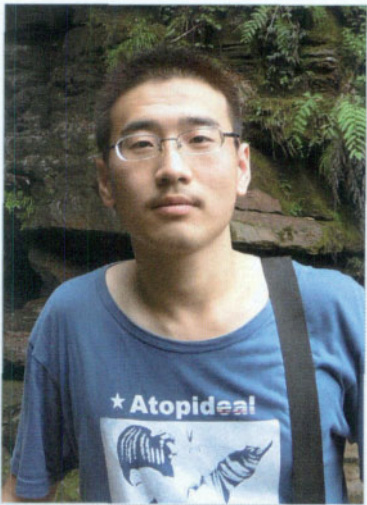


树脂基复合材料固化过程的数值模拟方法进展*

Development of Numerical Simulation of the Curing Process of Resin Matrix Composites

北京航空航天大学航空科学与工程学院 马志阳 张纪奎 程小全



马志阳

北京航空航天大学飞行器设计硕士研究生,研究方向为复合材料制造工艺技术。

复合材料制造过程中产生的固化变形不仅会增加制造和装配成本、降低结构的强度和使用寿命,更重要的是会导致一些大型整体结构和非对称结构在工艺上难以实现,从而影响结构整体性、限制设计自由度,大幅增加结构重量和成本。为了克服固化变形所带来的种种问题,传统的方法是在经验和工艺试验的基础上

建立描述固化过程的计算机数值模型,以模拟计算各种工艺条件下材料内各参数的变化历程,分析固化变形和残余应力的产生机理与影响因素,为结构设计和优化制造工艺提供重要依据,从而改变以往复合材料设计和制造的理念,提高设计和制造的准确度和效率,对我国的复合材料自动化、整体化、设计制造一体化和低成本化具有重要意义。

对结构件的固化工艺规范和结构件固化所用模具型面进行反复调整和补偿性修正加工,以控制变形程度或抵消变形的影响作用。显然,这种处理方法以大量试验数据为基础,必然要耗费大量人力物力,并且对大型复杂结构不再适用。

随着复合材料结构低成本要求的提出和整体化程度的提高,采用数值模拟方法研究大型复杂结构固化过程中的固化变形和尺寸控制显得必要而紧迫。建立描述固化过程的计算机数值模型,以模拟计算各种工艺条件下材料内各参数的变化历程,分析固化变形和残余应力的产生机理与影响因素,为结构设计和优化制造工艺提供重要依据,从而改变以往复合材料设计和制造的理念,提高设

计和制造的准确度和效率,对我国的复合材料自动化、整体化、设计制造一体化和低成本化具有重要意义。

固化过程数值模拟研究现状

热固性复合材料结构件制造时的固化过程包括树脂基体交联反应、树脂固化收缩、树脂在固化压力下的流动和纤维网络的变形等一系列物理化学变化,它们之间存在着复杂的相互影响和耦合的关系。

采用计算机数值模拟复合材料的固化过程,建立一套完整的固化变形分析和预测方法,改变传统设计和制造思想,在设计之初就考虑到结构的成型问题,是降低复合材料生产成本的有效方法。

目前,有许多模型已经能够模拟

*国家自然科学基金青年基金项目(50903002)资助。

复合材料的热传导、固化交联反应、树脂粘性变化、树脂流动以及固化残余应力和变形情况。针对不同的构件几何形状、铺层顺序、模具形式,这些模型能有效改善复合材料制造的工艺参数,对复合材料最终的残余应力和变形具有一定的预测和分析作用。

1 热传导和固化反应的数值模拟

复合材料固化过程本质上是一个在低热传导率、各向异性材料内进行的、具有非线性内热源的化学反应过程^[1]。其中的内热源来源于树脂的固化交联反应放热。热传导和固化交联反应是固化过程中发生的最基本、相互耦合的物理和化学现象。

大多数研究者采用Fourier热传导控制方程描述复合材料结构固化过程的热量传递,只是模型的复杂程度和问题求解方法有所不同。一维模型忽略了热压罐内的对流传热,只描述复合材料平板厚度方向的热传导现象^[2-3]。二维模型可描述复杂轮廓型面复合材料结构内的热传导现象。对形状复杂的大型复合材料结构,则采用三维模型来描述^[4-6]。

复合材料热传导问题的求解十分复杂,传统解析方法只能求解各向同性简单层合板的热传导问题,无法求解复杂换热边界、结构问题。早期的研究者^[1-3,7]采用有限差分法求解规则形状结构件内的热传导问题。对大型复杂结构,有限元方法以其对结构形状和边界条件良好的适应性而得到广泛应用^[8]。目前,已经建立了正交各向异性材料三维热传导问题的有限元列式^[9],以此研究材料热传导性能的各向异性对温度场分布的影响。

2 紧密压实过程的数值模拟

树脂基复合材料在固化压力下的紧密压实过程可以看作是粘性流体穿过多孔介质的流动。基于Gutowski提出的“挤压海绵”型流动-压实模型,使用Darcy定律和有效应力原理分别来建立树脂流动的控

制微分方程和力学平衡方程,就可以对复合材料的固化压实过程进行数值模拟研究。

采用有限差分方法求解树脂流动控制方程^[10-12]对简单几何形状适用。对复杂结构件,则应采用有限元方法来求解。另外,有研究者采用有限元/控制体积法求解RTM^[13-14]充模和热压罐固化成型^[15-16]过程中的树脂流动,实现对流动前缘的精确追踪。

3 残余应力和变形的数值模拟

树脂的力学特性在固化过程的变化可以分为3个阶段:第一阶段为纯粘态,树脂处于可流动状态,不会产生残余应力,树脂在凝固之前都处于此状态;第二阶段是粘弹态,发生在树脂凝固之后到玻璃化之前,此时树脂模量随固化度增大而迅速增大,残余应力有一定程度的延时和释放;第三阶段是弹性状态,玻璃化转变完成后,树脂呈弹性状态,是残余应力产生发展的主要阶段。尽管树脂在固化过程中存在粘弹性状态,但大多数研究者仍采用完全弹性^[7,17]或者线弹性材料模型^[18-19]进行数值模拟,主要有2方面的原因。首先采用粘弹性会大大增加分析的复杂性;其次,经过适当时间的保温后,粘弹性阶段产生的应力已经完全释放。简单结构的残余应力可以采用粘弹性模型模拟,但其在复杂结构上的应用仍需要在材料测试和计算效率方面做进一步研究。

模块法应用于固化过程研究

模块化的研究方法将复合材料的固化过程按照所发生的物理化学变化分为热-化学模块、树脂流动-压实模块、残余应力-变形模块这几个相对简单独立的子模块分别进行研究,各模块内任务明确,便于分析和计算,这种研究方法将广泛应用于今后的工作中。

1 热-化学模块

热-化学模块通过对复合材料

结构内热传导和固化交联反应的数值模拟,给出温度和固化度随时间的变化过程,从而为升温速率、保温温度及保温时间等工艺参数的制定提供依据,也为后续2模块的分析提供必要的状态参数。

固化过程要求采用尽可能低的固化温度和升温速率,但从成本方面考虑,固化的时间越短越好,应采用尽可能高的固化温度和升温速率。热-化学模块的准确分析可以在保证构件质量的前提下选用尽可能高的固化温度和升温速率,为工艺曲线的制定和优化提供依据。

另外,温度 T 和固化度 α 是流动-压实和残余应力-变形2个模块重要的输入参数,树脂的粘性和材料的力学性能都由它们决定,它们的准确预测对后续的分析工作具有重要意义。图1给出了热-化学的有限元求解流程,其中 $i-1$ 表示第 $i-1$ 个时间步; V_f 为纤维体积含量; Δt_{\min} 为程序所允许的最小时间步长,若 $\Delta t_i < \Delta t_{\min}$,则计算不收敛,程序终止运行。

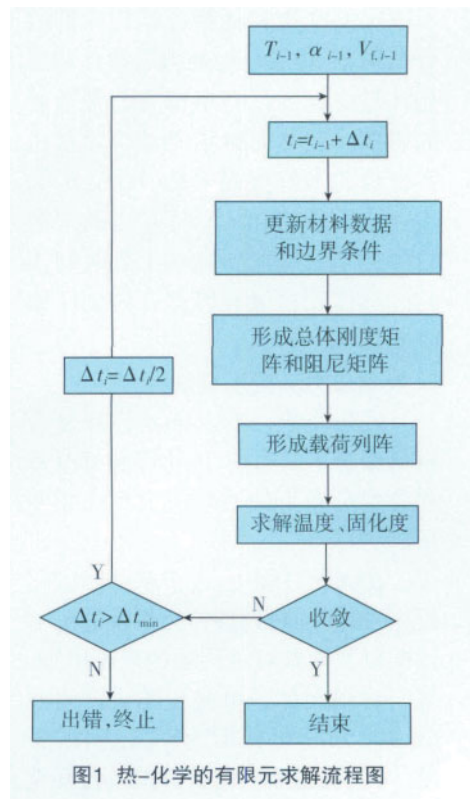


图1 热-化学的有限元求解流程图

2 树脂流动 - 压实模块

当树脂处于可流动状态时, 多余树脂在固化压力的作用下自预浸料内流出, 层合结构得以巩固压实, 这一过程称为层合板的紧密压实。树脂流动 - 压实模块以温度和固化度为输入变量, 通过对紧密压实过程的数值模拟, 给出纤维网络的变形以及纤维体积分量的分布情况。

在固化初期, 树脂基体的粘度随温度的上升而降至最低点, 随固化度的增长而增大, 在达到凝胶点后, 树脂丧失流动性。固化压力、加压时机、保温平台、升温速率等工艺参数的制定必须结合粘性变化的这一特点: 在树脂粘性较低时施以压力, 同时应使温度保持一段时间, 以阻止粘性的迅速上升, 为铺层内多余树脂流出提供充分的时间。采用树脂流动 - 压实模块方法分析紧密压实过程中各种操作条件下粘性、树脂分布以及纤维网络的变形情况, 对于科学的设计和优化操作工艺, 提高结构件的成型质量具有重要意义。

另外, 复合材料的紧密压实过程所决定的纤维和树脂在结构内部的分布状态, 对层合板的力学特性和结构件最终的固化变形都有非常重要的影响。图 2 为树脂流动 - 紧密压实模块的求解流程。其中, T_i 、 α_i 为热 - 化学模块第 i 个时间步的求解结果; $V_{f, i-1}$ 、 $\varepsilon_{3, i-1}$ 为第 $i-1$ 个时间步的纤维体积分量和厚度方向的压缩应变。

3 残余应力 - 变形模块

残余应力 - 变形模块计算复合材料在给定的温度、固化度和纤维体积分量分布下的残余应力和固化变形。

在固化过程中, 由于基体的固化反应、层间的热物理与力学性能的不匹配以及模具对结构的约束作用等, 复合材料制件不可避免的要产生残余应力和固化变形, 会对结构的强度、几何稳定性产生不利影响, 甚至

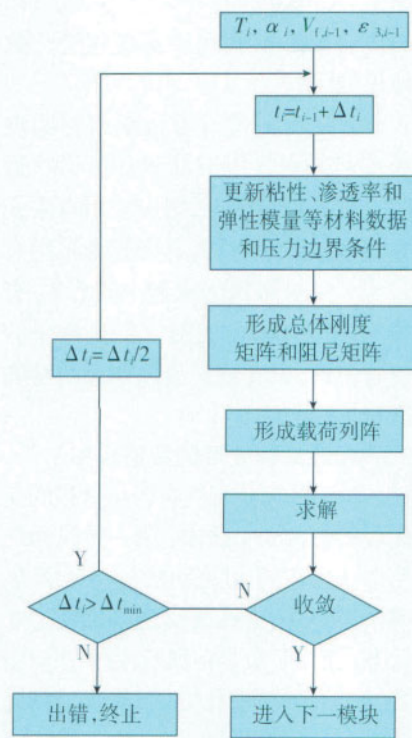


图2 流动-压实模块的有限元求解流程

可能引起破坏或失效^[20-21]。因此, 复合材料的残余应力和固化变形的数值模拟对于结构设计、工艺过程控制以及模具设计等具有重要意义。

残余应力和固化变形的数值模拟分为 2 个阶段: 第一阶段为固化工艺过程中残余应力的数值模拟, 在此过程中结构被模具约束, 沿模具表面法线方向的位移自由度被约束, 沿模具表面方向的约束情况视模具表面情况而定, 残余应力是由于温度变化和固化交联反应所产生的收缩应变而产生的; 第二阶段为结构脱模后固化变形的预测, 结构脱离模型的约束, 残余应力部分释放而产生固化变形。

残余应力 - 变形模块的求解过程如图 3 所示, 其中, $V_{f, i}$ 为树脂流动 - 压实模块在第 i 个时间步的求解结果; t_{total} 为固化总时间, 当 $t > t_{total}$ 时进入脱模后固

化变形计算子程序, 之后整个程序结束运行。

4 各模块之间的数据交换关系

3 个模块之间的相互作用通过各模块的数据交换来体现。图 4 为各模块之间的数据交换关系示意图, 其中方框内点划线上方为本模块的名称以及所描述的物理化学现象, 点划线下方为本模块的输出变量; 指向方框的箭头为本模块的输入变量, 实线表示对在当前时间步内就可以计算的上一模块对本模块的影响, 虚线则表示在下一个时间步考虑上一模块对本模块的影响。各模块输入变量、输出变量以及与其他模块的关系如下。

热 - 化学模块的输入参数包括工艺参数、几何形状、边界条件等, 同时还包含另外 2 个模块在上一个时间步求解所得的纤维体积分量分布以及结构的变形情况; 输出变量为温度和固化度以及由二者确定的树脂粘性。热 - 化学模块的温度和固化度变化在当前时间步内就会对另外 2 个模块产生影响。

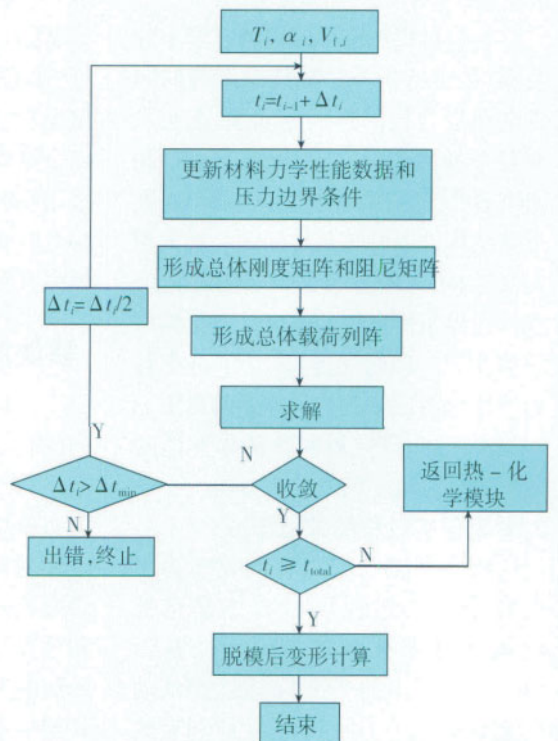


图3 残余应力-变形模块的有限元求解流程

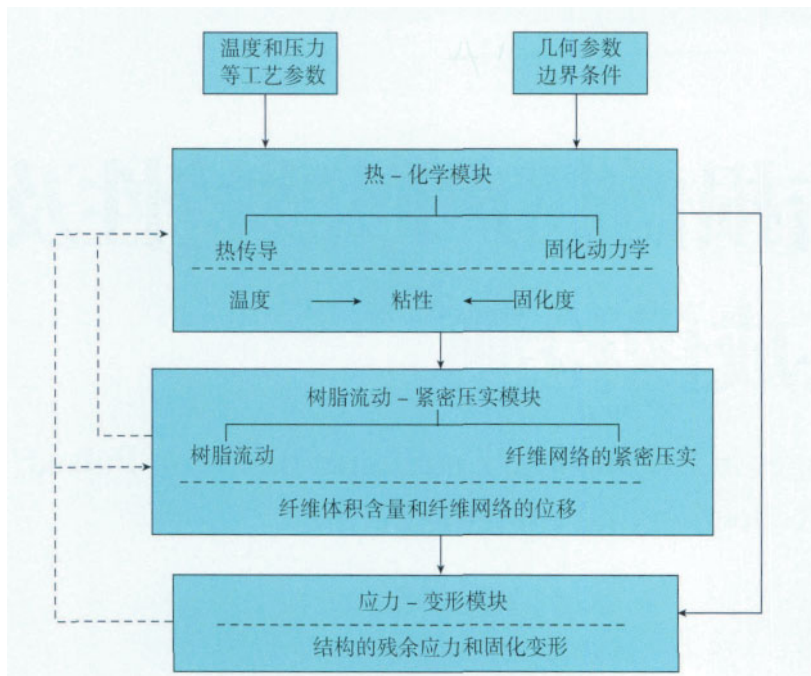


图4 各模块的数据交换示意图

流动-压实模块的输入条件包含纤维网络的渗透率和弹性性能以及树脂粘性，同时还包含在上一个时间步求解所得结构的变形情况；输出变量为纤维体积含量和纤维网络的变形。流动-压实模块的求解结果对应应力变形模块当前时间步的求

解结果产生影响，对热-化学模块的影响则在下一时间步考虑。

前面2个模块输出的温度、固化度、纤维体积含量均是应力-变形模块的重要输入参数，应力-变形模块输出变量为结构的残余应力和固化变形，其对另外2个模块的影响在下一个时间步考虑。

5 不同时刻的各模块调用关系

树脂的固化过程可以根据凝胶化和玻璃化转变分为3个阶段。凝胶化是指树脂由液态向橡胶态的转变；玻璃化则是指树脂由液态或橡胶态向玻璃态的转变。凝胶点 α_{gel} 和玻璃化转变温度 T_g 是固化进程的2个重要判断依据：凝胶点是树脂力学性能增长和残余应力产生的开始点，同时是树脂流动的终止点；

玻璃化转变温度后，材料处于完全弹性状态，力学性能趋于稳定，温度应变和固化收缩应变分别与温度和固化度呈线性关系。图5为不同时刻各模块程序的调用关系示意图。在每个计算时间步开始之前首先更新温度和固化压力等工艺参数，在求解热-化学模块的控制方程后根据当前固化度 α 与凝胶点 α_{gel} 的关系确定是否调用树脂流动-固化压实模块：若 $\alpha \leq \alpha_{gel}$ 则进入树脂流动模块，由于此时结构内无残余应力，求解完后直接进入下一个时间步；若 $\alpha > \alpha_{gel}$ ，则根据当前温度 T 与 T_g 的关系决定是否进行材料力学性能数据更新和固化收缩子程序调用。

结束语

国内关于复合材料固化过程数值模拟的研究开展时间较短，基本的材料性能测试还没有完成，特别是树脂固化动力学、粘性和纤维网络在固化压实过程中的力学性能方面。目前，国内关于热固化和树脂流动的研究与数值模拟都是参照国外数据进行的，国内在这方面的研究还远未达到工程应用阶段，应尽快开展国内相关材料体系的热力学、固化动力学、流变特性和固化过程力学特性的测试工作，进行典型结构件的固化变形实验，为固化变形的分析与预测提供实验基础。

模块法适于建立应用于大型整体复合材料的设计制造一体化软件，有利于改变传统设计思路。通过数值模拟方法进行虚拟的工艺参数和模具设计，可达到减少试验次数、缩短生产周期、降低生产成本的目的，为复材设计制造一体化提供技术保证。

本文有参考文献21篇，因篇幅所限，未能一一列出，读者如有需要，请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)

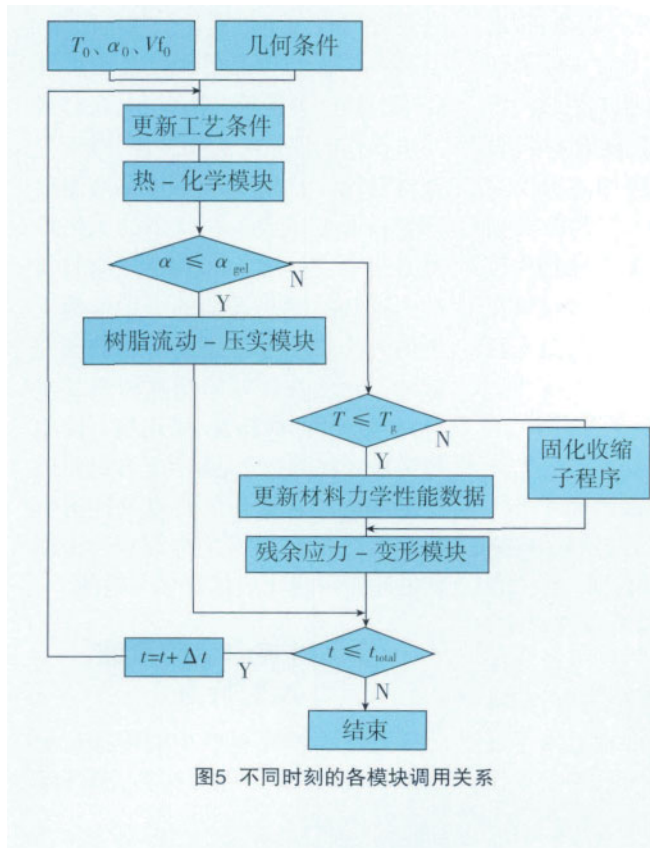


图5 不同时刻的各模块调用关系