复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
Engineering Village

热模压预成型工艺参数对复合材料帽型长桁质量的影响

李哲夫 谈源 张俭 岳广全 刘卫平 孙宝忠

Effects of hot stamp forming process parameters on quality of the hat-shaped structure preforms of composites

LI Zhefu, TAN Yuan, ZHANG Jian, YUE Guangquan, LIU Weipin, SUN Baozhong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201215.004

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳纤维/尼龙6预浸料的制备及盒体的热冲压成型工艺

Preparation of continuous carbon fiber/polyamide 6 prepreg and rectangular box forming by hot stamping

复合材料学报. 2019, 36(1): 51−59 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180404.002

铺放工艺参数对预浸料丝束曲线铺贴质量的影响

Influence of laying process parameters on curve trajectory placement quality of prepreg tow

复合材料学报. 2021, 38(6): 1795−1808 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200826.004

预浸料的超薄化对碳纤维/环氧树脂复合材料拉伸破坏行为的影响

Effect of ultra−thinning of prepreg on tensile failure behavior of carbon fiber/epoxy resin composites

复合材料学报. 2020, 37(4): 800−807 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190628.001

碳纤维增强双马来酰亚胺树脂预浸料铺覆黏性及其储存老化行为

Placement tack and storage aging behavior of carbon fiber reinforced bismaleimide prepreg

复合材料学报. 2019, 36(8): 1830−1837 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181119.002

热熔法预浸料用氰酸酯树脂的性能

Properties of cyanate ester resin for hot melt prepreg

复合材料学报. 2020, 37(12): 3071−3078 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200506.001

单向碳纤维/环氧树脂预浸料热解特性

Pyrolysis characteristics of unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg

复合材料学报. 2018, 35(9): 2442−2448 https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171208.004

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 38 卷 第 10 期 10 月 2021 年
Vol. 38 No. 10 Oct 2021

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20201215.004

热模压预成型工艺参数对复合材料帽型长桁质量的影响

分享本文

李哲夫[1,3]，谈源[2]，张俭[2]，岳广全*[1,3]，刘卫平[3,4]，孙宝忠[1,3]

（1. 东华大学 纺织学院，上海 201620；2. 常州市新创智能科技有限公司，常州 213135；3. 东华大学 民用航空复合材料协同创新中心，上海 201620；4. 上海飞机制造有限公司，上海 201324）

摘 要：本文采用热模压预成装置将碳纤维单向预浸料层板制备成帽型结构长桁预成型体，通过对不同工艺条件下制备的帽型长桁预成型体的表观质量、厚度和纤维偏转角度进行检测，考察和分析了成型温度和速度对预成型体质量的影响规律。当成型温度较低时，由于树脂的黏度较高，预浸料层间摩擦力较大。预成型体表面出现褶皱现象，并且纤维由于受到层间剪切的作用而出现角度偏转。当成型温度较高时，树脂受到压力作用更易流动。这不仅降低了预成型体的厚度，同时也减弱了树脂束缚纤维的能力，使纤维偏转角度增加。而当成型速度增加时，预浸料层间的摩擦力使纤维的偏转角度增大。因此在预成型过程中，为了提高预成型质量，工艺温度和成型速度应控制在一定范围内。

关键词：复合材料预成型体；帽型长桁；预浸料；成型质量；纤维变形

中图分类号：V261；TB332 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-3851(2021)10-3270-11

Effects of hot stamp forming process parameters on quality of the hat-shaped structure preforms of composites

LI Zhefu[1,3], TAN Yuan[2], ZHANG Jian[2], YUE Guangquan*[1,3], LIU Weipin[3,4], SUN Baozhong[1,3]

(1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Changzhou New Intelligent Technology CO. LTD., Changzhou 213135, China; 3. Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620, China; 4. Shanghai Aircraft Manufacturing CO. LTD., Shanghai 201324, China)

Abstract: In this paper, the hat-shaped structure preforms of carbon fiber unidirectional prepreg laminate were pre-formed with the hot stamp forming device. The effects of temperature and forming speed were investigated by measuring the apparent mass, thickness and fiber deflection angle of preforms. A relatively great friction force between prepreg layers is observed at low temperatures due to the low viscosity of the resin, which causes the wrinkle on the surface of hat-shaped structure preforms and angle deflection of fiber by the inter-ply shearing. At high temperature, the fluidity of the resin is enhanced under the pressure. Not only the thickness of preforms are reduced, but also the deflection angle of fiber is increased due to the ability of resin to bind the fiber being diminished. As the increase of forming speed, the deflection angle of the fiber shows an increasing trend. Therefore, the temperature and forming speed must be controlled to improve the preforming quality.

Keywords: preforms of composites; hat-shaped stringers; prepreg; forming quality; fiber deflection

在现代飞机结构中，长桁承受着由于机身弯曲而引起的横向力，是飞机中重要的受力部件之一。与传统材料相比，复合材料由于具有质量轻、比强度和比模量高等特点而被广泛应用于民用航空领域，将复合材料应用于长桁结构是飞机机身结构发展的趋势[1-4]。

目前复合材料长桁成型工艺以手工铺贴为主，该工艺首先在模具上逐层铺贴预浸料制成预成型

收稿日期：2020-10-14；**录用日期**：2020-12-01；**网络首发时间**：2020-12-15 14:15:17
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201215.004
基金项目：上海市科技创新行动计划项目 (19DZ1100300)；国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金项目 (COMAC-SFGS-2019-344)
通信作者：岳广全，博士后，高级工程师，硕士生导师，研究方向为纤维增强树脂基复合材料成型工艺 E-mail: yueguangquan@dhu.edu.cn

引用格式：李哲夫，谈源，张俭，等. 热模压预成型工艺参数对复合材料帽型长桁质量的影响 [J]. 复合材料学报，2021，38(10)：3270-3280.
LI Zhefu, TAN Yuan, ZHANG Jian, et al. Effects of hot stamp forming process parameters on quality of the hat-shaped structure preforms of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(10): 3270-3280(in Chinese).

体，然后再进行固化等操作，在生产效率、成本与质量等方面均存在许多缺陷。而自动化制造技术不仅能极大提高生产效率，同时也保证了质量稳定性，成为先进复合材料结构制造的发展方向[5]。这种自动化制造技术首先使用自动铺丝/铺带工艺将预浸料按照一定的铺层顺序铺贴成平板；然后进行预成型工艺，使用机械力/真空等外力作用使平板在模具上变形为特定的三维结构，即预浸料预成型体；最后通过固化得到所需制件[6]。常用的预成型方法有热模压预成型、热隔膜预成型、辊压预成型等。其中热模压预成型工艺由于成型精度好、自动化水平高等特点已经被应用于波音B787及空客A350等机型的制造过程中[7-8]。

在预成型过程中，工艺参数影响预成型的质量。不合适的参数会导致预成型体出现褶皱、纤维偏转等缺陷[9-11]。Mukhopadhyay等[12]发现褶皱缺陷会严重降低材料的抗压强度；Baran等[13]发现纤维偏转会严重降低材料的拉伸模量；Hörrmann等[14]对复合材料制造过程中缺陷对使用寿命的影响进行了探究，发现缺陷的存在使样品的寿命减少了50%。因此，研究缺陷的产生原因、改进生产工艺并减少成型过程中产生的缺陷一直是研究者们努力的方向。

目前，国内外有许多研究者已经对预成型工艺展开了研究。姚双等[15]研究了C型结构热隔膜预成型过程中成型温度与几何尺寸对预成型体表面质量和内部缺陷的影响；Farnand等[9]研究了热隔膜预成型过程中褶皱与纤维偏转等缺陷产生的微观机制；Wang等[16]热隔膜成型过程中的层间滑移行为，并分别探究了温度、压力及滑移速率的影响，并且对层间滑移行为进行了建模；孙凯等[17]分析了成型温度、变形速率及膜片对帽型长桁热隔膜成型过程的影响，并且通过理论推导得出膜片的张力是减少褶皱的主要因素；马开维等[18-19]研究了L型长桁热模压预成型过程中的工艺参数的影响，确定了最优参数范围。但目前研究方向主要集中于热隔膜预成型工艺，而有关热模压预成型工艺方面的研究在国内还较少，缺乏相关的理论和工艺研究，因此有必要对帽型长桁热模压预成型过程中工艺参数对预成型质量的影响进行探究。

本文采用热模压预成装置将碳纤维单向预浸料层合板制备成帽型结构长桁预成型体，通过对不同工艺条件下制备的帽型长桁预成型体的表观质量、厚度和纤维偏转角度进行检测，考察和分析了成型温度与速度对预成型体质量的影响规律，研究结果为热模压预成型工艺的推广和应用提供了理论和实验依据。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

M21/UD194碳纤维/环氧树脂单向预浸料：纤维体积分数为59.2vol%，单层厚度为0.1868 mm，美国Hexcel公司。

1.2 热模压预成型装置

预成型装置使用的是常州新创航空科技有限公司所生产的长桁类预浸料热模压预成型实验机(图1)。相比于实际生产过程中的长桁成型设备，

(a) (b)

图1 热模压预成型装置(a)及帽型长桁成型模具(b)

Fig. 1 Device of hot stamp forming (a) and forming mold of hat-shaped structure preforms (b)

该设备所需的材料较少。并且模具模块化可更换，可以探索不同结构预成型体热模压过程中的生产工艺参数。

在本文中所使用的模具制备的帽型长桁热模压预成型截面尺寸如图 2 所示。

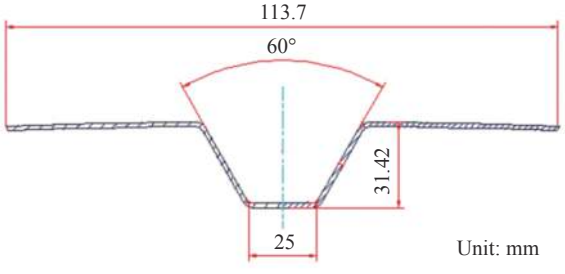


图 2　帽型长桁预成型体截面尺寸

Fig. 2　Section dimensions of the hat-shaped structure preforms

1.3　帽型长桁预成型制件的制备

在室温 (23℃) 条件下，将预浸料解冻后裁剪成尺寸为 350 mm×150 mm 的料片，按照 $[45/0/0/-45/90]_s$ 的铺层顺序铺叠成预浸料层合板，其中每铺贴两层预浸料使用真空袋预压实一次。在预压实过程中，抽真空压力不高于−75 kPa，保压时间为 5 min。在预浸料铺叠完成后，在预浸料表面覆盖上无孔隔离膜，并真空压实。

在热模压预成型实验机上设定好相关的成型工艺参数，将预浸料层合板放置于成型实验机上，进行热模压预成型操作 (如图 3 所示)。将两侧的压边条 (图 3 中的 A、C 结构) 降下，给予预浸料一个固定的夹持力。之后在预浸料上安装热电偶，并加热及保温，同时成型工装中的活动模芯 (图 3 中的 D 结构) 移动至与两侧阴模同样高度位置，防止预浸料在加热过程中出现下垂的现象。待预浸料层合板的温度达到所设定的温度并稳定后，冲头 (图 3 中的 B 结构) 下移，开始热模压预成型过程。

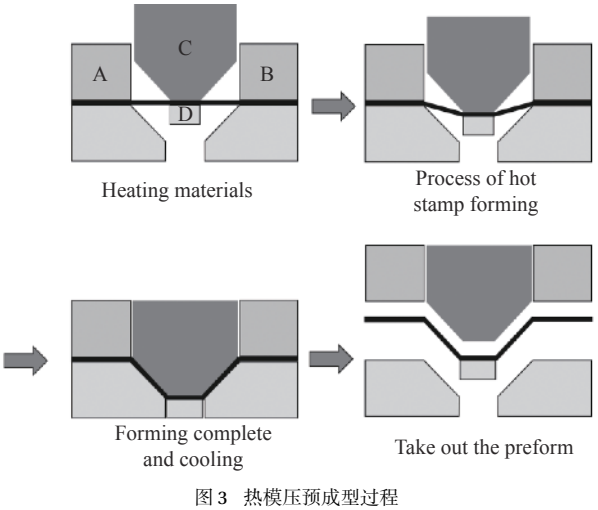


图 3　热模压预成型过程

(A-B: 压边条; C: 冲头; D: 活动芯模)

Fig. 3　Process of hot stamp forimg

(A-B: Blank holder; C: Punch; D: Activity core)

1.4　预成型制件成型质量的表征

1.4.1　厚度检测

厚度的偏差影响着产品的结构强度，在实际生产中如果厚度偏差超过 20% 则会进行报废或增加特制件处理[20]。在进入热压罐固化前，如果预成型体的厚度已经小于其理论厚度，则视为不合格。在热模压预成型后使用千分尺测量如图 4(a) 所示位置的厚度，每个点测量三次取平均值，本实验中的理论厚度为 1.681 mm。在测量厚度时为了避免由于材料质地较软而造成的误差，在转动千分尺时当感受到阻力后就停止转动开始读数，同时要求预成型体表面须无压痕。

1.4.2　纤维偏转表征

为了除去预成型体固化可能带来的影响，本文将未固化预成型体直接制作成金相样品，并检测其 R 角厚度、孔隙率与纤维偏转情况。由于未固化预成型体样品质地较软，在切割过程中将预成型体放置在模具上，防止在切割过程中预成型体发生变形。将制备好的金相检测样品在烘箱内在 80℃ 下加热 48 h，防止预成型体在金相打磨抛光过程中产生缺陷。在打磨过程中将金相样品表面区域打薄 5 mm，除去制样时的切割可能带来的新缺陷。

在金相样品中，分别对左缘条、左帽腰、帽顶、右帽腰、右缘条及左下、左上、右下和右上 R 角部位进行测量，在样品中每个部位取三个不同位置的测量点，每点分别对不同层数进行测量，放大倍数为 100 倍，具体测量位置如图 4(b) 所示。

通过不同铺层的金相图片计算纤维的截面积[21]。使用 Image J 软件对金相图片进行黑白二值化及分水岭算法切割处理。如图 5 所示，调节阈值使树脂基体部分的灰度值为 0，纤维截面部分的灰度值为 255。同时对图像中纤维粘连部分使用分水岭算法进行切割，并排除边缘不完整纤维，计算金相所测量的样品中纤维的横截面积。

图 6 为不同角度铺层纤维的剖面示意图。可知，不同铺层角度的纤维的剖面面积不同。当纤

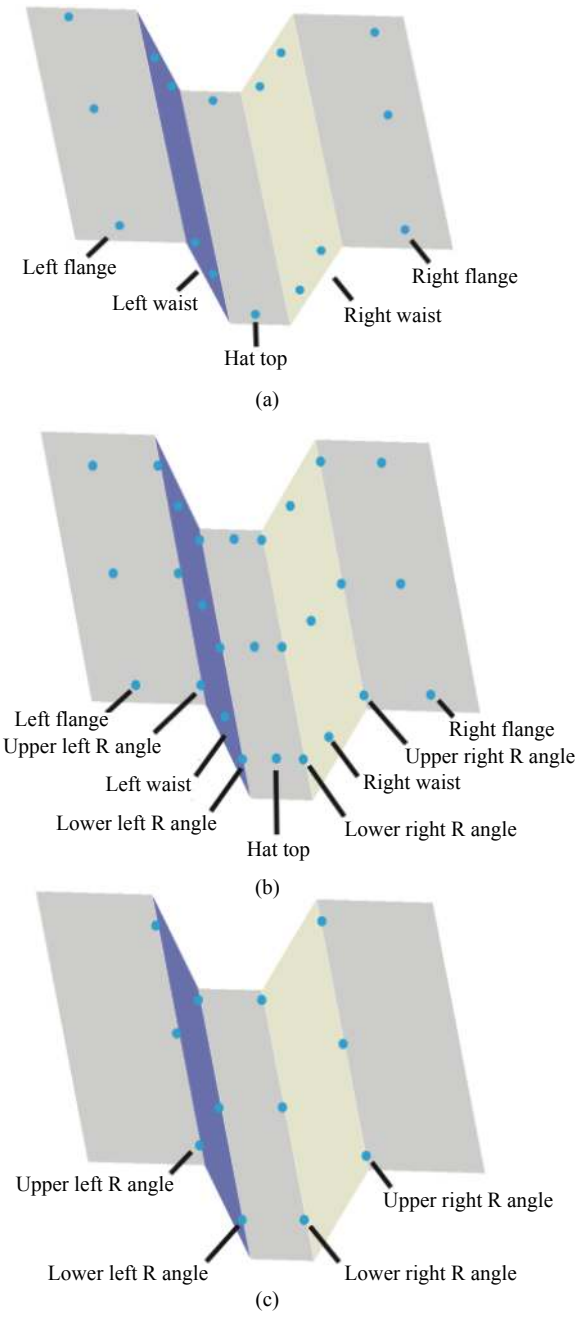
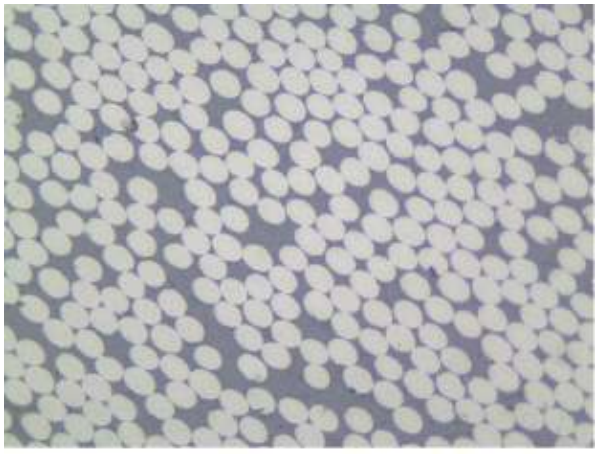


图 4　预成型体厚度检测位置 (a)、预成型体纤维偏转金相检测位置 (b) 及预成型体 R 角厚度金相检测位置 (c)

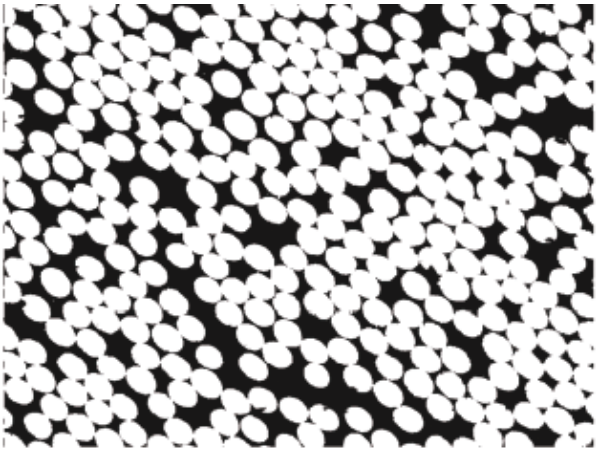
Fig. 4　Thickness detection positions of preforms (a), fiber deflection angle detection positions of preforms (b) and fillet's thickness detection positions of preforms (c)

维铺层角度从 0°增大时，纤维的剖面形状由圆形逐渐变为椭圆形，并且椭圆形的长轴随着角度不断增大直至 90°变成长方形。

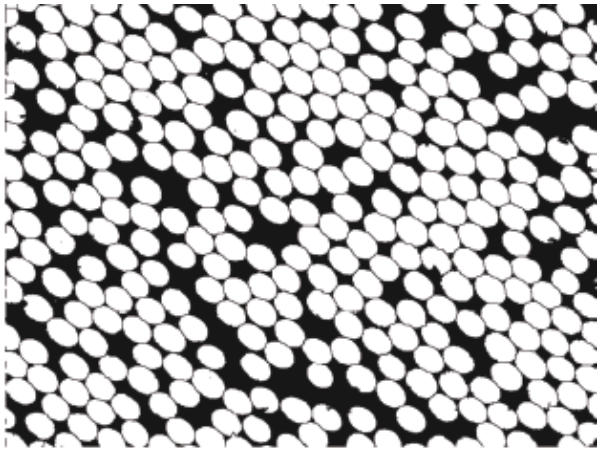
统计 0°方向纤维的平均截面积，取统计结果中的最小值为基准截面积S_0。然后统计不同成型条件下制件同一放大倍数金相照片内不同铺层的平均纤维截面积S，通过下式计算纤维取向角度θ[19]：



Original photograph of metallographic miicroscope



After the process of binarization



After the process of watershed algorithm

图 5　黑白二值化与分水岭算法处理示意图

Fig. 5　Process of binarization and watershed algorithm

$$\theta = \arccos\frac{S_0}{S} \tag{1}$$

θ与理论夹角之差即为该层纤维的偏转角度。

1.4.3　R 角厚度测量

使用 Image J 软件测量金相样品中左下、左上、右下和右上 R 角部位的厚度，每个 R 角处取三个

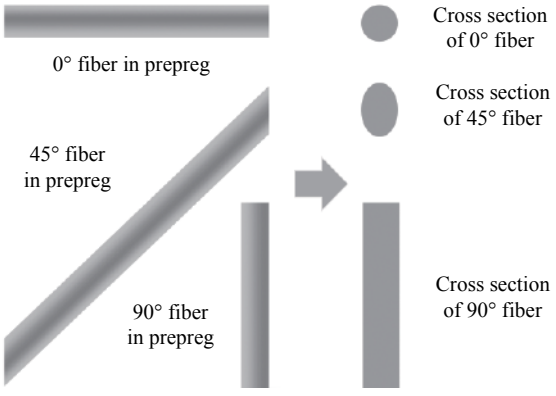


图 6　不同角度铺层纤维的剖面示意图

Fig. 6　Cross sections of fibers at different angles

不同位置的测量点，每点测三次，具体测量位置如图 4(c) 所示。

2　结果与讨论

2.1　热模压预成型过程中的理论模型

在热模压预成型过程中，预浸料受热折弯成特定的形状。其中可以将整个成型过程分为两个阶段：

第一个阶段为加热软化阶段。上模降至特定位置，同时上下模具开始加热预浸料层合板至一定的温度，使在模压过程中层合板更易于发生弯曲变形。在这一阶段中预浸料层合板中树脂的黏度发生变化，可以由树脂黏度模型表示[22]：

$$\eta = \eta_\infty \exp\left(\frac{U}{RT} + \eta_\beta \alpha\right) \tag{2}$$

其中：η_∞为黏度常数；U为黏流活化能；R为理想气体常数；T为温度；η_β是与温度无关的常数。从式 (2) 可知，当温度与树脂的黏度成反比关系。

第二阶段为热模压预成型阶段。在这个阶段中，上下模闭合，通过上模的机械作用使预浸料层合板发生弯曲变形。在这一阶段中预浸料层合板发生受压变形和层间的相对滑移。在该过程中，树脂的流动性与黏度成正比，当压力和温度增加时，树脂的流动情况增强。

而预浸料的层间滑移作用可以由 Gorczyca 等[23]根据流体润滑理论提出的层间摩擦系数模型表示：

$$f = c_1 \eta v + F_N c_0 \tag{3}$$

其中：v为层间滑移速度；η为树脂黏度；F_N为正向压力；c_1和c_0为待求系数。

由式 (3) 可以发现层间滑移摩擦力与层间滑移速度和树脂黏度成正比关系。即层间滑移作用力与层间滑移速度成正比关系，与温度成反比关系。

由上可知，在预浸料层合板热模压预成型过程中，主要影响的因素为压力、温度和速度。当压力一定，影响预成型体质量的主要工艺参数为成型温度和成型速度。本文将分别考察这两个参数的具体影响。

2.2　成型温度对热模压预成型制件质量的影响

成型温度影响着预浸料的黏度、变形能力和层间滑移能力，是热模压预成型过程中一个重要的工艺参数。本文在热模压成型速率为 3 mm/min 的条件下，在室温、40℃、60℃、75℃、80℃ 和 100℃ 六个成型温度下制备了帽型长桁预成型制件，并考察温度对制件质量的影响。

图 7 为不同成型温度下的帽型长桁预成型体的表观形貌。可知，对不同成型温度下的帽型长桁预成型体外观进行观察可以发现，当成型温度

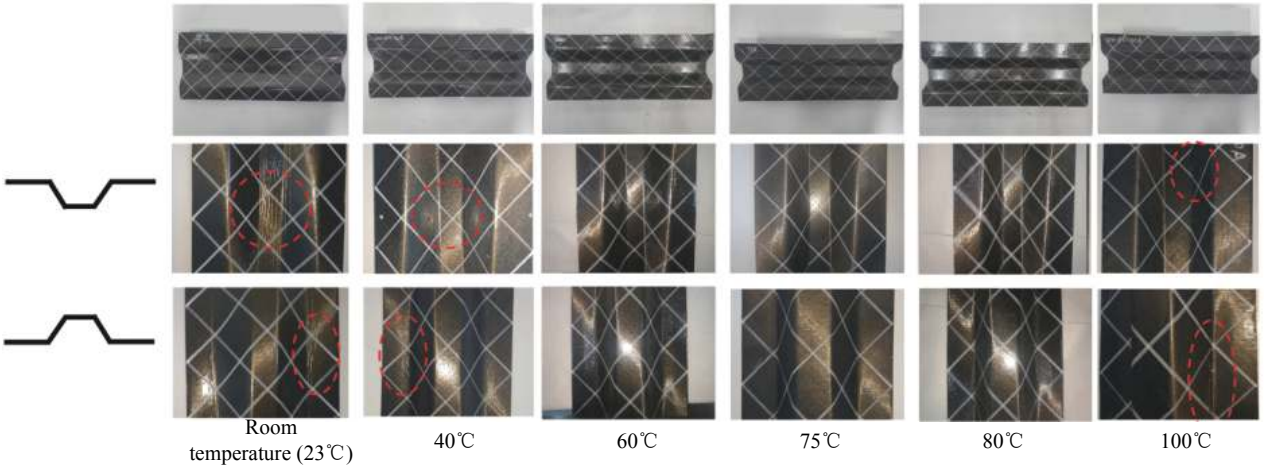


图 7　不同成型温度下的帽型长桁预成型体的表观形貌

Fig. 7　Apparent morphologies of preforms with the hat-shaped structure at different temperatures

较低时，在帽顶内测和缘条外侧出现了明显的褶皱 (图 8(a))。当温度升高时，制件表面出现的褶皱逐渐消失。热模压预成型是复合材料层合板受压变形的过程，在 R 角等带有曲率的位置发生弯曲变形，使预浸料层间发生滑移。当温度较低时，预浸料树脂的黏度较高，层与层之间的摩擦阻力较大，阻碍了预浸料层间滑移的进行，使层间滑移与弯曲不匹配，导致褶皱的出现。当温度升高时，预浸料树脂的黏度下降，层间的摩擦阻力也随之降低，减少了褶皱的产生。当温度较高时，在 R 角处出现了树脂分布不均的现象 (图 8(b))。从图 7 可以发现，当成型温度在 60~80℃ 左右时，预成型体的表观质量最好。

对热模压预成型后帽型长桁缘条、帽腰和帽顶处的厚度进行测量可以发现 (图 9)，所有部位的厚度均随温度上升而减小。相比于帽顶和缘条位置，帽腰处的厚度变薄趋势较小。对 R 角位置的厚度进行测量后发现，R 角位置的厚度同样随着温度升高而减小。并且比较 R 角与其他部位的厚度可以发现，在温度较低时 R 角的厚度要大于预成型体其他位置的厚度。

当温度较低时，树脂黏度较低，层间摩擦阻力较大，使预浸料铺层受到的剪切作用较大。与其他位置不同，由于在 R 角处上下模具存在着间隙，使预浸料铺层在 R 角厚度增加。随着成型温度的增加，树脂的流动性增强。在压力的作用下，

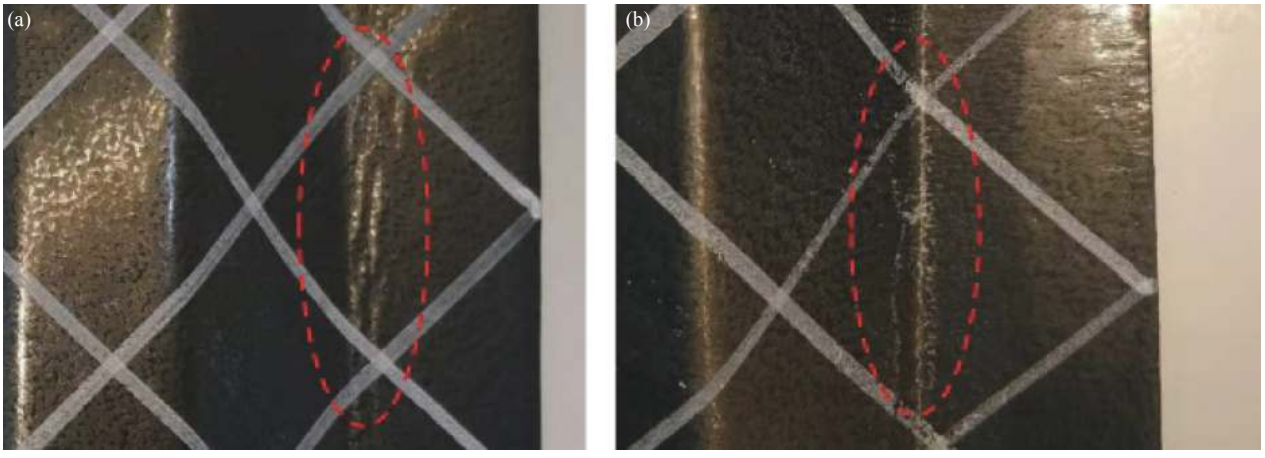


图 8　帽型长桁预成型体典型的缺陷
((a) 褶皱；(b) 树脂分布不均)

Fig. 8　Typical defects of preforms with the hat-shaped structure
((a) Wrinkle; (b) Resin starvation defect)

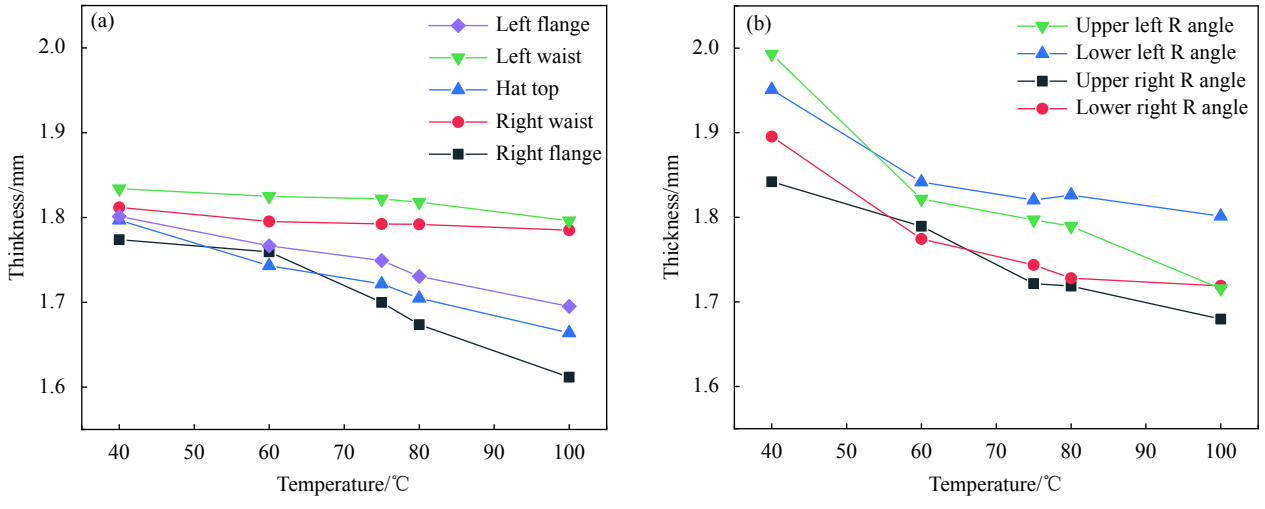


图 9　不同成型温度下的帽型长桁预成型体的各位置的厚度

Fig. 9　Thickness of preforms with the hat-shaped structure at different temperatures

树脂被挤压到其他位置导致厚度下降。而帽腰位置在成型过程中悬空，只在成型的最后阶段才受上下模的挤压作用，受压时间较短，因此厚度的变化不如其他部位明显。由图 9 可以发现，当温度大于 75℃ 时，帽型长桁预成型体右缘条部位的厚度小于 1.681 mm，并且预成型体的厚度随着温度的升高而下降；而当温度低于 60℃ 时，预成型体 R 角部位出现了明显的增厚。因此，当温度在 60~75℃ 时，预成型体的厚度符合要求。

在预成型过程中，层合板的铺层受到弯曲、压力及层间相对滑移等作用，使纤维的角度发生了偏转，其中 45°铺层发生偏转的情况最明显。图 10 是不同预成型温度下 45°铺层纤维偏转角度的测量结果。由图 10(a) 和图 10(d) 可以发现，在层合板外侧铺层的偏转角度随着温度的增加而先减小后增大。当预成型温度较低时，预浸料中树脂黏度较大，阻碍层合板层与层之间的相对滑移。当层间滑移摩擦力作用于预浸料铺层时，铺层中的纤维受到层间摩擦力剪切作用就会产生角度偏转。当预成型温度逐渐升高时，树脂的黏度逐渐降低，层间滑移摩擦力减小，纤维受到的剪切力变小，使其偏转角度降低。但随着温度的继续升高，纤维偏转角度出现了增加的趋势。这是由于随着温度升高，树脂黏度的降低不仅降低了层间滑移摩擦力，同时也增加了树脂的流动性，降低了对铺层中纤维的束缚能力，使纤维的偏转角度变大。从图 10 可以发现，当温度在 70~80℃ 时，纤维的偏转角度最小。

分别比较图 10(a) 与图 10(d) 及图 10(b) 与图 10(c) 可以发现，不同位置的铺层纤维的偏转角度不同。其中接近于中线铺层纤维的偏转角度较小。在热模压预成型过程中，层合板受到外力作

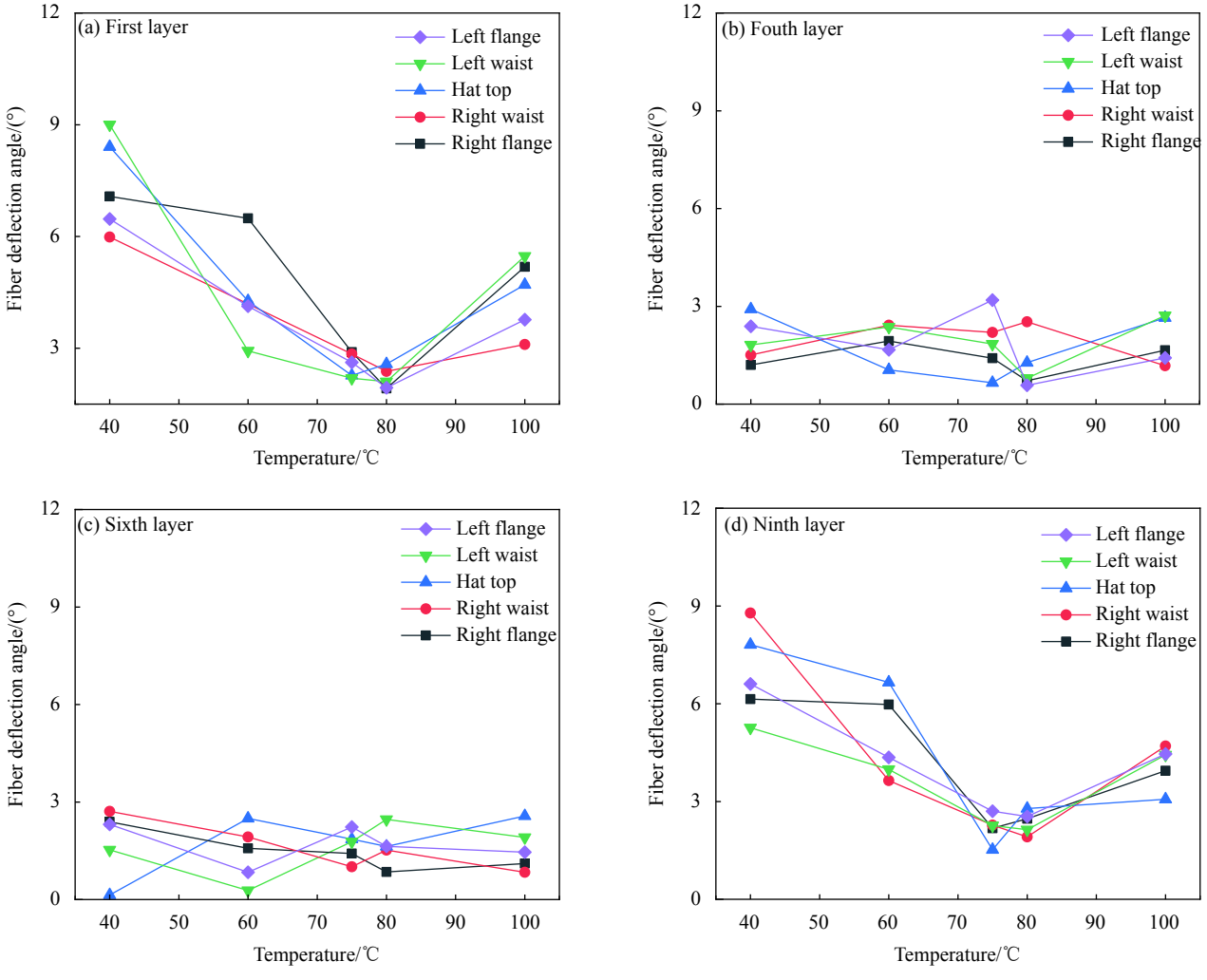


图 10　不同成型温度下帽型长桁预成型体 45°铺层纤维的偏转角度

Fig. 10　45° fiber's deflection angles of preforms with the hat-shaped structure at different forming temperatures

用发生弯曲形变。在中性面以上主要发生拉伸作用，而在中性面以下主要发生压缩作用，这两种作用使预浸料层与层之间发生相对的滑移。而越靠近中性面，拉伸/压缩作用越小，使层间的相对滑移过程减弱，减小了纤维偏转的程度。在 R 角区域的纤维角度偏转情况也相同。

综合上述因素可知，温度主要影响着预浸料中树脂黏度，进而影响着热模压预成型体表观质量、厚度及纤维偏转角度，因此确定一个合适的预成型温度范围对热模压预成型过程非常重要。综合预成型体的表观形貌、厚度和纤维偏转角度等因素，将最佳的工艺温度选择为 75℃。

2.3 成型速度对热模压预成型制件质量的影响

成型速度也是热模压预成型过程中重要的工艺参数之一，同时还影响着生产效率。本文在成型温度为 75℃ 的条件下，以 1、3、5、7、10 mm/min 五个不同的成型速度下制备帽型长桁热模压预成型制件，考察成型速度对制件成型质量的影响。

图 11 为不同成型速度下的帽型长桁预成型体的表观形貌。可以发现，随着成型速度的增加，制件表面逐渐出现褶皱。这是由于当成型速度增加时，预浸料层合板的层间滑移速率与变形速率不匹配，使制件出现了褶皱。但是如果成型速度较低时，会严重影响生产效率。因此，在保证成型质量的前提下，成型速率越高越好。综合预成型体的表观质量和生产效率，最佳的成型速度为 3~5 mm/min。

图 12 为不同成型速度下的帽型长桁预成型体

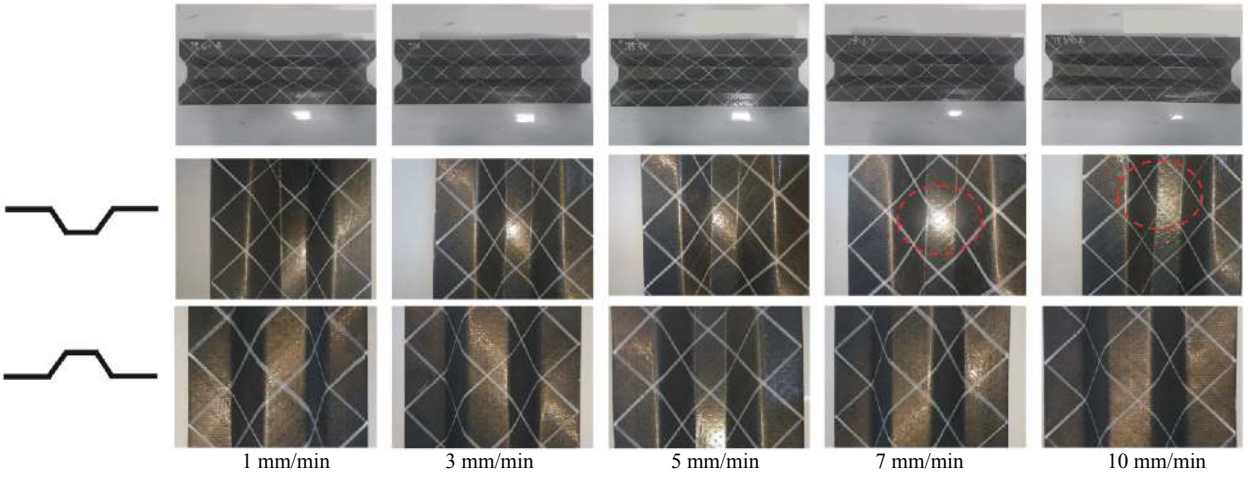


图 11 不同成型速度下的帽型长桁预成型体的表观形貌

Fig. 11 Apparent mass of preforms with the hat-shaped structure in different forming speed

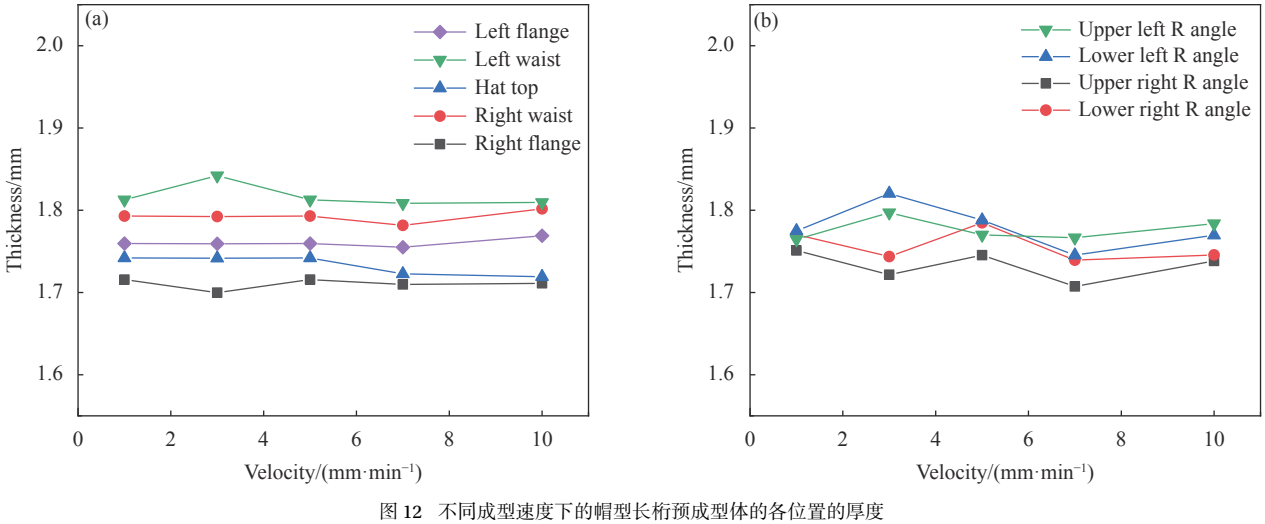


图 12 不同成型速度下的帽型长桁预成型体的各位置的厚度

Fig. 12 Thickness of preforms with the hat-shaped structure in different forming speeds

的各位置的厚度。可以发现，预成型体的厚度与成型速度并没有明显的联系。与不同温度下所制备的预成型体相同，帽腰位置处由于成型过程中受压时间短，厚度要明显大于帽顶和缘条位置。对 R 角部位厚度进行测量同样可以发现成型速度对厚度没有影响。由于在 R 角处上下模具存在间隙，导致预成型体 R 角位置的厚度波动较大。对预成型体不同部位厚度进行测量可知，预成型体的厚度与成型温度和成型压力有关，当温度与压力一定时，改变成型速度并不会对预成型体的厚度造成影响。

图 13 是不同预成型速度下 45°纤维偏转角度的测量结果。由图 13(a) 和图 13(d) 可以发现，在层合板外侧铺层的偏转角度随着速度的增加出现了增大的趋势。由式 (3) 可知，层间滑移摩擦力与层间相对滑移速度成正比关系。当预成型速度增加时，使层合板的变形速度增加，增大了层与层之间的相对滑移速度，使层间滑移摩擦力增加。层间滑移摩檫力对预浸料铺层的剪切作用增加，增大了纤维的偏转角度。与温度结果相同，比较图 13(a) 与图 13(d) 和图 13(b) 与图 13(c) 可知，由于预成型过程中层合板变形导致的拉伸/压缩作用的不同，使越接近于中线铺层纤维的偏转角度越小。从图 13 可以发现，当速度在 1~5 mm/min 时，纤维的偏转角度较小。在 R 角区域的纤维角度偏转情况也相同。

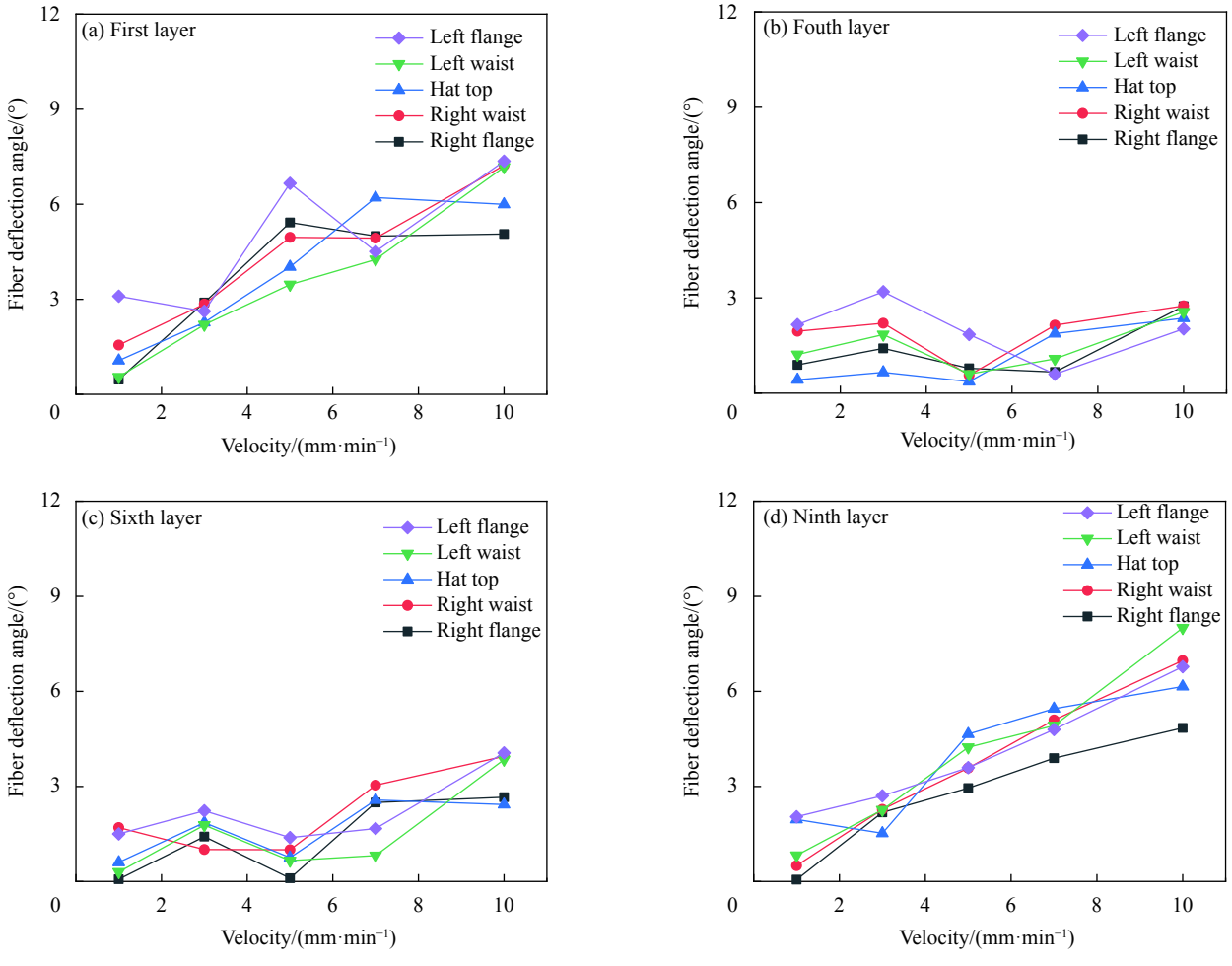


图 13　不同成型速度下帽型长桁预成型体 45°铺层纤维的偏转角度

Fig. 13　45° fiber's deflection angle of preforms with the hat-shaped structure in different forming speeds

综合上述因素可知，成型速度主要影响着预浸料中层间摩擦力，进而影响着热模压预成型体表观质量和纤维偏转角度。综合预成型体的表观形貌、纤维偏转角度和生产效率等原因，最佳的成型速度选择为 3~5 mm/min 为宜。

3　结 论

探究了 M21/UD194 碳纤维/环氧树脂预浸料

的热模压预成型过程中工艺参数对最终产品质量的影响。对于热模压预成型工艺而言，预成型温度和速度将直接决定制品的表观质量、厚度和预成型体中纤维偏转角度，进而影响着预成型体的质量。

(1) 成型温度主要影响着成型过程中树脂的黏度，进而影响到树脂的流动情况和预浸料层与层之间的摩擦力。当温度升高会导致树脂黏度的降低，使树脂的流动性增强，降低了预成型体的厚度。同时树脂黏度的降低也会降低层间摩擦阻力，不仅促进了层间滑移作用，减少了褶皱的产生，同时也使预浸料铺层受到的剪切作用减弱，改善了纤维的偏转情况。但是当温度过高时，树脂束缚纤维的能力减弱，使纤维偏转角度增加。综合上述因素，M21/UD194 的最佳成型温度应在 75℃ 左右；

(2) 成型速度主要影响着预浸料层与层间的滑移作用，对于预成型体的厚度没有影响。当成型速度过快时，层间摩擦力增大，使预成型体表面出现了褶皱。同时层间摩擦力的增大也增大了预浸料铺层之间的剪切作用，使纤维的偏转角度增大。但是，如果成型速度过慢会降低生产效率。因此，最佳的成型速度应在 3~5 mm/min 左右。

参考文献：

[1] 顾轶卓, 李敏, 李艳霞, 等. 飞行器结构用复合材料制造技术与工艺理论进展[J]. 航空学报, 2015, 36(8)：2773-2797.
GU Yizhuo, LI Min, LI Yanxia, et al. Progress on manufacturing technology and process theory of aircraft composite structure[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica，2015，36(8)：2773-2797(in Chinese).

[2] 李培旭, 陈萍, 苏佳智, 等. 复合材料先进液体成型技术的航空应用与最新发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(8)：99-104.
LI Peixu, CHEN Ping, SU Jiazhi, et al. The recent development of advanced liquid composite molding technique and its application in aviation[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites，2016(8)：99-104(in Chinese).

[3] 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 Liming, ZHANG Jiazheng, YUE Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2015，32(2)：317-322(in Chinese).

[4] 孙振起, 吴安如. 先进复合材料在飞机结构中的应用[J]. 材料导报, 2015, 29(11)：61-64.
SUN Zhengqi, WU Anru. Application of advanced composite in aircraft structures[J]. Materials Reports，2015，29(11)：61-64(in Chinese).

[5] 文立伟, 肖军, 王显峰, 等. 中国复合材料自动铺放技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(5)：637-649.
WEN Liwei, XIAO Jun, WANG Xianfeng, et al. Progress of automated placement technology for composites in china[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics，2015，47(5)：637-649(in Chinese).

[6] 陈亚莉. 复合材料成型工艺在A400M军用运输机上的应用[J]. 航空制造技术, 2008(10)：32-35.
CHEN Yali. Application of composite forming technique in military freighter A400M[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2008(10)：32-35(in Chinese).

[7] DE M D. Process for the realization of a stiffener made of composite material with an omega section: USA, 8, 636, 935[P]. 2014-1-28.

[8] PARLA G C. Device and method of manufacturing omega stringers: USA, 9, 914, 270[P]. 2018-3-13.

[9] FARNAND K, ZOBEIRY N, POURSARTIP A, et al. Micro-level mechanisms of fiber waviness and wrinkling during hot drape forming of unidirectional prepreg composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2017，103：168-77.

[10] BOISSE P, COLMARS J, HAMILA N, et al. Bending and wrinkling of composite fiber preforms and prepregs. A review and new developments in the draping simulations[J]. Composites Part B: Engineering，2018，141：234-49.

[11] 陈萍, 赵月青, 陈菲, 等. 单向碳纤维/环氧树脂预浸料叠层的面内变形行为[J]. 复合材料学报, 2020, 37(5)：1049-1055.
CHEN Ping, ZHAO Yueqing, CHEN Fei, et al. In-plane deformation behavior of unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg layups[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2020，37(5)：1049-1055(in Chinese).

[12] MUKHOPADHYAY S, JONES M I, HALLETT S R. Compressive failure of laminates containing an embedded wrinkle; experimental and numerical study[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2015，73：132-42.

[13] BARAN I, STRAUMIT I, SHISHKINA O, et al. X-ray computed tomography characterization of manufacturing induced defects in a glass/polyester pultruded profile[J]. Composite Structures，2018，195：74-82.

[14] HÖRRMANN S, ADUMITROAIE A, VIECHTBAUER C, et al. The effect of fiber waviness on the fatigue life of CFRP materials[J]. International Journal of Fatigue，2016，90：139-47.

[15] 姚双, 李敏, 顾轶卓, 等. 碳纤维复合材料C形结构热隔膜成型工艺[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(1)：95-99.
YAO Shuang, LI Ming, GU Yizhuo, et al. Hot diaphragm forming of carbon fiber composite with C-shaped structure[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and

Astronautics，2013，39(1)：95-99(in Chinese).

[16] WANG L, XU P, PENG X, et al. Characterization of inter-ply slipping behaviors in hot diaphragm preforming: Experiments and modelling[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2019，121：28-35.

[17] 孙凯, 安学锋, 闫丽. 复合材料帽形长桁热隔膜成型工艺研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(2)：166-168.
SUN Kai, AN Xuefeng, YAN Li. Hot diaphragm preforming process for composite hat-shaped stringer[J]. New Chemical Materials，2020，48(2)：166-168(in Chinese).

[18] 马开维, 李博, 朱佳强, 等. 工艺参数对复合材料长桁成型载荷的影响[J]. 航空制造技术, 2019, 62(12)：72-78.
MA Kaiwei, LI Bo, ZHU Jiaqiang, et al. Effect of process parameters on forming load of composite stringer[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2019，62(12)：72-78(in Chinese).

[19] 马开维, 李博, 朱佳强, 等. 工艺参数对复合材料长桁预制体变形成型制件质量的影响[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(6)：36-44.
MA Kaiwei, LI Bo, ZHU Jiaqiang, et al. Effects of deformation forming process parameters on quality of the composites stringers forming parts[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition)，2019，46(6)：36-44(in Chinese).

[20] 何林锋, 张鹏飞, 李希岩. 浅析复合材料制造过程中的缺陷处理[J]. 科技视界, 2017(2)：10.
HE Lingfeng, ZHANG Pengfei, LI Xiyan. The analysis of defect treatment in the manufacturing process of composite materials[J]. Science & Technology Vision，2017(2)：10(in Chinese).

[21] SHARP N D, GOODSELL J E, FAVALORO A J. Measuring fiber orientation of elliptical fibers from optical microscopy[J]. Journal of Composites Science，2019，3(1)：23.

[22] LEE W I, LOOS A C, SPRINGER G S. Heat of reaction, degree of cure, and viscosity of Hercules 3501-6 resin[J]. Journal of Composite Materials，1982，16(6)：510-520.

[23] GORCZYCA-COLE J L, SHERWOOD J A, CHEN J. A friction model for thermostamping commingled glass-polypropylene woven fabrics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing，2007，38(2)：393-406.