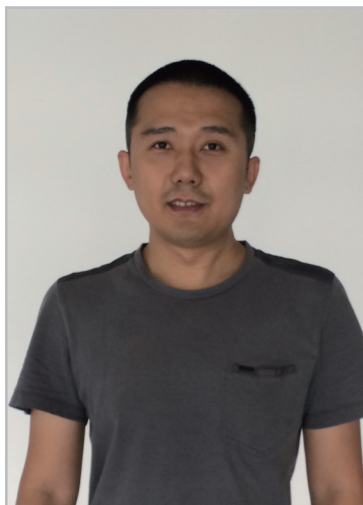


复合材料设计制造一体化中的 固化变形预报技术

Prediction of Curing Deformation in Integrated Design and Manufacture of Composites

· 北京航空航天大学材料科学与工程学院 唐占文 张博明



唐占文

现就读于北京航空航天大学,材料科学与工程学院博士后。主要研究领域为复合材力学性能表征与强度分析、多尺度力学分析模型研究、复合材料失效/损伤分析与表征、复合材料结构固化变形预报。

先进树脂基复合材料是适应航空、航天等高科技领域的需要而发展起来的一种高性能复合材料,它具有轻质、高强度和可设计性等优越性能。整体化成型技术是复合材料设计制造一体化中的关键技术,是减少零件和紧固件的数目、减轻结构重量、降低生产成本、装配成本的一个有效途径。复合材料材料设计和结构设计,材料成型和构件成型是同时

复合材料结构固化变形预报是设计制造一体化中的一项关键技术,可以指导模具与工艺参数设计、结构概念与细节设计,进行可制造性评价。国内外学者专家经过多年的研究,目前理论分析方法已经比较完善。

一次完成、不可分开的,充分地体现了复合材料整体成型结构的设计制造一体化的特点。整体化成型的复合材料结构件,其固化变形问题贯穿整个设计和制造过程,结构越大、整体化程度越高,固化变形的影响越严重,所以复合材料结构的固化变形预报技术是现代复合材料结构设计与制造一体化中的重要研究内容。

复合材料固化变形预报技术可以指导模具与工艺参数设计、结构概念与细节设计、进行可制造性评价。目前的预报技术存在一定的不足,或是方法考虑了复杂的过程变量与化学反应等因素,虽然从原理上更加符合实际情况,但是这些复杂的模型并不便于工程应用,因为模型需要大量的输入参数(这些参数需要由大量的复杂试验来提供),导致模型使用

的周期很长;或是模型过于简单,考虑的因素很少,虽然计算效率很高,但是实际的指导意义并不大。所以,针对复合材料的设计制造一体化,工程上更加希望采用一种标准化、规范化、工程化的复合材料结构预报技术。

国内外研究概况

复合材料在热固化成型过程中由于材料本身的各向异性、基体的固化收缩效应以及工艺过程引起的材料分布梯度等因素,结构内部将不可避免地产生残余应力,进而引起复合材料结构件在脱模后产生回弹变形以及翘曲变形,使构件在室温下的自由形状与预期的设计形状存在一定的差异,即产生固化变形。固化变形会增加制造成本和装配难度。变形

的产生对零件外形精度和构件的连接匹配产生极为不利的影响,在装配时会引起附加残余应力、密封性差等问题,导致制件的结构强度和疲劳寿命降低,甚至造成制件报废。

引起复合材料变形的因素有多种,主要包括:构件的结构形式、铺层方式及取向、固化时间及温度、固化压力分布及树脂流动、随温度变化的材料力学性能、固化反应放热、化学收缩、纤维体积含量、固化工艺参数、模具因素等。

1 固化变形的影响因素与机理研究

(1)外热源:成型工艺过程中复合材料构件的一端与框架式模具的型面直接接触,模具型面温度分布会影响构件的固化过程。P.Salagnac等^[1]人模拟研究了热压罐内的气体流动及温度分布情况,张斌、王永贵等^[2]研究了热压罐内高温流动气体的作用下框架式模具的温度场分布情况。大多数的研究者采用傅里叶热传导控制方程描述复合材料固化过程中的热传导,只是问题的求解方法和模型的复杂程度不同而已。Twardowski等^[3]忽略了热压罐内的对流传热,采用简单的一维模型描述复合材料层合板厚度方向的热传导现象,模拟了复合材料厚度方向上的温度场分布。Costa等^[4]采用了二维平面模型描述了复杂轮廓型面复合材料结构件内部的热传导现象,得到了二维温度场的分布。谭华等^[5]采用三维模型模拟了形状复杂的大型复合材料结构件内部的热传导现象,得到了复合材料结构件内部三维温度场的分布。

(2)模具因素:金属模具与复合材料之间的热膨胀系数不匹配导致了模具与复合材料构件之间的相互作用,在该相互作用下构件出现了固化变形,表现在2个方面:①模具和复合材料热传导系数差异引起的层合板内温度分布梯度;②模具和复合材料热膨胀系数差异而引起的

应力梯度。Wiersma^[6]研究阴/阳模具对固化变形的影响,研究了拐角处压缩厚度的差异对变形的影响。Ramford和Rennick^[7]观察到模具角半径越大,其对变形的影响越小。Twigg等^[8]使用应变片实验研究并理论分析了模具与复合材料的相互作用。Satish等^[9]在数值模拟的模型中建立剪切层来代替模具对复合材料的作用。柔性模具是热压罐整体化成型工艺中一个重要的辅助模具,应用也很广泛。哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所的张宁等实验研究了橡胶软模的压力传递情况^[10]。

(3)铺层方式:由于纤维和基体的线膨胀系数不同,一般材料的向线膨胀要远远大于纵向线膨胀则远小于纵向模量。因此,温度改变引起的每层的热膨胀和铺层方式关系密切。非对称铺层复合材料叠层板固化后产生变形的主要原因是层压板材料的各向异性。层压板由树脂基体和增强材料两种材料组成,树脂基体各向同性而增强纤维是各向异性,最终导致层压板是各向异性的。一般认为,树脂基体和增强纤维的热膨胀系数不同导致热固化过程中,不同铺层方向,热膨胀不一致而产生翘曲。实际中复合材料铺层纤维的取向与设计取向之间会存在差异(称为铺层取向误差),由于这种误差破坏了原始结构的对称性,常导致层合板固化后发生变形。

(4)树脂收缩:同时,一些研究者对热压罐成型工艺考虑树脂收缩作用的残余应力分析进行了大量的研究工作,认为固化过程中树脂的化学收缩不能忽略,其中,国外的Holmberg^[11]通过对碳/环氧复合材料系统试验,得知化学收缩对变形有着重要影响。Prasatya^[12]模拟计算得到三维环氧树脂的化学收缩对残余应力的产生的影响程度占30%以上。而后,Karkkainen等^[13]研究了

3501-6树脂固化过程中的热膨胀和化学收缩。发现热膨胀系数(CTE)保持常数,化学收缩和固化度成线性关系。Liu^[14]等的试验研究发现受层板铺设方式的影响,化学收缩导致的残余应力为最终残余应力的2%~22%。Yoon和Kim^[15]研究了热变形和化学收缩对L型层板工艺诱导扭曲的影响。模型以经典层合理论为基础,预测了热膨胀系数和化学收缩变化时层板的扭曲,发现热膨胀系数和化学收缩应变的差异是异型截面层板变形的主要来源。

(5)固化制度:固化温度、固化压力、升温速率和对流换热系数是控制复合材料工艺成本和成型质量的关键参数。Jung等^[16]研究表明,随着固化温度的提高,复合材料层合板的变形增大,残余应力和变形会随着固化温度的增加而增加。升温速率和对流换热系数对构件的树脂分布几乎没有影响,其主要通过改变固化过程中层合板的峰值温度影响回弹变形。峰值温度会随升温速率的提高而提高,随对流传热系数的提高而降低。峰值温度越高载荷越大,由此产生的固化变形也越大。因此,峰值温度的提高相当于增加了温度载荷,故回弹变形随之增大。Sarrazin^[17]、White、Hahn、郭兆璞、陈浩然等^[18]发现较低的降温速率会减小变形量,较低的降温速率能够增加应力松弛的效果。固化压力对构件的峰值温度几乎没有影响,主要通过改变树脂含量来影响最终的构件回弹变形。

(6)压力分布与树脂流动:热压罐固化过程中,树脂流动对残余应力的生成及变形有着重要影响,由于压力分布不均匀导致压实不均匀,使各部分树脂含量不同,另外,吸胶材料用量的不准确使得层板在厚度方向上存在不均匀的树脂分布。固化过程中一般是单面吸胶,树脂有沿层板厚度方向流向吸胶层

的趋势。导致上表面铺层具有贫树脂现象(纤维含量高),下表面铺层具有富树脂现象(纤维含量低),层板厚度方向纤维含量呈梯度变化,随着层板厚度的增加,这种差异渐趋明显。由于低纤维体积分含量铺层热膨胀系数(CTE)比高体积分含量铺层高,降温过程下表面铺层的收缩大于上表面,导致脱模后产生变形。随着零吸胶树脂体系应用的增加,这种树脂分布的不均匀性得到一定的改善,但对于有曲率的零件,会在曲率较大的地方形成压力梯度,导致不均匀的树脂流动,造成变曲率区域树脂的增加或减少,甚至造成贫脂区和富脂区,这种不均匀性也会影响零件的回弹变形。

(7)结构各向异性:Radford和Rennick^[19]针对L型构件在考虑了树脂化学收缩作用下给出了回弹变形角的解析表达式。戴棣等^[20]采用平面应变有限元模型模拟计算单曲面厚壁复合材料层合构件的固化变形。英国哥伦比亚大学的Fernelund等^[21]研究了C型和L型构件的固化变形,指出构件变形与固化制度、固化模具、构件的几何形状及铺层有着密切的关系。国内的李君、姚学锋等^[22]建立了理论分析模型研究T型整体化结构的固化变形,结果表明在导致T型整体化结构固化变形的因素中模具与复合材料之间热不匹配导致的相互作用是仅次于复合材料固化收缩和热膨胀的主要因素。

(8)纤维体积分含量:纤维体积分数的变化影响材料的弹性性能和热性能。Wiersma^[23]采用弹性模型考虑了L型复合材料工件的纤维体积分数改变对工件变形的影响。通过实验,Sung和Hilton^[24]观察到纤维体积分数影响固化过程最大放热温度和固化度。Loos、Twardowski、Bogetti^[25]研究了纤维体积分含量对固化反应放热的影响。纤维体积分数降低意味着复合材料单位质量固化放热量和

层合板中放热峰值的增加。这些都会导致应力分布的梯度,进而产生工件变形。另一方面是纤维和集体分布的不均匀性,即纤维体积分数的梯度分布。这种不均匀性尤其是在厚度方向上的对残余应力和变形的影响更大。北京航空制造工程研究所的杨进军^[26]研究了纤维分布对复合材料固化变形的影响,提出了纤维分布不均匀度的表征参数,发现复合材料的固化变形随着纤维分布不均匀度增加而增大。

2 固化变形的预报方法与模型

针对复合材料成型过程的变形问题很多学者结合多种机理建立了相应的模型。White等^[27]人将固化动力学与残余应力模型集合起来建立了LamCure模型该模型,适合对较薄的层板进行二维分析,但模型不具备热分析的能力。Bogetti等^[28]建立了热传导与固化动力学的耦合模型,与LamCure模型一样均未考虑模具的相互作用以及树脂流动。Johnston等^[29]开发的COM-PRO模型考虑了固化收缩、热膨胀系数不匹配、模具作用以及压力与树脂流动的关系。国内郭战胜等^[30]建立了粘弹性模型,并利用有限元方法对构件残余应力和固化变形进行分析。李君等^[31]建立了T型整体化结构翘曲变形预测模型,考虑了树脂固化放热、固化收缩、材料热膨胀系数各向不一致等因素。张纪奎等^[32]建立了复合材料固化过程数值模拟和固化变形预测的三维有限元分析模型。王晓霞^[33]给出了简化的固化动力学方程,建立了热-化学耦合计算模型,实现了复合材料的温度场和固化度场联立求解,模型能够模拟伴随固化反应热效应和凝胶效应的树脂固化过程。

面向工程的固化变形预报模型

在研究复合材料结构件的固化变形预报过程中,北京航空航天大学

的张博明提出了面向工程的多层次固化变形预报方法。复杂结构的固化变形计算以简单结构的固有结论为基础展开,结构不断复杂,不断考虑新的影响固化变形的因素到模型中,形成适应不同结构层次和工艺条件的预报方法。对于不同结构层次的复合材料结构,降温收缩、化学收缩和模具影响这三个因素所占的比例是不同的,在实际计算过程中,可以保留主要因素、忽略次要因素,保证计算精度的同时简化计算。针对加筋壁板或者更加复杂的结构,必须考虑不同成型工艺对复合材料固化变形的影响,提出了基于应力传递模型的预报方法,将成型工艺考虑进入复合材料的固化变形预报模型。之后简要介绍了固化变形分析中常用到的固化收缩率、固化过程模量和热膨胀系数的测量方法。最后,给出了几种面向工程应用的半经验简化模型。

1 大型复杂结构变形多层次预报模型

如图1所示,为大型复杂结构变形多层次预报模型。

(1)第1模块——考虑树脂降温收缩。该模块仅考虑降温过程引起的变形,未考虑树脂的化学收缩作用。输入参数仅需铺层信息与单向板固化后模量和热膨胀系数数据(也可采用随温度变化的材料性能),计算时间短,基本预报误差达到30%左右。

(2)第2模块——考虑树脂化学收缩。在第1模块的基础上,该模块又增加了树脂的化学收缩的影响,引入了树脂化学收缩产生的残余应力。输入参数与第1模块相比增加了树脂(或预浸料)固化收缩率,计算时间略有增加,但是基本预报误差可以达到20%左右。

(3)第3模块——考虑模具作用。如表1所示为第3模块模型描述,与第2模块相比,该模块又增加了模

具的影响,建立了复合材料构件与模具的相互作用,输入参数增加了模具的材料属性(或是简化后剪切层的材料属性),计算时间增加,基本预报误差进一步提高,可以达到 15% 左右。

(4)第 4 模块——采用光纤光栅直接测量获得初始变形场。该模块与第 3 模块相比,功能相同,但是输入量却简化了很多。该模块主要的设计思想是采用试验手段(可以采用光纤光栅传感器)来获得固化残余应力场及变形场(直接作为模型的输入),来简化繁琐的模型输入参量。基本预报误差可以达到 15% 左右。

(5)第 5 模块——“分阶段固化”变形预报。如表 2 所示,该模块主要针对实际中的分阶段固化工艺的固化变形问题提出的,采用合理的约束条件,考虑了先固化结构件存在不可恢复的化学收缩变形,采用应力传递模型来预报整体结构的变形。计算过程比较复杂,基本预报误差可以达到 20% 左右。

2 预报模型中材料性能的获取

(1)固化收缩率的测量。将试件(例如单向预浸料)夹在 2 块铝片之间,使用 TMA 测定其随固化温度历程的厚度变化。通过空白对照,将相同的 2 块铝片叠在一起,测定空白样随固化温度历程的厚度变化,此过程已经去除了温度的影响,最后通过线性拟合得到固化收缩率,如图 2 为预浸料线收缩率和固化温度随时间变化图。

(2)固化过程模量的测量。固化过程可以分成 3 个阶段,阶段 A:加热使树脂软化流动,固化反应提高模量,材料的玻璃化转变温度远低于环境温度,模量值为 0。阶段 B:材料开始出现凝胶,温度逐渐升高,模量值在 B 区域的起点均为 0,终点可由 C 阶段的起点确定。阶段 C:预浸料固化完全,且温度高于环境温度,仅考虑温度对材料模量的影响。通过试验测得复合材料的弹性模量随

温度变化见图 3。

(3)热膨胀系数的测量。要获得由固化温度载荷下材料热变形导致的残余应力及固化变形,必须首先确定复合材料的有效热膨胀系数。由于预浸料的固化过程中伴随着固化体积收缩,因此固化过程中的热膨胀系数不能直接测定,通常采用固化后的热膨胀系数值。首先采用热压罐工艺成型 6mm 厚的单向板,沿纤维方向(垂直纤维方向)截取

6mm × 25mm 样品,用热膨胀仪进行热膨胀系数测定,测试结果如图 4 所示。

3 面向工程应用的半经验简化模型

(1)“等效温差”表征“固化收缩”。

复合材料热压罐成型工艺过程中树脂基体产生的收缩量主要分为 2 个部分:①固化平台阶段的固化收缩 ε^h (h 代表恒温),产生原因复杂,包含了化学反应在里面。②固化后

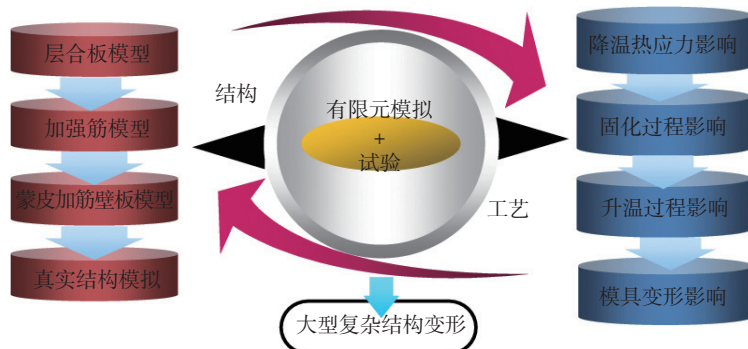


图1 大型复杂结构变形多层次预报模型

表1 第3模块模型描述

模型输入条件	参量描述	
考虑因素	考虑升温过程树脂物性变化、模具热膨胀 考虑树脂固化收缩的影响 考虑降温过程引起的变形	
几何模型	A: 模具 + 复合材料	B: 复合材料结构
初始条件	应力: 无初始应力 温度: 凝胶点温度	应力: 以模型 A 的计算结果为初始应力,其余同第 2 模块
边界条件	层合板连接模具 升温至固化平台	同第 2 模块
材料性能	升温固化过程热膨胀系数、模量、固化度 剪切层热膨胀系数、弹性模量	同第 2 模块

表2 第5模块模型描述

模型输入条件	参量描述		
考虑因素	考虑升温过程树脂物性变化、模具热膨胀; 考虑树脂固化收缩的影响; 考虑降温过程引起的变形		
固化阶段	阶段 1: A 先完成固化收缩	阶段 2: A 与 B 进行胶接,完成 应力传递	阶段 3: A 与 B 共同经历降温 阶段
几何模型	A	A+B	A+B
初始条件	施加树脂化学收缩应力	阶段 1 的计算结果作为 A 的初始应力,然后同 B 胶接, B 进行树脂固化收 缩,完成应力重新分配。	A 与 B 共同完成降温 收缩
边界条件	A 施加面内约束	A 与 B 施加面内约束	A、B 完好连接,从高温 降至室温
材料性能	弹性材料	弹性材料	弹性材料

降温阶段的收缩量 ε^r (r 代表降温), 这个阶段复合材料已经完全固化, 变

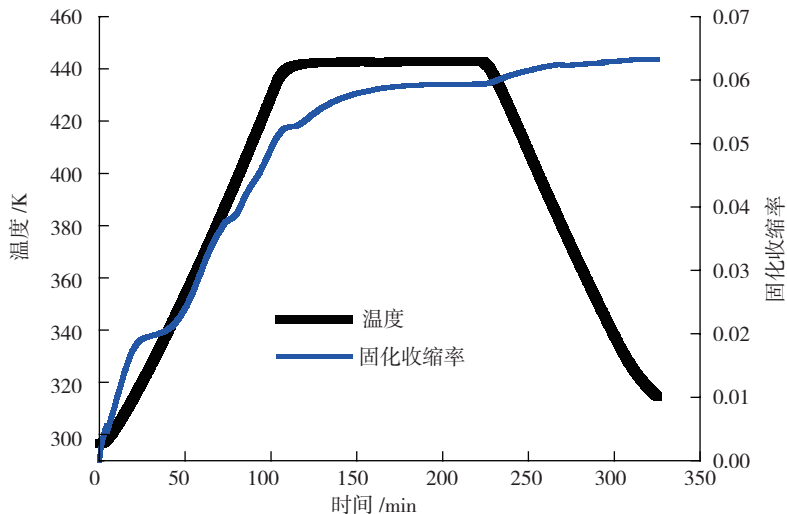


图2 预浸料线收缩率和固化温度随时间变化图

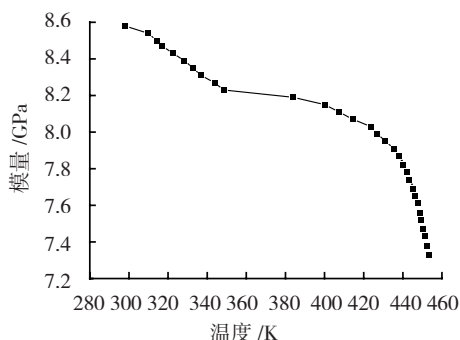


图3 固化过程中弹性模量随固化温度变化图

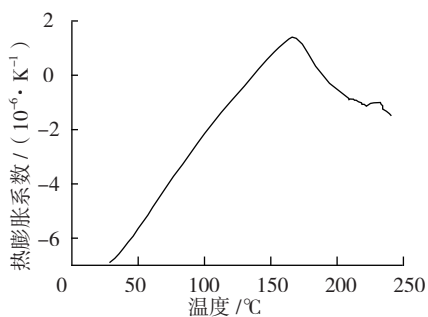


图4 热膨胀系数测试结果

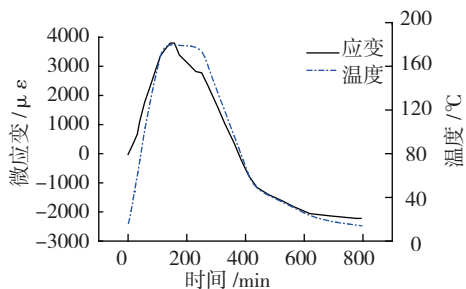


图5 通过光纤光栅测量固化收缩率与降温阶段的收缩率

形完全取决于热膨胀系数。“等效温差”提出的目的: 采用光纤光栅直

接测量“化学收缩”与“降温收缩”, 提出“等效温差”的手段来半经验地表征“化学收缩”, 不必去考虑复杂的化学反应过程。简化后模拟方法的大致思路如下:

总变形量(以应变形式表示)

$$\varepsilon^{\text{total}} = \varepsilon^h + \varepsilon^r, \quad (1)$$

$$\varepsilon^r = \alpha \Delta T^r, \quad (2)$$

其中, α 代表固化后树脂的热膨胀系数; ΔT^r 代表降温阶段的温差。 ε^h 是需要从实验中测量得到的量(见图5), 同理 ε^r 也可以表示成如下形式: $\varepsilon^h = \alpha \Delta T^h$, 这里只有 ΔT^h 是未知的(即恒温阶段固化收缩的“等效温差”)。由于 $\Delta T^h / \Delta T^r = \varepsilon^h / \varepsilon^r$, 所以最终确定, 等效温差 $\Delta T^h = \varepsilon^h \Delta T^r / \varepsilon^r$ 。

(2) “剪切层”表征模具效应。

为了模拟模具与复合材料构件热不匹配导致的固化变形, 在复合材料构件残余应力及变形分析的有限元模型中没有考虑模具而是加入了一个剪切层, 剪切层位于与模具接触的复合材料构件底层, 属于构件的一部分, 并且作用于树脂的粘弹性阶段。在固化模拟过程中由于剪切层的存在, 构件的厚度方向形成了一个应力梯度, 等效模具与复合材料构件之间由热膨胀系数不匹配导致的相

互作用, 预报由此导致的构件固化变形。剪切层在残余应力及变形分析的有限元模型中位于构件几何模型的底部, 它也是构件的一部分, 是通过改变构件底层部分区域的热膨胀系数而得到的。剪切层性能将直接反映模具与复合材料构件热不匹配导致的相互作用情况。

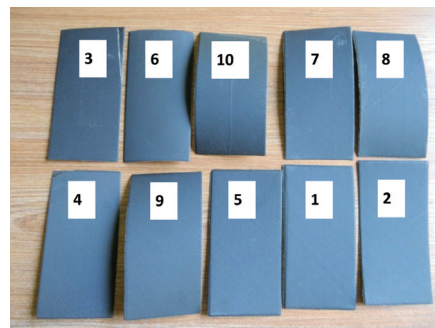


图6 非对称层合板的固化变形试验件

多层次固化变形预报技术的工程应用

1 典型结构的变形分析

(1) 非对称铺层结构的变形分析。作者设计了10组不同非对称铺层的层合板(试验构件见图6, 铺层方式及变形量对比见表3), 固化变形量范围在2mm~30mm之间, 同试验对比可以看出, 本文模型预报精度基本在15%左右。

(2) 加筋壁板类结构的变形分析。作者设计制造了T型加筋壁板、工型加筋壁板、T+工加筋壁板、双工加筋壁板, 如图7所示。采用固化变形的多层次预报模型进行预测, 分析结果见图8。与试验对比, 变形趋势吻合, 预报误差也都在20%以内。

(3) 蜂窝夹层回弹体结构的变形分析。作者设计制造了柱型与锥型蜂窝夹层回弹体结构, 并采用固化变形的多层次预报模型进行预测, 分析结果见图9。与试验对比, 变形趋势吻合, 预报误差也都在15%以内。

2 固化变形预报软件 CompDeformation

由北京航空航天大学 and 上海

表3 试件铺层

试件编号	铺层方式	试验最大翘曲值 /mm	模拟最大翘曲值 /mm	模拟误差 /%
1	[45/90 ₂ -45 ₂ /0 ₂ /45]	3	2.8	6.67
2	[0 ₃ /45 ₄]	12.5	11.6	7.20
3	[0/0/45/45]	13.5	16.4	21.48
4	[0/0/45/0]	13.5	10.7	20.74
5	[0/90/-45 ₂ /90/0/45 ₂]	14	12.3	12.14
6	[0/0/45/-45]	15.5	15.5	0.00
7	[90/90/45/45]	17.5	13.8	21.14
8	[90/45/45/0]	18.5	16.5	10.81
9	[90/90/90/45]	27.5	23.3	15.27
10	[90/90/45/-45]	30.5	28	8.20

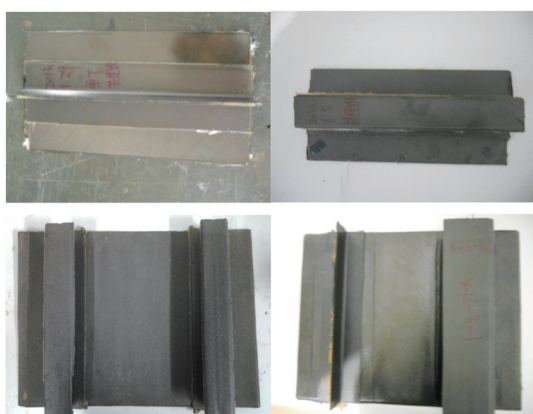


图7 加筋壁板的固化变形试验件

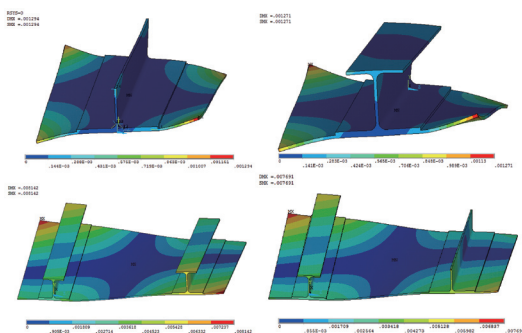


图8 加筋壁板的固化变形预报分析

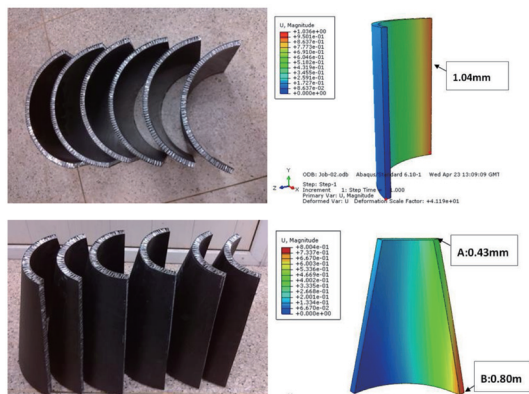


图9 蜂窝夹层结构的固化变形试验与预报分析

飞机制造有限公司联合开发的复合材料结构固化变形分析软件(CompDeformation)是一款基于“广义模型”理论上定制开发的专业化工程软件。它主要是为了解决“如何快速的对典型复合材料结构进行分析、评估”的问题,并生成分析报告的工作。复合材料结构固化变形分析软件首先提供了用于对各类复合材料典型结构(如平板结构、T型加筋结构等)进行参数化结构设计和铺层设计的功能。

通过直观、标准的可视化界面来设计尺寸和铺层结构,系统提供了灵活的铺层结构生成功能。其次,软件在此基础上提供了进行固化变形分析的功能,系统采用模板化方式定义参数,并将参数定义反映到MAC文件中,通过调用Ansys进行固化变形分析。然后系统提供了方便和定制化的对固化变形分析结构进行查看和操作的功能,方便用户直观、直接的对结果进行查看和校对。最后,软件提供了相

关固化指标的评估(如翘曲曲线、回弹角等)功能,同时提供了报告的自动生成和更新功能。

结束语

复合材料结构固化变形预报是设计制造一体化中的一项关键技术,可以指导模具与工艺参数设计、结构概念与细节设计,进行可制造性评价。国内外学者专家经过多年的研究,目前理论分析方法已经比较完善。但是由于复合材料本身的组份构成、材料属性比较复杂,传统分析方法过于繁琐,模型复杂、输入参量多、多影响因素同时考虑存在困难等并不方便直接指导工程设计与制造。

所以本文作者基于工程考虑,提出了针对大型复杂结构固化变形多层次预报技术,考虑了多种影响因素,结合试验手段提出了更加简化的半经验模型,能够快速、准确地给出分析结果,指导复合材料结构的设计与制造,减少设计周期、节省制造成本。同时也需要指出,针对热塑性复合材料构件的设计与制造,本文模型还需要进一步改进,考虑将黏弹性对固化变形的影响。

本文共有参考文献33篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 亿霖)