

微尺度纤维/金属混杂层板的低约束拉伸变形性能

王 耀^{1,2,3}, 宋国鹏¹, 杨 超¹, 魏 强¹, 赵丽滨¹, 胡 宁¹, 郎利辉⁴

(1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401; 2. 清华大学苏州汽车研究院 (相城), 江苏 苏州 215134;

3. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

4. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 为了研究微尺度下纤维金属层板的变形规律, 以TA1钛合金板和碳纤维增强预浸料为原材料, 制备了不同类型的微尺度TiGr层板, 并通过单向拉伸试验研究了TiGr层板的变形性能。通过改变制备工艺、层板结构、金属层厚度以及设置不同的加载速度, 得到应力-应变曲线。对各种情况下的抗拉强度和伸长率进行对比分析, 得到了试验变量对TiGr层板变形过程的影响规律, 并分析了层板的断裂失效形式和断口宏观形貌。最终得出: 采用低约束工艺制备, 加载速度为 $3\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 、金属层厚度为 0.04 mm 情况下, TiGr层板的变形性能最好, 其抗拉强度为 229.45 MPa 、伸长率为 27.8% 。

关键词: 纤维金属层板; TiGr层板; 微尺度; 单向拉伸; 变形性能; 低约束

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.010

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0063-09

Low constraint tensile deformation properties on micro scale fiber/metal hybrid laminates

Wang Yao^{1,2,3}, Song Guopeng¹, Yang Chao¹, Wei Qiang¹, Zhao Libin¹, Hu Ning¹, Lang Lihui⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Suzhou Automotive Research Institute (Xiangcheng), Tsinghua University, Suzhou 215134, China;

3. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the deformation law of fiber metal laminates at micro scale, for TA1 titanium alloy plate and carbon fiber reinforced prepreg, the different types of microscale TiGr laminates were prepared, and the deformation properties of TiGr laminates were studied by uniaxial tensile test. Then, the stress-strain curves were obtained by changing the preparation process, laminate structure and metal layer thickness and setting different loading speeds. Furthermore, the tensile strength and elongation under various conditions were compared and analyzed, and the influence law of test variables on the deformation process of microscale TiGr laminates was obtained to analyze the fracture failure forms of laminates and the macro morphology of fracture. Finally, it is concluded that the deformation performance of TiGr laminates prepared by low constraint process is the best when the loading speed is $3\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ and the metal layer thickness is 0.04 mm , and its tensile strength is 229.45 MPa and the elongation is 27.8% .

Key words: fibre metal laminates; TiGr laminates; microscale; uniaxial tensile; deformability; low constraint

纤维金属层板是一种由多层金属薄板与纤维增

强树脂预浸料在必要的物理化学处理后交替铺设, 并经过一定固化工艺后得到的超混杂材料。其独特的结构使其拥有优异的耐腐蚀性、抗冲击性、抗湿性、高损伤容限、良好的阻燃性以及轻质性能^[1-2]。此外, 通过改变层板中金属和复合材料的铺层结构、纤维方向和厚度, 还可以最大限度地优化层板的设计^[3-5], 因此, 纤维金属层板在航空工业中得到了广泛应用, 是大型飞机机身、蒙皮、壁板、整流板等薄壁构件的主要用材之一。

收稿日期: 2022-05-04; 修订日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52005153); 中国博士后科学基金资助项目 (2022T150372, 2021M701962); 中央引导地方科技发展项目 (206Z1803G); 天津市“项目+团队”重点培养专项 (XC202052); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题基金 (P2021-012)

作者简介: 王 耀 (1986-), 男, 博士, 副教授

E-mail: bhwy2014@126.com

目前，微制造领域逐渐成为研究的热点，受尺度效应的影响，传统的宏观成形理论不能通过相似的缩放方式应用至微成形领域^[6-9]，其力学性能及失效机制更为复杂^[10-12]，需要深入探讨。微细制造尺度效应的定量描述可分为 3 类：（1）微尺度零件的厚度较薄，成形时会提前颈缩，为材料尺度效应；（2）零件接触面积减小，摩擦因数增强，为摩擦尺度效应^[13]；（3）零件表面的微孔洞减少，断裂韧性减弱，为失效尺度效应。多因素的影响和复杂的机制使尺度效应成为了研究的热点与难点。微尺度纤维金属层板具有良好的抗冲击、耐疲劳等性能，在微机电系统中具有广泛的应用价值，所以，微尺度纤维金属层板力学性能的研究具有一定意义。

纤维金属层板的研究主要集中在新型层板制备、力学性能测试、损伤失效预测理论和层板构件的成形及应用等方面。Cortes P 等^[14]制造了具有更高弹性模量（96 GPa）和拉伸强度（1100 MPa）的 TiGr 层板。Jin K 等^[15]在不同温度下对 Ti/CFRP 纤维金属层板进行了疲劳裂纹扩展速率试验，发现界面强度和抗拉强度是影响高温下层板疲劳失效的主要因素，由于 Ti/CFRP 界面的弱化，分层面积随温度升高呈指数增长，并且分层总是在钛层的微裂纹上产生。李磊等^[16]制备了低约束的 GLARE 层板，通过单向拉伸试验得到了固化与低约束制备的纤维金属层板的应力-应变曲线、屈服强度、抗拉强度和伸长率，发现低约束制备的 GLARE 层板的成形性能更好。目前，尺度效应对于微尺度纤维金属层板影响的研究尚未广泛开展。Wang Y 等^[17]对微尺度热塑性碳纤维增强钛合金板的制备、固化及成形进行了研究，提出了一种集成的超声辅助制备成形固化方法以制备超薄 Ti/CF/PPS 层板。Mckown S^[18]发现纤维金属层板的拉伸和弯曲行为遵循几何比例定律，通过进行单向拉伸和冲击试验，发现目标偏转、冲击力和损伤阈值能量等响应参数符合比例定律，且在低速状态下，速率并不会影响受冲击的板和梁的峰值载荷和阈值能量。Carrillo J G 等^[19]通过单向拉伸试验，研究了基于铝合金、自增强聚丙烯复合材料及用作层间粘合剂的聚丙烯膜制备的纤维金属层板在 3 种不同缩放方法下的尺度效应，结果发现，在厚度和体积标度样品中，随着标度尺寸的增加，抗拉强度小幅下降，而在面积标度的样品中呈现相反的现象。Hallett S R 等^[20]通过开孔拉伸强度试验，研究了微尺度纤维金属层板的铺层顺序、铺层角度

（0°、45°、90°）及纤维层厚度对材料性能的影响，发现随着纤维层厚度的增加，材料强度显著降低，并且失效形式也从纤维断裂主导变为分层主导。Kashani M H 等^[21]为了研究尺度效应对纤维金属层板的影响，对 1050 铝、单向玻璃纤维环氧树脂组成的两种尺寸（厚度为 2.6 和 5.2 mm）的纤维金属层板进行了单向拉伸试验和三点弯曲试验，通过对比纤维断裂、铝断裂、复合层之间的分层、金属和复合层之间的脱粘，发现两个试样的弹性模量、最大应变、屈服强度和抗拉强度等力学性能大致相近。

上述研究已经证明了纤维金属层板几何尺寸对其拉伸力学性能及变形过程有较大影响，但尺度效应对微尺度纤维金属层板变形机理的影响尚不清晰。本文为进一步研究微尺度纤维金属层板的变形性能，以 TA1 钛合金和碳纤维增强预浸料为原材料，制备了不同金属层厚度、铺层结构以及层间约束状态的热固性碳纤维增强钛合金层板，并通过进行不同加载速度的单向拉伸试验得到多组数据，对比了各类层板的力学性能及断裂失效形式，分析了应力、应变变化规律及抗拉强度、伸长率等影响变形的关键因素，得到了各试验变量对关键因素的影响规律。本文旨在进一步研究微尺度纤维金属层板的拉伸变形性能，为今后微尺度纤维金属层板的应用及研究提供一定的经验借鉴。

1 试验设计

1.1 试验材料

制备不同种类的 TiGr 层板，其中钛合金层板选用 TA1 钛合金，提供了 0.010、0.025 和 0.040 mm 这 3 种厚度，其化学成分均相同，如表 1 所示。预浸料层为从复材易购（北京）科技有限公司购买的 GXC120-10T/200-2/2-3k 碳纤维机织物预浸料，厚度为（0.2±0.02）mm，其物理及化学性能如表 2 所示，固化曲线如图 1 所示。

表 1 TA1 钛合金的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of TA1 titanium alloy
（%，mass fraction）

元素	Ti	Fe	C	N	H	O	其他元素
标准值	基体	0.250	0.100	0.030	0.015	0.200	单个<0.100
测量值	基体	0.026	0.011	0.003	0.005	0.005	总和<0.400

表 2 预浸料的物理和化学性能参数
Table 2 Physical and chemical property parameters of prepreg

参数	数值	测试方法
树脂含量/%	38.0±3.0	HB 7736.5 ^[22]
纤维单位面积质量/(g·m ²)	200±10	HB 7736.3 ^[23]
预浸料单位面积质量/(g·m ²)	323±18	HB 7736.2 ^[24]
挥发物含量/%	≤1.0	HB 7736.4 ^[25]

1.2 试验方法

本次试验制备的层板试件采用固化和低约束两种工艺：固化工艺是将钛合金板材进行表面处理后，将所选的碳纤维预浸料铺贴在层板中央，然后在真空袋中以-0.1 MPa 的真空度并根据所选预浸料进行加温固化；而低约束工艺是在层板进行铺贴后，在真空袋中加压 0.5 h 后直接进行试验^[16]。真空固化工艺试验设备如图 2 所示。

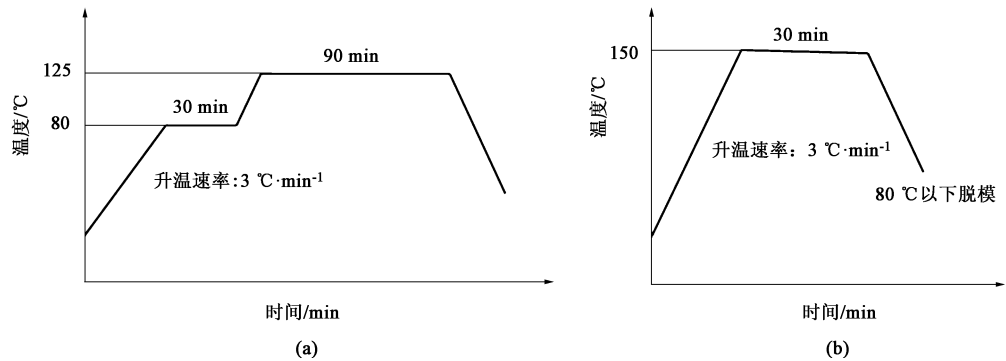


图 1 两种预浸料的固化曲线
(a) 中温固化曲线 (b) 高温固化曲线
Fig. 1 Curing curves of two prepregs
(a) Curing curve at medium temperature (b) Curing curve at high temperature



图 2 真空固化工艺试验设备
Fig. 2 Test equipment of vacuum curing process

在微尺度情况下，由于尺度效应的影响，材料的性能与传统宏观条件不同，因此，传统的拉伸试样设计及尺寸不适用于微尺度下材料力学性能的测量要求^[26]。由于目前未有针对微米级尺度材料的拉伸试样的标准，本文参考现有文献^[26]，设计的微拉伸试样尺寸如图 3 所示。该试样为哑铃型，标距为 20 mm，宽度为 5 mm，圆角半径为 20 mm，钛合金层的轧制方向为试件的拉伸方向。通过控制变量得到不同类型的纤维金属层板，层间约束方式分为固化和低约束两种，可选钛合金板的厚度为 0.040、0.025 和 0.010 mm，层板

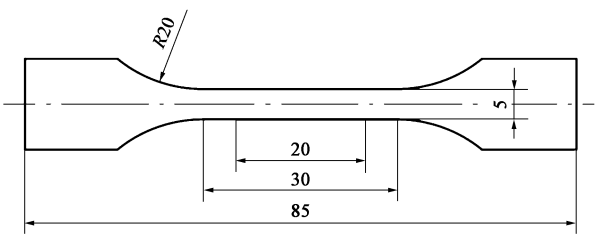


图 3 拉伸试样的几何尺寸
Fig. 3 Geometric dimensions of tensile specimen

结构设计为 2+1、3+2 和 4+3 (2+1 层板结构表示铺层方式为 TA1 钛合金/碳纤维预浸料/TA1 钛合金，其他层板结构同理)，并设置 3、6 和 12 mm·min⁻¹ 的 3 组不同的加载速度，以探究加载速度对微尺度纤维金属层板拉伸性能的影响，试验中层板的制备方案设计如表 3 所示。以低约束、层板结构为 2+1、金属层厚度为 0.040 mm、加载速度为 3 mm·min⁻¹ 为基础参考组，试验中测定了不同情况下纤维金属层板的抗拉强度和伸长率并进行对比。为方便记录与分类，现仿照标准 TiGr 层板^[27]，对本次试验样品进行编号，例如：TiGr-2/1-0.040-3-SC 表示层板结构为 2+1、金属层厚度为 0.040 mm、加载速度为 3 mm·min⁻¹，采用低约束工艺制备。

表 3 试验中层板制备方案

Table 3 Preparation schemes of laminates in test

编号	层板结构	金属层厚度/mm	加载速度/(mm·min ⁻¹)	层间约束方式
TiGr-2/1-0.040-3-S	2+1	0.040	3	固化
TiGr-2/1-0.040-6-S	2+1	0.040	6	固化
TiGr-2/1-0.040-12-S	2+1	0.040	12	固化
TiGr-2/1-0.040-3-SC	2+1	0.040	3	低约束
TiGr-2/1-0.040-6-SC	2+1	0.040	6	低约束
TiGr-2/1-0.040-12-SC	2+1	0.040	12	低约束
TiGr-3/2-0.040-3-SC	3+2	0.040	3	低约束
TiGr-4/3-0.040-3-SC	4+3	0.040	3	低约束
TiGr-2/1-0.025-3-SC	2+1	0.025	3	低约束
TiGr-2/1-0.025-6-SC	2+1	0.025	6	低约束
TiGr-2/1-0.025-12-SC	2+1	0.025	12	低约束
TiGr-2/1-0.010-3-SC	2+1	0.010	3	低约束
TiGr-2/1-0.010-6-SC	2+1	0.010	6	低约束
TiGr-2/1-0.010-12-SC	2+1	0.010	12	低约束

表 4 拉伸试验结果

Table 4 Results of tensile test

编号	抗拉强度/MPa	伸长率/%
TiGr-2/1-0.040-3-S	377.32	7.9
TiGr-2/1-0.040-6-S	460.35	9.2
TiGr-2/1-0.040-12-S	473.27	11.2
TiGr-2/1-0.040-3-SC	229.45	27.8
TiGr-2/1-0.040-6-SC	265.73	22.6
TiGr-2/1-0.040-12-SC	292.23	22.3
TiGr-3/2-0.040-3-SC	402.64	28.0
TiGr-4/3-0.040-3-SC	543.83	23.3
TiGr-2/1-0.025-3-SC	260.75	22.5
TiGr-2/1-0.025-6-SC	310.22	14.1
TiGr-2/1-0.025-12-SC	369.00	15.1
TiGr-2/1-0.010-3-SC	—	—
TiGr-2/1-0.010-6-SC	—	—
TiGr-2/1-0.010-12-SC	—	—

2 结果及讨论

2.1 制备工艺对试件变形的影响

表 4 为拉伸试验结果，其中 TiGr-2/1-0.010-3-SC、TiGr-2/1-0.010-6-SC 和 TiGr-2/1-0.010-12-SC 这 3 组试件的抗拉强度和伸长率数据过低，不作为对比参考。图 4 为采用固化和低约束两种工艺制备的金属层厚度为 0.040 mm、层板结构为 2+1 的纤维金属层板，通过设置 3 种不同的加载速度进行单向拉伸试验得到的应力-应变曲线。图 5 为固化和低约束两种工艺制备的层板的抗拉强度和伸长率柱形图。对比固化和低约束两种层间约束方式下不同加载速度的应力-应变曲线可以看出，在同一加载速度下，低约束工艺制备的纤维金属层板较固化工艺制备的纤维金属层板的抗拉强度更低(相同加载速度下抗拉强度减小了

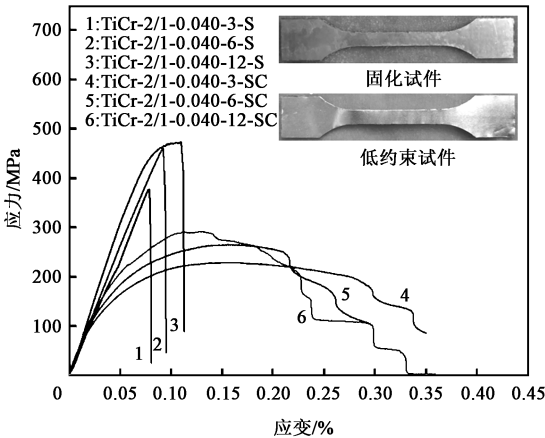


图 4 不同层间约束方式和加载速度下的应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves of different interlayer restraint modes and loading speeds

100~200 MPa)，而伸长率更高(相同加载速度下抗拉强度增加了 10%~20%)。

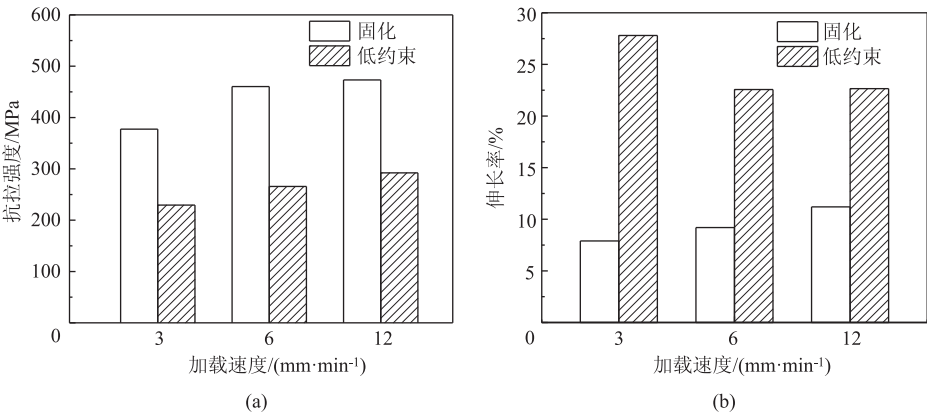


图 5 不同层间约束方式和加载速度下的抗拉强度 (a) 及伸长率 (b) 柱形图

Fig. 5 Column diagrams of tensile strength (a) and elongation (b) under different interlayer restraint modes and loading speeds

由此可以得出: 在成形时, 低约束工艺所需的成形力更小, 同时能达到更大的伸长率, 更有利于成形。在加载速度不同的情况下, 固化工艺制备的纤维金属层板呈现出抗拉强度和伸长率随加载速度的增加而增大的现象, 但随着加载速度的增大, 抗拉强度和伸长率的增加量逐渐减小。低约束工艺制备的纤维金属层板较固化工艺得到的应力-应变曲线相对平滑, 在加载速度较低 ($3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 时呈现出较低的抗拉强度 (229.45 MPa) 和较高的伸长率 (27.8%), 随着加载速度的增大, 层板的抗拉强度增大、伸长率降低。当加载速度为 6 和 $12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 抗拉强度和伸长率分别为 265.7 和 292.23 MPa , 22.6% 和 22.3% , 可以看出, 加载速度为 $12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 抗拉强度略高、伸长率略小, 这说明随着加载速度的增大, 抗拉强度的增加量和伸长率的减小量均会逐渐减小。

图 6 为拉伸后试件对比图。其中, 图 6a 为不同制备工艺的对比, 结合图 4 中试样 TiGr-2/1-0.040-3-S 的应力-应变曲线, 经分析得出, 由于固化之后金属和碳纤维的粘结强度大大提高, 碳纤维预浸料和金属不会滑动, 直至达到碳纤维的抗拉极限, 此

时层板的抗拉强度达到最大, 之后碳纤维断裂, 应力急剧下降^[28]。图 4 中 TiGr-2/1-0.040-3-SC 代表的曲线为低约束工艺制备层板的应力-应变曲线, 该曲线较为平滑, 无应力突变。固化工艺制备的 TiGr 层板主要是由纤维承受载荷, 其主要失效形式为碳纤维断裂, 断口较为平整, 断裂方向与拉伸方向垂直, 其断裂位置不同于常规纤维金属层板, 断裂出现在圆角与直线的相切区域, 这是由于在拉伸试验期间存在沿层板边缘发展的分层平面, 这种损伤导致了拉伸过程中出现应力集中^[19]; 在图 6a 的局部放大图中可以看出, 本次试验采用的碳纤维预浸料中间段仅有 $2.5 \sim 3.0$ 根纬纱, 其抵抗变形的能力较弱, 断裂区域处于经纱与纬纱的交接处, 且编织预浸料中的经、纬纱均产生了一定弯曲, 降低了材料的面内力学性能^[29], 导致层板在该处产生断裂。低约束工艺制备的 TiGr 层板主要是由金属承受载荷, 其主要失效形式为金属断裂, 断裂方向与拉伸方向呈一定角度, 这是受到了金属层板与纤维预浸料间摩擦力的影响。图 6b 为低约束工艺制备的层板在不同加载速度下的断裂形式对比, 可见在不同加载速度下, TiGr 层板的断裂形式无较大差异。

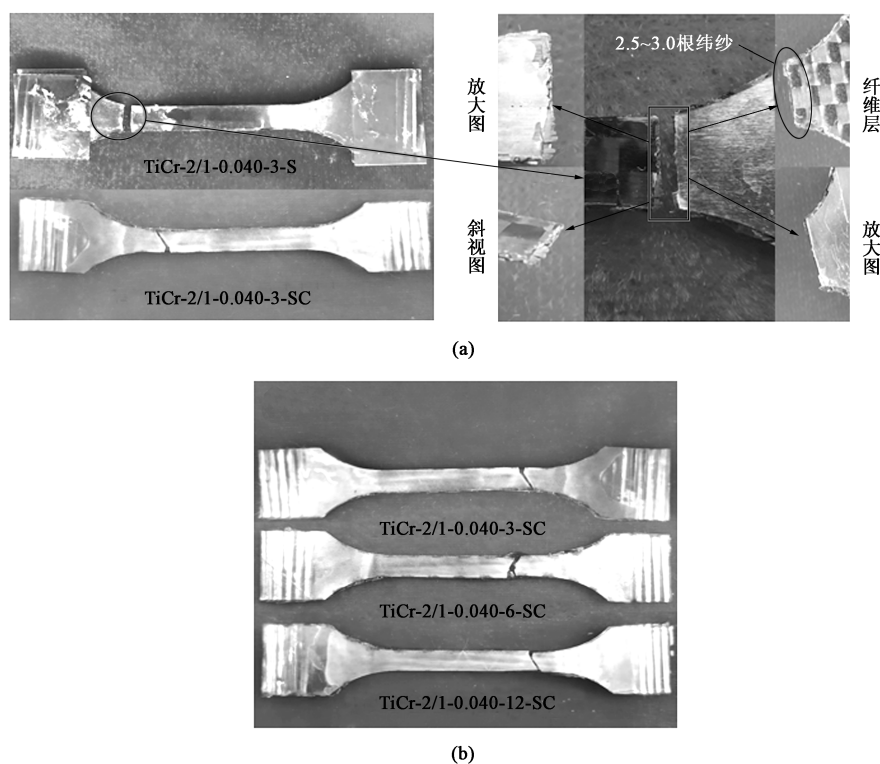


图 6 拉伸后试件对比

(a) 不同制备工艺 (b) 不同加载速度

Fig. 6 Comparison of samples after stretching

(a) Different preparation processes (b) Different loading speeds

2.2 层板结构对试件变形的影响

图7为采用低约束工艺制备的金属层厚度为0.040 mm, 层板结构分别为2+1、3+2和4+3的纤维金属层板, 设置加载速度为 $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时得到的应力-应变曲线及抗拉强度和伸长率的柱形图。通过图7a可以看出, 随着铺层结构的变化, 即随着预浸料和金属板数量的增加, 抗拉强度明显增大, (层板结构为2+1时抗拉强度为229.45 MPa, 层板结构为3+2时抗拉强度为402.64 MPa, 层板结构为4+3时抗拉强度为543.83 MPa); 比较3组试验的伸长率发现, 2+1结构层板的伸长率(27.8%)和

3+2结构层板的伸长率(28.0%)相差不大, 而4+3结构层板的伸长率(23.3%)明显小于前两组。这可能是由于随着金属板和纤维预浸料数量的增加, 层间摩擦力增大, 而最外层承受的来自层板内部的摩擦力最大, 使得层板提前断裂, 伸长率降低。由此可以得出: 在成形时, 2+1结构的纤维金属层板所需的成形力最小, 同时能达到更大的伸长量, 更有利于成形; 3+2结构的纤维金属层板能达到最大的伸长率, 但其抗拉强度明显高于2+1结构层板; 4+3结构的纤维金属层板的抗拉强度最大, 且伸长率明显小于前两者, 最不利于层板成形。

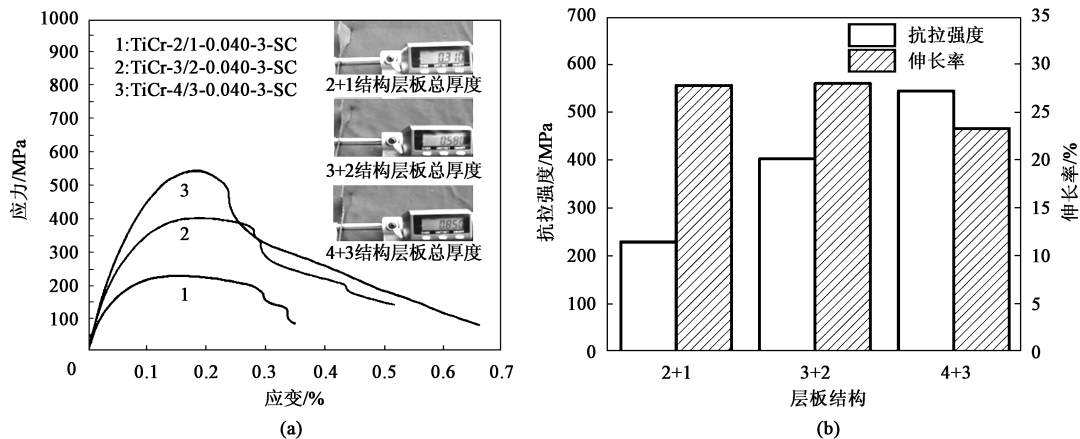


图7 不同层板结构下的应力-应变曲线 (a) 以及抗拉强度和伸长率柱形图 (b)

Fig. 7 Stress-strain curves (a) and column diagrams of tensile strength and elongation (b) for different laminate structures

图8为不同层板结构拉伸后试件的对比图, 可见3种情况下的断裂大致处于相同位置且断裂方向均与拉伸方向呈一定角度, 但3+2结构和4+3结构的层板均产生了不同程度的层间滑移, 且4+3结构的层间滑移现象更为明显, 这是由于多层结构TiGr层板在单向拉伸试验过程中会产生多次断裂, 并且低约束制备的TiGr层板的金属层和纤维预浸料层的粘结强度较低, 随着金属层和纤维预浸料层数量的增加, 层板内部的摩擦力增大, 使得拉伸过程中产生层间滑移。

2.3 金属层厚度对试件变形的影响

当金属层厚度为0.010 mm时, 由于尺度效应的影响, 金属层呈“越小越弱”的特点, 即由于金属层过薄, 金属能承受的力过小, 此时钛合金层板与碳纤维预浸料层界面的摩擦力可能大于钛合金板所能承受的力, 导致金属层过早发生断裂, 试验现象如图9a所示。单向拉伸得到的应力-应变曲线如图9b所示, 此种情况下难以得出纤维金属层板的抗拉强度和伸长率, 所以, 本次试验中金属层厚度为0.010 mm时得

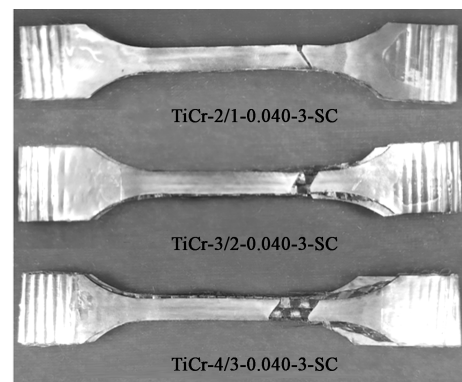


图8 不同层板结构的试件拉伸结果对比

Fig. 8 Comparison of tensile results for specimens with different laminate structures

出的各组数据未统计抗拉强度和伸长率, 且不与其他组数据进行对比, 仅用来做适当的参考。

图10为采用低约束工艺制备的金属层厚度分别为0.040和0.025 mm、层板结构为2+1的纤维金属层板, 通过设置3种不同的加载速度来进行单向拉伸试验得到的应力-应变曲线。图11为两种工艺制备

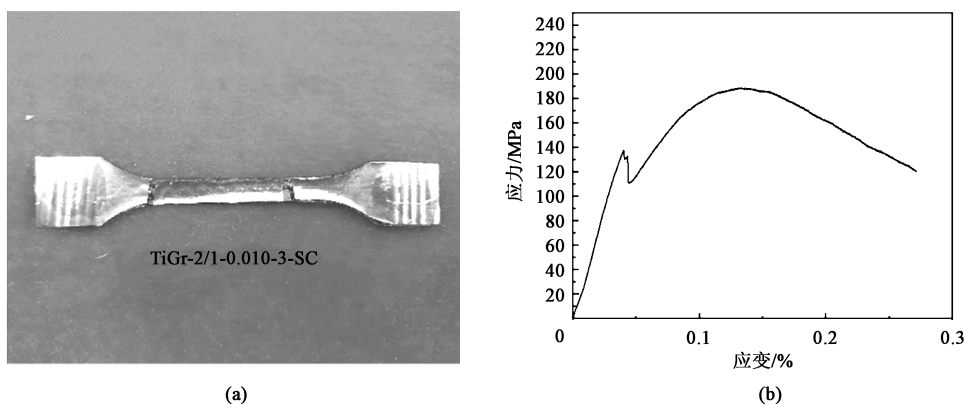


图 9 金属层提前断裂 (a) 和单向拉伸试验得到的应力-应变曲线 (b)

Fig. 9 Early fracture of metal layer (a) and stress-strain curve obtained by uniaxial tensile test (b)

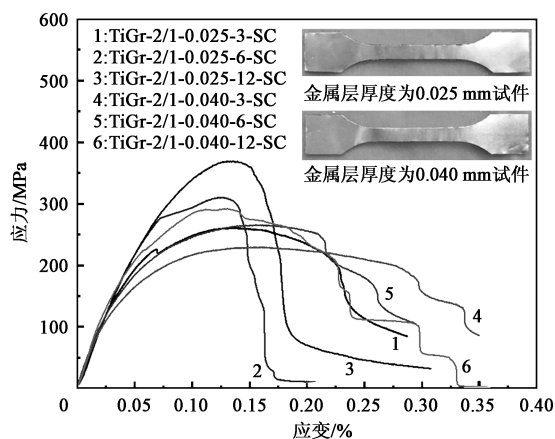


图 10 不同金属层厚度和加载速度下的应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curves under different metal layer thicknesses and loading speeds

的层板的抗拉强度和伸长率柱形图。对比不同金属层厚度下、不同加载速度的应力-应变曲线可以看出, 在加载速度相同的情况下, 金属层厚度为 0.025 mm

时的纤维金属层板的抗拉强度普遍高于金属层厚度为 0.040 mm 时的纤维金属层板 (相同加载速度下抗拉强度增加 40~80 MPa), 这一现象在加载速度为 $12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时尤为明显, 两者的差值达到了 76.77 MPa, 这可能是受尺寸效应的影响。当金属层厚度 (T) 和晶粒尺寸 (D) 比 $T/D < 1$ 时, 随着 T/D 的减小, 抗拉强度增大^[30]; 金属层厚度为 0.025 mm 时的纤维金属层板的伸长率普遍低于金属层厚度为 0.040 mm 时的纤维金属层板 (相同加载速度下伸长率减小 5%~9%), 两种情况下伸长率差值最大为 8.45%, 出现在加载速度为 $6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时。由此可以得出: 在成形时, 金属层厚度为 0.040 mm 时所需的成形力更小, 同时能达到更大的伸长量, 更有利于成形。在加载速度不同的情况下: 金属层厚度为 0.025 和 0.040 mm 时展现出的抗拉强度和伸长率的规律相同, 均呈现出随着加载速度的增大, 抗拉强度增大、伸长率减小的现象。

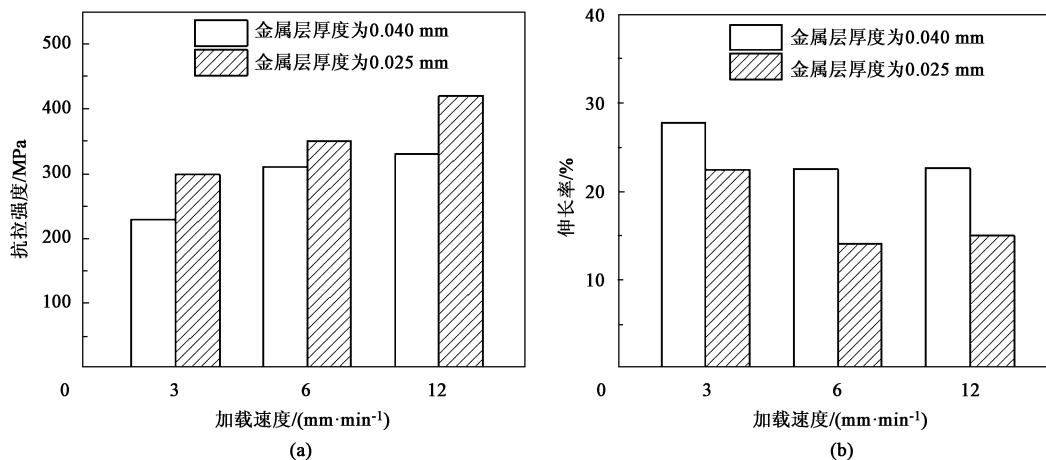


图 11 不同金属层厚度和加载速度下的抗拉强度 (a) 及伸长率 (b) 柱形图

Fig. 11 Column diagrams of tensile strength (a) and elongation (b) under different metal layer thicknesses and loading speeds

图 12 为不同金属层厚度试件拉伸后的对比图, 其中金属层厚度为 0.010 mm 时的 TiGr 层板的情况较为特殊, 上文已做解释, 这里不再赘述, 金属层厚度为 0.025 和 0.040 mm 时的 TiGr 层板的断裂大致处于同一位置且断裂方向均与拉伸方向呈一定角度。

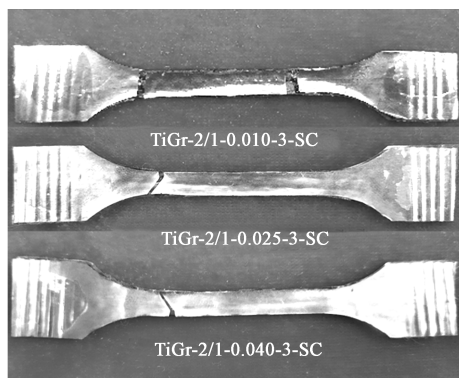


图 12 不同金属层厚度试件的拉伸结果对比

Fig. 12 Comparison of tensile results for specimens with different metal layer thicknesses

3 结论

(1) 相同加载速度、金属层厚度和层板结构下, 低约束工艺制备的 TiGr 层板具有更低的抗拉强度和更高的伸长率, 更利于成形。

(2) 相同金属层厚度和铺层结构情况下, 固化工艺制备的 TiGr 层板的抗拉强度和伸长率均随着加载速度的增大而增大, 低约束工艺制备的 TiGr 层板随着加载速度的增加, 抗拉强度增大, 伸长率减小。

(3) 相同加载速度、金属层厚度和制备工艺下, 随着铺层结构的增加, 层板的抗拉强度增大, 伸长率减小, 2+1 结构的层板最利于成形。

(4) 相同加载速度、层板结构和制备工艺下, 金属层厚度为 0.040 mm 时的 TiGr 层板较金属层厚度为 0.025 mm 时的 TiGr 层板拥有更低的抗拉强度和更高的伸长率, 更利于成形。

(5) 制备工艺是影响 TiGr 层板的断裂失效形式的主要因素, 其次是层板结构, 而金属层厚度、加载速度对断裂失效形式的影响不大。

参考文献:

- [1] Sun J, Daliri A, Lu G, et al. Tensile failure of fibre-metal-laminates made of titanium and carbon-fibre/epoxy laminates [J]. Materials & Design, 2019, 183: 108139.
- [2] Lin Y, Cheng L, Li H, et al. Interlaminar failure behavior of Glare laminates under double beam five-point-bending load [J]. Composite Structures, 2018, 201: 79–85.
- [3] Kai J A, Hao W B, Jie T, et al. Mechanical analysis and progressive failure prediction for fibre metal laminates using a 3D constitutive model [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 124: 105490–105490.
- [4] Hu Y X, Zheng X W, Wang D Y, et al. Application of laser peen forming to bend fibre metal laminates by high dynamic loading [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226: 32–39.
- [5] Mamalis D, Obando W, Koutsos V, et al. Novel thermoplastic fibre-metal laminates manufactured by vacuum resin infusion: The effect of surface treatments on interfacial bonding-sciencedirect [J]. Materials & Design, 2019, 162: 331–344.
- [6] Vollertsen F, Hu Z, Niehoff H S, et al. State of the art in microforming and investigations into micro deep drawing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151 (1–3): 70–79.
- [7] Engel U, Eckstein R. Microforming-from basic research to its realization [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125–126: 35–44.
- [8] Raulea L V, Goijaerts A M, Govaert L E, et al. Size effects in the processing of thin metal sheets [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 115 (1): 44–48.
- [9] Krishnan N, Zhong W, Lu H, et al. Microforming: Experimental investigation of the extrusion process for micropins and its numerical simulation using RKEM [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2004, 126 (4): 313–316.
- [10] 刘芳, 彭林法, 来新民. 基于尺度效应的微细薄板本构模型的建立 [J]. 材料科学与工艺, 2008, (1): 31–33.
- [11] Liu F, Peng L F, Lai X M. Constitutive model of micro sheet metal based on the size effect [J]. Materials Science and Technology, 2008, (1): 31–33.
- [12] 张玲, 吴杰峰, 丁毅. 基于尺度效应的不锈钢超薄板力学性能及断裂行为研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (10): 83–85.
- [13] Zhang L, Wu J F, Ding Y. Research on mechanical property and fracture behavior of stainless steel ultra thin sheet based on size effect [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (10): 83–85.
- [14] 崔保金, 童国权, 马振武. H80 薄板拉伸性能的尺寸效应 [J]. 材料科学与工艺, 2017, 25 (2): 45–49.
- [15] Cui B J, Dong G Q, Ma Z W. Size effects on tensile properties of H80 thin sheets [J]. Materials Science and Technology, 2017, 25 (2): 45–49.
- [16] 彭林法, 李成峰, 来新民. 介观尺度下的微冲压工艺特点分析 [J]. 塑性工程学报, 2007, 14 (4): 54–59.
- [17] Peng L F, Li C F, Lai X M, et al. Characteristic analysis of stamping process in Micro/Meso scale [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14 (4): 54–59.
- [18] Cortes P, Cantwell W J. The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre-metal laminates [J]. Composites Science & Technology, 2006, 66 (13): 2306–2316.
- [19] Jin K, Chen K, Luo X, et al. Fatigue crack growth and delamination mechanisms of Ti/CFRP fibre metal laminates at high tempera-

- tures [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020, 43 (6): 13178.
- [16] 李磊, 郎利辉, 轩永波, 等. 基于单向拉伸的半固化 GLARE 层板成形性能分析 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (2): 200–205. Li L, Lang L H, Xuan Y B, et al. Analysis on forming performance of semi-cured GLARE laminate based on uniaxial tensile [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (2): 200–205.
- [17] Wang Y, Hou Y, Liu Y, et al. Investigation of ultrasonic deformation characteristics of ultrathin miniaturized TA1 foil [J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, 777: 139070–139070.
- [18] Mckown S. Investigation of scaling effects in fiber-metal laminates [J]. *Journal of Composite Materials*, 2008, 42 (9): 865–888.
- [19] Carrillo J G, Cantwell W J. Scaling effects in the tensile behavior of fiber-metal laminates [J]. *Composites Science & Technology*, 2007, 67 (7–8): 1684–1693.
- [20] Hallett S R, Jiang W G, Wisnom M R. Effect of stacking sequence on open-hole tensile strength of composite laminates [J]. *Aiaa Journal*, 2009, 47 (7): 1692–1699.
- [21] Kashani M H, Sadighi M, Mohammadkhah M, et al. Investigation of scaling effects on fiber metal laminates under tensile and flexural loading [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 2013, 229 (3): 189–201.
- [22] HB 7736. 5—2004, 复合材料预浸料物理性能试验方法 第 5 部分: 树脂含量的测定 [S].
HB 7736. 5—2004, Test method for physical properties of composite material prepreg—Part 5: Determination of resin content [S].
- [23] HB 7736. 3—2004, 复合材料预浸料物理性能试验方法 第 3 部分: 纤维面密度的测定 [S].
HB 7736. 3—2004, Test method for physical properties of composite material prepreg—Part 3: Determination of fiber mass per unit area [S].
- [24] HB 7736. 2—2004, 复合材料预浸料物理性能试验方法 第 2 部分: 面密度的测定 [S].
HB 7736. 2—2004, Test method for physical properties of composite material prepreg—Part 2: Determination of mass per unit area [S].
- [25] HB 7736. 4—2004, 复合材料预浸料物理性能试验方法 第 4 部分: 挥发份含量的测定 [S].
HB 7736. 4—2004, Test method for physical properties of composite material prepreg—Part 4: Determination of volatiles content [S].
- [26] 姚瑶. 微尺度下纯铜箔的力学性能及弯曲回弹研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
Yao Y. Research on Mechanical Properties and Bending Spring-back of Pure Copper foil under Micro Scale [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [27] 王永贵, 梁宪珠, 曹正华. 纤维金属层板及其在大型飞机上的应用 [A]. 中国力学学会. 第十五届全国复合材料学术会议论文集: 下册 [C]. 哈尔滨: 中国力学学会, 2008.
Wang Y G, Liang X Z, Cao Z H. Fibre metal laminate and its application in large aircraft [A]. The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics. Proceedings of the 15th National Conference on Composites: Volume 2 [C]. Haierbin: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2008.
- [28] 郎利辉, 张闫飞, 关世伟. 基于单向拉伸的 GLARE 板力学性能测试 [J]. *精密成形工程*, 2018, 10 (6): 30–33.
Lang L H, Zhang Y F, Guan S W. Test on mechanical properties of GLARE plate based on uniaxial tensile [J]. *Journal of Net-shape Forming Engineering*, 2018, 10 (6): 30–33.
- [29] Hancox N L. Engineering mechanics of composite materials [J]. *Materials and Design*, 1996, 17 (2): 114–114.
- [30] Gau J T, Principe C, Wang J. An experimental study on size effects on flow stress and formability of aluminm and brass for microforming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 184 (1–3): 42–46.

关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程（锻压）分会成立于 1963 年，是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体，是依法登记的法人社团。经本会理事会研究决定：凡承认本会章程并符合条件者，可申请为本会会员。

会员的权利与义务：1. 颁发个人/团体会员证书及铜牌，铜牌由秘书处统一制作并颁发，可申请定制；2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠；3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动；4. 优先获得本会的有关学术资料，免费获赠全年学会会刊《锻压技术》杂志；5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo 链接；6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权；7. 接受本会委托，进行论证、评议、咨询等工作；8. 享有入会、退会的自由。

申请手续：提交入会申请表。申请个人会员，需填写《个人会员入会申请表》，同时提交“本人身份证复印件”、“一寸免冠照片两张”。申请团体会员，需填写《团体会员入会申请表》，同时提交“法人登记证书复印件”。材料均需一式一份寄至学会秘书处，并以电子邮件方式将表格发送至我会邮箱；也可登陆学会网站，进行在线注册。经审批通过后，将及时通知申请单位或个人。会员缴纳会费后正式登记，由学会秘书处颁发会员证书。

地 址：北京市海淀区学清路 18 号 707 室塑性工程分会

联系人：李佳盈、秦思晓、周 林、金 红

电 话：010-62912592 传 真：010-62912592 邮 箱：duanya@cmes.org 网 址：http://www.cstp-cmes.org.cn

中国机械工程学会塑性工程分会