

# 复杂构件 RTM 整体成型工艺设计与仿真研究

左龙彦, 吴文平, 王晓蕾, 潘 韵, 居建国

(1. 上海复合材料科技有限公司, 上海 201112;  
2. 上海航天树脂基复合材料工程技术研究中心, 上海 201112)

[摘要] 以飞机预冷气引起口为典型构件, 对其成型工艺进行探索, 选择 RTM 成型工艺并应用 PAM-RTM 软件对 RTM 成型工艺影响参数进行虚拟仿真, 确定模具设计的最终参数值。

关键词: 低熔点合金; RTM; 整体成型; PAM-RTM; 达西定律

## Process and Simulation of Complicated Composites RTM Integrity Technology

ZUO Longyan, WU Wenping, WANG Xiaolei, PAN Yun, JU Jianguo

(1. Shanghai Composites Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 201112, China;  
2. Shanghai Aerospace Resin based Composite Engineering Technology & Research Center, Shanghai 201112, China; )

[ABSTRACT] Based on the manufacture of inlet duct of aircraft, develop its forming technology, choose RTM method and simulate it by PAM-RTM, then use the simulation result for mold designing.

Keywords: Low melting point alloy; RTM; Integral forming; PAM-RTM; Darcy's law

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.096

“一代材料, 一代飞机”正是世界航空发展史的一个真实写照。轻量化是提高大飞机燃料经济性, 实现节能减排的有效途径。复合材料用量已成为评价一架飞机先进程度的一项重要指标。中国的大飞机要想在世界有立足之地, 就必须顺应世界航空发展的趋势大量使用复合材料<sup>[1-3]</sup>。随着复合材料的扩大应用, 一些制约因素逐渐暴露出来, 特别是制造成本<sup>[4]</sup>。作为低成本制造技术之一的 RTM 技术在航空复合材料制造中的地位越来越重要<sup>[5]</sup>。

RTM 工艺是一种采用刚性闭合模具制造复合材料的技术, 其基本原理是在模具的型腔中预先放置增强材料, 合模夹紧后在一定的温度和压力下将经静态混合器混合均匀的树脂体系注入模具, 浸渍增强体后固化, 脱模得到复合材料制品<sup>[6]</sup>。在 RTM 工艺中, 模具的设计和制造对整个生产过程具有决定性影响。要设计和制造出合理的模具, 仅仅依赖经验是不够的, 国内外都开展了 RTM 工艺的数值模拟技术研究, 利用数值模拟对模具设计方案进行检验和优化<sup>[7]</sup>。

本文以复合材料飞机预冷气引起口整体成型为典型构件, 对其结构进行工艺性优化, 筛选材料。在达西定律的基础上, 引入初始和边界条件应用 PAM-RTM<sup>[8]</sup> 软件对注胶口、注胶时间、注胶压力等参数进行模拟, 并

得出最优的参数输入到模具设计及成型工艺中。

## 1 工艺设计

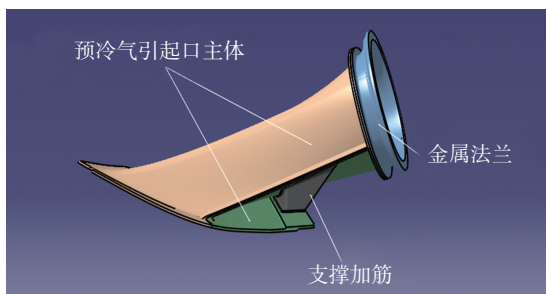
### 1.1 设计输入

#### 1.1.1 产品结构

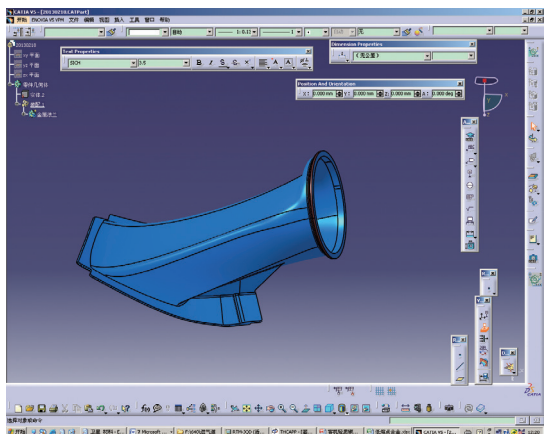
预冷气引起口初步设计方案如图 1 (a) 所示, 该结构有如下特点:

- (1) 预冷气引起口主体结构端头为圆形和四边形混合的不规则曲面, 壁厚为 2~3mm;
- (2) 该结构由预冷气引起口主体(上、下)、金属法兰和支撑加筋 3 部分构成;
- (3) 预冷气引起口主体材料厚度有突变区域, 不适合复合材料整体成型;
- (4) 金属法兰与预冷气引起口主体结合界面问题难以处理;
- (5) 支撑加筋结构不能与预冷气引起口主体整体成型。

针对设计要求及复合材料成型工艺特性, 对设计进行优化, 预冷气引起口由金属法兰框和预冷气引起口主体组成。法兰框作为复合材料结构的埋件预埋到结构中, 支撑加筋结构与预冷气引起口主体合为一体结构, 如图 1 (b) 所示。



(a) 初步设计方案



(b) 优化后方案

图1 预冷气引起口

Fig.1 Model of inlet duct of aircraft

### 1.1.2 产品材料

#### (1) 基体材料

Henkel 树脂 LM41005.1, 参数详见表 1。其固化曲线如图 2 所示。

#### (2) 增强材料

东丽 T300 碳纤维, 其性能参数详见表 2。

### 1.2 工艺总方案

预冷气引起口采用复合材料整体成型, 成型面为异型面。为了满足气动要求, 预冷气引起口主体内型面要求光滑, 产品不允许拼接。预冷气引起口属非主承力复杂结构成型, 可以选择 SCM 或 RTM 成型, 其中 RTM 成型更能保证压力的均衡, 本项目拟采用 RTM 成型工艺进行预冷气引起口的研制, 总体方案如图 3 所示。

表1 树脂LM41005.1主要参数

项目	参数值
密度 / ( kg · m <sup>-3</sup> )	1000
粘度 / ( Pa · s )	0.2
玻璃化转变温度 / °C	160
注射温度 / °C	约 110, 最高可达 140
注射压力 / MPa	初始 100~300

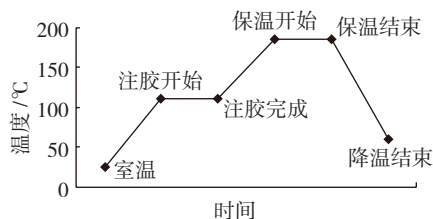


图2 LM41005.1固化曲线

Fig.2 LM41005.1 curing process curve

表2 东丽T300碳纤维性能

类型	T300
单丝数目	3K
拉伸强度 / MPa	3530
拉伸模量 / GPa	230
延伸率 / %	1.5
TEX / ( g · km <sup>-1</sup> )	198
密度 / ( g · cm <sup>-3</sup> )	1.76

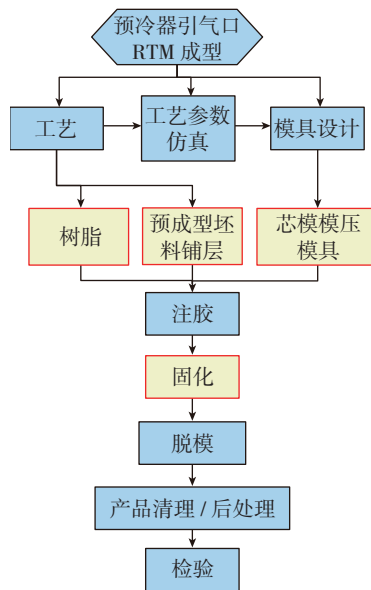


图3 预冷气引起口研制方案

Fig.3 Inlet duct of aircraft develop program

## 2 模具设计与工艺仿真

### 2.1 模具类型及材料选择

预冷气引起口可拔模性分析如图 4 所示, 在模具设计中可以采用的模具类型如表 3 所示, 该产品研制周期短, 内型面精度要求高, 故采用低熔点合金模。

在 RTM 工艺中, 选择合适的低熔点合金材料是技术的关键。一方面要求材料具有相对较低的熔融温度, 以保证模具成型及使用; 另一方面要求熔芯具有一定的强度和硬度, 能够在成型过程注射压力和熔体的冲击作用下维持较高的形状精度和定位精度。

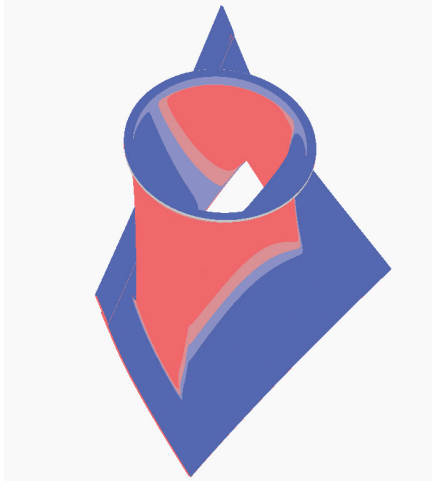


图4 产品拔模分析示意图  
Fig.4 Product draft analysis

表3 不同材料模具比较

模具类型	金属模具	气囊模具	水溶性模具	硅脂模	低熔点合金模
设计制造周期	长	较长	短	短	短
制造成本	高	较高	较低	低	高
型面精度	高	较高	较高	低	高
表面质量	高	较高	较高	高	较高
使用寿命	长	较短	一次性	一次性	可回收利用
脱模难易程度	难	较容易	容易	容易	较容易
复杂型面产品	组合式	组合式	整体	整体	整体
实用生产模式	批产	小批量	科研	小批量	批产

低熔点合金作为模具材料,发展比较成熟,合金温度随着合金组分的变化而变化,形成了温度系列,如表4所示。一般为了保证低熔点合金在产品注胶、固化过程中不熔化,要求所选择的低熔点合金熔点不低于树脂固化温度 185℃。考虑到加热设备和操作方便,低熔点合金熔点应越低越好,范围选择 200~210℃比较理想。本项目中选用 210℃低熔点合金作为芯模材料。

表4 低熔点合金及其物理性能

合金型号	熔点 /℃	密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度 / MPa	硬度 HB	收缩率 /%
1	138	8.50	70.56	20	略胀
2	170	8.05	122.50	30	0.085
3	152	8.06	101.92	25	0.067
4	220	7.47	140.14	32	0.214
5	210	8.12	147.00	33	0.083
6	140	8.52	102.61	26	0

## 2.2 工艺参数仿真

### 2.2.1 树脂流动模型

树脂在模具中流动一般以达西定律为理论基础,液体的流动速率  $Q$  是由流动过程中的压力差  $\Delta p$  和液体的粘度决定的,并与流动区域  $A$  和流动系数有关,如下式所示:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L}$$

矢量表示如下:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{yx} & K_{zx} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{zy} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix}$$

其中:  $q$  为速度矢量;  $K$  为纤维预成型体的渗透率张量,  $m^2$ ;  $\mu$  为树脂粘度,  $Pa \cdot s$ ;  $L$  为渗流路径长度,  $m$ 。

本文所用软件为 PAM-RTM (法国 ESI), CATIA (法国 Dassault System)。

### 2.2.2 参数模拟

PAM-RTM 中的填充模拟宏观上基于达西定律,根据预冷气引起口结构特点,注胶口设计以下 4 种方案(如图 5 所示)。

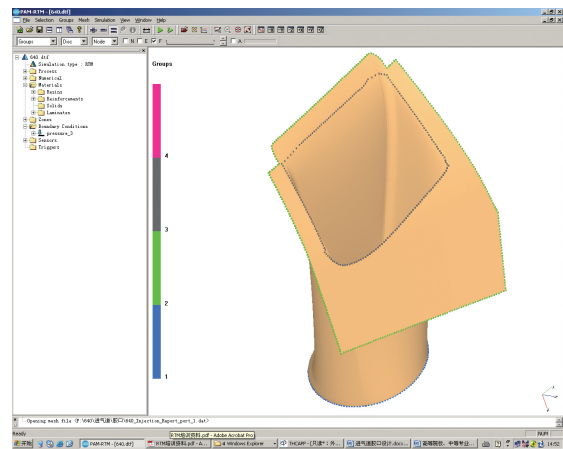


图5 注胶口设计

Fig.5 Designing of injection port

蓝色为方案 1,注胶口位置为圆截面端;绿色为方案 2,注胶口位置为四边形截面外轮廓;灰色为方案 3,注胶口位置为四边形截面内轮廓;粉红色为方案 4,注胶口位置为圆截面端 + 四边形外轮廓最远法兰边(两个注胶口,在图 5 中被 2,3 方案遮挡住)。

不同注胶口采用相同的工艺参数(表 5),仿真不同注胶口位置时注胶时间及注胶过程中注胶压力。

不同注胶口仿真结果如图 6 所示。

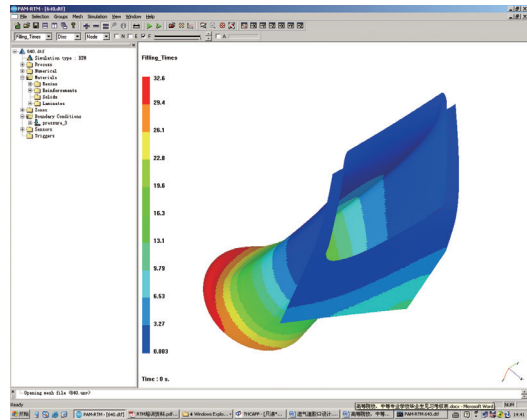
根据仿真云图,结果汇总如表 6 所示,从注胶时间及工艺实现的难易程度,最终选择方案 3。

表5 RTM工艺参数

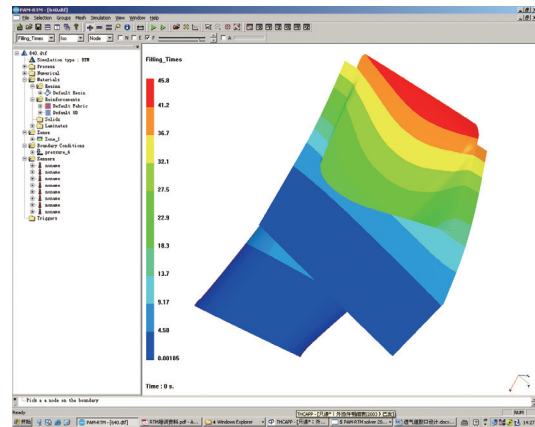
项目	参数
密度 / ( kg · m <sup>-3</sup> )	1000
渗透率	1.00E-09
空隙率	0.7
壁厚 /mm	2
树脂粘度 / ( Pa · s )	0.2
充模压力 / Pa	2.00E+05
注胶温度 /℃	110

表6 不同注胶口仿真结果汇总

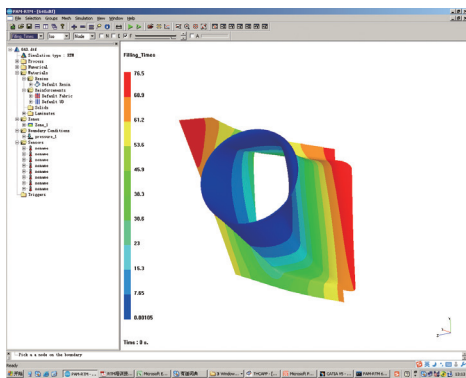
方案	注胶口位置	注胶口个数	注胶时间 /s	注胶口特点描述
1	圆截面端	1	76.5	注胶口在结构端头,注胶时间最长
2	四边形截面外轮廓	1	44.9	注胶口在结构端头
3	四边形截面内轮廓	1	32.6	注胶行程短,注胶时间短,在胶口位置毛边处理比较难,适用于型面精度要求低的产品
4	圆截面端 + 四边形外轮廓最远法兰边	2	45.8	注胶口在结构两端头,注胶口开启时间需控制,注胶时间较短



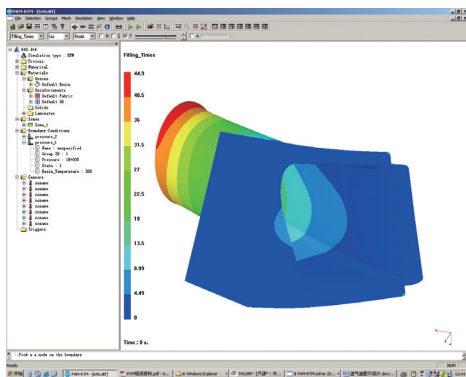
(c) 方案3



(d) 方案4



(a) 方案1



(b) 方案2

图6 不同注胶口仿真云图

Fig.6 Simulation results of different injection ports

### 2.3 模具结构

应用工艺仿真结果进行模具材料选择及结构设计。根据仿真结果及低熔点合金材料的收缩率,设计拼接结构 RTM 成型模具(图7)。

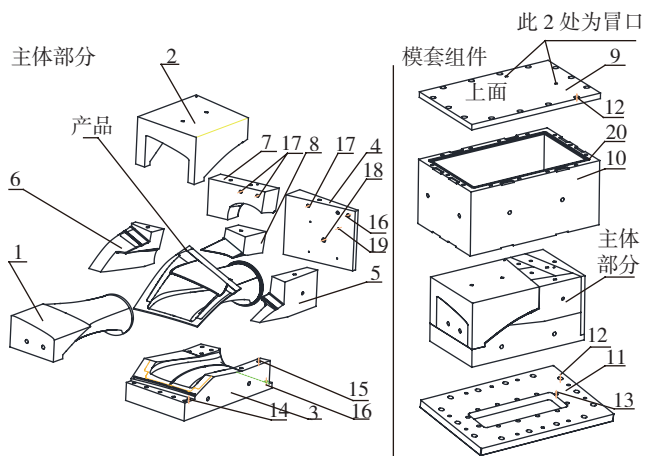


图7 模具总装图

Fig.7 Mold exploded assembly

(下转第 103 页)

零件耐磨寿命提高 2 倍以上。

## 2 结束语

通过对本文中涉及生产制造流程、工艺方法、工艺文件等方面的研究和实践,有效提升了本单位某型号喷嘴挡板式电液伺服阀的制造技术水平,起到了提升该类伺服阀产品生产效率与能力的实效。文中的各个技术创新点,从不同角度体现了提高产品制造技术能力的实际需求,其优化内容、方式和思路,对同类型产品具有良好的借鉴和参考价值。

### 参考文献

- [1] 任光融,张振华,周永强.电液伺服阀制造工艺[M].北京:中国宇航出版社,1988.
- REN G R, ZHANG Z H, ZHOU Y Q. Hydroelectric servo valve manufacturing process[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1988.
- [2] 史晓.创新推行精细化生产组织模式[J].东方企业文化期刊,2013(10):157-158.
- SHI X. Innovative implementation of fine production organization model [J]. Oriental Enterprise Culture, 2013(10):157-158.
- [3] 刘树华,鲁建厦.精益生产[M].北京:机械工业出版社,2009.
- LIU S H, LU J X. Lean Production[M]. Beijing: China Mechine Press, 2009.
- [4] 唐中君,陈荣秋,纪雪洪.即时顾客化定制的运作策略和原则研究[J].工业工程与管理,2005(1):37-45.
- TANG Z J, CHEN R Q, JI X H. Operational tactics and tenets to implement instant customerization[J]. Industrial Engineering and Management, 2005(1):37-45.
- [5] WOMACK J P, JONES D T. Lean Thinking[M]. USA: Simon & Schuster, 1996.
- [6] 王广林.伺服阀阀口加工质量自动检测与控制的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000.
- WANG G L. Research on automatic measurement and control of machining quality of servo valve orifice[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000.
- [7] SCHEIDL R, MANHARTSGRUBER B. On the dynamic behavior of servo-hydraulic drives[J]. Nonlinear Dynamics, 1998, 17:247-268.
- [8] WANG D, DOLID R, DONATH M, et al. Development and verification of a two-stage flow control servovalve model[J]. American Society of Mechanical Engineer, 1995(2):121-129.
- [9] URATA E, NAKAO Y. Study of a flapper-nozzle system for a water hydraulic servovalve[J]. JSME International Journal Ser. B: Fluids and Thermal Engineering, 1998, 41(2):270-277.
- [10] 张武装,刘咏,黄伯云.硬质合金切削刀具涂层技术的发展[J].粉末冶金工业,2006,16(5):44-47.
- ZHANG W Z, LIU R, HUANG B Y. Development of coating technology of cemented carbides[J]. Powder Metallurgy Industry, 2006, 16(5):44-47.

(责编 李丹)

(上接第 99 页)

## 3 结论

本文对薄壁异型结构件的成型工艺进行研究,主要得出以下结论:

- (1)通过工艺可制造性分析,对设计结构进行优化,得出整体成型结构形式,并进行工艺总方案设计;
- (2)以达西定律为理论基础,应用 PAM-RTM 软件,对不同注胶口注胶过程进行仿真,选择从四边形截面内轮廓注胶的结构形式;
- (3)通过产品拔模分析,选择合适的模具类型和模具材料,设计 RTM 成型模具。

### 参考文献

- [1] 曹春晓.一代材料技术,一代大型飞机[J].航空学报,2008(5):701-706.
- CAO C X. One generation of material technology, one generation of large aircraft[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008(5):701-706.
- [2] 林一平.复合材料助力大飞机瘦身增效[C].第17届全国复合材料学术会议,北京,2012.
- LIN Y P. High performance lightweight composite large aircraft[C]. The Seventeenth National Conference on Composite Materials, Beijing, 2012.
- [3] 张兴金,邓忠林.浅谈纤维复合材料与中国大飞机[J].纤维复合材料,2009(6):24-26.
- ZHANG X J, DENG Z L. The discussion on carbon fiber composite and passenger-carrying aircraft of China[J]. Fiber Composites, 2009(6):24-26.
- [4] 段宝,杨亚文,王雅杰.先进复合材料结构 RTM 技术现状及发展[J].沈阳航空工业学院学报,2007(9):18-21.
- DUAN B, YANG Y W, WANG Y J. RTM technology status and development of advanced composite structure[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2007(9):18-21.
- [5] 张保平,王运生. RTM 技术在大飞机复合材料构件上的应用[J].航空制造技术,2007(12):68-70.
- ZHANG B P, WANG Y S. Application of RTM technology in composite structure of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(12):68-70.
- [6] BECKWITH S W, HYAND C R. Resin transfer molding: a decade of technology advances[C]. SAMPE Journal, 1998, 34(6):7-19.
- [7] 施飞,董湘怀. RTM 树脂流动模拟及其对模具设计的意义[J].航空制造技术,2009(20):51-53.
- SHI F, DONG X H. Resin flow simulation in RTM and its significance to mould design[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(20):51-53.
- [8] RENAUD L, RUIZ E, BENOIT Y, et al. PAM-RTM user guide and tutorials[M]. Rungis Cedex: ESI Group, 2004.

(责编 李丹)