

文章编号: 2097-1974(2024)03-0079-06

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240312

压铆力对 $\Phi 4\text{mm}$ 2A10 铆钉连接 GFRP/铝合金叠层的 铆接干涉量影响研究

朱亚蓉¹, 马兴海^{1,2}, 杨帅¹, 吴赞¹, 安立辉³

(1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津, 300462; 2. 首都航天机械有限公司, 北京, 100076;
3. 中国运载火箭技术研究院, 北京, 100076)

摘要: 为了精确控制玻璃纤维增强塑料 (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP) /铝合金叠层的铆接干涉量, 降低GFRP材料因铆接产生的损伤, 需要对压铆力对干涉量的影响趋势进行研究。对2A10材料 $\Phi 4\text{mm}$ 铆钉在连接GFRP/2A12铝合金叠层的电动伺服压铆过程及不同压铆力和预制孔下的铆接干涉量进行了有限元仿真分析, 根据仿真结果开展了不同压铆力的压铆试验, 对钉杆不同位置的干涉量进行了测量并做了微观检测分析。结果表明, 同一预制孔下同测量位置的干涉量随着压铆力的增加而增大, 同压铆力下干涉量沿叠层厚度方向 (铆钉头向镦头方向) 呈现递减趋势; 选择 $\Phi 4.2\text{mm}$ 预制孔、18.3~18.7kN 压铆力能够获得理想干涉量且GFRP复合材料无明显损伤。

关键词: 玻璃纤维增强塑料; 压铆力; 干涉量; 递减趋势; 理想干涉量

中图分类号: V461

文献标识码: A

Study on the Influence of Riveting Squeeze Force on the Interference of GFRP / Aluminum alloy Layers Connection with $\Phi 4\text{mm}$ 2A10 Rivets

ZHU Yarong¹, MA Xinghai^{1,2}, YANG Shuai¹, WU Yun¹, AN Lihui³

(1. Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co. Ltd., Tianjin, 300462; 2. Capital Aerospace Machinery Company Limited, Beijing, 100076; 3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing, 100076)

Abstract: In order to control the riveting interference and minimize the damage of GFRP composite caused by riveting, it is necessary to study the influence trend of riveting squeeze force on the interference of $\Phi 4\text{mm}$ 2A10 rivet. The dynamic riveting process and the interference of the rivet have been simulated by ABAQUS on the effects of diameter of pre-drilled hole and riveting squeeze force of $\Phi 4\text{mm}$ 2A10 aluminum alloy rivet on GFRP composite and aluminum alloy layers. On the basis of the simulation the experimental investigations are performed. The Interference test and metallographic analysis of the specimens are conducted. Results indicate that the interference of the same measurement location in the rivet increases with the increase of the riveting squeeze force and the interference with the same riveting squeeze force decreases through-the-thickness. $\Phi 4.2\text{mm}$ diameter of pre-drilled hole and 18.3~18.7kN riveting squeeze force can achieve the optimum interference and the GFRP composite has no apparent injuries.

Keywords: glass fiber reinforced plastic; riveting squeeze force; interference; decrease; optimum interference

0 引言

玻璃纤维增强塑料 (Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP) 具有比强度高、比硬度高、耐疲劳等优点, 广泛应用于航空航天产品^[1-4], GFRP材料在运载火箭箭体结构中主要用于壳段蒙皮、整流罩等产品。GFRP材料构件一般通过铆接、螺接等方式与桁条、环框等零件进行连接, 其中铆接工艺是运载火箭箭体

结构中普遍采用的连接工艺。铆钉成型后钉杆从镦头到钉头方向呈现不同的膨胀量, 对于含有复合材料的铆接结构而言容易导致复合材料的损伤破坏, 60%~80%的复合材料连接结构破坏发生在连接处, 因此必须控制钉杆的膨胀^[5-6], 针对复合材料层板的最佳相对干涉量为1.5%~2%^[7]。

吕九九等^[8]针对玻璃钢与铝合金叠层开展了

2A10 $\Phi 4$ mm、 $\Phi 5$ mm 铆钉的液压压铆试验，两种规格铆钉分别在 8.5~10.5 MPa、11.5~14 MPa 压铆力时铆钉的相对干涉量可控制在 3%~4%。盛熙等^[5]对碳纤维复合材料与铝合金叠层开展了 $\Phi 3$ mm、 $\Phi 3.5$ mm、 $\Phi 4$ mm TA1 铆钉电磁铆接研究，分别选用外径 7 mm、8 mm、9 mm 垫圈时可将干涉量控制在 2% 以内，同时能够保证复合材料没有明显的损伤。张俊琪等^[9]研究发现适当干涉配合能够提高复合材料连接结构的承载能力，干涉量在 1.5% 左右可以获得较高的承载能力。本文对 2A10-T4 材料 $\Phi 4$ mm 铆钉在 GFRP/2A12-T4 叠层中的压铆过程及压铆力对铆钉干涉量影响趋势进行有限元仿真。在有限元仿真基础上开展了不同压铆力的电动伺服压铆试验，对试验件的干涉量和金相进行了检测，试验及检测结果验证了压铆力对相对干涉量影响趋势符合仿真结果，并得出干涉量控制在 2% 理想干涉量附近且 GFRP 复合材料无明显损伤的预制孔直径、压铆力等工艺参数。

1 试验方案

GFRP/铝合金叠层：GFRP 板为乙烯基树脂基玻璃纤维复合材料，厚度 2.8 mm；铝板为 2A12-T4 铝合金材料，厚度 3 mm；铆钉材料 2A10-T4，直径 $\Phi 4$ mm，长度 11 mm。铆钉半圆头在 GFRP 板一侧，镦头在 2A12-T4 板一侧，试片示意如图 1 所示。

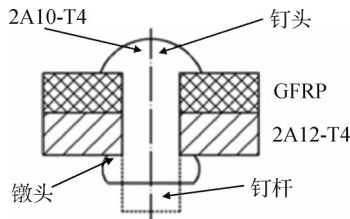


图1 试片示意

Fig.1 Structure of specimen

2A12-T4 板和 2A10-T4 铆钉的材料实测性能数据见表 1，GFRP 板的材料实测性能数据见表 2；2A12-T4 板和 2A10-T4 铆钉实测的真实应力和塑性应变曲线分别见图 2~3。

表1 2A12-T4和2A10-T4材料性能数据

Tab.1 Mechanical properties of of 2A12-T4 and 2A10-T4

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
2A12-T4	71700	0.31	2796
2A10-T4	69000	0.33	2796

表2 GFRP板材料性能数据

Tab.2 Mechanical properties of of GFRP

弹性常数	数值
E_{11} (纤维方向弹性模量)/MPa	26000
E_{22} (垂直纤维方向弹性模量)/MPa	27200
E_{33} (厚度方向弹性模量)/MPa	8100
G_{12} (面内剪切模量)/MPa	4170
$G_{13}=G_{23}$ (垂直面内剪切模量)/MPa	4170
ν_{12} (12方向波松比)	0.13
ν_{13} (13方向波松比)	0.13
ν_{23} (23方向波松比)	0.13
X_T (纤维方向拉伸强度)/MPa	602
X_C (纤维方向压缩强度)/MPa	545
Y_T (垂直纤维方向拉伸强度)/MPa	593
Y_C (垂直纤维方向压缩强度)/MPa	472
Z_T (厚度方向拉伸强度)/MPa	49.6
Z_C (厚度方向压缩强度)/MPa	298
S_{12} (面内剪切强度)/MPa	70.3
$S_{13}=S_{23}$ (垂直面内剪切强度)/MPa	67.4

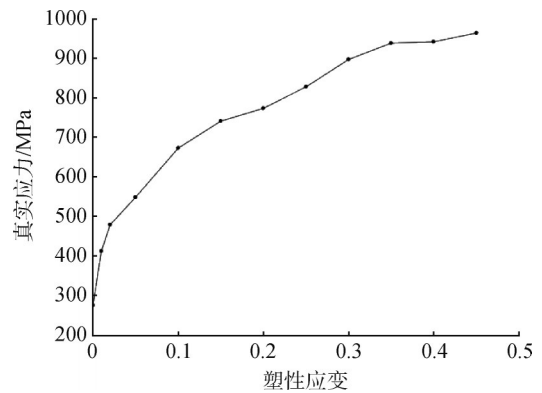


图2 2A12-T4板塑性属性

Fig.2 Stress-strain curve of 2A12-T4 sheet

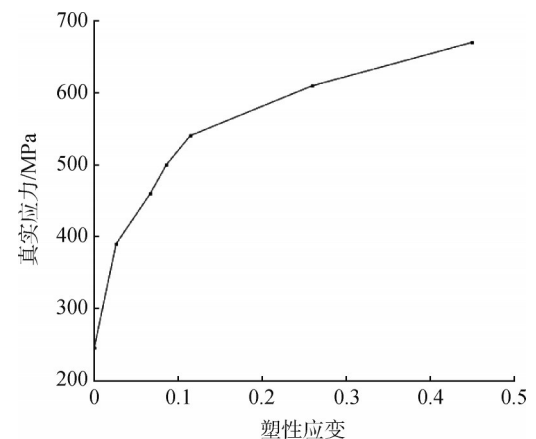


图3 2A10-T4铆钉塑性属性

Fig.3 Stress-strain curve of 2A10-T4 rivet

2 压铆力对干涉量影响仿真分析

2.1 压铆过程仿真

运用ABAQUS仿真软件建立铆钉压铆成形的分析模型，模型包括铆钉、GFRP板、2A12-T4板、压铆头，按照表1~2、图2~3所列数据设置材料性能数据。采用C3D8R单元类型按结构化网格技术形式对各零件进行网格划分，网格划分模型如图4所示，其中铆钉划分为176 770个单元、GFRP板划分为217 728个单元、2A12-T4板划分为126 720个单元、压铆头划分为1 600个单元。根据铆接实际情况建立6组接触，如图5所示。6组接触分别为：①铆模上端面为主面，铆钉下端和钉杆侧面为从面；②钉杆侧面为主面，GFRP材料板孔周为从面；③钉杆侧面为主面，2A12材料板孔周为从面；④铆钉半圆头下表面为主面，GFRP板上表面为从面；⑤钉杆侧面为主面，2A12板下表面为从面；⑥GFRP板和2A12板之间的接触面。

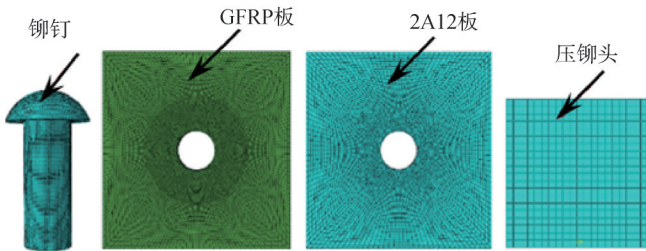


图4 模型网格划分

Fig.4 Mesh of FEA model

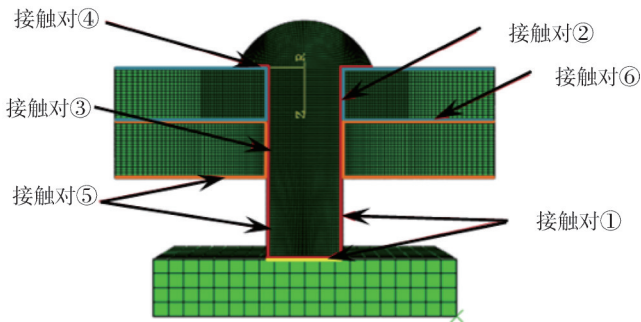


图5 接触关系

Fig.5 Contact relations of FEA model

铆钉压铆过程分为整体自由镦粗和局部自由镦粗两个过程。初始阶段，当压铆头和铆钉接触后，由于钉杆与孔壁存在间隙，铆钉杆首先发生整体镦粗变形，随着压铆头的运动铆钉变形增加，在钉杆变形最大处接触到孔壁材料。压铆力继续增加，钉杆变形直至填满钉孔形成铆接干涉量。镦头处变形继续增加，此时开始进入局部自由镦粗阶段，压铆力继续增加，

直至镦头形成。压铆变形的典型过程仿真结果如图6所示。通过对仿真结果进行分析，当叠层预制孔分别为Φ4.1 mm、Φ4.2 mm时，形成Φ(6±0.2) mm、高度(2±0.2) mm铆钉镦头所需的压铆力范围分别为18~20 kN、17.9~19.5 kN。

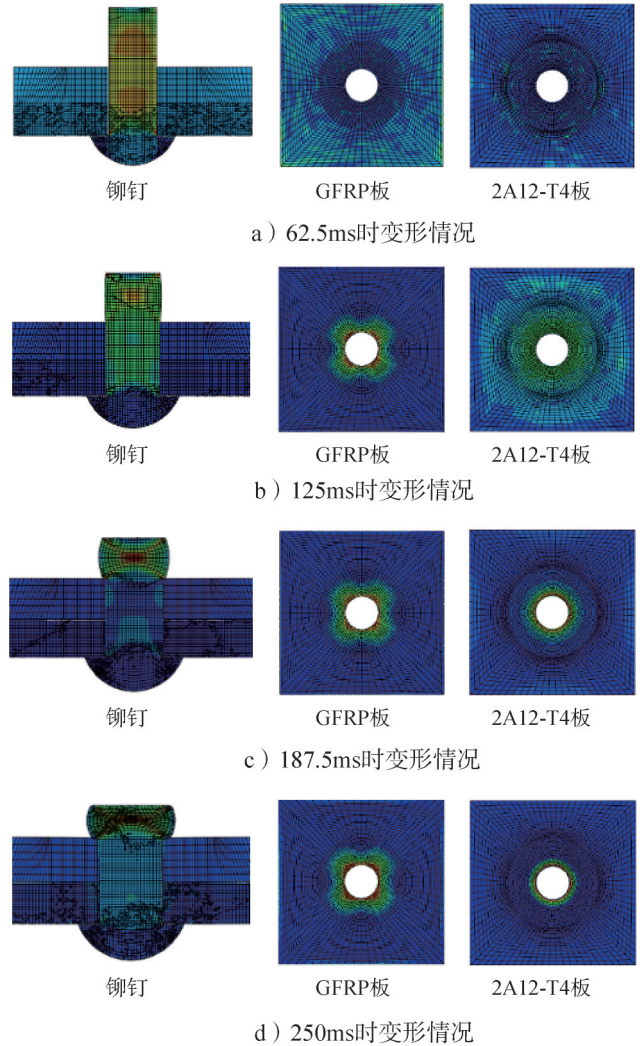


图6 压铆过程分析

Fig.6 FEA result of riveting

2.2 干涉量分析

设I为相对干涉量、D为铆接后铆钉直径、d为铆接前铆钉孔直径，则相对干涉量可表示为式(1)。对铆接试件中的铆钉取4个位置分别进行干涉量测量，测量位置示意如图7所示。

$$I_i = (D_i - d) / d (i=1, 2, 3, 4) \tag{1}$$

Φ4.1 mm、Φ4.2 mm 预制孔径及不同压铆力对应仿真试件各测量位置的干涉量测量结果见表3，干涉量对比见图8。由表3及图8可以得出：a) 预制孔为Φ4.1 mm时，干涉量均超过了2%，预制孔为

Φ4.2 mm时,干涉量在2%附近; b) 随着压铆力的增大,相同预制孔下同测量位置的干涉量随之增大; c) 同压铆力下铆钉不同位置的干涉量沿叠层厚度方向(铆铆头向铆头方向)呈递减趋势,即 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ 。

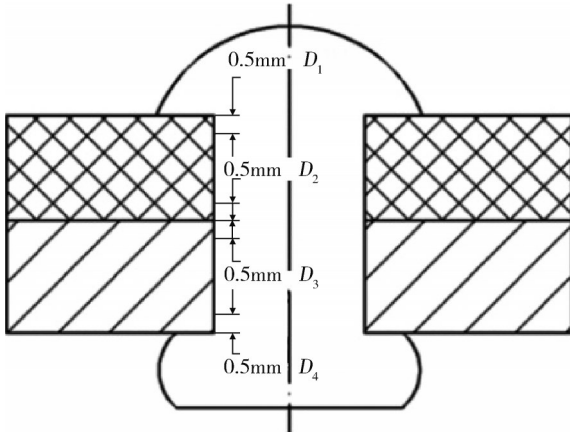


图7 干涉量测量位置示意

Fig.7 Measuring positions of interference

表3 仿真试片干涉量

Tab.3 Interference of FEA model

孔径/mm	钉长/mm	压铆力/kN	干涉量/%			
			I_1	I_2	I_3	I_4
4.1	11	18	2.46	2.44	2.41	2.36
		18.5	2.53	2.49	2.46	2.41
		19	2.56	2.51	2.49	2.43
		19.5	2.58	2.53	2.51	2.46
		20	2.70	2.67	2.63	2.49
4.2	11	17.9	1.87	1.83	1.77	1.70
		18.3	1.93	1.88	1.81	1.75
		18.7	1.96	1.92	1.83	1.78
		19.1	2.00	1.95	1.88	1.82
		19.5	2.05	1.99	1.92	1.85

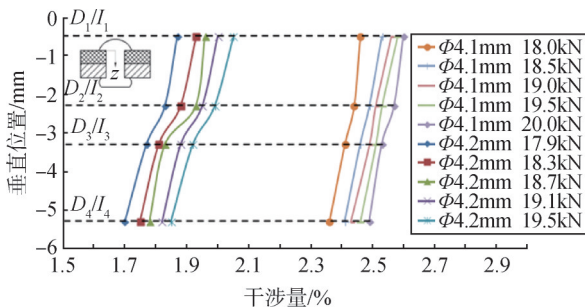


图8 不同预制孔、不同压铆力仿真试片干涉量对比

Fig.8 FEA result of interference under different pre-drilled hole and riveting squeeze force

2.3 小结

根据仿真分析结果针对2.8 mm 乙烯基酯树脂基

玻璃纤维复合材料 GFRP 板与 3 mm 2A12-T4 板叠层 伺服压铆 2A10 材料 Φ4 mm 铆钉时, Φ4.1 mm 预制孔、17.90~19.50 kN 压铆力时干涉量普遍大于 2%; Φ4.2 mm 预制孔、17.90~19.50 kN 压铆力时干涉量在理想干涉量 2% 附近。同压铆力下预制孔大小不同时,都表现出铆接干涉量沿叠层厚度方向(铆钉头向铆头方向)的递减趋势。

3 压铆力对干涉量影响试验研究

针对 2.8 mm GFRP 与 3 mm 铝合金叠层,利用电动伺服压铆机(见图 9,设备主要参数见表 4)对 2A10Φ4×11 mm 铆钉开展压铆试验,每组试片 10 件,如图 10 所示。预制孔 Φ4.2 mm,压铆力分别设置为 17.90 kN、18.30 kN、18.70 kN、19.10 kN、19.50 kN。试验后对试片进行干涉量检测和微观检测。

表4 压铆机参数

Tab.4 Riveting machine parameters

最大压铆力/kN	压铆行程/mm	最大进给速度/(mm·s ⁻¹)
55	450	250



图9 伺服压铆机

Fig.9 Riveting machine

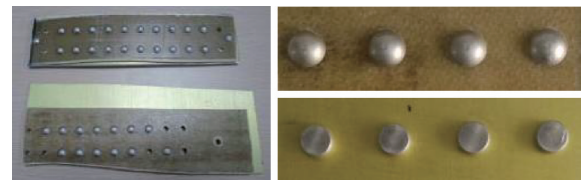


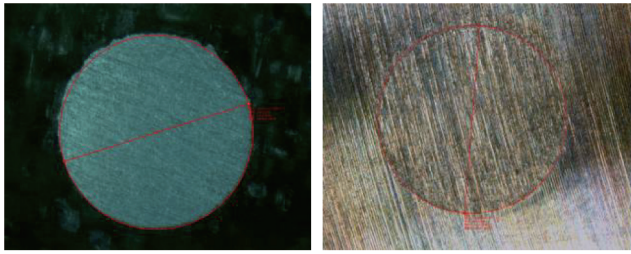
图10 GFRP/铝合金压铆试片

Fig.10 Riveting specimens of GFRP/Al

3.1 干涉量检测

利用数控加工中心对试片进行逐层铣削,加工至所需位置 ($D_1 \sim D_4$) 时,利用 GE-5 型显微镜对试片进

行拍照，通过 Digital viewer 软件对铆钉直径进行测量（如图 11 所示），计算铆钉相对干涉量。10 件试件同一位置的数据取平均值记为该位置的干涉量，具体见表 5，干涉量对比如图 12 所示。



a) GFRP层干涉量测量 b) 铝合金层干涉量测量

图 11 铆接试片干涉量测量

Fig.11 Interference test of riveting specimen

表 5 铆接试片的干涉量

Tab.5 Interference of riveting specimens

孔径/mm	钉长/mm	压铆力/kN	干涉量/%			
			I_1	I_2	I_3	I_4
4.2	11	17.9	2.18	2.14	2.10	1.98
		18.3	2.23	2.19	2.13	2.05
		18.7	2.28	2.22	2.17	2.10
		19.1	2.31	2.23	2.20	2.14
		19.5	2.35	2.28	2.23	2.17

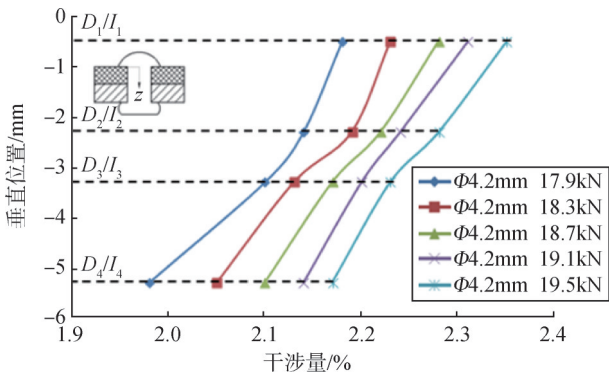


图 12 不同压铆力铆接试件的干涉量对比

Fig.12 Interference of riveting specimens under different riveting squeeze force

可以得出：a) 预制孔为 $\Phi 4.2\text{ mm}$ 时不同压铆力下各点干涉量稍大于 2%；b) 铆钉同测量位置的干涉量随压铆力增大而增大；c) 同压铆力下铆钉不同位置干涉量沿叠层厚度方向（铆钉头向铆头方向）呈递减趋势，即 $I_1 > I_2 > I_3 > I_4$ 。试验所得干涉量与压铆力的随变趋势与仿真结论一致。

3.2 微观检测

为判断不同压铆力的压铆试片铆钉周围 GFRP 材料的损伤情况，对试片进行微观检测，检测位置如

图 13 所示，金相检测切取试样如图 14 所示。

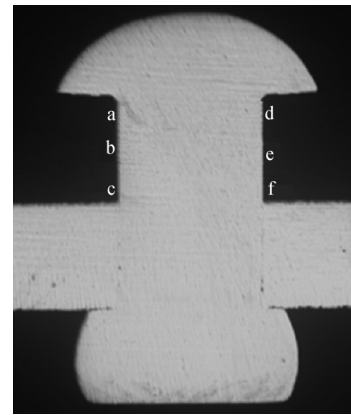


图 13 金相分析位置示意

Fig.13 Measuring positions of metallographic analysis

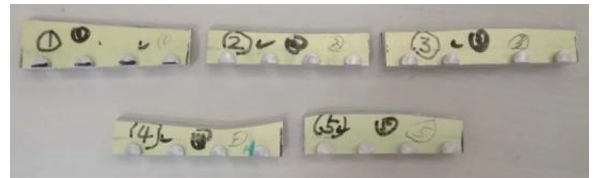
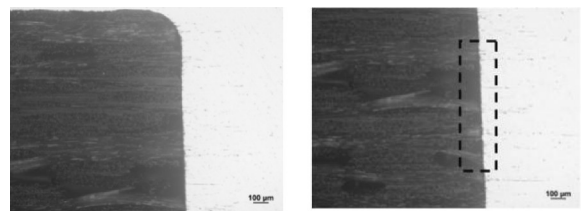


图 14 金相检测切取试样

Fig.14 Riveting specimens of metallographic analysis

17.90 kN 压铆力的铆接试片的微观分析如图 15 所示，由图 15 可以看出铆钉在 b、d、e 区的方框所示位置存在局部轻微间隙。对比不同压铆力的试片可以得出随着压铆力逐步变大，间隙随之变轻微甚至没有间隙。19.50 kN 制备的试片 GFRP 纤维层缺陷如图 16 所示，其中在 d 区方框位置出现了复合材料的脱粘现象，具有由配合界面处向复合材料内部扩展趋势；f 区方框内位置出现复合材料分层脱粘现象。对比不同压铆力的试片可以得出随着压铆力逐步变大，断裂情况呈加重趋势。压铆力为 18.30 kN、18.70 kN 的试片介于两种内部缺陷之间，铆钉钉杆与 GFRP 处无明显间隙，纤维损伤情况亦不明显。



a) a区位置 b) b区位置

图 15 17.9kN 试片金相分析

Fig.15 Micro structure of riveting specimens at 17.9kN riveting squeeze force

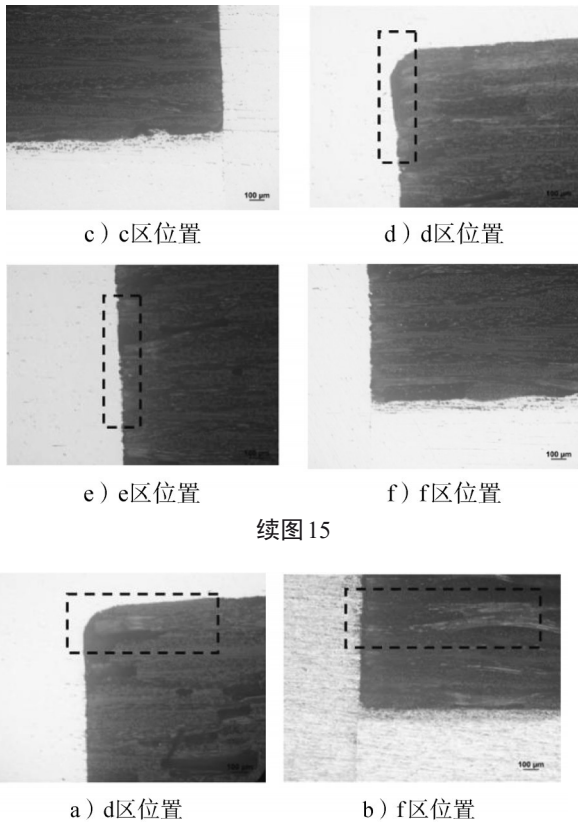


图16 19.5kN试片玻璃钢纤维断裂情况

Fig.16 Glass fiber fracture of riveting specimens at 19.5kN riveting squeeze force

4 结论

本文对典型GFRP/铝合金叠层压铆工艺中压铆力对 $\Phi 4$ mm 2A10铆钉干涉量影响开展了有限元仿真及试验研究,得出如下结论:

a) 铆钉同测量位置的干涉量随压铆力增大而增大;

b) 同压铆力下铆钉不同位置的干涉量沿叠层厚度方向(铆钉头向铆头方向)呈现递减趋势。

c) 对常用的2A10材料 $\Phi 4$ mm铆钉铆接GFRP/铝合金叠层结构时,选择 $\Phi 4.2$ mm预制孔、18.3~18.7 kN压铆力能够将铆钉的干涉量控制在2%理想干涉量附近且GFRP复合材料无明显损伤。

参考文献

- [1] 张立国,吕琴.我国玻璃钢/复合材料行业发展对玻璃纤维的市场需求[J].玻璃纤维,2010(5): 51-56.
ZHANG Ligu, LYU Qin. Demand for glass fibers by growing FRP/composites industry in China[J]. Fiber Glass, 2010(5): 51-56.
- [2] 金浩,程寓,高超,等.玻璃钢复合材料叠层结构钻削试验研究[J].机械设计与制造,2011(4): 133-135.
JIN Hao, CHENG Yu, GAO Chao, et al. An experimental study on drilling of sandwich structure of GFRP composites[J]. Machinery

Design & Manufacture, 2011(4): 133-135.

- [3] 刘东平,申林远,朱亚蓉,等.玻璃纤维复合材料与铝合金叠层低损伤制孔工艺参数研究[J].航空精密制造技术,2017(6): 72-74.
LIU Dongping, SHEN Linyuan, ZHU Yarong, et al. Research on low damage drilling process parameters of glass-fiber composite and aluminum alloy stacks[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017(6): 72-74.
- [4] 马立敏,张嘉振,岳广全,等.复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J].复合材料学报,2015,32(2): 317-322.
MA Limin, ZHANG Jiazhen, YUE Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 317-322.
- [5] 盛熙,曹增强,王俊彪.复合材料结构的干涉配合铆接[J].机械科学与技术,2004,23(6): 434-436.
SHENG Xi, CAO Zengqiang, WANG Junbiao. Interference-fit riveting of composite structure[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(6): 434-436.
- [6] 蔡闻峰,薛小平.先进复合材料结构飞机机械连接技术现状及发展方向[J].航空精密制造技术,2010(2): 22-24.
CAI Wenfeng, XUE Xiaoping. Current situation and developing direction of aircraft connection in advanced composite material structure[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010(2): 22-24.
- [7] 刘萍,张开达.干涉对复合材叠层板螺栓连接疲劳强度的影响[J].航空学报,1991(12): 545-549.
LIU Ping, ZHANG Kaida. An experimental study on fatigue life of interference-fit composite joint[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1991(12): 545-549.
- [8] 吕九九,檀甜甜,马兴海,等.玻璃钢复合材料自动钻铆工艺参数研究[J].航空精密制造技术,2018(1): 21-24.
LYU Jiujiu, TAN Tiantian, MA Xinghai, et al. Research on technological parameters of automatic drilling and riveting for glass fiber composite[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2018(1): 21-24.
- [9] 张俊琪,刘龙权,陈昆昆,等.干涉配合对复合材料机械连接结构承载能力的影响[J].上海交通大学学报,2013,47(11): 1795-1800.
ZHANG Junqi, LIU Longquan, CHEN Kunkun, et al. Influence of bolt-hole interference fit conditions on load capacity in composite mechanical joints[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(11): 1795-1800.

作者简介

朱亚蓉(1986—),女,高级工程师,主要研究方向为运载火箭箭体结构制造与质量检测技术。

马兴海(1981—),男,高级工程师,主要研究方向为运载火箭箭体结构铆接装配技术、自动钻铆技术、数字化装配技术、先进连接技术等。

杨帅(1987—),男,工程师,主要研究方向为运载火箭箭体结构铆接装配技术、工业工程与工艺布局。

吴赞(1990—),男,高级工程师,主要研究方向为运载火箭箭体结构铆接装配技术。

安立辉(1970—),男,博士,研究员,主要研究方向为运载火箭箭体结构制造技术、工艺管理。