

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.004

## 大型高性能复合材料构件 RTM 工艺进展

赵安安<sup>1</sup>, 杨文凯<sup>2</sup>, 于飞<sup>1</sup>, 刘文浩<sup>2</sup>, 鲁世红<sup>2</sup>

(1. 西安飞机工业集团有限责任公司制造工程部, 西安, 710089; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:** 航空航天工业的飞速发展对大型、高性能先进树脂基复合材料构件的高效、低成本制造提出了迫切需求。树脂转移模塑成型 (Resin transfer molding, RTM) 是一种制造先进纤维增强体树脂基复合材料的工艺技术, 与现有的热压罐技术相比具有设备结构简单、生产效率及制造成本低等优点。本文综述了两种典型的 RTM 工艺: 真空辅助树脂转移模塑成型 (Vacuum assisted-resin transfer molding, VA-RTM) 与轻质树脂转移模塑成型 (Light-resin transfer molding, L-RTM) 的技术研究与应用现状, 指出了这两种工艺在制造大型高性能构件时存在的问题, 并对 RTM 工艺过程多场耦合数值仿真、仿真新方法 & 多功能仿真的研究现状及技术难点进行了总结, 基于此对 RTM 工艺发展趋势进行了探讨, 旨在为实现快速工艺优化, 获得高效、高性能和大型构件的 RTM 工艺应用提供参考。

**关键词:** 复合材料; 树脂转移模塑成型; 数值模拟

**中图分类号:** V26      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2020)01-0039-09

## RTM Process for Large-Scale and High-Performance Composite Components

ZHAO An'an<sup>1</sup>, YANG Wenkai<sup>2</sup>, YU Fei<sup>1</sup>, LIU Wenhao<sup>2</sup>, LU Shihong<sup>2</sup>

(1. Manufacturing Engineering Department, Xi'an Aircraft Industry Group, Xi'an, 710089, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** In recent years, the rapid development of aerospace industry has put forward an urgent demand for high efficiency and low cost manufacturing of large and high-performance advanced resin matrix composites. Resin transfer molding (RTM) is a technology for manufacturing advanced fiber reinforced resin matrix composites. Compared with the existing hot-pressing technology, RTM has the advantages of simple equipment structure, high production efficiency and low manufacturing cost. In this paper, the research and application status of two typical RTM processes—Vacuum assisted-Resin transfer molding (VA-RTM) and Light-Resin transfer molding (L-RTM) are reviewed. The existing problems of these two processes in manufacturing large high performance components are pointed out. The research status and technical difficulties of multi-field coupled numerical simulation, new simulation methods and multi-function simulation of RTM process are summarized. Based on above conclusions, the development trend for RTM process is discussed, which is beneficial to provide reference for realizing rapid process optimization and obtaining high efficiency, high performance and large components in RTM process.

**Key words:** composite material; resin transfer molding (RTM); numerical simulation

先进树脂基复合材料具有强度高、质量轻、抗疲劳性能好以及抗腐蚀能力强等优点, 近年来在航空航天工业的用量持续增加<sup>[1-4]</sup>, 如新一代的宽体客机中复合材料的用量已占到飞机结构总重量的

**收稿日期:** 2018-12-06; **修订日期:** 2019-03-10

**通信作者:** 鲁世红, 女, 教授, 博士生导师, E-mail: lush@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 赵安安, 杨文凯, 于飞, 等. 大型高性能复合材料构件 RTM 工艺进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 39-47. ZHAO An'an, YANG Wenkai, YU Fei, et al. RTM process for large-scale and high-performance composite components[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 39-47.

一半以上<sup>[5]</sup>;UH-60直升机中机身典型结构件已使用复合材料制造<sup>[6]</sup>,波音公司生产的RAH-66“科曼奇”武装直升机中如舱门、传动轴和减速器箱等部件已大量应用复合材料,其重量占全机重量的51%<sup>[6]</sup>。常见的飞机零件,例如支架及扭力连杆使用复合材料制造后质量相比于金属材料构件降低30%以上且力学性能良好<sup>[7]</sup>。先进复合材料的用量百分比已成为衡量现代飞机发展水平的重要标志之一,而中国飞机复合材料用量与发达国家存在一定的差距,尤其是飞机起落架舱、机舱门和机翼等大型复合材料构件的高效、低成本制造已成为中国航空航天制造业需要解决的技术瓶颈。

树脂转移模塑成型(Resin transfer molding, RTM)工艺是一种典型的纤维增强体树脂基复合材料液体模塑成型工艺,其工艺过程主要为:(1)根据所需制件的形状及力学性能要求设计纤维预成型体;(2)在模具内铺放预先设计好的纤维预成型体,合模并进行压缩,使纤维预成型体获得相应体积分数;(3)在专用的注射设备下,以一定的压力和温度将树脂注入模具中排除空气并与纤维预成型体浸润;(4)在纤维预成型体完全被树脂浸润后再以一定的温度进行固化反应,直至固化反应完成,取出最终的制件。

从产品性能的角度来看,该工艺生产的制件具有较高的纤维体积分数,且能够根据具体的制件形状来进行纤维局部增强设计,有利于提高产品性能<sup>[8-11]</sup>。从生产成本的角度来看,复合材料构件成本的70%来源于制造成本,所以如何降低制造成本是复合材料发展中亟待解决的重要问题,相较于传统制造树脂基复合材料的热压罐技术,RTM工艺不需要价格昂贵的罐体,极大地降低了制造成本,且RTM工艺本身制造的零件不受罐体尺寸的限制,制件尺寸范围较为灵活,能够制造大型、高性能复合材料构件<sup>[12-15]</sup>。总的来看,RTM工艺在复合材料制造领域已经得到了广泛的应用和快速的发展,势必成为复合材料制造的主导工艺。

## 1 RTM工艺技术研究现状

近年来,航空航天制造业中复合材料产品从非承力部件、小型制件逐步向主承力部件及大型一体化制件发展,对大型、高性能复合材料制造需求迫切,因此发展了例如真空辅助树脂转移模塑(Vacuum assisted-resin transfer molding, VA-RTM)和轻质树脂转移模塑成型(Light-resin transfer molding, L-RTM)等工艺技术。

### 1.1 真空辅助树脂转移模塑工艺

VA-RTM工艺是由传统RTM工艺衍生而来的一种工艺技术。该工艺过程主要是利用真空泵等设备将纤维预成型体所在的模具内部抽真空,使树脂在真空负压的作用下注射进入模具,实现对纤维预成型体的浸润过程,并最终在模具内部固化成型,得到所需形状及纤维体积分数的复合材料制件,其工艺装置结构如图1所示。

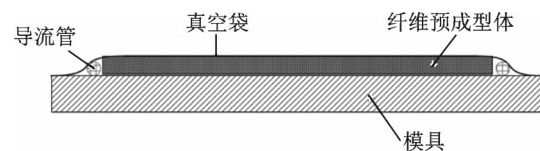


图1 VA-RTM工艺装置结构

Fig.1 Device structure of VA-RTM

相比于传统的RTM工艺,VA-RTM工艺技术对模具内部采用了抽真空,能够降低模具内部的注射压力,同时大大减少了模具及纤维预成型体的变形,从而降低了工艺对设备及模具的性能要求,也使RTM工艺能够使用更加轻质的模具,有利于降低生产成本,因此该技术更加适用于制造大型复合材料制件,例如泡沫夹心复合材料板是航空航天领域常用的大型部件之一。Chen等<sup>[16]</sup>针对VA-RTM制造泡沫夹心复合材料板型制件进行了实验研究,他们提出依靠VA-RTM工艺的真空辅助技术能够十分便捷地制造出泡沫夹心复合材料板,同时该工艺能够有效控制泡沫夹芯板的纤维含量并降低局部的缺陷形成。Mohamed等<sup>[17]</sup>通过VA-RTM制备了泡沫夹心复合材料构件,通过试验与数值模拟相结合的方式探究了该构件的力学性能,结果显示VA-RTM工艺制备的制件力学性能良好。国内赖家美、王科等<sup>[18-19]</sup>通过VA-RTM工艺制备了嵌入加强筋的缝合泡沫夹心复合材料结构件,他们提出该工艺成型构件的尺寸范围大,特别适用于制造大型且厚度较大的缝合泡沫夹层复合材料构件。

传统的RTM工艺中极易产生树脂流动不均匀,造成纤维预成型体局部区域树脂浸润不充分,从而产生干斑缺陷。与此同时,树脂的不充分浸润也会造成制件在微观结构中产生气泡缺陷,严重影响制件质量。事实上,VA-RTM工艺所采用的模具内部抽真空技术有利于提高树脂对纤维预成型体的浸润效果,从而提高制件的机械性能。Jishi等<sup>[20]</sup>通过VA-RTM工艺制备了一种新型复合材料晶格结构制件,并通过压缩试验验证了制件的力学性能较好。Ccen等<sup>[21]</sup>通过VA-RTM工艺制备了树脂基复合材料制件,通过扫描电镜分析了制件内部的结构,他们提出VA-RTM技术能够使树脂与

纤维之间有效结合,从而提高了制件本身的力学性能。Aruniit等<sup>[22]</sup>通过实验研究了VA-RTM工艺制件的力学性能,他们指出VA-RTM工艺能够显著降低制件内部气泡含量同时能够成型纤维含量更高的制件,因此该工艺制备的复合材料制件具有良好的机械性能。

与此同时,许多学者针对VA-RTM工艺还做了进一步优化研究。Johnson等<sup>[23-26]</sup>研究了VA-RTM工艺过程中气泡及干斑的形成过程,并提出了一种模具局部感应加热的方法来有效降低气泡的形成,该方法利用电磁感应技术对模具进行局部加热,降低此处树脂的黏度,从而使树脂在纤维渗透率较小的部位流动更加均匀,经试验验证该方法十分有效。

Simacek等<sup>[27]</sup>通过试验研究发现VA-RTM工艺过程中存在着树脂后填充阶段,即树脂在到达模具的排气口后仍会在模具内部进行一段时间的流动,因此需要补充注射直至模具内压力变为常数或者树脂固化度达到凝胶点。由于树脂在后填充阶段的流动会造成制件厚度不断变化,对最终制件的尺寸精度有较大的影响,因此他们提出在模具内部设置压力传感器来监测树脂压力直至压力恒定值后结束充模过程,并通过多组的试验数据建立了VA-RTM树脂后填充阶段压力变化数学模型,此方法有利于提高VA-RTM制件的尺寸精度,特别是大型构件的厚度精度。

Amirkhosravi等<sup>[28]</sup>提出了一种磁力强化的VA-RTM工艺技术,如图2所示为技术原理图,该技术利用真空袋上方放置的磁体及磁性下模之间产生的磁力作用将纤维预成型体压缩之后完成充模过程,纤维预成型体在磁力的压缩作用下降低了内部的透气性,从而有利于降低制件内部气泡的形成,经试验验证在磁力作用下的VA-RTM工艺制件内部气泡含量低于1%,而传统的VA-RTM工艺制件内部气泡含量在6%左右。与此同时,磁力作用使纤维含量增加到50%以上,高纤维含量有利于提高制件的机械性能,经测试磁力强化下VA-RTM制件抗弯性能提高了28%以上,证明该技术能够制备高性能的复合材料构件。

总的来看,VA-RTM工艺十分适用于制备大

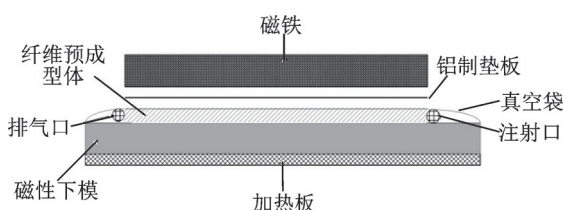


图2 磁力强化VA-RTM工艺原理

Fig.2 Device structure of magnetic VA-RTM

型、高性能的航空航天复合材料构件,但该工艺过程在国内仍为半机械化生产,产品制造效率较低,且工艺参数设计大多依靠经验,尚未实现智能设计,产品质量无法得到精确控制。与此同时,有许多研究<sup>[29-30]</sup>指出该工艺过程中容易在树脂流动方向产生压力梯度,特别是采用真空袋时树脂流动前沿会出现一定的压力松弛,从而影响树脂浸润,使制件内部产生气泡并降低产品力学性能,同时压力分布不均会造成制件厚度分布不均匀,影响最终制件的外观质量,这也是该技术目前尚要解决的技术难题。

## 1.2 轻质树脂转移模塑工艺

L-RTM工艺是在传统VA-RTM工艺技术基础上发展而来的一种新型技术。如图3所示,该工艺技术主要的特点就是下模采用金属等刚性模具,上模采用半刚性的轻质模具,模具内部设计为双重密封结构,外部通过真空来固定上模,内部采用真空来导入树脂。由于该工艺的上模采用了半刚性模具,且模具内部为真空状态,因此大大降低了模具内部的压力及模具本身的制造成本,使此项技术能够制造大型复合材料制件。

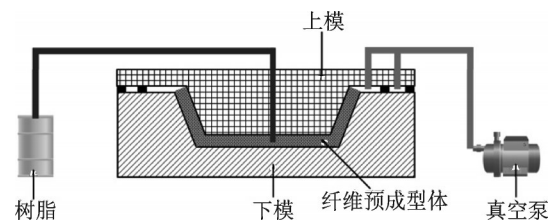


图3 L-RTM工艺装置结构

Fig.3 Device structure of L-RTM

相比于传统VA-RTM工艺,该工艺获得的制件厚度更加均匀且上下表面质量优越,同时上模采用半刚性材料能够进行重复利用,避免了VA-RTM工艺过程中真空袋的浪费,因此该技术十分适用于制造表面质量要求较高的航空航天复合材料制件。然而在实际生产过程中,该工艺仍存在一定的技术难点<sup>[31-34]</sup>:

(1)由于上模采用的是半刚性材料,若材料的刚性不够极易导致在抽真空固定模具过程中产生坍塌,从而使制件厚度不均匀并影响制件的表面质量,同时模具的刚性也影响着模具本身的寿命,如何选择合适的半刚性材料作为L-RTM的模具是该工艺应用的技术难点之一。

(2)由于L-RTM工艺技术模具内部采用了抽真空,因此模具的密封性对工艺过程能否顺利进行起到了至关重要的影响,若密封性不足会造成制件内部树脂浸润不充分,从而影响制件性能。故模具

密封技术是该工艺应用的技术难点之一。

(3)L-RTM工艺所用的树脂应在充模过程中保持较低的黏度从而降低注射压力,提高模具的使用寿命,如何开发合适的树脂基体是该工艺应用的技术难点之一。

(4)L-RTM工艺过程中通常需要在模具上设计流道来促进树脂均匀流动,若流道设计不合理,会使制件出现干斑、富脂等缺陷,严重影响制件的最终质量,特别是对于形状复杂的三维制件,如何合理设计模具流道也是该工艺应用的技术难点之一。

针对以上技术难点,研究者们也在对L-RTM工艺进行不断优化。针对L-RTM工艺中模具寿命较短的问题,JHM Technologies公司提出一种可更换模具表层的分体模具来代替传统的L-RTM模具,从而延长了模具的寿命,降低了制造成本<sup>[31]</sup>。Composite Integration Ltd公司研发了专用于L-RTM工艺的树脂注射机,极大提高了注射的效率,使该项技术的自动化生产成为可能<sup>[31]</sup>。Garay等<sup>[32]</sup>提出了一种利用碳酸钙改性L-RTM专用基体树脂的方法,他们提出利用碳酸钙可以有效延长树脂的凝胶时间,从而提高树脂在充模过程中的可操作时间,有利于该技术制造大型的复合材料构件。

总的来看,L-RTM工艺能够制造大型、高性能的航空航天制件,且相比于VA-RTM工艺,获得的制件表面质量更高。但目前在中国L-RTM工艺的配套设备、工艺参数设计及树脂研发尚不成熟,与国外相比有一定的差距,尚未实现智能设计及自动化生产,产品制造效率低且质量难以精确控制。

## 2 RTM工艺过程数值模拟研究现状

数值模拟是一种强大的计算机辅助设计工具,能够有效仿真实际工艺过程,并实现工艺参数快速优化设计,避免试验研究高成本、低效率的问题。特别是RTM工艺为典型的闭模制造技术,树脂流动过程及固化反应难以通过试验来进行有效检测,而传统的工艺参数设定大多依据经验获得,难以保证其合理性,对于航空航天领域的先进大型高性能复合材料构件,更需要预先的优化设计来降低最终的研发成本,同时提高产品质量,因此通过数值模拟来实现RTM工艺过程的快速优化设计已成为现在研究的热点。

### 2.1 多场耦合下RTM工艺过程数值模拟

在实际RTM生产过程中,通常利用设备对树脂进行加热来降低其黏度,从而提高注射效率、降

低模具内压力并提高树脂的浸润效果,最终得到高性能复合材料制件,因此RTM工艺过程中存在着树脂流动场、温度场以及树脂固化反应场等多个场变量。实际生产过程中为了确保制件的生产质量,需要实时掌握各种场变量的变化情况,而温度及树脂反应难以通过设备进行监控,因此多场耦合数值模拟是解决此问题的有效工具。与此同时,为了提高数值模拟结果的精确性,应使仿真条件尽可能地接近实际生产过程,故多场耦合计算是提高RTM工艺过程数值模拟精度的重要方法之一。然而多场耦合计算不仅需要建立合适的数学模型,更要综合考虑各个物理场的联合计算问题,并开发出相应的程序来实现数值模拟,整个过程十分繁杂,特别是如何实现三维复杂制件的多场耦合数值模拟已成为现在研究的重点和难点。

Yang等<sup>[35-36]</sup>充分考虑了温度对于树脂流动过程的影响,并实现了三维温度场/三维流动场的非等温RTM工艺过程数值模拟,如图4,5所示,通过此数值模拟工具能够实现三维温度场及固化度场的仿真预测,对生产有重要的指导意义。

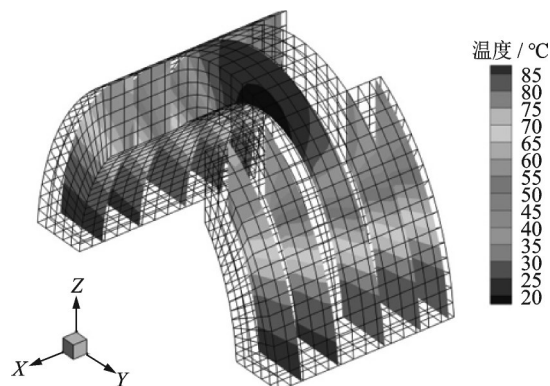


图4 RTM工艺过程三维温度场预测<sup>[35]</sup>

Fig.4 Three-dimensional temperature field prediction of RTM<sup>[35]</sup>

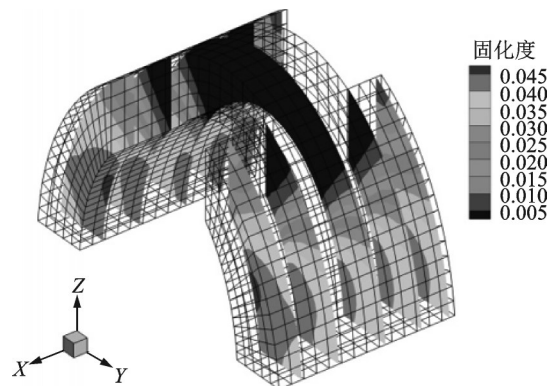


图5 RTM工艺过程三维固化度场预测<sup>[35]</sup>

Fig.5 Three-dimensional curing degree field prediction of RTM<sup>[35]</sup>

Chang<sup>[37]</sup>利用有限元差分法实现了真空辅助压缩树脂转移模塑成型(Vacuum assisted-compression resin transfer molding, VA-CRTM)工艺过程的非等温数值模拟,其中的数学模型采用了一维流动/二维热传导的方式进行建立,因此数值模拟计算速度较快。Saad等<sup>[38-40]</sup>提出了一种快速数值模拟方法,能够实现非等温RTM工艺过程的快速仿真,并通过对比解析解验证了数值模拟结果具有较高的精度。

在国内,山东大学的丁研羽等<sup>[41-43]</sup>充分考虑树脂化学流变行为对RTM工艺过程的影响,通过自主开发的程序实现了非等温RTM工艺过程仿真,探究了边缘效应对RTM工艺过程的影响,并提出考虑树脂化学流变特性及边缘效应能够使数值模拟更加接近实际过程,有利于提高数值模拟结果的准确性。

上海交通大学的Shi等<sup>[44]</sup>建立了三维流场/三维温度场RTM充模过程数学模型,并通过自主开发的程序实现了三维非等温RTM充模过程数值模拟,能够针对三维复杂形状的制件进行工艺参数优化设计。

总的来看,多场耦合下RTM工艺过程数值模拟的研究已经趋于成熟,特别是能够针对三维复杂制件进行数值模拟计算,提高了数值模拟的有效性和适用性,使数值模拟程序能够对大型高性能复合材料构件的制造起到有效的指导作用。但从数值模拟的程序上来看,大多是自主开发的程序,因此本身的推广性较差;另外多场耦合计算中树脂化学反应数学模型计算的结果与实际过程仍有一定差距,这与测试设备的精度及操作方法均有关,因此如何提高数学模型的精度是未来研究的重点。

## 2.2 RTM工艺过程数值模拟新方法

近年来,RTM工艺过程数值模拟的方法出现了较大的革新,逐渐发展出了例如移动粒子法、多尺度模拟等新方法,极大提高了数值模拟的适用性及结果的准确性,使仿真结果更加接近实际生产过程,对工艺中模具设计、注射参数的优化选择以及缺陷预测能够进行有效指导。

Okabe等<sup>[45]</sup>利用移动粒子半隐式方法实现了RTM充模过程的数值仿真,该方法将树脂划分为各个粒子,通过对粒子的移动追踪来实现树脂的流动仿真,特别是此方法能够有效追踪树脂在纤维丝内部及纤维丝间的流动,实现了微观气泡形成的仿真预测,能够有效预测工艺过程中制件的气泡分布,有利于提高制件质量。

有关学者经过研究发现树脂在流动前沿存在着非饱和流动,即传统的数值模拟使用的宏观流动

模型并不能够准确描述树脂的真实充模过程,而工艺过程中需要获得树脂的真实流动状况来设计模具,因此针对RTM充模过程的多尺度流动仿真成为研究的新热点。

Carlone等<sup>[46]</sup>建立了RTM充模过程多尺度流动数学模型,该模型充分考虑了树脂在纤维丝内部及纤维丝之间的流动,通过求解该数学模型实现了树脂在纤维预成型体中非饱和流动过程的数值模拟,该仿真能够有效检测树脂的微观流动,提高了流动仿真的精度,对工艺过程中模具流道的优化设计具有重要的推动作用。

Tan等<sup>[47]</sup>建立了非等温RTM充模过程多尺度数学模型并实现了数值模拟,通过该数值模拟方法研究了温度对于树脂非饱和流动的影响,研究发现温度在纤维丝内部与纤维丝之间有一定差异,因此多尺度模拟更能反应充模过程真实的温度变化。

Yeager等<sup>[48]</sup>提出了一种将毛细压力和孔隙压力结合起来预测树脂流动的新数值模拟方法,该方法考虑了纤维体积分数分布不均匀对孔隙分布的影响,通过模拟树脂在纤维中的流动来预测气泡的形成,对实际生产中排除制件的气泡缺陷有重要参考意义。

Gascón等<sup>[49]</sup>提出了一种气液两相流双尺度RTM充模过程数学模型并实现了数值模拟,该模型在压力方程中引入空气压缩,因此可以对较低恒定树脂注入流量下的流动行为进行数值仿真预测。

国内魏雅君等<sup>[50]</sup>基于流体体积系数(Volume of fluid, VOF)方法实现了RTM充模过程的多尺度非饱和流动仿真,能够对树脂微观流动进行有效预测,通过对法兰盘制件的数值求解验证了仿真结果的可行性。

周云飞等<sup>[51]</sup>研究了纤维预成型体结构对于树脂浸渍过程的影响,建立了二维双尺度气液两相流模型并利用有限元体积法求解了数学模型,通过研究发现树脂黏度对于气泡的形成及排除过程具有重要的影响。

总的来看,RTM数值模拟新方法的提出无疑提高了仿真的精度,但大多数新方法计算效率过低,特别是多尺度、多相流的数值模拟,由于计算数据的增加造成其计算速度过慢,影响了设计的效率,因此如何在开发RTM数值模拟新方法的同时提高计算效率是研究的重点。

## 2.3 多功能RTM工艺过程数值模拟

随着RTM工艺过程数值模拟方法的不断革新,如何提高数值模拟程序的功能性也成为了研究的重点,特别是RTM工艺过程中许多参数变量需要大量试验来获取,例如注射口选取、注射参数优

化以及模具结构设计等,若利用数值模拟程序实现以上功能无疑能够提高设计的效率并降低成本。

Wang等<sup>[52]</sup>提出了一种通过数值模拟来寻找制件重心的方法,结果显示此方法确定的注射口能够显著降低树脂的充模时间,为工艺过程中注射口位置优化设计提供了强大工具。

Gupta等<sup>[53]</sup>针对工艺过程中模具合模力难以进行有效监控的问题,提出了一种通过数值模拟来预测RTM充模过程合模力的方法,运用此方法探究了非等温RTM充模过程中树脂温度及模具温度对于模具内压力及合模力的影响,他们指出树脂温度低于模具温度有利于降低模具内压力及充模过程中的合模力。

国内哈尔滨工业大学的Yang等<sup>[54]</sup>通过研究树脂充模过程中纤维预成型体渗透率随着压缩及剪切变化的变化规律,提出了一种适用于C-RTM工艺过程的数值模拟方法,该方法充分考虑C-RTM工艺过程中纤维变形对充模过程的影响,能够实现C-RTM工艺过程中模具结构设计、参数优化等技术难题。

金天国等<sup>[55]</sup>提出了一种通过数值模拟来预测纤维预成型体在压缩变形下的渗透率的方法,能够快速计算渗透率,避免了繁杂的渗透率测试试验,有利于提高工艺参数设计效率。

总的来看,多功能数值模拟能够针对RTM工艺过程中的特殊问题实现快速优化设计,从而对产品制造过程起到有效的指导作用,但数值模拟本身的功能性仍有待提高,特别是大部分多功能数值模拟程序仅能针对简单二维制件进行设计,因此应用范围十分有限,另外多功能程序本身计算时简化的条件过多,特别是仿真计算中大多简化为单物理场的计算,无疑降低了计算结果的精度,造成参数设计的合理性难以保证,因此多物理场耦合计算下的多功能数值模拟是未来研究的重点。

### 3 总结与展望

本文以航空航天工业对大型、高性能纤维增强体树脂基复合材料高效、低成本制造的迫切需求为背景,综述了两种典型的RTM工艺——VA-RTM和L-RTM在国内外的研究现状,并针对工艺过程数值模拟的最新研究成果与技术难点进行了总结。从工艺技术的研究现状来看,VA-RTM工艺和L-RTM工艺十分适用于制造大型、高性能树脂基复合材料制件,但这两种工艺技术存在有一定的技术难度,尤其是工艺过程中压力松弛现象、模具密封、半刚性模具材料选择、先进树脂体系开发及模具流

道优化设计等问题还需要解决。另外,如何实现加工过程工艺参数智能设计、精确控制产品质量及自动化快速制造是应用研究的关键点,而中国在工艺技术、设备研发和树脂体系开发等方面相对落后,如何实现上述RTM工艺制造目标将会是科研工作者的研究重点。

从数值模拟最新研究成果来看,RTM工艺过程数值模拟更加注重仿真结果的精确性及仿真系统的功能性。为了提高仿真结果的精确性,需要减少仿真计算中的简化条件,建立合理的数学模型,特别是针对不同树脂反应体系需要选择合适的数学模型进行描述,最终实现多物理场及多尺度下的耦合计算,使计算条件更加接近实际过程,同时需要对仿真算法进行改进从而提高多物理场耦合仿真的计算效率;为了提高仿真系统的功能性,需要对实际生产过程进行进一步的研究,尤其是工艺过程中缺陷预测、注射参数计算以及模具流道优化设计等功能还有待完善,与此同时,多功能数值模拟程序也需要保证结果的准确性,因此实现多物理场耦合计算下的多功能数值模拟是今后研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] 范玉青,张丽华.超大型复合材料机体部件应用技术的最新进展——飞机制造技术的新跨越[J].航空学报,2009,30(3):534-543.  
FAN Yuqing, ZHANG Lihua. New development of extra large composite aircraft components application technology—Advance of aircraft manufacture technology—Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 534-543.
- [2] 任天宁,朱光明,聂晶.形状记忆聚合物复合材料可展开结构的研究进展[J].航空材料学报,2018,38(4):51-59.  
REN Tianning, ZHU Guangming, NIE Jing. Research progress on deployable structures of shape memory polymer composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(4): 51-59.
- [3] 杨乃宾.新一代大型客机复合材料[J].航空学报,2008,29(3):596-604.  
YANG Naibin. Composite structures for new generation large commercial jet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 596-604.
- [4] 曹春晓.一代材料技术,一代大型飞机[J].航空学报,2008,29(3):701-706.  
CAO Cunxiao. One generation of material technology, One generation of large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 701-706.
- [5] 李培旭,陈萍,苏佳智,等.复合材料先进液体成型技术的航空应用与最新发展[J].玻璃钢/复合材料,

- 2016(8): 99-104.
- LI Peixu, CHEN Ping, SU Jiazhi, et al. The recent development of advanced liquid composite molding and its application in aviation[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2016(8): 99-104.
- [6] 赵秀芬, 刘刚, 李伟东. 液态成型复合材料在直升机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2017, 536(17): 60-64. ZHAO Xiufen, LIU Gang, LI Weidong. Application of liquid molding composites in helicopter[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 536(17): 60-64.
- [7] 陈卢松. 复合材料液体成型工艺在民用飞机领域的应用进展[J]. *塑料*, 2018, 47(2): 93-96. CHEN Lusong. Progress of resin transfer moulding technique on commercial aircraft[J]. *Plastics*, 2018, 47(2): 93-96.
- [8] 马金瑞, 黄峰, 赵龙, 等. 树脂传递模塑技术研究进展及在航空领域的应用[J]. *航空制造技术*, 2015, 483(14): 56-59. MA Jinrui, HUANG Feng, ZHAO Long, et al. Development and application of resin transfer molding in aviation[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 483(14): 56-59.
- [9] 杨杰, 席平. 树脂传递模塑制品的缺陷控制及流程优化[J]. *航空制造技术*, 2015, 475(6): 77-79. YANG Jie, XI Ping. Defect control and process optimization of resin transfer molding products[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 475(6): 77-79.
- [10] KIM J I, HWANG Y T, CHOI K H, et al. Prediction of the vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process considering the directional permeability of sheared woven fabric [J]. *Composite Structures*, 2019, 211: 236-243.
- [11] BANCORA S P, BINETIUY C, ADVANI S G, et al. Effective permeability averaging scheme to address in-plane anisotropy effects in multi-layered preforms. [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 113: 359-369.
- [12] 曾小苗, 张博明, 殷莎. 非热压罐成型技术在通用飞机的应用发展[J]. *纤维复合材料*, 2016, 33(2): 11-14. ZENG Xiaomiao, ZHANG Boming, YIN Sha. The out-of-autoclave molding technology in the application of general aircraft development[J]. *Fiber Composites*, 2016, 33(2): 11-14.
- [13] 唐见茂. 航空航天复合材料非热压罐成型研究进展[J]. *航天器环境工程*, 2014, 31(6): 577-583. TANG Jianmao. Progress in the out of autoclave process in aerospace composites[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2014, 31(6): 577-583.
- [14] 梁栋, 蒋云峰, 熊志建, 等. 树脂基复合材料关键制造技术的研究进展与制约因素分析[J]. *材料导报*, 2011, 25(7): 5-8. LIANG Dong, JIANG Yunfeng, XIONG Zhijian, et al. Research and development of key manufacturing technology and restriction for resin composites[J]. *Materials Review*, 2011, 25(7): 5-8.
- [15] 高国强. 复合材料 LCM 整体成型工艺发展及应用[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2014(9): 105-108. GAO Guoqiang. Development and application of LCM composite molding technology[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014(9): 105-108.
- [16] CHEN Q, LINGHU T, GAO Y, et al. Mechanical properties in glass fiber PVC-foam sandwich structures from different chopped fiber interfacial reinforcement through vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 144: 202-207.
- [17] MOHAMED M, ANANDAN S, HUO Z, et al. Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures[J]. *Composite Structures*, 2015, 123: 169-179.
- [18] 赖家美, 陈乐乐, 王科, 等. 嵌入加强筋的缝合泡沫夹芯结构复合材料 VARTM 工艺树脂充填模拟及验证[J]. *高分子材料科学与工程*, 2017, 33(7): 99-105. LAI Jiamei, CHEN Lele, WANG Ke, et al. Simulation and verification of resin flow of ribs embedded in stitched foam core sandwich structure by VARTM process[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(7): 99-105.
- [19] 王科, 赖家美, 鄢冬冬, 等. 缝合泡沫夹芯结构复合材料 VARTM 工艺树脂充填模拟及验证[J]. *高分子材料科学与工程*, 2015, 31(11): 124-129. WANG Ke, LAI Jiamei, YAN Dongdong, et al. Process simulation and verification of stitched foam core sandwich structure by VARTM process[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2015, 31(11): 124-129.
- [20] JISHI H Z, UMER R, CANTWELL W J. The fabrication and mechanical properties of novel composite lattice structures[J]. *Materials & Design*, 2016, 91: 286-293.
- [21] CCEN V, SEKI Y, SARIKANAT M, et al. FTIR and SEM analysis of polyester and epoxy-based composites manufactured by VARTM process[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 108(4): 2163-2170.
- [22] ARUNIIT A, HERRANEN H, MILLER K. Comparative study of the VARTM, VAP and MTI vacuum infusion processes[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 674: 6.
- [23] JOHNSON R J, PITTCUMANI R. Flow control using localized induction heating in a VARTM

- process[J]. *Composites Science & Technology*, 2007, 67(3): 669-684.
- [24] JOHNSON R J, PITTCHUMANI R. Simulation of active flow control based on localized preform heating in a VARTM process[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(10): 1815-1830.
- [25] JOHNSON R J, PITTCHUMANI R. Flow control using localized induction heating in a VARTM process[J]. *Composites Science & Technology*, 2007, 67(3/4): 669-684.
- [26] JOHNSON R J, PITTCHUMANI R. Enhancement of flow in VARTM using localized induction heating[J]. *Composites Science & Technology*, 2003, 63(15): 2201-2215.
- [27] SIMACEK P, ÖMER E, HEIDER D, et al. Experimental validation of post-filling flow in vacuum assisted resin transfer molding processes[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(3): 370-380.
- [28] AMIRKHOSERAVI M, PISHVAR M, ALTAN M C. Fabricating high-quality VARTM laminates by magnetic consolidation: Experiments and process model[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 114: 398-406.
- [29] LI W. Process and performance evaluation of the vacuum - assisted process[J]. *Journal of Composite Materials*, 2004, 38(20): 1803-1814.
- [30] YANG J, XIAO J, ZENG J, et al. Compaction behavior and part thickness variation in vacuum infusion molding process[J]. *Applied Composite Materials*, 2012, 19(3/4): 443-458.
- [31] 乔东, 胡红, 罗永康. 轻型树脂传递模塑(RTM-Light)成型工艺技术[C]//第十七届玻璃钢/复合材料学术年会. 北京:中国硅酸盐学会玻璃钢分会, 2008: 182-186.
- QIAO Dong, HU Hong, LUO Yongkang. Light resin transfer molding technology[C]// Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of FRP/Composite Materials. Beijing: FRP Branch of China Silicate Society, 2008: 182-186.
- [32] GARAY A C, HECK V, ZATTERA A J, et al. Influence of calcium carbonate on RTM and RTM light processing and properties of molded composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011, 30(14): 1213-1221.
- [33] 张莉. 轻质RTM与传统RTM的比较[C]//第十六届玻璃钢/复合材料学术年会. 北京:中国硅酸盐学会, 2006: 187-189.
- ZHANG Li. Comparison between light RTM and traditional RTM[C]//Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of FRP/Composite Materials. Beijing: China Silicate Society, 2006: 187-189.
- [34] ISOIDI L A, OLIVEIRA C P, ROCHA L A O, et al. Three - dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2012, 34(2): 105-111.
- [35] YANG W K, LU S H, XIANG L T, et al. Simulation of non - isothermal resin transfer molding process cycle and optimization of temperature system[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(1): 3-14.
- [36] YANG W K, LU S H, XIANG L T, et al. Nonisothermal simulation on pressure during resin transfer molding[J]. *Journal of Applied Polymer and Science*, 2019, 136(19): 47492.
- [37] CHANG C Y. Simulation of non-isothermal filling process in vacuum assisted compression resin transfer moulding process[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2015, 44(4): 162-170.
- [38] SAAD A, ECHCHELH A, HATTABI M, et al. An improved computational method for non isothermal resin transfer moulding simulation[J]. *Thermal Science*, 2011, 15(2): 275-289.
- [39] SAAD A, ECHCHELH A, HATTABI M, et al. A fast computational model to the simulation of non - isothermal mold filling process in resin transfer molding[J]. *Polymer Composites*, 2011, 32(6): 857-868.
- [40] SAAD A, ECHCHELH A, HATTABI M, et al. Optimization of the cycle time in resin transfer molding process by numerical simulation[J]. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 2012, 31(20): 1388-1399.
- [41] DING Y, JIA Y, DONG S, et al. Non - isothermal simulation of resin transfer molding process with edge effect [J]. *Polymers & Polymer Composites*, 2014, 22(3): 355-360.
- [42] YANG J, JIA Y, DING Y, et al. Edge effect in RTM processes under constant pressure injection conditions[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 118(2):1014-1019.
- [43] 丁妍羽. 基于化学流变学的树脂传递模塑工艺过程的数值模拟及灵敏度分析[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- DING Yanyu. Numerical simulation and sensitivity analysis of reactive resin transfer molding process[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [44] SHI F, DONG X. 3D numerical simulation of filling and curing processes in non-isothermal RTM process cycle[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*,



- 2011, 47(7): 764-770.
- [45] OKABE T, MATSUTANI H, HONDA T, et al. Numerical simulation of microscopic flow in a fiber bundle using the moving particle semi-implicit method[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(10): 1765-1774.
- [46] CARLONE P, RUBINO F, PARADISO V, et al. Multi-scale modeling and online monitoring of resin flow through dual-scale textiles in liquid composite molding processes[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96: 2215-2230.
- [47] TAN H, PILLAI K M. Multiscale modeling of unsaturated flow of dual-scale fiber preform in liquid composite molding II: Non-isothermal flows[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(1): 14-28.
- [48] YEAGER M, SIMACEK P, ADVANI S G. Role of fiber distribution and air evacuation time on capillary driven flow into fiber tows[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 93: 144-152.
- [49] GASCÓN L, GARCÍA J A, LEBEL F, et al. Numerical prediction of saturation in dual scale fibrous reinforcements during liquid composite molding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 77: 275-284.
- [50] 魏雅君, 朱豪磊, 卢洋洋, 等. 基于 VOF 方法的 RTM 充模非饱和流动仿真算法研究[J]. *橡塑技术与装备*, 2017, 43(10): 15-19.
- WEI Yajun, ZHU Haolei, LU Yangyang, et al. Study on simulation algorithm of RTM mold filling unsaturated flow based on VOF method[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2017, 43(10): 15-19.
- [51] 周云飞, 方荀, 王文琪, 等. RTM 中纤维结构对树脂浸渍影响的数值模拟[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 43(2): 162-170.
- ZHOU Yunfei, FANG Xun, WANG Wenqi, et al. Numerical simulation of the influence of fibrous structure on resin filling in RTM process[J]. *Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 43(2): 162-170.
- [52] WANG J, SIMACEK P, ADVANI S G. Use of centroidal voronoi diagram to find optimal gate locations to minimize mold filling time in resin transfer molding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 87: 243-255.
- [53] GUPTA A, KELLY P A, BICKERTON S, et al. Simulating the effect of temperature elevation on clamping force requirements during rigid-tool liquid composite moulding processes[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(12): 2221-2229.
- [54] YANG B, JIN T, LI J, et al. Three-dimensional numerical simulation of mold filling process in compression resin transfer molding[J]. *Applied Composite Materials*, 2015, 22(2): 209-230.
- [55] 金天国, 魏雅君, 杨波, 等. 预成型体渗透率预测及其受压缩变形的影响[J]. *复合材料学报*, 2015, 32(3): 840-847.
- JIN Tianguo, WEI Yajun, YANG Bo, et al. Permeability prediction of preform and influence of compression deformation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(3): 840-847.

(编辑:刘彦东)