

刚性模和柔性介质拉深成形工艺对 GLARE 层板筒型件成形极限及壁厚分布的影响规律

门向南¹, 闫东东², 郎利辉², 张弛烨², 郭庆磊³, 李磊⁴

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610073; 2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;
3. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 4. 中国人民解放军 93175 部队, 吉林 长春 130000)

摘要: 开展了刚性模和柔性介质拉深成形工艺对 0° 和 45° 方向纤维铺层方式的未固化 GLARE 层板筒型件的壁厚分布、成形极限及破裂形式的影响规律研究。结果表明, 柔性介质拉深成形工艺较刚性模拉深成形工艺下未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚增加了 0.01 mm, 壁厚分布更加均匀; 采用柔性介质拉深成形 GLARE 层板筒型件时, 沿 0° 方向纤维铺层较沿 45° 方向纤维铺层的成形极限深度提高了 15.2%; 此外, 纤维铺层方向还影响着 GLARE 层板筒型件的破裂形式, 筒型件的破裂位置与铺层方向一致。因此, 采用柔性介质拉深成形工艺可制备更深的 GLARE 层板筒型件, 同时结合不同结构的构件优化纤维的铺层方式, 可提高构件的壁厚一致性, 避免构件在成形过程中产生破裂缺陷。

关键词: GLARE 层板; 成形极限; 壁厚分布; 破裂形式; 柔性介质拉深成形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.009

中图分类号: TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 08-0053-07

Influence law of rigid die and flexible medium deep drawing process on forming limit and wall thickness distribution for GLARE laminate cylindrical parts

Men Xiangnan¹, Yan Dongdong², Lang Lihui², Zhang Chiye², Guo Qinglei³, Li Lei⁴

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610073, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

4. Unit 93175, People's Liberation Army, Changchun 130000, China)

Abstract: The influence laws of rigid die and flexible medium deep drawing process on wall thickness distribution, forming limit and fracture mode for uncured GLARE laminate of cylindrical part with fiber layout modes along 0° and 45° directions were studied. The results show that compared with the rigid die deep drawing process, the minimum wall thickness of the uncured GLARE laminate of cylindrical part is increased by 0.01 mm, the wall thickness distribution is more uniform, and the forming limit depth of the GLARE laminate of cylindrical part with 0° direction fiber layout is 15.2% higher than that with 45° direction fiber layout in the flexible medium deep drawing process. In addition, the fiber layout direction also affects the fracture mode of GLARE laminate cylindrical part, and the fracture position of cylindrical part is consistent with the fiber layout direction. Therefore, the deeper GLARE laminate cylindrical part can be prepared by the flexible medium deep drawing process, and at the same time, the fiber layout mode can be optimized by combining optimized fiber layout mode for components with different structures to improve the wall thickness consistency of component and avoid the fracture defects in the forming process.

Key words: GLARE laminate; forming limit; wall thickness distribution; fracture mode; flexible medium deep drawing

纤维增强金属层板 (Fiber Metal Laminates,

FMLs) 作为一种新型的轻量化混杂复合材料, 相对于金属材料, 其具有比强度高、比刚度大、损伤容限高、抗疲劳等优点, 被越来越广泛地应用于航空航天等领域^[1-3], 受到研究人员的广泛关注。玻璃纤维增强铝合金层板 (Glass Fiber Reinforced Aluminum Laminates, GLARE) 作为一种典型 FMLs 复合材料, 在 A380 上机身蒙皮、垂直和水平尾翼前缘、

收稿日期: 2021-07-26; 修订日期: 2021-10-25

基金项目: 四川省科技计划项目 (2019YFSY0034)

作者简介: 门向南 (1983-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: mxn19830726@163.com

通信作者: 郎利辉 (1970-2022), 男, 博士, 教授

E-mail: lang@buaa.edu.cn

整流板、整流罩等部位的使用面积高达 470 m²，减重约 800 kg，疲劳寿命提高 10~15 倍^[4-5]。

目前，FMLs 构件的成形特点主要是基于小曲率、大尺寸等特征进行制造，成形方法主要包括真空袋成形、辊弯成形、激光成形以及喷丸成形等。陶杰等^[6]采用真空袋成形方法制造变曲率 FMLs 机翼前缘构件时，发现成形构件结构虽然完好，但成形后树脂分布不均匀，且成形较大曲率结构件时，层板内部存在较大的回弹应力，同时纤维的铺层方向对构件的力学性能有较大影响。Palkowski H 等^[7]采用辊弯成形技术成形曲率大于 120 mm 的构件时层板未破裂，但辊弯成形技术难以成形类似双曲率形状的复杂结构^[8]。但 Edwardson S P 等^[9]采用激光成形技术制造 FMLs 构件时，发现在成形大曲率结构件时，纤维层会和金属层脱粘，需增加后固化工序。Russig C 等^[10]探究了采用喷丸成形技术制造 FMLs 构件时金属层和纤维层的形变传递问题，发现粒子直径越小、硬度越高，越有利于 GLARE 层板的成形。Mylonas G I 等^[11]采用喷丸成形技术开展了 FMLs 构件的成形试验研究，发现喷丸尺寸过大容易导致纤维层分层以及纤维断裂。

传统成形技术在成形 FMLs 构件时均存在成形构件结构简单、金属层与纤维层易脱粘分层、成形工序较多的问题，因此，越来越多的研究人员开始采用冲压成形技术来制造 FMLs 复杂构件。Mosse L 等^[12-13]采用冲压成形技术成形 FMLs 构件，探究了温度等工艺参数对 FMLs 成形性的影响，发现采用冲压成形技术成形 FMLs 构件时较成形单一铝合金材料具有更好的成形性能。Gresham J 等^[14]研究发现，冲压凸模力是导致纤维增强金属层板破裂的主要因素，通过预热可以有效地减少 FMLs 构件中纤维层的断裂。Rajabi A M 等^[15]开展了对 FMLs 在冲压过程中构件起皱出现位置以及拉伸和弯曲性能的研究。Liu S C 等^[16]采用冲压成形技术成形 FMLs 构件时，发现纤维铺层方向对外层金属层减薄和表面成形质量有显著影响。Wollmann T 等^[17]采用试验和数值分析的方式分析了 FMLs 的成形性能，研究发现，可以采用冲压成形技术成形一定深度的、无缺陷的 FMLs 筒型件构件。

本文开展了冲压成形技术制造的 GLARE 层板筒型件的成形性能研究，采用刚性模和柔性介质拉深成形工艺，分别对 0° 和 45° 方向纤维铺层方式的未固化 GLARE 层板筒型件进行了拉伸成形试验。分别对比分析了其壁厚分布、成形极限及破裂形式，分析了柔性介质拉深成形未固化 GLARE 层板筒型

件构件中纤维铺层方向对最优成形性能的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

制备 GLARE 层板筒型件选用的铝合金材料为 2024-T3，厚度为 0.5 mm，标称化学成分如表 1 所示，基本力学性能如表 2 所示。

表 1 2024-T3 铝合金的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of 2024-T3 aluminum alloy
(%, mass fraction)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.08	0.20	4.40	0.57	1.40	0.01	0.13	0.02	余量

表 2 2024-T3 铝合金的力学性能
Table 2 Mechanical properties of 2024-T3 aluminum alloy

参数	屈服应力/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	平均厚向异性 指数 r	硬化指数 n
数值	288.9	418.6	21.1	0.78	0.195

纤维层选用山东光威碳纤维产业技术研究院有限公司生产的玻璃纤维预浸料。编织玻璃纤维预浸料型号采用 WP-9011 的平纹编织预浸料，厚度为 0.20 mm，纤维含量为 60%，预浸料纤维单位面积质量为 204 g·m⁻²。纤维密度为径向每厘米 8 根，纬向每厘米 7 根，表 3 为厂商提供的预浸料性能参数。

表 3 预浸料的力学性能
Table 3 Mechanical properties of prepreg

预浸料型号	弹性模量/ GPa	拉伸强度/ MPa	压缩强度/ MPa	层间剪切 强度/MPa
WP-9011	18	400	450	55

1.2 试验设备

成形设备采用板材柔性拉深试验机 YRJ-50，如图 1 所示。该设备主要由压边缸、增压器、加热炉、

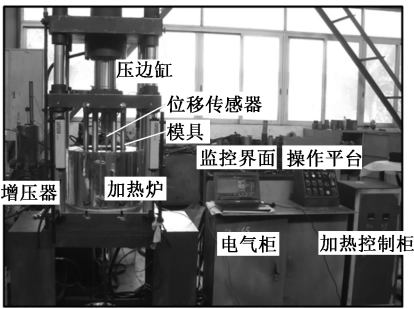


图 1 板材柔性拉深试验机 YRJ-50
Fig. 1 Plate flexible drawing experimental machine YRJ-50

模具、位移传感器、操作平台、监控界面、加热控制柜和电气柜等系统组成，可通过软件控制凸模行程、压边力、液室压力、成形温度等工艺参数。设备的主要参数如表 4 所示。

表 4 试验设备参数
Table 4 Experimental equipment parameters

参数	数值
最大液室压力/MPa	30
最大压边压力/MPa	25
凸模表面粗糙度/ μm	0.15
凸模直径/mm	$\Phi 79$
凸模圆角半径/mm	5
压边圈表面粗糙度/ μm	0.1
压边圈内侧直径/mm	$\Phi 80$
压边圈内侧圆角半径/mm	8
凹模表面粗糙度/ μm	0.1
凹模直径/mm	$\Phi 85$
凹模圆角半径/mm	10

1.3 试验方法

未固化 GLARE 层板的铺层方式采用“2+1”的形式，即两层铝合金薄板中间夹一层玻璃纤维层的结构。由于平纹编织纤维在 0° 和 90° 铺层方向的性能相同，因此，选择纤维经纱方向与铝合金轧制方向的夹角分别为 0° 和 45°，作为纤维铺层方向的试验设计方案，试验设计方案如表 5 所示，0° 和 45° 方向纤维铺层结构示意图如图 2 所示。试验在相同条件下重复 3 次，其中设定最大液室压力为 10 MPa，

表 5 试验设计方案
Table 5 Experimental design schemes

层板类别	层板铺贴方式	是否存在液室压力
2+1-0°-柔性	Al/0°/Al	是
2+1-0°-刚性		否
2+1-45°-柔性	Al/45°/Al	是
2+1-45°-刚性		否

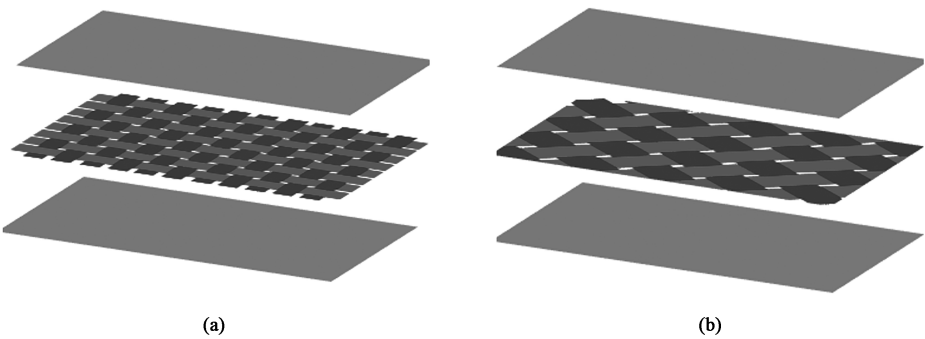


图 2 纤维铺层方式示意图
(a) 0° 方向纤维铺层 (b) 45° 方向纤维铺层
Fig. 2 Schematic diagrams of fiber layout modes
(a) Fiber layout along 0° direction (b) Fiber layout along 45° direction

压边力为 15 MPa，试验过程中压边力和冲头速度保持恒定，图 3 为未固化 GLARE 层板复合材料筒型件柔性介质拉深成形工艺示意图。

如图 4 所示，由于筒型件截面具有高度的对称性，因此，选择与轧制方向夹角为 0° 和 45° 方向对未固化 GLARE 层板复合材料筒型件试样进行切割，分析试样沿不同方向的壁厚分布规律。第 1 个方向为从筒形件底部中心沿铝合金层轧制方向，该方向被定义为 0° 方向，为坐标轴的正方向。第 2 个方向为从筒形件底部中心沿与铝合金层轧制方向呈 45° 角方向，这个方向被定义为 45° 方向，为坐标轴的负方向。采用螺旋测微计对筒型件构件壁厚进行测量，测量精度为 0.001 mm。

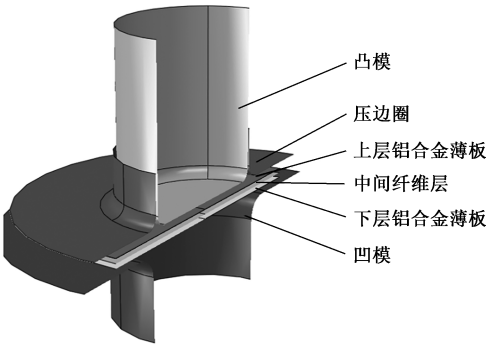


图 3 未固化 GLARE 层板筒型件柔性介质拉深成形示意图
Fig. 3 Schematic diagram of flexible medium deep drawing for uncured GLARE laminate cylindrical parts

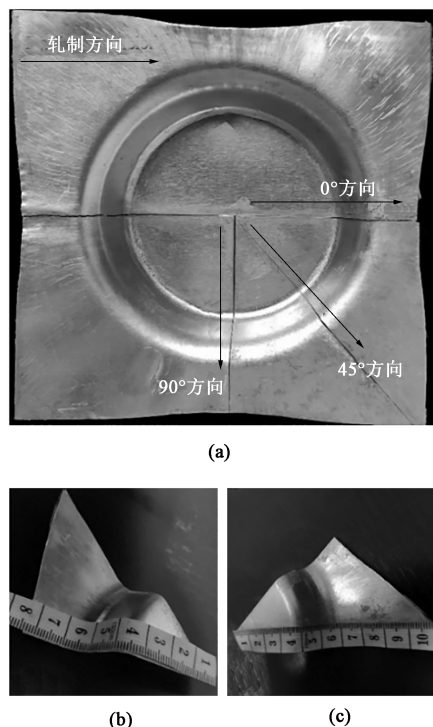


图4 试样切割及测量方向示意图

(a) 试件的切割方向 (b) 0°方向测量 (c) 45°方向测量

Fig. 4 Schematic diagrams of sample cutting and measurement directions

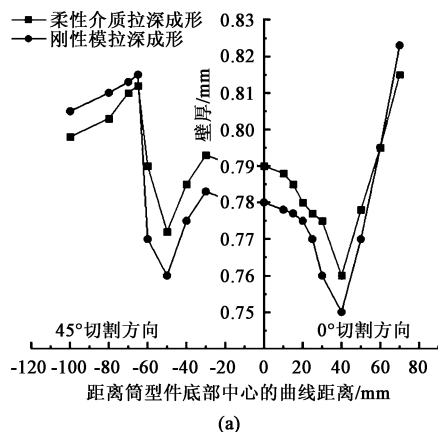
(a) Cutting direction of sample (b) Measurement along 0° direction
(c) Measurement along 45° direction

图5 不同成形工艺下未固化 GLARE 层板筒型件的壁厚分布

(a) 0°方向纤维铺层 (b) 45°方向纤维铺层

Fig. 5 Wall thickness distributions for uncured GLARE laminate cylindrical parts under different forming processes

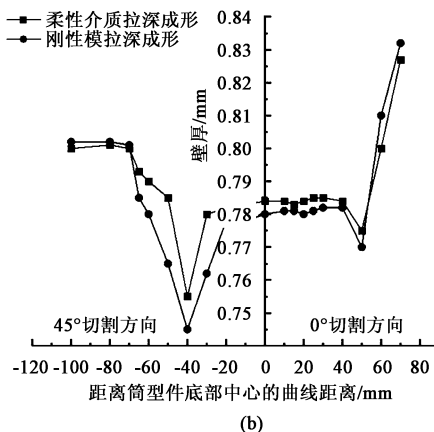
(a) Fiber layout along 0° direction (b) Fiber layout along 45° direction

2 结果与讨论

2.1 纤维铺层方向对刚性模与柔性介质拉深成形筒型件壁厚分布规律的影响

图 5a 和图 5b 分别为沿 0° 和 45° 方向纤维铺层时采用刚性模和柔性介质拉深成形工艺条件下筒型件的壁厚分布图。沿 0° 方向纤维铺层时，在 0° 和 45° 切割方向上，柔性介质拉深成形工艺较刚性模拉深成形工艺得到的筒型件的最小壁厚均增加了 0.01 mm。沿 45° 方向纤维铺层时，在 0° 切割方向上，柔性介质拉深成形工艺较刚性模拉深成形工艺得到的筒型件的最小壁厚增加了 0.01 mm；在 45° 切割方向上，柔性介质拉深成形工艺较刚性模拉深成形工艺得到的筒型件的最小壁厚增加了 0.005 mm。采用柔性介质拉深成形工艺成形的未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚较刚性模拉深成形工艺成形的未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚增加了 0.01 mm。可以看出，柔性介质拉深成形工艺较刚性模拉深成形工艺成形的未固化 GLARE 层板复合材料筒型件的壁厚分布更加均匀，最小壁厚更厚。

这是由于：采用柔性介质拉深成形工艺时，柔性介质的成形压力均匀作用在未固化 GLARE 层板



上，在柔性介质压力作用下层板与凸模紧密贴合在一起，产生一种“摩擦保持”的效果，使层板贴合在凸模表面，层板随凸模的运动一起流动。此外，在成形过程中柔性介质会产生一种“溢流润滑”的效果，能够有效地减小层板与凹模之间的摩擦力，使

得层板更好地流动，因此，柔性介质拉深成形工艺成形的未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚更厚。

图 6 为柔性介质拉深成形工艺下沿 0° 方向和 45° 方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件的壁厚分布对比。沿 0° 方向纤维铺层时，发现在 0° 切割

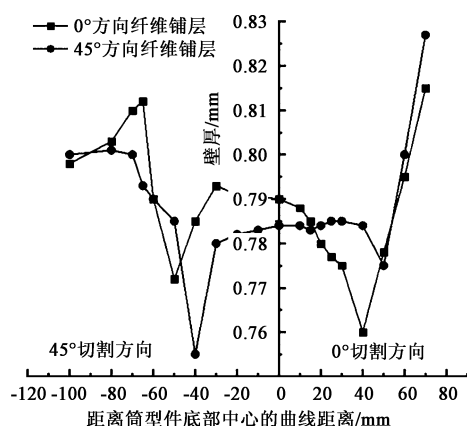


图6 不同纤维铺层方向下柔性介质拉深成形未固化 GLARE 层板筒型件壁厚分布

Fig. 6 Wall thickness distributions of uncured GLARE laminate cylindrical parts formed by flexible media deep drawing under different fiber layout directions

方向上, 距离零件底部中心约 40 mm 处未固化 GLARE 层板筒型件的壁厚最小; 在 45°切割方向上, 距离零件底部中心约 50 mm 处未固化 GLARE 层板筒型件的壁厚最小, 筒型件沿 0°切割方向的最小壁厚较沿 45°切割方向的最小壁厚减小了 0.011 mm。

沿 45°方向纤维铺层时, 在 0°切割方向上, 壁厚最小区域位于距离筒型件底部中心约 50 mm 处, 在 45°切割方向上, 壁厚最小区域位于距离筒型件底部中心约 40 mm 处, 筒型件沿 0°切割方向的最小壁厚较沿 45°切割方向的最小壁厚增加了 0.02 mm, 其壁厚变化规律与沿 0°方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件相反。沿 45°方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚较沿 0°方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚小 0.05 mm。

这是由于: 沿 0°方向纤维铺层时, 在 45°切割方向上, 平纹编织的纤维首先发生纤维束之间的扭转变形, 使得金属板料更加容易流动, 从而使得 45°切割方向的筒型件壁厚高于 0°切割方向的壁厚。沿 45°方向纤维铺层时, 在 0°切割方向上平纹编织的纤维首先发生纤维束之间的扭转变形, 使得金属板料更加容易流动, 从而使得 0°切割方向的筒型件壁厚高于 45°切割方向的壁厚。因此, 纤维的铺层方向对未固化 GLARE 层板筒型件的壁厚分布同样有着重大的影响。

通过对沿 0°方向和 45°方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件的壁厚分布规律进行分析发现, 相较传统刚性模拉深成形的方法, 柔性介质拉深成

形未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚更大, 板料更不易破裂。沿 0°方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件较沿 45°方向纤维铺层时未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚更大, 更不易发生破裂风险, 铺层方向会对层板的成形性能造成很大影响。因此, 可以针对实际构件的具体特征合理地设计未固化 GLARE 层板的纤维铺层方式, 实现更均匀的构件壁厚分布。

2.2 纤维铺层方向对刚性模与柔性介质拉深成形筒型件成形极限和破裂方式的影响

图 7 为沿 0°和 45°方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件的成形极限深度对比。由图 7 可以可知, 采用柔性介质拉深成形工艺下, 未固化 GLARE 层板筒型件的成形极限深度远高于刚性模拉深成形工艺, 其中沿 0°方向纤维铺层时, 柔性介质拉深成形工艺较刚性模拉深成形工艺成形未固化 GLARE 层板筒型件的成形极限深度提高了 18%; 沿 45°方向纤维铺层时, 柔性介质拉深成形工艺较刚性模拉深成形工艺成形未固化 GLARE 层板筒型件的成形极限深度提高了 17.9%, 提高显著。同时, 纤维的铺层方向同样影响着未固化 GLARE 层板筒型件的成形极限, 采用柔性介质拉深成形工艺成形未固化 GLARE 层板筒型件时, 沿 0°方向纤维铺层较沿 45°方向纤维铺层的成形极限深度提高了 15.2%; 采用刚性模拉深成形工艺成形未固化 GLARE 层板筒型件时, 沿 0°方向纤维铺层较沿 45°方向纤维铺层的成形极限深度提高了 15.1%。

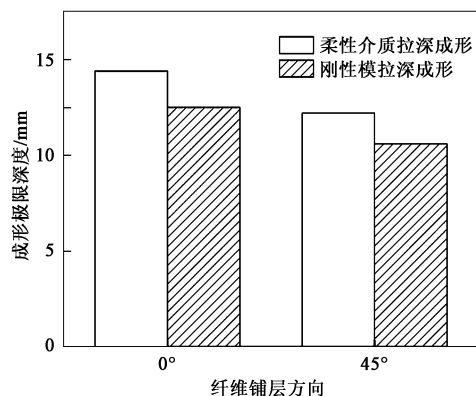


图7 0°和 45°纤维铺层方向下未固化 GLARE 层板筒型件的成形极限深度

Fig. 7 Forming limit depths of uncured GLARE laminate cylindrical parts with fiber layout along 0° and 45° directions

这是因为: 沿 0°方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板在 0°切割方向上的法兰面积较小, 所受的压边力较小, 层间可以有效流动, 在 45°切割方向上,

虽然压边力增大,但是纤维束可以发生较大的剪切扭转变形,在成形过程中纤维层在各方向均能够发生较大的流动变形。但是沿 45° 方向进行纤维铺层时,中间纤维层在 45° 切割方向上受到较大的压边力作用,此方向也与经纱的 0° 方向相同,导致纤维束自身的变形量较小,两种因素叠加在一起导致纤维层变形流动困难,这也与未固化 GLARE 层板筒型件壁厚的分布规律相对应,所以沿 0° 方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板相比沿 45° 方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板更容易流动变形。

图 8 为 0° 和 45° 方向纤维铺层未固化 GLARE 层板筒型件破裂的断口位置,可以看出:采用柔性介质拉深成形工艺时,未固化 GLARE 层板筒型件的

破裂位置与纤维的铺层方向一致,沿 0° 方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件在 0° 方向位置发生破裂,沿 45° 方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件在 45° 方向位置发生破裂。同时,未固化 GLARE 层板筒型件的断裂位置均出现在凸模圆角附近区域,这也与沿 0° 方向和 45° 方向纤维铺层的未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚位置均出现在凸模圆角附近区域一致。对于未固化 GLARE 层板筒型件而言,纤维层材料的性能起到决定性作用,纤维层材料发生断裂后,金属层会因为纤维材料的断裂导致其在大应力状态下发生瞬时断裂,因此,未固化 GLARE 层板筒型件在凸模圆角附近区域发生断裂。

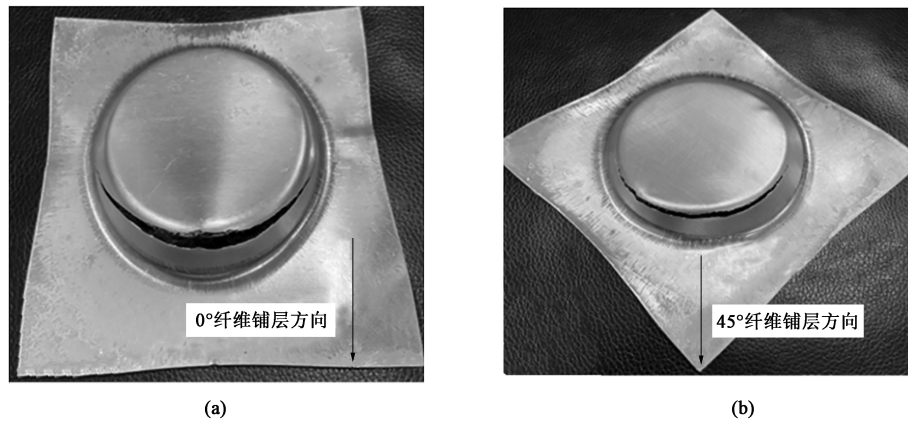


图 8 未固化 GLARE 层板筒型件破裂断口形貌

(a) 0° 纤维铺层方向 (b) 45° 纤维铺层方向

Fig. 8 Fracture morphologies of uncured GLARE laminate cylindrical parts

(a) Fiber layout along 0° direction (b) Fiber layout along 45° direction

3 结论

(1) 由于流体介质的“摩擦保持”和“溢流润滑”效果,柔性介质拉深成形工艺下未固化 GLARE 层板筒型件的最小壁厚减薄量较刚性模拉深成形工艺增加了 0.01 mm ,成形极限深度更大,壁厚分布更加均匀。

(2) 纤维铺层方向对未固化 GLARE 层板筒型件的成形性能产生不同影响,采用柔性介质拉深成形未固化 GLARE 层板筒型件时,沿 0° 方向纤维铺层较沿 45° 方向纤维铺层的成形极限深度提高了 15.2% ,因此,可以合理地设计未固化 GLARE 层板中纤维的铺层方式,实现更大的构件成形极限深度。

(3) 未固化 GLARE 层板沿不同纤维铺层方向进行铺贴时,筒型件的破裂位置与纤维的铺层方向

一致,纤维的铺层方向对未固化 GLARE 层板筒型件的成形性能起到决定性作用。

参考文献:

- [1] 曹增强. 纤维金属层板及其在飞机结构中的应用 [J]. 航空制造技术, 2006, (6): 60-62.
Cao Z Q. Fiber metal laminates and its application in aircraft structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, (6): 60-62.
- [2] Vlot A, Gunnink J W. Fibre Metal Laminates: An Introduction [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [3] Sinmazçelik T, Avcu E, Bora M Ö, et al. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods [J]. Materials & Design, 2011, 32 (7): 3671-3685.
- [4] Park S Y, Choi W J, Choi H S, et al. A comparative study on the properties of GLARE laminates cured by autoclave and autoclave consolidation followed by oven postcuring [J]. The International

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49, 605–613.
- [5] Huang Y, Liu J Z, Huang X, et al. Delamination and fatigue crack growth behavior in fiber metal laminates (glare) under single overloads [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 78, 53–60.
- [6] 陶杰, 李华冠, 潘蕾, 等. 纤维金属层板的研究与发展趋势 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47 (5): 626–636.
Tao J, Li H G, Pan L, et al. Review on research and development of fiber metal laminates [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47 (5): 626–636.
- [7] Palkowski H, Stanic V, Carradò A. Multilayer roll-bonded sandwich: Processing, mechanical performance, and bioactive behavior [J]. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2012, 64 (4): 514–519.
- [8] Sinke J. Manufacturing of GLARE parts and structures [J]. Applied Composite Materials, 2003, 10 (4–5): 293–305.
- [9] Edwardson S P, Dearden G, Watkins K, et al. Laser forming of fibre metal laminates [J]. Lasers in Engineering, 2005, 15 (3): 233–255.
- [10] Russig C, Bambach M, Hirt G, et al. Shot peen forming of fiber metal laminates on the example of GLARE [J]. International Journal of Material Forming, 2014, 7 (4): 425–438.
- [11] Mylonas G I, Labeas G. Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: Residual stress, surface roughness and cold work prediction [J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205 (19): 4480–4494.
- [12] Mosse L, Compston P, Cantwell W J, et al. The effect of process temperature on the formability of polypropylene based fibre-metal laminates [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36 (8): 1158–1166.
- [13] Mosse L, Compston P, Cantwell W J, et al. Stamp forming of polypropylene based fibre-metal laminates: The effect of process variables on formability [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172 (2): 163–168.
- [14] Gresham J, Cantwell W, Cardew-Hall M J, et al. Drawing behaviour of metal-composite sandwich structures [J]. Composite Structures, 2006, 75 (1–4): 305–312.
- [15] Rajabi A M, Kadkhodayan M, Ghanei S. An investigation into the flexural and drawing behaviors of GFRP-based fiber-metal laminate [J]. Mechanics of Advanced Materials & Structures, 2017, 10 (25): 805–812.
- [16] Liu S C, Lang L H, Sherkatghadan E, et al. Investigation into the fiber orientation effect on the formability of GLARE materials in the stamp forming process [J]. Applied Composite Materials, 2018, 25 (2): 255–267.
- [17] Wollmann T, Hahn M, Wiedemann S, et al. Thermoplastic fibre metal laminates: Stiffness properties and forming behaviour by means of deep drawing [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18 (2): 442–450.

《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2022 年广告征集工作已经开始。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

(1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

(2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst_linyutong@163.com

电话: 010-62920652 Http: //www.fstjournal.net

