

纤维增强 Ti/Al₃Ti 金属-金属间化合物 层状复合材料研究进展

蔺春发, 颜浩然, 施 浩, 韩雨蔷, 阙庆华, 姚家琛, 尤道广

(常熟理工学院材料工程学院, 江苏 常熟 215500)

摘 要: 连续纤维增强的金属-金属间化合物层状复合材料兼具高强度、高模量和良好的韧性等优异性能, 逐渐成为国内外学者的研究重点。这种复合材料包含庞杂的体系、复杂的结构和性能表现, 因此有必要对其制备技术、结构特征和综合性能开展深入的研究。以纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料为对象, 系统地综述了其研究现状。首先介绍了 Ti/Al₃Ti 等层状复合材料的制备技术, 并着重探讨了真空热压烧结和超声波固结辅助热压烧结两种方法在制备纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料方面的优缺点; 然后围绕陶瓷纤维、金属纤维和形状记忆合金纤维增强的 Ti/Al₃Ti 层状复合材料的组织结构、力学性能和功能特性进行了述评; 随后阐述了纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料中各种纤维的强韧化机制; 最后结合现有研究中存在的主要问题, 对连续纤维增强金属-金属间化合物层状复合材料未来的发展方向进行了展望。

关键词: 纤维增强; 金属间化合物; 层状复合材料; Ti/Al₃Ti; 制备技术; 界面行为

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2022)03-0222-08

引用格式: 蔺春发, 颜浩然, 施浩, 等. 纤维增强 Ti/Al₃Ti 金属-金属间化合物层状复合材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2022, 41(3): 222-229.

LIN C F, YAN H R, SHI H, *et al.* Recent Progress in Fiber-Reinforced Ti/Al₃Ti Metal-Intermetallic-Laminate Composites[J]. Materials China, 2022, 41(3): 222-229.

Recent Progress in Fiber-Reinforced Ti/Al₃Ti Metal-Intermetallic-Laminate Composites

LIN Chunfa, YAN Haoran, SHI Hao, HAN Yuqiang, QUE Qinghua,

YAO Jiachen, YOU Daoguang

(School of Materials Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

Abstract: Continuous fiber-reinforced metal-intermetallic-laminate composites (FR-MILCs) have been the research focus of laminate materials due to their high strength, high modulus and superior toughness. The FR-MILCs possess complex material systems, complicated microstructures and various performance indexes. Thus, it is of significance to investigate the preparation technology, microstructure and comprehensive properties of these composites. In this paper, the research status of fiber-reinforced Ti/Al₃Ti laminate composites is systematically reviewed. Firstly, the preparation technology of laminate composites such as Ti/Al₃Ti is introduced, and the advantages and disadvantages of vacuum hot pressing sintering and ultrasonic consolidation assisted hot pressing sintering in preparing fiber-reinforced Ti/Al₃Ti laminate composites are introduced. Then, the microstructure, mechanical properties and functional properties of Ti/Al₃Ti laminate composites reinforced by ceramic fibers, metal fibers and shape memory alloy fibers are elaborated, respectively. Besides, the strengthening and toughening mechanisms of various fibers in fiber-reinforced Ti/Al₃Ti laminate composites are analyzed. Finally, combined with the main problems in the existing

research, the future development direction of continuous FR-MILCs is prospected.

Key words: fiber reinforcing; intermetallic compounds; laminate composites; Ti/Al₃Ti; preparation technology; interfacial behavior

收稿日期: 2020-08-05 修回日期: 2020-11-03

基金项目: 江苏省科技计划-产学研合作项目(KYH2019183); 常熟理工学院科研启动项目(KYZ2018043Q, KYZ2018044Q)

第一作者: 蔺春发, 男, 1989 年生, 讲师,

Email: chunfalin1852@csitg.edu.cn

通讯作者: 韩雨蔷, 女, 1990 年生, 讲师,

Email: hanyuqiang@csitg.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202008004

1 前 言

开发新型高强韧金属材料是结构材料发展的重要方

向, 而同时提升材料的强度和韧性是材料发展的主要难题之一。人们在研究天然贝壳时发现, 其独特的叠层结构使贝壳兼具高强度和良好的韧性^[1]。鉴于此, 研究人员以贝壳为仿生模板, 设计并制备了一系列具有优异综合力学性能的金属-金属间化合物层状复合材料 (metal-intermetallic-laminate composites, MILCs)。相比于传统合金, 这种新型 MILCs 具有更强的可设计性和更高的使用温度。近 30 年来, 科研人员针对 MILCs 开展了大量的研究工作, 涉及 Ti-Al^[2-4]、Ni-Al^[5, 6]、Fe-Al^[7, 8] 和 Ti-Cu^[9] 等多种金属间化合物体系。其中, Ti/Al₃Ti 层状复合材料兼具高比强度、高比模量、良好的韧性、抗冲击、耐磨损、耐腐蚀及抗高温氧化等优异性能, 在航空航天、海工装备、汽车、电子等领域呈现出巨大的应用潜力^[10-15]。然而, 金属间化合物 Al₃Ti 存在室温韧、塑性低和脆性大等问题, 使 Ti/Al₃Ti 层状复合材料加工受限, 阻碍其大范围应用。目前, 改善金属间化合物及 MILCs 韧性的主要方法是借助复合强韧化理念, 将连续纤维引入到金属间化合物层中, 获得纤维增强的金属-金属间化合物层状复合材料 (fiber-reinforced MILCs, FR-MILCs)^[16, 17]。研究人员已经尝试将陶瓷纤维、金属纤维、合金纤维等连续增强体加入到 Ti/Al₃Ti 层状复合材料中, 探究纤维对 FR-MILCs 的强韧化效果和相关机制, 并分析不同类型增强纤维对材料组织结构和功能特性的影响规律。

本文首先回顾了 Ti/Al₃Ti 层状复合材料的主要合成方法, 并着重探讨了真空热压烧结和超声波固结辅助热压烧结技术制备 FR-MILCs 的工艺过程和优缺点, 随后具体介绍了陶瓷纤维、金属纤维和形状记忆合金纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料的组织演变规律、力学性能和功能特性及不同纤维的强韧化机制, 最后对 FR-MILCs 的发展趋势进行了展望。

2 制备工艺

传统 Ti/Al₃Ti 层状复合材料可通过箔冶金法制得, 该方法已经十分成熟, 主要采用放电等离子烧结^[18, 19]、热压扩散复合^[20-22]、轧制复合^[23-25]、爆炸焊接^[26, 27]、超声波固结^[28]等技术完成冶金过程。在这些技术中, 适用于合成 FR-MILCs 的方法主要有两种: 真空热压烧结法 (一步法) 和超声波固结辅助热压烧结法 (两步法), 这两种方法均是以箔-纤维-箔叠层为基础, 通过箔材之间的元素扩散反应实现复合。

2.1 真空热压烧结技术

真空热压烧结技术是合成金属基复合材料、金属叠层材料、块体合金的重要手段之一。采用真空热压烧结技术制备纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料通常是以 Ti 箔、Al 箔和连续纤维为原材料, 将经过打磨-清洗-烘干处理的金

属箔材和经清洗-烘干处理的纤维 (束状陶瓷纤维需先经热处理分散, 金属/合金纤维需先打磨去氧化皮) 交叠排列, 其中纤维平铺在箔材表面, 两端固定于箔材边缘^[29]。随后将叠合的箔材/纤维放入热压烧结炉中进行真空烧结, 烧结温度一般控制在 650 ~ 660 °C 左右。在此温度区间内, Al 为液相, Ti、Al 之间发生如下扩散反应: $\text{Ti(s)} + \text{Al(l)} \rightarrow \text{Al}_3\text{Ti(s)}$, 在层间界面处生成金属间化合物 Al₃Ti 相^[30]。此时, 纤维在新形成的 Al₃Ti 固相及界面应力作用下被推向 Al 相中心, 并在 Al 相被完全反应后, 留存于金属间化合物层中心位置。最终, 形成了 Ti 层和 Al₃Ti 层交叠排列、紧密结合, 同时纤维分布于 Al₃Ti 层中心面上的 FR-MIL 结构^[31]。具体工艺过程如图 1 所示。

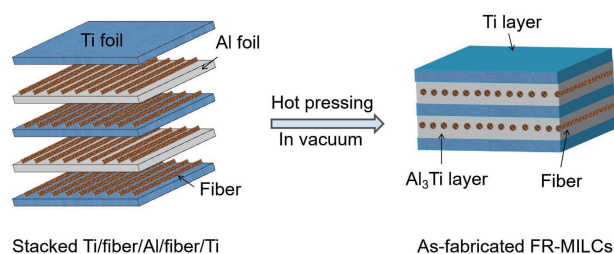


图1 真空热压烧结法制备纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料的工艺过程^[31]

Fig. 1 Schematic illustration of the fabrication process of fiber-reinforced Ti/Al₃Ti laminate composite via vacuum hot pressing sintering^[31]

作为目前制备纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料最主要的方法, 真空热压烧结技术具有众多优势。一方面, 通过调控原始箔材的成分、厚度、层厚比及纤维的种类、数量、排列方式, 可轻松获得具有不同组织结构和性能指标的 FR-MILCs, 可设计性强, 甚至可以用来合成单相金属间化合物块体^[32]以及纤维增强金属间化合物^[33]、颗粒增强 Ti/Al₃Ti 等复合材料^[34], 应用范围广。另一方面, 该方法还具有操作简单 (一步法)、原材料箔材来源广、环保无污染、技术成熟等优势。但该方法仍存在一些不足, 如束丝陶瓷纤维需要预先热处理以分散纤维, 而这样会造成纤维性能的损伤; 手工铺放纤维效率低, 均匀性差; 连接纤维与箔材所用胶体会引入一些杂质, 影响材料的结构和性能; 热压制备的复合材料块体多为直板, 合成或加工成曲面结构较困难。

2.2 超声波固结辅助热压烧结技术

超声波固结是一种利用超声波能量进行金属材料焊接的快速成形技术, 是合成金属叠层材料的重要手段之一。早期的超声波固结技术主要用于 Al 等塑性良好、易冶金结合的同种金属材料的连接, 如 Al3003 箔材^[35, 36]。随着大功率超声波设备的出现, 该技术已经广泛应用于异种金属叠层的连接, 如 Al/Ti^[37, 38]、Al/Cu^[39, 40]等。以

通过超声波固结技术合成的 Al/Ti 叠层为预制体, 通过后续热压处理促进 Ti 和 Al 之间的扩散反应, 可进一步制备 Ti/Al₃Ti 层状复合材料^[28]。可见, 超声波固结技术同样可以作为一种层状复合材料预成型方法。

此外, 超声波固结技术已在制备纤维增强金属叠层材料方面得到应用, 如 C_f/Al^[41]、NiTi_f/Al^[42]等。其原理是通过对叠放的金属箔材料和纤维施加一定的压力和超声波能量, 使金属箔材在发生大量塑性变形的同时, 束状纤维可以均匀分散并被包裹在层间界面处, 形成以机械结合为主、并伴有少量元素扩散的复合结构, 其过程

如图 2 所示^[43]。而通过该方法获得的纤维均布金属带材同样可作为制备 FR-MILCs 的预制体。以连续陶瓷纤维均布 Ti/Al 复合带材为预制体, 通过真空热压烧结过程可制备出陶瓷纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料^[44, 45]。这种超声波固结辅助热压烧结技术制备 FR-MILCs 有两大优势: 一方面, 在超声波作用下, 束状纤维分散均匀, 且层间结合紧密, 有利于热压过程中扩散反应的进行; 另一方面, 残留在纤维均布带材中的超声波能量能够加快其在热压烧结时的反应速度, 提高生产效率。

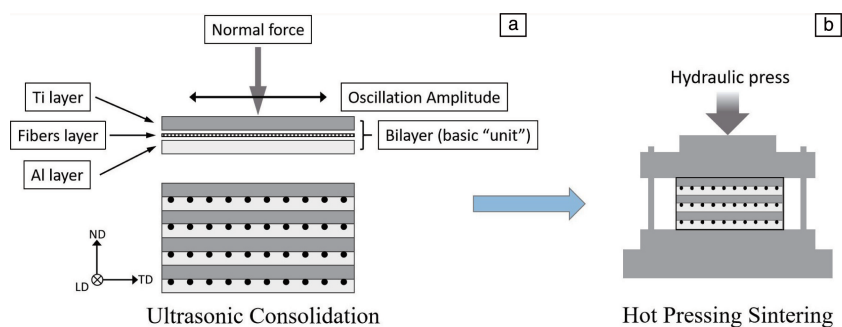


图 2 超声波固结辅助热压烧结技术制备纤维增强金属-金属间化合物层状复合材料的工艺流程图^[43]: (a) 超声波固结成纤维均布带材, (b) 热压烧结过程

Fig. 2 Schematic illustration of manufacturing fiber-reinforced metal-metallic laminate composites (FR-MILCs) by two steps^[43]: (a) Ti/Al laminate tape containing continuous fibers prepared by ultrasonic consolidation, (b) hot pressing sintering process

3 纤维增强 Ti/Al₃Ti 材料体系

目前, 用于制备纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料的连续纤维主要包括高强度陶瓷纤维、高韧性金属纤维和形状记忆合金纤维, 可以将制备的复合材料分为 3 类: 陶瓷纤维增强金属-金属间化合物层状复合材料 (CFR-MILCs)、金属纤维增强金属-金属间化合物层状复合材料 (MFR-MILCs) 和形状记忆合金纤维增强金属-金属间化合物层状复合材料 (SMAFR-MILCs)。

3.1 陶瓷纤维增强 MILCs

3.1.1 组织结构优化

陶瓷纤维具有低密度、高强度、高模量等优势, 是目前用于 TiAl 系金属间化合物强韧化领域最主要的增强材料^[46, 47], 如 SiC 纤维、C 纤维和 Al₂O₃ 纤维等。在 CFR-MILCs 中, 陶瓷纤维总是聚集在金属间化合物层中心面上, 也是 Al 相反应耗尽的位置^[31], 而该中心面上往往会聚集一些杂质和缺陷, 且从横截面观察呈一条线状, 被称为“中心线”缺陷, 如图 3 所示。受其影响, 增强纤维与金

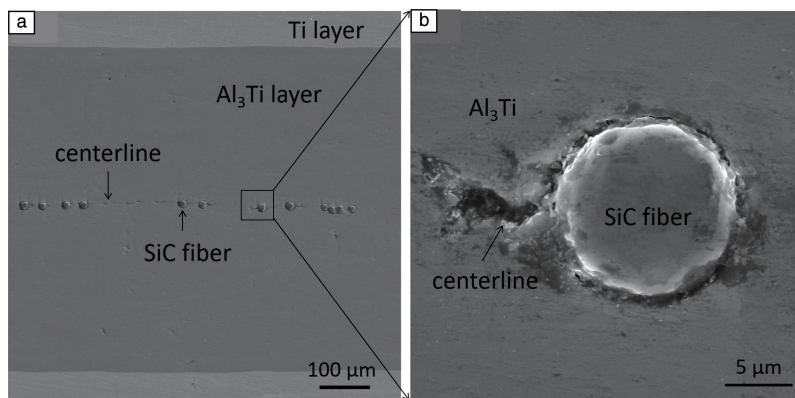


图 3 SiC_f-Ti/Al₃Ti 层状复合材料的典型横截面形貌^[48]

Fig. 3 Representative transverse micrographs of SiC_f-Ti/Al₃Ti laminate composites^[48]

属间化合物基体界面结合强度往往不高, 纤维强韧化效果难以全面发挥^[48]。因此, 探究 CFR-MILCs 纤维/基体界面及整个中心面区域的组织结构优化方法具有重要意义。

Vecchio 等^[49]在制备 Al₂O₃ 纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料时, 通过控制原始箔材厚度使过量 Al 相保留于金属间化合物层中心区域, 同时 Al₂O₃ 纤维分布于 Al 相内, 避免了中心线的形成及其对纤维/基体界面的影响。然而, Al 相的存在造成了复合材料强度和刚度的降低, 同时纤维与 Al₃Ti 分离, 并未对 Al₃Ti 起到强韧化效果。与此不同, Han 等^[29, 48]利用热等静压及热处理方法分别对 Al₂O₃-Ti/Al₃Ti 和 SiC_f-Ti/Al₃Ti 层状复合材料进行了高温后处理, 进而促进纤维/金属间化合物界面的扩散反应以形成冶金结合。这种冶金结合界面能够有效传递载荷, 发挥纤维的强韧化效果。然而, 高温处理在一定程度上损伤了复合材料各组元的性能。

研究人员发现, 在制备 CFR-MILCs 过程中, 同时铺放 NiTi 合金丝和陶瓷纤维, 由于 NiTi 中双元素与 Al 的反应速度远远高于纯 Ti, 可阻碍氧化物等杂质在金属间化合物中心面的聚集, 消除了中心线缺陷, 并获得了结合良好的纤维/基体界面^[50, 51]。其优势是操作简单, 不需要后续热处理, 组元性能不受影响; 不足之处是 NiTi 的使用提高了生产成本, 引入了密度较高的 Al₃Ni 相, 使材料组织结构变得更为复杂。Lin 等^[52]则采用添加扩散阻碍层(Ti 箔)的方法成功地将 SiC 纤维与中心线分离, 获得了界面结合良好的 SiC_f/Al₃Ti 结构。该方法不影响

复合材料的成本、密度、强度和刚度等重要参数, 但并未消除金属间化合物中心线缺陷, 仅适用于纤维/基体界面的优化, 存在一定的局限性。综上可知, 仍需探索更合适的制备工艺或处理技术来进一步改善 CFR-MILCs 纤维/基体界面结合, 并消除中心线缺陷。

3.1.2 力学实验及模拟研究

科研人员在 CFR-MILCs 力学行为研究方面开展了大量的实验测试和仿真模拟工作。Jiao 等^[45]对 C_f-Ti/Al₃Ti 层状复合材料的力学性能进行了测试, 其结果表明, 沿着纤维轴向加载时, 复合材料的抗拉强度和断裂延伸率明显高于无纤维增强的 Ti/Al₃Ti 材料, 但两种材料的压缩性能并没有明显区别, 即碳纤维的引入有效提升了复合材料的拉伸性能。Han 等^[29, 49]以 Al₂O₃-Ti/Al₃Ti 层状复合材料为研究对象进行了系统准静态力学性能测试, 结果发现, 通过 Al₂O₃ 纤维的脱粘和拔出及其对脆性裂纹的阻碍和偏转等作用, 复合材料的强度和断裂韧性均可得到一定程度的提升, 而纤维发挥强韧化作用的基础是良好的结合界面及适度的界面结合强度。同样, 研究人员发现 SiC_f-Ti/Al₃Ti 层状复合材料的抗压强度、抗拉强度、弯曲强度、压缩失效应变、断裂伸长率、断裂韧性等性能均比加入 SiC 纤维前的 Ti/Al₃Ti 材料更加优越^[31, 48]。另外, Liu 等^[53-55]以等效夹杂数值算法为基础, 通过模拟刚性球侵入 SiC_f-Ti/Al₃Ti 材料靶板早期接触过程, 研究了准静态加载条件下 CFR-MILCs 的小变形弹塑性接触力学行为, 建立了准确有效的数值模型, 如图 4 所示。相关研究结果指出, 球面加载时, SiC 纤维能够显著改善复合材料的强度。

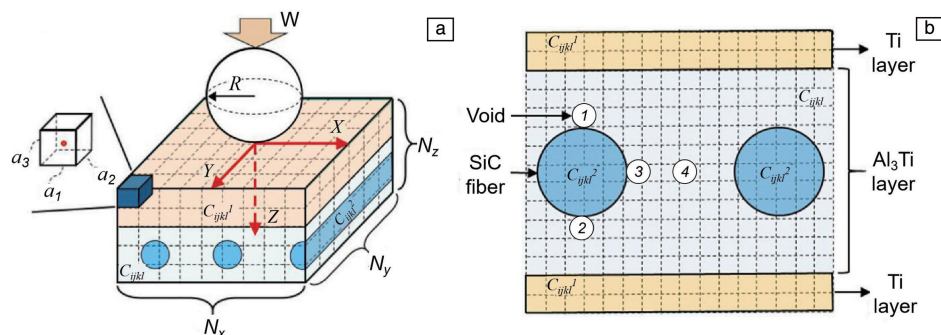


图 4 SiC_f-Ti/Al₃Ti 层状复合材料半解析模型示意图^[54]: (a) 包含 Ti 层层状分布和多个 SiC 纤维非均匀柱状分布特点的基本接触模型, (b) 考虑 SiC 纤维周围孔洞缺陷的材料模型放大截面

Fig. 4 Schematic diagram of the semi-analytical model for SiC_f-Ti/Al₃Ti laminate composite^[54]: (a) basic contact model containing a layered inhomogeneity of Ti layer and multiple cylindrical inhomogeneities of SiC fibers, (b) magnified cross section of the material model considering the hole defects around the SiC fibers

3.2 金属纤维增强 MILCs

现阶段对 MFR-MILCs 的研究还比较浅显, 主要集中在金属纤维与 Al 之间的反应规律及复合材料力学性能方面。如 Qi 等^[56]对 W_f-Ti/Al₃Ti 层状复合材料制备过程中的

扩散反应规律进行了初步研究, 发现 W 纤维仅与 Al 之间发生了一定的相互扩散, 形成了二元钨铝固溶体。Chang 等^[57]研究发现, Mo_f-Ti/Al₃Ti 层状复合材料由交叠排列、紧密结合的 Ti 层和金属间化合物层(主要为 Al₃Ti 相)组

成, Mo 纤维分布于金属间化合物层中心面附近, 且与 Al 相反应生成了一系列的金属间化合物 (Al_8Mo_3 、 Al_4Mo 、 Al_5Mo 及 Al_{12}Mo), 如图 5 所示, 这与 Li 等^[58]的研究结果大体相同。此外, 还发现由于 Mo 纤维的优异性能及其强韧化行为, $\text{Mo}_f\text{-Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 材料比 $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 具有更高的拉伸强度和断裂延伸率。

3.3 形状记忆合金纤维增强 MILCs

新型 SMAFR-MILCs 是以形状记忆合金 NiTi 纤维为增强体的高强韧、高阻尼层状复合材料^[59]。这种复合材料由 Ti 层和组织结构复杂的金属间化合物层组成, NiTi 纤维位于金属间化合物层中心面位置, 且该位置不存在中心线缺陷, 如图 6a 所示。金属间化合物层主要由比邻 Ti 层的 Al_3Ti 单相薄层、 $\text{Al}_3\text{Ti}+\text{Al}_3\text{Ni}$ 双相混合层及接近纤维的 $\text{Al}_3\text{Ti}+\text{Al}_3\text{Ni}$ 双相混合区组成。事实上, 在烧结过程中 NiTi 纤维率先与 Al 发生扩散反应, Ni-Al 和 Ti-Al 双扩散偶的耦合扩散行为是双相混合区形成的主要原因, 由于 Ni-Al 扩散速率明显高于 Ti-Al 扩散速率, 所以不同双相混合区的形貌产生了明显的差异, Ti 箔与 Al 的反应相对滞后且反应速度慢, 所以在近 Ti 层形成的单相 Al_3Ti 层较薄^[60]。

研究发现, $\text{NiTi}_f\text{-Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 层状复合材料具有良好的综合力学性能^[61, 62]。相比于 $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 材料, 加入 NiTi 纤维后, 复合材料的塑性和断裂韧性明显提升, 同时强度

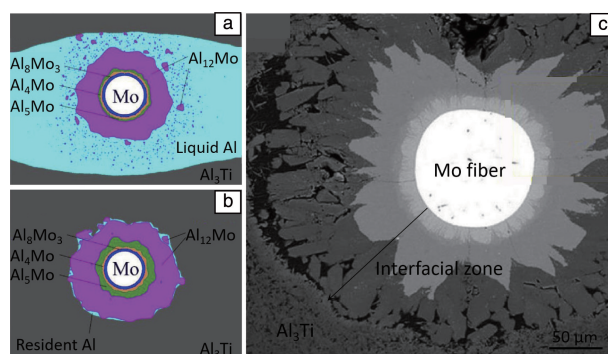


图 5 $\text{Mo}_f\text{-Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 层状复合材料的组织结构^[57]: (a, b) Mo 纤维与 Al 的反应过程示意图, (c) $\text{Mo}_f/\text{Al}_3\text{Ti}$ 界面区域显微形貌

Fig. 5 Microstructures of $\text{Mo}_f\text{-Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ laminate composite^[57]: (a, b) schematic diagram of reaction process between Mo fiber and Al phase, (c) microstructure of $\text{Mo}_f/\text{Al}_3\text{Ti}$ interface area

基本保持不变。可见, NiTi 纤维具有良好的韧化效果。另外, 受益于 NiTi 合金的形状记忆效应和超弹性特征, $\text{NiTi}_f\text{-Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 层状复合材料获得了优异的阻尼性能, 如图 6c 所示, 其阻尼因子远远高于无纤维增强的 $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 材料^[59]。即 SMAFR-MILCs 是一种极具应用潜力的新型结构功能一体化材料, 既可以用作结构件, 又可以作为减振降噪的功能材料使用。

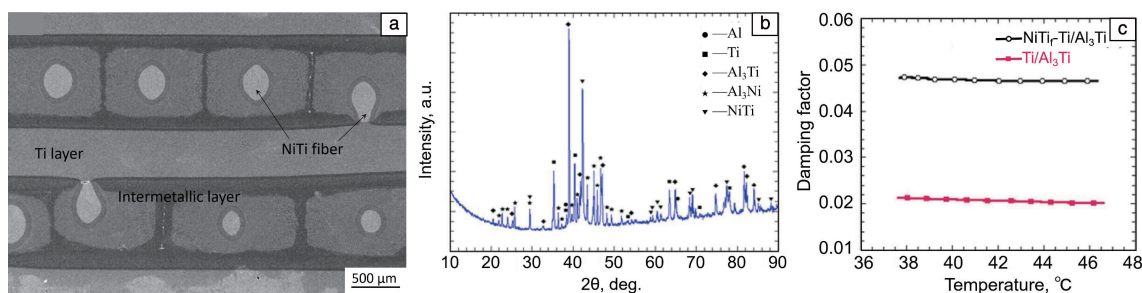


图 6 $\text{NiTi}_f\text{-Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 层状复合材料^[59, 60]: (a) 微观结构, (b) XRD 图谱, (c) 阻尼因子-温度曲线

Fig. 6 The microstructure (a), XRD pattern (b) and damping factor-temperature curve (c) of $\text{NiTi}_f\text{-Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ laminate composite^[59, 60]

4 FR-MILCs 中纤维的增韧机制

连续纤维增强金属-金属间化合物层状复合材料具有优异的综合力学性能, 除了突出的抗拉强度、抗压强度和抗弯强度外, 还具有优异的断裂韧性。下面将对 FR-MILCs 中连续纤维的增韧行为进行详细阐述。在 CFR-MILCs 中, 陶瓷纤维与金属间化合物基体之间形成结合强度适宜的冶金反应界面, 如 $\text{SiC}_f/\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$ 层状复合材料中, $\text{SiC}_f/\text{Al}_3\text{Ti}$ 界面反应产物主要是 Ti 或 Al 的碳化物、硅化物等。当复合材料受到沿纤维轴向的拉伸载荷作用或垂直于纤维轴向的压缩载荷时, 陶瓷纤维都会受到沿轴向的拉应力作用。由于陶瓷纤维具有远远高于基

体的抗拉强度, 将作为承担载荷的主体, 大多数载荷通过结合良好的界面从基体传至纤维, 从而提升复合材料的强度。此外, 当金属间化合物基体中产生的裂纹扩展到纤维/基体界面区时, 会发生界面脱粘、纤维拔出、纤维断裂、裂纹桥连、裂纹偏转等效应 (如图 7 所示), 从而提高了裂纹扩展阻力, 延长了裂纹扩展的距离, 减缓了裂纹的扩展速率, 推迟材料完全断裂的发生并吸收更多的断裂能, 进而提升材料的韧性。对于 MFR-MILCs 和 SMAFR-MILCs 而言, 金属及形状记忆合金纤维均具有良好的延展性, 其加入有利于复合材料的协调变形和塑性提升。另外, 纤维与金属间化合物基体之间形成了极为紧密的冶金结合界面, 能够有效地传递载荷, 发挥纤维

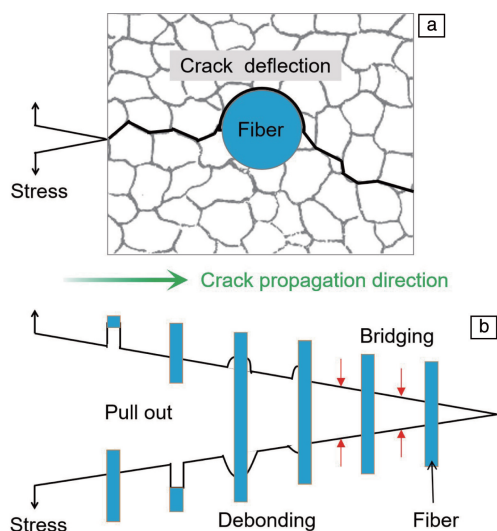


图7 FR-MILCs中纤维增韧机制示意图:(a)裂纹偏转,(b)纤维拔出、脱粘及桥连行为

Fig. 7 Schematic diagram of fiber toughening behavior in FR-MILCs: (a) crack deflection, (b) the pullout, debonding and bridging behavior of fibers

的强韧化效果。事实上,复合材料受到外加载荷作用时,裂纹首先会在脆性的金属间化合物相中形核,随后逐渐长大、扩展,当这些裂纹到达纤维/基体界面区时,由于连续纤维的存在,会产生明显的裂纹桥连和偏转,致使局部应力重分布,使脆性裂纹钝化,进而提高裂纹扩展难度,裂纹若要进一步生长则需要重新形核,从而消耗更多的能量,提高了复合材料的韧性。

5 结 语

连续纤维增强 Ti/Al₃Ti 金属-金属间化合物层状复合材料具有高比强度、高比模量、耐冲击和良好的韧性,有望在轻型战车、坦克防弹装甲、武装直升机领航员座椅方面得到广泛应用;此外,这种层状复合材料具有优异的高温力学性能和减振降噪的功能特性,将在汽车减震器、飞机发动机及热交换器等领域具有应用前景。随着研究的深入,纤维、颗粒、晶须增强的 Ti/TiAl、Ti/Ti₃Al 等金属-金属间化合物层状复合材料备受关注^[63-65]。目前,纤维增强金属-金属间化合物层状复合材料(FR-MILCs)的研究中仍然存在一些关键科学问题亟待解决,如降低成本、提高效率、实现应用等。因此,该领域未来应着重发展以下方向。

(1)优化 FR-MILCs 的制备工艺,并开发能够有效解决金属间化合物脆性造成的复合材料机加工和曲面成形困难的新的净成形工艺,推动该类复合材料的工程实际应用进程。

(2)针对 FR-MILCs 体系多、组织结构复杂问题,结

合反应热力学、动力学理论,通过深入研究复合材料的界面扩散反应规律和成形机理,达到精确控制材料结构和性能的目标。

(3)大力发展 FR-MILCs 设计—制备—加工—服役全过程的仿真模拟工作,建成准确有效的复合材料模型和计算模型,指导复合材料的生产和应用,降低研究和生产成本,提高生产效率。

参考文献 References

- [1] RITCHIE R O. Nature Materials[J], 2011, 10(11): 817-822.
- [2] LYU S Y, SUN Y B, LI G D, *et al.* Materials and Design[J], 2018, 143: 160-168.
- [3] QIN S H, CUI X P, TIAN Z, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2017, 700: 122-129.
- [4] 史明东,原梅妮,何小晶,等. 复合材料学报[J], 2018, 35(8): 2286-2292.
SHI M D, YUAN M N, HE X J, *et al.* Acta Materialiae Compositae Sinica[J], 2018, 35(8): 2286-2292.
- [5] WANG Y, WANG H R, LIU X, *et al.* Materials Science and Engineering A[J], 2017, 682: 454-465.
- [6] WANG Y, WANG H R, LIU X, *et al.* Intermetallics[J], 2017, 87: 70-80.
- [7] WANG H R, ZHU C Y, VECCHIO K S. Acta Materialia[J], 2020, 194: 496-515.
- [8] MA X Y, ZHANG Q, LUO Z C, *et al.* Materials and Design[J], 2016, 89: 71-77.
- [9] KONIECZNY M. Materials Letters [J], 2008, 62 (17/18): 2600-2602.
- [10] 曹阳,张丹丹,刘建秀,等. 兵器材料科学与工程[J], 2019, 42 (3): 122-127.
CAO Y, ZHANG D D, LIU J X, *et al.* Ordnance Material Science and Engineering[J], 2019, 42(3): 122-127.
- [11] 孔凡涛,孙巍,杨非,等. 航空材料学报[J], 2018, 38(4): 37-46.
KONG F T, SUN W, YANG F, *et al.* Journal of Aeronautical Materials [J], 2018, 38(4): 37-46.
- [12] YUAN M N, WANG Z J, YAO Y H, *et al.* Results in Physics[J], 2019, 15: 102706.
- [13] FAN X L, YUAN M N, QIN Q. Rare Metal Materials and Engineering [J], 2019, 47(9): 2615-2620.
- [14] YUAN M N, LI L L, WANG Z J. Vacuum[J], 2018, 157: 481-486.
- [15] 原梅妮,李瑶,魏成富,等. 西华大学学报(自然科学版)[J], 2018, 37(4): 90-95.
YUAN M N, LI Y, WEI C F, *et al.* Journal of Xihua University(Natural Science Edition)[J], 2018, 37(4): 90-95.
- [16] 李伟. NiTi 纤维增强 Fe-Al 层状复合材料的制备、微结构表征与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
LI W. Fabrication, Microstructure Characterization and Properties of NiTi Fiber Reinforced Fe-Al Laminated Composites[D]. Harbin: Har-

- bin Engineering University, 2018.
- [17] 韩雨蕾, 蔺春发, 陈长江, 等. 上海航天[J], 2018, 35(1): 87-96.
HAN Y Q, LIN C F, CHEN C J, *et al.* Aerospace Shanghai[J], 2018, 35(1): 87-96.
- [18] LAZURENKO D V, MALI V I, BATAEV I A, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2015, 46(9): 4326-4334.
- [19] SUN Y B, CHEN J, MA F M, *et al.* Materials Characterization[J], 2015, 102: 165-172.
- [20] 姜波, 韩玉杰, 原梅妮. 材料热处理学报[J], 2019, 40(1): 23-30.
JIANG B, HAN Y J, YUAN M N. Transactions of Materials and Heat Treatment[J], 2019, 40(1): 23-30.
- [21] LYU S Y, SUN Y B, REN L, *et al.* Intermetallics[J], 2017, 90: 16-22.
- [22] WANG Y, VECCHIO K S. Materials Science and Engineering A[J], 2016, 649: 325-337.
- [23] SUN W, YANG F, KONG F T, *et al.* Materials Characterization[J], 2018, 144: 173-181.
- [24] KONG F T, CHEN Y Y, ZHANG D L. Materials and Design[J], 2011, 32(6): 3167-3172.
- [25] 孙彦波, 马凤梅, 肖文龙, 等. 航空材料学报[J], 2014, 34(4): 98-111.
SUN Y B, MA F M, XIAO W L, *et al.* Journal of Aeronautical Materials[J], 2014, 34(4): 98-111.
- [26] BATAEV I A, BATAEV A A, MALI V I, *et al.* Materials and Design[J], 2012, 35: 225-234.
- [27] 王少刚. 材料开发与应用[J], 2018, 33(6): 126-133.
WANG S G. Development and Application of Materials[J], 2018, 33(6): 126-133.
- [28] 夏彬彬. 超声固结法制备Ti/Al₃Ti层状复合材料及其力学性能评价[D]. 济南: 山东大学, 2019.
XIA B B. Ti/Al₃Ti Laminated Composites Prepared by Ultrasonic Consolidation and Mechanical Properties Evaluated[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [29] HAN Y Q, LIN C F, HAN X X, *et al.* Materials Science and Engineering A[J], 2017, 688: 338-345.
- [30] PENG L M, WANG J H, LI H, *et al.* Scripta Materialia[J], 2005, 52(3): 243-248.
- [31] LIN C F, JIANG F C, HAN Y Q, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2018, 743: 52-62.
- [32] WEI N X, HAN X X, ZHANG X Y, *et al.* Journal of Materials Research[J], 2016, 31(17): 2706-2713.
- [33] LU Z C, JIANG F C, CHANG Y P, *et al.* Materials and Design[J], 2018, 143: 274-284.
- [34] 王帅. SiC颗粒增强钛-铝系层状复合材料的制备、结构及力学性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
WANG S. Fabrication, Microstructure and Mechanical Properties of SiC Particle-Reinforced Titanium Aluminide Laminate Composites[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [35] FOSTER D R, DAPINO M J, BABU S S. Ultrasonics[J], 2013, 53(1): 211-218.
- [36] FUJII H T, SRIRAMAN M R, BABU S S. Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2011, 42(13): 4045-4055.
- [37] KAYA İ, CORA Ö N, KOC M. Materials[J], 2019, 12(20): 3402.
- [38] KAYA İ, CORA Ö N, ACAR D, *et al.* Metallurgical and Materials Transactions A[J], 2018, 49(10): 5051-5064.
- [39] DAS S, SATPATHY M P, ROUTARA B C, *et al.* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering[J], 2019, 653: 012031.
- [40] MUELLER J E, JR J W G, ADVANI S G. Scanning[J], 2013, 35(5): 1-9.
- [41] GUO H Q, GINGERICH M B, HEADINGS L M, *et al.* Composite Structures[J], 2019, 208: 180-188.
- [42] FRIEL R J, HARRIS R A. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers[J], 2010, 224(11): 31-40.
- [43] 姜风春, 韩雨蕾, 蔺春发, 等. 连续陶瓷纤维均匀布铝带材超声波固结快速制造方法: ZL201510677021.1[P]. 2017-04-12.
JIANG F C, HAN Y Q, LIN C F, *et al.* Ultrasonic Consolidation Rapid Manufacturing Method for Continuous Ceramic Fiber Uniform-Distribution Aluminum Strip: ZL201510677021.1[P]. 2017-04-12.
- [44] 焦飞飞. 基于超声波固结成形钛-铝系层状复合材料的制备与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
JIAO F F. Fabrication and Mechanical Properties of Ti-Al Laminated Composites Based on Ultrasonic Consolidation[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [45] JIAO F F, LIU M Y, JIANG F C, *et al.* Materials Science and Engineering A[J], 2019, 765: 138255.
- [46] 李肖. 非金属纤维增强Al₃Ti基复合材料的制备与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
LI X. Preparation and Properties of Non-Metallic Fiber Reinforced Al₃Ti Matrix Composite[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [47] 蔺春发, 韩雨蕾, 袁丁, 等. 中国材料进展[J], 2017, 36(3): 219-225.
LIN C F, HAN Y Q, YUAN D, *et al.* Materials China[J], 2017, 36(3): 219-225.
- [48] LIN C F, HAN Y Q, GUO C H, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2017, 722: 427-437.
- [49] VECCHIO K S, JIANG F C. Materials Science and Engineering A[J], 2016, 649: 407-416.
- [50] HAN Y Q, ZHU J Y, YAN H R, *et al.* Advanced Composites Letters[J], 2020, 29: 1-9.
- [51] HAN Y Q, JIANG F C, LIN C F, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2017, 729: 1145-1155.
- [52] LIN C F, WANG S Y, YAN H R, *et al.* Metals and Materials International[J], 2021, 27(2): 306-318.
- [53] LIU J C, ZHANG L, JIANG F C, *et al.* Materials[J], 2018, 11(7): 1152.
- [54] LIU J C, ZHANG M Q, JIANG F C, *et al.* Metals[J], 2019, 9

- (2): 165.
- [55] 刘净川, 姜凤春, 王立权, 等. 机械工程学报[J], 2018, 54(22): 63-77.
- LIU J C, JIANG F C, WANG L Q, *et al.* Journal of Mechanical Engineering[J], 2018, 54(22): 63-77.
- [56] 齐心. 纤维增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- QI X. Preparation and Properties of Fiber Reinforced Ti/Al₃Ti Laminate Composites[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [57] CHANG Y P, WANG Z Q, LI X C, *et al.* Intermetallics[J], 2019, 112: 106544.
- [58] 李秀才. 连续金属钼丝增强 Ti/Al₃Ti 层状复合材料的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- LI X C. Preparation and Properties of Continuous Mo Wire Reinforced Ti/Al₃Ti Laminate Composites[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [59] WANG E H, GUO C H, ZHOU P J, *et al.* Materials and Design[J], 2016, 95: 446-454.
- [60] WANG E H, TIAN Y, WANG Z Q, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2017, 696: 1059-1066.
- [61] TIAN Y, WANG E H, LI W, *et al.* Journal of Alloys and Compounds[J], 2018, 739: 669-677.
- [62] 田瑶. NiTi 纤维增强 Ti-Al 金属-金属间化合物层状复合材料的制备与性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- TIAN Y. Fabrication and Properties of NiTi Fiber-Reinforced Ti-Al Metal-Intermetallic Laminate Composite[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [63] 张迪, 孙彦波, 赵业青, 等. 中国有色金属学报[J], 2010, 20(S1): 1078-1082.
- ZHANG D, SUN Y B, ZHAO Y Q, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2010, 20(S1): 1078-1082.
- [64] ZHU K, YU W B, AMAN Y, *et al.* Journal of Materials Science[J], 2016, 51(18): 8747-8760.
- [65] YU W B, ZHU K, AMAN Y, *et al.* Materials and Design[J], 2016, 101: 102-108.

(编辑 吴 锐)