

# 复合材料湿法模压成型 工艺参数研究\*

王英男<sup>1</sup>, 潘利剑<sup>2</sup>, 刘国峰<sup>1</sup>

(1. 东华大学材料科学与工程学院, 上海 201620;  
2. 东华大学民用航空复合材料协同创新中心, 上海 201620)

**[摘要]** 采用湿法模压成型(WCM)工艺制备碳纤维复合材料层合板,对浸润时间和固化压力两个工艺参数进行了设计,制备了不同参数的层合板。利用金相显微镜观察了不同参数制备层合板截面的微观形貌,对层合板成型质量进行表征,主要包括层合板厚度、纤维体积含量、短梁剪切强度(ILSS)、压缩强度以及拉伸强度的测试和计算。结果表明,当浸润时间4min、固化压力1MPa时,层合板的成型质量最好,截面缺陷较少,力学性能优良,力学强度相对提高5%~11.45%左右;随着浸润时间的增加,力学性能先迅速增大后趋于平缓,随着固化压力的增加,层合板的纤维体积含量和力学性能都逐渐增加,在浸润时间10min/固化压力1.5MPa时,纤维体积分数和拉伸模量达到最大值,为66.12%和86.50GPa。

**关键词:** 湿法模压成型; 复合材料; 浸润时间; 固化压力; 力学性能

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.14.056



王英男

硕士研究生,主要从事纤维增强树脂基复合材料成型工艺相关研究。

碳纤维复合材料由于其高比强度及比模量、优异的力学性能、耐疲劳强度、吸能抗震性优良和可设计性强等特点<sup>[1-2]</sup>,在航空航天领域得到了广泛应用。近年来,随着原材料和成型工艺的不断改善,碳纤维复合材料在汽车领域的应用也越来越成熟。目前,轻量化是汽车发展的一个方向。有数据显示汽车整车质量每减少100kg,油耗可降低0.3~0.6L/百千米<sup>[3]</sup>。碳纤维复合材料的使用,相对于铝合金结构件可减重20%~40%,相对于钢类金属件减重60%~80%<sup>[4]</sup>,这在很大程度上可以提升汽车动力性能,减少能源消耗并保护环境。

然而,碳纤维复合材料在汽车行业中的大批量应用受到成本和生产效率的制约<sup>[5-7]</sup>,在复合材料的成

本中制造成本占了60%~70%,成型效率在很大程度上与选择的工艺相关,因此快速发展并深入探索适合汽车行业的复合材料成型工艺是研究的重点<sup>[8-9]</sup>。目前,在汽车领域中使用较多的工艺为高压RTM(HP-RTM)成型工艺,其已经在BMW i3中应用;预浸料模压工艺也可用于量产,湿法模压(WCM)成型工艺在BMW i3和7系中得到了应用<sup>[4]</sup>。

目前,国内对于复合材料成型工艺的研究大多以引进先进设备为基础,缺乏基础性研究。在采用碳纤维复合材料制备汽车零件所使用的成型工艺中,WCM成型工艺具有效率高、操作简单、成本较低等特点,在宝马系列产品中得到了广泛应用,但是国内使用WCM成型工艺制备零件的报道以及相关研究相对较少。本

\* 基金项目: 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金项目(COMAC-SFGS-2016-33311)。

文对 WCM 成型工艺进行了基础性研究,相关工作主要围绕固化压力、预浸润时间以及温度等参数<sup>[10]</sup>展开,以表征改变参数对于复合材料制件性能的影响,为 WCM 成型工艺在汽车领域的广泛使用提供参考依据。

## 试验及方法

### 1 试验材料

试验采用的碳纤维织物为 3K 平纹织物,面密度为 200g/m<sup>2</sup> (常州市宏发纵横新材料科技股份有限公司),中温快速固化环氧树脂(浙江百合航太复合材料有限公司)固化条件为 120℃保温 15min。模具为不锈钢材质。

### 2 试验方法

本试验采用 WCM 成型工艺,利用热压机成型制备碳纤维复合材料层合板,图 1 为 WCM 成型工艺制备碳纤维层合板的示意图。将预热到 65℃的环氧树脂浇注在碳纤维平纹织物上,再移入预热到 65℃的模具中(图 1(a)),合模,并按照试验参数设计进行树脂对纤维织物的预浸润(图 1(b))(各参数下的预浸润压力为 0.1MPa),待模具温度到达 120℃后,保温 15min(图 1(c)),固化完成后降温开模(图 1(d)),即可得到碳纤维复合材料层合板。试验

编号以及试验成型过程中的预浸润时间和固化压力如表 1 所示。

试验对成型后的碳纤维复合材料层合板性能进行表征和微观形貌观察。主要表征其成型后厚度,纤维体积含量,拉伸、压缩及短梁剪切性能等<sup>[11-13]</sup>,采用金相显微镜对成型后层合板的截面进行观察,将宏观性能和微观形貌进行结合。

## 结果与讨论

采用 WCM 成型工艺分别在不

表1 WCM成型工艺制备层合板工艺参数

试验编号	浸润时间 /min	固化压力 /MPa
1	0	0.2
2	0	0.5
3	0	1.0
4	0	1.5
5	2	0.2
6	2	0.5
7	2	1.0
8	2	1.5
9	4	0.2
10	4	0.5
11	4	1.0
12	4	1.5
13	10	0.2
14	10	0.5
15	10	1.0
16	10	1.5

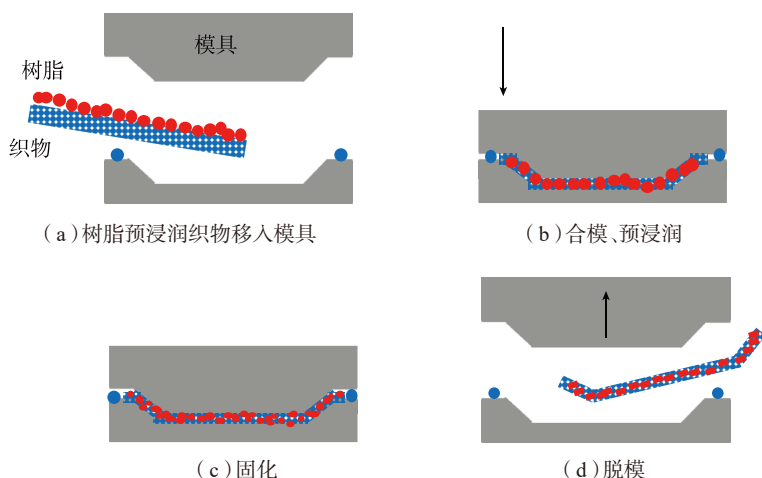


图1 WCM成型工艺制备层合板示意图

Fig.1 Schematic of molding laminates by WCM process

同浸润时间和固化压力参数下制备碳纤维环氧树脂基复合材料层合板,图 2 为不同固化压力下层合板厚度、纤维体积分数以及拉伸模量随浸润时间的变化。可以发现,固化压力相同时,随浸润时间的增加,层合板厚度逐渐降低,纤维体积分数和拉伸模量逐渐增大,当浸润时间超过 4min 后,增长趋势减缓并趋于稳定;纤维体积分数和拉伸模量均随着固化压力的增加而呈现增加趋势,并在固化压力 1.5MPa/ 浸润时间 10min 时达到最大值 66.12% 和 86.50GPa。

不同固化压力下层合板力学性能随浸润时间的变化如图 3 所示。可以发现,浸润时间增加到 2min 时,不同固化压力下短梁剪切强度(ILSS)有最大值,相比没有预设浸润时间情况表现出不同程度的提高(2%~7%),且在 1MPa 固化压力下达到最大值 30.35MPa,随着浸润时间进一步增加,ILSS 呈现先快后慢的下降趋势;不同固化压力下,随浸润时间的增加,压缩强度和拉伸强度都呈现增大的趋势,当浸润时间达到 4min 后,变化趋势相对平缓。

不同固化压力和浸润时间下采用 WCM 成型碳纤维复合材料层合板的截面内部显微照片如图 4 所示,其均为 200 倍下观察到的微观形貌。由图 4 可知,当固化压力为 1MPa 时,随着浸润时间的增加,孔洞、富树脂区域逐渐减少。没有预设浸润时间时,孔洞相对较多、分散较广(图 4(a));当浸润时间达到 4min 时(图 4(c)),缺陷相对较少;当浸润时间继续增加达到 10min 时(图 4(d)),会出现贫胶现象。

纤维体积分数和界面情况在很大程度上决定着成型后复合材料力学性能的优劣。复合材料中纤维是主要承力结构,界面既可以保护纤维又可以传递载荷,所以在选定成型工艺后,提高纤维体积分数以及良好的界面结合是制备得到具有较高力学

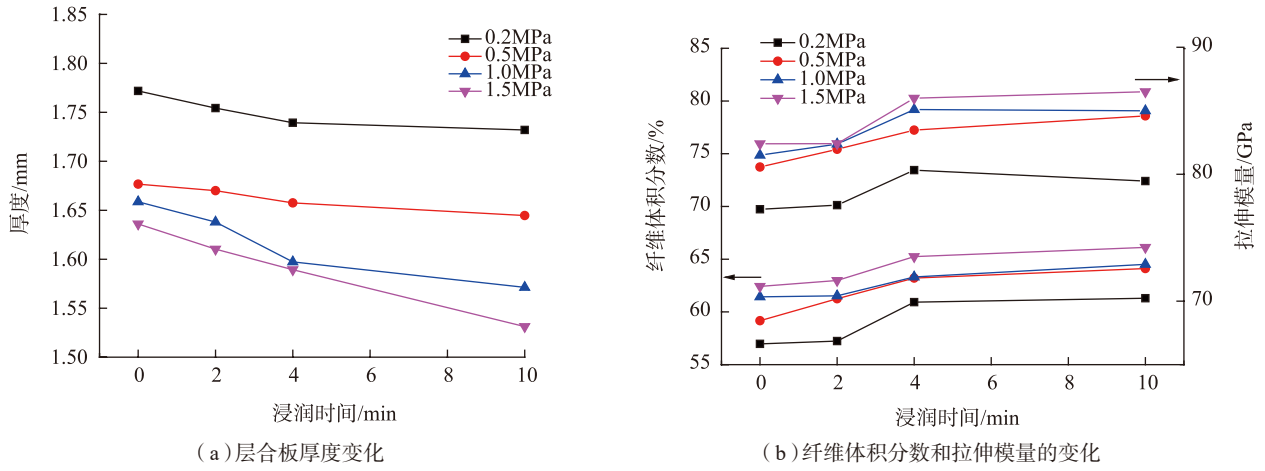


图2 不同固化压力下层合板厚度、纤维体积分数和拉伸模量随浸润时间的变化

Fig.2 Change of laminates thickness, fiber volume content and tensile modulus with infiltration time under different curing pressures

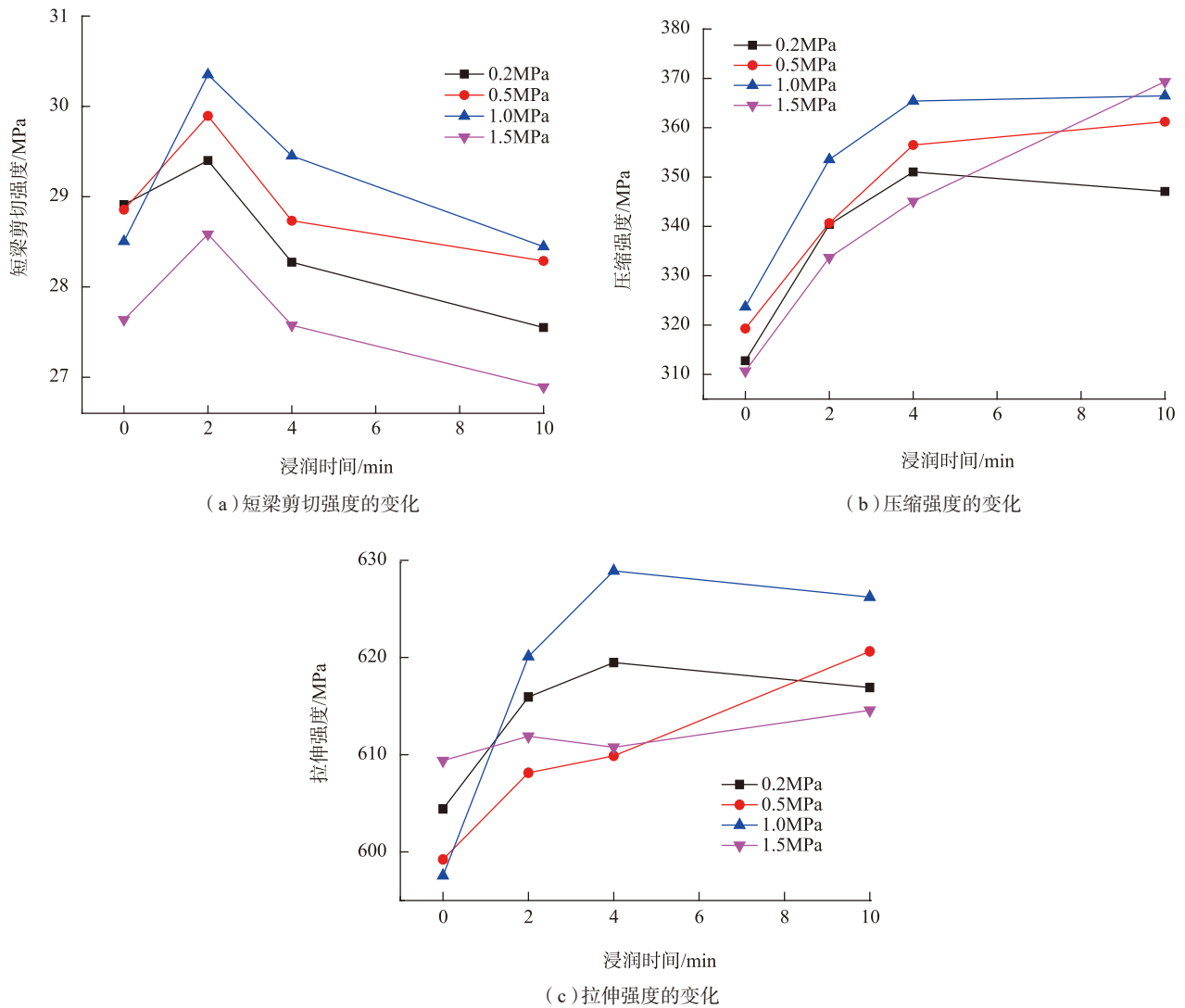


图3 不同固化压力下短梁剪切强度、压缩强度和拉伸强度随浸润时间的变化

Fig.3 Change of short beam shear strength, compression strength and tensile strength with infiltration time under different curing pressures

性能复合材料的关键。因此可以通过改善树脂对纤维织物的浸润以及适当提高固化压力,以控制层合板厚度来提高制品的质量。

在湿法模压工艺成型过程中,将液态环氧树脂浇注到纤维织物上后,树脂对织物的浸润是一个过程,适当的温度、预浸润时间和预压力可以使织物和树脂之间获得较好的接触。固化压力对于制件厚度和纤维体积分数的影响可由纤维束的弹性形变行为来解释, Gutowsk 等<sup>[14-15]</sup>的研究表明纤维以及纤维织物结构存在着轻微的凹凸结构,当纤维织物按照设计进行铺层后,会有接触和孔隙交替出现的状况,适当的固化压力可以使得纤维织物接触更紧密而减少孔隙,因此固化压力的适当增加有利于控制制件的厚度并减少缺陷的产生;真空辅助成型工艺中制件厚度变化的湿态压缩原理<sup>[10]</sup>可以用来解释浸润时间对于制件的影响,当干态的纤维织物得到树脂浸润后,在相同的压力作用下,纤维重新排列,压缩

量增大。在 WCM 成型工艺中,在相同的预成型压力作用下,适当增加浸润时间可以有效地提高树脂与织物间的接触,减少成型后的缺陷并降低制件厚度。在浸润时间不充分的情况下,纤维织物之间的孔隙得不到填充,会产生一定的缺陷,如图 4 (a) 所示;浸润时间过长、固化压力过大的情况下,会出现树脂被挤出较多的现象,造成树脂和纤维织物的界面情况较差,如图 4 (d) 所示。

当浸润时间和固化压力设计的合适时,制件的微观形貌良好,如图 4 (c) 所示。增加固化压力,可以减少纤维织物间的孔隙,增加树脂与纤维织物间的相互接触,从而可以提高制件的纤维体积分数和力学性能,得到质量良好的碳纤维复合材料制件。

## 结论

本文采用湿法模压成型工艺制备了碳纤维环氧树脂基复合材料层合板,主要探讨了浸润时间和固化压力两个参数对于层合板力学性能的

影响,得到以下结论:

(1) 当浸润时间为 4min、固化压力为 1MPa 时,采用 WCM 成型工艺制备的制件力学性能优良,微观结构缺陷较少。

(2) 当浸润时间为 4min、固化压力为 1MPa 时, WCM 成型工艺制备的碳纤维复合材料层合板性能为:厚度为 1.60mm,纤维体积分数为 63.32%,拉伸模量为 85.10GPa,拉伸强度为 628.91MPa,压缩强度为 365.40MPa,短梁剪切强度为 29.45MPa。

(3) 当浸润时间不充分时,树脂与纤维织物间的接触不完全,造成界面较差、缺陷较多,力学性能相比浸润时间充分的情况较差。固化压力为 1MPa 时,未预设浸润时间的力学强度相比浸润时间 4min 下降 5%~11.45% 左右。

(4) 当浸润时间过长,固化压力过大时,树脂会被过多挤出,出现贫胶现象,界面情况较差,导致复合材料制件的性能相对下降。

## 参考文献

[1] 郑学森. 汽车复合材料应用技术体系架构及其发展推进建议 [C]// 中国硅酸盐学会玻璃钢分会. 第二十一届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文集. 北京: 玻璃钢/复合材料杂志社, 2016.

ZHENG Xuesen. Application technology architecture of automotive composites and suggestions to promote their development [C]// China Silicate Society FRP Branch. The 21st National Fiberglass/Composites Annual Conference Proceedings. Beijing: Fiber Reinforced Plastics/Composites Magazine, 2016.

[2] 焦立冰. 复合材料在汽车领域应用浅析 [J]. 新材料产业, 2017(12): 14-17.

JIAO Libing. Application of composite materials in automotive industry [J]. Advanced Materials Industry, 2017(12): 14-17.

[3] 中良. 汽车轻量化要求下的工艺和材料创新 [J]. 汽车工艺师, 2017(10): 35-37.

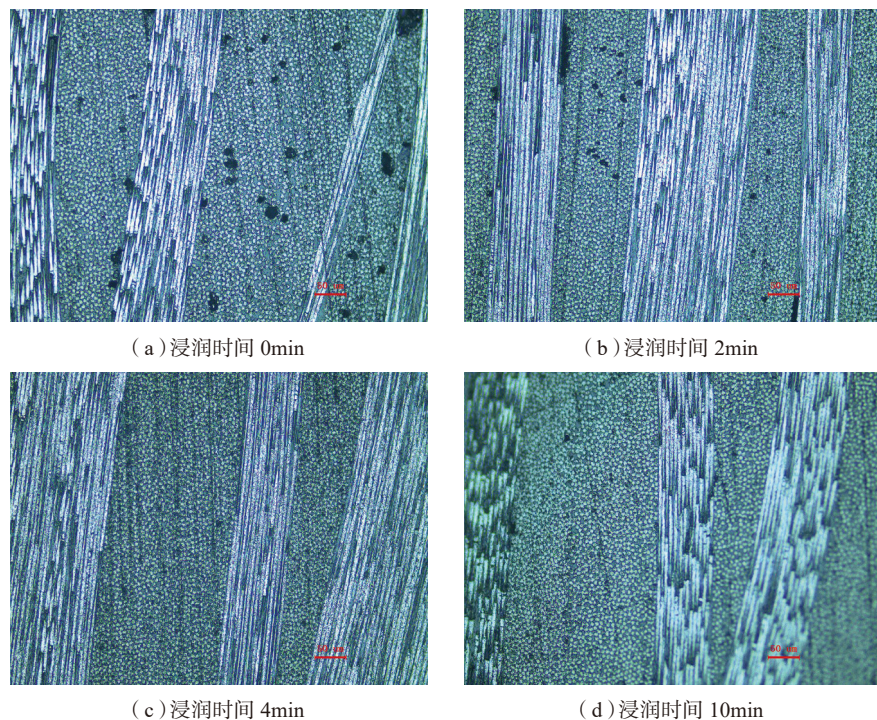


图4 固化压力为1MPa时不同浸润时间下截面微观形貌

Fig.4 Micrographs of sections with different infiltration time under 1MPa curing pressure

ZHONG Liang. The requirements of car lightweighting process and material innovation[J]. *Automotive Technologist*, 2017(10): 35-37.

[4] 刘頔, 朱成. 碳纤维增强树脂基复合材料用于新能源乘用车车身轻量化及经济性分析[J]. *科技与创新*, 2018(2): 5-7.

LIU Di, ZHU Cheng. Carbon fiber reinforced plastics-based composites for light weight and economic analysis of new energy passenger car[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2018(2): 5-7.

[5] 陈绍杰. 先进复合材料在汽车领域的应用[J]. *高科技纤维与应用*, 2011, 36(1): 11-17, 23.

CHEN Shaojie. Application of advanced composites on automotive filed[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2011, 36(1): 11-17, 23.

[6] 李嘉, 崔姝艺, 桂佳俊, 等. 快速固化碳纤维复合材料及其在汽车领域的应用[J]. *高科技纤维与应用*, 2017, 42(2): 10-16.

LI Jia, CUI Shuyi, GUI Jiajun, et al. Rapid curing composites and its application in automotive filed[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2017, 42(2): 10-16.

[7] 雷绍阔, 钟国留, 刘伟. 浅论复合材料在汽车上的应用[J]. *上海塑料*, 2017(2):

8-12.

LEI Shaokuo, ZHONG Guoliu, LIU Wei. Primary study on application of composite material in automobile[J]. *Shanghai Plastics*, 2017(2): 8-12.

[8] 何亚飞, 矫维成, 杨帆, 等. 树脂基复合材料成型工艺的发展[J]. *纤维复合材料*, 2011, 28(2): 7-13.

HE Yafei, JIAO Weicheng, YANG Fan, et al. The development of polymer composites forming process[J]. *Fiber Composites*, 2011, 28(2): 7-13.

[9] 赵云峰, 孙宏杰, 李仲平. 航天先进树脂基复合材料制造技术及其应用[J]. *宇航材料工艺*, 2016, 46(4): 1-7.

ZHAO Yunfeng, SUN Hongjie, LI Zhongping. Manufacturing technology and its application of aerospace advanced polymer matrix composites[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2016, 46(4): 1-7.

[10] 庄恒飞, 潘利剑, 刘卫平, 等. VARI成型厚度稳定与抽真空时间的研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2015(2): 5-10.

ZHUANG Hengfei, PAN Lijian, LIU Weiping, et al. A study of the steady thickness by the vacuum assisted resin infusion process and the vacuum keeping time[J]. *Fiber Reinforced*

*Plastics/Composites*, 2015(2): 5-10.

[11] ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2008.

[12] ASTM. Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials using a combined loading compression (CLC) test fixture[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2009.

[13] ASTM. Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2010.

[14] GUTOWSKI T G. Resin flow/fiber deformation model for composites[J]. *SAMPE Quarterly*, 1985, 16(4): 58-64.

[15] GUTOWSKI T G, DILLON G. The elastic deformation of lubricated carbon fiber bundles: comparison of theory and experiments[J]. *Journal of Composite Materials*, 1992, 26(16): 2330-2347.

通讯作者: 潘利剑, 博士, 副研究员, 研究方向为纤维增强树脂基复合材料, E-mail: xiaopanhrb@163.com.

## Parameters of Composites Wet Compression Molding

WANG Yingnan<sup>1</sup>, PAN Lijian<sup>2</sup>, LIU Guofeng<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**[ABSTRACT]** The carbon fiber laminates are fabricated by wet compression molding method. We have designed two molding parameters of infiltration time and curing pressure to fabricate the laminates. The micro appearance of the laminates' section was observed by metalloscope. The molding qualities of laminates were represented, which include the thickness, fiber volume content, ILSS, compression and tensile strength. Results show that the laminates have good quality with the infiltration time being 4 minutes and the curing pressure being 1MPa, there are few defects in the section, and the mechanical properties have relatively improved by 5%~11.45% compared with others; with the increase of infiltration time, the mechanical properties showed a rapid and then slow trend; with the increase of curing pressure, the fiber volume content and tensile modulus of laminates showed an increasing trend. The fiber volume content and tensile modulus have the largest value 66.12% and 86.50GPa respectively, when the infiltration time is 10 minutes and the curing pressure is 1.5MPa.

**Keywords:** Wet compression molding; Composites; Infiltration time; Curing pressure; Mechanical property

(责编 逸飞)