

# 计算机仿真辅助复合材料 RTM工艺模具设计

Computer-Aided Composites Mould Design for RTM

ESI 中国 王 翹



王 翹

ESI 中国分公司复合材料产品经理, 长期致力于复合材料结构的性能分析及相关成型工艺仿真技术。

复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料,通过物理或化学的方法,在宏观上组成具有新性能的材料。相对钢筋混凝土等传统复合材料,近 50 年发展起来的,以碳纤维、玻璃纤维等作为增强材料的新型轻质高强复合材料又被称为先进复合材料。

经过几十年的发展,先进复合材料以其高比模量、高比强度、高耐腐

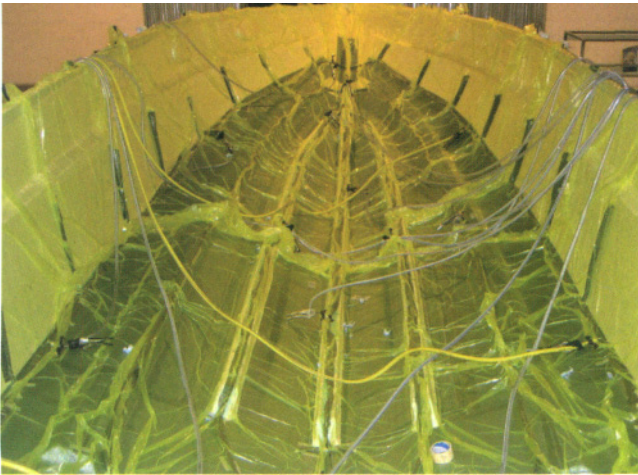
随着复合材料产品向着尺寸更大、更厚,结构更复杂,一体化程度要求更高等特点,RTM 工艺将更多得到各个工业领域的关注。作为 RTM 工艺相关设备中影响产品质量最显著的设备,RTM 模具设计也正面临着新一轮的挑战。

蚀性等优越的性能,逐渐在航空航天领域得到了广泛的应用。在航天领域,由于轻质复合材料在减重增程方面的明显效果,以及在耐热增强方面的优越性能,从头锥、喉衬到弹体、发动机外壳,越来越多的构件采用复合材料来生产。同样在航空制造业,在过去几十年中,复合材料走过了一段从仅用于整流罩等非承力构件,到用于尾翼等次承力部位,最后被成功地应用于军机和民机的主承载结构上的发展历程,使得复合材料不再仅仅扮演减重的角色,其增强性能和可靠性也得到了认可。

尽管如此,经过了几十年的工艺改进,复合材料的制造成本和原料成本降幅仍低于人们的预期。目前,碳纤维增强环氧树脂预浸料的原材料成本仍比铝合金高 5~10 倍,而制造

成本则更高。共固化技术虽然可以通过实现构件的高度整体化和减少零件数量的办法来降低成本,但实践证明其带来了更高的循环成本和非循环成本。另一方面,传统的预浸料/热压罐成型工艺并非对任何构件都试用。某些形状复杂或承受高集中载荷的构件虽然也曾尝试用这种工艺来生产,但往往因为过高的成本,最终被金属材料所替代。可见,高昂的成本在很大程度上降低了复合材料构件的市场竞争力,限制了复合材料结构的进一步推广。

可见,要进一步提高复合材料在航空航天工业中的用量,就必须寻求一种低成本的成型工艺,而树脂传递模塑(RTM)工艺是降低复合材料结构成本最有希望的工艺之一。这种工艺采用低粘度树脂注入闭合模具



复合材料船体VARI工艺成型

中,树脂沿已预先铺设或经预成型处理的增强材料间的空隙流动并浸润增强材料,注塑完成后在模具型腔内通过模具加热固化成型。与其他传统复合材料成型工艺相比,RTM有许多优点:适于生产形状复杂复合材料构件、无需胶衣树脂也可获得光滑的双表面、产品从设计到投产时间短、生产效率高、生产设备简单等。RTM模具和产品可采用CAD进行设计,模具制造相对容易,材料选择广泛。RTM成型的构件易于实现局部增强以及局部加厚,之前需要后期粘接的复杂构件(如蒙皮加筋结构)易于一次成型。RTM工艺成型过程中树脂挥发少,有利于劳动保护和环境保护。成本方面,相对于预浸料成型工艺,采用RTM工艺单位质量的价格可以减少30%~50%。而随着工艺水平的不断完善,RTM工艺也实现了在飞机主承力结构的成型。RTM工艺的应用为复合材料在航空航天工业中的进一步推广注入了新的活力。

### RTM工艺与模具设计

复合材料RTM成型工艺的生产流程包括以下5个步骤:

(1) 预成型:将增强体干料加工成零件需要的形状,之后放入型腔中,增强体与型腔内壁之间尽可能不

留缝隙;

(2) 注塑:树脂通过注射装置注入型腔,树脂在增强体的空隙间流动,并浸润增强体;

(3) 固化:待树脂充分填充型腔后,利用模具上的加热装置对型腔内的树脂进行加热,令其充分固化;

(4) 开模:将型腔的上下模分开,取出固化后的复合材料构件,如有可拆卸型芯和拆卸型芯;

(5) 剪边:对复合材料构件进行修剪,裁去为出入胶孔预留的边缘,并做适当的打磨,确保光洁。

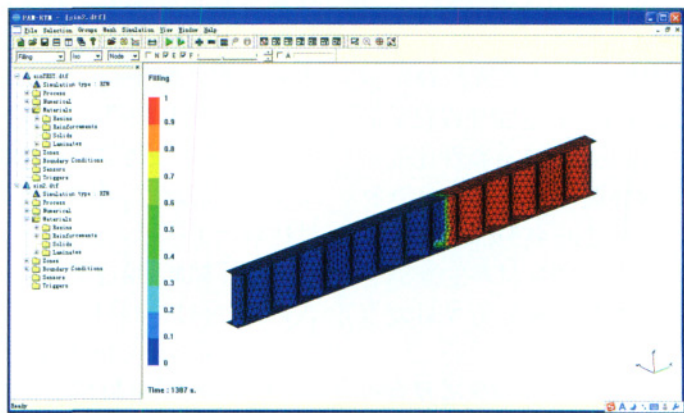
RTM工艺涉及的加工设备主要包括注射装置和模具两部分。模具的用途包括增强体预成型,确定构件形貌和树脂流动路径,对树脂加热固化、保障脱模等。根据所要生产的构件的不同和工艺方案的不同,模具具有极高的可设计性。根据复合材料结构与工艺一体化设计的特点,在零件设计的同时设计模具是十分必要的。

在大型构件的注塑过程中,如果注胶和出胶系统的选择不当,那么就会造成浇注时间过长,树脂在未充

满构件之前已经有一部分固化,导致树脂流动性变差,最终使构件不能完全成型,变为废品;注胶系统和出胶系统选择不当,会造成树脂使用量变大,浪费树脂,甚至需要修改后或设计工装/模具,从而导致工艺成本提高。此外,正确选择注胶和出胶系统还可以降低复合材料结构件在成型过程中出现的干斑数量,避免气泡的产生。对于复杂形状的结构件,合理安排注胶口和出胶口的位置和数量,适时地开启和关闭注胶口和出胶口,同样可以避免工艺过程中出现的问题,避免修改或重新设计工装/模具,提高产品的质量。

RTM工艺技术需要在生产之前设计、加工出合适的工装设备,确定合适的工艺参数。如何在较低的成本和周期下设计出既能满足生产工艺需要,又能保证产品质量要求的工装/模具一直是业界积极探索的热点之一。传统的方法是凭经验进行试模,不仅耗时耗力,而且难以保证产品质量,已经很难满足现代复合材料工装/模具设计生产的需要。在工艺工装设计和制造过程中采用数字化技术进行仿真模拟,是提高开发效率,降低生产成本和提高产品质量的有效途径之一。

随着CAE技术的不断发展,在工装/模具设计和产品制造之前,对设计和生产过程进行合理的数字化仿真,通过仿真结果来指导设计和生



正弦波形梁RTM注塑模拟

产,能够避免生产和设计过程中的问题,合理设计工装/模具,不失为提高产品质量和生产效率的重要途径。

### PAM-RTM 仿真辅助 模具设计

欧洲第一大工程软件供应商ESI集团早在十几年前就已经致力于这方面的研究,并且已经取得了骄人的成绩。PAM-RTM作为专业的RTM过程模拟软件,是ESI集团旗下复合材料价值链中重要的产品之一,能方便准确地模拟RTM工艺过程中树脂的流动过程、流动速度、压力分布、固化过程、温度分布等结果,优化模具设计和工艺参数,降低设计生产周期和费用,已成为工业界广泛使用的RTM设计开发工具。

PAM-RTM是高性价比的模拟液态复合成型的解决方案。将产生缺陷部件的风险降至最小,有助于掌握工具设计和制造过程。PAM-RTM提供了预设计的快速解决方案,并细化过程和模具优化、最终设计检验计算。而且,PAM-RTM计算上市时间并降低工具安装和注射过程的成本。

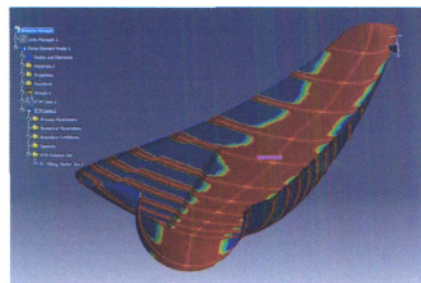
PAM-RTM模拟的工艺覆盖面广,囊括了包括闭模RTM、考虑模具加热的RTM、真空辅助RTM(VARI)、CRTM及ACRTM等在内的绝大多数主流RTM工艺;操作简便,工程师可以很快学会操作;计算迅速,利用DARCY定律求解,保证了计算的

精度;后处理结果直观,无须进入其他界面直接观察模拟结果;准确模拟树脂充模和固化过程,优化纤维与树脂的搭配,优化注胶口和出胶口位置,优化注胶流速和注胶压力。综上所述可以帮助企业大幅度减少设计时间和成本,由大量试模导致的经济成本,提高工作效率,提高企业设计能力。

注胶口和出胶口的位置是RTM模具设计工作需要最早确定的设计参数。不同的注胶口和出胶口位置选择会直接影响树脂的填充路径、总的填充时间、填充过程中树脂在腔体内的压力分布、树脂前锋流动速度、树脂损失量等,进而决定产品是否可能存在气泡、干斑的分布和数量等缺陷水平。不合理的注/出胶口选择甚至可能导致树脂无法充满等情况。

在模具设计之初采用计算机仿真技术模拟在不同的注/出胶口方案中树脂在型腔内的填充过程,就可以提前预测树脂能否填满整个型腔,总的注塑时间是否合理,以及树脂损失量等,从而减少试模次数和尽可能避免模具的重新设计。

对于结构复杂的复合材料构件,诸如蒙皮加筋结构的一次成型,往往需要多个注胶口和多个出胶口通过相应的开关进程控制来实现充分的填充。此时,即便采用了相同的注胶口/出胶口分布方案,注/出胶口的开关历程不同,填充情况也会截然不同。因此,模具设计不仅要给出模具



风机叶片VARI注塑仿真

的CAD数模,还要给出各个胶口的开关历程方案。

使用PAM-RTM,可以通过设置与相应传感器相关联的控制开关来控制各胶口的开关状态。从而模拟在各种开关历程中,树脂的注塑情况,从而快速高效地得到较为合理的树脂注塑方案。

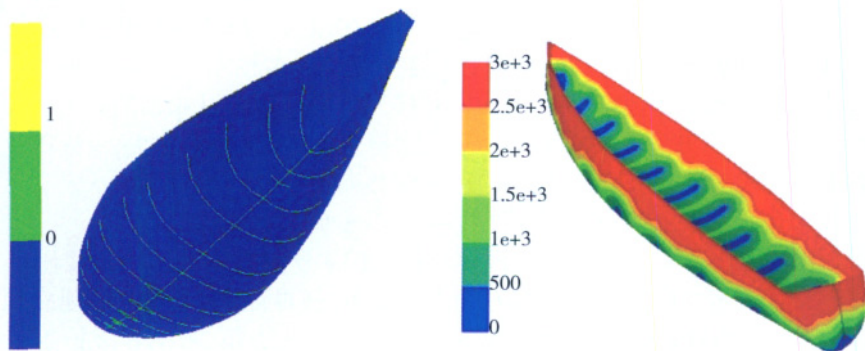
对于船体、风电叶片等大型复合材料产品往往采用真空辅助RTM成型工艺(VARI工艺)来生产。对于这些大尺寸的产品,不仅仅需要注胶口和注胶口位置的选择,往往还需要通过使用导流管道,将大的构件划分成多个填充区域,从而避免了树脂在增强体的多孔介质中传递过长距离,缩短注塑时间并降低宏观干斑出现的可能。

采用计算机仿真技术能够快速预报不同的导流方案对注塑过程的影响,帮助模具设计人员快速地确定较为合理的导流管道分布。

### 结束语

随着复合材料产品向着尺寸更大、更厚,结构更复杂,一体化程度要求更高等特点,RTM工艺将更多得到各个工业领域的关注。作为RTM工艺相关设备中影响产品质量最显著的设备,RTM模具设计也正面临着新一轮的挑战。将计算机仿真技术融入到RTM模具的设计工作中能够有效地提高设计效率,尽可能地避免模具的重新设计,降低多次试模引起的时间成本和经济成本。

(责编 小城)



(a) 导流管道分布

(b) 树脂填充时间

船体VARI注塑模拟(PPE)