

铝/碳纤维自冲铆接结构力学性能研究

景力军^{1,2}, 姚远², 蒋浩², 崔俊佳², 于旻³, 李光耀^{4*}

¹上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西 柳州

²湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙

³首都航天机械有限公司, 北京

⁴北京理工大学深圳汽车研究院(电动车辆国家工程实验室深圳研究院), 广东 深圳

收稿日期: 2022年5月30日; 录用日期: 2022年6月30日; 发布日期: 2022年7月6日

摘要

碳纤维由于其优异的性能, 在车辆轻量化方面具有良好的发展前景。本文对AA5182铝合金和T300碳纤维自冲铆接结构进行了拉伸试验。研究不同拉伸速率对铝/碳纤维自冲铆接头力学性能的影响。结果表明:在中速时, 互锁结构保持较好从碳纤维板中脱出, 铆钉周围碳纤维材料失效, 接头强度取决于碳纤维的强度。在高速时, 互锁结构失效, 铆钉从碳纤维板中脱出。

关键词

碳纤维, 铝合金, 自冲铆接, 高速拉伸性能

Research on Mechanical Properties of Aluminum/Carbon Fiber Self-Piercing Riveted Joints

Lijun Jing^{1,2}, Yuan Yao², Hao Jiang², Junjia Cui², Yang Yu³, Guangyao Li^{4*}

¹SAIC-GM-Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

²State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha Hunan

³Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing

⁴Shenzhen Automotive Research Institute (Shenzhen Research Institute of National Engineering Laboratory for Electric Vehicles), Beijing Institute of Technology, Shenzhen Guangdong

Received: May 30th, 2022; accepted: Jun. 30th, 2022; published: Jul. 6th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 景力军, 姚远, 蒋浩, 崔俊佳, 于旻, 李光耀. 铝/碳纤维自冲铆接结构力学性能研究[J]. 应用物理, 2022, 12(7): 377-386. DOI: 10.12677/app.2022.127044

Abstract

Because of its excellent performance, carbon fiber has a good development prospect in vehicle lightweight field. In this paper, the tensile test of AA5182 aluminum alloy and T300 carbon fiber self-piercing riveted structure is carried out. The effects of different tensile rates on the mechanical properties of aluminum/carbon fiber self-piercing riveted joints were investigated. The results showed that the interlocking structure held up well from the carbon fiber sheet at medium speeds. The carbon fiber material around the rivet failed, and the joint strength depended on the strength of the carbon fiber. At high speeds, the interlocking structure failed and the rivets came out of the carbon fiber sheet.

Keywords

Carbon Fiber, Aluminum Alloy, Self-Piercing Riveting, High Speed Tensile Properties

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳纤维作为高性能复合材料，具有高强度、高模量、耐腐蚀等性能，在车辆轻量化方面具有良好的发展前景。例如在宝马 7 系系列汽车采用碳纤维车身，在降低车身重量的同时保证了安全性能[1]。新能源汽车采用碳纤维材料设计电池箱，在达到轻量化设计的同时提高了整体强度[2]。采用碳纤维材料设计防撞梁结构，与传统钢结构防撞梁相比，其重量减少了 67.2% [3]。

碳纤维复合材料较脆，通常与金属材料进行连接使用。连接方法有：胶接、螺栓连接和铆接等。胶接受环境影响大，特别是在严寒或炎热环境下作战会对轻武器的性能产生较大的影响；而螺栓连接容易松动，可靠性较差[4]。铆接能够有效解决以上问题。其中，自冲铆接是用于板件连接的冷成型制造工艺，它可以用于连接金属和非金属材料，拥有噪音较小、无发热现象、不产生飞溅和对板料上的涂层损害轻等优点[5]。随着工业的快速发展，自冲铆接在车辆的轻量化过程中起着重要作用[6]。

大量学者对碳纤维复合材料不同条件下的性能进行了研究，刘瑞军等[7]针对碳纤维腐蚀后的性能进行了研究，得到了不同腐蚀周期后碳纤维疲劳寿命的变化。任银银等[8]通过高低温循环研究温度对碳纤维拉伸性能的影响。LIU 等[9]通过扫描电镜分析不同碳纤维层厚和层铺角度对接头力学性能的影响。张弩等[10]通过仿真分析不同角度层铺的碳纤维作为防冲击材料运用在舰艇船体的结构中。这些研究表明了碳纤维是一种优质的降低车身重量的材料。通常，碳纤维需要和金属连接，本文采用碳纤维和铝合金自冲铆接的方法。不同学者对碳纤维和铝合金的接头性能进行了研究。林洪才等[11]通过微观分析了不同铝合金板料的耐腐蚀性能。黄志超等[12]研究不同碳纤维铺层和铝合金自冲铆接接头的准静态拉伸剪切性能对比，没有涉及到动态条件的性能比较。黄志超等[13]对比碳纤维板和铝板在空心铆钉和半空心铆钉下的静拉伸强度，不同的铆钉参数会影响接头强度。JIANG 等[14]使用不同的放电量研究其对电磁半圆头铆接的影响，表明不是放电量越大，铆接效果就越好。李文中等[15]研究了抽芯铆钉、热熔流钻铆接和自冲铆接三种不同的铆接方法进行拉脱试验，研究碳纤维的失效形式，但是没有通过计算确保三种铆接方式

下的铆接结构径向剪切载荷基本相同。李光耀等[16]在相同的径向剪切载荷下对比分析磁脉冲铆接和螺栓连接的接头强度。JIAN 等[17]提出一种新的铆接方法,减轻铆钉穿刺碳纤维板时对它的损伤以此提高铆接强度。彭露玫等[18]使用计算流体软件对碳纤维在高温冲击下的结构稳定性,结果表碳纤维/铝合金在降低重量的同时提高了高温冲击性能。这些研究表明了碳纤维和铝合金接头具有一定的强度。

综上所述,对碳纤维的研究基本都在低速状态下进行。因此,本文在中高速的状态下研究铝/碳纤维自冲铆接的结构拉伸性能,汽车在使用碳纤维复合材料实现重量减轻的同时满足不同速度下的拉伸强度。

2. 试验材料及方法

2.1. 试样材料

试验选用 35 号碳钢铆钉,铆钉直径 5.3 mm,长度 5 mm。采用的板件为 AA5182 铝合金和 T300 碳纤维,两种板件厚度为 1.2 mm。AA5182 铝合金是 Al-Mg 系的一种,拥有较好的冷加工性、焊接优良、耐腐蚀等优点。AA5182 铝合金板的力学性能及化学成分如表 1 所示,35 号碳钢铆钉的力学性能及化学成分如表 2 所示,T300 碳纤维的力学性能如表 3 所示。

Table 1. Mechanical properties and chemical composition of aluminum alloy sheets

表 1. 铝合金板的力学性能及化学成分

性能	5182 铝板
密度(g/cm ³)	2.8
屈服强度(MPa)	150
拉伸强度(MPa)	225
杨氏模量(GPa)	70
泊松比	0.33
硬度(HV)	75
化学成分(%)	Zn = 0.25, Cr = 0.10, Si = 0.20, Fe = 0~0.35, Mn = 0.20~0.50, Mg = 4.0~5.0, Ti = 0.1, Cu = 0.15, Al = 剩余

Table 2. Mechanical properties and chemical composition of rivets

表 2. 铆钉的力学性能和化学成分

密度(kg/m ³)	硬度(HV)	C	Cr	Si	Mn	Cu	P	Fe
7870	750	0.35	0.30	0.30	0.10	0.025	0.025	余量

Table 3. Mechanical properties of carbon fiber

表 3. 碳纤维的力学性能

纤维密度(g/m ³)	纤维模量(GPa)	纤维强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	拉伸模量(GPa)	铺层厚度(mm)	树脂体积分数(%)
1.76	230	3530	911	76	0.15	40

连接件规格如图 1 所示,搭接区域宽度为 40 mm,板件宽度为 40 mm,板件长度为 120 mm,板件厚度为 1.2 mm。

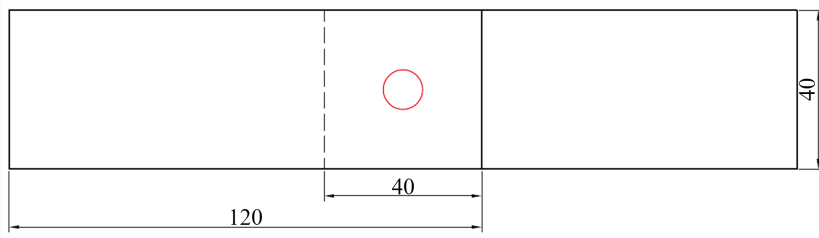


Figure 1. Connector size (Unit: mm)
图 1. 连接件尺寸(单位: mm)

2.2. 试验方法

自冲铆接的过程如图 2 所示, 分为以下 4 个步骤: 1) 夹紧阶段, 压边圈压紧板料; 2) 穿刺阶段, 冲头推动铆钉刺穿上板; 3) 扩张阶段, 铆钉继续向下刺穿下板, 并在凹模的作用下钉腿扩张形成互锁结构; 4) 卸载阶段, 冲头向上回到起点, 铆接完成。采用伺服电机自冲铆接平台 (如图 3 所示) 进行 AA5182 铝合金和 T300 碳纤维的自冲铆接试验。其中, 碳纤维为上板, 铝合金为下板。轻质合金白车身连接性能测试平台通过设定不同的补偿量给冲头施加不同大小的作用力来完成自冲铆接。如图 4 所示为分别采用 40、50 和 60 三种不同补偿量的自冲铆接件。当补偿量为 40 时, 钉头高度大于 0; 当补偿量为 50 时, 钉头高度基本等于 0; 当补偿量为 60 时, 钉头高度小于 0。

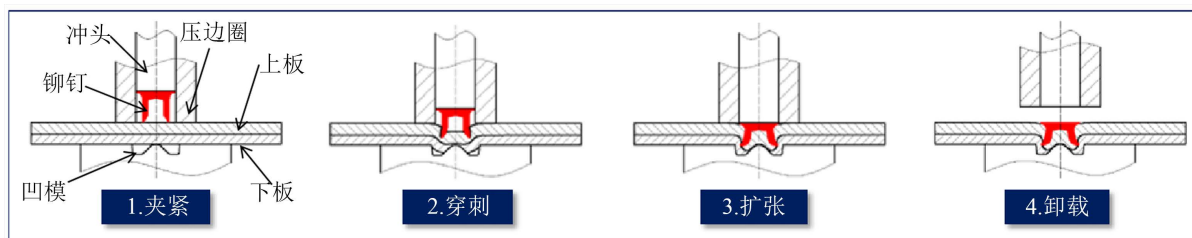


Figure 2. The process of self-piercing riveting
图 2. 自冲铆接的过程



Figure 3. Self-piercing riveting equipment
图 3. 自冲铆接设备

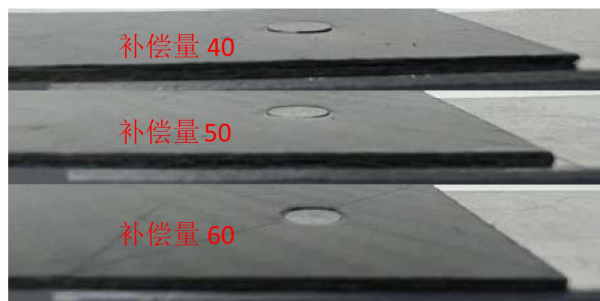


Figure 4. Self-piercing riveted parts under different compensation amounts
图 4. 不同补偿量下的自冲铆接件

自冲铆接的接头质量通常采用观测法和试验法进行评价[7]。通过两种测验方法来分析接头的质量是否满足力学性能，满足条件则判断合格进行后续试验。本试验采用准静态拉伸试验和中高速拉伸试验两种试验法对自冲铆接接头的质量进行评价。

2.2.1. 准静态拉伸试验

在接头的搭接连接试验研究中，用丙酮试剂对表面进行清洗擦拭，连接完成之后对接头进行拉伸性能测试。在试验中，准静态剪切拉伸根据《GB/T 228-2002 金属材料室温拉伸试验方法》进行。本试验采用用 LABSANS LD 26.105 万能试验机(如图 5)在室温下对接头进行拉伸测试，拉伸速度为 2 mm/min，测试不同补偿量下的最大剪切载荷，从而获得性能最佳的碳纤维/铝合金接头。



Figure 5. LABSANS LD 26.105 universal testing machine
图 5. LABSANS LD 26.105 万能试验机

2.2.2. 中高速拉伸试验

采用剪切拉伸搭接件在 Zwick HTM 5020 高速拉伸试验机(如图 6 所示)进行高速拉伸试验，高速拉伸试验机的最大拉伸速度为 20 m/s、最大法向力为 50 kN。本试验分别对铝合金/碳纤维自冲铆接接头进行了 2 m/s，4 m/s，6 m/s 和 8 m/s 四种不同速率下的拉伸试验，同时每种速率进行三次重复性试验。



Figure 6. Zwick HTM 5020 high-speed tensile testing machine
图 6. Zwick HTM 5020 高速拉伸试验机

3. 试验结果及讨论

3.1. 准静态拉伸性能

如图 7 所示为铝合金/碳纤维自冲铆接接头在速度为 2 mm/s 不同补偿量下的剪切性能。不同补偿量下剪切力随位移的变化趋势基本一致。当补偿量为 50 时，最大载荷略大于其它两种情况。将自冲铆接接头准静态拉伸下的位移载荷变化过程分为以下三个不同阶段：弹性阶段、屈服阶段和失效阶段[19]。

在弹性阶段时，剪切力变化率由最开始的峰值迅速下降。铆接接头产生的弹性变化是由铆钉和 AA5182 铝板之间相互影响。在屈服阶段时，剪切力变化率随着拉伸位移的增加逐渐减小，当其变化率为 0 时，剪切力达到峰值。碳纤维板和铝板之间的接触面积迅速减小，剪切力表现为铆钉和 AA5182 铝板之间的摩擦。结果表明碳纤维板和铝板接头的最大剪切力由弹性阶段的强度所决定的。在失效阶段时，剪切力变化率小于 0 并且变化缓慢，剪切力逐渐变小直至整个接头失效。

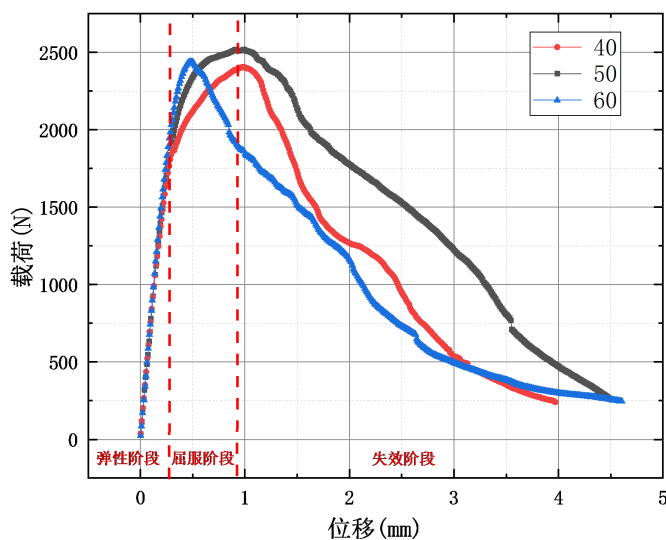


Figure 7. AA5182-T300 shear performance under different compensation amounts
图 7. AA5182-T300 不同补偿量下的剪切性能

如图 8 所示为自冲铆接头剪切拉伸失效随位移的变化过程。拉伸开始阶段，碳纤维板上铆钉钉头处开始失效。碳纤维板自由端在铆钉和夹具的非对称力作用下发生翘曲，形成的翘曲角度随着位移的增加而逐渐变大。在此阶段，碳纤维板和铝板之间的摩擦力随着板件的接触面积减小而逐渐减小直至为 0，铆钉和铝板的互锁结构之间的摩擦产生承载力。在接头完全失效后，碳纤维在铆钉孔周围完全失效。结果表明，整个拉伸过程主要碳纤维板发生曲翘和铆钉的脱出导致整个接头的失效。因此，碳纤维板的强度决定了接头的剪切拉伸强度。选用强度较高的碳纤维板，能在减轻重量的同时提高了接头的力学性能。

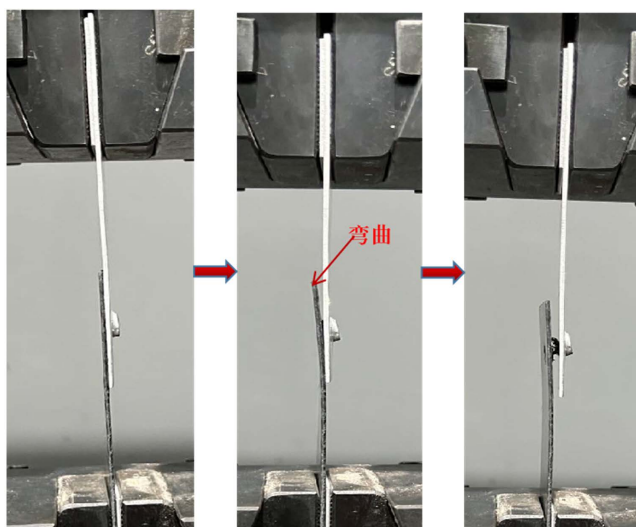


Figure 8. Variation process of shear tensile failure of lap joints with displacement
图 8. 搭接件剪切拉伸失效随位移变化过程

如图 9 所示为铝合金/碳纤维自冲铆接头在不同补偿量下的剪切失效示意图。当补偿量较低时铆接力较小，整个铆钉从碳纤维脱出，碳纤维板铆钉周围损伤较严重，连接完全失效。当补偿量增大，铆接力随之增大，钉头部分仍留在碳纤维板中。

综上所述，补偿量为 50 时，其最大剪切载荷大于补偿量为 40 和 60。钉头高度是评价自冲铆接质量的一种观测方法，当钉头高度接近于 0 时，铆接效果最好。因此，根据上述钉头高度的观测法和准静态拉伸试验的试验法决定 50 为最佳补偿量，并进行中高速试验。

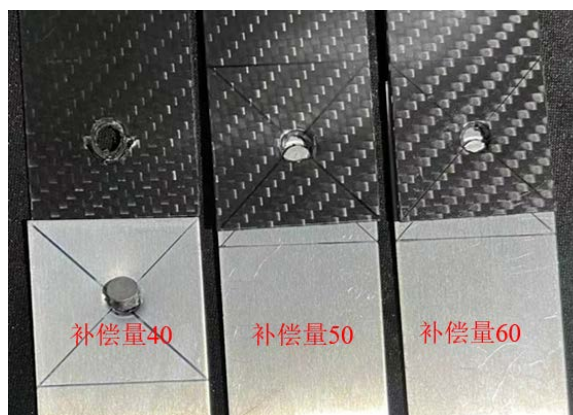


Figure 9. AA5182-T300 shear failure under different compensation amounts
图 9. AA5182-T300 不同补偿量下的剪切失效

3.2. 中高速拉伸性能

如图 10 所示为铝合金/碳纤维自冲铆接接头在不同速度下的剪切性能。相对于图 6, 当剪切拉伸速率较低时, 剪切力随位移的变化平滑。当剪切速率较高时, 剪切力在高速拉伸下产生剧烈的变化。碳纤维板在高速拉伸断裂时, 呈多层断裂的失效模式, 从而导致了其剪切力-位移曲线抖动剧烈, 和 Yangjie Zuo 的结果基本相同[20]。拉伸过程中, 自冲铆接头处碳纤维板和铝合金板会产生摩擦。因此, 拉伸速率越大, 上下板之间的摩擦力越大导致曲线的抖动越剧烈。

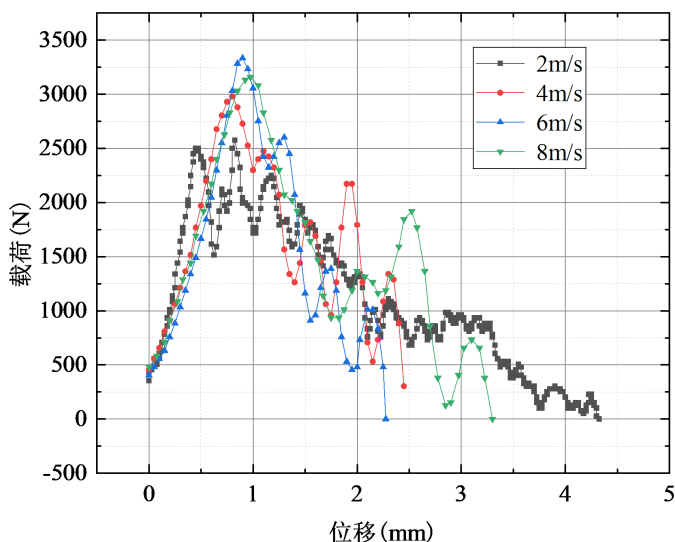


Figure 10. AA5182-T300 shear performance at different speeds

图 10. AA5182-T300 不同速度下的剪切性能

如表 4 所示为 AA5182-T300 不同速度下的最大载荷, 随速度增加呈现处先变大后变小的趋势。当拉伸速率为 6 m/s 时, 最大载荷的平均值最大为 3182.31 N, 当拉伸速率为 2 m/s 时, 最大载荷的平均值最小为 2643.51 N。最大载荷的平均值比最小载荷的平均值增加了 20.4%。由图 7 可知准静态拉伸的最大载荷为 2519.48 N, 相对于准静态条件, 在中高速条件下碳纤维/铝合金自冲铆接接头的强度有所提升。因此, 相比于准静态, 在中高速运动状态下, 结构的抗剪切性能得到了提升。

Table 4. AA5182-T300 maximum load at different speeds

表 4. AA5182-T300 不同速度下的最大载荷

速度(m/s)	试件 1(N)	试件 2(N)	试件 3(N)	平均值(N)
2	2576.16	2626.67	2727.7	2643.51
4	2980.26	3030.77	2712.7	2907.91
6	3333.85	3359.11	2853.98	3182.31
8	2803.46	3157.05	2651.93	2870.81

如图 11 所示为不同拉伸速率下接头剪切拉伸失效图。在不同速度下, 碳纤维在铆钉孔处均产生了严重的损伤。当速度为 2 m/s 和 4 m/s 中速时, 铆钉从碳纤维板中脱出, 并留在铝合金板件中。当速度为 6 m/s 和 8 m/s 高速时, 铆钉从铝合金板中拉出。结果表明, 接头受到高速拉伸时会产生冲击载荷使铆钉更容易被拉出。铆钉拉出的过程会与碳纤维板和铝合金板产生不同程度的摩擦, 导致拉伸速率越大, 曲线抖

动越剧烈(如图 10 所示)。图 12 所示为不同拉伸速率下碳纤维材料失效图,不同速率下,碳纤维的失效模式基本相同。由于碳纤维材料采用多层铺垫的编织方式,其失效模式为多层断裂,并且在铆钉孔的下方断裂更严重,因为铆钉从碳纤维板的下方拉出。当铆钉穿刺碳纤维板时同样会对碳纤维造成损伤,采用相同的铆接力,因此失效形式基本一致。与准静态拉伸相比,高速下碳纤维损伤更为严重,表明在高速拉伸时接头碳纤维板受铆钉的拉出力更大。

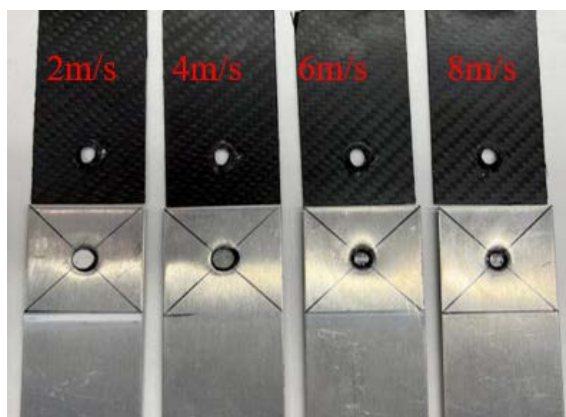


Figure 11. Shear tensile failure diagram of joints at different tensile rates
图 11. 不同拉伸速率下接头剪切拉伸失效图

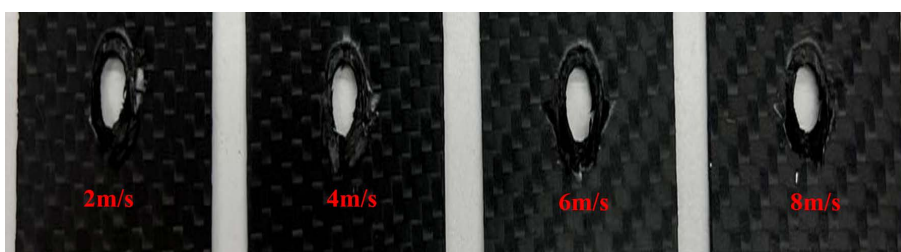


Figure 12. Failure diagram of carbon fiber under different tensile rates
图 12. 不同拉伸速率下碳纤维失效图

4. 结论

本文研究了碳纤维复合材料和铝合金自冲铆接结构的拉伸性能,通过剪切拉伸试验对别分析了不同速度下的结构抗剪切强度。经试验获得下列结论:

- 1) 碳纤维板/铝合金自冲铆接的最佳补偿量为 50, 接头强度并不是随着补偿量的增加而增加。
- 2) 碳纤维/铝合金自冲铆接接头在剪切拉伸失效的过程中,铆钉是从碳纤维板中拉出,导致铆钉孔附近的碳纤维产生较大的损伤。因此,碳纤维的强度决定了接头强度。
- 3) 碳纤维/铝合金自冲铆接接头在中高速下的接剪切最大载荷均大于在准静态下。

基金项目

深圳市科技计划项目(KQTD20200820113110016)和柳州市科技计划项目(2020GAAD0601)。

参考文献

- [1] 杨桂英, 赵睿, 肖冰, 杨秀霞, 王殿铭. 碳纤维复合材料在汽车轻量化中的应用[J]. 当代石油石化, 2020, 28(10): 24-28.

- [2] 陈静, 彭博, 王登峰, 唐傲天, 陈书明. 碳纤维增强复合材料电池箱轻量化设计[J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 257-263+277.
- [3] 肖金涛, 张帅, 徐锐良, 徐立友. 碳纤维复合材料防撞梁与铝合金吸能盒低速碰撞轻量化设计优化[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 25-32.
- [4] 于海平, 张旭, 章茂云, 孙立强, 李春峰. 大直径铝合金铆钉以铆代螺可行性试验研究[J]. 航天制造技术, 2016(4): 1-4+12.
- [5] 金鑫. 铝钢异种金属自冲铆接工艺仿真优化研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2012: 1-10.
- [6] 吴小丹, 王敏, 孔谅, 等. SPR 自冲铆接技术研究现状及应用前景[J]. 电焊机, 2016, 46(4): 31-36.
- [7] 刘瑞军, 李双义, 张连洪, 等. 自冲铆接技术在汽车车身轻量化中的应用[J]. 汽车技术, 2004(11): 33-36.
- [8] 任银银, 石建军, 贾彬, 刘曹锐, 张佳贺, 李朗. 高低温循环及湿度耦合作用对环氧树脂基碳纤维增强复合材料拉伸性能的影响[J]. 塑料工业, 2022, 50(4): 128-134.
- [9] Liu, Y. and Zhuang, W.M. (2019) Self-Piercing Riveted-Bonded Hybrid Joining of Carbon Fibre Reinforced Polymers and Aluminium Alloy Sheets. *Thin-Walled Structures*, **144**, Article ID: 106340. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106340>
- [10] 张弩, 于馨, 明付仁. 复合材料层合板在水下多层防护结构中的抗爆效能[J]. 兵工学报, 2021, 42(z1): 135-141.
- [11] 林洪才, 朱庆丰, 石入文, 贾涛, 张恩阁, 赵志浩. 热轧后中间退火对 5059 铝合金耐蚀性能的影响[J]. 兵工学报, 2021, 42(2): 379-387.
- [12] 黄志超, 程露, 涂林鹏, 黄薇. 不同纤维铺层玻璃-碳纤维混杂复合材料与铝合金自冲铆接强度对比[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(10): 54-61.
- [13] 黄志超, 李玲玲, 李海洲. 碳纤维复合材料与 5052 铝合金空心与半空心自冲铆接静强度分析[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(2): 20-27.
- [14] Jiang, H., Cong, Y.J., Zhang, X., Li, G.Y. and Cui, J.J. (2018) Fatigue Degradation after Salt Spray Ageing of Electromagnetically Riveted Joints for CFRP/Al Hybrid Structure. *Materials and Design*, **142**, 297-307. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.047>
- [15] 李文中, 李振兴, 吴皓亮, 马杰, 和仕超, 马秋. 碳纤维复合材料与铝合金连接方式选型研究[J]. 汽车工艺与材料, 2021(3): 48-52.
- [16] 李光耀, 陈乾, 蒋浩, 张旭, 崔俊佳. 卡车车架磁脉冲铆接结构可行性研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(3): 1-6.
- [17] Wang, J., et al. (2021) A Self-Piercing Riveting Method for Joining of Continuous Carbon Fiber Reinforced Composite and Aluminum Alloy Sheets. *Composite Structures*, **259**, Article ID: 113219. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113219>
- [18] 彭露玫, 周成康, 张志勇, 刘冬. 金属与碳纤维复合结构发射箱耐高温冲击性能[J]. 兵工学报, 2021, 42(11): 2360-2367.
- [19] 梁钜松. 电磁自冲铆接工艺及剪切力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [20] Zuo, Y.J., et al. (2018) Dynamic Behavior of CFRP/Ti Single-Lap Pinned Joints under Longitudinal Electromagnetic Dynamic Loading. *Composite Structures*, **184**, 362-371. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.079>