

三维编织复合材料 RTM 工艺和力学性能*

RTM Process and Mechanical Properties of 3D

Braided Composite Materials

孙慧玉 (中国科学技术大学)

Sun Huiyu (University of Science and Technology of China)

[摘要] 以气瓶、真空泵、热电烘箱组装了 RTM 工艺装置,探索了三维编织碳/环氧 648、碳/双马 QY8911-IV 成型的最佳温度、时间、压力等工艺参数,并用 X 射线对部分试件进行质量评定,研究了纺织工艺参数对力学性能的影响,结果发现随着编织角的增大,拉压模量和强度降低;编织角,尤其横向编织角影响泊松比;轴向纱能增加弹性模量和强度性能,减小泊松比。

关键词 复合材料 三维编织 RTM 工艺 力学性能

[Abstract] The RTM equipment, including air bottle, vacuum pump and electrothermal blast drier, is assembled in this paper. The optimum forming process parameters, such as temperature, time and pressure, are investigated as to 3D braided carbon/epoxy 648 and carbon/bis-maleimide. X rays are used to evaluate some specimens. The effects of textile process parameters on mechanical properties are investigated. The results show that, with the braider angle increases, the tensile and compressive modulus and strength decrease. The braider angle, and transverse angle especially, have an influence upon Poisson's ratio. Axial yarns can increase elastic modulus and strength, and reduce Poisson's ratio.

Keywords composite materials three-dimensionally braiding RTM process mechanical properties

1 前言

纤维增强复合材料是一种新型的结构材料,具有比强度高、比刚度大、材料性能可设计等优点。但是传统的层合板复合材料具有一些难以克服的弱点:厚度方向的刚度和强度性能低,面内剪切和层间剪切强度低,易分层,冲击韧性和损伤容限水平低。解决这些问题的方式之一是寻求新的复合材料结构方式,在复合材料的刚度和强度较弱的方向加进增强纤维,这种设想与纺织技术的结合就产生了纺织结构复合材料。

树脂传递模塑(RTM)工艺^[1]是编织结构复合材料最适宜的成型方法。一些研究者分析了两维等温 RTM 模型注塑过程,采用的方法有达西定律^[2]和有限元法^[3]。在国内,航天工业总公司 703 研究所、中华复合

材料制品(深圳)有限公司^[4]研制了适合三维编织复合材料成型的 RTM 工艺并合成了一些结构部件。航空工业总公司 625 研究所、621 研究所和 637 研究所等单位从国外引进了成套的 RTM 工艺设备,但是这种工艺设备仅限于使用粘度较低的树脂,对于粘度较高的高性能的环氧树脂以及双马来酰亚胺树脂等,则较难使用。

本文通过实验探索三维编织复合材料的成型工艺,尤其是高粘度高性能树脂基复合材料的 RTM 工艺特性,掌握各项成型工艺参数,如温度、时间和压力等对复合材料性能的影响,为工业编织复合材料的成型提供依据。另外还研究编织工艺参数对力学性能的影响,以在实际应用中指导人们获得最佳的编织工艺参数。

2 RTM 成型工艺

RTM (Resin Transfer Moulding, 树脂传递模塑工艺)是把一个树脂体系在最低粘度和低压的状态下传递

* 国家自然科学基金 (19702016) 和中国博士后科学基金资助项目

注入到一个内装干燥增强材料的密封模具中的工艺。

RTM 工艺的特点: (1) 工艺过程简单, 避免了预浸料这一中间环节; (2) 低压注胶, 节约了附加设备的费用; (3) 封闭式的模具操作, 作业环境清洁; (4) 易于实现自动化和计算机控制; (5) 制品表面质量好。

RTM 成型工艺装置示意图如图 1 所示, 左边是储

气瓶和注胶罐, 中间是装有预成型织物的封闭模具, 右边是集胶罐和真空泵。胶液从注胶罐经过注胶管道从注胶口进入模具, 把织物浸润后剩余的胶液从出胶口流出, 并用集胶罐收集起来, 模具周围有加热设备, 以满足适当的注胶温度和固化温度。此装置结构非常简单, 辅助设备的要求很少, 而且工艺过程易于控制。

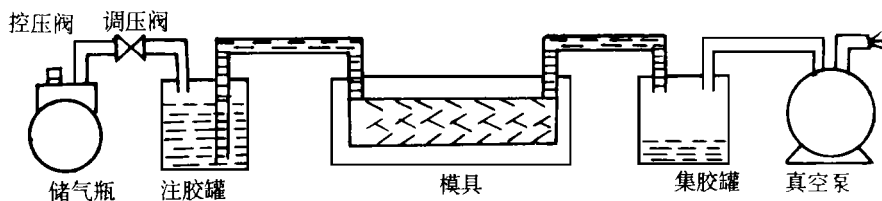


图 1 RTM 工艺装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of RTM processing equipment

用 RTM 工艺制作性能优良的三维编织复合材料部件, 关键是一些工艺参数的掌握和控制, 如温度、压力、时间、预成型织物在模具中放置等。其工艺流程细则如下: 1) 将模具放入烘箱, 加热至 180°C , 打上硅酯脱模剂; 2) 布入编织物, 注意使织物与模具两侧贴紧; 3) 将树脂与模具放入烘箱, 加热至 110°C , 保温至少 30min; 4) 连接好气路, 缓缓打开气阀, 以使压力缓慢上升到 8.5 大气压, 10min 缓升到 9.0 大气压, 15min 后缓升至 9.5 大气压, 20min 后缓升至 10.0 大气压; 5) 注满后, 若树脂为 QY 8911, 需将真空泵与出胶口连接上, 抽气 15min; 6) 关闭气阀, 固化 (对于环氧 648, 加热

至 130°C , 保温 1h; 对于 QY 8911, 加热至 180°C , 保温 2h); 7) 后处理 (对于环氧 648, 加热至 180°C , 保温 2h; 对于 QY 8911, 加热 200°C , 保温 2h); 8) 模具冷却, 打开模具, 取出试件。

3 材料的 X 光检测

以 3×2 四步法编织的试样尺寸为 $50\text{mm} \times 4\text{mm} \times 350\text{mm}$ 。抽取两件, 用水浸法^[5]测定其纤维体积含量分别为 58.4% 和 53.5%, 空隙率分别为 5.9% 和 4.6%, X 光照片见图 2。



图 2 三维编织玻璃纤维/双马复合材料 X 光照片

Fig.2 X-ray photograph of 3D braided glassfiber/bismaleimide composites

图 2 内部白色的斑点和条纹为空隙, 树脂浸润好的

地方黑度大, 可见 B 板的空隙量比 A 板的低, 双马树脂

对 B 板的浸润比对 A 板的好, X 光检测结果未发现纤维聚集, 说明用于试件的三维编织具有良好的耐冲刷性。

一般说来, 纤维体积含量是影响复合材料制件的关键因素之一。三维编织预成型物在纤维体织含量大于 65% 时, 注胶变得困难, 且制件中间出现白色未浸润的纤维, 可观察到稍多的空隙, 而试件边缘从未出现过类似缺陷, 原因是注胶时胶液沿着模具壁流动阻力小于在织物内的流动阻力, 使得中间形成包封, 纤维束内的气体难以排除。纤维体织含量较低时可制得良好制件。但是, 三维编织物的体织含量又不能太低, 这是因为: 1) 纤维体织含量太低, 树脂流对编织件会冲乱织物结构, 引起纤维聚集; 2) 纤维体织含量太低, 降低基本弹性模量和强度性能, 难以满足工业中的应用。

4 力学性能的测试与讨论

采用上述真空辅助 RTM 工艺浸渍了碳/ QY8911-1V 三维编织复合材料试件, 其编织形式分别为 1×1、3×1、1×1×1/2F (各 10 件), 分别以甲组, 乙组和丙组表示。其物理参数和编织参数列于表 1、表 2。其中拉伸试件尺寸标准为 ASTM D3639-76, 压缩试件尺寸标准为 ASTM D3410-75。采用厚度为 1mm 的铝片作为加强片, 粘贴于试件两端, 以消除试验机夹头对于试件夹

持纤维的损伤。

表 1 RTM 工艺编织复合材料物理参数表

Table 1 Physical parameters of braided composites by RTM process

组别	纤维重量 含量, %	试件密度 g/ cm ³	纤维体织含量 %	试件空隙率 %
甲	0. 641	1. 454	52. 66	5. 248
乙	0. 608	1. 445	49. 64	4. 683
丙	0. 640	1. 463	52. 90	4. 626

表 2 三维编织结构复合材料几何参数表

Table 2 Geometric parameters of 3D braided structural composites

组别	编织角, °	横向编织角, °
甲	17. 8	28. 2
乙	24. 5	30. 3
丙	25. 1	27. 7

然后, 分别对这些试件进行拉伸和压缩的刚度和强度性能测试, 所有试验均在 INSTRON 10 吨万能材料试验机上进行。试验结果见表 3~4。

表 3 双马/ 碳编织复合材料试件拉伸性能数据处理表

Table 3 Tensile properties data of braided bismaleimide/ carbon composites specimen

组别	拉伸模量, GPa; 拉伸强度, MPa			拉伸泊松比; 拉伸破坏应变		
	均值	标准差	离散系数, %	均值	标准差, %	离散系数, %
拉甲	52. 47, 522. 24	4. 00, 62. 79	7. 62, 12. 0	0. 6443, 1. 095	0. 0417, 0. 0858	6. 48, 7. 83
拉乙	30. 22, 351. 90	2. 89, 39. 15	9. 56, 11. 1	0. 5795, 1. 494	0. 0434, 0. 1049	7. 49, 7. 02
拉丙	62. 80, 638. 24	1. 16, 66. 18	1. 85, 10. 4	0. 5534, 1. 675	0. 0163, 0. 1207	2. 94, 7. 21

表 4 双马/ 碳编织复合材料试件压缩性能数据处理表

Table 4 properties data of braided bismaleimide/ carbon composites specimen

组别	压缩模量, GPa; 压缩强度, MPa			压缩泊松比; 压缩破坏应变		
	均值	标准差	离散系数, %	均值	标准差, %	离散系数, %
压甲	48. 07, 350. 95	2. 29, 30. 13	4. 76, 8. 58	0. 6389, 0. 876	0. 0493, 0. 0608	7. 72, 6. 94
压乙	32. 52, 253. 89	1. 50, 34. 57	4. 61, 13. 6	0. 5947, 0. 768	0. 0181, 0. 0557	3. 04, 7. 26
压丙	60. 34, 409. 38	2. 07, 50. 05	3. 43, 12. 2	0. 5537, 0. 658	0. 0144, 0. 0538	2. 61, 8. 17

可见对每一种编织形式, 拉伸模量, 拉伸泊松比分别与压缩模量, 压缩泊松比基本相当, 而拉伸强度, 拉

伸破坏应变分别高于压缩强度、压缩破坏应变。与文献
(下转第 40 页)

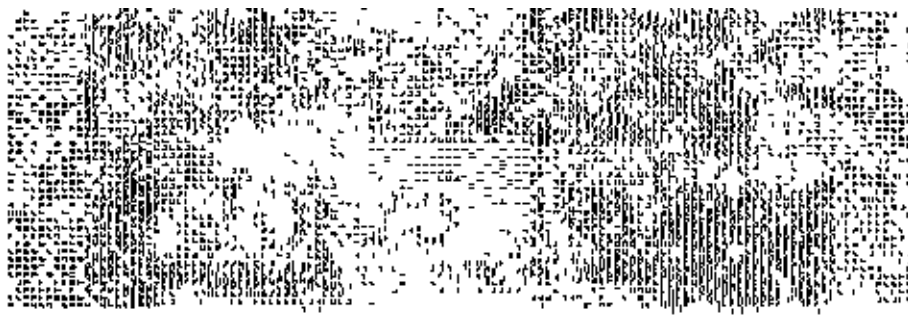


图4 SiCp增强复合材料磨损剖面形貌 (SEM)

(a) 表层疲劳破坏

(b) SiCp颗粒引发裂纹及裂纹扩展

Fig. 4 SEM of cross-section (parallel to the sliding direction and normal to the worn surface) of SiCp/Al6061 (a) fatigue of wear surface (b) cracks due to debond of SiCp at the SiC-Al interface

4 结论

(1) 利用真空压力浸渍工艺能够制备组织比较均匀的SiCp增强和SiCp、Gr混杂增强Al基复合材料。复合材料具有很高的抗咬合性能,尤其是混杂增强复合材料。

(2) 石墨对混杂复合材料有一定减小摩擦系数的作用,但石墨的片状和针状外形对耐磨性不利。

参考文献

- 1 L. M. Hutchings. Mater. Sci. Tech., 1994, 10: 513 ~ 515
- 2 Das, S. VPrasd and T. R. Ramacandam. Wear, 1989, 133: 173 ~ 187
- 3 S. Das, S. V. Prasad and T. R. Ramahandram. Matre. Sci. Eng. 1991, A 138: 123 ~ 132

(上接第36页)

[6] 的结果类似,发现编织角、轴向纱明显地影响模量和强度。随着编织角的增大,拉压模量和强度降低,编织角尤其是横向编织角影响泊松比;轴向纱能显著增加弹性模量和强度性能。并大大地减小泊松比。

参考文献

- 1 F. R. Phelam. Jr., Proceedings of the American Society for Composites, Seventh Technical Conference, 1992, 13-15 (10): 90 ~ 102
- 2 W. Michaeli, V. Hammes, L. Kirberg, R. Kotte, T. A. Osswald and O. Specker. Hanser Publishers, Munich, 1989.
- 3 M. V. Bruschke and S. G. Advani. ANTEC Technical Pa-

- 4 R. K. Rohatgi, R. Asthana and S. Das. Inter. Mater. Rev., 1986, 31 (3): 115 ~ 139
- 5 T. Okumoto, T. Sasaki and T. Hayada. J. Jpan. Foundry-mens, Soc., 1974, 46: 913
- 6 A. T. Alpsa and J. Zhang. Mater. Sci. Eng., 1993, A 161: 273 ~ 284
- 7 P. K. Rohatgi, S. Pay, Y. Liu, Inter. Mater. Rev., 1992, 37 (3): 129 ~ 149
- 8 W. Ames and A. T. Alpsa, Metall. Mater. Trans., 1995, 26A: 85 ~ 98

收稿日期: 1997年10月13日

卢德宏,男,1968年10月生,博士研究生。现在上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室从事金属基复合材料制备及摩擦磨损性能方面的研究,200030。

pers, 1989, 1769.

- 4 杨桂,敖大新,万叔禹,刘述文. 复合材料进展. 航空工业出版社, 1994, 225 ~ 229
- 5 孙慧玉. 编织结构复合材料的力学性能预报和成型工艺研究, 南京航空航天大学博士学位论文. 1996, 23 ~ 25
- 6 Jenn-Ming Yang, Chang-Long Ma and Tsu-Wei Chou. Journal of Composite Materials, 1986, 20 (9): 472 ~ 484

收稿日期: 1997年7月25日

孙慧玉,男,1966年7月生,1996年毕业于南京航空航天大学,获博士学位,现在中国科技大学做博士后研究工作,主要从事编织结构复合材料的力学性能,非线性本构特性等方面工作。合肥(230026)中国科技大学力学和机械工程系