

工艺参数对复合材料长桁成型载荷的影响

马开维¹, 李博¹, 朱佳强², 段跃新²

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092;

2. 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

[摘要] 复合材料长桁机械成型过程中的成型载荷与成型工艺参数的关系会影响预制体成型过程的稳定性和长桁成型后的性能, 利用自制复合材料L型长桁自动化成型机, 搭建出一种长桁结构机械成型载荷测试系统, 通过成型温度、成型速率、成型间距和铺层结构的研究, 对成型载荷的变化规律进行测试和分析, 探索出工艺参数与成型载荷之间的经验公式。结果表明: 在合适的成型温度范围内, 随着成型温度的逐渐升高, 成型速率逐渐降低, 成型间距逐渐增大, 会使得成型载荷逐渐降低; 铺层方式不同时, 成型载荷变化情况为: $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{ns} > [0^\circ/90^\circ]_{ns} > [\pm 45^\circ]_{ns}$; 最后得到成型载荷与工艺参数关系的经验公式, 在一定范围内对成型温度、成型速率、成型间距可具备实际指导能力。
关键词: 复合材料长桁; 预制体; 工艺参数; 成型载荷; 经验公式

Effect of Process Parameters on Forming Load of Composite Stringer

MA Kaiwei¹, LI Bo¹, ZHU Jiaqiang², DUAN Yuexin²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The relationship between the forming load and the forming process parameters greatly affects the stability of the forming process and the performance of composite stringer preforms. By applying the domestic composite material L-shaped long automatic forming machine to build a mechanical forming load test system, the variation law of forming load was tested and analyzed through the study of molding temperature, molding rate, forming pitch and layup structure, which achieved an empirical formula between process parameters and forming load. The results show that, as the molding temperature gradually increases, the molding rate gradually decreases, on the other hand, the molding pitch gradually increases, which causes the decrease of molding load. When the lamination method is different, the molding load changes as follows: $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{ns} > [0^\circ/90^\circ]_{ns} > [\pm 45^\circ]_{ns}$. Finally, an empirical formula for the relationship between the forming load and the process parameters is obtained, and the molding temperature, the forming rate, and the forming pitch can be practically guided within a certain range.

Keywords: Composite stringer; Preforms; Process parameter; Forming load; Empirical formula

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.072

先进复合材料因其高比强度、比模量和优异的耐疲劳性能等优点, 在新一代民机领域应用越来越广泛, 从主承力结构到次承力结构都广泛地应用先进复合材料, 其中各种形状的复合材料长桁结构被普遍应用于飞机机翼上。传统长桁成型工艺以手工铺覆为主^[1], 具有质量不稳定、效率低下等缺陷, 而自动化生产可以避免这些缺陷, 因此民机长桁的生产逐渐朝自动化方向前进。

复合材料长桁结构的自动化生产已经在空客和波音等大型公司展开, 以热隔膜成型、液压成型、滚轧成型

等工艺方法为主。这种自动成型工艺首先利用自动铺带技术^[2]将预浸料铺叠成平板; 然后调整温度、压力、变形速率等工艺参数将平板铺层滑移贴向特定构型的模具成型为预制体; 最后利用热压罐或者真空固化得到制件成品。预浸料平板铺叠成预制体的过程容易产生褶皱、断裂和纤维变形等缺陷, 影响制件的质量和生产效率, 因此研究合适的工艺参数稳定成型质量成为关键。

对于复合材料铺层成型时工艺参数的影响, 国内外已有众多研究, Elgmel等^[3]研究了压力对于热隔膜成

型过程中隔膜形变的影响,并通过一系列分析得到压力与成型质量的影响关系; Pantelaki 等^[4]定性分析了在 5~20MPa 内提高压力值,可以提高固化质量,但很容易产生尺寸偏差及纤维淤积的现象; Cogswell^[5]提出,理想热塑性复合材料基体在成型温度下的黏度应该介于 100~10000Pa·s 之间。文琼华等^[6]发现温度对预浸料形变、预浸料层间黏附性及预浸料与模具间的黏附性有较大影响; Ning 等^[7]测试了不同铺层数的碳纤维/PPS 预浸料固化时的沿厚度方向的温度曲线,并提出单隔膜成型工艺在厚度方向的温度梯度可能引入残余应力,这可能会降低制件的机械性能或产生变形。Wijskamp^[8]指出预浸料成型之后主要的纤维变形方式包含纤维扭曲以及回弹现象,且回弹主要出现在成型温度到冷却过程中; Barnes 等^[9-11]对变形成型过程中热膨胀系数与回弹之间的关系进行了研究,并准确预测了在成型温度变化时的热变形能力,对层合板在固化过程中的尺寸变化进行了阐释; Keane 等^[12]通过对制件成型后的回弹行为研究发现,采用阳模制造的制件比阴模制造的制件回弹更严重,而增加制件厚度有利于减小回弹,且模具曲率对回弹也有影响。

已有的研究工作大多直接考虑成型工艺参数对于最终长桁成型质量与性能的影响,对于成型过程中载荷的规律变化不够明晰。而成型过程中工艺参数的调整直接影响成型载荷的变化规律,一定程度上决定长桁制件的质量。成型设备在推动层板变形过程中会发生层板的层间滑移,载荷过大会导致层板褶皱,过小会使层板难以移动,使预浸料各部分滑动速度不均匀造成纤维挤出或变形,最终制件的尺寸均匀性不好,因此调整工艺参数,实现长桁制造中合适的载荷变化是外观质量良好、内部纤维均匀的关键。因此研究成型工艺对于成型载荷的影响规律,实时监控成型载荷的变化,必要时调整工艺参数将更加利于工艺窗口的确定,提高制件性能。

本文以自制复合材料 L 型长桁自动化成型机为基础,自研出一种长桁结构机械成型载荷测试系统,在不同工艺参数情况下对成型过程中的成型载荷进行检测与输出。通过分析,给出了工艺参数对于成型载荷的影响规律以及经验公式,为后续 L 型长桁批量生产提供参考依据。

1 试验及方法

1.1 自研成型载荷测试系统

基于自制复合材料 L 型长桁自动化成型机,研制出成型载荷测试系统,该系统能实现以下功能。

(1) 能够对预浸料层叠板进行加热,且加热范围覆盖成型温度所需范围。

(2) 能够设定机械成型过程中的速率,并且对速率参数能够实时控制。

(3) 能够计算和显示机械成型过程中成型载荷/压力,并且能实时记录并采集数据。

(4) 在测量成型载荷过程中,下压装置的下压运动不会因为悬臂梁效应导致成型间距改变或改变较小,可实现对成型制件纤维体积分数的精确控制。

该系统设计原理如图 1 所示。对于铺层数相同的同种预浸料,仅成型间距决定制件的纤维体积含量,其理论值计算公式为:

$$V = \frac{nw}{1.8 \times 10^3 h} \times 100\% \quad (1)$$

式中, V 为纤维体积分数; n 为预浸料层叠板铺层层数; w 为预浸料碳纤维面密度, g/m^2 ; h 为成型间距, mm 。

试验开始时,由力学试验机控制成型机构下压,控制好加热的温度和下压成型速率,将铺叠好的预浸料层板下压弯折成 L 型长桁,传感器实时记录机械成型过程中的载荷。

1.2 试验材料

本试验中使用上海康展复合材料有限公司生产的台丽 T300-6k 碳纤维单向预浸料,其树脂体系为中温固化环氧树脂,树脂含量为 $35\% \pm 2\%$,纤维面密度 $150\text{g}/\text{m}^2$,预浸料面密度为 $224\text{g}/\text{m}^2$,预浸料单层厚度约为 0.164mm 。

1.3 预浸料树脂体系性能测试

为确定合理的成型工艺温度的范围,采用 Bohlin Instrument 公司生产的 Gemini 旋转流变仪对预浸料中树脂流变特性进行了测试。测试采用应力控制模式 (Stress Control, SC),频率为 1Hz ,应力为 10Pa ,升温速率为 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

1.4 样品制备

1.4.1 铺层方向及各部分名称

预浸料中纤维方向沿 L 型件长度方向的为 90° 铺层(图 2 中虚线箭头所示);纤维方向沿 L 型件缘条及腹板宽度方向的为 0° 铺层(图 2 实线箭头所示)。L 型件缘条及腹板部分如图 2 所示,对于设备成形的制件,

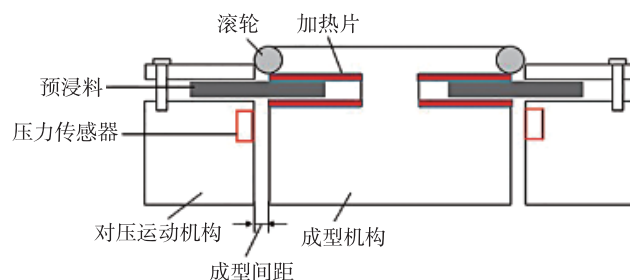


图1 设备设计示意图

Fig.1 Sketch of equipment design

缘条部分为设备盖板预压实固定部分,腹板为下压头成型部分。

1.4.2 层叠板制备

在成型机构的工作台上铺贴 60mm×30mm 的预浸料层叠版,按照要求选取缘条部分尺寸,在等截面成型测试载荷测试夹具安装完毕后进行试验。为保证数据的有效性,本试验工艺参数的数据均随机选取。

试验中利用真空袋成型工艺,对 L 型件预成型体进行固化,固化工艺为 80℃下 30min+130℃下 60min。

2 分析与讨论

2.1 预浸料流变性能测试

树脂黏度影响树脂流动行为,影响制件的机械成型过程,最终影响制件的质量。根据测试的预浸料中树脂流变曲线如图 3 所示,确立合理的成型温度范围,选取树脂黏度较低且有一定差别的 3 种树脂黏度所对应的温度来探索成型温度对制件质量的影响。3 种温度分别为流变曲线转角区域树脂黏度为 253.79Pa·s、

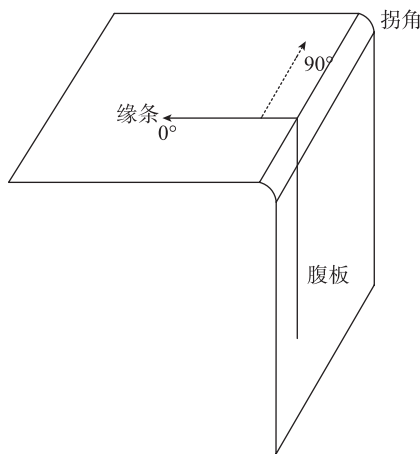


图2 L型制件铺层方向示意图
Fig.2 L-shaped parts' laying direction diagram

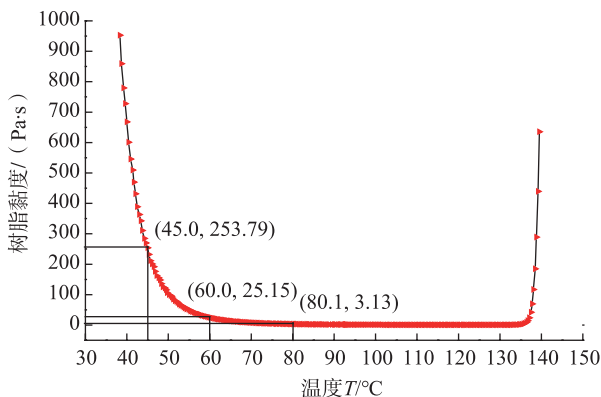


图3 预浸料树脂体系流变测试曲线
Fig.3 Prepreg resin system rheological test curve

25.15Pa·s 所对应的 45℃、60℃,以及平台区域树脂黏度为 3.13Pa·s 所对应的 80℃。

2.2 成型温度对机械成型载荷的影响

在成型间距 4.74mm 下,选择 32 层铺层方式为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{4s}$ 的准各项同性预浸料层叠板,在 3mm/min 下讨论不同温度对成型载荷的影响,所考察成型温度包含 45℃、60℃和 80℃。图 4 为成型载荷曲线图,图 5 为在不同位移处所得载荷与位移变化情况。

如图 4 所示,随着温度上升,成型载荷逐渐减小,且 60℃与 80℃成型载荷变化不大。典型成型载荷曲线可分为 3 个阶段;第 1 阶段为预浸料层叠板逐步变弯至直角并开始贴合模具表面,该阶段成型载荷较小,变化幅度小;第 2 阶段为随着预浸料层叠板贴合模具表面增加,摩擦力逐渐增大,成型载荷呈现直线上升趋势;第 3 阶段为当预浸料平板完全变为直角并贴合至模具表面,成型载荷趋于平缓。随着预浸料黏度数量级下降,成型

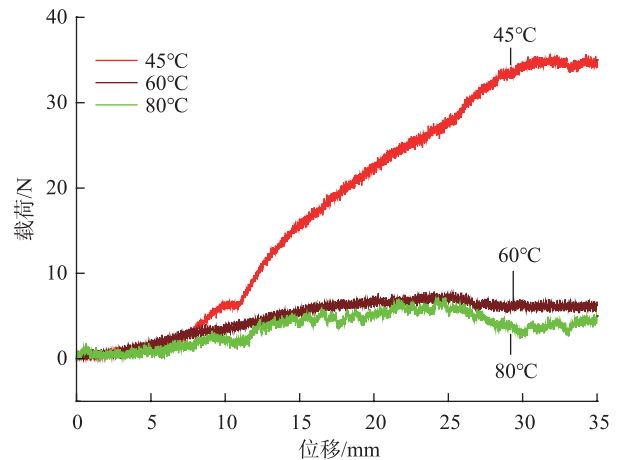


图4 不同温度的成型载荷-位移曲线
Fig.4 Forming load-displacement curve at different temperatures

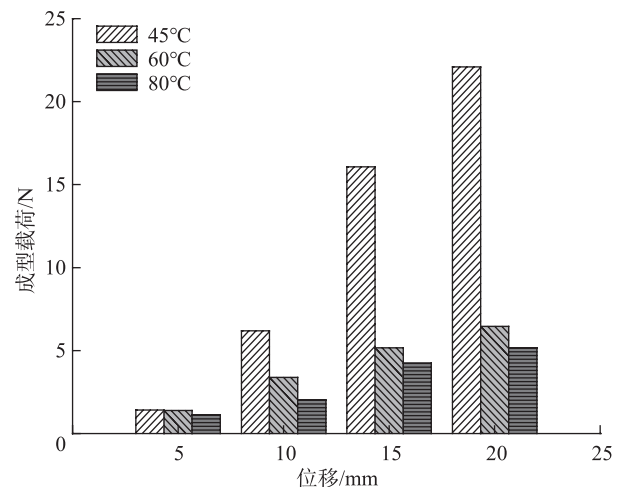


图5 不同温度下成型载荷值
Fig.5 Forming load value at different temperatures

载荷下降较为明显,成型载荷与预浸料体系黏度呈现出正相关。

由图5可知,随着位移逐渐增大,不同温度下成型载荷之间的差距逐渐增大。而在10mm之前,预浸料层叠板需要逐步变为与移动压头侧面进行接触,在此过程中,由于32层预浸料厚度在4.8mm左右,而试验所采用移动压头处的R角为3mm。因此从8mm位移处,预浸料层叠板同时受到上方下压头的压力以及侧方移动压头的摩擦力作用,成型载荷出现较为明显上升,并且随着位移增大,预浸料层叠板近移动压头侧接触面积逐渐增大,因此其成型载荷呈上升趋势。

2.3 成型速率对机械成型载荷的影响

在成型间距为2.48mm、成型温度为60℃,铺层方式为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{2s}$ 的准各向同性16层预浸料平板件,考察不同成型速率下成型载荷的变化情况,试验结果如图6所示。图7为在不同位移处所得载荷与位移变化情况。

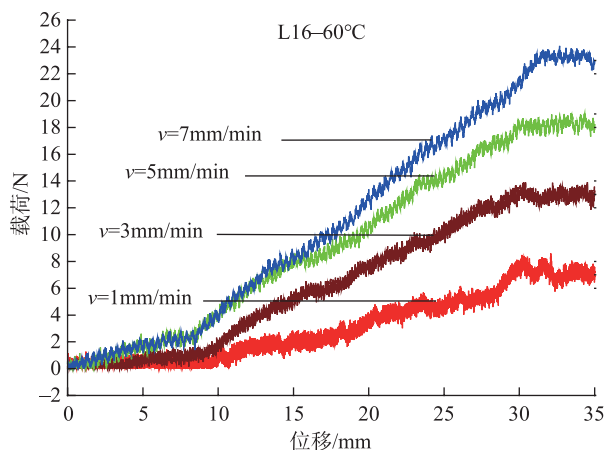


图6 不同速率下成型载荷-位移曲线

Fig.6 Forming load-displacement curve at different forming rates

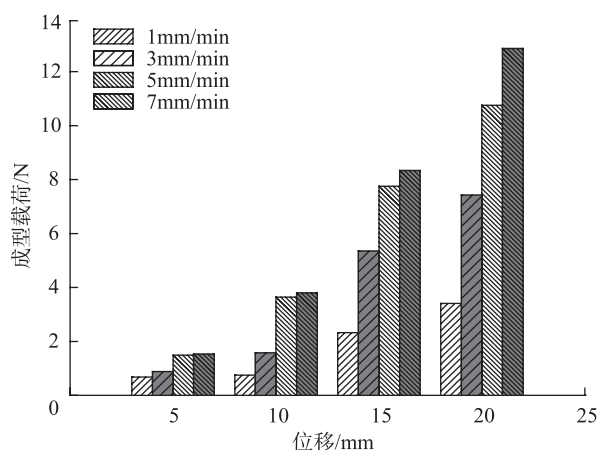


图7 不同成型速率下成型载荷值

Fig.7 Forming load value at different forming rates

结果表明:随着成型速率逐渐增大,成型载荷呈上升趋势,并且近似呈正比例相关。这是由于随着成型速率逐渐增大,预浸料层与层之间的滑移速率梯度逐渐增大,随该速度梯度增大,层与层之间的切应力相应增大,因而成型载荷逐渐增大。图7说明了在不同位移处,成型载荷均呈现出随成型速率增大而增大的趋势,且随着位移逐渐增大,不同成型速率之间的成型载荷差距逐渐增大。

2.4 不同铺层方式对机械成型载荷的影响

考察铺层为32层时,不同铺层方式对于机械成型载荷的影响,分别选择 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{4s}$ 、 $[0^\circ/90^\circ]_{8s}$ 、 $[45^\circ/-45^\circ]_{8s}$ 16层预浸料层叠板,成型温度45℃,成型速率3mm/min下成型载荷对比结果如图8所示,结果表明: $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{4s}$ 成型载荷大于另外两种,表面所包含的 0° 纤维可以更好地承担轴向压力,同时准各向同性铺层又可以最大限度地提供纤维之间的相互掣肘作用,从而得到最大的成型载荷, $[0^\circ/90^\circ]_{8s}$ 相互掣肘作用次之,而 $[45^\circ/-45^\circ]_{8s}$ 的铺层方式中, 45° 纤维受到侧向的压力作用容易受力变形,因此其成型载荷较小。

分别考察不同厚度下不同铺层方式的成型载荷对比,作为验证试验并进行取点后,结果见图9。在相同制件厚度、成型温度、成型速率情况下,对于不同铺层方式的成型载荷对比结果如下: $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{ns} > [0^\circ/90^\circ]_{ns} > [45^\circ/-45^\circ]_{ns}$,并且随着成型厚度增加,成型载荷逐渐增大,不同铺层方式之间载荷差距变大。

2.5 成型间距对机械成型载荷的影响

分别对不同成型间距下32层预浸料层叠板的成型载荷进行对比,分别依据不同纤维体积分数来进行不同成型间距的选择,本试验预选了5个纤维体积分数分别为0.54、0.56、0.58、0.60和0.62,可计算得出相应的成型间隙,如表1所示。

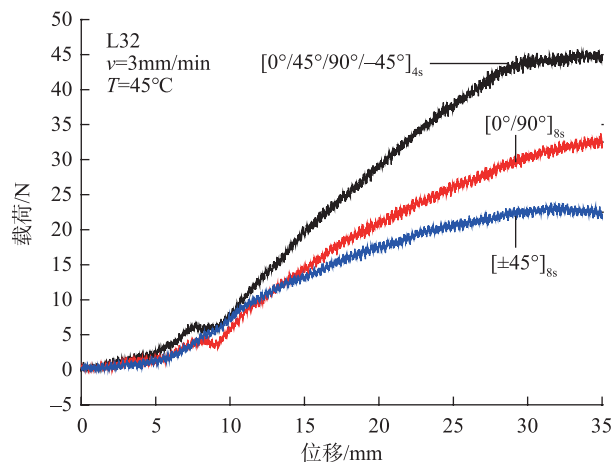


图8 铺层方式不同下成型载荷-位移曲线

Fig.8 Forming load-displacement curve under different laminated structure

由于机械成型时所设定的成型间隙为夹具与压头之间的距离,需要用游标卡尺调节,因此最终选取的成型间隙分别为 4.94mm、4.76mm、4.60mm、4.44mm、4.30mm。本组试验选取的铺层顺序为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{4s}$,成型温度为 60°C ,成型速率为 $3\text{mm}/\text{min}$,所得成型间距与成型载荷之间的关系如图 10 所示。

结果表明:随着成型间距逐渐减小,成型载荷呈上升趋势,且随位移增大,成型载荷逐渐增大。在机械成型过程中,成型间距主要通过影响成型载荷来影响成型质量,成型间距较小时,压头给予制件腹板部分更大的成型压力使腹板部分变为所需厚度,在这个过程中有可能因为成型压力较大使纤维变形或者挤出,如图 11 所示。而在成型间距较大时,使腹板部分变形至所需厚度的成型压力较小。

2.6 经验公式的提出和验证

成型载荷主要由两部分组成:(1)促使预浸料层叠板层间滑移的剪切应力;(2)预浸料铺层与下压头和移动压头之间的摩擦力。在流体力学中,流体之间的切应力如图 12 所示。

由牛顿内摩擦定理可知:

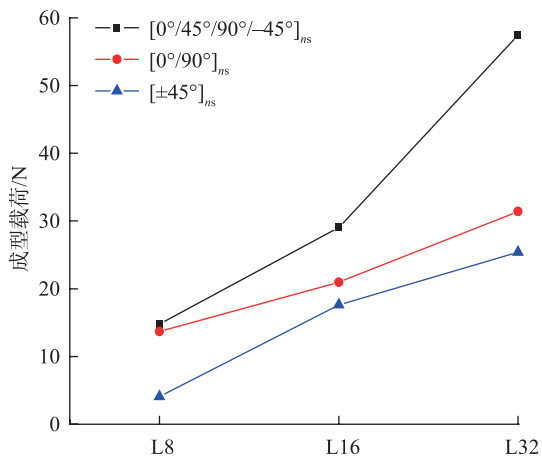


图9 厚度/铺层方式不同时成型载荷值

Fig.9 Forming load value at different thickness/layering method

表1 不同纤维体积分数对应成型间距

Table 1 Forming pitch corresponding to different fiber volume fraction

纤维体积分数 V	成型间隙 /mm
0.54	4.938
0.56	4.762
0.58	4.598
0.60	4.444
0.62	4.301

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2)$$

其中, μ 为流体的黏度; du/dy 为层与层之间的速度梯度,在温度升高的同时,流体黏度下降,在层间速度梯度不变的情况下,流体之间的切应力随着黏度的下降而下降,因而整体载荷也会逐渐降低。以牛顿内摩擦定理为基础,考虑复合材料机械成型工艺主要工艺参数对成型工艺载荷的影响,对试验所得成型载荷进行如下猜测并

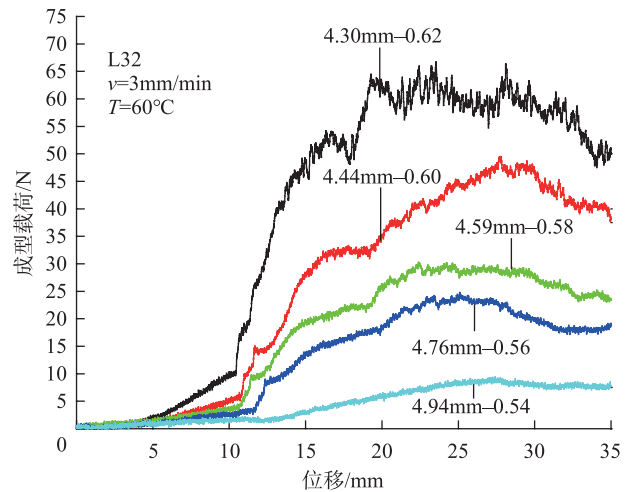
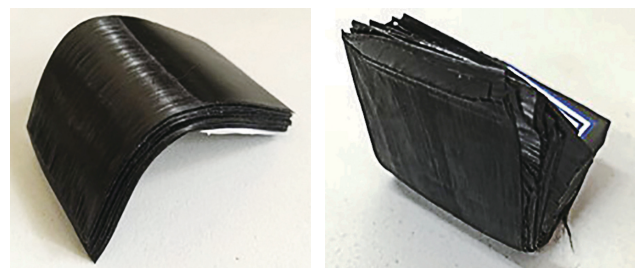


图10 不同成型间距下成型载荷-位移曲线

Fig.10 Forming load-displacement curve at different forming pitches



(a) 4.94mm 成型结果

(b) 4.30mm 成型结果

图11 不同成型间距的结果示意图

Fig.11 Results of different forming pitches

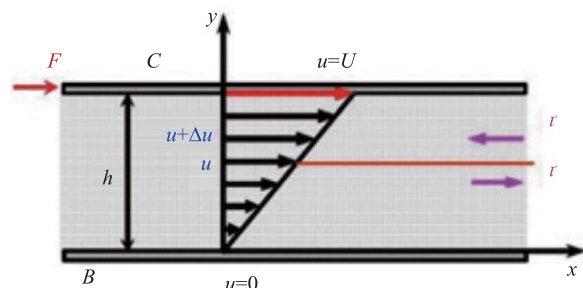


图12 流体切应力示意图

Fig.12 Fluid shear stress diagram

进行探讨。

$$F = K \cdot \frac{v}{d} \cdot n \cdot \mu \cdot s \cdot h \quad (3)$$

其中, F 为成型载荷; K 为矫正因子; n 为预浸料层数; μ 为树脂体系的黏度; v 为成型速率; d 为成型间距; h 为预浸料层叠板宽度; s 为位移。现分别对各工艺条件进行拟合。

(1) 成型温度。本次试验用预浸料在 45℃、60℃、80℃ 下的黏度分别为 253.79Pa·s、25.15Pa·s、3.13Pa·s, 成型速率 $v=3\text{mm/min}$, 成型间距为 4.74mm, h 为 30mm。对试验中成型载荷曲线第 2 阶段, 也就是位移为 10~25mm 的阶段进行线性拟合得到斜率, 并通过式 (3) 计算所对应 K 值(表 2) 可以发现, 随着成型温度逐渐增大, 预浸料黏度逐渐降低, K 值逐渐增大, 且在温度较高的 80℃ 突然上升, 而随成型速率变化不同, 其变化规律不同, 在 45℃、60℃ 时, K 值逐渐变大; 而在 80℃ 下, K 值变小。

(2) 成型速率。对 16 层制件成型温度分别为 45℃ 和 60℃ 进行试验, 对成型载荷曲线中第 2 阶段进行线性拟合, 得到斜率与 K 值, 如表 3 所示。结果显示: 在相同速率下, 60℃ 的 K 值要明显 >45℃, 并且随着成型速率逐渐增大, 大部分 K 值呈现出减小趋势, 不同温度制件 K 值的差距随着成型速率增大而逐渐减小。这说明随着成型速率增大, 成型速率对于成型载荷的影响逐渐加大。

(3) 不同铺层方式。不同铺层下的成型载荷曲线在第 2 阶段进行线性拟合, 就会得到相应的 K 值。随不同铺层方式变化, K 值出现明显变化, 且铺层方式为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{4s}$ 的 K 值要明显大于 $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$ 和 $[\pm 45^\circ]_{4s}$ 两种, 这表明不同铺层方式对于成型载荷变化的影响未能体现在式 (3) 除 K 值之外的影响因素中, 需

进一步探讨。

为保证试验结果准确有效, 现对于成型载荷影响较大的成型温度与成型速率工艺条件设计验证试验。

(1) 成型温度。设计验证试验, 分别进行了不同厚度在不同速率下的成型试验, 分别在 45℃、60℃、80℃ 下进行了 8 层铺层方式为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{1s}$ 、速率为 7mm/min 的试验以及 32 层铺层方式 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{4s}$ 、速率 5mm/min 的试验, 结果显示成型载荷随温度的变化规律与之前相同。

(2) 成型速率。设计验证试验, 进行了铺层方式为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{4s}$ 的 32 层准各向同性制件在 45℃ 下不同成型速率的试验。结果发现在 45℃ 下成型载荷均 >60℃ 相同成型速率下成型载荷, 且成型载荷与成型速率的变化规律相同。

3 结论

(1) 在合适的成型温度范围内, 随着成型温度逐渐升高, 由于预浸料中树脂体系黏度逐渐下降, 在成型过程中预浸料铺层之间阻力降低, 成型载荷逐渐降低。成型载荷受黏度影响较大, 其与温度的关系和黏度与温度关系近似。

(2) 随成型速率逐渐增大, 预浸料层间滑移所需外力变大, 成型载荷逐渐增大。随着成型间距逐渐增大, 预浸料铺层层叠板受挤压程度相应减弱, 层与层之间相互作用减小, 成型载荷逐渐降低, 近似呈反比例函数。

(3) 在不同铺层方式下, 在受到下压头的向下作用力时, 0° 纤维受拉, 可以有效承担载荷并保持不变形, 同时准各向同性铺层可以使得不同铺层之间的相互作用达到最大化, 结果为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{ms} > [0^\circ/90^\circ]_{ms} > [\pm 45^\circ]_{ms}$

(4) 经验公式 $F=K \cdot \frac{v}{d} \cdot n \cdot \mu \cdot s \cdot h$ 对于成型温

表2 不同温度下拟合曲线与K值

Table 2 Fit curve and K value at different temperatures

温度 /℃	$v=3\text{mm/min}$, L32		$v=5\text{mm/min}$, L32		$v=7\text{mm/min}$, L8	
	斜率	K 值	斜率	K 值	斜率	K 值
45	1.46324	569.3485	4.18	975.8596	1.709	293.41
60	0.2337	918.3396	0.4708	1110.024	0.3045	527.54
80	0.14542	4587.931	0.22539	4266.568	0.1427	1986.47

表3 不同速率下拟合曲线和K值

Table 3 Fit curve and K value under different rates

速率 / ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	45℃		60℃	
	斜率	K 值	斜率	K 值
1	1.056	1289.885	0.27402	3380.271
3	1.85464	755.1367	0.5234	2152.195
5	2.9137	711.8066	0.65776	1622.806
7	7.15	1247.657	0.85469	1506.619

度、成型速率、成型间距等工艺条件在一定范围内可提供准确的成型载荷趋势描述,可指导长桁的机械成型。而欠缺铺层方式的影响因素,对于铺层方式改变进而影响成型载荷变化的规律尚不明确,需进一步修改完善。

参考文献

[1] SAMUEL B T. Permanent press, no wrinkles: reinforced double diaphragm formings of advanced thermoset composites[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000.

[2] MONAGHAN M R, O' BRADAIGH C M, MALLON P J, et al. The effect of diaphragm stiffness on the quality of diaphragm formed thermoplastic composite components[J]. Journal of Thermo-Plastic Composite Materials, 1990, 3(3): 202-215.

[3] ELGAMEL H E. Closed-form expressions for the relationships between stress, diaphragm deflection, and resistance change with pressure in silicon piezoresistive pressure sensors[J]. Sensors & Actuators A Physical, 1995, 50(1-2): 17-22.

[4] PANTELAKIS S G, BAXEVANI E A. Optimization of the diaphragm forming process with regard to product quality and cost[J]. Composite Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(4): 459-470.

[5] COGSWELL N F. The processing science of thermoplastic composites[J]. Polymer International, 1987, 1(4): 157-165.

[6] 文琼化, 王显峰, 何思敏, 等. 温度对预浸料铺放效果的影响[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1740-1745.

WEN Qionghua, WANG Xianfeng, HE Simin, et al. Influence of temperature on placement effect of prepreg[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(9): 1740-1745.

[7] NING H, JANOWSKI G M, VAIDYA U K. 单一膜片成形中碳 / PPS 的加工和非等温结晶动力学[J]. 复合材料学报, 2010, 44(8): 915-929.

NING H, JANOWSKI G M, VAIDYA U K. Processing and nonisothermal crystallization kinetics of carbon/PPS in single diaphragm forming[J]. Journal of Composite Materials, 2010, 44(8): 915-929.

[8] WIJSKAMP S. Shape distortions in composites forming[D]. Enschede: University of Twente, 2005.

[9] BARNES J A, BYERLY G, LEBOUTON M C, et al. Dimensional stability effects in thermoplastic composites towards a predictive capability[J]. Composites Manufacturing, 1991, 2(3): 171-178.

[10] SPENCER A J M, WATSON P, ROGERS T G. Thermoelastic distortions in laminated anisotropic tubes and channel sections[J]. Journal of Thermal Stresses, 1992, 15(1): 129-141.

[11] NELSON R H. Prediction of dimensional changes in composite laminates during cure[C]//Proceedings of 34th International SAMPE Symposium. Reno, 1989: 2397-2410.

[12] KEANE M A, MULHERN M B, MALLON P J. Investigation of the effects of varying the processing parameters in diaphragm forming of advanced thermoplastic composite laminates[J]. Composites Manufacturing, 1995, 6(3-4): 135-144.

通讯作者: 段跃新, 博士, 高级工程师, 研究方向为 RTM 工艺材料体系及计算机模拟仿真技术, E-mail: duanyuexin@126.com。

(责编 古京)

(上接第71页)

参考文献

[1] 刘大响. 一代新材料, 一代新型发动机: 航空发动机的发展趋势及其对材料的需求[J]. 材料工程, 2017, 45(10): 1-5.

LIU Daxiang. One generation of new material, one generation of new type engine: development trend of aero-engine and its requirements for materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(10): 1-5.

[2] 宋瑞楨. 复杂母线柔性抛光工具研制及抛光工艺参数优化[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017.

SONG Ruizhen. Development of flexible polishing tool with complex generatrix and optimization of polishing parameters[D]. Beijing: Beihang University, 2017.

[3] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 整体叶盘抛光技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2045-2064.

HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of polishing technology for blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2045-2064.

[4] 段继豪, 史耀耀, 张军锋, 等. 航空发动机叶片柔性抛光技术[J]. 航空学报, 2012, 33(3): 573-578.

DUAN Jihao, SHI Yaoyao, ZHANG Junfeng, et al. Flexible polishing technology for blade of aviation engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 573-578.

[5] 高航, 吴鸣宇, 付有志, 等. 流体磨料光整加工理论与技术的发展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(7): 174-187.

GAO Hang, WU Mingyu, FU Youzhi, et al. Development of theory and technology in fluid abrasive finishing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 174-187.

[6] 陈修文. 整体叶盘电解加工的流场仿真与试验[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

CHEN Xiuwen. Flowing field simulation and experiments on electrochemical machining of blisk[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[7] 张海洋. 叶片砂带磨削机器人轨迹规划与离线编程[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

ZHANG Haiyang. Robotic trajectory planning and off-line programming for belt grinding of turbine blade[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.

[8] 郭龙文, 杨能阁, 陈燕. 磁力研磨工艺对整体叶盘表面完整性的影响[J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 10-14.

GUO Longwen, YANG Nengge, CHEN Yan. Influence of magnetic abrasive finishing technology on surface integrity of vane-integrated disk[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(3): 10-14.

[9] 刘浩, 张雷, 冀世军, 等. 叶片难抛光区域粗糙度对压气机性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(8): 8-14.

LIU Hao, ZHANG Lei, JI Shijun, et al. Influence of roughness in difficult-to-polished blade region on the performance of compressor[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(8): 8-14.

[10] 陈志同. 一种具有局部增强结构的复杂母线抛光轮及其制作方法: CN105818008A[P]. 2016-08-03.

CHEN Zhitong. A complex bus polishing wheel with local reinforcing structure and manufacturing method: CN105818008A [P]. 2016-08-03.

通讯作者: 侯广库, 本科, 研究员级高级工程师, 研究方向为叶片加工及材料热处理, E-mail: hgk98765@126.com。

(责编 古京)