

# RTM 成型复合材料 T 型接头工艺参数优化与力学性能实验研究

白江波, 熊峻江\*, 程 序, 彭 勃

(北京航空航天大学 飞行器运用系, 北京 100191)

**摘 要:** 对树脂传递模塑(RTM)成型的复合材料 T 型接头进行了工艺参数优化、制备及力学性能实验研究。应用流动模拟软件, 对 RTM 成型的复合材料 T 型接头进行了基体流动数值模拟, 确定模具最佳注射方式和出胶口位置, 并优化了影响树脂充模时间的工艺参数, 显著提高了 RTM 接头的工艺性能。根据优化工艺参数结果, 制备了 RTM 成型的复合材料 T 型接头试样, 并进行了拉伸和压缩试验, 分析了其破坏机制。根据拉伸和压缩试验现象和结果, 发现 RTM 成型的复合材料 T 型接头拉伸破坏模式主要为富树脂三角区的树脂与纤维布界面分层, 其拉伸破坏主要取决于树脂基体抗剥离分层的拉伸强度; 压缩破坏模式为底板中央部位的弯曲分层与折断, 其压缩破坏由接头底板中的纤维布抗拉强度决定; T 型接头的压缩破坏强度高于拉伸破坏强度。

**关键词:** 复合材料; 树脂传递模塑(RTM); 流动模拟; 力学性能; T 接头

**中图分类号:** TB332; V258; O242 **文献标志码:** A

## Processing parameter optimization and experimental investigation on mechanical properties for RTM composite T-joint

BAI Jiangbo, XIONG Junjiang\*, CHENG Xu, PENG Bo

(Aircraft Department, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The paper seeks to address an integrated technique for the processing parameter optimization, manufacturing and mechanical property-based experiments for the composite T-joint prepared by the resin transfer moulding(RTM) process. The numerical simulation for resin flow of RTM process was conducted to obtain the optimized injection modes of resin into mould and processing parameters. From the optimized results of RTM processing parameter, the composite T-joints were processed by using RTM technique for the tension and compression tests. The mechanical properties were determined and the failure mechanism was discussed from the experimental observation. The results show that the debonding and delamination occur along the interface of a triangular region of the T-joint subjected to tension loading, which are governed largely by the static tension properties of the resin. The bending delamination and fracture appear at the central cross section of bottom plate of the T-joint subjected to compression loading, which are dependent on more of the ability of the fabric to support the fibre against tension. And the failure strength of compression is higher than that of tension.

**Keywords:** composites; resin transfer moulding(RTM); flow simulation; mechanical properties; T-joint

作为典型的连接形式, 复合材料 T 型接头被广泛地应用于航空航天与船舶等工程结构中, 因此, 人们运用试验、数值计算、试验与理论相结合的方法, 对破坏强度与失效机制进行了大量研究。Shenoi 等<sup>[1-2]</sup> 试验研究了 T 型接头几何尺寸对压缩强度的影响; Marcadon 等<sup>[3]</sup> 试验研究了 T 型接头的疲劳失效过程, 并讨论了其疲劳失效机制; The-

otokoglou<sup>[4-5]</sup>、Kumar<sup>[6]</sup> 和 Apalak<sup>[7]</sup> 等采用有限元法, 数值研究了 T 型接头的破坏机制、裂纹扩展模式及大变形下的应力场分布; Apalak<sup>[8]</sup> 和 Kurmari 等<sup>[9]</sup> 采用有限元方法, 分别研究了非均匀温度场下 T 型接头的非线性热应力, 以及湿热环境对引入缝纫工艺的 T 型接头强度的影响; Toftgaard<sup>[10]</sup>、Theotokoglou<sup>[11]</sup> 和 Stickler<sup>[12]</sup> 等通过实

收稿日期: 2008-05-12; 收修改稿日期: 2008-07-01

基金项目: 航空科学基金(05A51011)

通讯作者: 熊峻江, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为金属及复合材料结构疲劳可靠性 E-mail: jxiong@buaa.edu.cn

验研究和数值模拟相结合的方法, 分别研究了泡沫夹层的三明治 T 接头、复合材料 T 接头和引入缝纫工艺复合材料 T 接头的拉伸破坏强度; Earl<sup>[13]</sup>也采用实验研究和数值模拟相结合的方法, 研究了湿热环境导致 T 型接头性能下降的问题。

从以上研究可以看出, 复合材料 T 接头的力学性能得到了大量研究, 但是迄今为止, 针对树脂传递模塑(RTM)成型 T 接头的力学性能的研究却不多见。作为一种具有良好发展前景的成型工艺, RTM 工艺正在航空航天和船舶工业中得到日益广泛的应用, 研究 RTM 成型 T 接头的力学性能和破坏机制非常必要。因此, 本文中对 RTM 成型 T 型接头的力学性能进行了实验研究, 分析了其破坏模式和失效机制。

## 1 T 接头 RTM 成型工艺参数优化

树脂基体在纤维间的流动渗透性, 直接影响 RTM 制件性能, 因此, 对树脂基体的流动模拟和工艺参数优化, 是 RTM 成型工艺设计的重要内容<sup>[14-17]</sup>。T 型接头的几何形状和尺寸如图 1(a) 所示, 根据图 1(a) 所示的试样几何形状和尺寸, 采用工程应用 CATIA 和 PATRAN 软件, 建立 T 型接头的基体流动数值模拟的有限元(FE)模型(如图 1(b) 所示), 在此基础上, 使用 PAM-RTM 软件进行基体流动模拟。计算过程中, 选定 T 型接头立柱的顶边为注胶位置, 优化树脂黏度  $\eta$  注射压力  $p$  和纤维预成型体的渗透率  $k$  等工艺参数。

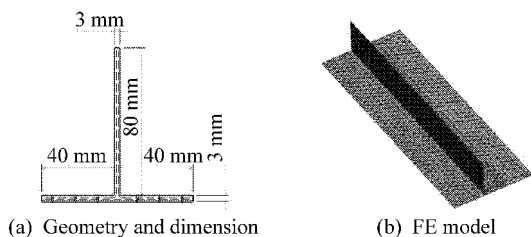


图 1 T 接头示意图与有限元模型

Fig. 1 Geometry dimension and FE model of T-joint

在给定注射压力  $p = 0.3 \text{ MPa}$ , 纤维体积含量  $V_f = 55\%$ , 预成型体渗透率  $k = 1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , 接头根部的富树脂区渗透率  $k_0 = 1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2$  的条件下, 优化树脂黏度  $\eta$ 。选定树脂黏度  $\eta$  取值范围为  $[0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}, 0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}]$ , 数值模拟得到的树脂黏度  $\eta$  与充模时间  $t$  的关系曲线如图 2(a) 所示。从图 2(a) 可以看出, 充模时间随树脂黏度的增加而线性

增加, 较小的树脂黏度能够使纤维得到更好的浸润, 从而提高产品质量。

在给定纤维体积含量  $V_f = 55\%$ , 预成型体渗透率  $k = 1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , 接头根部的富树脂区渗透率  $k_0 = 1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ , 树脂黏度  $\eta = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  的条件下, 优化注射压力  $p$ 。选定注射压力  $p$  取值范围  $[0.1 \text{ MPa}, 1 \text{ MPa}]$ , 数值模拟得到的注射压力  $p$  与充模时间  $t$  的关系曲线如图 2(b) 所示。从图中可以看出, 注射压力  $p$  的增加能明显缩短充模时间  $t$ , 但基于工程实践经验, 过大的压力会造成预成型体的变形, 同样会影响制件性能, 所以注射压力  $p$  适中选择。

在给定树脂黏度  $\eta = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 纤维体积含量  $V_f = 55\%$ , 注射压力  $p = 0.3 \text{ MPa}$  的条件下, 优化预成型体渗透率  $k$ 。选定预成型体渗透率  $k$  的取值范围  $[10^{-12} \text{ m}^2, 10^{-9} \text{ m}^2]$ , 且  $k_0 = 10k$ , 数值模拟得到的预成型体渗透率与充模时间的关系曲线如图 2(c) 所示。从图中可见, 充模时间  $t$  随着渗透率  $k$  的增大而显著减小, 但由于渗透率  $k$  主要取决于纤维的体积含量, 可调整的范围较小。

根据上述基体流动模拟结果, 得到主要的优化工艺参数为: 树脂黏度  $\eta = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 注射压力  $p = 0.3 \text{ MPa}$ , 注射温度  $60^\circ\text{C}$  至  $80^\circ\text{C}$ 。

## 2 RTM 成型 T 接头制备

RTM 成型 T 型接头选用 EW220 平纹玻璃纤维布为增强体, 其经向密度 180 ends/10 mm, 纬向密度 140 ends/10 mm, 经向强度 400 MPa, 纬向强度 200 MPa, 单层原始厚度 0.22 mm。选用适合于航空航天主承力构件, 可在  $150^\circ\text{C}$  湿热环境下长期使用的 5284RTM 环氧树脂作为基体。其他辅助材料包括质量分数为 10% 的定型剂(溶剂为丙酮溶液)和用于填充接头根部的单向玻璃纱 REM 800。

T 型接头的纤维布铺层方式如图 3(a) 所示, 其每边都铺放 18 层纤维布, 在接头根部存在富树脂三角区, 通过填充单向纤维纱的方式, 进行一定程度的增强。RTM 成型过程主要包括: 将纤维布铺放在模具内, 然后合模; 按照优化工艺参数, 将树脂注入模具内, 如图 3(b) 所示; 将模具放入烘箱中, 以  $1 \sim 5^\circ\text{C}/\text{min}$  的升温速率升至  $160^\circ\text{C}$ , 恒温 1 h, 此后, 以同样速率升温至  $180^\circ\text{C}$ , 恒温 2 h, 再自然冷却到室温; 脱模, 得到 T 接头制件, 如图 3(c) 所示。

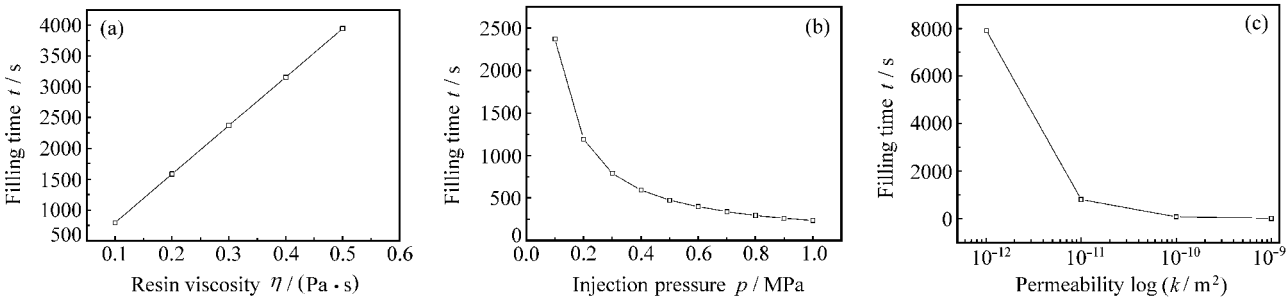


图2 3种工艺参数与充模时间关系曲线

Fig. 2 Three curves of process parameters vs filling time

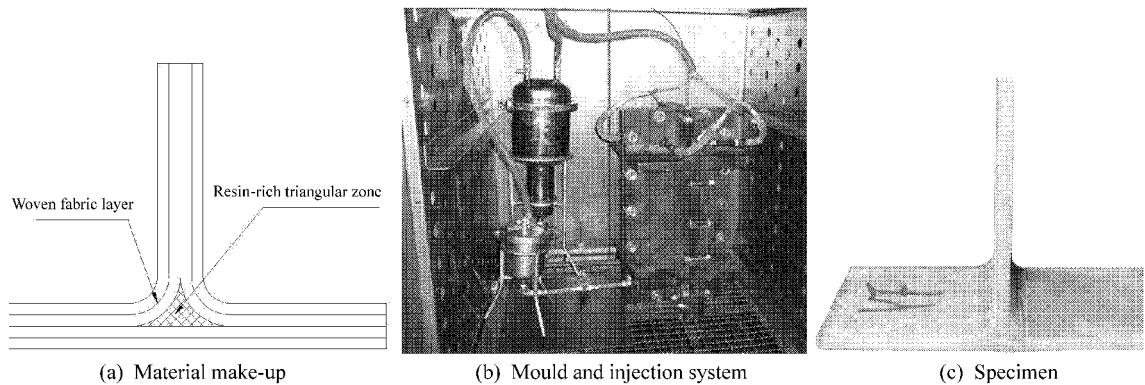


图3 T 接头制备

Fig. 3 Process of T- joint

3 力学性能实验与结果

对 T 型接头进行拉伸试验和压缩试验, 测定其拉伸与压缩性能, T 型接头的拉伸加载方式如图 4(a) 所示。目前尚未见有关复合材料 T 接头力学测试方面的试验标准可供本试验参考, 本文中自行设计了上述试验的试验方案。通过实验观察, 发现在接头根部填充单向纤维纱的富树脂三角区的上角点, 首先出现开裂, 分层裂纹沿三角区树脂与纤维布界面扩展, 之后接头垂直板沿中间界面分层, 最后与富树脂三角区剥离的左右 2 块纤维层板在夹具夹持处弯曲折断。整个接头的破坏如图 4(b) 所示。实验测定 T 接头的拉伸载荷- 位移曲线和破坏载荷分别如图 4(c) 和表 1 所示, 图中不同的曲线分别表示 5 次重复试验的结果。由图 4(c) 可以看到, T 接头的拉伸载荷- 位移曲线存在锯齿形波动。这是由于在拉伸载荷作用下, T 型接头富树脂三角区的树脂与纤维布界面存在导致基体界面分层的剥离力与剪切力, 界面分层导致拉伸载荷- 位移曲线的第 1 次降载; 随着分层裂纹沿三角区的左右界面继续扩

展, 以及三角区的左右两边纤维布层板发生大变形, 导致接头垂直板沿中间界面存在剥离力与剪切力, 因此也出现分层, 导致拉伸载荷- 位移曲线的第 2 次降载; 三角区的左右界面分层扩展至 T 接头的夹具夹持处, 导致三角区的左右两边纤维布层板发生弯曲折断, 试样破坏, 拉伸载荷- 位移曲线再一次出现大降载。由上面分析可知, T 型接头拉伸破坏模式为接头根部富树脂三角区的树脂与纤维布界面分层, 其拉伸破坏主要取决于树脂基体抗剥离分层的拉伸强度。

T 接头压缩试验加载方式如图 5(a) 所示, 试验测定 T 接头的压缩载荷- 位移曲线和破坏载荷数据分别如图 5(c) 和表 1 所示, 图中不同的曲线分别表示 6 次重复试验的结果。压缩试验显示, 在 T 接头底板中央部位的下表面, 首先出现弯曲分层, 然后折断, 如图 5(b) 所示。在压缩载荷作用下, T 型接头富树脂三角区的树脂与纤维布界面存在挤压力与剪切力, 由于树脂基体的抗压强度远高于抗拉强度, 界面上基体未出现脱胶与分层, 但在三角区的底边纤维布层板的中性层界面上存在一个最大的弯

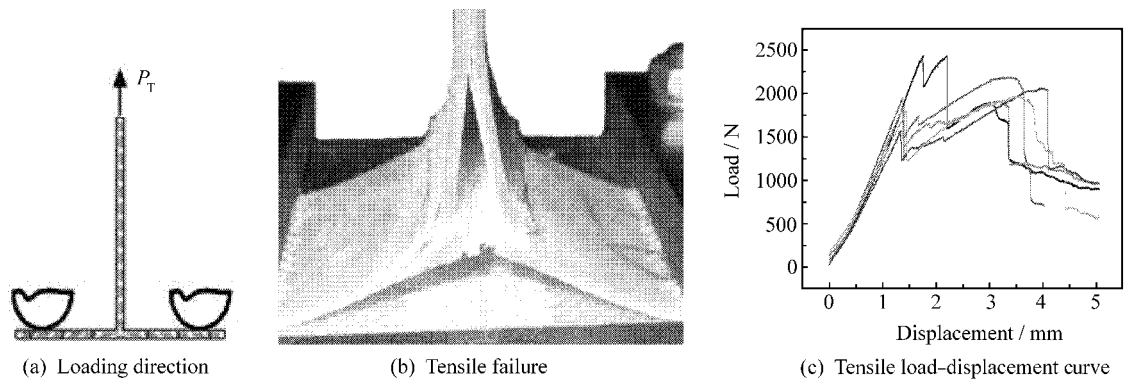


图 4 T 接头拉伸试验  
Fig. 4 Tension test of T- joints

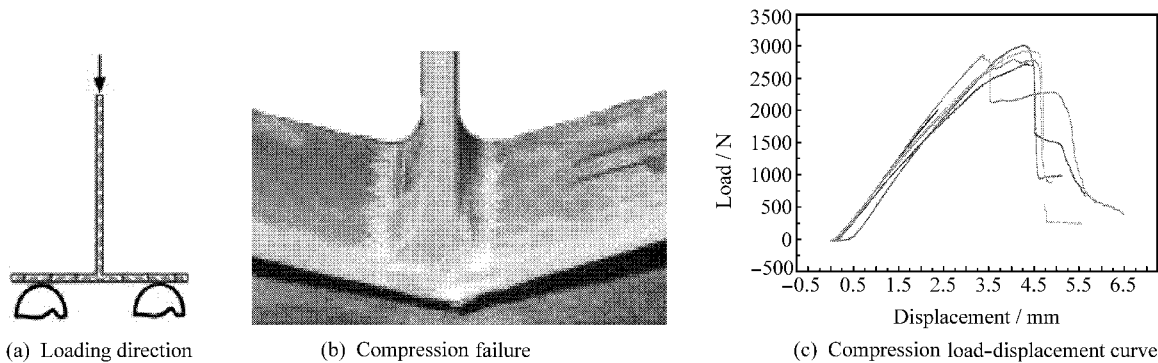


图 5 T 接头压缩试验  
Fig. 5 Compression tests of T- joints

表 1 T 接头破坏载荷  
Table 1 Failure load data of T joints N

	1	2	3	4	5	Mean	Standard deviation
Tension	2429	1934	1845	1567	1803	1915.6	317.4
Compression	3007	2786	2717	2925	2848	2856.6	113.8

曲剪应力，导致界面的弯曲分层；随着底板弯曲分层和弯曲挠度的增大，底板在中央部位因弯曲挠度最大而发生弯曲折断，试样破坏。可见，T 接头压缩破坏模式为底板中央部位的弯曲分层与折断，其抗弯能力主要由纤维布承担，因此，T 型接头压缩破坏由接头底板中的纤维布抗拉强度决定。

根据表 1 所列试验数据，并对比图 4(c) 和图 5(c)，可以发现，T 型接头的压缩破坏强度高于拉伸强度。根据上述拉伸与压缩破坏机制分析，得出 T 型接头拉伸破坏主要取决于树脂基体的抗拉强度，而压缩破坏则由接头底板中的纤维布抗拉强度决定。研究表明，纤维的抗拉能力远高于树脂基体，显见，T 型接头的压缩破坏强度高于拉伸破坏强度。

4 结 论

- (1) 通过基体流动数值模拟，得到主要工艺参数的优化结果，根据此优化工艺过程，制备了能满足试验要求的复合材料 T 型接头试样。
- (2) T 型接头拉伸破坏模式为接头根部富树脂三角区的树脂与纤维布界面分层，其拉伸破坏主要取决于树脂基体抗剥离分层的拉伸强度。
- (3) T 型接头压缩破坏模式为底板中央部位的弯曲分层与折断，其压缩破坏由接头底板中的纤维布抗拉强度决定。
- (4) T 型接头的压缩破坏强度高于拉伸破坏强度。

参考文献:

[1] Shenoi R A, Violette F L M. A study of structural composite Tee joints in small boats [J]. Journal of Composite Materials, 1990, 24: 644- 666.  
[2] Shenoi R A, Read P, Jackson C L. Influence of joint geometry and load regimes on sandwich Tee joint behaviour [J]. Journal of

- Reinforced Plastic and Composites, 1998, 17(8): 725– 740.
- [3] Marcadon V, Nadot Y, Roy A, Gacougnolle J L. Fatigue behaviour of T - joints for marine applications [ J ]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2006, 26: 481– 489.
- [4] Theotokoglou E E. Strength of composite T- joints under pull out loads [ J ]. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 1997, 16(6): 503– 518.
- [5] Theotokoglou E E. Study of the numerical fracture mechanics analysis of composite T- joints [ J ]. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 1999, 18(3): 215– 223.
- [6] Kumari S, Sinha P K. Finite element analysis of composite wing T- joints [ J ]. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 2002, 21(17): 1561– 1585.
- [7] Apalak M K. On the non - linear elastic stresses in an adhesively bonded T - joint with double support [ J ]. J Adhesion Sci Technol, 2002, 16(4): 459– 491.
- [8] Apalak M K, Gunes R, Turaman M O, Ceri A A. Thermal and geometrically non- linear stress analyses of an adhesively bonded composite Tee joint [ J ]. Composites Part A, 2003, 34: 135– 150.
- [9] Kumari S, Sinha P K. Effects of transverse stitching and hygrothermal environment on composite wing T- joints [ J ]. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 2003, 22(18): 1705– 1728.
- [10] Toftegaard H, Lystrup A. Design and test of lightweight sandwich T- joint for naval ships [ J ]. Composites Part A, 2005, 36: 1055– 1065.
- [11] Theotokoglou E E, Moan T. Experimental and numerical study of composite T- joints [ J ]. Journal of Composite Materials, 1996, 30(2): 190– 209.
- [12] Stickler P B, Ramulu M. Investigation of mechanical behavior of transverse stitched T- joints with PR520 resin in flexure and tension [ J ]. Composite Structures, 2001, 52: 307– 314.
- [13] Earl J S, Dulieu- Barton J M, Shenoi R A. Determination of hygrothermal ageing effects in sandwich construction joints using thermoelastic stress analysis [ J ]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 211– 223.
- [14] 邱婧婧, 段跃新, 梁志勇. RTM 工艺参数对树脂充模过程影响的模拟与实验研究 [ J ]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 70– 74.
- Qiu Jingjing, Duan Yuexin, Liang Zhiyong. Computer simulation and actual experiments of RTM mold filling process affected by processing parameters [ J ]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6): 70– 74.
- [15] 姚福军, 段跃新, 肇 研. RTM 工艺树脂注射温度优化 [ J ]. 复合材料学报, 2007, 24(3): 105– 108.
- Yao Fujun, Duan Yuexin, Zhao Yan. Optimization of resin injection temperature for RTM process [ J ]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(3): 105– 108.
- [16] 吴晓青, 李嘉禄. 基于单向流动研究三维编织预制件的渗透型 [ J ]. 复合材料学报, 2007, 24(3): 116– 120.
- Wu Xiaoqing, Li Jialu. Permeability of the 3D braided preform based on the unidirectional flow measurement [ J ]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(3): 116– 120.
- [17] 戴福洪, 张博明, 杜善义, 武湛君. 复杂形状三维薄壁构件 RTM 制造工艺注模过程模拟 [ J ]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 87– 91.
- Dai Fuhong, Zhang Boming, Du Shanyi, Wu Zhanjun. Simulation of mould- filling in RTM process for 3D complex shape thin shell parts [ J ]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 87– 91.