

大飞机复合材料成型工艺数值模拟技术研究进展

Research Progress of Numerical Simulation Technology for Composite Forming for Large Aircraft

成都飞机工业集团有限责任公司 李彩林 文友谊



李彩林

2006年毕业于四川大学高分子材料科学与工程学院材料学专业，工学硕士。现任成都飞机工业集团有限责任公司热加技术室工程师，主要从事航空复合材料成型工艺及数字化仿真领域的研制工作。

近年来，复合材料在大飞机上的用量及应用部位已成为衡量各国航空业先进水平的主要标志之一，如欧洲空客 A380 飞机的复合材料用量为 25%，波音 787 飞机上的用量已占全机结构总重的 50% 以上。

“十一五”期间，复合材料制造技术作为实现我国新一代飞机轻量化、高性能化的关键技术而被列入科技发展规划。尽管复合材料在大飞

机上的应用不断扩展，但其加工工艺相当复杂，在国内现有加工条件下，复合材料构件的试验周期长、制造成本高，产品性能难以达到现代航空业对复合材料性能的苛刻要求，严重阻碍了我国民用航空业的发展。因此，用于大飞机的高质量、低成本复合材料成型技术中存在的问题亟待解决。

随着计算机技术的飞速发展，国内外众多企业竞相采用数值模拟技术对复合材料构件进行虚拟设计，将设计和制造融为一体，从而实现模具设计、工艺过程控制及参数优化。本文通过采用计算机软件对几种常见复合材料成型工艺（如 RTM、热压罐成型）进行数值模拟，阐述了数字化仿真技术在复合材料构件制造中的研究进展。

制造技术的主要发展方向之一。该技术以成本低、成型速度快、质量高的特点和先进的工艺形式而倍受关注。尽管 RTM 工艺有众多优点，但在成型过程中也存在诸多技术难点，如 RTM 模具的注胶口和溢胶口位置及数量的选择，注射压力、注射温度和注胶时间等工艺条件的确定。

为了解决 RTM 在成型过程中易出现的种种难题，尤其是 RTM 模具的设计和注胶时间的确定，我们在选定树脂和增强材料的情况下，通过设计出几种不同的方案，利用 RTM 树脂转移模拟软件对不同的注胶口位置进行工艺仿真，并结合预制件形状合理安排溢胶口，再对几种设计方案进行工艺优化，确定最佳的注胶口、溢胶口，优化出较为适合的工艺参数。

2 RTM 数值模拟技术研究

RTM 的数值模拟技术通过计算机模拟实际生产过程来优化和确定模具设计、材料及工艺参数。RTM 成型工艺包括树脂注射流动、固化反

RTM 及数值模拟技术

1 RTM 技术概述

RTM (Resin Transfer Molding) 是树脂传递模塑成型的简称，是航空航天先进复合材料低成本

应及监测控制等。其中树脂注射可在 Darcy 定律的基础上引入初始条件和边界条件,借助有限元理论,可求得某一时刻树脂区域内的压力分布。同样,通过建立温度场模型得到温度分布的微分方程后,引入初始和边界条件,借助有限元和控制体法求解,可得出模腔中树脂在不同时刻的温度分布。根据温度分布结果,结合树脂固化反应动力学模型,可知不同时刻树脂的固化度。

注胶口和溢胶口位置及数量的选择和设定是 RTM 模具设计的关键,因为它不仅关系到 RTM 的成型工艺过程,还直接影响成型构件的质量。为了优化模具设计,确定工艺参数,应设计出几种方案,利用复合材料软件进行工艺仿真研究。

在进行树脂注射过程仿真分析时,由于纤维不进行力学性能分析,所以只需输入纤维的密度、热导率和热膨胀系数;分析树脂注射过程时需确定材料的密度和粘度;还要结合试验及相关资料,定义成型过程的工艺参数。某试验件的材料及工艺参数如表 1 所示。

在材料及其参数相同的条件下,分别对几种设计方案进行模拟,通过对参数的反复修改,多次仿真分析,对比得出一组最优方案的参数设置,如注胶口和溢胶口位置及数量、注射压力及注射温度等。采用优化方案及参数设置得到模拟结果为:合理的注胶口和溢胶口位置设计、最大压力为 0.22MPa (压力分布如图 1 所示),注射时间为 45min,约需树脂 0.081m³。试验及理论分析表明,该工艺仿真的参数设置合理,可用于指导实际生产。

3 国内外应用现状

国外学者从 20 世纪 80 年代开始从事 RTM 的数值模拟研究工作,并取得了重大进展;进入 90 年代以后,已经有不少用于 RTM 设计的软件投入到生产实践中。这些软件模

拟 RTM 成型过程,可以在零件制造前对产品进行设计和测试,优化产品性能和节约试验成本,还可以对成型温度、树脂流动速率、注射压力等成型参数进行优化。

国内从 20 世纪 90 年代中期开始研究 RTM 的数值模拟技术,并作了大量卓有成效的工作,但目前仍以理论方面的探索和研究为主,实际应用还处于初期阶段,主要用于小型次承力结构件的制造上。

热压罐成型工艺及数值模拟技术

1 热压罐成型工艺概述

热压罐成型工艺以其应用范围广、对构件加压灵活性强的特点而应用于先进复合材料结构,并在航空工业的主承力和次承力结构上得到广泛应用。固化过程是热压罐成型工艺的关键环节之一,固化工艺曲线的选择和设计是影响产品质量的重要因素。利用计算机建立树脂固化动

行仿真,从而优化出零件成型过程的固化工艺参数。

采用热压罐成型工艺,固化的材料参数主要指树脂和增强材料的参数,包括树脂的焓、粘度和密度,以及增强材料的强度、热膨胀系数等。固化过程中材料参数设置较多,与 RTM 的参数设置相似,固化的工艺参数主要包括温度曲线和压力曲线。固化过程中,温度对树脂的性能影响较大,可以通过设定某一常数或温度曲线来对边界条件的温度进行设置;纤维的浸润、纤维的压实及树脂基体中孔隙的形成等与压力密切相关,可以通过设置某一常数或压力曲线对热压罐内的压力进行设置。

利用复合材料工艺仿真软件的 CURE 模块对热压罐成型过程进行模拟,可以得到零件的固化时间、固化度以及固化过程的温度变化,通过对参数进行反复修改、不断模拟,可优化出较为适合的固化工艺参数。

(1) 固化度分布。

表1 材料及工艺参数

碳纤维	双马树脂	工艺参数
密度 = 1.7 ~ 2.1g/cm ³	密度 = 0.93 ~ 0.96g/cm ³	注胶口、溢胶口位置: 可变
热导率 = 10 ~ 160W · m ⁻¹ · K ⁻¹	粘度 = 0.25Pa · s	注胶口压力 = 0.1 ~ 0.3MPa
热膨胀系数 = 0 ~ 1.1 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹	-	溢胶口压力 = 0MPa
-	-	注射温度 = 90°C ~ 120°C

力学模型对热压罐成型工艺进行数值模拟,可以预测零件的固化温度、固化时间及固化过程中发生的物理化学变化等。通过反复模拟筛选工艺参数,从而最终达到确定和优化工艺参数的目的。

2 热压罐成型工艺数值模拟技术研究

热压罐成型的工艺仿真主要通过模拟对固化过程的模拟,对零件的固化温度、固化时间、固化度及零件的厚度变化等进

行模拟,从而优化出零件成型过程的固化工艺参数。

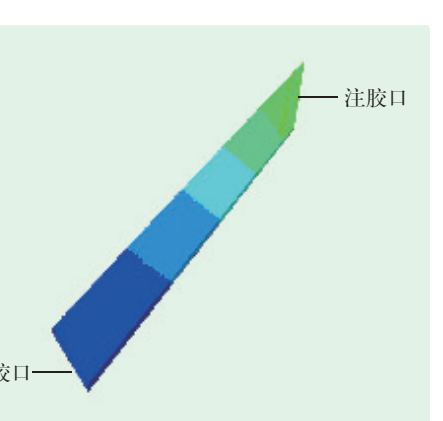


图1 注射过程压力分布

响生产效率,通过固化成型工艺的数值模拟,可筛选出适合的固化周期和相应的固化度。对某试验件反复模拟,可优化出固化时间为 10h,固化率为 100%。图 2 显示了制件在固化过程中不同阶段的固化度。

(2) 厚度变化分布。

制件的最终厚度不仅与含胶量

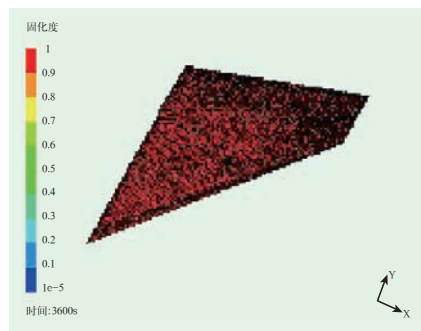


图2 固化度分布

的多少有关,还与预浸料的压实程度和吸胶纸的用量等有关。通过对制件厚度变化的模拟,可筛选出适合的吸胶纸用量及相应含胶量的预浸料等,有利于制成厚度均匀、性能良好的制品。用上述试验件对厚度变化进行仿真,通过工艺参数筛选,得到该制件的厚度与理论厚度(理论厚度为 3.4mm)相比变化较小,相同部位厚度最大公差变厚值为 0.27mm,图 3 显示了该试验件的厚度变化分布。

通过对热压罐成型工艺的模拟,得到试验件的固化时间为 10h,实际生产中的固化时间为 14h,固化率均为 100%;相同部位厚度最大公差变厚值为 0.27mm,该零件在实际生产中则为 0.25mm,与理论厚度较接近。分析及模拟显示表明,上述试验件在以上工艺参数条件下可实现完全固化。

复合材料制造技术数字化仿真研究进展

复合材料的最大特点之一就是固化过程中同时完成结构形成和材料成型,由于复合材料制造工艺种

类繁多,成型工艺中树脂流动、纤维的铺放、环境温度、固化温度等都会直接影响复合材料的结构性能。随着计算机技术的不断发展,应用复合材料工艺软件即可模拟不同工艺参数对成型的影响,还可避免或消除制造上的缺陷,实现复合材料构件的低成本制造。

1 国外现状

从国外情况看,复合材料制造技术得到了全面的发展,其先进的制造、加工方法及相应的数字化生产水平已能较好的满足当代新型大飞机制造的相应要求。

(1) 为了获得高性能、低成本的复合材料构件,一系列先进的低成本制造技术在航空领域得到了快速发展,如各类树脂转移成型技术(RTM、RFI 等)、三维编制技术及纤维自动铺放技术等。洛克希德·马丁公司采用 RTM 技术制造 JSF X-35 的整体化尾翼结构,使零件数目从 13 个减少为 1 个,取消了 1000 多个紧固件,相应的制造成本降低了 60% 左右。

(2) 在数字化制造技术方面,B777 飞机由于采用了设计与制造工艺一体化技术,使研制周期缩短 50%,制造成本降低近 25%;B787 飞机项目中大量采用数字化设计制造技术,使其研发周期较 B777 又缩短了 3 年时间。

(3) 欧洲空客公司采用自动铺放技术完成了 A380 的安定面蒙皮和中央翼盒以及 A330 和 A340 的水平安定面蒙皮的制造,最大限度地节省了时间和劳动力,生产效率大大提高。

国外的研究和应用成果表明,在复合材料构件的设计制造中,不仅要采用单项的数字化设计制造技术,还要建立集成的数字化设计制造环境,

从而实现复合材料构件数字化生产一体化。

2 国内现状

我国复合材料制造技术经过近 30 年的发展,虽然也取得了一定的进展,但与一些西方发达国家复合材料数字化生产线相比,无论是在 CAD/CAE 技术的研发方面,还是在数字化应用方面都存在着较大的差距。

(1) 复合材料构件数字化单项技术的应用已取得了一定成效,但各个系统之间仍然是孤立的,没有实现复合材料构件设计、制造技术到检验检测的一体化;

(2) 复合材料构件制造工艺的

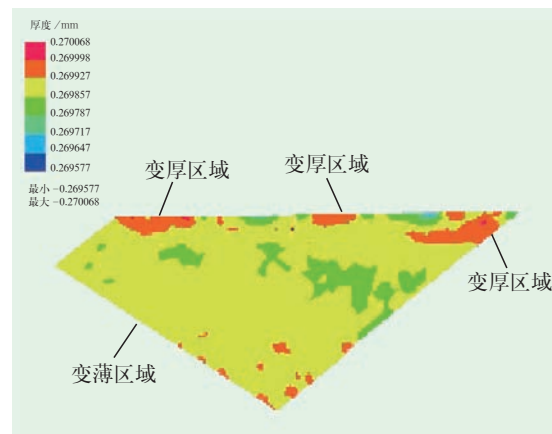


图3 厚度变化分布

仿真验证技术比较落后,导致新产品试制周期长,试验件数量大,研制成本居高不下;

(3) 各类材料没有形成统一的数据库,工艺技术及质量体系没有形成国家级的标准或规范。

结束语

大飞机复合材料制造技术的数值模拟将极大地推动我国复合材料的的生产技术水平,使复合材料制造技术向低成本化方向发展;同时该技术还可以大大缩短大飞机的研制周期,提高制品质量,为大飞机的制造提供技术支持。

(责编 徽凉)