料零件提供了可行的技术途径,但界面反应、材料缺陷控制等问题将是技术挑战。

### (四) 超常性能金属基复合材料

“超常性能”材料指的是关键性能指标超越传统材料极限的材料 [34]。根据国内外研究现状预判,具备超常性能的金属基复合材料会大量涌现。①高强韧性纳米复合材料在增强体,比如 MAX 相 [35] (三元碳化物、氮化物、具有纳米层状晶体结构,如  $Ti_3SiC_2$ 、 $Ti_2AlC$ 、 $SiBC$  等) 达到纳米量级之后,可以带来诸多未知特性,提高强度的同时提高塑性,这给金属基复合材料走出强度和塑性倒置的“魔咒”提供了设计思路。②高阻尼复合材料在金属基体中引入具有高阻尼性能的增强体以及界面,如空心球、形状记忆合金 (TiNi、Cu-Al-Ni)、铁磁性合金、压电陶瓷等,使得增强体与界面发挥更高的阻尼功能。③超低膨胀复合材料在金属基体中添加具有低膨胀甚至负膨胀系数的增强体 (如  $ZrW_2O_8$  [36]、 $Hf-W_2O_8$ 、 $PbTiO_3$ 、 $Mn-Cu-Sn-N$  等) 来使基体获得超低热膨胀系数,从而在变温场合能够保持较小的尺寸变化,在空间精密机构、高精度测量仪表、光学器件等工程领域有重要应用价值。

“超常性能”的实现仅仅通过陶瓷增强体的选择和含量的控制还不够。未来基于基因工程理念,建立起金属的氧化物、碳化物、氮化物、硼化物以

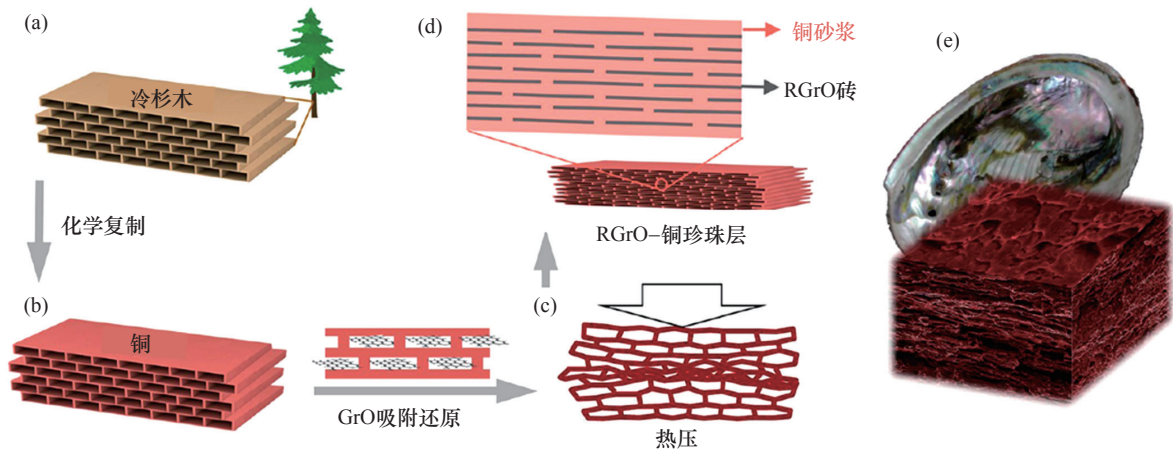


图10 制备人造珍珠层示意图

及碳材料等增强体的物理性能、化学性能、晶体结构、表面能等数据库，同时对基体成分、界面结构、增强体分布构型等进行仿真计算，由此精细设计和制备出超常性能的金属基复合材料，将是更高技术层面的发展方向。

### 六、金属基复合材料产业机遇与挑战研判

#### (一) 发展机遇

一代装备，一代材料。我国装备技术先后经历了引进、仿制发展、升级换代、自主创新等阶段。新一代装备在研制过程中，所困扰的“卡脖子”问题往往是以材料为代表的基础性问题。近年来，国内材料研究进展表明，由于金属粉末、纤维和纳米粉体技术的发展以及材料基因组研究方式的采用，材料性能提升已经超过了25%的预期上限。金属基复合材料相比聚合物基复合材料，用量不多，产业化规模不大，但又是决定装备精度、效能、寿命、可靠性等指标能否实现的关键因素，具有不可替代、不可或缺的作用，进而成为国家材料技术水平的重要标志。

金属基复合材料在民用领域同样也迎来了发展机遇期。世界性的能源问题引发了轨道交通、电动汽车等领域的轻量化技术需求，金属基复合材料在某些部件上已经成为唯一的替代材料。例如，高速铁路列车的大功率电子器件、第五代移动通信(5G)基站关键模块的散热问题已经无法依靠常规材料来解决，只有金属基复合材料才能胜任。随着智能制造的兴起，越来越多的高速往复运动部件要求具有低密度、高耐磨、高刚度、低成本等特性，而仅有金属基复合材料可以满足其需求。

未来5~10年，随着装备更新换代步伐的加快，我国金属基复合材料的市场需求将出现“井喷式”态势。预计国内市场主要分布在：高精度机电产品、空间光学仪器、惯导仪器、轨道交通与地面交通装备、电子器件、通信设施、新光源、微波装置等。具体来说，第三代半导体器件、5G通信、电动汽车、高铁刹车盘、商业航天等产品领域将会有千亿元级别的庞大市场需求。

综合来看，金属基复合材料是一种具有战略性的新材料。我国经过近40年的研究，材料设计技术逐渐趋于成熟，若干制造技术已经达到国际先进

甚至领先的水平；军民两用装备升级换代的需求正在加速，在技术层面上对金属基复合材料的刚性需求有所加强。在此大背景下，以往大多面向国防应用的金属基复合材料有望快速转化并进入民用装备市场，金属基复合材料产业新的发展战略机遇期正在到来。

#### (二) 面临的挑战

我国金属基复合材料的部分技术，如大气环境下自排气压力浸渗技术具有领先水平，粉末冶金技术、搅拌铸造技术整体上与国外水平比肩，材料产品性能指标与国外报道的基本相当。但综合来看，金属基复合材料技术仍然落后于美国、日本、加拿大、英国等传统材料强国，产业化环境的差距更为明显，主要表现在以下方面。

(1) 包括增强体制备、金属基体专用合金设计、材料制造装备、精密加工、精密成形、连接技术等在内的金属基复合材料产业链不够完备。其中，国内专用基体合金尚属空白，国产增强体粉末、基体合金粉末的质量一致性欠缺，国产制造设备故障率偏高，焊接技术研究不充分，精密加工研究不足。

(2) 金属基复合材料制造是一项特殊的技术，目前国内尚没有自动化专用装备，直接导致材料性能批次稳定性差、生产成本低。

(3) 研究与生产分散、无序、脱节，缺乏实质性的“产学研用”联合与合作。

(4) 工程设计人员对金属基复合材料不敢用、不会用的问题依然存在，金属基复合材料不好用、乱用的问题也较为明显。

(5) 金属基复合材料基础数据库尚不完备，国家标准体系不完善，细分材料的类别不明晰，导致用户盲目选材，甚至因误选材料而造成重大损失。

### 七、对策建议

#### (一) 夯实国家级产业化平台、工程实验室以及人才培养基地

金属基复合材料的科学问题与工程问题是跨学科的，其应用领域的覆盖面较宽，这一特点决定了“平台”不应由单一材料学的研究人员构成。建议国内高校与技术力量雄厚的用户(企业)合作建立

跨学科的研发平台,并在产品设计/特种加工/力学/材料学、惯性技术/力学/精密加工/材料学等复合方向优先布局。

## (二) 加大国家投入,尽快增强我国金属基复合材料产业体系实力

材料强国的发展路线表明,新材料的发展初期较多体现为政府行为,应由国家给予引导、支持和协调,且支持方向要基于应用产品对象而非材料本身。针对代表性强、价值重大、复合材料技术相对成熟的产品,支持企业牵头、用户主导的联合研发团队模式。开展国家级金属基复合材料产业化技术攻关,利用 5~10 年时间,集中力量攻克金属基复合材料批量生产和应用这一瓶颈问题。

## (三) 加快金属基复合材料相关的标准和数据库体系建设

优先支持国家实验室、国家地方联合工程实验室牵头,研究和建立国家标准和行业标准体系,构建金属基复合材料各类细分材料的基础性、通用性数据库。

## (四) 材料制备技术是金属基复合材料产业的核心竞争力

鉴于突破金属基复合材料制备技术的过程费时费力,且高风险、慢节奏,国家应制定积极正确的政策导向,鼓励专家学者和工程技术人员潜心研究工艺基础问题、装备技术基础问题、具有交叉性的基础问题。

### 致谢

文章撰写期间得到了国防科技大学白书欣教授、哈尔滨工业大学耿林教授、中国科学院金属研究所马宗义教授、北京有色金属研究总院樊建中教授、上海交通大学王浩伟教授、河北省材料研究中心崔春翔教授等专家学者的大力帮助,谨表谢意。

### 参考文献

- [1] 武高辉. 金属基复合材料性能设计——创新性思维的尝试 [J]. 中国材料进展, 2015, 34(6): 432–438.  
Wu G H. The development trend of metal matrix composites: Design of performance [J]. Materials China, 2015, 34 (6): 432–438.
- [2] 张荻, 张国定, 李志强. 金属基复合材料的现状与发展趋势 [J]. 中国材料进展, 2010, 29(4): 1–7.  
Zhang D, Zhang G D, Li Z Q. The current state and trend of metal

- matrix composites [J]. Materials China, 2010, 29(4): 1–7.
- [3] Researchmoz Global Pvt Ltd. Metal matrix composites (MMC) market for ground transportation, electronics/thermal management, aerospace, and other end-users – Global industry analysis, size, share, growth, trends and forecast, 2013–2019 [R]. New York: Researchmoz Global Pvt Ltd, 2014.
- [4] America's Office of Naval Research. 2019 Navy ManTech project book [R]. Virginia: America's Office of Naval Research, 2019.
- [5] Kumar P A, Rohatgi P, Weiss D. 50 years of foundry-produced metal matrix composites and future opportunities [J]. International Journal of Metalcasting, 2019 (9): 1–27.
- [6] 韩圭焕, 武高辉. 蔡-希尔失效判据在W/420/Cu复合材料中的实验研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1983, 15(3): 79–91.  
Han G H, Wu G H. Experimental observations on the Tsai-Hill failure criteria in W/420/Cu composite material [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1983, 15(3): 79–91.
- [7] 于琨, 徐宏清, 孙长义, 等. 硼/铝型材的研制 [J]. 航空学报, 1985, 6(3): 291–294.  
Yu K, Xu H Q, Sun C Y, et al. Fabrication of boron/aluminum shapes [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 1985, 6(3): 291–294.
- [8] 耿林, 王桂松, 郑镇洙, 等. SiC<sub>w</sub>/Al高温高速变形规律及其应用 [C]. 西安: 西部大开发科教先行与可持续发展—中国科协2000年学术年会文集, 2000.  
Geng L, Wang G S, Zheng Z Z, et al. High temperature and high-speed deformation rule and application of SiC<sub>w</sub>/Al [C]. Xi'an: Antecedence of Science and Education and Sustainable Development in China Western Development – Proceedings of CAST Annual Conference 2000, 2000.
- [9] 王秀芳, 陈苏, 武高辉. 仪表级、光学级复合材料研究新进展 [C]. 哈尔滨: 2005年惯性器件材料与工艺学术研讨暨技术交流会论文摘要集, 2005.  
Wang X F, Chen S, Wu G H. Progress in the research of instrument and optical-grade composite materials [C]. Harbin: Abstracts of 2005 Inertial Devices Materials and Technology Academic Seminar and Technical Exchange Conference, 2005.
- [10] 武高辉, 张云鹤, 陈国钦, 等. 碳纤维增强铝基复合材料及其构件的空间环境特性 [J]. 载人航天, 2012, 18(1): 73–82.  
Wu G H, Zhang Y H, Chen G Q, et al. Spatial environment properties of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites and their components [J]. Manned Spaceflight, 2012, 18(1): 73–82.
- [11] 张宇, 王小美, 葛禹锡, 等. 原位合成技术制备金属基复合材料的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2014, 43(24): 23–26.  
Zhang Y, Wang X M, Ge Y X, et al. Research progress of metal-matrix composite fabricated by in-situ synthesis [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(24): 23–26.
- [12] 耿林, 倪丁瑞, 郑镇洙. 原位自生非连续增强钛基复合材料的研究现状与展望 [J]. 复合材料学报, 2006, 23(1): 1–11.  
Geng L, Ni D R, Zheng Z Z. Current status and outlook of in situ discontinuously reinforced titanium matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(1): 1–11.
- [13] 孔亚茹, 郭强, 张荻. 颗粒增强铝基复合材料界面性能的研究 [J]. 材料导报, 2015, 29(9): 34–43, 49.  
Kong Y R, Guo Q, Zhang D. Review on interfacial properties of particle-reinforced aluminum matrix composites [J]. Materials Review, 2015, 29(9): 34–43, 49.

- [14] 武高辉, 河野纪雄, 高桥恒夫, 等. 熔融液态金属的自排气压力浸渗浸入过程 [C]. 东京: 轻金属学会第81回秋期大会讲演概要集, 1991.
- [15] 武高辉. 自排气压力浸渗法制备颗粒增强复合材料的复合化过程解析 [J]. 轻金属, 1993, 43(1): 20–25.
- [16] 武高辉, 乔菁, 姜龙涛. Al及其复合材料尺寸稳定性原理与稳定化设计研究进展 [J]. 金属学报, 2019, 55(1): 33–44.  
Wu G H, Qiao J, Jiang L T. Research progress on principle of dimensional stability and stabilization design of Al and its composites [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(1): 33–44.
- [17] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年) [EB/OL]. (2006-02-09) [2019-08-11]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_240244.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm).  
State Council of the People's Republic of China. The national medium- and long-term program for science and technology development (2006–2020) [EB/OL]. (2006-02-09) [2019-08-11]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content\\_240244.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm).
- [18] Li J W, Wang X T, Qiao Y, et al. High thermal conductivity through interfacial layer optimization in diamond particles dispersed Zr-alloyed Cu matrix composites [J]. Scripta Materialia, 2015, 109(1): 72–75.
- [19] 武高辉. 金属基复合材料发展的挑战与机遇 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1228–1237.  
Wu G H. Development challenge and opportunity of metal matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1228–1237.
- [20] 温诗铸, 黄平, 田煜, 等. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.  
Wen S Z, Huang P, Tian Y, et al. Principles of tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [21] 中华人民共和国国务院办公厅. 能源发展战略行动计划(2014—2020年) [EB/OL]. (2014-11-19) [2019-08-11]. [http://www.gov.cn/xinwen/2014-11/19/content\\_2780748.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2014-11/19/content_2780748.htm).  
General Office of the State Council of the People's Republic of China. Energy development strategy action plan (2014–2020) [EB/OL]. (2014-11-19) [2019-08-11]. [http://www.gov.cn/xinwen/2014-11/19/content\\_2780748.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2014-11/19/content_2780748.htm).
- [22] 武高辉, 姜龙涛, 陈国钦, 等. 金属基复合材料界面反应控制研究进展 [J]. 中国材料进展, 2012, 31(7): 51–58.  
Wu G H, Jiang L T, Cheng G Q, et al. Research progress on the control of interfacial reaction in metal matrix composites [J]. Rare Metals Letters, 2012, 31(7): 51–58.
- [23] 黄浩, 王敏涓, 李虎, 等. 连续SiC纤维增强钛基复合材料研制 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(14): 26–36.  
Huang H, Wang M J, Li H, et al. Preparation of SiC fibers reinforced titanium matrix composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(14): 26–36.
- [24] 杨延清, 罗贤, 黄斌, 等. SiC纤维增强Ti基复合材料的界面反应规律 [J]. 中国体视学与图像分析, 2016, 21(1): 58–65.  
Yang Y Q, Luo X, Huang B, et al. Characterizing interfacial reaction of SiC fibers-reinforced titanium-matrix composites [J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2016, 21(1): 58–65.
- [25] 王玉敏, 张国兴, 张旭, 等. 连续SiC纤维增强钛基复合材料研究进展 [J]. 金属学报, 2016, 52(10): 1153–1170.  
Wang Y M, Zhang G X, Zhang X, et al. Advances in SiC fiber reinforced titanium matrix composites [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(10): 1153–1170.
- [26] 田君, 李文芳, 韩利发, 等. 镁基复合材料的研究现状及发展 [J]. 材料导报, 2009, 23(17): 71–74.  
Tian J, Li W F, Han L F, et al. Research and development of magnesium matrix composites [J]. Materials Review, 2009, 23(17): 71–74.
- [27] 宋美慧. C<sub>r</sub>/Mg复合材料组织和力学性能及热膨胀二维各向同性设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(博士学位论文), 2010.  
Song M H. Microstructure and mechanical properties of C<sub>r</sub>/Mg composites and two-dimensional isotropic design for thermal expansion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology (Doctoral dissertation), 2010.
- [28] 杨文澍, 武高辉, 肖瑞, 等. 石墨烯/铝复合材料的研究现状及应用展望 [J]. 新材料产业, 2014 (11): 20–23.  
Yang W S, Wu G H, Xiao R, et al. Research status and application prospect of graphene/aluminum composites [J]. Advanced Materials Industry, 2014 (11): 20–23.
- [29] 王剑桥, 雷卫宁, 薛子明, 等. 石墨烯增强金属基复合材料的制备及应用研究进展 [J]. 材料工程, 2018, 46(12): 18–27.  
Wang J Q, Lei W N, Xue Z M, et al. Research progress on synthesis and application of graphene reinforced metal matrix composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(12): 18–27.
- [30] Lu K. Making strong nanomaterials ductile with gradients [J]. Science, 2014, 345(6203): 1455–1456.
- [31] Xiong D B, Cao M, Guo Q, et al. Graphene-and-copper artificial nacre fabricated by a preform impregnation process: Bioinspired strategy for strengthening-toughening of metal matrix composite [J]. ACS Nano, 2015, 9(7): 6934–6943.
- [32] Huang L J, Geng L, Peng H X, et al. Room temperature tensile fracture characteristics of in situ TiBw/Ti6Al4V composites with a quasi-continuous network architecture [J]. Scripta materialia, 2011, 64(9): 844–847.
- [33] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1–4.  
Lu B H, Li D C. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology [J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1–4.
- [34] 武高辉. 金属基复合材料设计引论 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
Wu G H. Introduction to the design of metal matrix composites [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2016.
- [35] Barsoum M W. The M<sub>N+1</sub>AX<sub>N</sub> phases: A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates [J]. Progress in Solid State Chemistry, 2000, 28(1–4): 201–281.
- [36] Wu G H, Zhou C, Zhang Q, et al. Decomposition of ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> in Al matrix and the influence of heat treatment on ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub>/Al–Si thermal expansion [J]. Scripta Materialia, 2015, 96(1): 29–32.