复合材料学报 第19卷 第2期 4月 2002年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 19 No. 2 April 2002

文章编号: 1000-3851(2002)02-0001-12

复合材料固化过程的智能化监控及其智能生产系统

黄龙男[1], 王正平[2], 张德庆[3], 张宝友[4], 李辰砂[4], 刘志强[5], 李晓峰[5], 夏伟光[6]

(1: 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2: 哈尔滨工程大学 化学工程系, 哈尔滨 150001;
3: 哈尔滨工程大学 材料系, 哈尔滨 150001; 4: 哈尔滨工业大学 分析测试中心, 哈尔滨 150001;
5: 哈尔滨气轮机厂有限责任公司, 哈尔滨 150046; 6: 清华大学 同方公司, 北京 100084)

摘 要: 复合材料由于其优良的性能而拥有广泛的应用领域, 但其成型工艺复杂, 成本高使其应用受到限制。针对成型过程开发智能化技术是提高生产效率和产品质量的有效手段, 其中包括建立数学模型, 以专家系统、神经网络或分步预测优化的模型系统为中心的在线监控系统。本文作者针对这些智能化工艺技术进行了总结分类和比较, 对智能成型工艺系统进行了阐述, 包括其功能、结构和辅助部件。分析了关于复合材料智能化生产技术的发展方向和社会效益。

关键词: 复合材料; 固化; 在线监控; 智能生产系统

中图分类号: TB32 **文献标识码:** A

INTELLIGENT MOLDING PROCESS AND THE INTELLIGENT MANUFACTURE SYSTEM OF COMPOSITES

HUANG Long-nan[1], WANG Zheng-ping[2], ZHANG De-qing[3], ZHANG Bao-you[4], LI Chen-sha[4], LIU Zhi-qiang[5], LI Xiao-feng[5], XIA Wei-guang[6]

(1. Material Science and Engineering Academy, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Chemistry Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
3. Material Science and Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
4. Center for Analysis and Measurement, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
5. Harbin Turbine Company LTD, Harbin 150046, China;
6. TONG FANG Company of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Composite materials have been widely applied because of their many desirable properties. But the bottleneck to widespread acceptance in more commonplace applications is the inability to manufacture composite parts cheaply and reliably. The cure cycle has a significant effect on the quality of the finished part. The traditional cure cycle based on an empirical approach could not ensure the quality of cured products in the aspects of unstabilized performance, the high cost of production and the low efficiency. In this paper, the technology of intelligent cure operation is set forth according to the developing tendency of smart material and structure. An intelligent-system-based tool was developed in order to operate the autoclave cure of a fiber reinforced thermosetting matrix composite laminate in an optimal manner. The intelligent system includes an expert system, a neural network and the step optimal model whose function, structure and attaching parts are systematically set forth. They can achieve the desired objectives such as minimizing the cure time while still producing a high quality part.

Key words: composites; cure; on-line monitor; intelligent manufacture system

由于复合材料具有优良的性能, 使其可以在不少领域替代传统材料, 先进复合材料的发展正推动

收稿日期: 2000-08-12; 收修改稿日期: 2000-10-08
基金项目: 国防科工委九五预研项目
作者介绍: 黄龙男, 男, 博士, 研究方向为复合材料成型工艺。

着宇航飞行器、航海船舶潜艇及陆地建筑桥梁设计的变革。其优良性能表现在重量轻、强度高、抗冲击、耐腐蚀等方面,因此首先被应用于航空、航天工业领域[1]。军用新型复合材料是现代武器装备的关键,是军用高技术的先导和基础,它的基础水平和发展速度,很大程度制约着高技术的进一步发展。以美国为首的发达国家对军用新材料的发展极为重视。由于复合材料成型工艺方法上的分散性,使其质量难以得到保证,这成为影响复合材料更加广泛应用的重要问题。

一种经常使用的制造高性能的热固性基体复合材料层板的工艺名为真空辅助的釜内成型工艺(vacuum-assisted autoclave molding)[1],事先将复合材料预浸料(pre-preg)按设计切割并铺制成预浸层板,层板被罩于真空袋内,而后置于固化釜内的温压环境中,实现固化成型,称为一个固化周期(cure cycle)。温度的加热作用不但使树脂基体的粘度下降,流动性增强,也是固化交联反应的必要条件。压力作用使层合结构得以巩固,使树脂分布均匀。真空袋的功能是使材料内生成的气体被排除。

复合材料的固化操作存在着复杂的内部过程,如何确定最佳工艺条件使生产质量最好,并且生产成本最少,这是很困难的。以前主要靠两种方法来摸索操作工艺[2]:实验法和经验法。前者通过对形状简单的小型试件多次实验,并结合有限的定性分析设计出较合理的操作工艺,但它不适用于较大尺寸或形状复杂的产品;后者是生产厂家在长期的生产实践中摸索出的操作工艺,也只适用于特定的范围。这两种方法都不能从根本上解决目前生产中存在的产品合格率低、成本居高不下的问题。最重要的一条是:当材料种类或几何形状改变时就不适用[2]。例如:对于热固性树脂基体的复合材料,生产厂家习惯上提供的一个经验固化操作规范对于较薄的层板来说一般是比较令人满意的,因为薄层板中热量传递较快,使被加工材料在整个过程中保持内部温度均匀。对于较厚的复合材料层板,整体导热性相对较低,由于热阻大带来了许多问题[3]。其中一个问题是造成材料里外部分温差较大,固化进展不一致,致使固化产品内热应力积累,对应用造成危害。另一个问题是固化反应放热不能及时疏散,导致材料内温度骤升甚至失控,使树脂基体分解碳化,产品质量被破坏。对此,传统办法只有尽量降低升温速率,增加中途恒温次数,最终就是延长操作周期[3],既增加了成本,又使单位时间内的产量降低。

目前优化固化操作的方法主要分两大类:一类是放弃预先设计的固化操作过程,建立在线智能控制系统。设置在固化体系内的传感器实时采集被加工材料的信息并反馈给计算机内的控制系统,通常是包含一系列控制规则的专家系统或由过程模型或神经网络形成的可进行分布预测的控制系统,由控制系统指导固化进程。第二类是基于机理模型的模拟运算。通过计算优化操作参数,可以在很大程度上提高复合材料的的生产效率,提高产品质量,降低生产成本。

1　基于传感监测的“专家”方法

美国 Wright-Patterson 空军基地与 Ohio 州立大学的工作者在研制“质量过程自动化”(QPA)的工作中首先尝试将专家系统技术用于复合材料生产[4]。构成 QPA 的策略强调了在线控制原则,基于如此策略的控制系统能够自主地解释传感数据,分析变化过程,依靠一个包含相关知识的知识库系统实时建造过程方案,这样就可以使固化进展自动进行。执行 QPA 的目标是恰当地部署智能化过程控制系统,它应该完全适应过程的条件,并且直接影响产品的质量和产量。

针对釜内固化过程的 QPA 系统的知识库由两个相互独立的部分组成,这两个子系统通过一个“黑板”相互联系。一个部分由分析程序构成,负责采集由传感器监测输入的数据,并对所采集的数据进行解释——将数据转化并进入更复杂的描述过程状态的工作。另一个部分为思考系统,负责估计过程状态,考虑过程目标,制定过程决策并将操作命令传送给操作装置。系统的目标是尽可能快地使复合材料完成固化并使之结构致密,并且在成型过程中材料不受破坏。QPA 技术在缩短完成固化所用时间方面效果比较显著[4],其规则形式为如下的假设形式的规则,这是构成知识库中规则结构的基本形式:

IF (TEMPERATURE is increasing) and

($d^2T/dt^2 > 0$),

THEN (REACTION_INITIATED is true),

AND IF (REACTION_INITIATED is true),

THEN (initiate COOLING)

其他不少工作者将 QPA 作为自己工作的基础。Ciriscioli 和 Springer 开发了一个称为可靠性保障系统的专家系统(SECURE)[5],它不但满足温度历程的需要,还有针对层压过程、应力形成和气孔活动的一系列规则。Springer 曾认真研究了复合材料

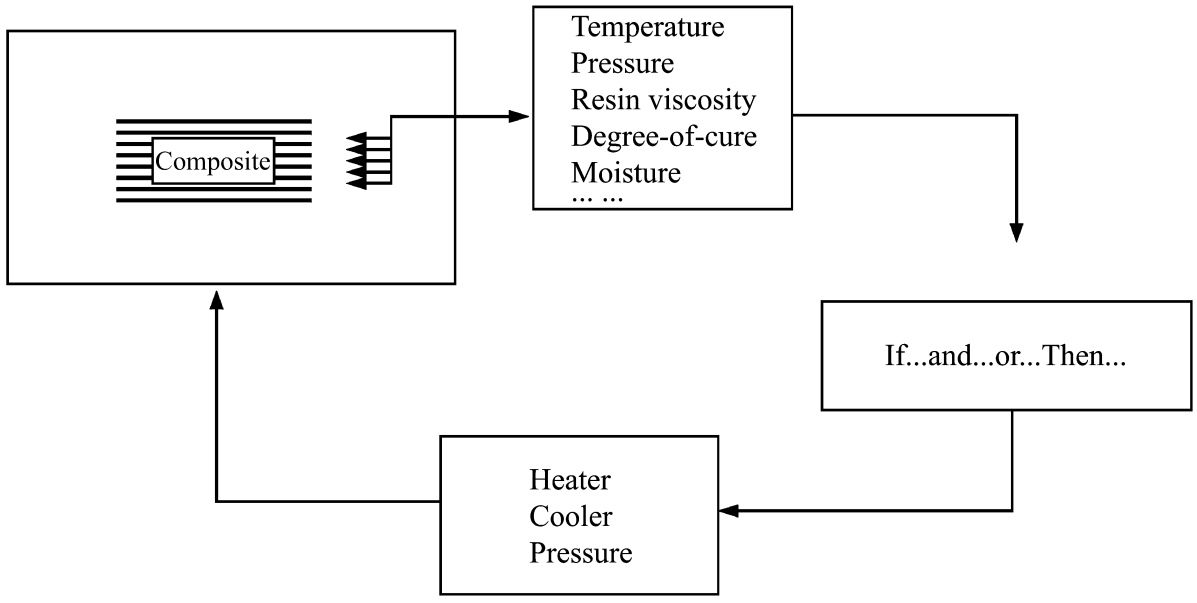

图 1　专家系统监控复合材料固化过程

Fig. 1　Expert system monitoring curing process of composite

固化过程中的内部变化历程，建立了过程模型，模拟不同条件下固化过程中温度分布、铺层厚度、气孔直径、残余应力的变化规律，掌握了大量资料。根据温度分布均匀、铺层厚度变化一致、控制气泡和残余应力及缩短固化周期等操作规范而建立专家系统的判据规则体系。输入专家系统的实时测量的数据是温度、压力、层板中间点的温度、层板表面温度、材料厚度以及由介电传感器监测的树脂基体的介电常数等，输入数据经过数学处理，被预先设置的规则检验，依据这些规则指导固化进展方向。这些规则分两个主要部分：一个部分负责维持温度和温度变化在限制区域内，另一个部分负责确保层板压缩过程有条不紊进行，还有一条规则用于确定固化结束时刻。其结构框图如图 1 所示。各部分判据规则机理为

关于温度：用复合材料内外温差（$\Delta T = T_m - T_s$）反映温度分布的均匀性，中间层温度的二阶导数（$T_m = d^2T_m/dt^2$）反映因反应放热和传热而引起的固化体系温度变化的加速趋势。为确保体系内温度分布均匀以及温升和放热不失控，必须遵循规则：（T_m，T_s）$T_a < T_{max}$，$\Delta T < \Delta T^H_{max}$，$T_m < 0$。$T_a$ 为固化罐内的温度，T_m 为复合材料中间层的温度，T_s 为材料上、下表面温度的平均值，ΔT^H_{max} 为容许最大内外温差，T_{max} 为容许最高温度。对其设定一要考虑缩短固化周期，二要考虑防止树脂基体出现热裂解。另外，在材料内温度不加速上升——既温度不失控的情况下，若因反应放热的原因造成中间层温度高于表面温度，可以通过提升罐温的办法来缩小内外温差。由此制定关于温度分布和反应放热强度控制的判据规则为

IF：（$T_a < T_{max}$ and $T_s < T_{max}$ and $T_m < T_{max}$ and $\Delta T < \Delta T^H_{max}$ and $T_m < 0$），OR：（$T_a < T_{max}$ and $T_s < T_{max}$ and $T_m < T_{max}$ and $T_m < 0$ and $\Delta T > \Delta T^H_{max}$ and $T_s < T_m$ and $T_m < 0$），

THEN：提升操作温度（启动加热器）

IF：$T_a > T_{max}$ or $T_s > T_{max}$ or $T_m > T_{max}$ or $\Delta T > \Delta T^H_{max}$ or $T_m > 0$，

THEN：降低操作温度（关闭加热器，如有必要，打开冷却器）

关于树脂基体的粘度：根据树脂的粘度在初始阶段随温度的升高而下降，而后上升的规律，工艺要求需要使树脂的粘度在最低点维持恒定一段时间直到基本析出全部富余树脂，否则会造成层板在尚未完全压紧的情况下树脂已进入凝胶点而无法实现层板的密实化。SECURE 系统认为为使粘度维持一段时间的相对恒定，需要使温度在轻微波动中相对恒定一段时间，若温度绝对恒定，树脂粘度也会因固化度的增长而逐渐增长。由此确定在该阶段的关于粘度的规则为

IF _ ≥ 0，THEN 加热（使粘度下降）

IF _ ≤ 0，THEN 冷却（使粘度上升）

树脂基体的粘度由埋在复合材料中的介电传感器监测的介电常数来反映。

关于层板压缩进程：其压缩进程的缓急需成为一条被考虑的因素。为使铺层厚度和树脂分布均匀，需要保持适当的压缩进度。有的工作者直接通过调整操作温度来控制压缩进程。当压缩进度放慢时，需提高加热速率来降低树脂粘度，以便于压缩进度的

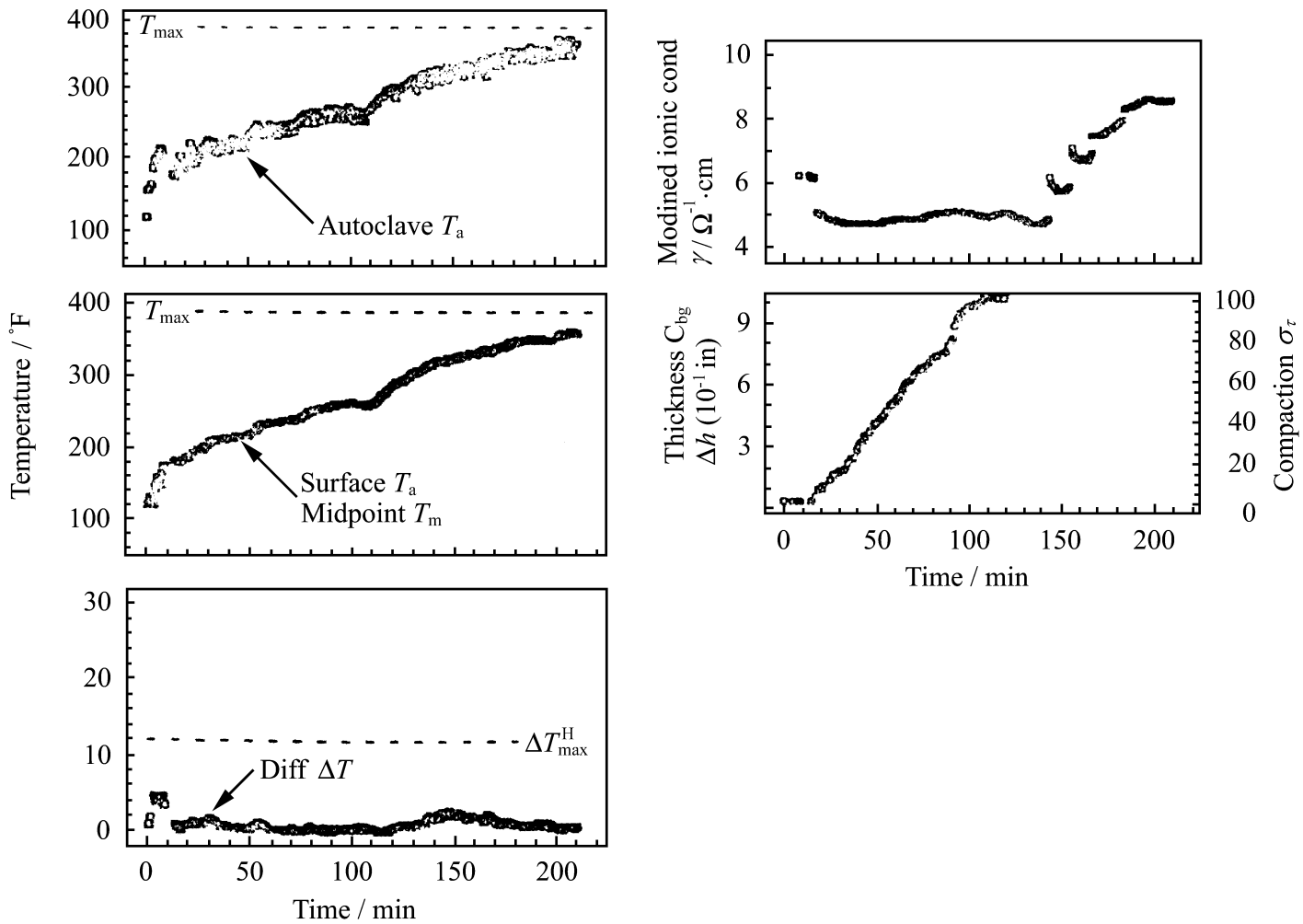

图 2　SECURE 系统对固化体系温度、介电数等参数变量的一组实时监控结果(52 层 T300/976 预浸料, 0.34 英寸厚)

Fig. 2　Temperature, thickness change, compactions, modified ionic conductivities during cure monitored by SECURE system (T300/976 Tape 52, ply 0.34 in)

加快; 当压缩进度加速时, 需通过降低温度提高树脂的粘度, 以遏制压缩进度加快的势头; 层板的压缩进程达到极限, 应以最快的速率加热。

$$\text{IF } \ddot{\Delta h} = \frac{d^2(\Delta h)}{dt^2} > 0, \text{ Then 降低温度}$$

$$\text{IF } \ddot{\Delta h} = \frac{d^2(\Delta h)}{dt^2} < 0, \text{ Then 提升温度}$$

$$\text{IF } \Delta h = (d\Delta h/dt) = 0, \text{ Then 提升温度}$$

材料厚度的变化为: $\Delta h = h_0 - h$, h_0 为复合材料的初始厚度, h 为复合材料在时刻 t 时的厚度。上标“·”、“¨”分别表示对时间的一阶、二阶导数。Springer 也设计了特殊装置来监测层板厚度的变化[5]。

关于气泡的控制: 由于影响气泡活动的因素十分复杂, 一般只从总体上控制操作压力大于气泡内挥发气体的饱和蒸汽压(P_s) 以有效地控制气泡的生长, 气泡内气体的饱和蒸汽气压主要由温度决定, 可以通过调节罐温控制气泡的生长。由此确定关于气泡的规则:

IF $P < P_s$ and $P < P_{max}$, Then 降低温度

IF $P > P_s$ and $P > P_{max}$, Then 提升温度

针对残余应力, 考虑到残余应力与材料成型过程中经历的温度变化有关, 因此在所控制的最大温度设定上兼顾节省固化周期和减小残余应力两方面因素。整个判据规则体系尽量协调各方面的要求, 避免互相冲突。

该系统的目标与其他工作者建立的监控系统是一致的。相对于 QPA 系统, 增加了有关粘度、层板压缩进程及残余应力等方面的判据规则, 不但基本上包括了复合材料成型中的影响产品质量的各方面变化过程, 而且针对这些判据规则是建立在分析固化过程的机理之上的。

QPA 和 SECURE 在优化复合材料成型过程操作方面是比较超前的技术, 但也有一些潜在的缺陷。操作规则是由大量的实验数据汇总而得到, 对成型过程中的固化体系的状态的判断取决于所监测传感的信息, 对各操作决策的选择没有定量的判断根据。知识库系统(KBS) 中的知识是知识工程师对固化过程的了解以特定的方式密封于知识库之中的。KBS 只能依据所获得的知识和信息来执行, 不能扩展新的功能且预测能力差, 一旦监测到不良状态, 已来不及阻止和避免; 另外, 很难将规则系统组织得步调一致, 难以克服不同规则的相互矛盾性。

通过固化较厚的碳/环氧复合材料的实验显示,

在改进产品性能方面 SECURE 与最初的 QPA 没有明显的优势。例如: 对 35 mm 厚的 T300/976 复合材料固化实验中, 材料内外最大温差竟达 17 ℃。其实验结果之一如图 2 所示。

针对 QPA 和 SECURE 系统存在着忽略系统动力学因素, 在线预测能力差的缺陷, 需要进行改进。例如: Kalra 在其所建立的专家系统中[6], 设立可预测的规则系统, 能预测每一时刻内的材料内的温度的增长趋势, 并据此及时调整罐温, 避开反应放热的高峰。

Kalra 规则系统的基础是关于固化体系热量传导的一阶时间延迟拉铺拉斯(Laplace)转换关系式

$$\frac{T(s)}{M(s)} = \frac{K_p e^{-[_d s}}{f_p + 1}$$

T(s) 为温度变化的拉普拉斯转换, M(s) 为加热功率变化的拉普拉斯转换, K_p 为过程放大系数, $[_d$ 为过程时间延迟, f_p 为过程时间常数。

执行在线监控的初期, 罐温上升缓慢, 确保固化体系不释放反应热。根据实时采集的数据, 现场计算出 K_p, $[_d$, f_p。而后计算拟合出罐温变化的区域, 罐温上限为最高允许温度 T_{max}, 下限为在没有反应放热前提下, 材料所经历的温度变化历程, 它由上式经演化为如下形式而获得。

$$T_c = T_{ci} + (T_{cf} - T_{ci})(1 - e^{-(t-[_d)/f_p})$$

式中: T_c 为复合材料内温度, T_{ci}为初始温度, T_{cf} 为终了温度。这在很大程度上缩小了罐温变化范围。

执行完上述工作后, 罐温迅速升至最高固化温度 T_{max}, 正式进行监控过程。由于存在反应放热, 在任意时刻停止加热, 材料内温度不会停止上升, 而是升至某一极值后才下降。当某一时刻系统采集完数据后, 在下一采集数据时刻之前要进行如下工作:

(1) 计算材料内温变速率 slope 和温变加速速率, 即温度对时间的二阶导数。

(2) 计算富裕时间 leadtime, 即从目前温度升至 T_{max}所需时间, 计算如下:

leadtime = lead temperature/(slope × w)

lead temperature 为富裕温度, 为最高固化温度 T_{max}减去材料目前的温度; slope 为该时刻材料内温度曲线的斜率, 即温升速率。w 为加权系数, 反映温升的非线性特性, 它由该时刻温升的加速趋势经验估算, 这要根据数据库中储存的实验数据而现场拟合估算。

(3) 启动规则系统: 如果 leadtime 小于过程时间延迟 $[_d$, 说明目前材料内温升相对过快, 即使停止加热, 材料内温度也会严重超出最高允许温度 T_{max}。此时必须将罐温降致区域的下限。如果 leadtime 大于过程时间延迟 $[_d$, 则继续加热。

为缩短固化时间, 节约生产成本, 在条件成熟时需继续启动加热操作。有三种可供选择的条件: 一是当材料内的温度经过最高峰后降至 T_{max}之时; 二是当材料内温度升至尖峰即将下降时; 三是当监测到过了该阶段反应放热高峰之时。前两种条件使再次加热偏晚, 造成材料内温度下降幅度过大, 不利于节省固化时间。第三种条件可以最大限度地提前再加热时间, 使材料内的温度降幅小, 有利于提高生产质量。

因此根据材料内固化反应放热/导热规律, 所制定的关于加热或冷却的判据规则为

IF leadtime < $[_d$, THEN cool

IF leadtime > $[_d$, OR 再加热条件满足, THEN heat

Kalra 的监控系统虽然只对温度过程进行监控, 但事先确定固化体系的热导动力学关系, 根据由此得到的相关信息预测固化体系的变化趋势, 及时调整控制操作。取代了早期的 QPA 和 SECURE 系统的时断时续的机械而被动的操作, 在一定程度上克服了当出现两个不同规则被重叠调用时导致温度调控剧烈波动和一旦监测到严重不良状态已来不及阻止和避免的弊端。有条不紊地做出基于预测活动的决策使固化过程在最短的时间内完成, 并且不发生剧烈的反应放热。更适用于温度分布较难控制的层数多、尺寸大的制件的固化过程。

上述三个监控系统的推理过程属于数据推动的推理过程, 即正向推理过程。Manzini 和 Roehl[7] 采用目标驱动的过程即反向推理过程改进监控系统。被加工复合材料制件、传感器、控制系统及树脂的行为皆根据控制目标而被描述, 按不同的层次组织。知识过程以分布式的方式进行, 在所选取点, 各种相关规则被相互比较, 经冲突处理规则做出最后的决策。这种结构克服了正向推理对知识元的选择的潜在的低效性, 知识库的创建和修改更容易进行, 更适于建构结构化的复杂的知识库体系, 提高了监控系统的功能。

另外的工作者也从不同的角度发展和完善智能监控系统。例如: Wu 和 Joseph 所开发的基于知识库的系统通过建立知识库作为处理实际过程所依据的原理[8]。他们引用实际过程中的一些较重要的步骤

作为控制活动的识别标准,并据此建立若干关联关系。其规则结构还用于将过程条件与控制活动的前提联系起来,形成的运行框架是利用“前提-条件”式的规则结构划分和处理过程变量。甚至引入一些模糊控制方法,部分采用模糊式的规则系统监控过程进展。这样的程序过程至少减少了知识库的随意性,使控制过程更趋于合理,而且使知识库体系的理解能力更强,更易于修改。当然,这些模糊成员关系函数的监控功能也受开发知识库系统的工作者对所针对的研究领域了解程度的局限。

发展在线监控技术对成型工艺技术的发展来说意义重大。但是在线监控策略一般包含许多经验成分,而且将所有的要领都囊括进一个统一的协调一致的框架中也是很困难的。而且开发较大型的实时控制专家系统的工作量大,在各阶段需要广泛的人的参与。材料或过程的变化将迫使知识库被较大程度地修改,甚至使初期进行的框图的制作、编程、调试等工作都要重新进行。

2　基于模型模拟的成型工艺的优化

基于模型模拟的工艺设计,首先要从如下方面考虑优化目标:

(1) 釜内温度:厚的复合材料层板可以采用保守的慢升温速率的方法进行固化成型。可是,热压釜内的固化的成本是很高的,固化时间长,产量低,价格就昂贵。因此需要尽量缩小固化时间,固化结束的标志就是材料的固化度达到最低设计固化度。

(2) 均匀固化:非均匀固化的最明显的表现就是产品中的残余应力明显[6]。Delaware 大学复合材料化学所开发了 PIRSA 程序(成型过程产生的残余应力)估算残余应力[9]。它根据层板结构理论采用一维固化分析模型从复合材料固化所经历的温度和固化度历程中确定过程导致的应力和形变。在模型分析中考虑了热膨胀和收缩引起材料比容的变化导致的内部应力作用,温度和固化度的梯度分布是应力产生和演化的基础。

对于厚度较大的层板,完全消除固化度的梯度分布是不可能的,但固化进展由里向外的分布有利于消除气孔和杂质的影响,并且可以最大程度地减小残余应力。固化初期,因热量从罐内空气向层板传递,这使得层板表面温度先于中间而升高且首先开始固化进程。在后续阶段,固化反应放热的作用改变了层板内的温度变化和固化反应活动,内部固化进程加快,最后超过表面的固化度进展。为达到优化固化过程的目的,中间层的固化度追上表层固化度的那一时刻的固化度的值必须为低于凝胶点 a_g 的某一点[10]。

(3) 热破坏:无论何时,材料内的温度都不能达到使树脂基体热降解的温度。

(4) 层合结构的巩固:必须排尽富余树脂,达到合适的纤维体积分数,完全巩固层合结构,纤维体积分数分布要均匀。

(5) 气孔:气孔是由铺制铺层过程中卷入的空气和溶在树脂中的潮湿组分挥发而形成,气孔对制件质量很有影响。对气孔影响程度的判断依具体复合材料的性能和对产品的具体要求而定。

不少文献报导关于如何地安排操作压力以巩固层合结构和消除气孔的形成[11~12]。Kardos[13]提出为消除含水分的气孔,操作压力必须高于所处温度下的气孔内水分的饱和蒸汽压,这意味着固化过程中的任一时刻外压都得高于该时刻下水蒸气的饱和气压。Kardos 还指出大多数情况下纤维束里的压力要低于外压,在安排加压时间时需考虑这一因素以使层板中纤维分布均匀,避免出现“过瘦”区。根据粘度的变化过程,树脂基体的粘度在初期较大,对气孔有较大的限制作用,而后因温度上升而下降。这样可以当温度升至一定值以上时(例如 70 度至 80 度,材料内外温差在 3 度、5 度以内)的某一时刻施加高于该温度下饱和气压的外压。

这样剩下的需要优化的操作变量就是温度,经过优化的釜温历程能应达到如下目标:(1) 完成固化时间最小;(2) 有效地限制放热峰;(3) 使成型过程产生的残余应力最小。这样,所形成的优化目标就是加以温度和温度分布限制条件的时间最小化问题。

不少研究者探索数值模拟的方法优化材料成型工艺过程。他们的核心工作是一致的,而且针对较厚的复合材料层板成型过程的困难都获得了比较有效的克服方法。将优化函数化简为低阶函数是一种显著的前向搜索策略,Martinez[3]采用分段线性逼近来优化工艺过程,其所需最小化的目标函数是材料中间的温度与通过模拟预设的温度曲线之差。实验结果显示固化时间缩短了 45 %,固化进展均匀。但他忽略了固化体系内附件的影响,实际温度变化历程应该有些滞后。

Leenson[14]研究了玻璃纤维增强/聚合物树脂基体(SMC)成型过程中的层压过程。根据限制最大温度和温差的原则而设计优化固化操作以便实现任

意时刻下的温度均匀。本着使优化参数按分段线性地逼近理想正弦函数的原则设计操作变量-釜温-的历程。包含优化参数变量的目标函数的解的梯度分布以直接的微分方程的解析式的形式表示, 最后用分段逼近的二次多项式进行数值求解。最后求得优化的釜温历程如同峰与峰叠加的波形。如图 3。

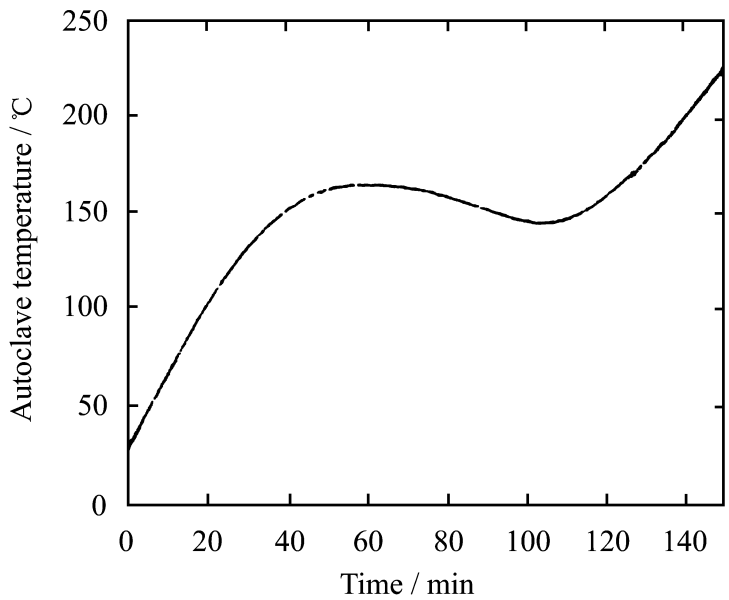

图 3 Leenson 的釜温优化曲线

Fig. 3 The optimal cure cycle of Leenson

Williams 与其合作者认真探索了较厚的玻璃纤维/聚合物基体复合材料层板的固化的模拟, 理论计算与实验结果的完成玻璃化状态转变的温度是一致的, 这是材料力学性能达到最佳值的点, 也是操作温度应最后恒定的点, 如果温度再高于这一温度, 将导致材料力学性能的向不良方向偏移。Williams 与其合作者发现使最后稳定的固化温度发生改变的因素是传统的 "升温-恒温-升温 "操作步骤的第二次升温的速率。这种 "升温-恒温-升温 "的安排可以最大限度地降低固化度的不均匀分布, 是在减少投资成本和获得最佳产品物理力学性能之间的一种折衷的方法。其他工作者[10]也发现可以通过多次变换第二次升温的速率的方法来消除反应放热过快的现象。

Kenny 和其合作者[15]提出了一个基于模型的优化操作方案。在固化开始后的最初几分钟内, 确定层板表面与热压罐内空气之间的传热系数, 而后及时设计出固化件内各时刻的理想温度历程曲线, 据此设计和调整釜温在各个时刻下的变化。

Tam 和 Gutowski[16]利用传统的封闭式控制流程。在过程模型中, 将状态变量 V_f(纤维体积分数), a(固化度), T_{part}(制件的温度) 与操作变量 P_a(压力), T_a(罐内温度) 相关联。需控制的变量是 V_f 和 a, 这两个变量的理想的变化曲线被模型程序所确定, 在每一步时间步长中, 当控制变量偏离理想曲线时, 控制决策即被启动。过程的目的是在设计时间以内达到凝胶点和令人满意的纤维体积分数。其结构如图 4。考虑到避免材料的性能参数变量出现严重的梯度分布的影响, 采用薄板进行实验, 控制过程比较成功, 在凝胶点以前就使纤维体积分数达到合适值, 这是理想的工艺所要求的。

Nagendra 和 Loos 等[17]以动力学理论为基础监控固化过程变量, 引入一定的限制条件使目标函数最小化。整个的优化过程可以看成一个时间优化控制问题, 并且加以终点限制条件、中断条件、还有关于被加工复合材料的温度和固化度的限制条件, 控制变量是釜温过程。程序运行从假设初始值开始, 根据输出结果的偏差按最速下降法一步一步地搜索, 使目标变量(时间) 最小化。这种搜索容易陷入局部极小化的误区。但按优化的固化路径对克服反应急剧放热, 缩短固化时间起到了明显的效果。对较厚层板, 不但克服了放热高峰, 而且克服了材料内温度的发散分布, 优化结果如图 5。但是因为罐内空气传热过程的滞后, 这样的理论操作温度历程在实际生产中是不可能实现的, 但可以作为对实际操作温度历

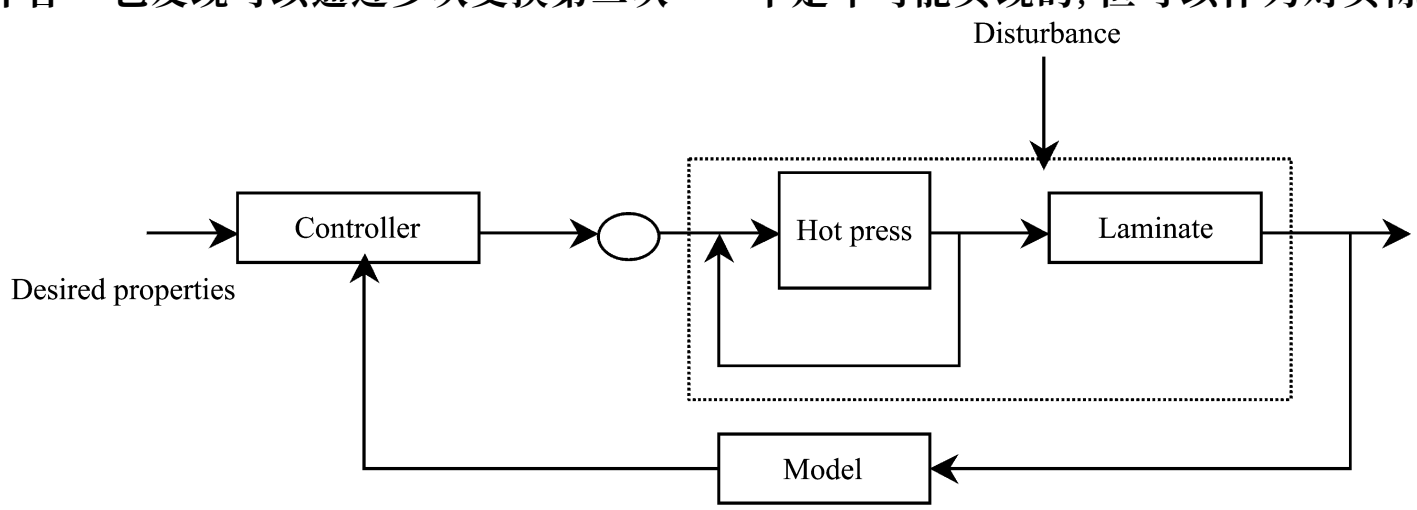

图 4 Gutowski 的罐内固化控制的封闭流程

Fig. 4 A closed loop control formulation of the autoclave curing problem of Gutowski

程的设计的依据。

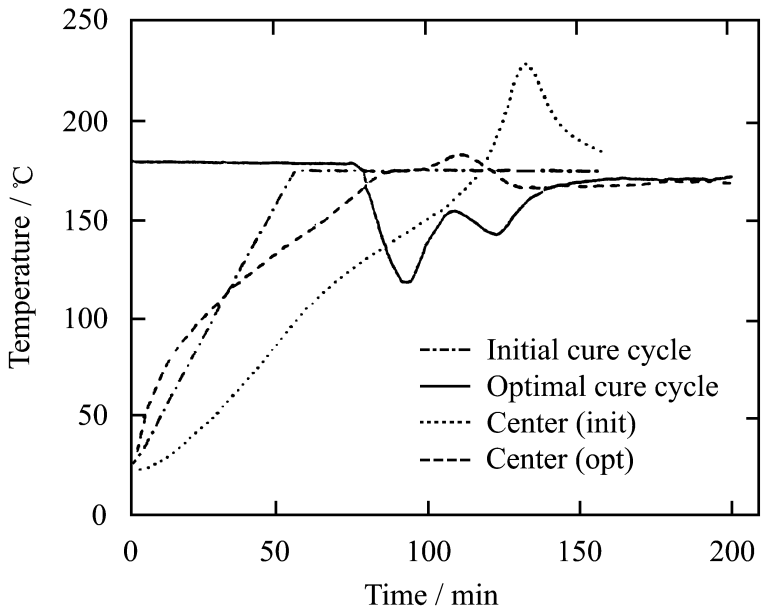

图 5　Nagendra 和 Loos 的优化结果

Fig. 5　Optimization results from Nagendra and Loos

Travis Bogetti[18] 建立了 TGCURE 模型方案，它建立了复合材料层板中的非匀相传热等式。由反应引起的热增长作为热项，所建立的边界条件用于关联层板表面与罐内温度，利用有限差分算法求解方程组。由固化体系周围附件的热阻、热容和空气传热影响也在系列关系式中被包括进去，在模拟中考虑了因传热阻力造成的材料内的温变滞后，包括加热器自身传热性能对温度变化的影响。

上述以模型为基础的优化操作过程的诸方面方法存在共同的问题是关于被优化目标函数的处理对于变化的环境适用性差。它们通常是预设材料的参数变量的理想的变化路线，固化操作过程就是使实际变化路线尽量接近设计路线。为求解方便和易于生成优化控制路线和计算过程收敛，一般要做一些简化假设，但这又使解的实用性更差。而且百分之百完善的模型是不可能建立的，不能完全精确地描述过程和确定物性参数，也会造成误差。

3　基于局域优化的成型工艺的设计

局域优化 LCO(Local Criteria Optimization) 是指在每一时刻根据被加工制件的具体状态和趋势而制定瞬时的控制决策来优化操作[10]。在任一时刻的控制决策是根据上一临近时刻的向前推理预测过程进展而得出，如图 6 所示。控制变量随时间是离散化的，每一步时间间隔都有几种预测变化可供选择，各个选择的发展趋势都被随时间逐段地往后推测，直到某一选择的发展可以达到一个可被接受的状态(图中带星号的点)，该选择即被采纳成为该时刻的决策，由此即可得出一个最优的决策路线，不但实现了在线预测功能，而且实现使每一步的操作参数定量化。局域优化包括以数学模型为核心的分布预测

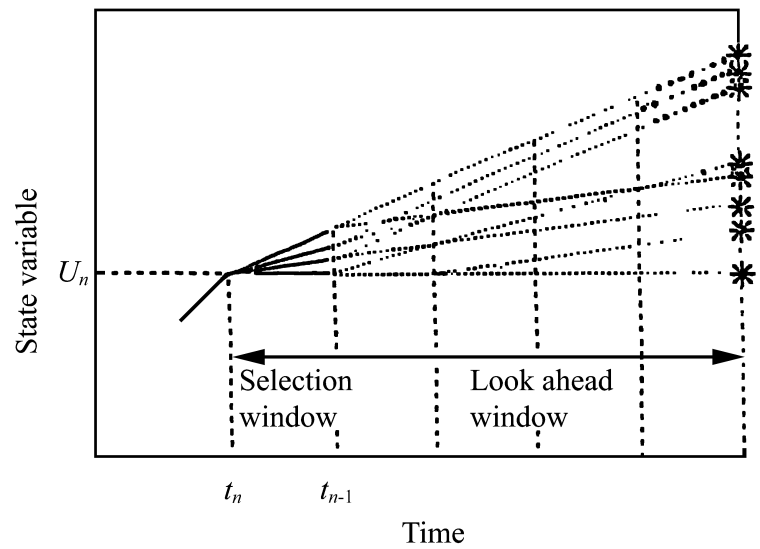

图 6　局域优化简图

Fig. 6　Schematic of local criterion optimization

优化和以自组织自学习的神经网络为核心的分布预测优化操作过程。

数学模型指挥的局域优化：状态估计函数自身是一个直观估价函数，直观估价函数是一系列罚函数(penalty function)的组合。它包含一些优化参数，这些优化参数是针对不同直观估价函数(Heuristic evaluation function)的加权系数，通过设置这些加权系数，可以祢补人们对过程知识掌握的不足。这样通过函数优化求取最优温度历程的问题就简化为离散的低级优化组合的问题[19]。

Vikram Pillal 根据不同的子目标将固化过程分成两个大的子部分[10]，第一个部分的目标是使层板达到温度均一的稳定状态。在第二部分中，固化反应开始，直至完成固化。第一部分的最优操作温度过程独立地确定。在第二部分中，固化过程中出现的不合适变化被施加以罚函数，如：较长的固化时间，较高的材料层板中间温度，较大的温度梯度，层板比中心提前达到凝胶点。直观估价函数是四个相应的罚函数的组合。利用直观估价函数，通过一系列设置的加权参数，在每一步时间步长里作出最佳选择，形成特殊的经过优化的罐温变化过程路线。各个加权系数可以通过预设的总体的优化标准来确定。

LCO 程序的基准是根据每一时间点的具体状态通过模拟迭代设计固化周期内的各步路线。事先并未限定一个过程要进行的路线，优化路径在优化程序中依靠直观估价、总体标准和模拟的相互作用而产生。有时为了 LCO 程序扑捉适当的结果而对目标函数进行必要的改变。Johnson 和 Roberts 也开发了针对材料固化的“以各步事件为基础的控制”[20]。他们分析了介电监测数据，对固化过程中的特殊事件进行了关联形成了整体趋势，他们的控制策略就是限制这一整体趋势的变化范围。

神经网络调控复合材料固化过程：神经网络实时监控技术是近几年发展起来的新技术。神经网络

是一个具有高度非线性的超大规模连续时间的动力系统,它是由大量处理单元(神经元、处理元件、电子元件等)广泛互连而成的网络。网络的信息处理由神经元之间的相互作用来实现;知识与信息的存贮表现为网络元件互连间分布式的物理联系;网络的学习和识别决定于各神经元连接权系的动态演化过程。

利用神经网络在线监控复合材料固化过程,首先要利用数值模拟或实验数据的关联对其进行训练。用数值模拟软件对不同条件下的固化操作过程进行计算,利用计算结果对神经网络进行系统训练,使其利用自己的模型对不同情况下的输入数据和输出结果建立有机的联系,而后还要利用数值模拟或实验结果对神经网络的训练效果进行检验。

神经网络在线监控分为前馈控制和反馈控制两种类型,它们的运行方式不同,但执行的操作是相同的,各自的执行过程如下[21]:

前馈控制:在前馈控制神经网络实时监控固化过程中,传感器采集并输入神经网络系统一组数据,如:罐内温度、复合材料的固化度、树脂粘度、压缩进度、复合材料的温度、当前的复合材料内的温度变化速率、固化反应速率等,神经网络选择一组操作变量,如:加热速率等,而后对下步时间间隔末的固化体系的参数变量进行预测,如:固化度、树脂粘度、压缩进程等。对各组预测结果的理想性进行评估,选出最佳一组结果下的操作变量并执行。在各时间单元里都重复这些步骤直致体系的固化度达到设定值。

反馈控制:在反馈控制神经网络在线监控固化过程中,传感器采集并输入神经网络系统一组数据,神经网络对下一步时间间隔末固化体系的参数变量——体系的固化度、树脂粘度、压缩进程等的理想值进行设定,而后反向推算出下步时间间隔所需的加热速率等操作变量的值并依此执行。重复这一系列步骤直至体系的固化度达到设定值。

因神经网络具有完善的模型和采用并行处理过程,用其在线监控复合材料固化过程,不但精度高,而且速度快。它能对每一时刻固化体系的参数变量的性质做出准确的评估,对变化趋势做出精确的预测,从而做出定量化的操作指令。前馈控制和反馈控制各有特点,前者因需要迭代比较过程,使其速度相对较慢、精度相对较低,后者速度相对较快、精度相对较高,但需反向推算操作变量,因此对其进行的训练过程也较复杂。利用前馈控制或反馈控制需根据不同的情况正确处理。

LCO 优化的路线是过程应该经历的合适的变化趋势的组合,控制结果是确保实际过程尽可能地接近优化的路线[22]。并没有使每一步时间步长内的实际路线与优化路线的均方根偏差最小,而是确保过程变量的趋势尽量接近优化模型所给定的路线。模拟和实际过程中的变量变化历程被输入过程趋势分析模型,输出值是各步时间单元内的半定量化的数据描述,勾划出了过程的基本趋势。通常选择若干不同参数进行运行,分析几种解的结果而对控制过程进行关联,通过关联各步的控制决策形成具体过程事件,即实际控制。细节问题的描述可以在各时间单元里发掘,连续变量被分解成各时间子单元内的离散变量,描述各时间间隔的近似行为。

神经网络的分布式存储信息、并行分布处理的特征,使之具有自组织、自学习和容错性,从而对实际的监控过程可以全面分析,准确预测,定量地调整操作变量。但目前神经网络方法本身还不完备,其学习效率低、训练速度慢、理解功能弱等问题,使其实用化大受影响。

4 各种方法在实际固化操作中效果的比较

通过上面的阐述,总结出各种方法的主要特点如下表 1。

表 1 四种方法的比较

Table 1 Comparison of the four methods

	传统的固化方法	模型模拟	“专家”控制策略	LCO 优化
依据基础	基于生产经验	基于对固化过程的机理的研究和材料的各物性参数的测定、获取	基于研究固化机理和需要存入知识库的大量的实验数据	基于对固化过程的机理的研究,材料各物性参数的测定、获取,以及训练神经网络的大量的实验数据
优点	简便	事先预测总体变化过程,设计出合理的操作工艺	实时调整固化条件,不限于固定的材料种类、尺寸、形状	具有在线预测功能,精确控制每一步时间间隔的操作条件
缺点	不适于变化的生产条件和材料种类	无法及时调整操作参数	不能实现定量化的调整操作条件	运行速度慢易导致反馈命令不及时。神经网络效率低、理解功能弱,影响实用化

由上面的阐述可以得出,由四种不同的方法实现的工艺历程是不同的,导致的生产效率、生产质量也将不一样。以不太容易处理的厚度较大和热导性较差的复合材料层板的固化过程为例:

(1) 传统的固化方案:固化在较低的升温速率下进行,使反应速率较慢,放热速率较低,便于热量的扩散。以延长固化时间和增加成本为代价。

(2) 模型模拟:在工艺设计中通过延缓升温速率甚至降温的方法来避开放热高峰和传热热阻的影响。但无法克服实际执行中的不确定因素的影响,有可能出现内外温差过大,使质量难以保证。

(3) "专家"控制策略:当反应放热开始后,成型制件被冷却,以此来协调温度历程。但一般无法通过提前的预测系统调整温变,易造成较大的温度梯度。

(4) LCO 优化:允许在较低的温度发生一些反应,反应热用于提升材料中间的温度。同时进行釜温提升,使材料表面的固化进展不会太长地滞后于中间部分。实施加热的时间对于控制成功与否很关键。升温过早,会造成由外向内的固化发展和剧烈的放热。升温过迟,会增加固化生产成本,而且升温越迟,越会造成不均匀固化。因为无法方便地直接监测固化度进程,过程控制方案依赖于制件内的动力学和热化学模型。实践发现,即使是微小的扰动,例如第二次升温超前或延迟一两分钟,都将导致固化质量的恶化。因为无法建立百分之百完善的模型,必须有每一步的恰当的控制策略。通过对大量优化路线的关联可以得出总的控制策略,对于出现冲突的多个选择,可以通过简化类型划分的办法或应用神经网络技术——自组织自学习的技术来克服。

5　复合材料智能化生产系统的辅件

实现智能化生产除包括智能结构体软件和核心生产设备以外,还包括附属部分,主要是用来采集固化体系数据的传感器。性能优良、灵敏度高的传感器监测复合材料成型变化过程可以为研究过程机理、设计操作工艺提供材料和依据,也是智能化综合生产系统不可缺少的部分。

热电偶是监测固化体系温度的最常用的传感器,它具有成本低、可靠性高、易于使用等优点。监测温度的变化在很大程度上囊括了固化体系的信息,因为很多参数变量都可以与温度建立关联。近些年,开发监测其它反映复合材料固化状态诸方面参数的先进传感器的工作也取得了不少成果。

对树脂固化进行传感监测较早是采用动态弹簧法(DSA),差示扫描量热法[23]和红外频谱方法[24],其局限在于只能把有限的样品放在仪器内进行检测,然后将测量结果作为经验推广到生产实际中,无法实现固化工艺过程中的在线实时监测。以后发展的动态介电分析法(DEA)可以在线监测树脂的粘度变化[25],在生产过程中可以实际应用,但使用成本较高。

八十年代末伴随着智能材料与结构的兴起,在国外开始了光纤固化监测传感器研究。国外有关复合材料成型工艺光纤固化监控技术的研究发展较快,主要集中在光纤对复合材料性能的影响、埋光纤智能复合材料的成型工艺技术、光纤固化传感系统、复合材料成型工艺模型与评价专家系统等方面。利用光纤传感器对复合材料成型工艺进行在线实时监控,其传感机理包括红外频谱、超声[26]、荧光[27]、折射率[28]等参数的测量。通过这些光纤传感器可以从各个侧面观察工艺过程。目前,国外在先进复合材料固化光纤在线实时监控技术方面的研究,经过基础性研究和探索,已向成品化、工业化方向发展。

目前的这些先进传感器普遍价格昂贵,对使用环境敏感,易损坏,从而造成监测固化过程的中途失效[10]。即使可以可靠地监测整个固化过程,完全依靠这种复杂的监测技术也不是可行的方法。因此,将模型模拟与传感测量结合起来发展在线控制技术意义更大。

6　总　结

复合材料生产工艺的智能化在很大程度上以研究工艺过程机理为基础,分两个方面:一方面是设计和优化工艺过程的数值模拟;另一方面是对工艺操作过程的实时在线监控,这是先进复合材料生产工艺技术的一个发展方向。实现复合材料生产工艺过程智能化的另一关键要素是设在生产装置内的先进的传感器系统。研究智能化复合材料成型工艺就是从上述三方面入手展开系统化的研究过程。三个方面相互联系,通过对固化机理的研究确定传感器应监测的参数变量,根据数值模拟计算的结果可以解释传感器的监测结果,传感器的监测结果又可以验证数值计算的有效性。根据数值计算的结果还可以为在线监控系统的判据规则提供依据。在线监控系统需要传感器做"眼睛",传感器只有应用于自动化监控系统才能有效地发挥其监测固化过程的功能的

作用,它能成功地监测复合材料固化变化趋势,为智能系统及时在线发布重要操作指令提供了准确的情报。三部分相互联系,形成统一的智能化复合材料工艺过程体系。这正是把‘智能材料工艺与结构’的概念引入复合材料成型工艺过程而开始由经验向基于科学的过程的转变。其结果将大大提高复合材料成型工艺过程的效率,提高产品性能,降低成本。无论对要求高性能复合材料的国防工业还是对不断扩展复合材料应用范围的民用领域,都具有十分重要的科学研究意义和非常广阔的应用前景。

另外需注意,实际过程与模型的不匹配产生的误差将使得优化结果不能直接应用,主要原因:(1)对物理化学过程的不准确的模型;(2)不恰当的假设和简化;(3)所使用的一些物性参数的值不精确。材料的物理参数受结构形式和生产系统的部件设置的影响。例如:热动力参数受温度变化的影响,还会由于材料的老化而改变。传热热阻受固化体系内部件设置的影响。有些参数可能在每一次实际运行中都有所不同。这些影响因素都是需要认真研究克服的。

参考文献:

[1] 前川善一郎. 显微在复合材料中的应用[J]. 显微复合材料, 2001, 18(1): 51- 57.

[2] Springer G S, Keynote J, Address R. The Role of Models in Manufacturing Thermosetting and Thermoplastic Matrix Composites [A]. In Proceedings of Mannfacturing International, VI [C]. Atlanta, GA. 1998, 2(88): 1- 5.

[3] Martinez G M. Fast cures for thick laminated organic matrix composites [J]. Chem Eng Sci, 1991, 46(2): 439- 450.

[4] LeClair S R, Abrams F L. Qualitative Process Automation [A]. Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control [C]. Austin, TX, 1988: 197- 209.

[5] Ciriscioli P R, Springer G S, Wang Q. An Expert System for Controlling Autoclave Temperature, in Tomorrows Materials Today [A]. Proceedings of the 34th International SAMPE Symposium [C]. Reno, NY, 1989: 205- 220.

[6] Kalra L, Perry M J, Lee L J. Automation of autoclave cure of graphite-epoxy composites [J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(10): 2567- 2584.

[7] Manzini R A, Roehl E A. Flexible Control of an Organic Matrix Composite Cure Process Using Object-Oriented Control Concepts [A]. Proceedings of the American Control Conference (IEEE Cat. Number 90CH2896- 9) [C]. 1990: 1980- 1985.

[8] Wu H T, Joseph B. A blackboard architecture for model-based reased reasoning and plan refinement in real-time process control [J]. Cltem Eng Sci, 1992, 47(4): 917- 928.

[9] Bogetti T A, Gillespie J W. Process-induced stress and deformation in thick section thermoset composite laminates [J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(5): 626- 660.

[10] Pillal V, Antony N, Dhurjatj P. Intelligent curing of thick composites using a knowledge-based system [J]. Journal of Composite Materials, 1997, 31(1): 22- 51.

[11] Dementyev V S, Petuhov M, Torkunov A. On the Optimization of the Fiber Reinforced Composites Manufacturing Process with Two pressure Steps [A]. In CADCOMP92-3rd International Conference on Copmuter-Aided Design in Composite Material Technology [C]. 1992: 37- 47.

[12] Pillai V. Use of Simulations in Optintzation of and Design of Knowledgc Based Control System for a Composites Fabrication [A]. In CADCOMP92-3rd International Conference on Computer Aided Design in Composite Material Technology [C]. Newark. DE, 1992: 529- 544.

[13] Kardos J L, Dudukovic J P, Mckague E L, Lehman M W. Void Formation and Transport during Composite Assurance and Processing [A]. In Composite Materials, Quality Assurance and Processing, C E [C]. Browning ed, ASTM STP 797, 1983: 96 - 109.

[14] Jeenson S. Optimal Cure Cycle Design of Resin-Fiber Composite Laminate [D]. Master's thesis. Old Dominion University. 1986: 8- 13.

[15] Kenny J M. Integration of Processing Models with Control and Optimization of Polymer Composites Fabrication [A]. In CADCOMP92-3rd International Conference on Computer Aided Design in Composite Material Technology [C]. Newark. DE, 1992: 529- 544.

[16] Tam A S, Gutowski T G. A Nonlinear Process Controller for Curing a Thermoset Composite, in Tomorrow's Materials: Today [A]. Proceedings of the 34th International SAMPE Symposium [C]. Reno. NV, 1989: 426- 435.

[17] Nagendra S, Loos A C. Optimization of the Curing Process of Filament Wound Composites, in Tomorrow's Materials: Today [A]. Process of the 34th International SAMPE Symposium [C]. Reno. NV, 1989: 1853- 1867.

[18] Bogtti Ta, Gillespoe Jr J W. Two-dimensional cure simulation of thick thermosetting composites [J]. Journal of Composite Materials, 1991, 25(3): 239- 273.

[19] Pillai V K, Bris A N, Dhuujati P. Heuristics Guided Optimization of a Batch Autoclave Curing Process [J]. Comp Chem Eng in Press, 1995: 27- 32.

[20] Johnson S A, Robrets N K. Production Implementation of Fully Automated Closed Loop Cure Control for Advanced Composite Structures [A]. In Proceedings of the 34th International SAMPE Symposium [C]. Reno. NV, 1989: 373- 384.

[21] Joseph R, Frieda W, Hanratty G. Predictive control of quality in a batch manufacturing process using artificial neural network models [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1993, 32(9): 1951- 1961.

[22] Pillai V A, Beris N, Dhurjati P. Implementation of model-based optimal temperature profiles for autoclave curing of composites using a knowledge-based system [J]. Ind Eng Chem Res, 1994, 33(10): 2443- 2452.

[23] 梁 滨, 马蕊然. 中温固化环氧树脂体系的研究[J]. 复合材料

学报, 1993, 10(2): 85- 88.

[24] 周志强, 何平笙, 吴人洁. 非收缩共聚环氧树脂基体固化的反应动力学 [J]. 高分子材料科学与工程, 1990, 7(4): 13- 19.

[25] 李玉华. QY8911-Ⅲ高韧性双玛来酰亚胺树脂固化工艺规范的研究 [J]. 化学世界, 1996, 37(7): 249- 251.

[26] Wang A, Lee S Y. Sapphire-fiber-based intrinsic fabry-perot interferometer [J]. Optic Letter, 1992, 17(14): 1021- 1023.

[27] Ram L, Levy G, Scott D, Schwab R. Fluorescence optrode sensors for composite processing control and smart structure applications [A]. Fiber Optic Smart structures(Eric Udd ed) [C]. John Wiley & Sons, Inc. 1994: 361- 372.

[28] Lam K Y, Afromowitz M A. Fiber-optic epoxy composite cure sensor, I: Dependence of refractive index of an autocatalytic reaction epoxy system at 850 nm on temperature and extent of cure [J]. Applied Optics, 1995, 34(9): 5635- 5638.