

引文格式: 陈宏达, 曹东风, 胡海晓, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料热压成型工艺研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(15): 24-37.
CHEN Hongda, CAO Dongfeng, HU Haixiao, et al. A review on thermo-forming process and simulation progresses of continuous fibre reinforced thermoplastic plastics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(15): 24-37.

连续纤维增强热塑性复合材料热压成型 工艺研究进展*

陈宏达^{1,2}, 曹东风², 胡海晓^{2,3}, 王继辉⁴, 丁安心⁴, 钟愉承³, 倪爱清¹, 冀运东⁴, 陈俊磊⁴

(1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070;

2. 先进能源科学与技术广东省实验室佛山分中心佛山仙湖实验室, 佛山 528000;

3. 武汉理工大学理学院, 武汉 430070;

4. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

[摘要] 连续纤维增强热塑性复合材料(CoFRTP)具有损伤容限高、成型周期短及可回收利用等优点,在航空航天及新能源汽车等领域能够规模化应用。热压成型工艺因其高效率、低成本的优势得到广泛的关注,但由于该工艺涉及成型参数多,以及成型过程中材料大变形、非线性、多相变等多场耦合的特点,所制构件易产生褶皱、纤维开裂及外形尺寸变形过大等质量缺陷,对构件力学性能的稳定及后期装配带来极大挑战。为克服传统试错法低效率、高成本的缺点,提高热压成型设计效率,本文重点对热压成型工艺及其相应有限元数值仿真方法进行综述。本文从CoFRTP应用现状及制造关键、热压成型工艺过程分析及研究现状和热压成型工艺仿真方法3个方面展开,最后对后续的研究工作进行展望。本文将为CoFRTP高效率和高质量成型提供理论指导,对相应的结构设计和工程应用起到推动作用。

关键词: 连续纤维增强热塑性复合材料(CoFRTP); 热压成型工艺; 先进制造; 成型仿真; 设计-成型一体化平台

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.15.024



陈宏达

副研究员,工学博士,研究方向为热塑性复合材料工艺开发与结构设计。

随着世界范围内能源问题的突显以及对环境保护需求的日益强烈,发展轻质高强复合材料结构、提高能源利用效率已成为航空航天及新能源汽车领域的重大需求之一。为满足轻质、高强和耐久等特性,连续纤维增强热固性复合材料得到了快速发展并受到了广泛的认可。然而,热固性复合材料的回收再利用问题始终是困扰行业进一步发展的难题。连续纤维增强热塑性复合材料(CoFRTP)具有损伤容限高、成型周

期短及可回收利用等优点,是解决回收再利用问题的有效途径之一。同时,热压成型工艺作为此类复合材料重要成型方法,得到了学术界和工业界的广泛重视^[1-8]。如图1所示^[9-11],目前英国国家复合材料中心主导的空客下一代机翼结构“Wing of Tomorrow (WOT)”项目,重点开发单向增强CoFRTP热冲压成型机翼翼肋结构;同时基于热冲压成型工艺的织物增强CoFRTP已在空客某些机型机翼前缘构件、机身连接角片及新能源汽

* 基金项目: 先进能源科学与技术广东省实验室佛山分中心(佛山仙湖实验室)开放基金(XHT2020-002); 中央高校基本科研业务费专项资金(WUT2021IVA068); 武汉理工大学新教师自主创新研究基金项目(2023IVA076); 国家自然科学基金(52273080、12202325)。

车电池包外壳领域得到了应用。

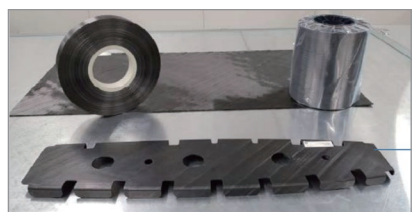
复合材料成型过程伴随着多种外形和结构变化,如纤维重新排布和厚度变化;同时制造过程中可能产生由工艺参数控制不当引发的各种缺陷,导致构件服役过程中出现机械性能衰减或装配问题。引起制造缺陷的原因除工艺相关参数设置不合理外,构件的初始外形和结构与成型工艺的匹配性也尤为重要。因此,复合材料构件的制造和应用应综合考虑外形和结构设计、成型工艺、结构验证和服役工况验证等多个环节。针对以上问题,德国慕尼黑工业大学 Schug^[12] 和德国卡尔斯鲁厄理工学院 Frank Henning 教授课题组^[3-4,13] 提出了复合材料构件的结构外形设计-成型工艺-结构仿真-服役工况评价一体化平台,旨在提高复合材

料工程化应用效率。复合材料构件制造过程中,由于初始外形和结构设计的特殊性及其成型工艺的局限性,通常与初始设计有差异。为避免传统低效“试错法”造成的人力物力浪费,提高设计效率,Kärger 等^[13] 提出了复合材料构件工艺迭代优化和结构设计迭代优化技术路线。该技术路线适用于复合材料构件的前期设计阶段:首先进行工艺仿真、验证和迭代优化,当工艺设计达到制造标准要求以后(关键部位无褶皱等缺陷),将成型后的构件外形尺寸、纤维铺层和纤维方向信息映射到结构仿真模型,结合构件应用标准进行结构优化设计、验证和迭代优化。经过多轮迭代,通过不断调整初始构件的初始外形和结构及制造工艺参数,完成复合材料构件设计,进而考虑进行实际制造和规模化生产。

复合材料构件制造过程中产生的缺陷原因有多种,包括初始外形和结构设计不合理导致的现有成型工艺无法实现制造,或者对成型工艺自身特点缺乏理解引起的工艺参数设计不合理等。针对上述问题,可通过以下两种方法解决:(1)考虑现有制造工艺的特点和特定工艺参数下材料行为变化规律,调整初始几何外形和结构设计,在不影响构件服役要求的前提下实现所制造的构件对初始设计构件的同等替代;(2)加强对成型原理的认识,优化成型过程中每个步骤的制造工艺参数,确保所制造的产品与初始设计保持一致,或具有可接受范围内的公差。如表 1 所示,将制造工艺原理的理解分为 3 个等级。

等级 1 是制造工艺设计者对工艺原理完全不理解,成型工艺是一个“黑箱”,工艺设计完全依赖于低效的人工“试错法”。此阶段所制造的构件通常与预期结构不同,需要进行多次设计修正,最终所制备构件不一定能达到预期结构效果。等级 2 中工艺设计者对于制造工艺原理部分了解,构件外形和结构初始设计考虑了部分制造工艺影响因素,但因对成型原理的认知不透彻需要多次迭代才能获得可接受的结构,所制造构件不是最优化设计。等级 3 是对于制造工艺原理完全理解,工艺设计者在初始外形和结构设计中考虑制造工艺的所有影响因素,所制备构件的外形和结构与初始设计完全一致,或者与初始设计有出入,但所制备构件可实现使用空间和结构的优化替换,此等级可实现复合材料构件低成本、高效率设计,减少产品开发周期。

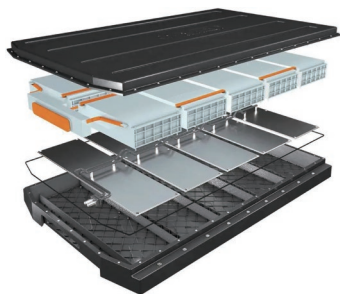
为了实现对干纱织物铺覆成型和 CoFRTP 热压成型制造过程理解,商用软件公司开发了相应的成型设计专用仿真软件,包括常见的 AniForm^[10] 和 PAM-Form^[14]。另外,在非线形计算方面有优势且具有二次开发模块的 ABAQUS 和 LS-Dyna 软件近几年也得到广泛应用^[15-17]。基于成型-结构一体化仿真平台,Han 等^[18] 采用热固性复合材料预浸料,对铺覆成型制造工艺和所制备的典型半球形构件结构性能进行仿真分析和验证:首先使用非正交本构模型对铺覆成型过程进行仿真;然后将成型仿真结果数据(构件外形、纤维方向和纤维角度)映射到结构



(a) 单向碳纤维增强PEEK复合材料方向舵增强肋片^[9]



(b) 玻纤织物增强PPS复合材料空客A380机翼前缘增强肋片^[10]



(c) 新能源汽车热塑性复合材料电池外壳^[11]

图 1 CoFRTP 热压部件在航空航天和新能源汽车上的应用

Fig.1 Application of CoFRTP hot pressed parts in airspace and new energy vehicles

表 1 制造工艺理解等级

Table 1 Understanding level of manufacturing process

等级	成型工艺	设计	产品
1	不理解(试验和误差)	设计 ≠ 预期结构	已加工 ≠ 预期结构
2	部分理解	设计 ≈ 预期结构	已加工 ≈ 预期结构
3	完全理解	设计 = 预期结构	已加工 = 预期结构

分析模型,对构件结构性能进行压缩仿真并对破坏模式进行了分析,与相应试验对比,该仿真平台得到的结果有较高的可信度。另外, Liang 等^[19]基于一体化仿真平台,提出了一种多尺度建模的成型-结构仿真方法,研究发现,在构件的拉伸破坏仿真模型中,与不考虑成型工艺引起的变形(纤维角度、纤维方向的变化)相比,考虑变形效应的结构仿真模型对复合材料整体刚度的预测更为准确。

1 热压成型工艺过程分析及研究现状

典型 CoFRTP 热压成型工艺如图 2 所示^[20-21],包括预浸料制备、层合板制备、层合板预热、热冲压及冷却脱模 5 个步骤,每个步骤包括若干材料参数和工艺参数,这些参数通过影响热压过程中材料的变形行为决定热压构件的最终质量。CoFRTP 预浸料制备方面, Vaidya 等^[22]就浸渍

方法的开发和应用展开综述,包括 UD 单向带(Unidirectional tape)和织物增强预浸料(Organosheets)的制备工艺以及各种工艺的优缺点。邢开^[23]和周典瑞^[24]等对 CoFRTP 专用上浆剂和 CoFRTP 预浸料的制备工艺^[25]进行了详细的综述。针对 CoFRTP 的材料性能表征方法、热压成型工艺和仿真方面,相关文献对成型的各个方面进行了综述^[1-2,5-6,26-35]。Boisse 等^[30-32,34]对干纱织物和预浸料的面内和面外材料力学性能的不同表征方法及热压过程中产生的各种缺陷进行了全面综述。杨志等^[29]对织物复合材料预制体的拉伸、压缩、弯曲、剪切和成型试验等测试方法进行了综述,讨论了不同测试方法的优缺点及适用条件,并对后续的研究工作进行了展望。在热压成型过程的数值仿真方法方面, Bussetta 等^[2]综述了包括干纱织物、热固性预浸料和 CoFRTP 的冲压过程的数值建模方

法。Baran 等^[35]总结了热固性复合材料和 CoFRTP 在固化或冷却阶段残余应力产生机理。Gong 等^[5,27]对织物增强 CoFRTP 的材料性能表征方法和冲压模拟仿真方法进行了综述。Chen 等^[1]针对 CoFRTP 的材料测试方法、成型工艺和仿真方法进展进行了全面综述。

冲压阶段是热压成型工艺重要环节,对构件的成型质量起决定性作用。在冲压阶段,纤维通过滑动、转动和弯曲等大变形实现重分布以适应复杂的三维型面,其变形行为对成型温度、冲压速度、边界条件等工艺参数依赖性较高,成型工艺参数选取不当易导致材料变形不协调,引发褶皱等成型缺陷。在冲压阶段,首先将预热至熔融状态的层压板转移到具有一定温度的冲压模具中,然后以合适的速度进行冲压。由于 CoFRTP 的温度相关性,成型工艺参数(冲压速度、模具几何形状和温度、边界条

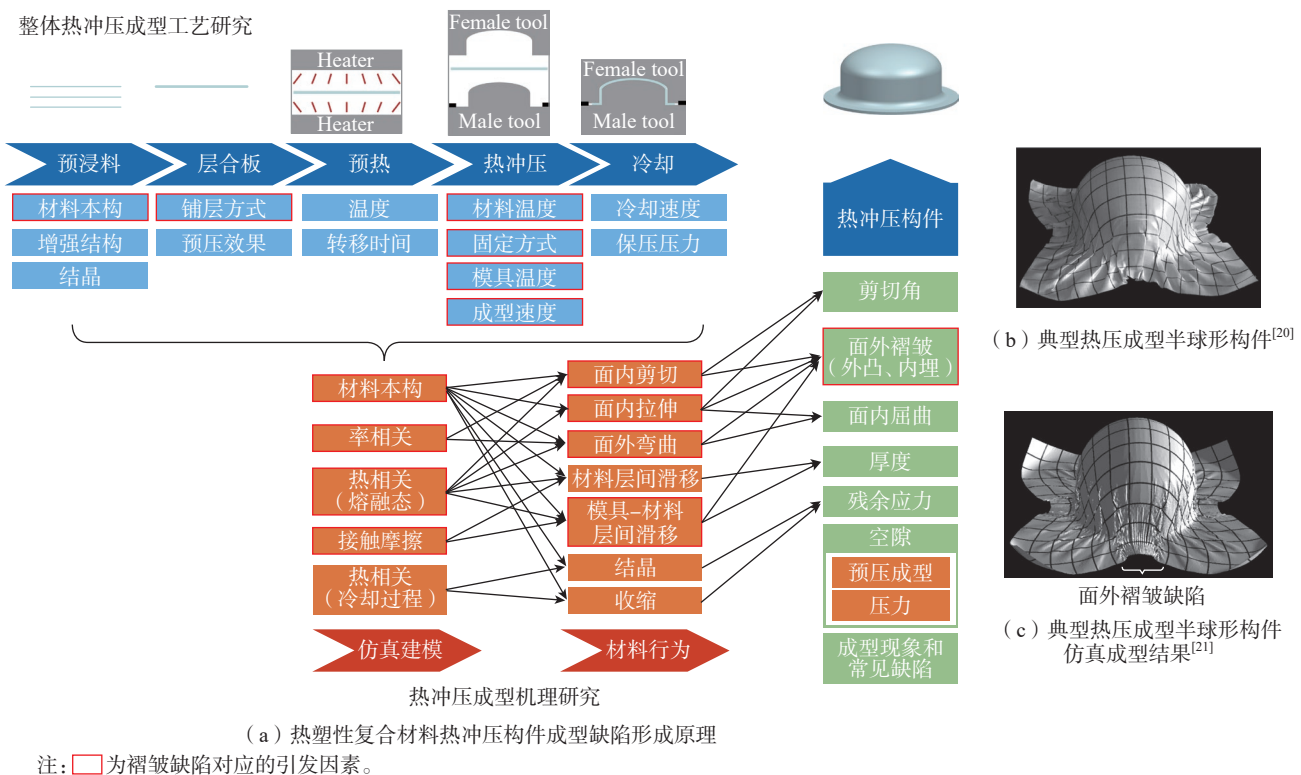


图 2 热压工艺成型参数-仿真建模-材料行为-成型现象和常见缺陷对应关系

Fig.2 Hot pressing process forming parameters-simulation modeling-material behavior-forming phenomena and common defects corresponding relationship

件及压边力)决定 CoFRTP 构件的最终成型质量。研究表明,冲压阶段中应系统地考虑包括预热温度、转移时间、冲压速度和模具温度在内的成型参数,以确保熔融层合板在冲压步骤期间处于最佳成型温度^[36-39]。同时,由于 CoFRTP 的率相关特性,模具冲压速度的也会影响材料变形行为,如面内剪切和面外弯曲行为等^[17,38,40]。对于模具温度和冲压速度工艺参数,研究表明,低温的模具和较慢的成型速度会降低构件的成型质量^[39-41],主要原因为层压板低温下基体的黏度较高,导致层合板面内剪切刚度升高,冲压过程中纤维转动困难易引起材料成型缺陷^[39-41]。此外,研究发现降低冲压模具曲率半径,可有效提高构件成型质量^[42]。

冲压阶段材料典型变形行为如图 3 所示^[1,36,43],根据材料行为产生位置可分为层内变形行为和层间变形行为。其中材料的层内变形行为包括面内行为(面内剪切、压缩和拉伸)和面外行为(面外弯曲);层间变形行为包括预浸料/预浸料接触行为和预浸料/模具接触行为。构件冲压成型过程中,就材料抵抗冲压变形的能力而言,面内剪切刚度、面外弯曲刚度和层间摩擦力量级相对较低,而沿纤维方向的拉伸模量相对较高。研究表明,材料冲压过程中的变形行为和缺陷与材料的层内和层间

力学行为有直接关系,冲压过程中纤维方向和夹角的变化程度与材料的面内剪切刚度相关;冲压过程中面外褶皱缺陷的引发与材料的面内剪切刚度有关,褶皱的数量和幅度与面外弯曲刚度关系密切^[15-17,38,44]。因此,冲压成型过程中材料变形行为和缺陷的准确预测,关键在于对材料变形机制的准确把握及相关力学材料行为的准确表征。

2 热压成型工艺仿真方法

热压过程中材料由二维层合板片材冲压成三维复合材料构件,构件最终成型质量与冲压过程中材料行为密切相关。研究中通常将冲压过程中的复合材料变形行为划分为 3 个尺度,包括微观尺度、介观尺度和宏观尺度^[3]。微观尺度是纤维层面建模,变形特征是树脂和单根纤维的剪切应变、伸长应变及其界面的接触增强原理;介观尺度是单束纤维纱线层面建模,变形特征包括纤维束弯曲、剪切变形及树脂在纤维束之间的流动。在与结构层次相关的宏观尺度中,材料变形根据层内和层间机制进行描述^[15];宏观尺度是单层预浸料或层合板层面建模,材料变形原理通常包括层内和层间变形行为。

基于细观法建模仿真方法可以更为真实地反映冲压成型过程中材料变形行为,但由于建模过程中需考

虑大量纤维与纤维的接触或界面接触,导致模型过于复杂,对计算时间和计算资源要求较高,实际研究中较少使用该方法。相对细观法建模,介观法在一定程度上降低了成型模型的复杂程度,模型中使用桁架单元、梁单元或弹簧单元对单束纤维建模,面内行为如面内剪切刚度使用二维薄膜单元或者壳单元建模,该方法在最大限度考虑材料性能的同时,对模型进行了简化,提高计算效率。Jauffrès 等^[45]针对 TWINTEX[®] 热塑性混编织物热压成型过程,提出一维和二维单元混合介观建模法,该方法中的一维单元用于单纱的拉伸行为描述,二维单元用于面内剪切行为建模。Dangora 等^[20,46]基于以上方法,使用单向增强 CoFRTP,对防弹头盔热压成型过程进行仿真,并使用试验对模型进行验证。Harrison 等^[47]使用桁架单元和薄膜单元分别对面内的拉伸行为和剪切行为进行建模,该方法用于预测混编热塑性织物热冲压过程中的面内剪切变形。

宏观建模法在一定程度上简化了成型模型,忽略部分次要力学行为,提高了建模和计算效率。模型中材料变形行为如层内变形通过二维单元(薄膜单元或者薄壳单元)建模,层间行为通过接触单元建模。典型宏观法建模流程如图 4 所示^[48]。宏观建模法的难点在于层内变形的面内拉伸行为和面外弯曲行为的解耦。现有商用软件中薄膜单元无厚度,无法对面外弯曲刚度进行有效建模,薄壳单元通常基于经典 Mindlin 或 Kirchhoff 理论,单元中面外弯曲刚度由面内拉伸模量计算得到,二者为耦合关系。现实中织物或熔融状态的热塑性预浸料面外弯曲刚度较小,直接使用单层壳单元会导致面外弯曲刚度过大,降低仿真模型精度^[38,44]。孔令国等^[48]对干纱织物的面内拉伸、面内剪切和面外弯曲行为进行表征,然后通过宏观建模法,解耦面内剪切

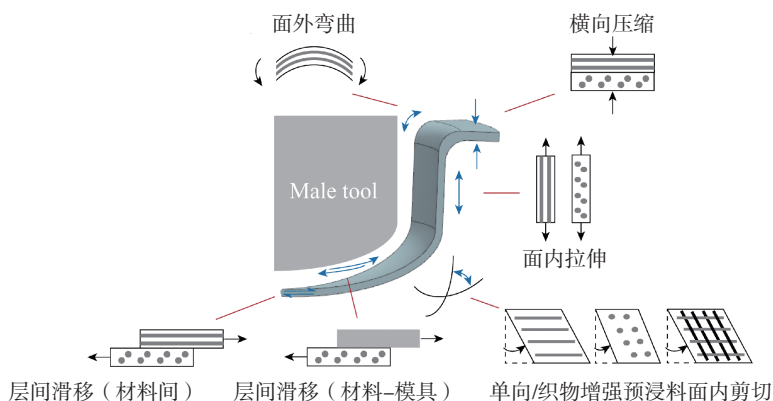


图 3 热冲压成型过程和冲压阶段的主要材料力学行为示意图^[1,36,43]

Fig.3 Main material mechanical behavior diagram of hot stamping process and stamping stage^[1,36,43]

刚度和面外弯曲刚度,将材料行为通过 Fortran 语言写入壳单元,对干纱织物铺覆成型过程进行仿真,并对结果进行了验证。Haanappel 等^[10]以典型 CoFRTP 机翼前缘热压构件成型为例,从材料表征方法、成型建模方法和成型验证 3 个方面完整呈现了 CoFRTP 成型全过程。

织物增强复合材料建模中,为了克服宏观法无法精确描述单纱形态和介观法无法精确描述接触行为的缺点,Boisse 等^[33]提出基于宏观法和介观法的半离散法。该方法通过将材料行为本构写入单元的单元的方式来计算节点力,通过此方式可将材料拉伸行为、面内剪切及面外弯曲刚度在离散单元中单独描述。半离散法的优点是在介观层面上精确描述材料行为,同时能在宏观层面进行仿真计算,提高设计效率。Liang 等^[49]采用基于三角壳单元的半离散方法,解耦面内拉伸和面外弯曲力学行为,对织物增强预浸料热压过程进行仿真,同时研究了热压过程中引起的褶皱大小与面外弯曲刚度的关系。Chen 等^[40]提出了一种基于实体壳单元的半离散法对碳纤维织物增强聚苯硫醚(CF/PPS)成型过程进行仿真,模型中考虑了包括拉伸、面内剪切和压缩行为的层内力学行为。Wang 等^[50]提出了基于壳单元的半离散法,对碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)热压过程进行了仿真,模型中考虑面内剪切、面外弯曲、层间滑移等关键力学行为。

2.1 面内剪切材料本构建模方法及应用进展

2.1.1 面内剪切材料本构建模方法

基于客观率的 Jaumann 率和 Green-Naghdi 率次弹性本构模型是面内剪切大变形研究中广泛应用的模型^[51]。如图 5(a)所示^[1],次弹性本构大变形通常由 Green-Naghdi 框架 $\{e_i\}$ 、非正交纤维框架 $\{g_i\}$ (协变基)和其共轭基 $\{g^i\}$ (逆变基)坐标系组

成,该模型早期通常作为复合材料本构方程用于干织物或热塑性混编复合材料成型仿真研究^[52-57]。Badel 等^[55]基于平纹织物成型过程中大变形的特点,建立 Jaumann 率和 Green-Naghdi 率次弹性本构模型,结合 ABAQUS 仿真结果对比了两种方法的有效性。基于上述模型, Machado 等^[44]开展了织物增强 CoFRTP 热压成型仿真和试验工作,使用三次多项式函数,提出了玻纤增强聚丙烯(GF/PP)织物增强 CoFRTP 的剪切角速率相关本构模型。如图 5(b)~(d)所示^[44],沿曲面表面曲线分布的剪切角仿真结果可以较好地对应试验结果。在以上工作基础上, Machado 等^[38]进一步考虑了面内剪切刚度的温度相关性,用以研究成型温度和成型速度

对剪切角分布的作用规律。另外,基于 Badel 等^[55]提出的次弹性模型, Dörr 等^[17]重点开展面外弯曲刚度的率相关性研究,并通过半球型和典型汽车用复杂结构件的热压成型验证了模型的可靠性。

次弹性本构的主要缺点是闭环加载路径不可恢复,基于具有独立加载路径的势能理论的超弹性本构模型可有效规避该缺点。超弹性本构模型的特点是存在一个存储能量函数,并在整个加载过程中假设没有能量耗散^[51]。超弹性材料本构模型在早期阶段广泛应用于织物的冲压成型仿真^[58-61], Aimène 等^[58]考虑大应变下织物的张力和剪切变形能量,提出了一种超弹性模型。基于以上方法, Peng 等^[62]开发了一种由

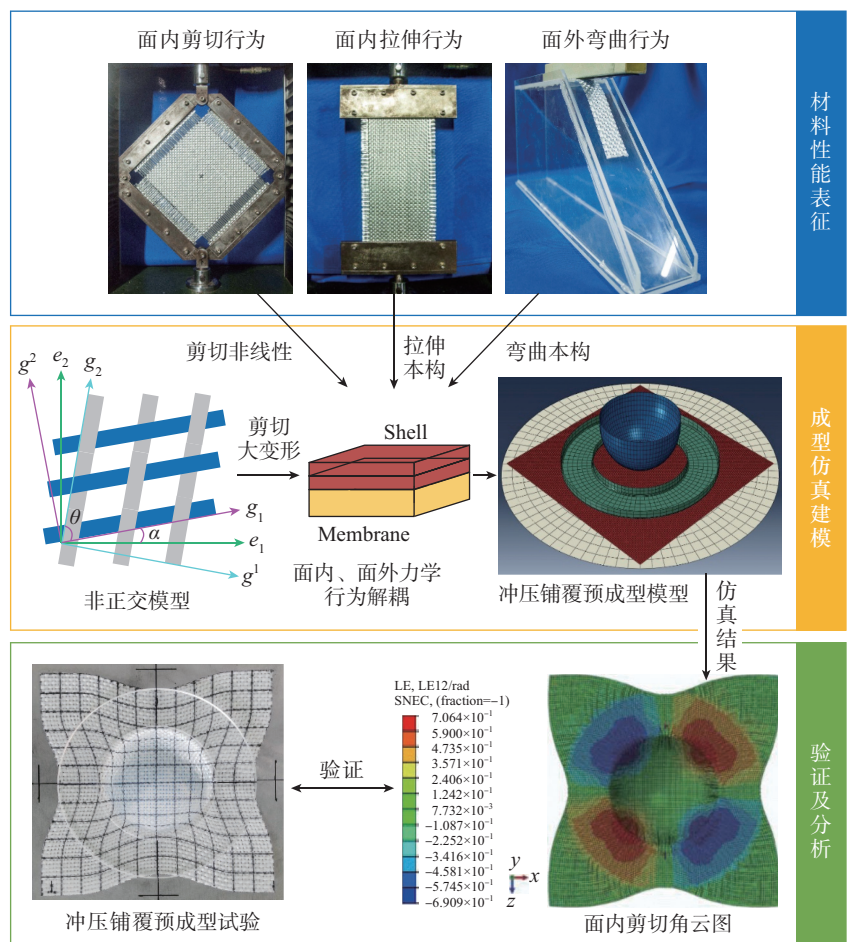


图 4 冲压铺覆预成型工艺过程仿真及验证研究概要图^[48]

Fig.4 Summary diagram of simulation and verification research on draping process^[48]

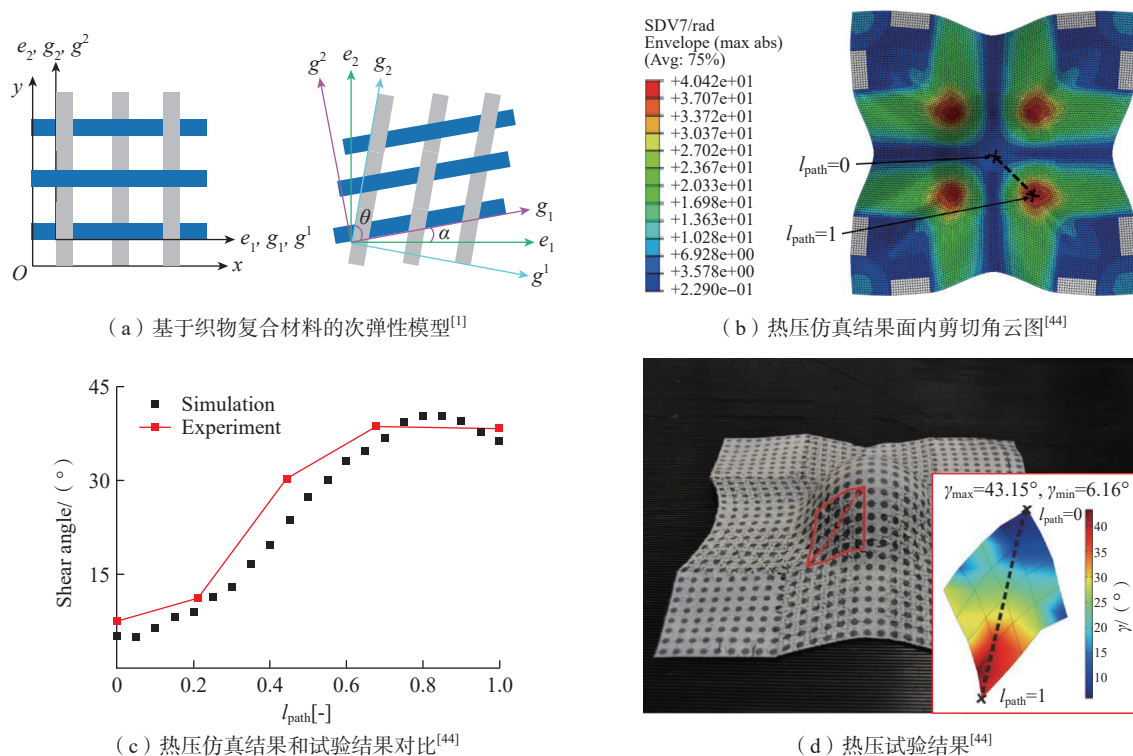


图5 基于次弹性模型的热压仿真和试验结果对比

Fig.5 Comparison of thermoforming results of simulation and experiments based on hypoelastic constitutive model

纤维拉伸和纤维面内剪切应变能组成的超弹性本构模型,用于干织物的 大变形分析。Gong 等^[64]考虑基体、纤维和纤维-纤维-基体剪切相互作用应变能,进一步改进超弹性本构模型,该模型可用于织物材料的热冲压过程仿真^[65]。此外,Guzman-Maldonado 等^[66]提出了一种非线性率相关的超黏弹性模型,该模型使用超弹性模型考虑张力和弯曲能的同时,使用广义 Maxwell 模型对面内剪切的黏弹性进行描述。Hu^[67]提出了一种基于压缩能量的超黏弹性方法并通过织物增强尼龙片材的热压成型试验进行了验证。

理想纤维增强材料模型(IFRM)属于超弹性模型范畴,是最早用于织物增强复合材料成型的连续介质力学方法之一,由 Rogers^[68]首次引入到复合材料成型领域。Harrison 等^[69]将 IFRM 材料本构模型应用于 GF/PP 混编织物的面内剪切行为建模中,同时该方法还用于双球顶几何形状的冲

压成型仿真^[70],为了评估该类模型对成型过程的仿真效果,使用次弹性本构模型进行了对比分析。Haanappel 等^[10]基于 AniForm 软件中的 IFRM 模型研究了 CETEX®C1200 UD 带材和 CETEX®GF/PPS 织物增强片材热压成型过程中材料变形机理。Dörr 等^[17]采用相同的方法对面内膜行为进行建模,并基于各向异性黏弹性模型对面外弯曲行为进行建模,结果表明基于 Voigt-Kelvin 的本构模型更适合于褶皱缺陷的预测^[15]。为了提高模拟方法的准确性,Dörr 等^[16]进一步考虑了 IFRM 模型的材料行为温度相关性,提出了一种热-力耦合方法对热压成型开展研究。

2.1.2 面内剪切模型应用进展

面内剪切模型用于模拟镜框剪切、偏轴拉伸和冲压成型中织物或者复合材料大变形行为,预测成型过程中纤维走向和纤维夹角变化规律。与干纱织物冲压预成型不同,CoFRTP 热压过程需考虑材料本构

的率相关和温度相关性,工艺参数研究多集中于模具冲压速度、预浸料预热温度、转移时间和模具温度等因素对纤维夹角和纤维方向的影响。基于与速率和温度无关的面内剪切本构模型,Wang 等^[50]提出了一种多层复合材料冲压模拟模型,模拟结果表明,在第7层的拐角处最大剪切角为 48°,与试验结果得到的 42° 吻合较好;尽管该模型可以准确预测某恒定温度下材料变形规律,但需根据成型条件更换材料本构,无法实现成型温度的连续变化。近期研究集中于成型过程中面内剪切行为的速率或温度相关的模型开发。Guzman-Maldonado 等^[66]提出了一种面内剪切行为的率相关本构,该模型使用非线性超黏弹性本构方程,用于热冲压过程的面内剪切变形行为的研究,并对不同成型温度和冲压速度工艺参数对面内剪切角的影响进行了讨论,结果表明构件中最大剪切角随着温度的升高而增加,剪切角随着冲

压速率的降低而增加。基于以上工作, Guzman-Maldonado 等^[71] 继续提出了温度-率相关本构, 评估热压过程中的材料变形行为, 结果表明所建模型可以较好地预测构件整体形状和局部剪切角变化, 与试验结果一致性高。Machado 等^[38] 基于次弹性本构提出了一种率-温度相关的面内剪切模型, 研究温度和成型速度对剪切角分布的作用规律, 对比恒温成型和非恒温成型仿真结果, 发现恒温模型并不适用于低速成型仿真, 主要原因为模具低速运动下预浸料散热严重, 导致模型中的材料温度与实际温度差异较大。张学文等^[37] 基于 Machado 等^[38] 温度-率模型, 对热冲压成型工艺参数包括模具温度、压边圈压力和预浸温度对初始褶皱的作用规律进行了研究, 并对成型工艺参数进行了优化。

2.2 面外弯曲材料本构建模方法及应用进展

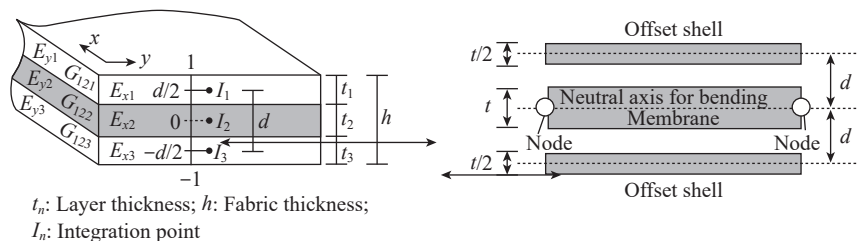
2.2.1 面外弯曲材料本构建模方法

考虑到实际成型的 CoFRTP 厚度相对较薄且均匀连续, 薄膜单元和基于壳理论的壳单元被广泛用于热冲压工艺仿真。由于热塑性预浸料的面外弯曲刚度相对较小, 早期成型仿真中通常只考虑面内拉伸和面内剪切行为, 后经研究发现, 面外弯曲刚度对热冲压成型过程中褶皱缺陷的数量和大小起着重要作用, 因此近期研究在材料本构模型中考虑面内膜行为的同时, 重点开展面外弯曲行为研究^[34]。目前干纱织物或 CoFRTP 热压成型数值建模方法是将所有材料本构方程赋予到传统薄膜单元或者壳单元中, 包括面内拉伸和面内剪切以及面外弯曲性能等^[66]。然而, 由于传统壳理论中面内拉伸模量和面外弯曲刚度的耦合作用, 干纱织物或熔融状态下热塑性预浸料的实际面外弯曲刚度远小于商业软件中传统壳理论提供的数值。

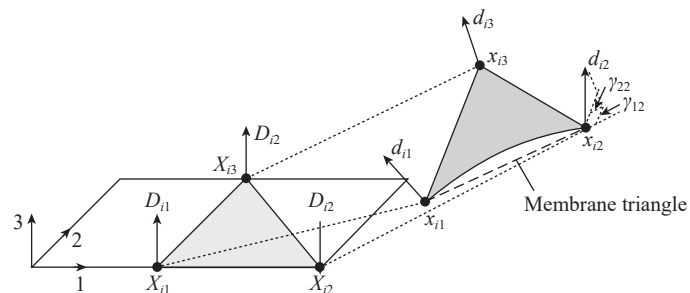
因此, 如何解耦面内和面外材料

行为, 实现面外弯曲刚度的准确建模是研究热点之一。采用单元层叠法解耦面内和面外材料行为是目前常用的方法之一^[72-73]。如图 6 (a) 所示^[72-73], Nishi 等^[73] 通过夹心膜单元和偏移壳单元的方式提出一种单元叠加法, 该方法同时考虑了面内(薄膜单元)和面外(两层偏移壳单元)材料属性。Iwata 等^[74] 将该方法引入碳纤维织物的铺覆成型仿真研究。孔令国等^[48] 基于以上思路对干纱织物进行建模并研究了压边力对干纱织物铺覆成型的作用规律。Dörr^[75] 使用壳单元共享节点法描述面外弯曲行为, 用于热压仿真模型中 CF/PA UD 单向带材料的建模。Haanappel 等^[10] 提出用于 CoFRTP 成型仿真的离散基尔霍夫理论 (DKT) 壳单元, 该方法可在一个单元内有效解耦材料的面内和面外变形行为。基于以上方法, Dörr 等^[15-16] 基于 ABAQUS 的 VUEL 子模块编写 DKT 壳单元并结合超弹性模型, 对 CF/PA UD 单向带复合材料热压成型过程进行仿真, 如图 6 (b) 所示。Liang 等^[49] 基于虚功定理对面内拉伸和面外弯曲

进行解耦, 研究了面外弯曲刚度对褶皱缺陷的作用规律。另外, 针对面外弯曲刚度的非线性建模是目前研究的另一个热点, 部分研究将面外弯曲刚度假设为定值, 在整个成型过程中保持不变^[73-74]。近期研究表明, 冲压成型过程中保持面外弯曲刚度恒定会导致褶皱形状失真, Yu 等^[76-77] 改进经典悬臂梁面外刚度测试方法, 结合 3D 点云成像法, 对无屈曲干纱织物 (NCF) 弯曲外形进行数学建模, 建立弯矩与曲率的非线性关系。Poppe 等^[78] 首先基于 41.5° 悬臂梁弯曲测试试验结果, 对比恒定面外弯曲刚度模型和非线性弯曲刚度模型的合理性, 发现前者弯曲样条轨迹线与试验结果差异较大, 而非线性弯曲刚度模型可以准确地预测样条弯曲轨迹, 如图 7 所示。Yu 等^[76] 基于干纱织物半球形铺覆成型试验, 对比面外弯曲刚度的线性本构和非线性本构对仿真精度的影响 (图 8) 发现非线性本构的结果与试验结果吻合较好。另外, Dörr 等^[15-17] 针对率相关性和温度相关性的非线性面外弯曲刚度开展了系统的研究。



(a) 基于层合板理论的层叠解耦法^[72-73]



(b) 基于节点坐标和单元方向的DKT壳单元初始构型到变形构型^[15]

图 6 基于层合板理论的解耦法和 DKT 壳单元

Fig.6 Decoupling method based on laminate theory and schematic illustration of the DKT shell element

2.2.2 面外弯曲模型应用进展

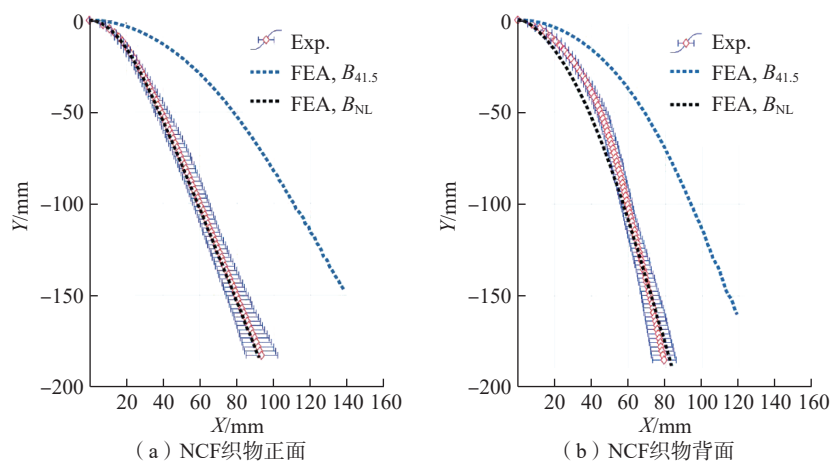
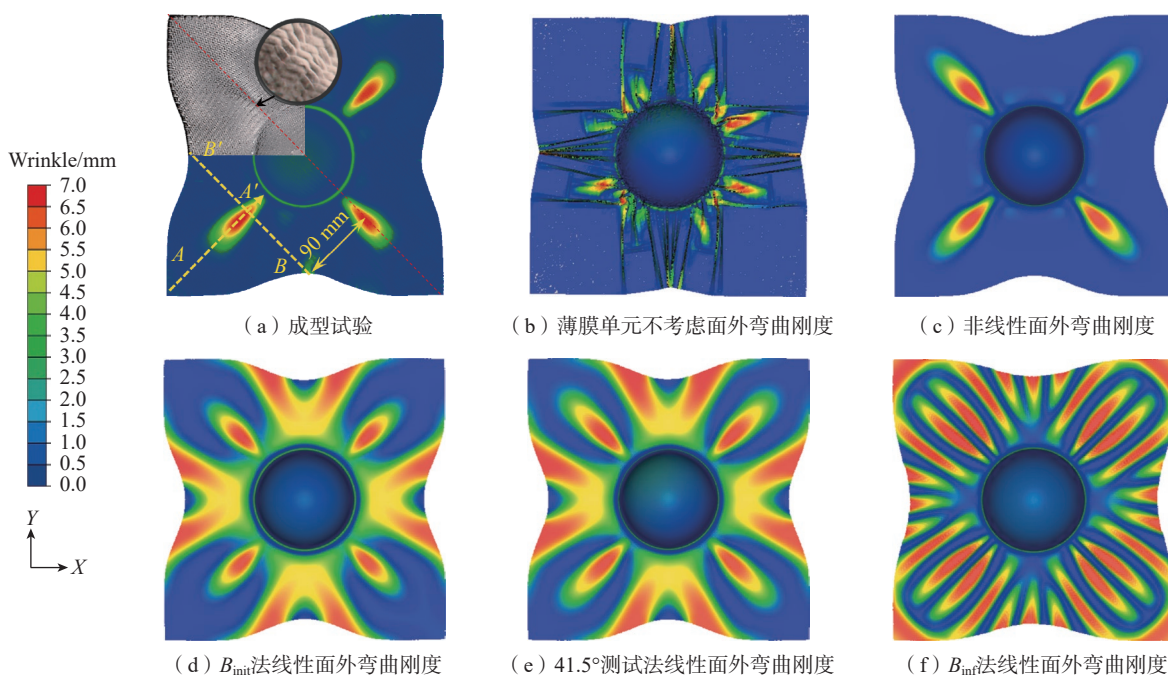
褶皱是 CoFRTP 热压构件中最常见的缺陷之一。在褶皱形成机理方面,面内材料行为是引发褶皱的主要原因,初期褶皱预测仿真模型集中在面内行为的描述^[32],随着热压工艺研究的进展,研究人员发现面外弯曲刚度是准确地预测褶皱的重要因素,该因素决定褶皱的数量和尺寸。在褶皱形成工艺因素方面,成型过程中

褶皱的形成很大程度上取决于材料增强类型、铺层顺序、成型速度、边界条件和成型温度等工艺参数。考虑到热压成型工艺参数的复杂性和多样性,如何有效提高褶皱预测精度、降低褶皱缺陷一直是成型仿真的研究热点之一。

研究早期阶段集中于热-率无关的仿真模型开发。Haanapple^[43]提出了考虑面内膜行为、面外弯曲行

为及摩擦行为的成型模型,对比 CF/PEEK 单向带和 GF/PPS 织物增强片材的成型机理。研究中以典型机翼前缘构件为目标,对比仿真和试验结果表明,在加强筋区域中,CF/PEEK 单向带构件更易产生褶皱,该模型正确预测了构件外形和褶皱位置。Poppe 等^[78]研究了层合板铺层顺序对褶皱的影响,仿真和试验结果均表明,与准各向同性铺层相比,具有正交铺层的层合板具有更好的成型性。Wang 等^[50]提出考虑层间摩擦接触的多层仿真模型,用于预测温度梯度对成型过程中褶皱产生的作用规律,结果表明,在成型过程中面内剪切刚度的重新分布是引发褶皱的主要原因。

研究中后期阶段集中于率相关的仿真模型本构开发。Guzman-Maldonado 等^[66]基于非线性超黏弹性本构模型描述率相关面内剪切行为,用于研究冲压速度对成型过程中褶皱的影响,结果表明成型过程中层合板温度的降低会导致褶皱量的增加,主要因为较低的温度会使面内剪切刚度升高,导致在成型过程中产生更多的褶

图7 面外弯曲刚度试验与线性和非线性仿真结果对比^[78]Fig.7 Out-of-plane bending stiffness test compared with linear and nonlinear simulation results^[78]图8 铺覆成型试验与仿真结果对比^[76]Fig.8 Comparison of test and simulation results of overlay molding^[76]

皱。另外, Dörr 等^[17]提出了考虑率相关的面外弯曲刚度数值模型,用于典型复杂构件成型,结果表明,使用广义 Maxwell 本构模型可有效预测褶皱缺陷。此外, Dörr 等^[15]提出基于 DKT 单元的超黏弹性本构方程描述层内材料变形行为,模拟结果表明, Voigt-Kelvin 本构模型更适用于恒温假设下的褶皱预测。

近期研究集中于率-温度相关的仿真模型本构开发。Guzman-Maldonado 等^[71]提出了基于率和温度相关的超弹性本构模型,用于提高仿真模型预测精度。Dörr 等^[16]在率相关模型^[15]基础上提出了热-力耦合仿真方法,用于预测热冲压过程中引起的褶皱;该方法中的热模型考虑了热辐射、热对流和热传导相关的热行为以及半结晶基体(PA6)的结晶行为;该模型可以同时考虑材料熔融态和固态的转变;与恒温模拟方法相比,热-力耦合模型仿真得到的褶

皱形状和数量更为真实。Chen 等^[21]基于 Dangora 等^[20,46]工作,考虑面内剪切刚度的热-率相关性和面内拉伸、面外弯曲的热相关性,解耦面内/外材料的变形行为,对单向增强 CoFRTP 层合板热压成型过程进行仿真,并使用验证的仿真模型对成型工艺参数进行研究,用以指导实际工艺参数设置,提高成型工艺设计效率,如图 9 所示。

2.3 层间滑移材料本构建模方法及应用进展

2.3.1 层间滑移行为建模方法

复合材料成型过程层间接触包括预浸料/预浸料间接触及预浸料/模具间接触。干纱织物或热塑性混编织物层间接触属于库仑摩擦,根据摩擦理论,当两个表面粗糙的接触面发生相对滑移,摩擦力与接触面表面粗糙度及施加在其表面的正压力有关。对于完全熔融状态 CoFRTP 预浸料,层间接触表面有一层树脂流体

润滑层,层间接触属于纯流体静力学摩擦接触范畴,此时摩擦力与接触面的树脂基体黏度、厚度和相对滑动速率直接相关;对于实际层间接触表面,可能既存在库仑摩擦又存在纯流体静力学摩擦,属于混合摩擦。复合材料常用摩擦模型有两个,其一是 Murtagh 等^[79]引入到连续纤维增强复合材料成型的滑移模型,该模型假定预浸料和模具之间树脂层为纯流体静力学接触,摩擦定律与层间接触树脂的黏度有关。对于以上模型的使用, Akkerman 等^[80]基于热塑性混编织物几何形状和基体材料的性能,使用介观法结合雷诺方程迭代推导出接触层树脂厚度,并对使用模型开展了热成型相关研究。关于复合材料摩擦的另一个经典模型是 Stribeck 曲线,该模型将整个接触过程分为 3 个阶段,树脂未开始熔化阶段(边界润滑)、树脂软化变黏阶段(混合润滑)和树脂熔化阶段(流体动力润滑)。

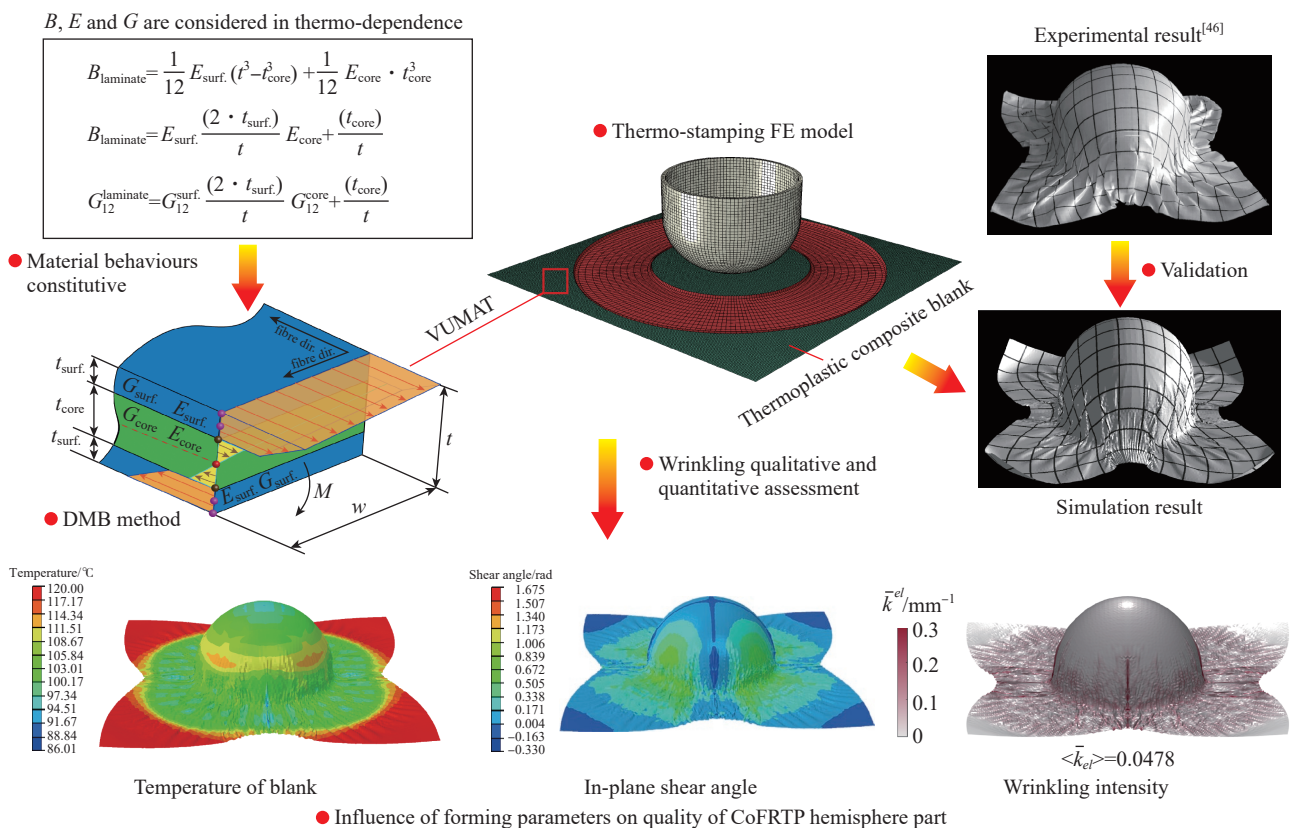


图 9 考虑温度相关的热压成型有限元建模、验证和应用^[21,46]

Fig.9 Temperature-dependent thermoforming FEA modeling, verification and application^[21,46]

2.3.2 层间滑移模型应用进展

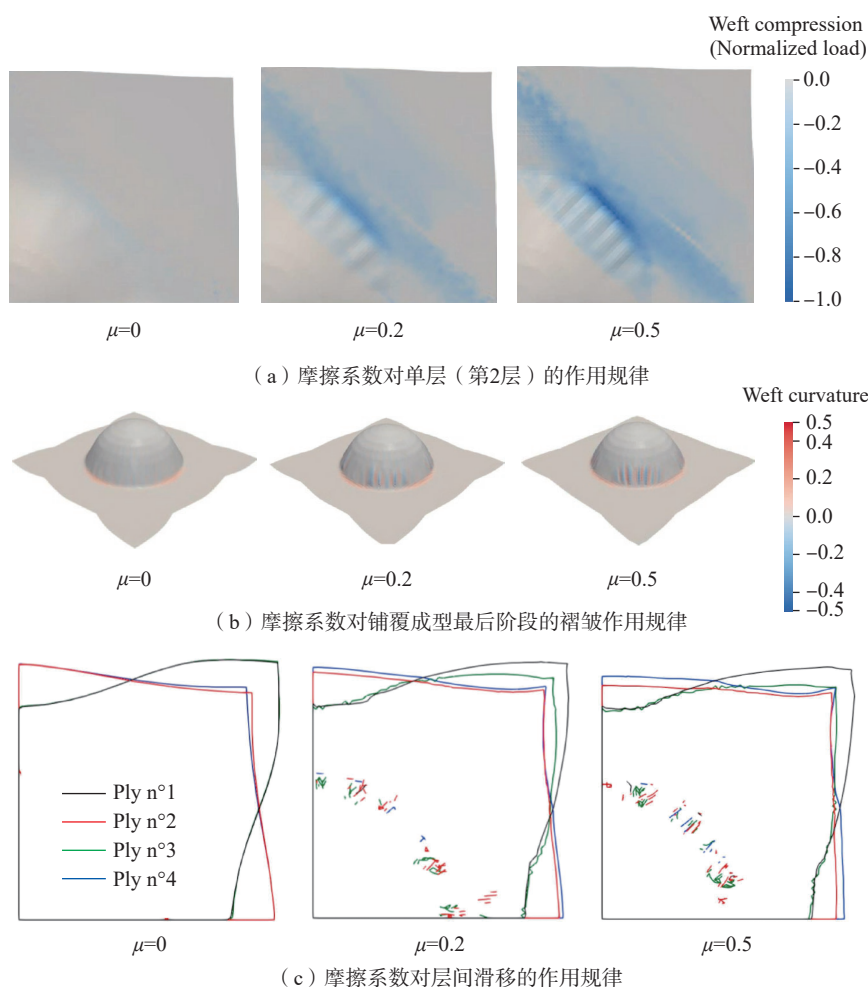
在热冲压成型过程中,模具/预浸料滑移及预浸料/预浸料相对运动会导致接触摩擦,从而显著影响局部材料变形行为。因此,相关研究针对不同接触摩擦本构建立仿真模型,研究接触摩擦对成型过程中材料变形的作用规律^[40,81-82]。Guzman-Maldonado等^[83]以多层干纱织物铺覆成型为研究对象,基于ABAQUS现有罚函数接触模块,研究模型中摩擦系数对成型的作用规律,研究发现,随着摩擦系数的增加,褶皱量增加,铺层之间的相对滑移减小,如图10所示。Harrison等^[70]对热塑性混编织物热压成型开展研究,设定5.0和3.0两种不同的恒定摩擦系数进行数值模拟,研究热压成型过程中摩擦系数对面内剪切

角的影响,结果表明,由于层间剪切刚度减小,后者可以观察到更多的剪切区域。Gorczyca-Cole等^[81]基于经典Stribeck模型,拟合摩擦系数 μ 与Hersey数的曲线,通过摩擦试验得到相应经验方程。基于摩擦模型定义用户子程序进行热冲压过程仿真,结果表明,模具/预浸料滑移的摩擦系数与模具温度直接相关,数值模型中应考虑Hersey数。Chen等^[40]使用多层复合材料进行热压成型,将内聚力模型应用到三维内聚元素中建立层间接触,模拟结果显示,成型温度为320℃时层间滑移显著。模具/预浸料滑移机理方面,与温度相关的树脂黏度对摩擦系数影响显著,应在模拟建模中予以考虑。基于增量拉格朗日乘子算法^[84],Wang等^[23]使用纯流

体静力学接触本构建立热压过程数值模型。此外,Fetfatsidis等^[85]利用基于压力和率相关的修正Hersey数库仑摩擦模型,研究模具/预浸料滑移以及预浸料/预浸料滑移机制。由于摩擦与冲压压力有关,有必要在热压过程中考虑可变摩擦系数。Dörr等^[17]基于经典库仑力模型考虑摩擦速率和接触系数的作用,提出层间滑移本构。李林秀等^[86]研究了CF/PPS预浸料热变形成型中的滑移行为,采用自行设计制作的测试系统,对织物预浸料、单向预浸料的滑移行为进行了表征,并考虑了温度、法向压力、速度对滑移行为的影响。

3 结论

热压成型工艺作为CoFRTP重要成型方法之一,由于成型效率高和生产成本低等优势得到广泛的关注。但该工艺涉及成型参数多,构件制备过程中易产生工艺缺陷。对热压制造工艺的充分理解是实现高质量制造的关键。对制造工艺原理的把握可分为3个等级,最高等级可实现构件低成本、高效率设计,减少产品开发周期。成熟商用有限元软件是连接CoFRTP热压成型机理与应用的重要桥梁。冲压阶段作为热压成型工艺重要环节,对构件的成型质量起决定性作用。纤维在冲压阶段通过滑动、转动和弯曲等大变形行为实现重分布以适应复杂的三维型面,其变形行为对温度、冲压速度、边界条件等工艺参数依赖性较高,成型工艺参数选取不当易导致材料变形不协调,引发褶皱等成型缺陷。对冲压阶段中材料变形行为和制造缺陷的准确预测,关键在于对材料变形机制的准确把握及相关力学材料行为的准确表征。基于材料变形机制和材料行为的宏观建模仿真方法在一定程度上简化了成型模型,提高了建模和计算效率。尽管目前对以上内容开展了部分研究工作,但对材料成型基础

图10 摩擦系数对多层干纱织物成型的作用规律^[83]Fig.10 Effect of inter-ply frictions on the draping simulation results^[83]

性能标准、面内面外材料力学行为本构、有限元单元等重点方面的研究仍存在较大的挑战,解决以上问题是热压成型突破应用技术瓶颈的关键。

未来工作中,进一步发展具有介观-宏观多尺度耦合的建模方法是提高预测精度和降低计算成本的有效途径。此外,为提高有限元模型仿真精度,有必要在数值模型中进一步考虑材料行为的非线性和率-温度相关性。另外考虑实际成型工况,由模具和材料的温差引起的材料相态转变(熔融态和固态)有必要在模型中进一步体现,以提高仿真结果的可靠性,需要进一步开发基于设计-成型-冷却-结构一体化迭代优化平台,以预测各环节对构件制造质量和制造成本的影响,其中各环节之间的有限元接口开发是下一步的重点。因此,真正实现热压工艺在 CoFRTP 构件中的高效应用,仍存在诸多挑战。

参考文献

- [1] CHEN H D, LI S X, WANG J H, et al. A focused review on the thermo-stamping process and simulation progresses of continuous fibre reinforced thermoplastic composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 224: 109196.
- [2] BUSSETTA P, CORREIA N. Numerical forming of continuous fibre reinforced composite material: A review[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 113: 12-31.
- [3] HENNING F, KÄRGER L, DÖRR D, et al. Fast processing and continuous simulation of automotive structural composite components[J]. Composites Science and Technology, 2019, 171: 261-279.
- [4] KÄRGER L, BERNATH A, FRITZ F, et al. Development and validation of a CAE chain for unidirectional fibre reinforced composite components[J]. Composite Structures, 2015, 132: 350-358.
- [5] GONG Y K, SONG Z R, NING H M, et al. A comprehensive review of characterization and simulation methods for thermo-stamping of 2D woven fabric reinforced thermoplastics[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 203: 108462.
- [6] LIANG B, BOISSE P. A review of numerical analyses and experimental characterization methods for forming of textile reinforcements[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(8): 143-163.
- [7] 刘彬, 安卫龙, 倪楠楠. 国外热塑性复合材料工程应用现状[J]. 航空制造技术, 2021, 64(22): 80-90.
- LIU Bin, AN Weilong, NI Nannan. Application status of thermoplastic composite materials in foreign engineering[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(22): 80-90.
- [8] 周冰洁, 张代军, 张英杰, 等. 高性能热塑性复合材料在航空发动机短舱上的应用[J]. 航空制造技术, 2020, 63(7): 86-91.
- ZHOU Bingjie, ZHANG Daijun, ZHANG Yingjie, et al. Applications of thermoplastic composites on aero-engine nacelles[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(7): 86-91.
- [9] National Composites Centre. Composites innovation in aircraft wing design and manufacture[EB/OL]. (2022-09-14) [2022-10-11]. <https://www.nccuk.com/sectors/aerospace/wing-of-tomorrow/>.
- [10] HAANAPPEL S P, TEN THIJJE R H W, SACHS U, et al. Formability analyses of unidirectional and textile reinforced thermoplastics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 56: 80-92.
- [11] LAUTEX. About pentation[EB/OL]. (2022-11-11) [2022-09-28]. <https://www.kautex.com/en/mobility/battery-systems>.
- [12] SCHUG A F. Unidirectional fibre reinforced thermoplastic composites: A forming study[D]. München: Technische Universit, 2020.
- [13] KÄRGER L, GALKIN S, ZIMMERLING C, et al. Forming optimisation embedded in a CAE chain to assess and enhance the structural performance of composite components[J]. Composite Structures, 2018, 192: 143-152.
- [14] PICKETT A K, CREECH G, DE LUCA P. Simplified and advanced simulation methods for prediction of fabric draping[J]. Revue Européenne Des Éléments Finis, 2005, 14(6-7): 677-691.
- [15] DÖRR D, HENNING F, KÄRGER L. Nonlinear hyperviscoelastic modelling of intra-ply deformation behaviour in finite element forming simulation of continuously fibre-reinforced thermoplastics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 109: 585-596.
- [16] DÖRR D, JOPPICH T, KUGELE D, et al. A coupled thermomechanical approach for finite element forming simulation of continuously fiber-reinforced semi-crystalline thermoplastics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 125: 105508.
- [17] DÖRR D, SCHIRMAIER F J, HENNING F, et al. A viscoelastic approach for modeling bending behavior in finite element forming simulation of continuously fiber reinforced composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 94: 113-123.
- [18] HAN M G, CHANG S H. Draping simulation of carbon/epoxy plain weave fabrics with non-orthogonal constitutive model and material behavior analysis of the cured structure[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 110: 172-182.
- [19] LIANG B, ZHANG W Z, FENNER J S, et al. Multi-scale modeling of mechanical behavior of cured woven textile composites accounting for the influence of yarn angle variation[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 124: 105460.
- [20] DANGORA L M, MITCHELL C J, SHERWOOD J, et al. Deep-drawing forming trials on a cross-ply thermoplastic lamina for helmet preform manufacture[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(3): 031009.
- [21] CHEN H D, WANG J H, COLIN D, et al. Temperature-dependent modelling of tension, in-plane shear, and bending behaviour in non-isothermal thermo-stamping process simulation of unidirectional UHMWPE fibre reinforced thermoplastic TPU composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2022: 089270572211422.
- [22] VAIDYA U K, CHAWLA K K. Processing of fibre reinforced thermoplastic composites[J]. International Materials Reviews, 2008, 53(4): 185-218.
- [23] 邢开, 徐海兵, 颜春, 等. 碳纤维增强高性能热塑性复合材料界面改性的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(5): 110-115.
- XING Kai, XU Haibing, YAN Chun, et al. Research progress on interfacial properties of carbon fiber reinforced high performance thermoplastic composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(5): 110-115.
- [24] 周典瑞, 高亮, 霍红宇, 等. 热塑性树脂基复合材料用碳纤维上浆剂研究进展[J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 1785-1795.
- ZHOU Dianrui, GAO Liang, HUO Hongyu, et al. Research progress of carbon fiber sizing

- agents for thermoplastic composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 1785–1795.
- [25] 许云鹏, 颜春, 刘东, 等. 连续纤维增强热塑性预浸料制备工艺的研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2020(8): 123–128.
- XU Yunpeng, YAN Chun, LIU Dong, et al. Rprogress in preparation technology of continuous fiber reinforced thermoplastic prepregs[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(8): 123–128.
- [26] 王子健, 周晓东. 连续纤维增强热塑性复合材料成型工艺研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(10): 120–128.
- WANG Zijian, ZHOU Xiaodong. Research progress on forming process of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(10): 120–128.
- [27] 龚友坤, 宋增瑞, 宁慧铭, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料成型工艺的研究进展[J]. *河北工业大学学报*, 2020, 49(2): 1–26.
- GONG Youkun, SONG Zengrui, NING Huiming, et al. Research progress on forming process of continuous fiber-reinforced thermoplastic composite materials: A review[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2020, 49(2): 1–26.
- [28] 肇研, 孙铭辰, 张思益, 等. 连续碳纤维增强高性能热塑性复合材料的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9): 4274–4285.
- ZHAO Yan, SUN Mingchen, ZHANG Siyi, et al. Advance in continuous carbon fiber reinforced high performance thermoplastic composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9): 4274–4285.
- [29] 杨志, 焦亚男, 谢军波, 等. 纺织复合材料纤维预制体力学性能测试方法研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(4): 1511–1533.
- YANG Zhi, JIAO Yanan, XIE Junbo, et al. Research progress in testing methods of mechanical properties of textile composite fiber preforms[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(4): 1511–1533.
- [30] BOISSE P, HAMILA N, GUZMAN-MALDONADO E, et al. The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepregs: A review[J]. *International Journal of Material Forming*, 2017, 10(4): 473–492.
- [31] BOISSE P, HAMILA N, MADEO A. Modelling the development of defects during composite reinforcements and prepreg forming[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society (Mathematical, Physical, and Engineering sciences)*, 2016, 374(2071): 20150269.
- [32] BOISSE P, HAMILA N, VIDAL-SALLÉ E, et al. Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(5): 683–692.
- [33] BOISSE P, AIMÈNE Y, DOGUI A, et al. Hypoelastic, hyperelastic, discrete and semi-discrete approaches for textile composite reinforcement forming[J]. *International Journal of Material Forming*, 2010, 3(2): 1229–1240.
- [34] 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: 234–249.
- [35] BARAN I, CINAR K, ERSOY N, et al. A review on the mechanical modeling of composite manufacturing processes[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017, 24(2): 365–395.
- [36] HOU M. Stamp forming of continuous glass fibre reinforced polypropylene[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1997, 28(8): 695–702.
- [37] 张学文, 王继辉, 陈宏达, 等. 单向增强热塑性复合材料热冲压成型仿真与优化[J]. *复合材料科学与工程*, (2022–09–14) [2022–11–15]. <https://kns.cnki.net/kns8/defaultresult/index>.
- ZHANG Xuewen, WANG Jihui, CHEN Hongda, et al. Numerical modeling and optimisation in thermo-stamping process of unidirectional fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Composites Science and Engineering*, (2022–09–14) [2022–11–15]. <https://kns.cnki.net/kns8/defaultresult/index>.
- [38] MACHADO M, MURENU L, FISCHLSCHWEIGER M, et al. Analysis of the thermomechanical shear behaviour of woven-reinforced thermoplastic-matrix composites during forming[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 86: 39–48.
- [39] SCHUG A, WINKELBAUER J, HINTERHÖLZL R, et al. Thermoforming of glass fibre reinforced polypropylene: A study on the influence of different process parameters[C]//AIP Conference Proceedings. Dublin: AIP Publishing, 2017: 030010.
- [40] CHEN Q Q, BOISSE P, PARK C H, et al. Intra/inter-ply shear behaviors of continuous fiber reinforced thermoplastic composites in thermoforming processes[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(7): 1692–1703.
- [41] VANCLOOSTER K. Forming of multilayered fabric reinforced thermoplastic composites[D]. Leuven: University of Leuven, 2010.
- [42] JAMIN T, DUBÉ M, LEBEL L L. Stamp forming of thermoplastic composites: Effect of radius and thickness on part quality[C]//16th European Conference on Composite Materials. Seville: European Conference on Coupons, 2014.
- [43] HAANAPPEL S P. Forming of UD fibre reinforced thermoplastics[D]. Netherlands: University of Twente, 2013.
- [44] MACHADO M, FISCHLSCHWEIGER M, MAJOR Z. A rate-dependent non-orthogonal constitutive model for describing shear behaviour of woven reinforced thermoplastic composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 80: 194–203.
- [45] JAUFFRÈS D, SHERWOOD J A, MORRIS C D, et al. Discrete mesoscopic modeling for the simulation of woven-fabric reinforcement forming[J]. *International Journal of Material Forming*, 2010, 3(2): 1205–1216.
- [46] DANGORA L M, MITCHELL C, WHITE K D, et al. Characterization of temperature-dependent tensile and flexural rigidities of a cross-ply thermoplastic lamina with implementation into a forming model[J]. *International Journal of Material Forming*, 2018, 11(1): 43–52.
- [47] HARRISON P, YU W R, LONG A C. Rate dependent modelling of the forming behaviour of viscous textile composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, 42(11): 1719–1726.
- [48] 孔令国, 王继辉, 陈宏达, 等. 压边力对非平衡平纹机织物预制体成型作用规律[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(4): 1798–1812.
- KONG Lingguo, WANG Jihui, CHEN Hongda, et al. Influence of blank-holder force on the draping process of unbalanced plain woven fabric preform[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(4): 1798–1812.
- [49] LIANG B, HAMILA N, PEILLON M, et al. Analysis of thermoplastic prepreg bending stiffness during manufacturing and of its influence on wrinkling simulations[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 67: 111–122.
- [50] WANG P, HAMILA N, BOISSE P. Thermoforming simulation of multilayer composites with continuous fibres and thermoplastic matrix[J].

Composites Part B: Engineering, 2013, 52: 127–136.

[51] BELYTSCHEK T. Nonlinear finite elements for continua and structures[M]. Newark: John Wiley & Sons, 2013.

[52] PENG X Q, CAO J. A continuum mechanics-based non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(6): 859–874.

[53] PENG X Q, DING F F. Validation of a non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics via hemispherical stamping simulation[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(4): 400–407.

[54] PENG X Q, REHMAN Z U. Textile composite double dome stamping simulation using a non-orthogonal constitutive model[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(8): 1075–1081.

[55] BADEL P, VIDAL-SALLÉ E, BOISSE P. Large deformation analysis of fibrous materials using rate constitutive equations[J]. Computers & Structures, 2008, 86(11–12): 1164–1175.

[56] 丁纺纺, 彭雄奇. 复合材料用机织物非正交本构模型的半球形冲压成型验证[J]. 复合材料学报, 2011, 28(1): 156–160.

DING Fangfang, PENG Xiongqi. Validation of a non-orthogonal constitutive model for woven composite fabrics via hemispherical stamping simulation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(1): 156–160.

[57] 吕柄熠, 王时玉, 校金友, 等. 基于非正交本构模型的热塑性机织物预浸料宽温域赋形褶皱缺陷仿真方法[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 2355–2364.

LÜ Bingyi, WANG Shiyu, XIAO Jinyou, et al. A simulation method of forming wrinkle defects in thermoplastic woven fabric preregs in a wide temperature range based on non-orthogonal constitutive model[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2355–2364.

[58] AIMÈNE Y. A hyperelastic approach for composite reinforcement large deformation analysis[J]. Journal of Composite Materials, 2010, 44(1): 5–26.

[59] PENG X Q, GUO Z Y, REHMAN Zia-Ur, et al. A simple anisotropic fiber reinforced hyperelastic constitutive model for woven composite fabrics[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 723–726.

[60] DRIDI S, DOGUI A, BOISSE P. Finite element analysis of bias extension test using an orthotropic hyperelastic continuum model

for woven fabric[J]. The Journal of the Textile Institute, 2011, 102(9): 781–789.

[61] KUEH A B H. Fitting-free hyperelastic strain energy formulation for triaxial weave fabric composites[J]. Mechanics of Materials, 2012, 47: 11–23.

[62] PENG X Q, GUO Z Y, DU T L, et al. A simple anisotropic hyperelastic constitutive model for textile fabrics with application to forming simulation[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 52: 275–281.

[63] SENNER T, KREISSL S, MERKLEIN M, et al. Bending of unidirectional non-crimp-fabrics: Experimental characterization, constitutive modeling and application in finite element simulation[J]. Production Engineering, 2015, 9(1): 1–10.

[64] GONG Y K, PENG X Q, YAO Y, et al. An anisotropic hyperelastic constitutive model for thermoplastic woven composite preregs[J]. Composites Science and Technology, 2016, 128: 17–24.

[65] GONG Y K, XU P, PENG X Q, et al. A lamination model for forming simulation of woven fabric reinforced thermoplastic preregs[J]. Composite Structures, 2018, 196: 89–95.

[66] GUZMAN-MALDONADO E, HAMILA N, BOISSE P, et al. Thermomechanical analysis, modelling and simulation of the forming of pre-impregnated thermoplastics composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 78: 211–222.

[67] HU X. Simulation of forming, compaction and consolidation of thermoplastic composites based on solid shell elements[D]. Lyon: Université de Lyon, 2017.

[68] ROGERS T G. Rheological characterization of anisotropic materials[J]. Composites, 1989, 20(1): 21–27.

[69] HARRISON P, CLIFFORD M J, LONG A C, et al. A constituent-based predictive approach to modelling the rheology of viscous textile composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(7–8): 915–931.

[70] HARRISON P, GOMES R, CURADO-CORREIA N. Press forming a 0/90 cross-ply advanced thermoplastic composite using the double-dome benchmark geometry[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 54: 56–69.

[71] GUZMAN-MALDONADO E, HAMILA N, NAOUAR N, et al. Simulation of thermoplastic prepreg thermoforming based

on a visco-hyperelastic model and a thermal homogenization[J]. Materials & Design, 2016, 93: 431–442.

[72] DÖBRICH O, GEREKE T, DIESTEL O, et al. Decoupling the bending behavior and the membrane properties of finite shell elements for a correct description of the mechanical behavior of textiles with a laminate formulation[J]. Journal of Industrial Textiles, 2014, 44(1): 70–84.

[73] NISHI M, HIRASHIMA T, KURASHIKI T. Textile composite reinforcement forming analysis considering out-of-plane bending stiffness and tension dependent in-plane shear behavior[C]//16th European Conference on Composite Materials. Seville: European Conference on Coupons, 2014.

[74] IWATA A, INOUE T, NAOUAR N, et al. Coupled meso-macro simulation of woven fabric local deformation during draping[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 118: 267–280.

[75] DÖRR D. Simulation of the thermoforming process of UD fiber-reinforced thermoplastic tape laminates[D]. Baden: Karlsruher Institut für Technologie, 2019.

[76] YU F, CHEN S, HARPER L T, et al. Simulating the effect of fabric bending stiffness on the wrinkling behaviour of biaxial fabrics during preforming[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 143: 106308.

[77] YU F, CHEN S, VIISAINEN J V, et al. A macroscale finite element approach for simulating the bending behaviour of biaxial fabrics[J]. Composites Science and Technology, 2020, 191: 108078.

[78] POPPE C, JOPPICH T, DÖRR D, et al. Modeling and validation of gripper induced membrane forces in finite element forming simulation of continuously reinforced composites[C]//Proceedings of the 20th International Esaform Conference on Material. Dublin: AIP Publishing, 2017.

[79] MURTAGH A M, LENNON J J, MALLON P J. Surface friction effects related to pressforming of continuous fibre thermoplastic composites[J]. Composites Manufacturing, 1995, 6(3–4): 169–175.

[80] AKKERMAN R, UBBINK M P, DE ROOIJ M B, et al. Tool-ply friction in composite forming[C]//European Scientific Association for Material Forming Conference on Material Forming. Zaragoza: AIP Publishing, 2007.

[81] GORCZYCA-COLE J L, SHERWOOD J A, CHEN J L. A friction model for

thermostamping commingled glass-polypropylene woven fabrics[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(2): 393–406.

[82] RAHULKUMAR P, JAGOTA A, BENNISON S J, et al. Cohesive element modeling of viscoelastic fracture: Application to peel testing of polymers[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(13): 1873–1897.

[83] GUZMAN-MALDONADO E, WANG P, HAMILA N, et al. Experimental and numerical analysis of wrinkling during forming of multi-layered textile composites[J]. *Composite Structures*, 2019, 208: 213–223.

[84] CARPENTER N J, TAYLOR R L, KATONA M G. Lagrange constraints for transient finite element surface contact[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1991, 32(1): 103–128.

[85] FETFATSIDIS K A, JAUFFRÈS D, SHERWOOD J A, et al. Characterization of the tool/fabric and fabric/fabric friction for woven-fabric composites during the thermostamping process[J]. *International Journal of Material Forming*, 2013, 6(2): 209–221.

[86] 李林秀, 岳广全, 杨洋, 等. 连续碳纤维增强聚苯硫醚预浸料层间滑移行为研究

[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(2): 24–31.

LI Linxiu, YUE Guangquan, YANG Yang, et al. Research on interlayer slip behavior of continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide prepreg[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(2): 24–31.

通讯作者: 曹东风, 副研究员, 工学博士, 研究方向为复合材料结构设计。
胡海晓, 副教授, 工学博士, 研究方向为复合材料健康监测与结构设计。

A Review on Thermo-Forming Process and Simulation Progresses of Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Plastics

CHEN Hongda^{1,2}, CAO Dongfeng², HU Haixiao^{2,3}, WANG Jihui⁴, DING Anxin⁴,
ZHONG Yucheng³, NI Aiqing¹, JI Yundong⁴, CHEN Junlei⁴

(1. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Foshan Xianhu Laboratory of Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory,
Foshan 528000, China;

3. School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

[ABSTRACT] Continuous fibre reinforced thermoplastic plastics (CoFRTP) exhibit the advantages of fast manufacturing, high fracture toughness and high recyclability, which are promising materials for aerospace and automotive industries. Thermoforming process is one of the most promising way for CoFRTP forming since the advantages of high efficiency and low cost. However, due to the amount of forming parameters involved in this process and the complex coupling of factors such as large nonlinearity deformation and multi phase transformation of materials, defects like wrinkles, fiber cracking and excessive dimensional deformation are prone to be induced, which generate great challenges to the mechanical properties of components and the assembly property. In order to overcome the disadvantages of low efficiency and high cost of traditional trial and error methods and improve the efficiency of thermoforming process design, this paper focuses on the review of thermoforming process and numerical methods. This paper includes four parts: the application and manufacturing of CoFRTP, the analysis and research status of thermoforming process, the simulation method of thermoforming process as well as the conclusion and the outlook of thermoforming technology. This study will provide theoretical guidance for highly efficient and high quality forming of CoFRTP, and promote the corresponding structural design and engineering application as well.

Keywords: Continuous fibre reinforced thermoplastic plastics (CoFRTP); Thermo-forming process; Advanced manufacturing; Process simulation; Design-forming platform

(责编 晓月)