

金属基复合材料研究进展

张效宁, 王 华, 胡建杭, 吴桢芬

(昆明理工大学材料与冶金工程学院, 云南 昆明 650093)

摘 要: 新材料的研究、发展与应用一直是当代高新技术的重要内容之一。其中复合材料, 特别是金属基复合材料在新材料技术领域占有重要的地位。金属基复合材料对促进世界各国军用和民用领域的高科技现代化, 起到了至关重要的作用, 因此倍受人们重视。文章简单综述了金属基复合材料的发展, 分类, 性能和应用; 以及增强体的选取, 制成品的成型工艺, 性能, 以及应用和展望。

关键词: 金属基复合材料; 增强体; 铝基复合材料; 镁基复合材料; 应用

中图分类号: TG13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-0308 (2006) 05-0053-06

Review and Prospect of the Research on Metal Matrix Composites

ZHANG Xiao-ning, WANG Hua, HU Jian-hang, WU Zhen-fen

(Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

ABSTRACT: The research, development and application of new composites are one of the important matters in modern high science and technology. Composite materials, especially metal matrix composites, play a very important role in new materials field. Metal matrix composites are paid more attention for that they have very strong effects on acceleration of the field of army and civilian utilization in the world. The development, classification, property and application of metal-based materials are summarized briefly. The selection of reinforcing particle, and the molding techniques, property, application and expectation of finished products are also discussed.

KEY WORDS: metal matrix composites, reinforcing particle, aluminum matrix composites, magnesium matrix composites, application

1 引 言

复合材料^[1~2]是继天然材料, 加工材料和合成材料之后发展起来的新一代材料。按通常的说法, 复合材料是指两种或两种以上不同性质的单一材料, 通过不同的复合方法所得到的宏观多相材料。随着现代科学技术的迅猛发展, 对材料性能的要求日益提高。常希望复合材料即具有良好的综合性能, 又具有某些特殊性能。金属基复合材料是近年来迅速发展起来的高性能材料之一, 对促进世界各国军用和民用领域的高科技现代化, 起到了至关重要的作用。相信随着科学技术的不断发展, 新的制

造方法的出现, 高性能增强物价格的不断降低, 金属基复合材料在各方面将有越来越广阔的应用前景。

按照结构用金属基复合材料的基体的分类, 我们可以将金属基复合材料简单的分为用于 450 以下的轻金属基体——铝、镁合金, 低于 650—700 以下的钛合金, 以及高于 1 000 使用的高温合金(超合金)。以下从基体、增强体、以及复合材料的应用等方面, 分别予以评述。

2 轻金属合金

铝、镁合金是目前应用最为广泛、发展最为成

收稿日期: 2006-01-23

作者简介: 张效宁 (1978-), 男, 青海西宁人, 在读博士, 主要研究方向为复合材料和固体废弃物处理。

基金项目: 云南省科技攻关项目 (2001GG19)

熟的轻金属合金。用它们制成的各种高比强度、高比模量的轻型结构件，广泛的应用于宇航、航空和汽车工业等领域，并形成工业化规模生产。

对于不同类型的复合材料应当选取合适的铝、镁合金基体。常用的铝合金、镁合金的成分及性能等列于表1中。而对于铝、镁合金的性能，价格等另一关键的影响因素是增强物。

对于铝合金，常用的增强物有长纤维增强物、短纤维增强物，以及晶须和颗粒增强物等。下面分别就增强物的类型为区分，分别加以论述^[1]。

2.1 铝基复合材料的性能和应用

2.1.1 长纤维铝基增强物

目前已经研制成功的长纤维铝基复合材料主要有以下五种：硼—铝复合材料、碳（石墨）—铝复合材料、碳化硅—铝复合材料、氧化铝—铝复合材料和不锈钢丝—铝复合材料。这些复合材料都具有明显的各向异性。

1) 硼—铝复合材料

硼—铝复合材料由于硼纤维的性能好，且为直径较粗 ($d_f = 100 - 140\mu\text{m}$) 的单丝，因而在工艺上

较易制造，是长纤维复合材料中最早研究成功和应用的金属基复合材料。硼—铝复合材料的拉伸强度和弹性模量均明显高于基体，这种复合材料的优越性在高温时尤其突出。而且其疲劳性能优异。硼—铝复合材料是实际应用最早的金属基复合材料。美国和前苏联的航天飞机中的机身框架及支柱和起落架拉杆等都采用硼—铝复合材料制成。如美国航天飞机的主舱框架就是用硼纤维增强铝基复合材料制成。比铝合金框架减重44%，产生了巨大的效益。硼—铝复合材料还用作多半导体芯片的支座的散热冷却板材料，硼—铝复合材料的导热性好，热膨胀系数与半导体芯片非常接近，能大大减少接头处的疲劳。硼—铝复合材料的应用前景广泛，可用作中子屏蔽材料，它比一般市售的中子吸民材料的吸收能力强，强度和刚性好，可显著减重。可用来制造废核燃料的运输容器和储存容器，可移动防护罩、控制杆、喷气发动机网扇叶片、飞机机翼蒙皮、结构支撑件、飞机垂直尾翼、导弹构件、飞机起落架部件、自行车架、高尔夫杆等等。

表1 各种牌号铝镁合金的成分和性能

Tab. 1 Composition and property of different trademark aluminum - magnesium alloy

合金 牌号	主要成分/ %						密度 / (g cm ⁻³)	热膨胀系数 ×10 ⁻⁶ / K ⁻¹	导热率 / W m ⁻¹	抗拉强度 / MPa	模量 / GPa
	Al	Mg	Si	Zn	Cu	Mn					
工业纯铝											
A13	99.5		0.3		0.015		2.6	22 - 25.6	218 - 226	60 - 108	70
LF6	余量	5.8 - 6.8				0.5 - 0.8	2.64	22.8	117	330 - 360	66.7
LY12	余量	1.2 - 1.8			3.8 - 4.9	0.3 - 0.9	2.8	22.7	121 - 193	172 - 549	68 - 71
LC4	余量	1.8 - 2.8		5 - 7	1.4 - 2.0	0.2 - 0.6	2.85	23.1	155	209 - 618	66 - 71
LD2	余量	0.45 - 0.9	0.5 - 1.2		0.2 - 0.6		2.7	23.5	155 - 176	347 - 379	70
LD10	余量	0.4 - 0.8	0.6 - 1.2		3.9 - 4.8	0.4 - 1.0	2.8	22.5	159	411 - 504	71
ZL101	余量	0.2 - 0.4	6.5 - 7.5	0.3	0.2	0.5	2.66	23.0	155	165 - 275	69
ZL104	余量	0.17 - 0.3	8.0 - 10.5				2.65	21.7	147	255 - 275	69
MB2	0.3 - 0.4	余量		0.2 - 0.8		0.15 - 0.5	1.78	26	96	245 - 264	40
MB15		余量		5.0 - 6.0			1.83	20.9	121	326 - 340	44
ZM5	7.5 - 9.0	余量		0.2 - 0.8		0.15 - 0.5	1.81	26.8	78.5	157 - 254	41
ZM8		余量		5.5 - 6.0			1.89	26.5	109	310	42

2) 碳（石墨）—铝复合材料

碳（石墨）纤维密度小，具有非常优异的力学性能，是目前可作为金属基复合材料增强物的高性能纤维中价格最便宜的一种，因此引起了人们的广泛注意，用它们与很多种金属基体复合，以制成高

性能的金属基复合材料，其中工作做的最多的便是铝基体。

但是由于碳（石墨）纤维与液态铝的浸湿性差，高温下相互之间又容易发生化学反应，生成严重影响复合材料生成的化合物。而且除了上述因素

之外, 纤维的长径比对复合材料的性能有明显影响。这里所指的纤维的长径比是指试样中纤维的表面长度与直径之比, 并为考虑纤维在试样中的断裂。

石墨—铝复合材料最成功的应用是美国的哈勃望远镜的两个兼作波导管用的长为 3.6 m 的长方形天线支架, 此外还可用做人造卫星的支架, L 频段平面天线、人造卫星抛物面天线、照相机波导管和镜筒、红外反射镜等。

3) 碳化硅—铝复合材料

碳化硅纤维除了具有优异的力学性能外, 在高温下的抗氧化性能良好, 与硼纤维和碳纤维相比, 在较高的温度下与铝的相容性较好。因此, 作为铝与铝合金的增强物引起了人们很大的注意。目前市售的碳化硅纤维分为有芯的相容较好。因此, 作为铝与铝合金的增强物引起了人们很大的注意。目前市售的碳化硅纤维分为有芯和有芯两种。有芯碳化硅纤维以钨丝或碳丝作底丝经化学气相沉积制得, 为直径较粗的单丝。在工艺上制造复合材料相对较容易, 纤维上残留的游离碳很少, 含碳量较低, 与铝不易发生反应, 是铝基复合材料较好的一种增强物。无芯碳化硅纤维有聚碳硅烷有机物转变制得, 一束多丝, 单丝直径细, 制作复合材料较直径粗的单丝困难, 且纤维中残留有较多的游离碳和氧, 因此与化学气相沉积法得到的碳化硅纤维相比, 较易与铝反应, 生成有害的反应产物。但是近几年来对这种碳化硅纤维进行了改造, 游离碳和氧的含量已明显减少。

碳化硅—铝复合材料主要用作飞机、导弹、发动机的高性能结构件, 如飞机的 3 m 长 Z 型加强板, 喷气式战斗机垂直尾翼平衡和尾翼梁, 导弹弹体及垂直尾翼, 汽车空调器箱, 移动式桥的下桁铰。主柱和 受压管, 小的重量轻的压力容器和聚变反应器等。

4) 其他长纤维增强铝基复合材料

氧化铝纤维增强铝基复合材料

氧化铝纤维增强铝基复合材料具有高的刚度和强度, 同时由于氧化铝纤维在氧化性气氛中稳定, 能在高温下保持其刚度和强度、硬而耐磨, 因此用它作增强物的金属基复合材料的抗蠕变、抗疲劳性能都很优异。

不锈钢丝增强铝基复合材料

不锈钢丝增强铝基复合材料中由于钢的密度高, 因此铝—钢丝复合材料的比强度和比刚度不如

高性能纤维增强的铝基复合材料。但由于这种复合材料比较便宜且工艺性能良好, 是最为实用的结构复合材料中的一种。

氧化铝纤维增强铝基复合材料最成功的应用是日本丰田公司用来制造柴油发动机的活塞, 年产量有几十万只。

2.1.2 短纤维铝基 晶须和颗粒增强物

以上简要介绍了长纤维增强铝基复合材料的性能及应用。下面简要介绍一下短纤维、晶须和颗粒增强物为增强体的铝基复合材料的性能及应用。

可用作铝基复合材料增强物的短纤维有氧化铝、硅酸铝和碳化硅等。尤其以前两者为主。氧化铝纤维是结晶态的, 成分为 Al_2O_3 , 并可以根据需要来添加其他氧化物。硅酸铝纤维有晶态和非晶态两种。莫来石纤维属晶态硅酸铝纤维, 其中 Al_2O_3 和 SiO_2 按化学计量, 分子式为 $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 。非晶态硅酸铝纤维中 SiO_2 的含量超过化学计量。氧化铝短纤维增强铝基复合材料的室温拉伸强度并不比基体合金高, 但它们的高温强度保持率明显优于基体, 弹性模量在室温和高温都有较大的提高, 热膨胀系数有所降低, 耐磨性能得到改善。

晶须和颗粒增强铝基复合材料的性能优异, 可以用常规的方法制造和加工, 颗粒的价格低廉, 某些晶须(如 SiC 晶须)由于找到了便宜的原料和较为简单的生产方法, 成本大幅度降低。因此, 这些复合材料具有大规模应用的广阔前景。目前主要使用 SiC 晶须和颗粒, 下面对这两种增强物的铝基复合材料做一介绍。

SiC 晶须和颗粒增强基复合材料具有良好的力学性能和摩擦性能, 并随增强物数量的增加而提高, 热膨胀系数低于基体。这些复合材料的韧性虽然低于基体, 但高于长纤维增强金属基复合材料。

非连续增强铝基复合材料有 SiC 晶须和颗粒以及氧化铝短纤维(包括硅酸铝纤维)增强铝基复合材料 3 种。

碳化硅晶须增强铝基复合材料用于制造导弹平衡翼和制导元件, 航天器的结构零部件和发动机部件、战术坦克履带、汽车零件、如活塞、连杆、汽缸、气门挺杆、推杆、活塞销、凸轮随动机等等。飞机的机身地板和新型战斗机尾翼平衡器, 星光敏感光学系统的反射镜基板, 超轻高性能太空望远镜的管、棒桁架, 微波电话插件, 高尔夫球棒和蹄铁等。

碳化硅颗粒增强铝基复合材料可用来制造卫星及航天用结构材料,如卫星支架、结构连接件、管材,各种型材,导弹翼,遥控飞机翼、制导元件,飞机零部件,如起落架支柱龙骨、纵架管、液压歧管、直升飞机阀零件,金属镜光学系统,如红外探测器、空间激光镜、高速旋转扫描镜等,汽车零部件,如驱动轴、刹车盘、发动机缸套、衬套和活塞、连杆、活塞镶圈,此外还可用来制造微波电路插件、惯性导航系统的精密零件、涡轮增压推进器、电子封装器件、自行车框架接头等。

氧化铝短纤维(包括莫来石纤维和硅酸铝纤维)增强铝基复合材料目前主要用于制造汽车发动机零件、如活塞镶圈等。

总而言之,铝基复合材料各种性能优异,可以用于多种部门,只要价格能够接受,将有广阔的应用前景。

2.2 镁基复合材料的性能和应用

镁基复合材料是继铝基复合材料之后又一具有竞争力的轻金属基复合材料^[3]。其主要特点是密度低,比强度和比刚度高,同时还具有良好的耐磨性、耐高温性、耐冲击性、优良的减震性能及良好的尺寸稳定性和铸造性能等;此外,还具有电磁屏蔽和储氢特性等,是一类优秀的结构和功能材料,也是当今高新技术领域中最有希望采用的复合材料之一;但由于价格昂贵,目前主要应用于航天及航空部门。^[4]

构成镁基复合材料的基体合金主要分为铸造、变形和超轻等系列。铸造系包括 Mg—Al、Mg—Zn、Mg—Al—Zn、Mg—Al—Zr、Mg—Zn—Zr—RE 等,侧重于制造镁基复合材料;变形系包括 Mg—Mn、Mg—Al—Zn、Mg—Zn—Zr、Mg—RE 等,侧重于挤压性能的复合材料应用;Mg—Li 系是目前最轻质的合金系,具有较强的抗高能粒子穿透能力,以及能显著降低构件重量、节约能量和满足某些高性能的要求。增强体可以分为颗粒、晶须、纤维等几种,增强体的选择要从复合材料的应用情况、制备方法以及增强体的成本等诸多方面考虑^[4]。镁基复合材料选择增强体的要求与铝基复合材料大致相同,都要求物理、化学相容性好,润湿性良好,载荷承受能力强,尽量避免增强体与基体合金之间的界面反应等。常用的增中体主要有 C 纤维、Ti 纤维、B 维纤, Al₂O₃ 短纤维, SiC 晶须, B₄C 颗粒、SiC 颗粒和 Al₂O₃ 颗粒等。但镁及镁合金比铝和铝合金化学性质更活泼,所用增强体与铝基复合材料

不尽相同。如 Al₂O₃ 是铝基复合材料常用的增强体,但其与 Mg 会发生 $3Mg + Al_2O_3 \rightarrow 2Al + 3MgO$ 的反应,降低其与基体之间的结合强度^[5];而且常用的 Al₂O₃ 是 Saffil Al₂O₃, 其中含 5% 的 SiO₂, SiO₂ 与 Mg 发生强烈反应: $2Mg + SiO_2 \rightarrow Si + 2MgO$, 余量的 Mg 与反应产物 Si 经反应 $2Mg + Si \rightarrow Mg_2Si$ 产生危害界面结合强度的 Mg₂Si 沉淀^[6,7], 所以镁基复合材料中较少采用 Al₂O₃ 作为增强体。C 纤维高强、低密度的特性使其理应是镁基复合材料最理想的增强体之一。虽然 C 与纯镁不反应,但却与镁合金中的 Al、Li 等反应,可生成 Al₂O₃、Li₂C₂ 化合物,严重损伤碳纤维^[6]。因此,要制造出超轻质的 C_f 增强的镁基复合材料当务之急是研制出有效的碳纤维表面涂层^[7]。在这方面,已有研究者通过真空铸造方法制备出了迥强度 C/ZM5 复合材料, C 纤维表面经 C—Si—O 梯度涂层处理后,在其体积分数为 35 时,复合材料的抗拉强度达到了 1 000 MPa^[8]。研究^[9]发现 B₄C 与纯镁也不反应,但 B₄C 颗粒表面的玻璃态 B₂O₃ 与 Mg 能够发生界面反应: $4Mg(L) + B_2O_3(L) \rightarrow MgB_2(s) + 3MgO(s)$, MgB₂ 的产生使得液态 Mg 对 B₄C 颗粒的润湿性增大,所以这种反应不但降低界面结合强度反而可使复合材料具有优异的力学性能。许多研究者研究了 SiC 与镁基体合金之间的界面反应,在复合材料的制造过程及高温固溶处理(500 , 12 h)中都没有发现任何界面化学反应^[10-12]。

由此可见, SiC 和 B₄C 晶须或颗粒是镁基复合材料合适的增强体。为进一步提高增强体与基体合金的润湿性,增大界面结合强度,保护增强体免受基体合金液侵蚀,有必要寻找合适的增强体涂层,或采用原位反应合成方法产生增强体,这对于特别活泼的 Mg—Li 基复合材料显得尤为迫切^[13]。

但镁基复合材料的复合机理、界面强化机理等基础研究还不够充分;复合材料的制备工艺还有待于改进和完善。增强相和基体的性能还需进一步提高,目前常用的基体合金都存在着某些不足,比如 AZ91D 合金虽然抗拉强度、压铸性能及抗腐蚀性不错,但抗蠕变性能不够理想。AS41B 合金抗蠕变性能不错,但强度、硬度不尽如人意。所以发展新型的具有优良性能的基体合金对复合材料的发展有重要意义。镁材料的腐蚀形象严重,电化学腐蚀及应力腐蚀现象尤为突出,杂质元素、晶粒细化和热处理等对其腐蚀影响规律的研究报道还不够^[14]。

镁基复合材料密度小、比强度和比刚度高，具有良好的尺寸稳定性和优良的铸造性能，正成为现代高新技术领域中最有希望采用的一种复合材料。Gr/Mg 复合材料用于人造卫星抛物面天线骨架，使天线效率提高 539 %^[11]；美国海军卫星上已将镁基复合材料作为支架、轴套、横梁等结构件使用，其综合性能优于铝基复合材料^[15]。此外，这种材料还具有优良的阻尼减震、电磁屏蔽等性能，在汽车制造工业中用作方向盘减震轴、活塞环、支架、变速箱外壳等，通讯电子产品中的手机、便携电脑等也用作外壳材料。而且镁基复合材料具有高储氢容量，氢化动力学性能较好，正逐渐成为非常具有发展前景的储氢材料^[16~18]。

镁基复合材料拥有优异的力学性能和物理性能，已经显示出广阔的应用前景。但其力学性能相对铝基复合材料尚有一定差距，发展方向可能在于选用超细增强相（如亚微米、纳米级增强相）提高复合材料强度的同时细化晶粒、提高塑性等，另外，通过原位反应合成增强相，控制界面反应制备镁基复合材料的方法也是一个值得研究和开发的领域^[13]。此外，在现有的镁基复合材料制备工艺条件下，大范围的应用还远未成为现实，因此在镁基复合材料的制备工艺、回收技术以及材料内部结构性能的各个领域都需要进行更多的原理研究及应用探索。对于空间应用及交通领域来说，都需要发展如高弹性模量、高比强度、高耐磨性能的轻质材料。而且，在未来的几十年中，人类社会的老龄化问题将日益突出，发展各种超轻结构材料对于老年人独立工作及日常生活是十分必要的。镁基复合材料以其固有的优良性能，将会具有更广阔的发展空间，在材料应用领域上发挥出更大的作用。

3 钛合金 钛基复合材料及其性能

钛基复合材料可在比铝、镁基复合材料更高的温度下使用，曾引起了人们很大的注意。钛基复合材料（TMCs）以其高的比强度、比刚度和良好的抗高温、耐腐蚀性能，在航空航天、汽车等领域有着广阔的应用前景，引起了材料研究者的广泛兴趣。国外对钛基复合材料的研究已有近 40 年的历史，发展相当迅速，开发出来的原位合成工艺、纤维涂层等制备技术已经成功用于制备高性能钛基复合材料^[19]。

钛基复合材料分为连续纤维增强（FIMCs）和颗粒（晶须）增强钛基复合材料（PIMCs）两大

表 2 TMCs 主要的基体材料

Tab. 2 Main matrix of TMCs

类型	钛合金	最高使用温度/
	Ti - 15V - 3Cr	
	- 21S	
+	Ti - 6Al - 4V	300
近	Ti6264	450
近	IMI834	600
2	TiAl	700
	TiAl	900

表 3 室温下 TiAl/Mo 和 TiAl/W 复合材料的性能

Tab. 3 Fracture toughness of TiAl/Mo and TiAl/W at room temperature

复合材料	状态	K_{Ic} , MPa \sqrt{m}	
		复合材料	基体
TiAl/Mo	铸态	366.2	338.8
	HIP	500.3	395.8
TiAl/W	铸态	447.3	338.8
	HIP	536.6	395.8

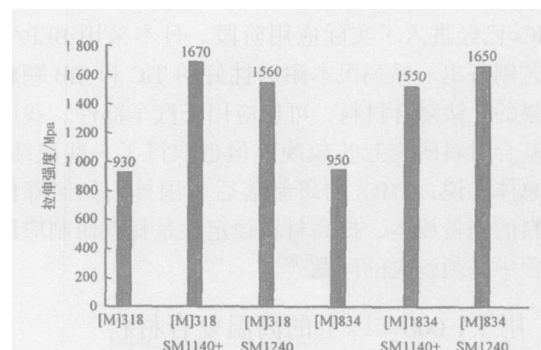


图 1 FFF 法制备的钛基复合材料的拉伸强度

Fig. 1 Tensile strength of TMCs prepared by FFF

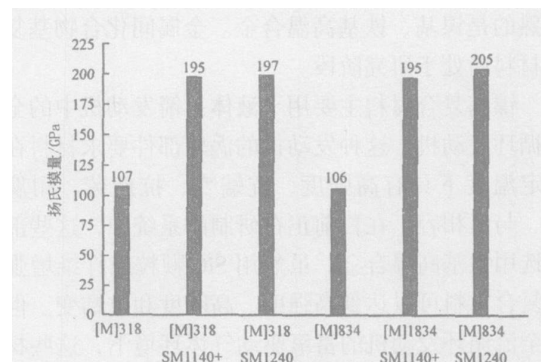


图 2 FFF 法制备的钛基复合材料的杨氏模量

Fig. 2 Young's modulus of TMCs prepared by FFF

类。这两种复合材料都要求基体材料具有较好的力学和加工成形性能。TMCs常用的基体材料见表2^[19]。Ti-6Al-4V合金由于综合性能优良,从而作为TMCs的基体材料得到了广泛应用。基钛合金塑性好,而且具有良好的冷、热加工性能,尤其是Timent 21S可以在700~800℃下完成热等静压,是高温FIMCs理想的基体候选材料^[20]。近钛合金IM834、Ti6242本身就是性能优良的高温结构材料,增强体的加入使复合材料的力学性能明显提高(见图1、图2)^[21],扩大了这类材料的应用范围。TiAl和Ti₃Al的最高使用温度在700℃以上,是极有潜力的高温结构材料。但其室温塑性、韧性低,加工成形性能差,限制了以TiAl和Ti₃Al为基的TMCs的应用。用W、Mo纤维增强的TiAl复合材料,断裂韧性比基体有明显的提高(见表3)^[22],纤维增强可能足发挥该类材料性能的一条有效途径。

钛基复合材料在国外已有许多的实际应用。在美国, IH-PTET计划(大型高性能涡轮发动机技术)的执行,已经开发了大量不同的TMCs部件,如空心翼片、压缩机转子、箱体结构件、连接件以及传动机构等。随着在美国空军F-22中的引入,TMCs已经进入了实际应用阶段。日本采用BEP/M工艺制备出一系列民本耐磨性好的TiC和TiB颗粒增强的钛复合材料,可望应用于汽车部件。我国钛基复合材料研究起步较晚,但也取得了一些成绩。但总体来说,TMCs的研制落后于国外。如何降低材料的制备成本,提高材料稳定性是材料研制应用过程中必须解决的问题^[19]。

4 用于1 000℃以上的高温复合材料

用于1 000℃以上的高温金属基复合材料的基体主要是镍基、铁基耐热合金和金属间化合物,较成熟的是镍基、铁基高温合金。金属间化合物基复合材料尚处于研究阶段。

镍基复合材料主要用于液体火箭发动机中的全流循环发动机。这种发动机的涡轮部件要求材料在一定温度下具有高强度、抗蠕变、抗疲劳、耐腐蚀、与氧相容。在目前正在研制的系统中,这些部件选用镍基高温合金。虽然用SiC颗粒或纤维增强的复合材料可以达到高强度、高刚度和抗蠕变。但在全流循环发动机的富氧驱动气体环境下,这些材料不能兼顾与氧的相容性。发动机起动瞬变过程的热冲击环境,排除了涡轮叶片采用加涂层的材料系的可能。因此,用整体材料制作的涡轮叶片。必须

经受住富氧燃烧产物所形成的环境。因为涡轮部件和涡轮盘在大约9 min运行中一般不用冷却,所以在短时运行中,整体材料温度达到730℃是正常的。对某些设计,希望密度低于6.5 g/cm³的材料,强度要大于1 040 MPa。应力、温度和化学环境都十分苛刻,要延长维修平均间隔时间(MIBR)使这些材料性能目标更难达到。

其它非旋转部件也必须经受住极端运行环境的考验。喷注器面板、喷注壳体 and 预燃烧器在高温下都必须抗氧化、耐腐蚀、抗氢脆。喷嘴调节和控制流入主燃烧室的推进剂流量。预燃烧室是个小型燃烧室。在这个燃烧室里,产生涡轮驱动体。在目前一些系统(其中一些被有效冷却)中,这些部件使用钴合金。未来发动机的这些部件,预计有极端的热环境(气体温度接近918℃)和高达62 MPa的压力。Si₃N₄整体材料正在用作喷嘴壳体,但陶瓷壳体与金属推力室的匹配困难还没有解决。由于喷嘴壳体的形状是轴对称的。所以早就有人建议这种壳体采用连续纤维增强的复合材料,但部件的匹配条件向连续纤维增强的复合材料提出挑战。目前正在做资金筹集工作,来改进整体镍基高温合金与氧的相容性,并提高其强度。一种应力-氧化响应特性已做了论证。镍基复合材料很有希望用于制造火箭发动机部件。但材料加工和设计技术对部件的演试还远未成熟。在这一领域的材料及加工工艺的开发工作,目前正在制定计划,计划在二、三年内筹集到研究资金。

耐高温金属基复合材料的使用温度通常都在1 000℃以上,除了对材料要求具有好的高温持久强度和模量外,韧性和导热性能都应优异。高熔点金属(合金)丝增强镍基和铁基高温合金是此类复合材料的主要品种,用来制造飞机和火箭发动机的零部件、涡轮机叶片、压力容器,飞机的简单受载的梁等。镍基高温合金是广泛使用于各种燃气轮机的重要材料。用钨丝、钼钨丝增强镍基合金可以大幅度提高其高温性能—高温持久性能和高温蠕变性能,一般可以提高100 h持久强度1~3倍,主要用于高性能航空发动机叶片等重要部件^[23]。

5 结 语

与传统的单一的金属、陶瓷、高分子等工程材料相比,金属基复合材料出除了具有优异的力学性能外,更具有某些特殊性能和良好的综合性能,并

(下转第73页)

“害人水”了。

5 结 语

我们应当承认这个现实，国际上人的饮用水主流是自来水，将来也还是自来水。解决中国居民饮用水的根本出路在于培育人的意识，加强水源的保护和污染根治，加强自来水水厂的技术改造和科学管理，改善输配管风系统，及时管理清洗中间水箱，减少并根除自来水的二次污染，使居民饮用的从水龙头出来的水，水质达到“合格水”、“优质

水”，达到国际水质先进水平，达到人体健康所需要的标准。而纯净水作为自来水的补充，在一些特殊场合适当饮用，也有其合理的一面。

参考文献：

- [1] 李 田, 刘遂庆. 分质供水解决城市饮用水水质问题的局限与作用探讨 [J]. 给水排水, 1999, 25 (2): 4-8.
- [2] 何京生. 纯水、超纯水与饮用纯净水 [J]. 四川地质学报, 1999, 19 (3): 233-240.
- [3] 魏 群, 邹艳梅. 城市节水工程 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2006.

(上接第 58 页)

且应用范围也是越来越广泛。我们主要介绍了轻金属合金—铝基、镁基复合材料的性能及应用，并简要介绍了钛基复合材料以及（高温合金）镍基、铁基复合材料等的性能及应用。可以看出，金属基复合材料一开始因价格比较昂贵，首先应用于航空、航天和军事领域。而随着新的材料制备技术的研制成功和廉价增强物的不断出现，金属基复合材料正越来越多地应用于汽车、机械、冶金、建材、电力等民用领域。显示出广阔的应用前景和巨大的经济效益和社会效益。我们相信随着科学技术的不断发展以及相关领域研究工作的不断深入，金属基复合材料其理论基础和制备技术将会有更大的突破，在各方面将有越来越广阔的应用前景。

参考文献：

- [1] 张国定, 赵昌正. 金属基复合材料 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.
- [2] 闻荻江. 复合材料原理 [M]. 湖北: 武汉工业大学出版社, 1998.
- [3] Lloyd DJ. Particle reinforced aluminum and magnesium matrix composites [J]. Inter Mater Rev, 1994, 39 (1): 1-45.
- [4] 董 群, 陈礼清, 赵明久, 毕 敬. 镁基复合材料制备技术、性能及应用发展情况 [J]. 材料导报, 2004, 4 (18): 84-87.
- [5] Z. M. El-Baradie. Structure and properties of magnesium-zinc composite alloys thermomechanically treated [J]. Materials Letters, 2003, 57 (21): 3269-3275.
- [6] Zhi Cheng Li, Hong Zhang, Lu Liu and Yong Bo Xu. Growth and morphology of β phase in an Mg-Y-Nd alloy [J]. Materials Letters, 2004, 58 (24): 3012-3024.
- [7] Badini C etc. Interfacial reaction in AZ61/AZ91/PI00/Mg/graphite composite: an Auger spectroscopy investigation [J]. Materials Letters, 1994, 21 (1): 55-61.
- [8] 张 坤, 李华伦, 等. 真空铸造高强度 C/Mg 复合材料 [J]. 复合材料学报, 1996, 13 (3): 43.
- [9] 吴桢干, 顾明员, 等. B4Cp+SiCw/Mb15Mg 基复合材料界面微

结构 [J]. 金属学报, 1998 (40): 605.

- [10] M. Rao and W. A Soffa. The deformation behavior of the L1. Ordered FePd alloy [J]. Scripta aaterialia. 1997, 36 (6): 735-740.
- [11] H. Y. Chu, F. R. Chen and, T. B Wu. Compositional evolution in aging duplex Fe-Mn-Al-C alloy [J]. Materials Letters, 1997, 30 (5-6): 369-375.
- [12] C. Badini, M. Ferraris and F. Marchetti. Interfacial reaction in AZ61/AZ91/PI00Mg/graphite composite an Auger spectroscopy investigation [J]. Material Letters, 1994, 21 (1): 55-61.
- [13] 李荣华, 黄继华, 殷 声. 镁基复合材料研究现状及展望 [J]. 材料导报, 2002, 8 (16): 17-18.
- [14] 陈 晓, 傅高升, 钱匡武. 镁基复合材料的研究现状和发展趋势 [J]. 材料导报, 2001, 6 (12): 47-49.
- [15] 兰永德, 等. 国外镁合金复合材料的研究与应用 [J]. 江苏冶金, 1995 (4): 57-58.
- [16] Chiaki Iwakura, Shinji Nohara, Shu Guo Zhang and Hiroshi Inoue. Hydriding and dehydriding characteristics of an amorphous Mg₂Ni-Ni composite [J]. Journal Alloys and Compounds, 1998, 285, (1-2): 246-249.
- [17] Karl J. Goss, Daniel Chartouni, Eric Leroy, Andreas Züfel and Louis Schlapbach. Mechanically milled Mg composites for hydrogen storage: the relationship between morphology and kinetics [J]. Journal Alloys and Compounds, 1998, 269 (1-2): 259-270.
- [18] M. Khruassanova, J. -L. Bobet, M. Terzieva, B. Chevalier, D. Radev, P. Peshev and B. Darriet. Hydrogen storage characteristics of magnesium mechanically alloyed with YNi_{5-x}Al_x (x=0, 1 and 3) intermetallics [J]. Journal Alloys and Compounds, 2000, 307 (1-2): 283-289.
- [19] 袁武华, 张召春, 杨寿智, 等. 钛基复合材料及其制备技术研究进展 [J]. 材料导报, 2005, 4 (19): 54-57.
- [20] 罗国珍. 钛基复合材料的研究与进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 1997, 26 (2): 1-5.
- [21] Thomas M P, Winstone M R. Longitudinal yielding behavior of SiC-fibrie-Reinforced titanium-matrix composites [J]. Comp Sic Techn, 1999, (59): 297-299.
- [22] 王文生, 阎蕴琪, 李中奎. 纤维增强 TiAl 基复合材料的研究 [J]. 钛工业进展, 2003, (2): 5-7.
- [23] 曾立英, 孙洪志. 镍基复合材料及其它基体的复合材料的应用 [J]. 稀有金属快报, 2001, (11): 12-15.