



## 玻璃纤维强化 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料的方法与性能研究

朱庆宣<sup>1</sup>, 刘旭东<sup>1\*</sup>, 王兴安<sup>1</sup>, 孙旭东<sup>2</sup>

(1. 大连大学环境与化学工程学院, 辽宁 大连 116622; 2. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 利用真空热压烧结工艺, 以一种新型的材料排列方式(复合材料前半部分为 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料, 后半部分在 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层之间扦插玻璃纤维), 成功利用玻璃纤维强化 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料。在同样的工艺条件下, 通过改变玻璃纤维的层数(玻璃纤维的体积分数), 探究玻璃纤维的层数对复合材料静态压缩性能、静态拉伸性能的影响。研究结果表明: 随着玻璃纤维层数的增加, 复合材料的静态压缩性能与静态拉伸性能都有提升, 但不是简单的正相关, 而是前期提升效果明显, 后期提升效果不明显; 同时, 复合材料的静态压缩性能在沿垂直于叠层方向测试时, 提升效果要比沿平行于叠层方向测试时明显。

**关键词:** 玻璃纤维; Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料; 静态压缩性能; 静态拉伸性能

**中图分类号:** TB331

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9981(2023)02-0317-06

**引文格式:** 朱庆宣, 刘旭东, 王兴安, 等. 玻璃纤维强化 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料的方法与性能研究[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(2):317-322.

ZHU Qingxuan, LIU Xudong, WANG Xingan, et al. Study on the Method and Properties of Glass Fiber Reinforced Ti/Al<sub>3</sub>Ti Laminate Composites[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(2):317-322.

Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料(简称 MIL)是一种轻量化、高强度、耐高温的新型材料<sup>[1-4]</sup>, 但复合材料本身的力学性能的强化仍然面临着一些复杂的考验<sup>[5]</sup>。一些研究者发现, 通过在叠层处扦插纤维, 利用纤维与材料基体的交界面把载荷转移到高韧性的纤维上, 使纤维代替材料本身承担主要受力, 此种强韧化方式可极大地增强 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料的整体强度与韧性<sup>[6-7]</sup>。当前, 研究比较多的是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维<sup>[8-9]</sup>、C 纤维、NiTi 纤维<sup>[10]</sup>、SiC 纤维<sup>[11]</sup>、TiC 纤维等。Han<sup>[12]</sup> 团队及 Vecchio 团队<sup>[13]</sup>, 在金属与金属化合物层之间引入 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维, 成功制备了以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维体来增强 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料, 表明在同样的制备工艺条件中, 复合材料的压缩性能及拉伸性能均有着显著的提升, 说明纤维增强体可以显著地提升复合材料的强度与韧性。

在金属与金属间化合物层之间引入纤维较为困难, 本文将提供一种新型的引入玻璃纤维强化 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料的方法(简称 CCFR-MIL)。同

时, 对复合材料的微观结构进行表征, 对静态压缩性能与静态拉伸性能的进行测试。

### 1 实验方法

将预处理过的 Ti 箔片(厚 0.2 mm)、Al 箔片(厚 0.2 mm)和玻璃纤维布(厚 0.26 mm)分别切割成 30 mm × 30 mm 的正方形小块, 前半部分按照 Ti、Al 交替叠放(Ti 共 10 层、Al 共 10 层), 后半部分按照玻璃纤维、Al 交替叠放(玻璃纤维 10 层、Al 10 层), 最后 1 层为 Ti, 材料叠放顺序如图 1 所示。

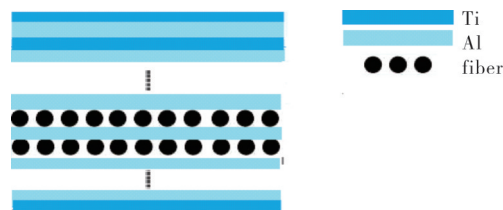


图 1 原材料堆叠示意图

Figure 1 Schematic diagram of stacked raw materials

收稿日期: 2023-02-16

作者简介: 朱庆宣, 硕士研究生, 研究方向为金属复合材料, E-mail: 767171195@qq.com。

通信作者: 刘旭东, 博士, 副教授, 研究方向为功能材料制备与性能研究, E-mail: liuxudong@dlu.edu.cn。

将叠放好的Ti、Al、玻璃纤维压入模具中,然后将其置于真空热压烧结炉中进行抽真空,真空度10 Pa以下,经过多次试验后确定了最佳工艺:抽真空至 $1 \times 10^{-3}$  Pa以下,先按速率 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 将温度升至 $600^\circ\text{C}$ 并保温1 h,再按速率 $3^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 将温度升至 $650^\circ\text{C}$ 并保温1 h,之后按速率 $3^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至

$680^\circ\text{C}$ 并保温3 h,最后随炉冷却至室温,期间第一步时控制压力在3 MPa、第二步时控制压力在2 MPa、第三步时控制压力在0.1 MPa(为了防止熔化的Al溢出)、随炉冷却时控制压力在3 MPa。复合材料制备工艺流程如图2所示。

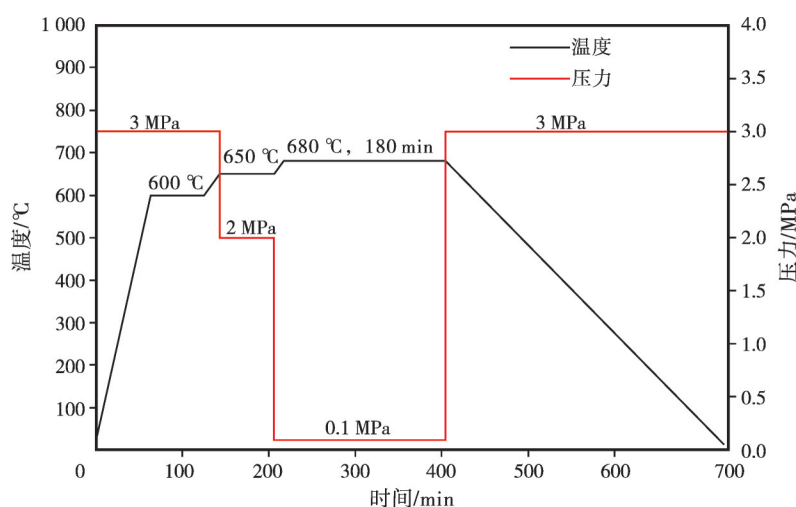


图2 复合材料制备工艺曲线

Figure 2 Composite material preparation process curve

## 2 结果与分析

### 2.1 微观结构分析

对复合材料进行扫描电子显微镜分析(SEM),结果如图3所示。从图3可以清晰的观察到:材料前

半部分为暗层与亮层交替循环的质地均匀的层状结构,后半部分与前半部分不同,为一个整体再加上一个暗层与亮层的结构;从纤维与Al的结合情况可以看到,纤维仍完好无损,且金属Al已经完全熔化后与纤维融合在一起。

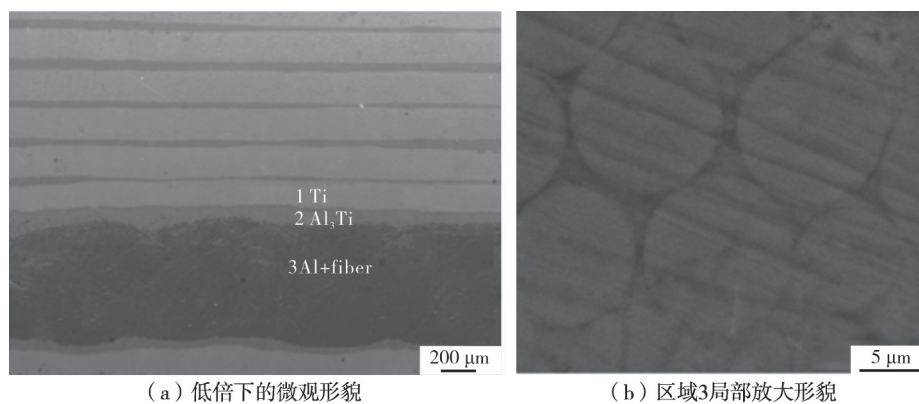


图3 复合材料的SEM照片

Figure 3 SEM images of the composite

对图3(a)中3个区域分别进行了EDS点扫描,其结果列于表1。由表3可知,区域1为Ti层,区域

2为 $\text{Al}_3\text{Ti}$ 层(含有少量Si),区域3为Al+纤维层(含有少量Ti)。

表 1 图 3(a) 中不同区域 EDS 测试结果

Table 1 EDS test results in different areas in Fig.3(a)

| 测试区域 | 化学组成(at%) |       |       |
|------|-----------|-------|-------|
|      | Al        | Ti    | Si    |
| 1    | 0.67      | 99.33 | 0     |
| 2    | 70.29     | 28.03 | 1.68  |
| 3    | 49.20     | 4.71  | 46.09 |

## 2.2 静态压缩测试与分析

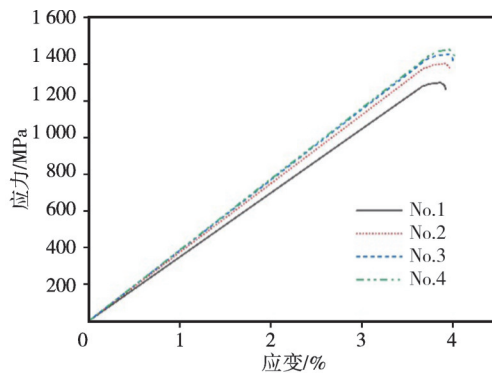
为了探究玻璃纤维体积分数对 CCFR-MIL 复合材料静态压缩性能的影响,本试验设计了 4 种不同玻璃纤维层数堆叠的 CCFR-MIL 复合材料(见表 2),每种为 3 个平行样本,分别沿垂直和平行于叠层

的方向进行静态压缩测试,测试结果取平均值,绘制应力-应变曲线图及最大抗压强度与失效应变柱状图(见图 4)。

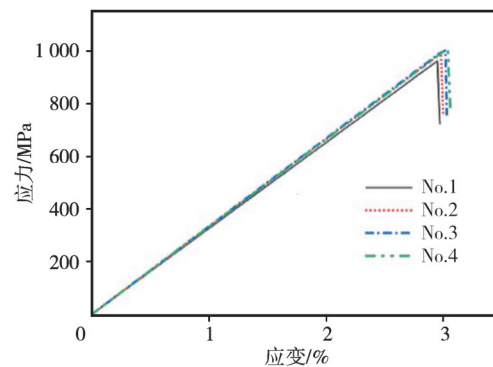
表 2 玻璃纤维层数与玻璃纤维体积分数

Table 2 The fraction of glass fiber layers and glass fiber volume

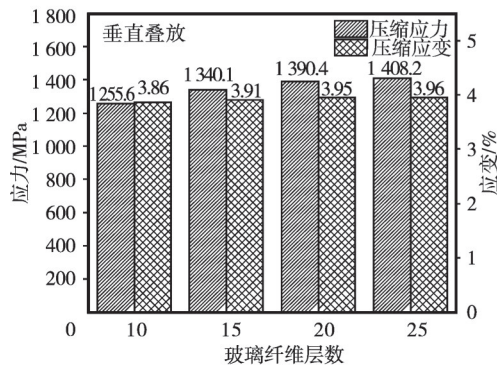
| 序号 | Ti 层数 | Al 层数 | 玻璃纤维层数 | 玻璃纤维体积分数/% |
|----|-------|-------|--------|------------|
| 1  | 11    | 20    | 10     | 29.55      |
| 2  | 11    | 25    | 15     | 35.14      |
| 3  | 11    | 30    | 20     | 38.81      |
| 4  | 11    | 35    | 25     | 41.40      |



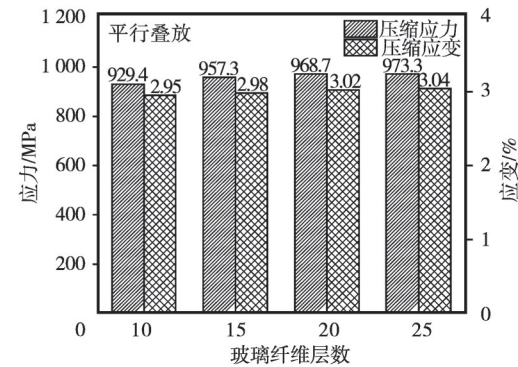
(a) 垂直于叠层的应力-应变曲线图



(b) 平行于叠层的应力-应变曲线图



(c) 垂直于叠层的最大抗压强度与失效应变



(d) 平行于叠层的最大抗压强度与失效应变

图 4 不同玻璃纤维层数制备的 CCFR-MIL 复合材料压缩性能

Figure 4 Compression properties test results of CCFR-MIL composites prepared with different glass fiber layers

从图 4(a)可见:沿垂直于叠层方向测试时,随着玻璃纤维的层数和体积分数的增大,CCFR-MIL 复合材料的压缩应力-应变曲线变化态势基本一致,即弹性变形阶段、弹性屈服阶段、失效阶段;随着玻璃纤维的层数和体积分数的增大,CCFR-MIL 复合材料的抗压强度也在不断提高,当玻璃纤维层数由 10 增加至 15 时 CCFR-MIL 复合材料的抗压强度增

大效果最明显,当玻璃纤维层数由 20 增加至 25 时 CCFR-MIL 复合材料的抗压强度增大效果最不明显。从图 4(b)可见:沿平行于叠层方向测试时,随着玻璃纤维的层数和体积分数的增大,CCFR-MIL 复合材料的压缩应力-应变曲线变化态势基本一致,复合材料未展现出弹性屈服阶段,而是直接失效,这是由于“中心线”的存在,从而导致复合材料容易沿



着中心线处开裂,使CCFR-MIL复合材料横向的抗压强度提升均不明显。从图4(c)可见,沿垂直于叠层方向测试时,随着玻璃纤维的层数和体积分数的增大,CCFR-MIL复合材料的最大抗压强度由1 255.6 MPa提升至1 408.2 MPa,失效应变由3.86%提升至3.96%。从图4(d)可见,沿平行于叠层方向测试时,随着玻璃纤维的层数和体积分数的增大,CCFR-MIL复合材料的最大抗压强度由929.4 MPa提升至973.3 MPa,失效应变由2.95%提升至3.04%。

综上所述,随着玻璃纤维层数与体积分数的增

加,CCFR-MIL复合材料的静态压缩性能有明显的提升,但是其提升效果并不是简单的正相关,而是前期提升效果明显,后期提升效果不明显。

### 2.3 静态拉伸性能测试与分析

为了探究玻璃纤维体积分数对CCFR-MIL复合材料静态拉伸性能的影响,本试验设计了4种不同玻璃纤维层数堆叠的CCFR-MIL复合材料,每种为3个平行样本,沿平行于叠层的方向进行静态拉伸测试,测试结果取平均值,绘制应力-应变曲线图及最大抗拉强度与失效应变柱状图,结果如图5所示。

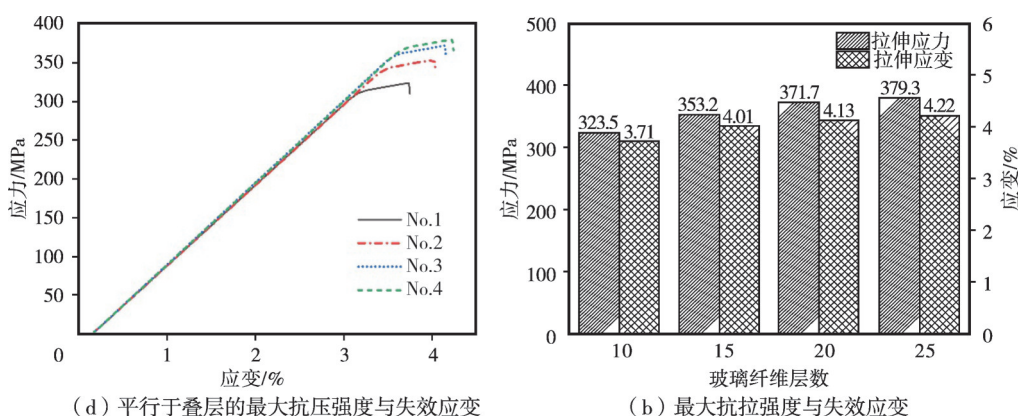


图5 不同玻璃纤维层数制备的CCFR-MIL复合材料拉伸性能测试结果

Figure 5 Tensile properties test results of CCFR-MIL composites prepared with different glass fiber layers

从图5(a)可见:随着玻璃纤维的层数和体积分数的增大,CCFR-MIL复合材料的拉伸应力-应变曲线变化态势基本一致,即呈现弹性变形阶段、弹性屈服阶段、失效阶段;随着玻璃纤维的层数和体积分数的增大,CCFR-MIL复合材料的抗压强度也在不断提高,当玻璃纤维层数由10增加至15时CCFR-MIL复合材料的抗拉强度增大效果最明显,当玻璃纤维层数有20增加至25时CCFR-MIL复合材料的抗拉强度增大效果最不明显。从图5(b)可见,随着玻璃纤维的层数和体积分数的增大,CCFR-MIL复合材料的最大抗拉强度由323.5 MPa提升至379.3 MPa,失效应变由3.71%提升至4.22%。

综上所述,随着玻璃纤维层数与体积分数的增加,CCFR-MIL复合材料的静态拉伸性能有明显的提升,但是其提升效果并不是简单的正相关,而是前期提升效果明显,后期提升效果不明显,这与静态压缩性能测试的结论一致。

### 2.4 玻璃纤维强化机理分析

通过静态压缩性能测试结果与静态拉伸性能测

试结果可知,随着玻璃纤维的层数增加,对复合材料的强化程度在降低。究其原因:裂纹更容易在复合材料的各层的界面处与 $\text{Al}_3\text{Ti}$ 的中心线处产生,玻璃纤维的引入可以承担一部分载荷;复合材料的前半部分为 $\text{Al}_3\text{Ti}$ 与Ti,其中 $\text{Al}_3\text{Ti}$ 为脆性材料、Ti为韧性材料,Ti的引入可以使得复合材料整体韧性有一定的提升;复合材料的后半部分为玻璃纤维与Al,随着玻璃纤维的层数增加到一定程度,其只能有效解决后半部分各层界面处的开裂问题,而无法解决 $\text{Al}_3\text{Ti}$ 的中心线处的开裂问题,最终导致复合材料的整体强度随玻璃纤维的层数增加前期强化程度更大而后期较小。

### 3 结论

(1)利用真空热压烧结工艺,成功将玻璃纤维以一种新型方式扦插入复合材料。复合材料前半部分,Ti- $\text{Al}_3\text{Ti}$ 之间界面结合良好且完整;复合材料后半部分,宏观看玻璃纤维-Al之间已形成一个整体,微观看玻璃纤维组织未被破坏且与金属Al融合

良好。

(2)静态压缩性能测试中,随着玻璃纤维层数(即玻璃纤维体积分数)的增加,CCFR-MIL 复合材料的静态压缩性能有明显的提升,但是其提升效果并不是简单的正相关,而是前期提升效果明显,后期提升效果不明显。玻璃纤维层数由 10 层增加至 15 层时,垂直于叠层方向的最大抗压强度提升了 84.5 MPa、失效应变提升了 0.05%,平行于叠层方向的最大抗压强度提升了 27.9 MPa、失效应变提升了 0.03%;玻璃纤维层数由 15 层增加至 20 层时,垂直于叠层方向的最大抗压强度提升了 50.3 MPa、失效应变提升了 0.04%,平行于叠层方向的最大抗压强度提升了 11.4 MPa、失效应变提升了 0.04%;玻璃纤维层数由 20 层增加至 25 层时,垂直于叠层方向的最大抗压强度提升了 17.8 MPa、失效应变提升了 0.01%,平行于叠层方向的最大抗压强度提升了 4.6 MPa、失效应变提升了 0.02%。

(3)静态拉伸性能测试中,随着玻璃纤维层数(即玻璃纤维体积分数)的增加,CCFR-MIL 复合材料的静态拉伸性能有明显的提升,但是其提升效果并不是简单的正相关,而是前期提升效果明显,后期提升效果不明显。玻璃纤维层数由 10 层增加至 15 层时,复合材料的最大抗拉强度提升了 29.7 MPa、失效应变提升了 0.30%;玻璃纤维层数由 15 层增加至 20 层时,复合材料的最大抗拉强度提升了 18.5 MPa、失效应变提升了 0.12%;玻璃纤维层数由 20 层增加至 25 层时,复合材料的最大抗拉强度提升了 7.6 MPa、失效应变提升了 0.09%。

### 参考文献:

- [1] 徐涛. 金属层状复合材料的发展与应用[J]. 轻合金加工技术, 2012(6):7-10.
- [2] 郭鑫, 马勤, 季根顺, 等. 金属间化合物基叠层复合材料研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(6):66-69.
- [3] YUAN C, ROOZEN N B, BERGSMA O, et al. Experimental-numerical study and optimization of sound insulation of a finite composite cylinder[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2013, 37(2): 250-259.
- [4] KARTHEEK S S M, VAMSI K V, RAVISANKAR B, et al. Microstructural and nanoindentation studies across diffusion-bonded interfaces in Al/Cu metal intermetallic laminates [J]. Procedia Materials Science, 2014, 6(Supplement C):709-715.
- [5] 程玉洁, 果春焕, 周培俊, 等. 金属间化合物层状复合材料 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 制备技术及其研究进展[J]. 中国材料进展, 2015, 34(4):317-325.
- [6] VECCHIO K S, JIANG F. Fracture toughness of ceramic fiber reinforced metallic intermetallic laminate (CFR-MIL) composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 649(Supplement C):407-416.
- [7] SHIRVANIMOUGHADDAM K, HAMIM S U, KARBALAEI AKBARI M, et al. Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 92(Supplement C): 70-96.
- [8] HAN Y, LIN C, HAN X, et al. Fabrication, interfacial characterization and mechanical properties of continuous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic fiber reinforced Ti/Al<sub>3</sub>Ti metal-intermetallic laminated (CCFR-MIL) composite [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 688: 338-345.
- [9] YU W, ZHU K, AMAN Y, et al. Bio-inspired design of Si CF-reinforced multi-layered Ti-intermetallic composite[J]. Materials & Design, 2016, 101:102-108.
- [10] HAN Y, JIANG F, LIN C, et al. Microstructure and mechanical properties of continuous ceramic SiC and shape memory alloy NiTi hybrid fibers reinforced Ti-Al metal-intermetallic laminated composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 729:1145-1155.
- [11] WANG E, GUO C, ZHOU P, et al. Fabrication, mechanical properties and damping capacity of shape memory alloy NiTi fiber-reinforced metal-intermetallic laminate (SMAFR-MIL) composite [J]. Materials & Design, 2016, 95:446-454.
- [12] ADHARAPURAPU R R, VECCHIO K S, JIANG F, et al., Effects of ductile laminate thickness, volume fraction, and orientation on fatigue-crack propagation in Ti-Al<sub>3</sub>Ti metal-intermetallic laminate composites [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005, 36A: 1595-1608.
- [13] BLOYER D R, RAO V K T, RITCHIE R O. Fracture toughness and R-curve behavior of laminated brittle-matrix composites [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29A: 2483-2496.

## Study on the Method and Properties of Glass Fiber Reinforced Ti/Al<sub>3</sub>Ti Laminate Composites

ZHU Qingxuan<sup>1</sup>, LIU Xudong<sup>1\*</sup>, WANG Xingan<sup>1</sup>, SUN Xudong<sup>2</sup>

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The Ti/Al<sub>3</sub>Ti laminated composites was successfully strengthened with glass fibers using a new material arrangement (the first half of the composite material is a Ti/Al<sub>3</sub>Ti laminated composite material, and the second half is inserted between the Ti/Al<sub>3</sub>Ti layers), using a vacuum hot pressing sintering process. Under the same process conditions, the influence of the number of layers of glass fibers on the static compression properties and static tensile properties of composite materials was explored by varying the number of layers of glass fibers (the volume fraction of glass fibers). The results show that with the increase of the number of glass fiber layers, the static compression properties and static tensile properties of the composite materials are improved, but they are not simply positive correlation, but the improvement effect is obvious in early stage and not obvious in the later stage. At the same time, the static compression performance of the composites is improved more significantly when tested along the direction perpendicular to the lamination than along the direction parallel to the lamination.

**Keywords:** glass fibers; Ti/Al<sub>3</sub>Ti laminated composites; static compression properties; static tensile properties

(学术编辑:黎小辉)