

# 先进复合材料热压罐成型固化 仿真技术研究进展

李艳霞

(北京航空航天大学材料科学与工程学院空天材料与服役教育部重点实验室,北京 100191)

[摘要] 热压罐成型工艺是航空航天领域用复合材料构件的重要制备方法之一,工艺过程涉及热和压力在多相材料体系间复杂的相互作用,并影响复合材料成型质量。在物理化学作用机理研究基础上,建立数值模拟方法可有效指导工艺、工装的设计与优化,为先进复合材料研制模式从传统的积木式验证向数字化制造模式转变提供了有力的技术支撑。综述近年先进树脂基复合材料热压罐成型工艺数值模拟方面的主要研究进展,结合国内外研究现状,对热压罐成型工艺数值模拟的发展趋势及亟需解决的问题提出了几点思考。

关键词: 先进复合材料; 热压罐工艺; 数值模拟

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.15.076



李艳霞

博士, 讲师, 研究方向为树脂基复合材料。

先进树脂基复合材料因具有高比强度、高比模量、可设计性强、耐腐蚀、抗疲劳、易于整体成型等优异的综合性能,广泛应用于航空、航天等领域<sup>[1]</sup>。热压罐工艺是航空航天飞行器用复合材料的重要制备方法之

一。复合材料热压罐成型工艺中热压罐内高温高压气体作用下复合材料和复合材料构件同时成型,工艺过程中复合材料涉及热和压力在多相材料体系即工装、模具、辅助材料、纤维与树脂复合体系等之间复杂的相互作用,当材料类型及复合材料构件形式等改变后,工装、模具、工艺参数等往往需要重新设计优化。传统的“试错法”研发模式从试样到缩比件到试验件需要经过反复多次试验,研究费用高,复合材料制造质量的可控性差,制件合格率低,制约复合材料研制效率和应用<sup>[2]</sup>。美国政府和波音公司在 2001~2004 年共同实施快速插入复合材料(AIM-C)计划,在充分的应用基础研究前提下,建立新材料或已有材料新应用的设计知识库,采用数值模拟技术改进传统“积木式”验证分析方法,提高验证分析效率,支撑新型树脂基复合材料在飞行器结构上的快速、可靠应用,缩短复合材料应用时间 40%~50%,降低

成本 33%<sup>[3]</sup>。中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司开展了数字化技术在复合材料构件研制中的应用研究<sup>[4]</sup>,旨在建立复合材料构件从设计、制造、检测等过程的数字化设计、制造一体化体系,实现复合材料研制过程的仿真和数字量传递,提高研制效率。高效质量可控的树脂基复合材料构件制备的关键在于工艺、工装及模具等方案的优化,在工艺过程物理化学作用机制基础上,建立数值模拟方法,深入分析各种因素对复合材料成型质量影响规律,揭示缺陷形成机制,基于数值模拟技术的复合材料构件虚拟制造可为工装、工艺设计与优化提供依据,为先进复合材料研制模式从传统的试错或积木式验证向数字化制造模式转变提供了有力的技术支撑。

## 复合材料热压罐成型固化 仿真技术

热压罐成型工艺原理如图 1 所

示,根据热、压力传递特点,可以归纳为热压罐内压缩气体与固体材料之间的交互作用和纤维与树脂复合体系内的物理化学作用,而纤维与树脂复合体系内部物理化学作用可分为热传导/固化反应行为和树脂流动/纤维密实行为。热压工艺树脂流动/纤维密实过程是树脂流动与纤维多孔介质骨架结构变形的耦合作用,区别于不可压缩多孔介质内渗透流动,一方面树脂流动性受温度和树脂固化反应的影响;另一方面树脂流动与纤维密实影响孔隙、富树脂等缺陷的形成。热化学过程决定着树脂黏度、树脂固化反应程度,影响着树脂流动以及残余应力和固化变形等。而工装模具、辅助材料直接影响热压罐压缩气体作用在纤维与树脂复合体系的热和力。国内外学者针对复合材料热压罐成型固化过程物理化学作用开展了大量研究,旨在建立有效的数值模拟方法,指导新材料、新结构的工艺、工装设计与优化。

### 1 热压罐气体与固体材料之间交互作用仿真

在复合材料热压罐成型工艺过程中,大型框架式模具的温度分布受到罐内气体热交换、模具本身结构、复合材料固化放热和工艺辅料传

热特性等多种因素的影响,工装模具温度均匀性直接影响复合材料构件温度均匀性和固化变形等成型质量,工装模具温度场的预测对于指导大型框架式模具设计具有重要意义,因此,热压罐内模具温度场仿真也已受到学者的广泛关注。目前,大多采用流体计算软件如 Fluent、CFX、ACE 等,针对热压罐内气体、工装、复合材料构件等材料内部温度分布规律开展数值模拟分析。热压罐有效尺寸均为工业用大型热压罐,如  $\phi 2.5\text{m} \times 7\text{m}$ 、 $\phi 5.5\text{m} \times 13\text{m}$ 、 $\phi 4.5\text{m} \times 15\text{m}$ ,工装以典型的框架式结构为主,复合材料制件形状包括曲面蒙皮、变厚度蒙皮加筋结构<sup>[5-15]</sup>。主要原理是基于计算流体力学中连续、运动、能量方程,建立热压罐内强迫对流换热的温度场三维非定常数值模拟方法,模拟热压罐内模具的温度分布,并可以对固化工艺参数、模具结构参数和模具摆放位置等因素进行研究,优化热压罐以及构件内部温度分布情况。根据仿真分析对象不同,可归纳为如下几种情况:

(1) 在无工装情况下热压罐内气体温度分布仿真。高玉峰等<sup>[5]</sup>针对热压罐空载温度场进行分析,结果表明测量点的仿真计算温度在实

际测量值  $-4.5 \sim +2.5^\circ\text{C}$  的正负偏差之间,仿真数据同现场实测数据非常接近,验证了仿真方法用于判断热压罐设计是否满足要求的有效性,同时,表明在空载情况下热压罐内温度分布较均匀。

(2) 在仅含工装情况下热压罐内工装温度分布仿真。张旭生等<sup>[6]</sup>基于 Fluent 软件,针对一字型、十字形、T 型 3 种不同风道结构对框架式模具温度分布进行模拟,指出 T 型风道对改善温度场均匀性效果最优,模具型面温差为  $2.09^\circ\text{C}$ 。林家冠等<sup>[7]</sup>利用 Fluent 软件提供的内部风扇边界条件,模拟框架式模具风道处风扇对模具温度分布的影响,结果表明框架式模具通风口处安装风扇可改善热压罐内流场的均匀性。

(3) 含有模具和复合材料构件的热压罐内温度分布仿真。而根据仿真模型中复合材料构件材料参数和树脂固化反应的假设不同又分为如下两类:

- 在仿真模型中不考虑树脂固化反应产生的内热源的影响,并将复合材料的热物理参数设定为常数。李彩林<sup>[8]</sup>基于 PAM-AUTOCLAVE 软件平台,以平板工具和蒙皮模具为例,分析零件内部温度和固化度分布规律。以大致尺寸为  $3.2\text{m} \times 2.5\text{m} \times 1.4\text{m}$  的 3 种复合材料成型工装为例分析模具温度场,同时,分析了几何模型中风扇端外延伸长度、网格、求解器对计算结果和计算效率的影响<sup>[7]</sup>。傅承阳<sup>[9]</sup>在 CATIA 中进行建模,分析了工装表面的温度分布以及计算和实验数据的偏差。贾宇超等<sup>[10]</sup>基于 Fluent 软件建立模拟方法分析升温速率、风速、工装材料类型对飞机翼梁结构最大温差的影响。

- 在仿真模型中考虑树脂固化反应产生的内热源。张铖<sup>[11]</sup>、白光辉等<sup>[12]</sup>采用 CFX 软件分析热压罐内模具与制件温度场,其中考虑了复合材料参数随固化度、温度的变

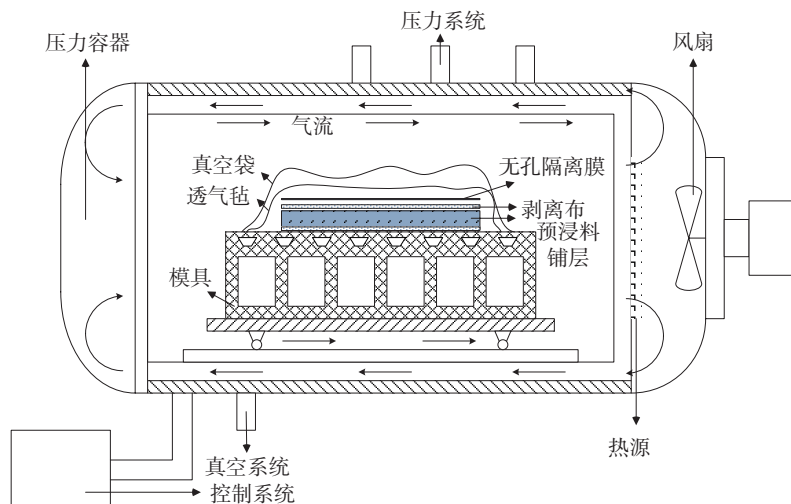


图1 复合材料热压罐成型工艺原理

Fig.1 Composite autoclave molding process principle

化,给出的部分试验数据表面数值模拟的预测误差在 10% 左右。Xie 等<sup>[13]</sup>针对  $\phi 2.5\text{m} \times 7\text{m}$  热压罐,采用  $1.8\text{m} \times 1.5\text{m} \times 0.3\text{m}$  的框架式结构,蒙皮尺寸为  $1.6\text{m} \times 1.3\text{m} \times 0.01\text{m}$ ,同时考虑吸胶材料和多孔聚四氟乙烯对传热的影响,分析工艺过程不同阶段的最大温差,对比 3 种升温速率情况下的最大温度偏差。Laurent 等<sup>[14]</sup>采用 CFD-ACE+ 软件分析热压罐内模具温度场,其中上海飞机制造有限公司(SAMS)设计的热压罐工作原理区别于传统热压罐气体传递方式,SAMS 热压罐通过罐体底部通道和 H 型流量调节通道,减少了气体扰流区域,提高罐内空间利用率,并针对空罐、含工装和 C 型筋条的有载状态进行了温度场仿真。陈飞等<sup>[15]</sup>介绍了热压罐工艺仿真软件 COMPRO,以某翼梁样件在制造过程的变形为例,选择翼梁根部和尖端的横截面进行 2D 有限元建模,分析了结构参数、树脂性能参数等对固化变形的影响,并指出固化收缩率、界面以及固化动力学影响回弹较大,缘条-腹板夹角  $90^\circ \sim 120^\circ$  区间内,数值模拟与试验样件的回弹角大约存在 25% 的差异。王翔<sup>[16]</sup>介绍了 ESI 公司热压罐工艺仿真方案,给出了 L 型件固化变形云图,但未见到关于工程应用实例。

深入分析热压罐内温度场模拟中研究对象的结构特点可知,热压罐罐体尺寸在米量级,而工装框架厚度为毫米量级,同时复合材料构件属于典型的大长厚比结构(通常厚度在毫米量级,平面尺寸在米量级),而高质量的计算网格通常要求单元的边长比例不能太大, $10^2 \sim 10^3$  倍的长厚尺寸差异对数值模拟用网格剖分提出很大挑战,高质量网格剖分难度大,计算耗时长,并且对网格剖分人员的技术水平提出更高要求。笔者对热压罐内仿真模拟研究发现:从 CATIA 软件输出的框架式模具需

要大量的几何修复才能获得满足数值仿真计算要求的几何模型并完成网格剖分,热压罐及框架式模具的网格模型如图 2 所示,其中热压罐尺寸为  $\phi 2.0\text{m} \times 6\text{m}$ ,框架式模具约  $2.0\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.6\text{m}$ ,厚度约 10mm,剖分得到约 1 千万非结构化网格,采用 DELL 八核服务器( $2 \times \text{xeonE5620}$ ,主频 2.4G),将计算模型分为 8 个进程并行计算,完成中温固化树脂体系的工艺时长的仿真,每次计算耗时为 50h。同时,流体计算软件仅能完成热场分析,无法集成复合材料固化成型过程树脂流动与纤维密实、固化变形等分析模块,因此,提高仿真计算效率,实现 CATIA 模型、热压罐内流场传热分析、复合材料构件内热化学及树脂流动/纤维密实分析模块之间数据传递是亟待解决的重要问题。

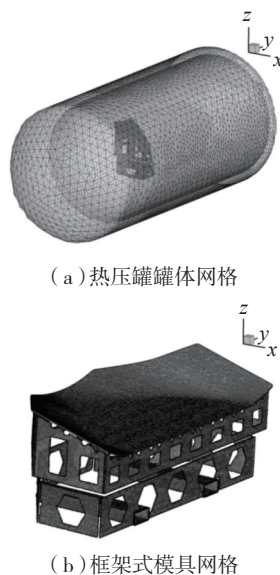


图2 热压罐罐体网格和框架式模具计算网格

Fig.2 Autoclave grid and frame type mold computing grid

## 2 纤维与树脂复合体系传热与固化反应行为

纤维与树脂复合体系固化成型过程中,材料温度和树脂固化反应直接影响材料内部应力、孔隙缺陷等发展并最终影响复合材料构件成型质

量,而其内部温度主要取决于树脂固化反应放热、外部热源以及多相材料之间热量交换,树脂固化反应放热与热传导模型通过固化动力学模型建立联系。以 Loos 和 Springer<sup>[17]</sup>提出的修正 Fourier 热传导模型为基础,国内外学者已开展了大量研究工作,其中假设纤维与树脂复合材料体系为多孔介质,基于均匀化理论,采用傅里叶热传导模型和树脂固化反应动力学模型,如公式(1)和(2)所示。

$$\frac{\partial(\rho_c C_c T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_r (1 - V_f) \dot{H}, \quad (1)$$

式中,  $T$  为绝对温度,  $V_f$  为纤维体积分数,  $C_c$  为复合材料比热容,  $k_x, k_y, k_z$  为材料坐标系下复合材料导热系数,  $\rho_r$  为树脂密度,  $\rho_c$  为复合材料密度,  $\dot{H}$  为反应热效速率,与固化反应速率有关,  $\dot{H} = H_u d\alpha/dt$ ,  $H_u$  为树脂总放热量。

以 Kamal 动力学模型为例,描述树脂固化历程,其模型为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A e^{-\frac{E}{RT}} \alpha^m (1 - \alpha)^n, \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为固化度,  $A$  为指前因子,  $E$  为反应活化能,  $m$  和  $n$  为反应级数,  $R$  为气体常数。

由上述公式可知,树脂的固化反应与温度、时间历程有关,同时,树脂固化反应放热引起材料内部温度变化,温度与固化度之间具有非常强的动态耦合关系。另外,树脂的固化反应放热引起树脂状态变化,纤维与树脂复合体系的热物理参数比热容、导热系数、密度与温度、固化度相关,使得热化学模型具有很强的非线性,给模型的求解带来一定的困难。

Bogetti<sup>[18]</sup>和 Kinesey<sup>[19]</sup>等采用有限差分方法建立了复合材料层板的二维固化模拟系统,计算平板、L 型板和变厚度层板的固化过程。Park

等<sup>[20]</sup>用有限元单元模拟了复合材料三维固化过程,模拟结果与文献试验数据较为吻合。Cheung 和 Yu 等<sup>[21]</sup>采用有限元方法模拟了平板和曲线形状构件三维固化过程,模拟结果与文献试验数据吻合较好。Guo 等<sup>[22]</sup>模拟 T300/HD03 体系固化过程中的温度场,用通用有限元软件包求解一维瞬态热传导模型,考查了模具与辅助材料等对温度场的影响,计算的层板上下表面和中心点的温度与试验数据吻合较好,指出考虑热力学参数对温度和固化度的依赖性以及树脂流动的影响,会进一步提高模型预测精度。孙晶<sup>[23]</sup>针对 U 型结构单元的热传导/树脂固化反应过程进行仿真,分析模具、材料参数对温度分布的影响。综上所述,纤维与树脂复合体系热传导/固化反应行为的研究较多,但材料体系仍有较大局限性,且通常采用文献中材料体系的热物理参数,如 AS4/3501-6。因此,工艺仿真数据库的建立和完善对于热传导/固化反应仿真技术在大型制件和新材料体系研究应用中具有重要的意义。

### 3 纤维与树脂复合体系传质与传压行为

复合材料热压成型过程中,在压力作用下纤维与树脂复合体系内树脂发生流动并引起纤维堆积状态的变化即树脂流动/纤维密实,树脂的流动以及树脂承载压力大小直接影响孔隙的形成、生长和迁移,纤维体积分数,富树脂区形成以及构件的最终尺寸等,是决定复合材料成型质量的关键。树脂流动/纤维密实模型用于描述复合体系内树脂渗流的流动状态和历程以及纤维堆积和排列状态的变化。根据理论假设的不同,发展和应用比较成熟的树脂流动/纤维密实模型主要包括 Springer 波浪式密实模型<sup>[17]</sup>和 Gutowski 渐进式密实模型<sup>[24]</sup>。波浪式密实模型假设垂直纤维轴向符合达西渗流定律,

平面内只考虑平行纤维方向的树脂流动并视为管流运动,同时模型没有考虑纤维和树脂所承担载荷的不同,与实际情况不完全相符。Gutowski 等<sup>[25]</sup>将有效应力原理和 Boit 固结理论用于复合材料热压成型预浸料叠层的固结过程,其中纤维和树脂共同承担外界载荷,将未密实的复合材料视为浸满粘性流体的非线性弹性多孔介质,并认为连续纤维复合材料的密实中包括两个重要过程:(1)多孔介质中树脂的流动;(2)多孔介质的变形。在初始阶段纤维多孔介质骨架尚未发生形变,所施载荷完全由树脂承担,随着树脂的流出,多孔介质被压缩,纤维逐渐靠近直到受压迫变形而产生弹力,此时纤维承担部分载荷,同时树脂承载压力减小。随着多孔介质被继续压缩,纤维承担负荷的比例越来越大,树脂承载压力越来越小直至为零,即渐进式密实模式。针对复合体系厚度方向的流动,Gutowski 和 Davé 采用试验方法对树脂流出质量和层板厚度进行验证并吻合较好<sup>[25-26]</sup>。为了揭示树脂基复合材料热压成型过程外加荷载与树脂流动驱动力之间的相互关系,国内学者对铺层内纤维承载及压力分配机制开展了在线监测的试验研究。在测量纤维承力方面,主要采用光纤微弯原理测试增强纤维构成的网络所承担的压力变化,如扎姆阿茹娜、王科等<sup>[27]</sup>;在树脂承压方面,Smith<sup>[28]</sup>在纤维层中铺放片状压力传感器对树脂压力进行定性研究,Lynch 等利用液体不压缩特性的传递压力作用,研制了一种测量准静态树脂压力的传感器,并对 AS4/3501-6 等厚层板厚度方向不同位置的树脂压力进行了多点测量<sup>[19]</sup>。顾轶卓等<sup>[29]</sup>根据液体传递压强的特性建立一种适用于复合材料热压成型工艺的树脂压力测试系统,可进行多点的实时检测,并以等厚层板为例,采用树脂压力和纤维承压在线测试方法,验证

了热压成型过程渐进式密实模式的适用性。

在 Gutowski 模型基础上,许多学者对树脂流动/纤维密实过程进行了模拟研究<sup>[30-33]</sup>,分析方法包括有限差分方法、有限体积方法、有限单元方法,早期以等厚层板内厚度方向一维流动/密实为主,而实际应用中复合材料制件结构复杂,其中曲率突变是复合材料制件中最典型的一种几何特征,在飞行器复合材料梁、肋、筋条、弯角接头等结构中最为常见。复合材料曲面制件的热压成型过程比平板复杂得多,曲面制件除了厚度方向的压缩,还会产生剪切变形,而复合材料具有明显各向异性,使得树脂流动与纤维密实研究非常复杂。此外,带曲率结构热压罐成型工艺往往采用辅助模具,因此,温度和压力传递要比等厚层板热压机工艺环境复杂得多,树脂流动/纤维密实行为模拟难度更大。一些研究以 L 形层板为例,建立二维树脂流动/纤维密实过程数值模拟方法,但未考虑拐角区模具及辅助材料对压力传递的影响<sup>[33-37]</sup>。贺鹏飞等通过试验研究发现,带曲率制件存在较明显的厚度不均和纤维体积分数分布不均匀现象,拐角区出现富树脂或孔隙等缺陷,而加压时机、平板长度、铺层方式等对层板密实状况以及缺陷均有显著影响,而孔隙、纤维分布不均会导致局部应力集中、影响固化变形和力学性能<sup>[38-40]</sup>。除了 L 形曲面制件,邓火英等<sup>[41]</sup>对热压罐变厚度层板缺陷进行了研究,发现由于树脂的二维流动、纤维的滑移和结构的不对称性使得厚度梯度区以及附近区域容易产生纤维分布不均、富树脂、孔隙和分层缺陷。Stanley 等<sup>[42]</sup>试验研究了铺层角度、梯度位置、压力均匀性及成型方法对变厚度层板中波纹缺陷的影响。当复合材料构件结构形式复杂后,模具材料与配合等问题使热、压力在多相材料体系之间传递和相互作用更加

复杂,构件质量更难控制。孙晶建立考虑预浸料铺层/模具相互作用的带曲率复合材料结构热压过程数值模拟方法,分析了L形层板热压罐工艺过程不同类型模具与复合材料层板的相互作用,并采用树脂压力测试系统对热压罐内L形复合材料层板拐角和平板位置的压力变化进行了研究,验证了金属阳模/硅橡胶阴模成型L形层板时拐角区树脂压力小于平板树脂压力,揭示了模具对于压力传递的影响<sup>[43]</sup>。王雪明<sup>[44]</sup>分析了不同模具配合方案对T型筋条拐角区成型质量的影响以及复杂结构形式对复合材料构件缺陷的影响。综上所述可知,目前,树脂流动/纤维密实过程数值模拟研究主要集中在典型结构单元热压成型过程仿真,其在复杂工程结构中的应用还有待开展和验证。此外,纤维与树脂复合体系固化工艺过程中,热载荷促使树脂发生固化反应并改变其流动性,力载荷引起树脂流动、纤维多孔介质变形等,因此,工艺历程中纤维与树脂复合体系材料特性粘度、渗透率、压缩特性等具有温度、压力依赖性,同时,与材料类型、铺层方式、纤维含量等密切相关。目前,许多情况下研究者直接引用文献的数据或经验方程,或在某一个范围内取值,而新材料体系或新结构形式复合材料成型过程的工艺仿真,依赖于准确的材料参数。

## 结束语

在复合材料热压罐成型工艺中热和压力在多相材料体系间复杂的相互作用,使得复合材料构件成型质量控制难度大,制造成本高。在工艺过程物理化学作用机理研究基础上,建立数值模拟方法可有效指导工艺、工装的设计与优化。已有的研究工作往往针对复合材料构件的典型结构单元进行传热、传压数值模拟分析,发展大型复合材料构件的热压罐成型固化全过程、多物理场、多材料

体系的高效计算方法,实现从工程应用的CATIA数模向数值模拟用几何模型、材料属性等的传递以及多物理场之间网格数据和场参数的传递与集成,建立基于数据库、知识库的工艺、工装方案快速评价方法,是实现新材料或新复合材料构件高质量快速研制的关键,也是复合材料热压罐成型固化仿真技术的研究方向。

## 参考文献

[1] 赵渠森. 先进复合材料手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003.  
ZHAO Qusen. Advanced composite materials handbook[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.

[2] 李艳霞. 先进复合材料热压流动/压缩行为数值模拟与工艺质量分析[D]. 北京:北京航空航天大学,2008.  
LI Yanxia. Numerical simulation and process quality analysis of flow/compression behavior of advanced composite materials during hot pressing process [D]. Beijing: Beihang University, 2008.

[3] CHARLES R. Accelerated insertion of materials-composites[J]. AIAA, 1998, 153(13):197.

[4] 李薇,杨楠楠,高大伟. 数字化技术在复合材料构件研制中的应用与研究[J]. 航空制造技术, 2006(3):32-37.  
LI Wei, YANG Nannan, GAO Dawei. Research and application of digital technology in development of composite material component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(3): 32-37.

[5] 高玉峰,屈春花. 热压罐热-流耦合数值仿真分析[J]. 工业炉, 2012,34(4):37-39.  
GAO Yufeng, QU Chunhua. Numerical analysis of coupling heat-flow during autoclave[J]. Industrial Furnace, 2012,34(4): 37-39.

[6] 张旭生,甘忠,张海燕. 热压罐时效成形模具温度场优化研究[J]. 中国制造业信息化, 2011,40(19):30-37.  
ZHANG Xusheng, GAN Zhong, ZHANG Haiyan. Research on optimization of mold temperature fields in autoclave age forming[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2011,40(19): 30-37.

[7] 林家冠,杨睿,王延霞,等. 大型复合材料构件热压罐成型温度分析与均匀性改

善研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(5): 61-65.  
LIN Jiaguan, YANG Rui, WANG Yanxia, et al. Large-scale composite curing temperature analysis and improvement in autoclave process[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(5): 61-65.

[8] 李彩林. 复合材料热压罐固化设计的数值模拟[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(11): 26-29.  
LI Cailin. Numerical simulation for autoclave curing design of composite materials[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(11): 26-29.

[9] 傅承阳. 飞机复合材料制件热压罐成型温度场模拟与改善方法[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.  
FU Chengyang. Temperature field simulation and improvement method of aircraft composite parts in autoclave process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013.

[10] 贾云超,关志东,李星,等. 热压罐温度场分析与影响因素研究[J]. 航空制造技术, 2016(1/2): 90-95.  
JIA Yunchao, GUAN Zhidong, LI Xing, et al. Analysis and influence factors of temperature field in autoclave[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(1/2): 90-95.

[11] 张铖. 大型复合材料结构热压罐工艺温度场权衡设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.  
ZHANG Cheng. Curing temperature field tradeoff design method of large-structure in autoclave process[D]. Harbin :Harbin Institute of Technology,2009.

[12] 白光辉,曼冬秀,张冬梅,等. 大型复杂框架式模具温度场模拟[J]. 复合材料学报, 2013,30(12):169-174.  
BAI Guanghui, YAN Dongxiu, ZHANG Dongmei, et al. A study on the temperature field distribution property of large frame type molds[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013,30(12): 169-174.

[13] XIE G N, LIU J, ZANG W H, et al. Simulation and improvement of temperature distribution of framed mould during the autoclave composite curing process[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2013, 22(1):43-61.

[14] LAURENT D, JIA L, WEI R, et al. Prediction of autoclave curing of aeronautical composites part and of resulting spring-in through ESI composites simulation solution[C]//20th International Conference on Composite Materials

Copenhagen, 19–24th July, 2015.

[15] 陈飞, 王健. 基于 COMPRO 模型的复合材料热压罐成型工艺仿真[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(1): 41–46.

CHEN Fei, WANG Jian. Curing simulation of composites autoclave forming based on COMPRO model[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(1): 41–46.

[16] 王翔. 热压罐工艺仿真技术[J]. 航空制造技术, 2011(20): 23–25.

WANG Xiang. Simulation technology of autoclave process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(20): 23–25.

[17] LOOS A C, SPRINGER G S. Curing of epoxy matrix composites[J]. Journal of Composite Materials, 1983, 17(2): 135–151.

[18] BOGETTI T A, GILLESPIE J W. Two-dimensional cure simulation of thick thermosetting composites[J]. Journal of Composite Materials, 1991, 25(3): 239–273.

[19] KINESEY S P, HAJI-SHEIKH A, LOU D Y S. A thermal model for cure of thermoset composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1): 442–449.

[20] PARK H C, SUNG W L. Cure simulation of thick composite structures using the finite element method[J]. Composite Materials, 2001, 35(3): 188–201.

[21] CHEUNG A, YU Y, POCHIRAJU K. Three-dimensional finite element simulation of curing of polymer composites[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 40(8): 895–912.

[22] GUO Z S, DU S Y, ZHANG B M. Temperature field of thick thermoset composite laminates during cure process[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(3): 517–523.

[23] 孙晶. 带曲率复合材料热压成型压实过程理论与实验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2013.

SUN Jing. Investigation on layer movement and forming quality of angle-shaped composite materials during autoclave process[D]. Beijing: Beihang University, 2013.

[24] GUTOWSKI T G, MORIGAKI T, CAI Z. The consolidation of laminate composites[J]. Journal of Composite Material, 1987, 21(2): 172–188.

[25] GUTOWSKI T G, CAI Z, KINGERY J, ET AL. Resin flow/fiber deformation experiments[J]. SAMPE Quarterly, 1986, 17(4): 54–58.

[26] DAVÉ R, KARDOS J L, DUDUKOVIC M P. A model for resin flow

during composite processing: part 1—general mathematical development[J]. Polymer Composites, 1987, 8(1): 29–38.

[27] 扎姆阿茹娜, 张佐光, 王科, 等. 复合材料热压成型过程用光纤压力测试技[J]. 复合材料学报, 2004(1): 45–50.

HAMU Aruna, ZHANG Zuoguang, WANG Ke, et al. Optical fiber pressure testing technology used in cure molding process for polymer matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004(1): 45–50.

[28] SMITH G D. Modeling and experimental issues in the processing of composite laminates[D]. Vancouver: The University of British Columbia, 1992.

[29] 顾轶卓, 张佐光, 李敏. 复合材料热压成型过程的树脂压力测试系统[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 23–27.

GU Yizhuo, ZHANG Zuoguang, LI Min. Resin pressure measuring system for hot pressing process of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 23–27.

[30] BATES P J, TAYLOR D, CUNNINGHAM M F. Compaction and transverse permeability of glass rovings[J]. Applied Composite Materials, 2001, 8(3): 163–178.

[31] CHEN B X, LANG E J, CHOU T W. Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding[J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 317(1–2): 188–196.

[32] ROBITAILLE F, GAUVIN R. Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing I: Review of experimental results[J]. Polymer Composites, 1998, 19(2): 198–216.

[33] ROBITAILLE F, GAUVIN R. Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing II: Compaction and relaxation of dry and H<sub>2</sub>O-saturated woven reinforcements[J]. Polymer Composites, 1998, 19(5): 543–557.

[34] ARMER J D, COVERT E E. Thermal conductivity of a thermosetting advanced composites during its cure[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1996, 10(3): 467–475.

[35] CIRISCIOLI P R, WANG Q, SPRINGER G S. Autoclave curing comparisons of model and test results[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(1): 90–102.

[36] KAMAL M R. Thermoset characterization for moldability analysis[J]. Polymer

Engineering and Science, 1974, 14(3): 231–239.

[37] SCOTT E P, BECK J V. Estimation of thermal properties in epoxy matrix/carbon fiber composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(1): 132–149.

[38] 贺鹏飞, 刘建萍, 戴瑛, 等. 纤维不均匀分布对单向纤维增强复合材料横向拉伸强度的影响[J]. 机械工程材料, 2000, 24(1): 8–10.

HE Pengfei, LIU Jianping, DAI Ying, et al. Influence of uneven distribution of the fibers in the matrix on the transverse tensile strength[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2000, 24(1): 8–10.

[39] 杨进军, 张佐光, 李敏, 等. 纤维分布均匀性对 T300/BMP316 复合材料层压板力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 22–27.

YANG Jinjun, ZHANG Zuoguang, LI Min, et al. Effect of fiber distribution uniformity on the mechanical properties of composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 22–27.

[40] RADFORD D W. Volume fraction gradient induced warpage in curved composite plates[J]. Composites Engineering, 1995, 5(7): 923–934.

[41] 邓火英, 顾轶卓, 李敏, 等. 热压成型变厚度层板缺陷研究[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(6): 65–69.

DENG Huoying, GU Yizhuo, LI Min, et al. Defects of variable thickness laminates in autoclave process[J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(6): 65–69.

[42] STANLEY J N, STEVE J C, SCOTT L. Identifying marcelling parameters of thick linear tapered laminates in a closed-mold curing process[J]. Engineering Village, 1999, 44(1): 167–173.

[43] SUN J, LI Y X, LI M, et al. Numerical study on effects of interaction between rubber mould and lay-up on consolidation of L-shaped laminates in autoclave process[J]. Polymers and Polymer Composites, 2011, 19(4–5): 271–278.

[44] 王雪明. 复合材料构件制造缺陷统计分析与 T 形结构整体成型规律研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.

WANG Xueming. Statistical analysis for manufacturing defects of composite components and investigation on integral molding rules of T-shaped structures[D]. Beijing: Beihang University, 2009. (下转第 86 页)