

# 纤维金属层板曲面零件成形技术研究\*

刘建光,张嘉振,岳广全,葛增如

(中国商飞北京民用飞机技术研究中心民用飞机结构与复合材料北京市重点实验室,北京 102211)

**[摘要]** 由于具有良好的综合性能,纤维金属层板在航空、航天等领域应用越来越多。但是,成形技术是限制纤维金属层板应用的主要困难之一。对纤维金属层板塑性成形技术进行了综述,分析了纤维金属层板成形性影响因素和成形过程的主要缺陷形式,介绍了国内外纤维金属层板曲面零件的成形技术进展以及近期提出的几种纤维金属层板成形新技术。最后,分析了纤维金属层板塑性成形存在的问题及瓶颈技术。

**关键词:** 纤维金属层板;曲面零件;成型;回弹;分层

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.16.046



刘建光

博士,高级工程师,主要从事轻质合金成形工艺研究。先后主持完成了国家自然科学基金、中国博士后基金、哈尔滨市科技创新人才基金等 10 个项目。在国内外期刊上发表学术论文 60 余篇,其中 SCI、EI 收录 50 余篇。申请或授权发明专利 6 项,授权实用新型专利 1 项;参编专著或译著 4 部,获科技成果奖 2 项。

纤维金属层板(FMLs)是一种由高强度金属薄板与纤维预浸料相互交替铺层,经一定固化工艺成型后得到的超混杂结构材料。按照采用的金属薄板和纤维增强树脂组合不同,纤维金属层板主要可分为芳纶纤维-铝合金层板、玻璃纤维-铝合金层板、碳纤维-铝合金层板以及碳纤维-钛合金层板,近年来还提出了采用密度更低的镁合金的纤维金属层板<sup>[1]</sup>。从树脂角度,传统的纤维金属层板主要采用热固性树脂,随着热塑性复合材料的不断成熟,热塑性复合材料将逐渐用于制备纤维金属层板。与单一金属板材相比,FMLs 具有轻质、高强、良好的导电性、优良的抗冲击和损伤容限性能、良好的阻燃性能及耐腐蚀性能等优点<sup>[2]</sup>。而且还可通过对层板中金属层和复合材料层的铺层厚度、铺层数量及铺层方向的变化来最大限度地实现结构

的优化设计。由于具有优良的综合性能,FMLs 逐渐在航空、航天领域得到应用,降低了飞行器结构的重量,提高了疲劳寿命。波音公司将第二代 FMLs 玻璃纤维-铝合金层板(GLARE 层板)用于 777 飞机货舱地板,与铝合金货舱地板相比,减重 23%。空客公司将 GLARE 层板用于 A380 飞机上机身蒙皮、垂直和水平尾翼前缘等部位,与传统的铝合金材料相比,结构减重可高达 25%~30%,疲劳寿命提高了 10~20 倍<sup>[3]</sup>。

尽管 FMLs 具有很多优点,但是其成形问题却是限制其大规模应用的主要困难之一。FMLs 曲面零件成形方法可以分为两种<sup>[4-6]</sup>,一种方法是铺贴成形技术,在模具上铺叠复合材料预浸料和金属板后放入热压罐内固化,在一次工艺中完成曲面零件的制备;另一种方法是塑性成形技术,首先制备 FMLs 平板,然后采用塑性成形方法成形出曲面零件。第一种方法由于复合材料层树

\* 基金项目:中国商飞公司科技创新专项(Y14GS05)。

脂不发生变形,可制备曲率半径较小、型面复杂的零件。但是,该方法相对于塑性成形技术耗费较大、且周期较长,并且复杂形状零件固化成形不易保证产品质量一致性。塑性成形是成形层板最高效的方法,但是由于FMLs各层之间性能差异较大,且纤维的变形能力有限,使得采用常规金属成形方法难于成形复杂形状FMLs零件。目前,国外对于FMLs的塑性成形技术已开展了较多的研究,并最终实现了FMLs在航空航天上的广泛应用。而国内对于FMLs层板塑性成形的相关研究尚处于起步阶段<sup>[7-8]</sup>。

本文对FMLs成形研究进展进行了综述,分析了影响其成形性的主要因素及最新成形技术进展,为下一步研究FMLs层板成形方法,以推动其在民用飞机上大规模应用提供参考。

## FMLs 曲面零件的主要成形缺陷

已开展的研究表明,FMLs成形过程的失效模式主要有3种,如图1<sup>[6,9]</sup>所示。

(1)表层金属板破坏。FMLs变形过程中金属层变形达到断裂极限时,容易出现开裂。例如弯曲变形,层板的外层为拉应力,当弯曲半径小于最小弯曲半径时,可能出现表层开裂,如图1(a)所示。同时,弯曲过程中内层面板也可能出现起皱缺陷,如图1(b)所示。

(2)纤维树脂层破坏。其原因是由于金属板材与纤维树脂层力学性能差异较大,例如玻璃纤维的极限变形仅为4.5%,树脂的变形能力也较差。纤维金属层板变形过程中,容易出现树脂基体或玻璃纤维的断裂,如图1(c)和(d)所示。但是,纤维树脂层断裂不会导致层板整体的失效。

(3)金属与纤维增强树脂分层。

金属与纤维树脂分层是FMLs成形过程经常出现的缺陷形式,这与金属与纤维增强树脂层之间的界面剪切强度有关,当界面的剪切应力增加,将出现层与层之间的开胶或脱层,如图1(e)所示。

## FMLs 成形性影响因素研究

概括来说,FMLs成形性影响因素主要包括以下3方面:

(1)金属板材的成形性能。

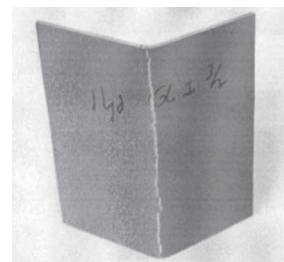
金属层板材的成形性很大程度上影响着FMLs的成形性,这与单层板材成形是一致的。金属层板材成形性越好,相应的FMLs成形性越好。由2024铝合金组成的FMLs成形性优于7075铝合金组成的FMLs。例如,FMLs板材弯曲过程,金属层的最小弯曲半径和金属板壁厚是影响FMLs最小弯曲半径的主要因素之一,FMLs壁厚越厚,最小弯曲半径越大<sup>[10]</sup>。表1<sup>[10]</sup>给出了部分GLARE层板的最小弯曲半径。

(2)复合材料层力学性能。

由于纤维和树脂变形能力有限,FMLs成形过程中,复合材料层仅发生弹性变形,复合材料层纤维的极限断裂应变和弹性特性是影响FMLs成形性的主要因素。FMLs塑性成形过程中复合材料层常见的缺陷有纤维断裂和树脂开裂,热塑性树脂/金属层板较热固性树脂/金属层板具有更好的成形性,如何提高复合材料层变形能力也是提高FMLs成形性的重要途径。此外,纤维的铺层方向也是影响FMLs成形性的重要因素之一。例如,FMLs层板弯曲过程,不同的铺层顺序和弯曲方向,成形后的零件回弹量不同<sup>[11-13]</sup>。图2<sup>[12]</sup>所示为不同铺层方向U形件弯曲回弹后试验件对比,可以看出,铺层结构对回弹量影响很大。

(3)成形工艺参数。

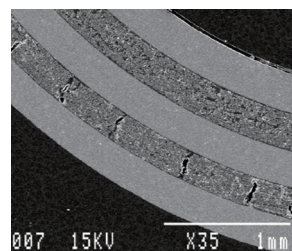
在成形工艺方面,成形温度、成形速度、压边力、凸模圆角半径、预热



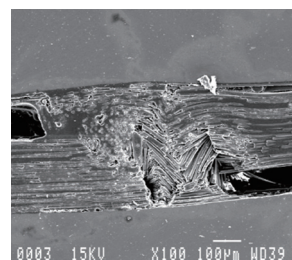
(a) 铝合金面板开裂



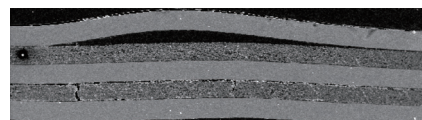
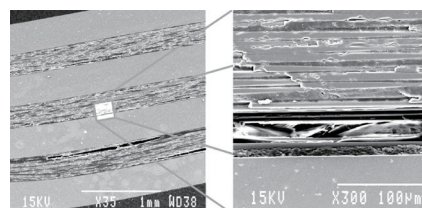
(b) 铝合金面板起皱



(c) 树脂基体断裂



(d) 纤维断裂



(e) 分层

图1 GLARE层板主要失效模式  
Fig.1 Main defects of GLARE

温度、冲头压力等工艺参数都是影响 FMLs 成形性的重要因素<sup>[13-16]</sup>。如图 3 所示为成形温度对回弹的影响,随着成形温度的提高,FMLs 弯曲后回弹量减低。

### FMLs 曲面零件成形技术研究进展

#### 1 弯曲成形

FMLs 成形始于单曲率零件,弯曲成形是单曲率 FMLs 零件的主要成形方法,其中应用最多的是辊弯成形工艺。以 Delft 大学为代表的国外相关研究机构对 GLARE 层板辊弯成形过程的纤维铺层设计、回弹控制都进行了系统研究,并结合有限元模拟技术获得了大量的理论和试验结果。1993 年,波音公司及空中客车公司开始研究将 GLARE 层板应用于主机舱蒙皮,辊弯成形技术开始实现了在 GLARE 层板上的工业应用。但是,研究发现,采用辊弯成形方法仅可以成形简单曲率的 GLARE 层板零件,对于周向纤维方向分布的零件,弯曲后的回弹非常大,而且更重要的是,采用辊弯方法无法成形双曲率的零件<sup>[9]</sup>。除了辊弯成形方法外,压弯成形工艺也是成形 GLARE 层板结构单曲率零件的常用方法,采用弯曲成形 GLARE 层板时,冲头半径、冲压速度和载荷均会影响 GLARE 层板弯曲后的回弹<sup>[14]</sup>。而且,该种成形方法的工艺窗口非常窄,当弯曲半径小于 3mm 时,常出现分层或开裂。而对于大曲率半径的 GLARE 层板零件,弯曲后的回弹较大,且难于预测和控制。图 4<sup>[9]</sup>所示为采用 GLARE 层板成形的长桁。

#### 2 冲压成形

冲压成形是最简单有效的板材成形方法。已经开展的 FMLs 冲压成形过程试验和数值模拟,针对纤维铺层、预热温度、压边力、冲头半径等影响开展了研究。Liu 等<sup>[17]</sup>研究了 2/1 结构 GLARE 层板冲压成形过

表1 GLARE 2 和GLARE 3最小弯曲半径

Table 1 GLARE 2 and GLARE 3 minimum bending radius

FMLs 结构	壁厚 /mm	弯曲方向	最小弯曲半径 /mm
GLARE 2 2/1-0.3	0.83	L	0.9
		LT	2.0
GLARE 2 3/2-0.2	1.16	L	3.2
		LT	10.0
GLARE 2 3/2-0.3	1.37	L	3.0
		LT	8.0
GLARE 3 2/1-0.3	0.88	L	1.3
		LT	1.3
GLARE 3 3/2-0.2	1.14	L	5.0
		LT	8.0
GLARE 3 3/2-0.3	1.44	L	5.4
		LT	9.0

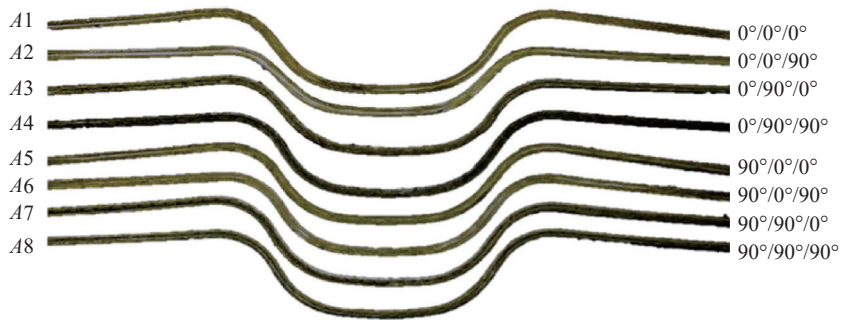


图2 不同铺层结构FMLs弯曲-回弹后试样

Fig.2 Springback of FMLs based on the different layups

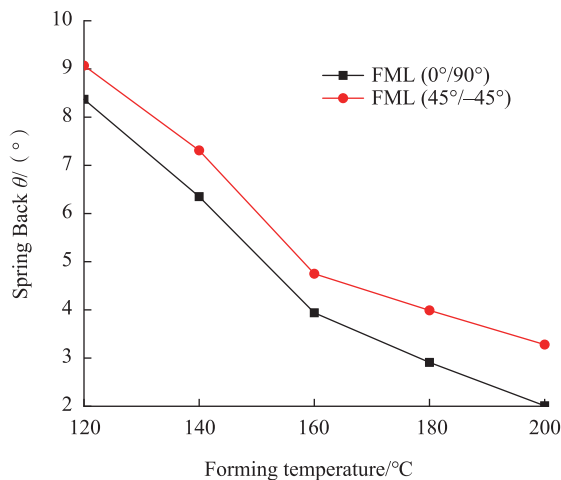


图3 成形温度对回弹影响

Fig.3 Effect of forming temperature on springback

程纤维铺层的影响规律,结果表明:纤维单向铺层和多向铺层对半球零件壁厚减薄和表面质量具有显著影响,多向铺层可实现零件更好的成形。Mosse等<sup>[15]</sup>在铝合金/自增强聚丙烯层压板冲压成形前进行预热,得到了无缺陷的杯形件。进一步研究表明,工具预热温度在成形过程中起主要作用,并且温度不宜过高,否则会影响层板内树脂基体导致起皱。此外,还研究了压边力、冲头速度和圆角半径对弯曲半径和尺寸误差的影响<sup>[16]</sup>。Hahn等<sup>[18]</sup>研究了单向碳纤维增强的热塑性树脂基纤维金属层板热冲压过程,建立了U形件热冲压过程的载荷计算模型。Rajabi等<sup>[19]</sup>也针对玻璃纤维增强的聚丙烯/铝合金层板拉深过程成形温度和压边力的影响开展试验和数值模拟研究,提高成形温度可降低成形力,成形温度和压边力对起皱具有耦合影响。

### 3 液压成形

液压成形是一种采用流体介质作为传力介质或背向压力的一种软模成形方法。Saadatfard等<sup>[20]</sup>研究了铝合金/玻璃纤维层板充液拉深过程预胀压力、液室压力和拉深比的影响,并最终获得了可成形无缺陷层板零件的优化工艺参数。图5(a)所示为液压成形试验件,但是内部是否存在分层等缺陷,还需要进行无损检测分析。



(a) 液压成形试验件

为了克服液压成形后的试验件分层问题,Lang等<sup>[21]</sup>提出在完成液压成形后,进行热塑性树脂和金属层的固化,避免了金属层与纤维树脂层的分层缺陷,图5(b)为成形的试验件。

### 4 激光成形

激光板材成形是一种依靠激光束对板材的不均匀加热,在变形区引起超过材料屈服强度的内应力,使工件产生变形的一种成形方法。具有生产周期短、柔性大等特点。激光成形工艺在制造FMLs结构中的优势在于能够实现结构应用中的无损伤元件。激光成形工艺是较早应用于FMLs曲面零件成形的工艺。Carey等<sup>[22]</sup>研究了GLARE层板的激光成形工艺,对于GLARE层板进行了低功率激光成形,并研究了纤维铺层方向、成形工艺以及复合材料的热效应等因素对成形工艺的影响。英国利物浦大学的Edwardson等<sup>[23]</sup>也

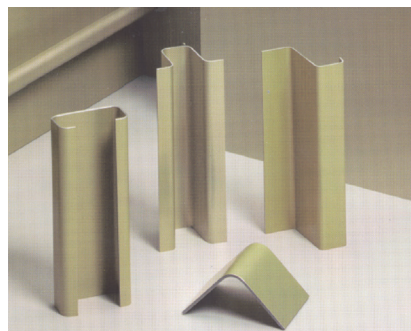


图4 GLARE层板弯曲成形的长桁  
Fig.4 GLARE stringer formed by bending



(b) 液压成形-固化试验件

图5 液压成形试验件  
Fig.5 FMLs hydroforming

对GLARE层板的激光成形工艺开展了研究,结果表明:由于温度梯度机制,层板受到塑性压缩而弯曲。当层板层数较多时,不会有热量传递到下层层板中,从而达到最小弯曲半径的结果。随着温度的升高,各层之间会相互滑动,从而导致界面结合(金属和聚合物)失效。如果金属层板和纤维层之间的粘合失败,则会发生分层。为了避免分层,样品在制造后进行后固化。图6<sup>[23]</sup>为采用激光成形方法成形的单曲率GLARE层板零件。但是,激光成形中如果参数控制不合理,则可能出现表层开裂、表层凸起、界面脱层等缺陷,如图7<sup>[23]</sup>所示。

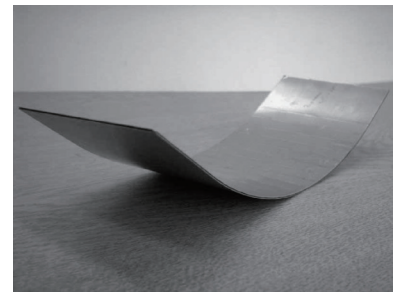


图6 激光成形圆柱面GLARE层板零件  
Fig.6 GLARE cylindric part formed by laser forming

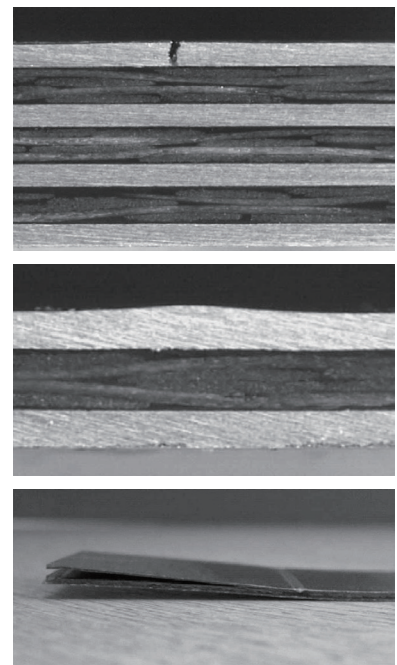


图7 激光成形中出现的缺陷  
Fig.7 Main defects in laser forming

## 5 喷丸成形

喷丸成形是一种通过金属球对层压板表面的冲击作用使层压板弯曲的工艺。德国亚琛工业大学的 Russig 等<sup>[24]</sup>采用喷丸成形方法成形 GLARE 层板零件,得到了工艺窗口。研究结果发现采用喷丸成形方法成形 GLARE 层板,工艺窗口较窄,采用小直径的粒子、较低的压力及较高的硬度比较有利于成形。同时还发现,只有 GLARE 3 层板可以采用喷丸成形方法成形出双曲率零件,如图 8<sup>[24]</sup>所示,这得益于该种材料的双向纤维分布。其他材料如 GLARE 1 和 GLARE 2 只能成形出单曲率零件,无法成形出双曲率形状零件。

### FMLs 成形新思路

为了解决纤维金属层板塑性成形过程层间开裂和回弹变形大的问题,近年来不断提出了新的成形方法。下面对近期提出的几种新方法进行介绍。

#### (1) 蠕变-固化复合成形方法。

由于铝合金蠕变时效成形温度与热固性复合材料的固化温度相近,二者可考虑在同一过程中进行。基于此原理,陶杰<sup>[25]</sup>和湛利华<sup>[26]</sup>等分别提出一种纤维金属层板构件的蠕变-固化复合成形方法,实现了铝合金纤维金属层板的制备成形一体化。该方法提出将铝合金的蠕变时效过程和热固性复合材料固化过程同时

进行,制备复杂曲面形状的铝合金纤维金属层板零件。该方法较先成形金属板材后固化复合材料的曲面零件传统制备方法相比缩减了工序,提高了零件制备精度。同时,采用该方法制备的复杂曲面零件具有层间残余应力小、回弹小等优点。但是,该方法相对于传统的塑性成形方法时间较长。

#### (2) 高能率成形方法。

采用高能率成形方法成形纤维金属层板也是近年提出的一种思路,包括电液成形和电磁成形。崔俊佳等<sup>[27]</sup>提出一种基于电液成形的层合板的成形装置和方法,该方法利用电液成形时高变形率的特性,预期可减小成形过程中层间的剪切力,从而减小层间开裂并且能提高层合板的横向刚度,同时还有望解决预热冲压时回弹量大的问题,并且比冲压成形具有更高的形位精度。同样原理,孙光永等<sup>[28]</sup>提出了纤维金属层的另一种高能率成形方法——电磁成形法。Glushchenkov 等<sup>[29]</sup>开展了 3/2 结构 FLMs 电磁成形试验研究,并将试验结果与采用橡皮垫静态成形试件结果进行了对比,电磁成形零件应变较小,有利于提高成形性,但是也增大了起皱的风险。

#### (3) 自阻加热成形法。

作者提出了一种热塑性纤维铝合金层板零件自阻加热成形方法,该方法利用铝合金电流自阻加热快的优点,使得热塑性纤维铝合金层板沿

厚度方向温度呈非均匀分布,在软化层间界面使得铝合金层板与纤维增强热塑性复合材料界面形成一层熔融状态热塑性树脂薄膜的同时,纤维增强树脂层内部仍能保持一定的强度,避免了成形过程层板厚度的大幅减薄。成形过程中当铝合金层与纤维树脂层间产生剪应力时,该层热塑性树脂熔融薄膜发生剪切变形,释放了剪应力,最终可得到无层间开裂缺陷的热塑性纤维层板零件。同时,由于铝合金温度升高后强度降低,塑性变形能力提高,弹性模量降低,有利于降低成形后层板零件的回弹,提高零件尺寸精度<sup>[30]</sup>。

### FMLs 曲面零件成形关键技术问题

FMLs 曲面零件成形的主要难点在于如何控制金属层与纤维层的协调变形,防止层间开裂的发生,并且由于纤维层变形能力较差,如何降低纤维层的变形也是实现曲面零件成形的关键。而且 FMLs 的回弹受到铺层形式的影响较单一层板更加复杂,这些因素都是制约 FMLs 曲面零件成形的难点。在分析国内外 FMLs 曲面零件成形技术研究取得的成果基础上,提出几个亟待解决的关键技术问题。

(1) 单曲率零件成形尺寸精度控制。

针对单曲率 FMLs 零件,根据国内外开展的研究可以看出,已经基本形成较为成熟的工艺方法,即采用辊弯或压弯的方法。但是,如何控制零件尺寸精度仍然是单曲率零件成形的关键问题,即建立精确的回弹补偿方法。传统金属板材成形过程的回弹补偿算法较为成熟,但是 FMLs 由于采用了层状结构,纤维增强的树脂层与金属层性能差异较大,并且 FMLs 结构特征及纤维排布都会影响回弹量,因此建立回弹补偿算法要充分考虑层间性能差异,具

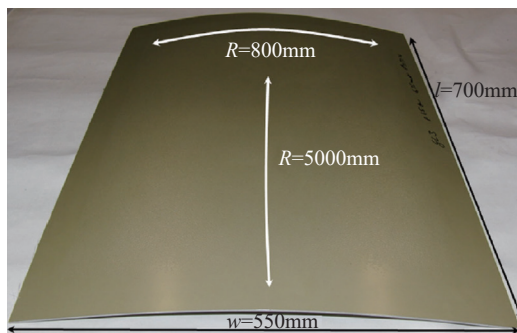


图8 喷丸成形双曲率GLARE层板零件  
Fig.8 GLARE parts formed by shot peen forming

有一定难度。

### (2) FMLs 双曲率零件成形工艺。

双曲率零件是 FMLs 成形的难题, 尽管国外已经尝试采用了多种工艺成形双曲率 FMLs 零件, 但大部分效果不佳。因此, 亟待提出一种新的适合 FMLs 成形的工艺, 克服成形中出现开裂、分层等缺陷。

### (3) FMLs 变形过程层间界面行为。

FMLs 层板中存在着两种界面: 金属 / 纤维树脂层界面, 纤维 / 树脂基体界面。由于纤维和金属二者之间的韧性、硬度、弯曲强度等力学性能差别较大, 在变形过程中层板发生金属层与纤维树脂层的脱层现象, 造成层板的破坏。研究 FMLs 层板成形过程中界面结构(金属 / 粘结剂界面、纤维 / 粘结剂界面)的演化规律, 获得 FMLs 层板发生脱层的极限成形工艺参数, 可有效避免 FMLs 层板在成形过程中因脱层导致的层板失效问题。

### (4) FMLs 层板成形数值分析方法。

FMLs 层板中纤维增强的树脂材料与金属性能差异较大, 建立有限元分析模型时必须考虑各层的变形行为, 同时还必须建立层间界面模型。建立精确的有限元分析模型需要解决以下几个问题: 纤维变形及损伤行为描述; 树脂的变形及损伤行为描述; 纤维与树脂界面行为描述; 金属板与树脂界面行为描述; 金属损伤行为描述。

## 结论

(1) 单曲率 FMLs 零件成形方法基本成熟, 但是双曲率甚至复杂形状 FMLs 零件成形依然是难题。

(2) 随着热塑性复合材料应用越来越多, 热塑性 FMLs 层板由于其良好的韧性, 更好的抗疲劳、裂纹扩展能力及抗冲击性能, 将得到更为广泛的应用。这也为应用塑性成形方法成形 FMLs 层板提供了便利。

(3) 近期提出的新方法主要围绕

如何克服纤维树脂与金属层间开裂, 并充分提高纤维金属层板成形性。

## 参考文献

- [1] TAMER S, EGEMEN A, MUSTAFA O B, et al. A review: fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods [J]. *Materials and Design*, 2011, 32: 3671–3685.
- [2] 韩奇钢, 孙延标, 杨文珂, 等. 纤维 / 金属层状复合材料的研究及应用进展 [J]. *精密成形工程*, 2019, 11(1): 17–24.
- [3] HAN Qigang, SUN Yanbiao, YANG Wenke, et al. The development in research and application of fiber metal laminated composites [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(1): 17–24.
- [4] GUNNINK J W, VLOT A, DE VRIES T J, et al. GLARE technology development 1997–2000 [J]. *Applied Composite Materials*, 2002, 9: 201–219.
- [5] VERMEEREN C A J R. Historic overview of the development of fiber metal laminates [J]. *Applied Composite Materials*, 2003, 13(6): 189–205.
- [6] VOLT A, GUNNINK J W. *Fibre metal laminates* [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [7] TJARKO D J. *Forming of laminates* [D]. Delft: Delft University of Technology, 2004.
- [8] 贾新强, 郎利辉. 纤维金属层板制备成形的研究现状及发展趋势 [J]. *精密成形工程*, 2017, 9(2): 1–6.
- [9] JIA Xinqiang, LANG Lihui. Research status and development trend of fiber metal laminates forming [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2017, 9(2): 1–6.
- [10] 吴欣桐, 湛利华, 李树健, 等. 纤维金属层板构件成形工艺研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(1): 12–20.
- [11] WU Xintong, ZHAN Lihua, LI Shujian, et al. Research progress on forming technology of fiber metal laminates component [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(1): 12–20.
- [12] SINKE J. Manufacturing of GLARE parts and structures [J]. *Applied Composite Materials*, 2003, 10: 293–305.
- [13] HOLLEMAN E, VAN PRAAG R.

On the minimum bend radius of some GLARE 2 and GLARE 3 grades: M–686[R]. Delft: Delft University of Technology, 1995.

[11] 刘建光, 张嘉振. GLARE 层板弯曲回弹有限元分析 [C]// 第十五届全国塑性工程学会年会论文集. 济南, 2017.

LIU Jianguang, ZHANG Jiazhen. FE analysis on bending and springback of GLARE laminate[C]//Proceeding of the 15th annual conference of the China Society for Technology of Plasticity. Jinan, 2017.

[12] KEIPOUR S, GERDOOEI M. Springback behavior of fiber metal laminates in hat-shaped draw bending process: experimental and numerical evaluation [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(5–8): 1755–1765.

[13] ZAL V, NAEINI H M, BAHRAMIAN A R, et al. Investigation of the effect of temperature and layup on the press forming of polyvinyl chloride–based composite laminates and fiber metal laminates [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(1–4): 207–217.

[14] KIM S Y, CHOI W J, PARK S Y. Spring–back characteristics of fiber metal laminate (GLARE) in brake forming process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 32: 445–451.

[15] MOSSE L, COMPSTON P, CANTWELL W J. The effect of process temperature on the formability of fibermetal laminates [J]. *Composite Part A*, 2005, 36(8): 1158–1166.

[16] 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: 163–168.

[17] LIU S, LANG L, SHERKATGHANAD 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.

[18] HAHN M, KHALIFA N B, SHABANINEJAD A. Prediction of process

forces in fiber metal laminate stamping [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(3): 031002.

[19] RAJABI A, KADKHODAYAN M, MANOOCHERHI M, et al. Deep-drawing of thermoplastic metal-composite structures: Experimental investigations, statistical analyses and finite element modeling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 215: 159-170.

[20] SAADATFARD A, GERDOOEI M, JALALI A A. Drawing potential of fiber metal laminates in hydromechanical forming: A numerical and experimental study [J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2018: 1099636218785208.

[21] LIU S, LANG L, GUAN S. An investigation into the formability and processes of glare materials using hydro-bulging test [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, 20(1): 121-128.

[22] CAREY C, CANTWELL W J, DEARDEN G, et al. Low power laser forming of glass fibre based fibre metal laminates [C]// *Laser Assisted Net Shape Engineering 5, Proceedings of the LANE*. Erlangen, 2007.

[23] EDWARDSON S P, FRENCH P, DEARDEN G, et al. Laser forming of fibre metal laminates [J]. *Lasers in Engineering*, 2005, 15: 233-255.

[24] 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: 425-438.

[25] 陶杰, 李华冠, 胡玉冰, 等. Glare 构件的制备成形方法: ZL 201410056071.3[P]. 2016-03-02.

TAO Jie, LI Huaguan, HU Yubing, et al. The preparation forming method of Glare component: ZL 201410056071.3[P]. 2016-03-02.

[26] 湛利华, 吴欣桐, 常腾飞, 等. 一种纤维金属层板构件的制造方法及其采用的装置: ZL 201610527882.6[P]. 2019-02-22.

ZHAN Lihua, WU Xintong, CHANG Tengfei, et al. A kind of manufacturing method of fiber metal laminate components and apparatus: ZL 201610527882.6[P]. 2019-02-22.

[27] 孙光永, 崔俊佳, 李光耀, 等. 一种热塑性玻璃纤维增强铝合金层板的成形装置与方法: ZL 201410128520.0[P]. 2015-09-

16. SUN Guangyong, CUI Junjia, LI Guangyao, et al. A forming device and method for thermo-plastic glass fiber reinforced aluminum alloy laminates: ZL 201410128520.0[P]. 2015-09-16.

[28] 崔俊佳, 孙光永, 李光耀, 等. 一种基于电液成形的层合板的成形装置和方法: ZL 201410128254.0[P]. 2016-04-20.

CUI Junjia, SUN Guangyong, LI Guangyao, et al. A forming device and method of laminated plate based on electro-hydraulic forming: ZL 201410128254.0[P]. 2016-04-20.

[29] GLUSHCHENKOV V, CHERNIKOV D, ERISOV Y, et al. Electro-magnetic forming of fiber metal laminates [J]. *Key Engineering Materials*, 2019, 794: 107-112.

[30] 刘建光, 岳广全, 薛佳, 等. 一种纤维增强热塑性树脂铝合金层板零件成形方法: ZL 201510510924.0[P]. 2017-11-10.

LIU Jianguang, YUE Guangquan, XUE Jia, et al. A kind of forming method of fiber reinforced thermoplastic resin aluminum alloy laminate parts: ZL 201510510924.0[P]. 2017-11-10.

通讯作者: 刘建光, E-mail: cnjgliu@126.com。

## Research on Forming Technology of Fiber Metal Laminate Curved Parts

LIU Jianguang, ZHANG Jiazhen, YUE Guangquan, GE Zengru

(Beijing Key Laboratory of Civil Aircraft Structures and Composite Materials, Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute of COMAC, Beijing 102211, China)

**[ABSTRACT]** Due to good comprehensive performance, fiber metal laminates (FMLs) have been applied more and more in the fields of aviation and aerospace. However, forming technology has become one of the main difficulties limiting the applications of FMLs. In this paper, the forming technologies of FMLs are reviewed. The effect factors on the formability of FMLs and main defects are analyzed. Then the research progress of the forming technology of curved parts at home and abroad as well as several new recently proposed forming technologies of FMLs are introduced. Finally, the existing problems and bottleneck technologies of FMLs plastic forming are analyzed.

**Keywords:** Fiber metal laminate; Curved part; Forming; Springback; Debonding

(责编 大漠)