

制孔质量约束的铝合金薄壁叠层结构 单向预压钻孔工艺研究

Study of One-Side Pressed Drilling Process of Aluminum Alloy Thin-Walled Laminated Structure

中航工业北京航空制造工程研究所 卢志军

[摘要] 进行了铝合金薄壁叠层结构单向预压钻孔试验,利用方差分析法研究了钻孔参数对孔圆柱度、夹层毛刺等影响的显著性。以零件的变形量为基础建立单向预压情况下钻孔圆柱度的计算模型。分析了钻孔出口毛刺形成机理以及预压力对夹层毛刺的抑制作用。通过算例,验证了叠层零件变形量计算模型的正确性和孔圆柱度计算模型的可靠性。最后,综合考虑孔圆柱度、夹层毛刺高度、效率等因素提出了工艺决策建议。

关键词: 单向预压 薄壁叠层结构 同轴度 夹层毛刺

[ABSTRACT] Drilling experiments for thin-walled aluminum alloy laminated structures are carried out considering the one-side press. The method of variance analysis is used to study the cylindricity and burr in the laminate. The cylindricity predicting model is proposed based on the deformation of the workpiece. The mechanism of the burr formation and the relationship between the laminated gap and burr are discussed. The deformation of the workpiece under one-side press and the cylindricity predicting model are verified by a example. Finally, the suggestion about process decision considering the cylindricity, burr and efficiency is proposed.

Keywords: One-side press Thin-walled laminated structure Concentricity Burr in the laminate

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S2.152

在飞机主要零部件当中,存在大量铝合金薄壁叠层结构,为了提高装配效率以及叠层孔的同轴度,此类结构往往是一次性钻出连接孔后再通过机械紧固件进行连接固定的^[1-2]。由于钻孔设备结构形式的限制、工装及待加工产品部段的开敞状态以及工装上对钻孔样板的舍弃,采用单向预压钻孔工艺成为必然手段。自动钻孔设备多在钻孔前利用压力脚等机构对待加工零件施

加初始单向预压力^[3-4],此方法有效地避免了因缺少钻孔样板的支撑以及夹紧而导致的叠层稳定性差的问题。由于待加工结构的叠层构型特点,在钻孔过程中,随着钻孔深度的变化,壁板叠层结构的受力状况是按阶段变化的,因此,可以通过对钻孔前的初始预压力、钻孔的轴向力等参数的选择,对叠层状态进行控制,从而保证钻孔质量。

国内外学者对金属薄壁零件以及薄壁叠层零件的钻孔过程进行了相关研究。张兴华、郑慧慧^[5]通过对Ti-6Al-4V钛合金和7075-T6铝合金组成的叠层材料进行干式钻削试验,分析了叠层次序、压紧力、进给量和转速对层间毛刺高度和宽度的影响,并观察了毛刺的微观形态。王珉^[6-7]主要以叠层层间间隙为评判依据,分析了单向压紧力对毛刺的影响,并以某飞机中机身和中后机身对接处的典型位置为实例,应用有限元方法分析了贴合面间隙随压紧力变化情况,最后给出合理的压紧力推荐值。王成勇^[8]用最小量冷却液法钻削航空铝-钛叠层复合板,对铝-钛合金复合板的钻削加工进行的一系列研究中,发现切屑的摩擦磨损作用是造成铝板孔径波动幅度较大、平均孔径值偏差大和孔径呈喇叭形的原因。针对薄壁零件钻孔质量需求,面向薄壁零件的定位夹紧的不稳定性,Antony Fields^[9]研制了一种柔性夹具和机器人自动制孔系统,提出了使用压力脚作为支撑件在自动钻孔过程中给予预压力以减小钻削力给薄壁零件带来的动态载荷,以保证零件的定位刚度,从而保证钻孔质量。Shikata^[10]主要对金属薄板的钻孔试验结果进行了分析与研究,通过设定不同的钻孔尺寸,检测钻孔过程中钻孔轴向力、扭矩、孔的质量等数据,提出了金属薄板钻孔的质量与孔的尺寸和切削参数状况有密切的关系。Melkote^[11]对蒙皮和框装配的制孔作了部分试验研究,对刀具等参数作了分析。但是试验的压紧方案与自动化装配过程中单向预压钻孔实际工况差距较远,无法保证试验和实际加工情况的一致性。Wardak^[12-13]在考虑了不同夹具定位状态不同钻孔位置

所钻孔的变形情况,对可变形金属板材的钻孔过程进行了建模仿真,并对仿真结果进行了分析。

本文将铝合金薄壁叠层单向预压情况下的钻孔变形过程及误差进行深入研究。拟以弹性力学、板壳理论为理论基础,详细分析该加工工艺对产品钻孔质量的影响,并建立单向预压钻孔的圆柱度计算模型,为钻孔工艺决策提供必要的理论基础与方法。

1 薄壁叠层结构单向预压钻孔工艺分析

首先,设计试验,通过试验研究钻削工艺参数对制孔质量的影响。试验台系统由钻削试验台,单向预压钻孔夹具和钻削力测定系统组成。为了能精确调整初始施加的单向预压紧力以达到加工试验效果,采用 Kistler 9130B 力传感器进行预压力的采集,该力传感器安装于上压板和压力脚之间。钻削力测定系统由 Kistler 9257A 型测力仪、Kistler 5073 型电荷放大器和 HBM G2Ni 瞬态信号记录仪组成,其中 Kistler 9130B 力传感器也共用此套电荷放大器以及信号记录仪。

本次试验中采用 5052 铝材制备而成的叠层构件作为试件,为了保证孔与孔之间影响尽量小,孔间距需大于 3 倍孔直径,且孔距试片边缘距离应不小于 2 倍孔直径。试验中,采用 5052 铝合金板作为试验件,长 240mm,宽 50mm,厚 2mm。为了研究不同钻孔位置钻孔参数对其钻削质量的影响,每组零件设置有 3 个不同的钻孔点位,每一个钻孔点位需要一组试验数据。

本试验的目的是为了考察钻孔工艺参数对钻孔质量的影响,特别是区别于传统的钻削过程,新加入的工艺参数单向预压紧力对钻孔质量的影响,最终探索孔圆柱度、夹层以及出口毛刺等随不同钻削参数的变化规律。本试验的因素水平表设计如表 1 所示。

钻削形成的毛刺的主要形式包括带钻帽的边缘均匀的毛刺、不带钻帽的边缘均匀的毛刺以及花冠状毛刺。圆柱度误差是最大半径和最小半径之差(图 1)。

为了确定各加工参数对孔圆柱度和层间出口毛刺的影响,对其试验结果中最大轴向力进行 F 检验,判断各加工参数对钻削轴向力影响的显著性。根据各因素的自由度 3,误差项自由度 6,查 F 检验的临界值(F_a)表。根据 F 检验原则,若因素的 F 值大于 $F_{0.01}$,则影响特别显著;大于 $F_{0.05}$ 而小于等于 $F_{0.01}$,则影响显著;若因素的 F 值大于 $F_{0.1}$ 而小于等于 $F_{0.05}$,则影响一般;若小于等于 $F_{0.1}$,则影响很小,可以不考虑。据此可以判断本试验各因素的显著程度。

由图 2~4 分析结果可知,单向预压力对夹层毛刺影响最为显著,对于孔圆柱度、进给速率和单向预压力也有显著影响。根据试验结果,毛刺高度随着预压力增

表1 试验方案设计表

编号	预压力 /N	进给速率 / ($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	主轴转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	0	0.02	1500
2	0	0.04	2000
3	0	0.06	2500
4	0	0.08	3000
5	30	0.02	2000
6	30	0.04	1500
7	30	0.06	3000
8	30	0.08	2500
9	60	0.02	2500
10	60	0.04	3000
11	60	0.06	1500
12	60	0.08	2000
13	90	0.02	3000
14	90	0.04	2500
15	90	0.06	2000
16	90	0.08	1500

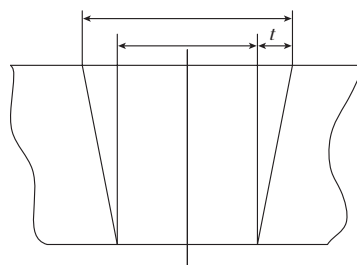


图1 孔圆柱度误差

Fig.1 Cylindricity error

大而减小,孔圆柱度随着预压力和进给速率的增大而增大。两个评价指标加上制孔效率,在工艺决策上相互冲突,需要对其形成机理进一步分析,以进行工艺决策支持。

2 薄壁叠层结构单向预压钻孔圆柱度建模

实际上,钻孔过程可能受到锋利的钻头和变形零件之间的共同作用影响。随着钻削加工的不断进行,材料的不断去除,零件的几何形状发生了改变,零件的结构刚度也随之改变,往往变得更弱。对于薄壁零件而言意味着会产生更大的变形,不仅仅在钻孔区域附近,而且在零件的较远区域亦是如此。由于材料去除引起的零件局部以及整体的变形,直接影响了正常的钻孔过程。

孔加工中需考虑了材料的局部变形过程,在零件的变形区域与刚性钻头之间产生接触,同样会对材料进行切削去除。当钻孔外力包括钻头的轴向推力以及钻削扭矩和夹具的夹紧力卸载,即零件处于一种无加载的状态,零件发生弹性回复,已有的孔壁从一个最初的圆柱

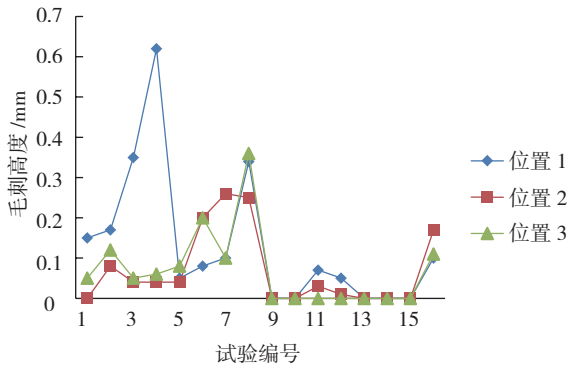


图2 毛刺高度
Fig.2 Height of burr

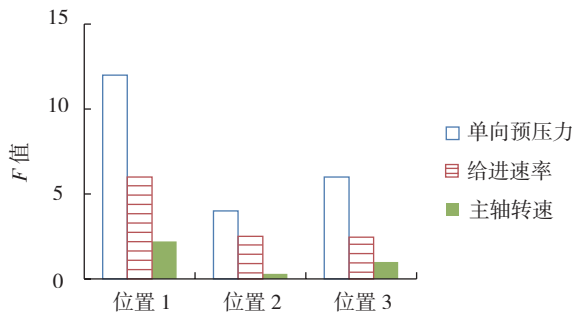


图3 夹层毛刺显著性分析结果
Fig.3 Analysis of burr in the laminate

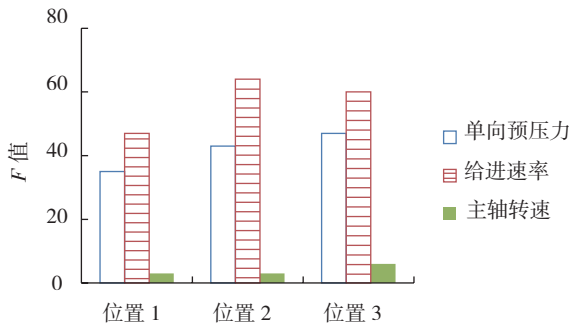


图4 圆柱度显著性分析结果
Fig.4 Analysis of cylindricity

形变为了复杂的三维喇叭形孔。

下面分别对弹性薄板和薄壁梁的孔壁变形及位移进行分析。假设预压力未撤去,所钻孔尺寸为精确尺寸,且孔径严格遵循钻头直径。

(1) 弹性薄板。

孔中心 O' 在坐标系 O 中的坐标为 (ζ, η) (图5)。对于弹性薄板而言,在施加了单向预压力之后,薄板内材料均分别沿 x 轴和 y 轴发生位移 u 和 v ,因此在受单向预压且钻孔结束时,孔周点的位置方程为:

$$((x+\mu)-\zeta)^2 + ((y+v)-\eta)^2 = r^2, \quad (1)$$

令 $F_{cs}(x,y) = (x-\zeta)^2 + (y-\eta)^2$, 根据圆柱度公差的定义,圆柱度误差应为:

$$t = \sqrt{F_{cs} \max(x,y)} - \sqrt{F_{cs} \min(x,y)}, \quad (2)$$

因此,弹性薄板的圆柱度误差控制方程为:

$$t_s = \sqrt{F_{cs} \max(x,y)} - \sqrt{F_{cs} \min(x,y)}, \quad (3)$$

约束条件为:

$$\begin{aligned} &((x+u)-\xi)^2 + ((y+v)-\eta)^2 = r^2 \\ &-\frac{h_s}{2} \leq z \leq \frac{h_s}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

为保证孔圆柱度误差 t , 应该满足 $t_s=t$ 。可通过对单向预压力 F_{ps} 进行控制,使其符合制造要求,从而可确定 F_{ps} 的取值范围。

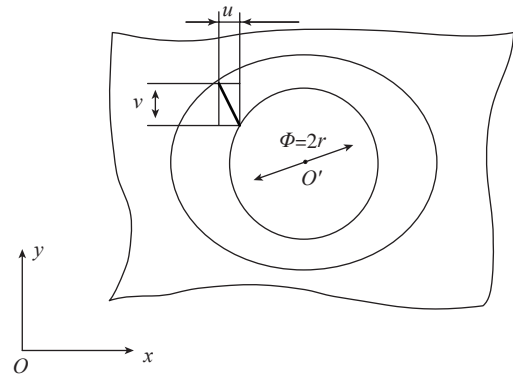


图5 弹性薄板孔壁变形情况
Fig.5 Deformation of thin-wall hole

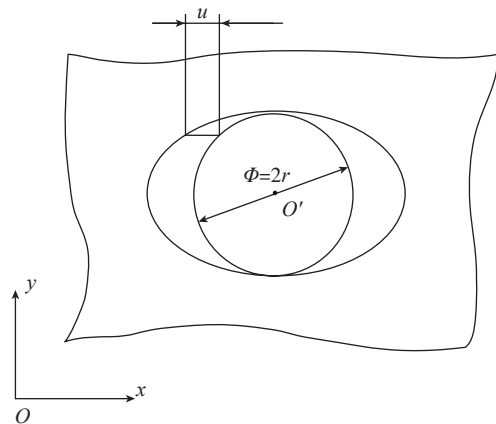


图6 弹性梁孔壁变形情况
Fig.6 Deformation of hole wall

(2) 薄壁梁。

对于薄壁梁而言,其结构属于弹性薄板的一种特殊形式,假设梁的弯曲为平面纯弯曲状态,梁内的点仅沿 x 轴发生位移 u (图6),因此在受单向预压且钻孔结束时,孔周点的位置方程为:

$$((x+u)-l_1)^2 + y^2 = r^2, \quad (5)$$

进行变换整理得:

$$((x-l_1)^2 + y^2 = r^2 - u^2 - 2(x-l_1)u), \quad (6)$$

令 $F_{cst}(x,y) = (x-l_1)^2 + y^2$, 根据圆柱度公差的定义,圆柱度误差应为:

$$t_{st} = \sqrt{F_{cst} \max(x,y)} - \sqrt{F_{cst} \min(x,y)}, \quad (7)$$

因此,圆柱度误差控制方程为:

$$t_{sst} = \sqrt{F_{\text{cst}} \max(x, y)} - \sqrt{F_{\text{cst}} \min(x, y)}, \quad (8)$$

约束条件为:

$$\begin{aligned} ((x+u) - l_1)^2 + y^2 &= r^2 \\ -\frac{h_{st}}{2} \leq z &\leq \frac{h_{st}}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

为保证孔圆柱度误差 t , 应满足 $t_{st} \leq t$ 。可通过对单向预压力 F_{ps} 进行控制, 使其符合制造要求, 同样可确定 F_{ps} 的取值范围。

3 钻孔出口毛刺产生机理分析

出口毛刺通常是一种滚动型毛刺, 这种毛刺通常在剪切材料所需的能量大于材料发生塑性变形所需能量时产生。当钻头前进到出口区域附近的时候, 出口部分材料开始发生变形, 假设当变形开始后变形的材料不再参与切削, 仅仅持续发生塑性变形, 直到材料在切削边缘达到断裂极限, 从而形成毛刺和钻帽。孔出口处材料发生变形之前所有的工作都由钻头的切削作用完成, 然而, 当出口材料变形开始之后, 靠近外侧切削刃区域的材料仍然参与切削, 而靠近钻头中央部分则几乎不受到钻头的切削作用。到最后, 所有的工作均只是对材料产生变形作用, 而没有任何切削作用。

在钻削金属叠层零件时, 除了会在材料表层形成毛刺外, 加工处理不当, 还会在叠层夹层间形成毛刺。这是因为在层间钻削区域附近, 材料弯曲特性的差异和钻削推力的共同作用会形成夹层间隙, 这为夹层毛刺的形成提供了物理空间。对于单向预压钻孔过程来说, 单向预压紧力的介入为消除夹层间隙提供了有利条件。因此, 控制好钻削轴向力与单向预压紧力之间的相互关系, 确定两者耦合作用对叠层的影响是研究夹层毛刺产生的基础。

4 理论算例与工艺优化

以试验中的试验件为对象, 计算并通过有限元验证薄壁叠层结构变形量, 采用 ABAQUS 有限元软件模拟铝合金薄壁结构在集中载荷情况下的位移。

对零件的两端采用固定约束。根据试验方案, 对零件 3 个钻孔点位置 $x=35\text{mm}$ 、 $x=70\text{mm}$ 、 $x=105\text{mm}$ 处均施加 30N、60N 和 90N 的集中力。

计算 $F_{\text{ps}}=60\text{N}$ 时薄板上下表面的位移量 u , 与仿真结果进行对比, 可见计算结果与仿真结果具有良好的 consistency, 如图 7、8、9 所示。

根据本文提出的圆柱度计算模型, 采用两层厚度为 2mm 与仿真实例相同尺寸的叠层板进行计算, 叠层之间无初始安装间隙, 部分圆柱度计算如表 2 所示。

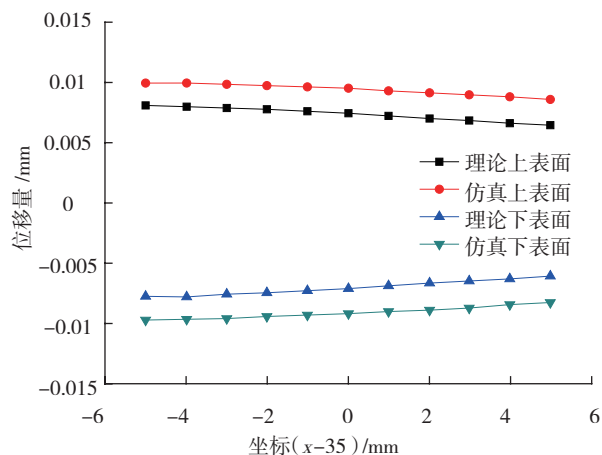


图7 位置1, $F_{\text{ps}}=60\text{N}$

Fig.7 Position 1, $F_{\text{ps}}=60\text{N}$

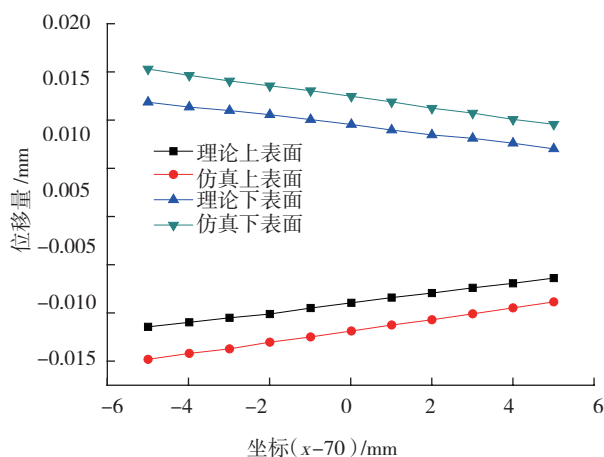


图8 位置2, $F_{\text{ps}}=60\text{N}$

Fig.8 Position 2, $F_{\text{ps}}=60\text{N}$

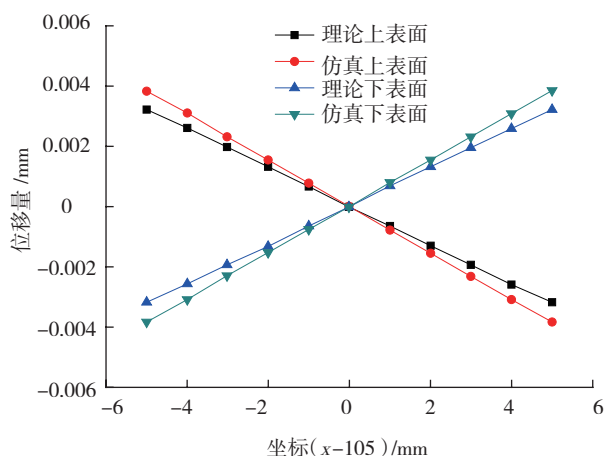


图9 位置3, $F_{\text{ps}}=60\text{N}$

Fig.9 Position 3, $F_{\text{ps}}=60\text{N}$

由计算结果可以看出, 在相同单向载荷的条件下, 由于材料的 u 向变形量情况为位置 3 < 位置 1 < 位置 2, 导致圆柱度值遵从这个规律, 即位置 3 < 位置 1 < 位置 2。针对本文试验件, 若取层间毛刺高度要求

表2 孔圆柱度计算值

预压紧力 /N	孔圆柱度 /mm		
	位置 1	位置 2	位置 3
30	0.0078	0.0108	0.002
60	0.0156	0.0217	0.0039
90	0.0234	0.0325	0.0059

$H_{\max} \leq 0.03\text{mm}$, 圆柱度公差 $T_{\max}=0.025\text{mm}$ 。首先根据圆柱度要求, 在表 2 中差值求取预压力范围 $F \leq 71\text{N}$, 然后根据毛刺高度要求, 确定预压力 $F \geq 60\text{N}$ 。对于转速和进给速率, 从变形控制角度出发, 进给不得超过 0.06mm/r , 要求越小越好, 但为保证制孔效率, 可取上限值, 同时适当增大转速, 以提高效率。

5 结论

本文对薄壁叠层单向预压钻孔工艺过程进行了分析, 通过试验研究、理论分析和有限元仿真, 以孔同轴度、出口毛刺为评价指标, 对叠层单向预压制孔工艺参数进行了分析, 主要贡献如下:

(1) 设计薄壁叠层结构单向预压钻孔试验, 以孔圆柱度和夹层毛刺高度为主要评价指标, 分析预压力、转速和进给速率对制孔质量的影响显著度。

(2) 通过对钻孔过程的分析, 结合薄壁零件弱刚性特点, 分析单向预压紧力对叠层零件产生的初始变形。考虑零件材料的变形, 建立钻孔后孔圆柱度计算模型。并利用 ABAQUS 有限元分析软件建立了薄板零件的单向受压模型, 计算出叠层零件材料的变形量, 验证叠层孔圆柱度计算模型。

(3) 分析了主要的钻孔毛刺种类, 包括出口毛刺以及夹层毛刺, 避免夹层毛刺成形的方法是尽量增大单向预压力以减小钻削过程中的夹层间隙。

(4) 综合考虑孔圆柱度、夹层毛刺高度、效率等因素, 提出了工艺决策建议。

参考文献

- [1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [2] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术. 航空制造技术, 2007(1): 96-99.
- [3] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERT E, et al. ONCE (one-sided cell end effector) robotic drilling system. SAE, 2002.
- [4] HEMPSTEAD B, DEVLIEG R, MISTRY R, et al. Drill and drive end effector[C]/SAE 2001 Automated Fastening Conference & Exposition, Seattle, WA, USA, 2001.
- [5] 张兴华, 郑慧慧. 金属叠层材料层间毛刺形成的钻削实验研究. 现代制造工程, 2011(10): 79-82.
- [6] 王珉, 薛少丁, 蒋红宇, 等. 飞机大部件对接自动化制孔单

向压紧力分析. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(4): 553-558.

[7] 王珉, 薛少丁, 陈文亮, 等. 面向飞机自动化装配的单向压紧制孔毛刺控制技术. 航空制造技术, 2011(9): 26-29.

[8] 王成勇. 用最小量冷却液法钻削航空铝-钛多层复合板. 机械工程学报, 2002, 38(6): 93-96.

[9] ANTONY F, KAMAL Y T, HARUHIKO A. Flexible fixturing and automatic drilling of sheet metal parts using a robot manipulator. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 1989, 5(4): 371-380.

[10] SHIKATA H, DEVRIES M F, WU S M, et al. An experimental investigation of sheet metal drilling. Annals of the CIRP, 1980, 1: 85-88.

[11] MELKOTE S N, NEWTON T R, HELLSTERN C, et al. Interfacial burr formation in drilling of stacked aerospace materials. Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs, 2009.

[12] WARDAK K R, TASCH U, CHARALAMBIDES P G. Optimal fixture design for drilling through deformable plate workpieces, Part I: model formulation. Journal of Manufacturing Systems, 2001, 20(1): 23-32.

[13] WARDAK K R, TASCH U, CHARALAMBIDES P G. Optimal fixture design for drilling through deformable plate workpieces, Part II: results. Journal of Manufacturing Systems, 2001, 20(1): 33-43.

(责编 李丹)

(上接第 151 页)

EA9696 加尼龙网试验件是在蜂窝和内外面板之间加一层透气尼龙网, EA9696 胶膜是一种蓝色环氧基胶膜, EA9696K 是一种白色环氧基胶膜, 两种胶膜的主要区别是 EA9696K 胶膜中复合了一层透气网格, 在固化抽真空过程中透气性能更好。

在采用同种蜂窝、同种预浸料、相同固化条件的情况下:(1) 蜂窝和面板间采用 EA9696 胶膜的试验件蜂窝与面板脱粘;(2) 蜂窝和面板间采用 EA9696 胶膜加尼龙网的试验件蜂窝与面板粘接完好;(3) 蜂窝和面板间采用 EA9696K 胶膜的试验件蜂窝与面板粘接完好。

后期滚筒剥离试验结果表明, EA9696 胶膜加尼龙网的试验件蜂窝与面板的滚筒剥离强度值远低于蜂窝与面板采用 EA9696K 胶膜的试验件的滚筒剥离强度值。

2 结论

(1) 碳纤维预浸料固化曲线因成型零件的复杂程度要进行调整, 固化曲线应该根据模具和零件不同, 依据零件热分布来定, 以确保零件固化成型。

(2) 对于蜂窝高度不大于 12mm , 且开敞性较好的夹层结构零件, 采用 EA9696 胶膜真空固化成型, 蜂窝与面板粘接良好, 满足设计要求。

(3) 对于蜂窝高度大于 19mm , 且半封闭的夹层结构零件, 采用真空固化成型时, 为了保证夹层结构蜂窝与面板粘接良好, 必须选用透气性更好的胶膜。试验结果表明 EA9696 胶膜的透气性能不好, 应改用 EA9696K 胶膜。

(责编 李丹)