

三维网络 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料制备及阻尼性能

肖 易, 肖华强, 何佳容, 冯进宇, 游川川, 赵鑫鑫

Preparation and damping capacity of three-dimensional network $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ matrix composites

XIAO Yi, XIAO Huaqiang, HE Jiarong, FENG Jinyu, YOU Chuanchuan, and ZHAO Xinxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2020120017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Cr_2AlC 含量对铜基复合材料摩擦磨损性能的影响

Effects of Cr_2AlC content on friction and wear properties of copper matrix composites

粉末冶金技术. 2019, 37(3): 184-190

高强AZ61Mg18%Ti复合材料的制备及力学性能

Fabrication and mechanical properties of high-strength AZ61Mg18%Ti composites

粉末冶金技术. 2021, 39(6): 532-536

含Cr和 NbSe_2 铜基电接触复合材料的制备及性能研究

Preparation and properties research of Cu-based electrical contact composites containing Cr and NbSe_2

粉末冶金技术. 2020, 38(6): 455-464

镀钨碳纳米管增强镁基复合材料的摩擦磨损性能研究

Friction and wear properties of magnesium matrix composites reinforced by tungsten-coated carbon nanotubes

粉末冶金技术. 2018, 36(6): 423-428

粉末冶金法制备颗粒增强钛基复合材料的研究进展

Research progress on particle-reinforced titanium matrix composites prepared by powder metallurgy method

粉末冶金技术. 2020, 38(2): 150-158

陶瓷颗粒增强粉末冶金Fe-2Cu-0.6C复合材料的微观结构和力学性能

Microstructure and mechanical properties of ceramic particle-reinforced powder metallurgy Fe-2Cu-0.6C composites

粉末冶金技术. 2019, 37(1): 11-17, 22



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

三维网络 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料制备及阻尼性能

肖 易, 肖华强[✉], 何佳容, 冯进宇, 游川川, 赵鑫鑫

贵州大学机械工程学院, 贵阳 550025

✉通信作者, E-mail: xhq-314@163.com

摘 要 采用前驱体法制备 Ti_2AlC 多孔陶瓷预制体, 通过辅助压力浸渗工艺制备出组织致密的三维网络相互贯通的 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料。利用扫描电镜和 X 射线衍射仪分析复合材料的微观组织和物相组成, 使用机械振动分析仪测试复合材料阻尼性能。结果表明, 复合材料具有宏观上及微观上双尺度的三维网络结构。恒定温度条件下, 复合材料在 1 Hz 和 10 Hz 测试条件下的最高损耗正切值分别为 0.13 和 0.15, 相比于基体 AZ91D 镁合金分别提高了约 30% 和 67%, 其阻尼表现增强。恒定应变条件下, 在最高测试温度时, 复合材料出现最大损耗正切值。两种测试条件下, 复合材料存储模量均高于基体 AZ91D 镁合金。从内耗值-存储模量二者平衡的角度来看, 复合材料不仅具有更宽的应用温度范围, 也具有更好的阻尼-强度平衡性。

关键词 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料; 前驱体法; 三维网络结构; 阻尼性能

分类号 TB333

Preparation and damping capacity of three-dimensional network $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ matrix composites

XIAO Yi, XIAO Huaqiang[✉], HE Jiarong, FENG Jinyu, YOU Chuanchuan, ZHAO Xinxin

School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

✉Corresponding author, E-mail: xhq-314@163.com

ABSTRACT The Ti_2AlC porous ceramic preforms were prepared by precursor method in this paper, and the $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ matrix composites with the dense three-dimensional network structure were prepared by auxiliary pressure infiltration process. The microstructure and phase composition of the composites were investigated by scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffractometer (XRD), and the damping performance of the composites was tested by vibration analyzer. The results show that, the composites have the two-scale three-dimensional network structure at the macro and micro levels. At the constant temperature, the maximum loss tangent values of the composites are 0.13 and 0.15 at 1 Hz and 10 Hz, respectively, increasing by about 30% and 67% compared with AZ91D, the damping performance is enhanced. Under the constant strain, the composites have the maximum loss tangent value at the highest test temperature. In the two test conditions, both of the storage modulus is higher than that of AZ91D. From the view of the balance between internal friction and storage modulus, the composites not only have the wider application temperature range, but also have the better damping-strength balance.

KEY WORDS $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ matrix composites; precursor method; three-dimensional network structure; damping properties

收稿日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51605106)

DOI: [10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2020120017](https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2020120017); <http://pmt.ustb.edu.cn>

在航天航空、汽车、民用空调等领域需要更好地控制振动和噪声,高阻尼材料成为研究热点^[1]。镁合金因其具有优良的阻尼性能和低密度备受关注,其中纯镁的阻尼衰减系数是铸铁的 5 倍,是铝合金的 12 倍^[2]。但是镁合金的室温阻尼机制主要是位错型阻尼,很难同时满足高强度和高阻尼的性能要求^[3-4],因此开发高强度、高阻尼结构功能一体化镁基材料成为重要研究方向。

通过向镁合金中加入增强相,引入新的阻尼增强机制来提高材料的阻尼性能成为研究热点^[5-6]。李凡国等^[7]和刘恩洋等^[8]将煤灰漂珠颗粒加入到 AZ91D 镁合金中制备漂珠/AZ91D 复合材料,复合材料的阻尼性能均优于基体。阮爱杰等^[9]在纯镁中添加 SiC 颗粒,发现 SiC 颗粒的加入显著提高了纯镁基复合材料的力学性能和阻尼性能。王勇等^[10]研究了不同含量 AlN 颗粒增强 Mg-9Al 基复合材料的阻尼性能,发现 AlN 也能提高镁基复合材料的阻尼性能,复合材料的阻尼-温度谱上出现了两个阻尼峰,分别由位错运动和界面滑动造成的。姚彦桃等^[11]也发现了类似的阻尼增强机制。Wu 等^[12-14]利用搅拌铸造法制备了不同含量石墨颗粒增强的镁基复合材料,也发现了类似的阻尼现象,复合材料的阻尼-温度谱上也出现了两个阻尼峰,前一个是由于边界滑动引起的,后者是由于再结晶造成的。近年来发展起来的三元 MAX 相因其独特的纳米层状结构而兼具金属及陶瓷的特性,并具有很好的阻尼性能,有望成为高性能阻尼金属结构材料的理想增强相。Barsoum 团队系统研究了 Ti_2AlC 的弯折非线性弹性变形机制,进一步验证了其建立的微尺度初始弯折带模型在预测 Ti_2AlC 及 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料体系中应力-非线性弹性应变-内耗三者关系的准确性^[15-18]。基于此,该团队认为 Ti_2AlC 相的一个潜在应用是可作为镁合金的增强相,并制备出了 Ti_2AlC 增强的镁基复合材料,验证了复合材料具有很好的力学性能和阻尼性能。陈禹伽^[19]通过熔融浸渗制备出具有双尺度互贯通结构的 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料,复合材料在 300 °C 以下兼具较好的存储模量及内耗值。

本文采用前驱体法制备双尺度三维网络 Ti_2AlC 多孔陶瓷预制体,并采用辅助压力熔体浸渗法将镁锭熔融浸渗到所制成的预制体中制备成复合材料,研究并分析了复合材料的物相组成、微观组织及阻尼性能,为高性能阻尼镁基复合材料的制备提供参考。

1 实验材料及方法

选用 Ti_2AlC 粉末、Ti 粉末为原材料,并与其他辅助材料配合使用,原料基本物性见表 1。基体材料为 AZ91D 镁合金,泡沫块像素密度为 6 ppi,尺寸为 60 mm×40 mm×15 mm,各种粉末的用量见表 2。将称量后的 Ti_2AlC 、Ti、羧甲基纤维素(carboxymethocel, CMC)、碱性硅溶胶、聚丙烯酰胺及水置于行星球磨机中充分混合,制成陶瓷浆料。将准备好的泡沫块充分浸入到陶瓷浆料中,保证足够的浆料涂附到泡沫前驱体上,并进行干燥。将干燥后的泡沫前驱体置于 ZT-40-20 型真空热压炉中进行 1400 °C 保温 0.5 h 无压烧结,烧结气氛为氩气。为防止泡沫胚体坍塌,烧结温度在 200~400 °C 时,升温速率为 2 °C·min⁻¹^[20]。最后,将三维网络 Ti_2AlC 多孔陶瓷预制体与 AZ91D 镁合金放入特制的石墨模具中,在 ZT-40-20 型真空热压炉中进行 0.68T 辅助压强烧结,烧结温度 750 °C,保温时间 0.5 h。

表 1 原料粉末基本物性

材料	质量分数 / %	粒径 / μm	生产厂家
Ti_2AlC	90%	2~75	北京福斯曼科技有限公司
Ti	99%	2~75	北京福斯曼科技有限公司

表 2 实验粉末的用量(质量分数)

Ti_2AlC 粉	Ti 粉	碱性硅溶胶 (陶瓷粉末)	羧甲基纤维素 (陶瓷粉末)	聚丙烯酰胺 (陶瓷粉末)	%
90.0	10.0	2.0	2.0	1.2	

利用 QUANTU250FEG 型场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察三维网络 Ti_2AlC 多孔陶瓷与复合材料的显微组织。采用 XD-3 型 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)分析复合材料的物相组成。使用 DMA-Q800 型机械振动分析仪测试复合材料与基体的阻尼性能,采用单悬臂梁模式连续升温多频扫描及连续增加应变等方式,测量镁合金基体与复合材料的阻尼-温度谱及阻尼-应变谱,试样尺寸为 35 mm×5 mm×1 mm。阻尼-温度谱测试条件为应变恒定,测试温度 25~300 °C,升温速率 5 °C/min,测试频率分别为 1 Hz 和 10 Hz。阻尼-应变谱测试条件为应变振幅 0~0.12%,测试频率分别为 1 Hz 和 10 Hz。

2 结果与讨论

2.1 Ti_2AlC 多孔陶瓷预制体组织结构

图1为流动氩气保护环境下无压烧结的 Ti_2AlC 多孔陶瓷宏观结构。从图中可以明显看出，泡沫骨架并未出现坍塌，连接完好，整体结构清晰，形成了三维网络多孔结构陶瓷预制体。这种完整性好、结构清晰且具有相当大孔洞结构的预制体为制备镁基复合材料提供了良好的三维网络贯通结构基础，同时为浸渗镁合金提供了良好的浸渗环境。

图2为流动氩气保护环境下无压烧结的 Ti_2AlC

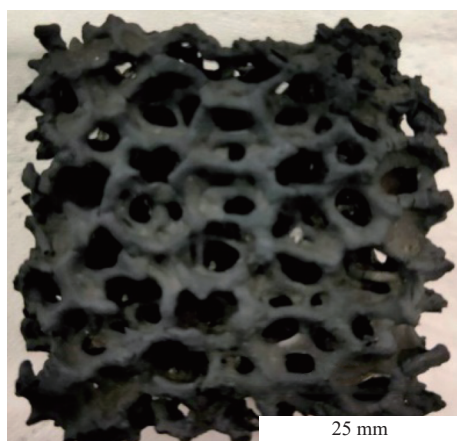


图1 多孔陶瓷预制体的宏观结构

Fig.1 Macrostructure of the porous ceramic preform

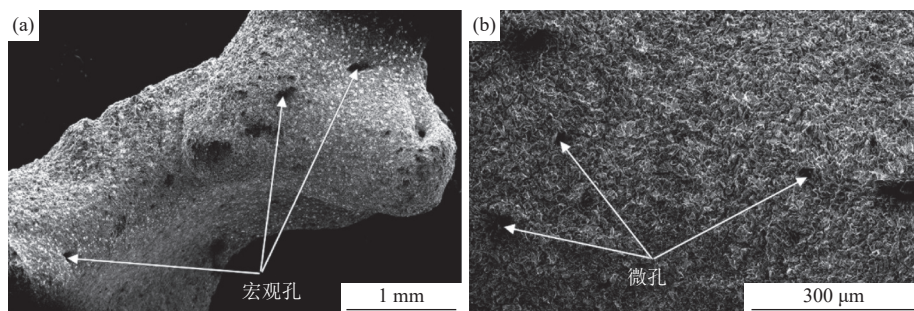


图2 Ti_2AlC 多孔陶瓷预制体骨架微观结构：(a) 低倍区；(b) 高倍区

Fig.2 Microstructures of the Ti_2AlC porous ceramic preform skeletons: (a) low magnification; (b) high magnification

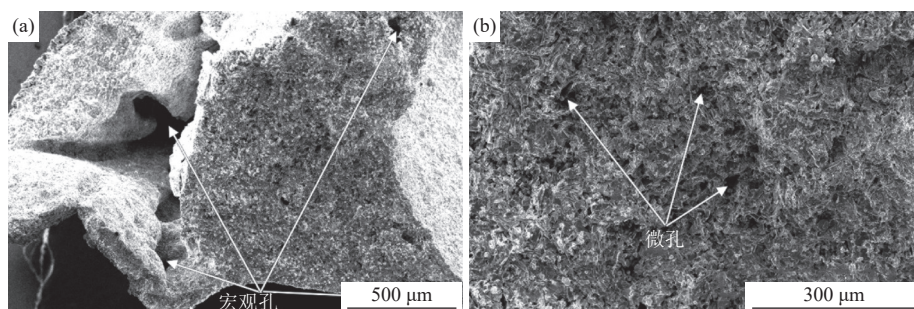


图3 Ti_2AlC 多孔陶瓷预制体骨架断口显微形貌：(a) 低倍；(b) 高倍

Fig.3 Fracture microstructures of the Ti_2AlC porous ceramic preform skeletons: (a) low magnification; (b) high magnification

多孔陶瓷预制体骨架显微形貌。从图2(a)中可以看到，陶瓷浆料涂附在三维网络泡沫块筋状结构上，烧结后粘结在一起，形成多孔陶瓷预制体骨架结构。结合图2(a)和图2(b)可知，陶瓷骨架表面存在大、小不同的孔洞缺陷，这类缺陷为后面AZ91D镁合金从陶瓷骨架与镁合金结合界面处浸入陶瓷预制体提供通道，从而形成微观上的三维网络互锁结构。

图3为多孔陶瓷预制体骨架断口显微形貌。从图3(a)中可看出，骨架内部存在较大的宏观孔洞，这与泡沫骨架的筋状结构分解有关，是由聚氨酯泡沫在高温下分解形成的。结合图2(a)可知，这类孔洞结构是开孔的，贯穿于整个骨架内部。从图3(b)中可看出，骨架内部还存在微观上的孔洞，微观孔隙分布较为均匀，这类微观孔隙与制备浆料的辅助材料碱性硅溶胶等在高温下发生分解有关。这表明， Ti_2AlC 陶瓷预制体在宏观上及微观上存在孔洞结构。

2.2 三维网络 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料组织结构

图4为以辅助压力浸渗方法制备的三维网络 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料X射线衍射图谱。由衍射图谱可知，复合材料的物相成分主要为Mg、 Ti_2AlC 、TiC及 Al_2O_3 。由于Mg衍射峰强度最强，可知镁合金为基体相，其次是 Ti_2AlC 作为增强相加入到

基体中, 而 TiC 和 Al_2O_3 则以中间产物或杂质形式少量或微量存在。 TiC 的形成可能与烧结助剂 Ti 有关, 前躯体泡沫烧结后残留下的 C 杂质与烧结助剂 Ti 反应生成 TiC 。 Al_2O_3 可能是由烧结过程中杂质引起的。

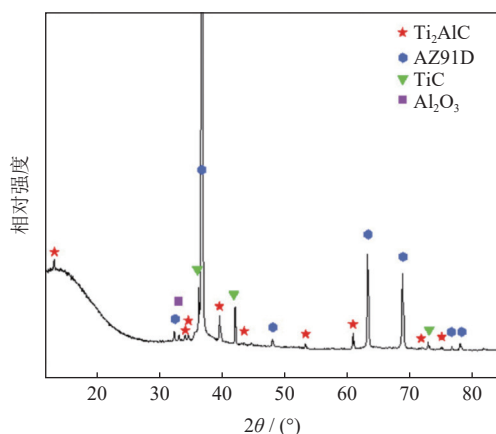


图 4 三维网络 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料 X 射线衍射图谱

Fig.4 XRD patterns of the three-dimensional network $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ matrix composites

图 5 为辅助压力浸渗方法制备的复合材料宏观形貌。由图可知, 复合材料主要由银白色的基体相与黑色网状骨架形式的增强相组成, 结合前面的 X 射线衍射分析可知, 银白色的基体相为 AZ91D 镁合金, 黑色网状骨架形式的增强相为 Ti_2AlC 金属陶瓷, 且三维网络骨架形式的 Ti_2AlC 金属陶瓷

与基体镁合金结合平滑、自然, 没有出现裂纹、团聚等缺陷产生。MAX 相 Ti_2AlC 金属陶瓷网状结构比较均匀地分布在基体 AZ91D 镁合金中, 这说明基体镁合金熔融浸渗入多孔陶瓷预制体中, 并形成具有宏观三维网络结构陶瓷增强的复合材料。图 6 为辅助压力浸渗方法制备的 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{AZ91D}$ 复合材料的背散射电子显微形貌。结合图 6 可知, 基体 AZ91D 镁合金能够润湿 Ti_2AlC 陶瓷, 形成了两相相互贯通的宏观三维网络结构, 这种特殊结构能高效发挥增强相与基体的性能优势, 从而得到性能优异的复合材料。



图 5 压力浸渗所得试样宏观形貌

Fig.5 Macro morphology of the samples by pressure infiltration

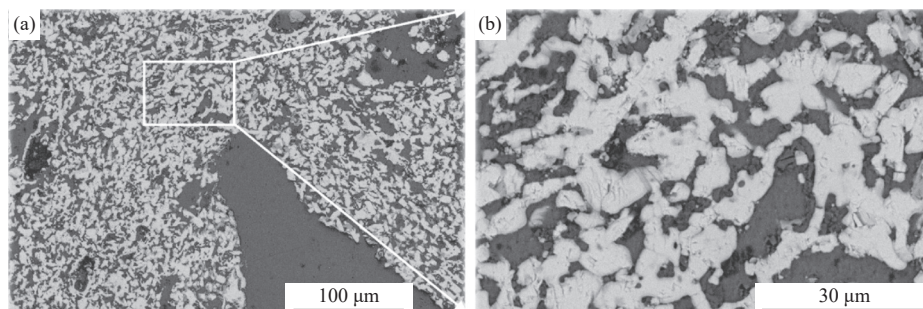


图 6 压力浸渗方法制备 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{AZ91D}$ 复合材料陶瓷与基体结合区背散射电子显微形貌: (a) 低倍; (b) 高倍

Fig.6 Backscattered electron images of the $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{AZ91D}$ composites at the ceramic and matrix bonding prepared by pressure infiltration method: (a) low magnification; (b) high magnification

从图 6 (a) 可看出, 复合材料的微观组织均匀且致密, 其中灰白色的相成分为 Ti_2AlC , 围绕 Ti_2AlC 周围的黑色相成分为基体 AZ91D 镁合金, 基体相对比较完整, 且 Ti_2AlC 陶瓷骨架与基体 AZ91D 镁合金的结合平滑、无裂纹。从图 6 (b) 可看出,

基体 AZ91D 镁合金从界面结合处渗入到陶瓷骨架空隙中, 且较为均匀地分布在陶瓷骨架内部。这证明镁合金成功渗入到陶瓷预制体骨架中。从图中还可看出, 镁合金渗入到陶瓷骨架中与 Ti_2AlC 陶瓷在微观上相互融合连接, 呈现微观上的三维网络空

间结构特征。这种增强相与基体相互贯通的三维网络特殊结构可以协同增强两相的力学性能和阻尼性能。

2.3 复合材料阻尼性能

图7是1 Hz、10 Hz两种振动频率下,基体AZ91D镁合金与复合材料的阻尼应变谱曲线。从图7(a)和图7(b)可看出,在1 Hz和10 Hz测试频率下,复合材料的存储模量均优于基体AZ91D镁合金,相比于1 Hz,10 Hz振动频率下的存储模量差值更大。由图7(a)可看出,在1 Hz频率下,随着应变增加,在应变达到0.02%之前,基体AZ91D镁合金的损耗正切值均大于前躯体法所制备的复合材料,其损耗正切值增长最快,基体AZ91D镁合

金的阻尼表现较好;当应变超过0.02%时,基体AZ91D镁合金的损耗正切值增长变慢,而前躯体法所制备的复合材料在应变超过0.02%后,其损耗正切值开始高于基体AZ91D镁合金,直到应变达到0.12%时,出现最大的损耗正切值,约为0.13,阻尼表现优异。结合图7(b)可知,从损耗正切值的变化趋势来看,10 Hz与1 Hz呈现相似的变化趋势,即在应变较低时,基体AZ91D镁合金的损耗正切值大于前躯体法所制备的复合材料,当超过某一应变值时,前躯体法制备的复合材料阻尼性能开始优于基体AZ91D镁合金,且增加振动频率后,这个应变值提前了,当应变达到0.12%时,前躯体法所制备的复合材料损耗正切值达到最大值0.15。

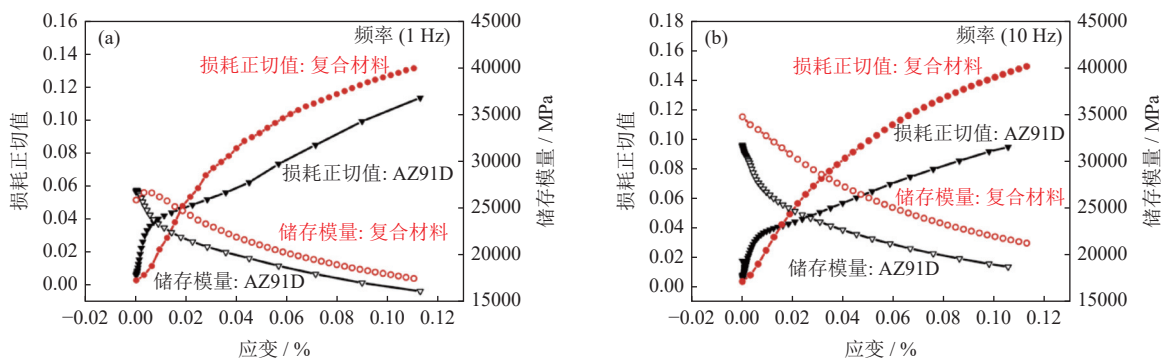


图7 AZ91D和 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料阻尼-应变谱曲线:(a) 1 Hz;(b) 10 Hz

Fig.7 Damping-strain spectrum curves of AZ91D and $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ matrix composites: (a) 1 Hz; (b) 10 Hz

由上可知,在1 Hz与10 Hz测试频率下,复合材料的存储模量均优于基体AZ91D镁合金。同时,三维网络增强结构 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料的最高损耗正切值在1 Hz和10 Hz测试条件下分别为0.13和0.15,相比于基体AZ91D镁合金分别提高了约30%和67%,表明增强相 Ti_2AlC 的加入增强了其阻尼表现,这与复合材料的双尺度三维网络增

强结构在结构上实现了结构阻尼增强有关。从阻尼产生机制而言,呈现三维网络的陶瓷骨架与基体镁合金产生了微观与宏观上的互锁效应,能够协调载荷传递,同时引入大量界面,提供了新的界面阻尼产生机制,极大的提高了复合材料的阻尼本领。

图8为基体AZ91D镁合金与复合材料的阻尼-温度谱曲线。从图8(a)中可看出,不同频率下

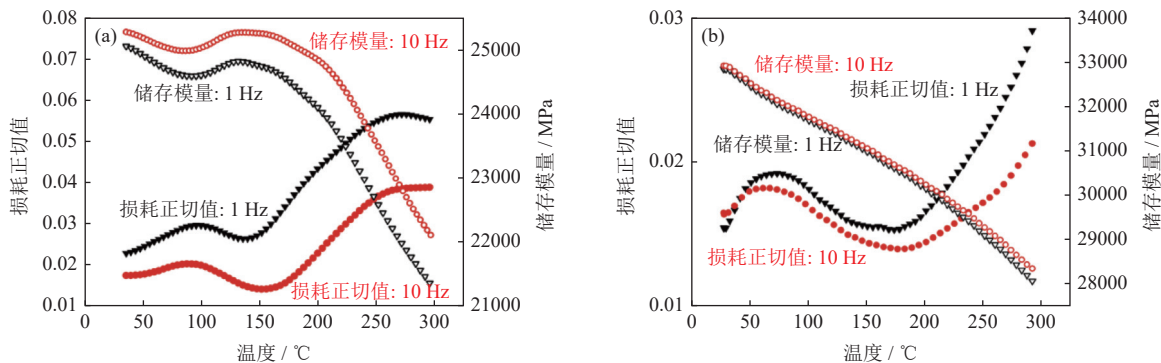


图8 AZ91D (a) 和 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料 (b) 阻尼-温度谱曲线

Fig.8 Damping-temperature spectrum curves of AZ91D (a) and $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ matrix composites (b)

材料的存储模量及损耗正切值曲线变化趋势一致,但振动频率为 10 Hz 的存储模量均高于频率 1 Hz 的,基体 AZ91D 镁合金的存储模量在 21~25 GPa 之间,而损耗正切值与存储模量相反,振动频率为 1 Hz 时,其损耗正切值较高,这符合镁合金的位错阻尼机制,即 1 Hz 下的阻尼高于 10 Hz 下的阻尼。从图中还发现,基体 AZ91D 镁合金的阻尼随温度呈现三段式上升-下降-上升的变化。在低温阶段,基体 AZ91D 镁合金的阻尼随温度升高逐渐增加,达到一定的峰值后,在中温阶段开始逐渐下降,随后在高温阶段急剧上升,在 290 °C 左右,出现最大阻尼平衡峰,高频 10 Hz 约为 0.039,低频 1 Hz 约为 0.057。存储模量也表现出相似但不同的三段式变化,其最明显之处为,在 150 °C 以后,存储模量开始急剧下降,说明材料发生了明显的软化,这也从侧面说明了其使用温度一般应低于 150 °C。

图 8 (b) 为复合材料的阻尼-温度谱曲线。由图可知,复合材料的阻尼随温度的变化趋势类似于基体 AZ91D 镁合金的三段式变化,但其在低温阶段及高温阶段的生长速率高于基体 AZ91D 镁合金,且在最高测试温度时,出现最大的损耗正切值,高频 10 Hz 约为 0.021,低频 1 Hz 约为 0.030。存储模量则与基体 AZ91D 镁合金完全不同,呈现出较为均匀的陡坡式下降,但其存储模量较高,在 28~33 GPa 之间;即使在 300 °C 条件下,复合材料的存储模量仍有 28 GPa,远高于常温下基体 AZ91D 镁合金的存储模量。从图中还可以看出,增加振动频率不会增加复合材料的存储模量,说明振动频率对复合材料的存储模量影响较小甚至没有影响。

由上可知,尽管 AZ91D 镁合金具有更好的损耗正切值,但其存储模量较低,特别是在高于 150 °C 后,其存储模量急剧下降,说明材料的高温性质不太稳定,而 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 复合材料的损耗正切值相对较小,但在总体的测试温度区间,复合材料的存储模量下降较为均匀,说明复合材料的性质较为稳定,且在 300 °C 条件下,复合材料的存储模量仍有 28 GPa,远高于常温下 AZ91D 镁合金的存储模量。因此,从内耗值-存储模量值两者平衡角度来看,复合材料不仅具有更宽的应用温度范围,同时也具有更好的阻尼-强度平衡性。

3 结论

(1) 采用前躯体法成功制备了三维网络 Ti_2AlC

多孔陶瓷预制体,为制备镁合金复合材料提供了良好的三维网络贯通结构和浸渗环境。采用辅助压力浸渗方法成功制备了 Ti_2AlC 金属陶瓷增强镁基复合材料,实现了宏观上及微观上双尺度的三维网络贯通结构。

(2) 在恒定温度条件下,复合材料的最高损耗正切值在 1 Hz 和 10 Hz 测试条件下分别为 0.13 和 0.15,相比于基体 AZ91D 镁合金分别提高了约 30% 和 67%,其阻尼表现增强,这与复合材料的双尺度三维网络增强结构在结构上实现了结构阻尼增强有关。在恒定应变条件下,最高测试温度时,复合材料出现最大的损耗正切值。

(3) 恒定温度和恒定应变测试条件下,复合材料的存储模量均大于基体 AZ91D 镁合金,这与 Ti_2AlC 多孔陶瓷预制体作为复合材料的骨架有关。从内耗值-储能模量二者平衡的角度来看,复合材料不仅具有更宽的应用温度范围,同时也具有更好的阻尼-强度平衡性。

参考文献

- [1] Feng Y, Chen C, Peng C Q, et al. Research progress on magnesium matrix composites. *Chin J Nonferrous Met*, 2017, 27(12): 2385 (冯艳, 陈超, 彭超群, 等. 镁基复合材料的研究进展. 中国有色金属学报, 2017, 27(12): 2385)
- [2] Zhang S W. Research and application summary of damping magnesium alloys. *Met World*, 2019(4): 5 (张士卫. 阻尼镁合金的研究与应用综述. 金属世界, 2019(4): 5)
- [3] Amadori S, Catania G. An effective coating material solution and modeling technique for damping oriented design of thin walled mechanical components. *Compos Struct*, 2018, 191(5): 251
- [4] Wan D Q, Hu Y L, Ye S T, et al. Effect of alloying elements on magnesium alloy damping capacities at room temperature. *Int J Miner Metall Mater*, 2019, 26(6): 760
- [5] Wan D Q, Hu Y L, Ye S T, et al. Research status and prospects of high damping magnesium matrix materials. *Funct Mater*, 2018, 49(5): 5035 (万迪庆, 胡莹琳, 叶舒婷, 等. 镁基高阻尼材料加工工艺研究现状及展望. 功能材料, 2018, 49(5): 5035)
- [6] Xiao H Q, Chen Y J, Zhao H, et al. Research progress in magnesium matrix damping composites. *Spec Cast Nonferrous Alloys*, 2018, 38(4): 382 (肖华强, 陈禹伽, 赵辉, 等. 镁基阻尼复合材料的研究进展. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(4): 382)
- [7] Li F G, Yu S R, Yuan M. Damping capacity of $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{AZ91D}$ composites. *Acta Mater Compos Sin*, 2017, 34(9): 1997 (李凡国, 于思荣, 袁明. $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{AZ91D}$ 复合材料阻尼性能. 复合材料学报, 2017, 34(9): 1997)
- [8] Liu E Y, Yu S R, Zhao Y, et al. Microstructure and properties of fly ash cenosphere/AZ91D composites. *Rare Met Mater Eng*, 2017, 46(11): 3298 (刘恩洋, 于思荣, 赵严, 等. 漂珠/AZ91D 复合材料微观组织与性能. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(11): 3298)

(下转第 384 页)

- influence on the microstructure and properties of supersonic-atmospheric-plasma-sprayed nanostructured thermal barrier coatings. *J Alloys Compd*, 2015, 644: 873
- [10] Bai Y, Zhao L, Wang Y, et al. Fragmentation of in-flight particles and its influence on the microstructure and mechanical property of YSZ coating deposited by supersonic atmospheric plasma spraying. *J Alloys Compd*, 2015, 632: 794
- [11] Shaw L L. Thermal residual stresses in plates and coatings composed of multi-layered and functionally graded materials. *Composites Part B*, 1998, 29(3): 199
- [12] Yang Y Z, Liu Z G, Liu Z Y, et al. Interfacial phenomena in the plasma spraying Al_2O_3 -13wt.% TiO_2 ceramic coating. *Thin Solid Films*, 2001, 388(1-2): 208
- [13] Wang Y, Tian W, Yang Y, et al. Investigation of stress field and failure mode of plasma sprayed Al_2O_3 -13% TiO_2 coatings under thermal shock. *Mater Sci Eng A*, 2009, 516: 103
- [14] Irisawa T, Matsumoto H. Thermal shock resistance and adhesion strength of plasma-sprayed alumina coating on cast iron. *Thin Solid Films*, 2006, 509(1-2): 141
- [15] Jordan E H, Gell M, Sohn Y H, et al. Fabrication and evaluation of plasma sprayed nanostructured alumina-titania coatings with superior properties. *Mater Sci Eng A*, 2001, 301(1): 80
- [16] Lu X C, Yan D R, Yang Y, et al. Phase evolution of plasma sprayed Al_2O_3 -13% TiO_2 coatings derived from nanocrystalline powders. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2013, 23(10): 2951
- [17] Sivakumar G, Dusane R O, Joshi S V. A novel approach to process phase pure α - Al_2O_3 coatings by solution precursor plasma spraying. *J Eur Ceram Soc*, 2013, 33(13-14): 2823
- [18] Lang F, Yu Z, Gedevanishvili S, et al. Isothermal oxidation behavior of a sheet alloy of Fe-40at.%Al at temperatures between 1073 and 1473 K. *Intermetallics*, 2003, 11(7): 697
- [19] Zhang Z G, Zhang X J, Pan T J, et al. Initial stage oxidation of Fe-Al and Fe-Cr-Al alloys at high temperature. *Res Iron Steel*, 2007, 35(3): 38
(张志刚, 张学军, 潘太军, 等. FeAl 和 FeCrAl 合金在高温下的初期氧化. *钢铁研究*, 2007, 35(3): 38)
- [20] Yang K, Chen J, Hao F, et al. Stress-induced phase transformation and amorphous-to-nanocrystalline transition in plasma-sprayed Al_2O_3 coating with relative low temperature heat treatment. *Surf Coat Technol*, 2014, 253: 277

(上接第 377 页)

- [9] Ruan A J, Ma L Q, Pan A X, et al. Study on mechanical property and damping capacity of SiC particle reinforced magnesium matrix composite produced by powder metallurgy. *Light Alloy Fab Technol*, 2012, 40(2): 50
(阮爱杰, 马立群, 潘安霞, 等. 粉末冶金法 SiC/Mg 基复合材料的力学性能和阻尼性能研究. *轻合金加工技术*, 2012, 40(2): 50)
- [10] Wang Y, Zhou J X, Xia J H, et al. Damping capacity of AlN particles reinforced magnesium-aluminum matrix composites by powder metallurgy. *J Xi'an Technol Univ*, 2018, 38(6): 620
(王勇, 周吉学, 夏金环, 等. 粉末冶金法 AlN 颗粒增强镁铝基复合材料的阻尼性能. *西安工业大学学报*, 2018, 38(6): 620)
- [11] Yao Y T, Chen L Q, Wang W G. Damping capacities of ($\text{B}_4\text{C}+\text{Ti}$) hybrid reinforced Mg and AZ91D composites processed by *in situ* reactive infiltration technique. *Acta Metall Sinica*, 2019, 55(1): 141
(姚彦桃, 陈礼清, 王文广. 原位反应浸渗法制备 ($\text{B}_4\text{C}+\text{Ti}$) 混杂增强 Mg 及 AZ91D 复合材料及其阻尼性能. *金属学报*, 2019, 55(1): 141)
- [12] Wu Y W, Wu K, Deng K K, et al. Damping capacities and tensile properties of magnesium matrix composites reinforced by graphite particles. *Mater Sci Eng A*, 2010, 527(26): 6816
- [13] Wu Y W, Wu K, Deng K K, et al. Damping capacities and microstructures of magnesium matrix composites reinforced by graphite particles. *Mater Des*, 2010, 31(10): 4862
- [14] Wu Y W, Wu K, Deng K K, et al. Effect of extrusion temperature on microstructures and damping capacities of Grp/AZ91 composite. *J Alloys Compd*, 2010, 506: 688
- [15] Amini S, Barsoum M W. On the effect of texture on the mechanical and damping properties of nanocrystalline Mg-matrix composites reinforced with MAX phases. *Mater Sci Eng A*, 2010, 527(16): 3707
- [16] Anasori B, Caspi E, Barsoum M W. Fabrication and mechanical properties of pressureless melt infiltrated magnesium alloy composites reinforced with TiC and Ti_2AlC particles. *Mater Sci Eng A*, 2014, 618: 511
- [17] Mei D, Lamaka S V, Feiler C, et al. The effect of small-molecule bio-relevant organic components at low concentration on the corrosion of commercially pure Mg and Mg-0.8Ca alloy: An overall perspective. *Corros Sci*, 2019, 153: 258
- [18] Shamma M, Caspi E, Anasori B, et al. *In situ* neutron diffraction evidence for fully reversible dislocation motion in highly textured polycrystalline Ti_2AlC samples. *Acta Mater*, 2015, 98: 51
- [19] Chen Y J. *Preparation and Damping Capacities of $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ Based Composites with Two-Scale Three-Dimensional Network* [Dissertation]. Guiyang: Guizhou University, 2019
(陈禹伽. 双尺度三维网络 $\text{Ti}_2\text{AlC}/\text{Mg}$ 基复合材料制备及其阻尼性能研究 [学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2019)
- [20] Ji S J. *Study on Preparation of SiC-Based Ceramic Foam Filter Material by Organic Foam Dipping Method (PSD) and Foam Gel Method (FGC)* [Dissertation]. Changsha: Central South University, 2013
(冀树军. 有机泡沫浸渍法 (PSD) 及发泡凝胶法 (FGC) 制备 SiC 基泡沫陶瓷过滤材料的研究 [学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013)