

# 非热压罐成型低孔隙率复合材料技术研究进展

杨茂伟 刘建 刘振濮 王志强

(中国航空工业集团公司济南特种结构研究所,高性能电磁窗航空科技重点实验室,济南 250023)

**文 摘** 介绍了非热压罐成型(OOA)低孔隙率复合材料技术的研究进展,详细阐述了 OOA 预浸料、OOA 树脂再到 OOA 预浸料增强材料等对复合材料孔隙的影响,分析了 OOA 预浸料固化过程中影响孔隙的典型物理现象,以及各种制造工艺条件和参数等对孔隙率的影响,并提出了控制 OOA 复合材料孔隙率的方法和建议。

**关键词** 热压罐外复合材料,真空袋压成型,孔隙,孔隙率

中图分类号:V258+.3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.06.004

## Research Progress of Out of Autoclave Technology for Low Porosity Composite

YANG Maowei LIU Jian LIU Zhenpu WANG Zhiqiang

(The Aeronautical Science Key Lab for high Performance Electromagnetic Windows, Research Institute for Special Structure of Aeronautical Composite, AVIC, Jinan 250023)

**Abstract** In this paper, research progress of out of autoclave(OOA) composite technology for low porosity composite was reviewed. We presented the influence of OOA materials properties including prepreg, resin and reinforcements on porosity of OOA composite, then, phenomena that affect porosity during curing were analyzed. Afterward, the relationships between porosity of OOA composite and manufacturing process conditions and parameters were also described. Finally, some suggestions on reducing porosity of OOA composite were proposed.

**Key words** OOA composite, VBO, Void, Porosity

### 0 引言

目前航空航天用高性能树脂基复合材料成型主要使用热压罐工艺<sup>[1]</sup>,但是热压罐成型工艺存在能源消耗多、设备制造和运行成本高、对成型模具要求高等问题,这已经成为制约复合材料广泛应用的一个“瓶颈”。低成本复合材料技术在这种背景下诞生,欧美国家提出并实施了多项低成本复合材料计划,包括 DMLCC、AFS、LCCP、ACT、CAI、ALCAS 和 TANGO 等,这些计划的实施促进了复合材料技术向低成本方向发展。非热压罐成型(OOA)技术是一种低成本复合材料制造技术,也可称为 VBO 工艺,其与热压罐成型工艺的主要区别是成型时不需要施加外压,因此在设备、成型和模具成本方面都优于热压罐成型工艺。获得与热压罐成型工艺相同质量的复合材料,是 OOA 技术的主要目标。由于成型压力低,OOA 复合材料中孔隙率较高,一般热压罐成型航空航天主承力结构件的孔隙率低于 1%,次承力结构件的孔隙率应

低于 2%,而传统的热压罐固化预浸料若采用 OOA 工艺固化,复合材料的孔隙率可以高达 5%~10%<sup>[2]</sup>。孔隙是影响复合材料性能的重要因素,因此降低复合材料的孔隙率并达到热压罐复合材料孔隙率的水平成为 OOA 技术研究的首要任务。本文从材料和制造工艺两方面综述了近年来低孔隙率 OOA 复合材料技术进展情况。

### 1 OOA 材料

#### 1.1 OOA 预浸料

复合材料成型中,预浸料的性能对复合材料产品的性能影响很大,结合 OOA 工艺技术的特点,有学者提出 OOA 预浸料是“会呼吸的”预浸料,其特征在于预浸料是部分浸渍的。

THORFINNSON 和 BIERMANN<sup>[3-4]</sup>在 20 世纪 80 年代提出最终复合材料中的孔隙和预浸料的浸渍程度存在关联,他们认为预浸料中的树脂未完全浸润增强纤维时,纤维束之间以及纤维束内部存在大量未浸

收稿日期:2016-05-23;修回日期:2016-08-10

作者简介:杨茂伟,1983 年出生,高级工程师,主要从事复合材料工艺研究工作。E-mail:sduymw@163.com

渍的干纤维,这些干纤维可以作为空气排除的通道,使得预浸料中夹杂的空气、水汽、挥发份等在树脂完全浸润纤维之前排除出预浸料体系,从而有效降低复合材料的孔隙率。后来的研究者<sup>[5]</sup>采用 Cytec 公司的第一代低温固化 OOA 树脂体系(5215 和 754)研究了纤维浸渍程度对孔隙率的影响,发现在材料完全相同的情况下,完全浸渍的预浸料按照 OOA 工艺固化后得到了孔隙率为 5%的复合材料,而采用部分浸渍的预浸料制造的复合材料孔隙率接近 0,证明预浸料的浸渍程度的确会影响最终复合材料中的孔隙率。

GURIT 公司开发了 SPRINT 预浸料,是由两层纤维夹裹一层树脂膜组成,其浸渍程度很低,纤维含量高,提供了大量的气体排除通道,采用 OOA 工艺即可获得低孔隙率复合材料。与之相反,大多数的 OOA 预浸料的结构是两层树脂膜夹裹一层纤维,纤维的两面均为部分浸渍,中间部分的纤维为气体的排除提供了通道,有利于气体的排除和降低孔隙率。

## 1.2 OOA 树脂

树脂基体对预浸料的工艺性能和使用性能起决定性的作用,用于 OOA 预浸料的树脂应具有较强的黏合力,为树脂和纤维的界面提供足够的粘接强度,且具有一定的工艺粘性,满足铺贴工艺的要求<sup>[2]</sup>。除此之外,OOA 树脂区别于热压罐材料树脂的两个关键点如下。

### 1.2.1 挥发物含量低、吸湿率低

OOA 材料仅在一个真空压力下固化,没有高外压抑制固化过程中气泡的汇集和生长,这些气泡的来源主要是铺层过程中夹裹的气体、树脂挥发份、反应放出的小分子以及预浸料吸收的水分,如果树脂凝胶前这些气体无法排除出预浸料体系,就会留在材料中形成孔隙。GRUNENFELDER 等人<sup>[6]</sup>将 OOA 预浸料暴露在不同相对湿度环境中以评估相对湿度对孔隙率的影响,发现树脂内的吸湿量随相对湿度增长呈抛物线关系增长,当初始状态的预浸料分别相对湿度 70%、80%和 90%(温度均为 35℃)条件下处理一段时间后,材料的含水率由初始状态的 0.24%分别上升至 0.64%、0.77%和 0.99%,其对应的复合材料层板孔隙率则由远小于 0.1%分别升高至 0.08%、1.0%和 2.62%,OOA 层板内的孔隙率随吸湿量增长呈指数级增长。KARDOS 等人<sup>[7]</sup>提出的基于扩散的孔隙生长模型解释了这一现象,当 OOA 预浸料中气体(包括吸湿引起的)所致孔隙压力超过树脂的压力时,孔隙就会长大。OOA 工艺最大固化压力仅为一个大气压,当孔隙内压超过树脂压力(不大于一个大气压)时,树脂中的气泡就会长大。挥发份和固化反应放出的小分子对孔隙的影响机理与吸湿的影响机理基本

相同,因此为了获得低孔隙率的 OOA 复合材料,OOA 树脂必须具有较低的挥发物含量和吸湿率<sup>[6,8]</sup>,正是基于这个原因,OOA 预浸料一般采用具有这一特点的热熔树脂制造。

### 1.2.2 流变性适中

RIDGARD<sup>[9]</sup>认为,部分 OOA 预浸料中设计的透气通道必须在固化过程中的某一段时间内保持敞开。要实现这一目标需要仔细的设计和 control 树脂的流变性,同时预浸料的初始浸渍程度必须充分考虑树脂的黏度、固化工艺等多重因素。树脂黏度如果过低,会过早的将干纤维提供的气体排除通道密封住,导致由于气体夹裹形成的孔隙含量增加;而如果树脂黏度过高,虽然干纤维的透气通道保持敞开和连通状态,但由于流动性不好而无法将干纤维之间的孔隙充满并完全浸润纤维,也会导致孔隙大量增加。需要特别指出的是,由于 OOA 预浸料预压实操有时需要几个小时甚至更长时间,必须保证树脂在压实环境和温度下不发生流动,否则这种流动可以将气体排除通道密封<sup>[10-11]</sup>。

良好的 OOA 树脂体系应能在预压实阶段和固化的早期阶段保持黏度以阻止树脂浸润纤维,防止气体排除通道被封闭,而在固化的中后期能够渗透进入干纤维中并完成浸润,防止局部区域贫胶。

### 1.3 增强材料

增强材料的结构和致密程度等会影响 OOA 预浸料的气体排除能力(气体渗透率)和树脂的流动性进而影响最终复合材料的孔隙率和力学性能。

GRUNENFELDER 和 NUTT<sup>[12]</sup>评估了单向带预浸料(Cycom 5320)的气体渗透率。单向材料在沿纤维长度方向上空气排除通道是直的,而垂直于纤维方向的空气排除路径更加曲折,因此单向材料在纤维长度方向上具有较高的渗透率,大约是垂直于纤维方向渗透率的 1.5 倍。KRATZ 和 HUBERT 等人<sup>[13-14]</sup>测定了两种 OOA 预浸料面内和厚度方向的渗透率,两种预浸料的树脂均为 Cycom 5320,增强材料分别为平纹织物(PW)和 5HS 织物,结果发现织物的面密度和紧密程度对厚度方向的渗透率有很大影响,面密度相对较低的平纹织物(196 g/m<sup>2</sup>)纤维束之间间隙相对较大且排列规则,其渗透率相对较高且较为稳定和均匀,而面密度较高的 5HS 织物(375 g/m<sup>2</sup>)纤维束排列密实且纤维束之间几乎没有大的孔隙,渗透率低且不稳定。试验结果证明织物结构和致密程度等会对预浸料的气体渗透率产生重要影响。

另外增强材料的结构和致密程度还会影响树脂的流动和对纤维的浸润,一般来说,面密度大、纤维排列密实的增强材料中树脂的流动阻力大,需要相对较低宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 6 期

黏度的树脂;而纤维排列相对疏松的增强材料不需要很低黏度的树脂。

总之,增强材料的结构和致密程度会影响预浸料的气体排除能力以及树脂在增强材料间的流动能力。虽然所有的纤维和增强材料结构都可以作为 OOA 预浸料增强材料,但对于特定的树脂、零件和制造工艺,在进行增强材料选择时必须综合考虑这些因素。

## 2 OOA 复合材料制造工艺

热压罐成型复合材料中孔隙的形成有多种原因,包括铺层过程中夹杂的空气、吸湿、固化过程中产生的气体等<sup>[15-18]</sup>。对于固化压力最多不超过一个大气压的 OOA 工艺和浸渍不完全的 OOA 预浸料,其孔隙形成原因还包括树脂流动不充分和浸润不完全等。因此,OOA 复合材料中的孔隙大致可分为两类:第一是气体所致的孔隙,指的是由于铺贴过程中夹裹的气体、预浸料中的挥发份、预浸料中吸收的水分蒸发及固化反应释放的气体等未能及时从体系内排除而在树脂凝胶后固结在复合材料中形成的空洞等缺陷;第二是流动导致的孔隙<sup>[19-20]</sup>,即在树脂凝胶前,树脂未能填充纤维与纤维间的孔隙、未能将预浸料中的纤维完全浸润而导致的空洞等缺陷。影响这两种孔隙形成主要是制造过程中的气体排除现象和树脂流动及浸润现象。

### 2.1 气体排除现象

#### 2.1.1 气体渗透率

ARAFATH 等人<sup>[21]</sup>认为气体的流动是在具有一定渗透率的介质中可压缩流体的流动,并提出了气体流动模型,这个模型阐述了空气排除的物理规律,表明在一定假设下,气体排除时间随增强材料渗透率的下降而线性增加,并与制件长度的平方存在线性关系。这些关系表明,如果空气排除需经历的距离增加一倍(由于层压板边长或不透气的边缘),气体排除时间增加到原来的四倍。

LOUIS 等人<sup>[22]</sup>测试了 OOA 预浸料(MTM45-1/5HS)在室温下真空压缩时面内和厚度方向气体渗透率。结果显示,面内渗透率(约  $10^{-14} \text{ m}^2$  数量级)比横向渗透率(约  $10^{-18} \text{ m}^2$ )大 4 个数量级。研究还发现当预浸料层数增加较多时渗透率接近 0,作者认为渗透率主要受少数未浸渍的干纤维支配,当使用多层预浸料时,多层预浸料中的干纤维“透气通道”无法对齐,导致层板的渗透率大大降低。

TAVARES 等人<sup>[23]</sup>测试了单向带材料(ACG 公司 VTM264)在室温和固化温度下的渗透率,室温渗透率约为  $5 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ ,与 LOUIS 等人的结果一致。在固化过程的初始升温阶段和恒温阶段,由于预浸料浸润程度提高,渗透率降低,而在第二个升温阶段,由于宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 6 期

黏度的降低、并最终固化,渗透率有所上升并稳定。该研究同时揭示了固化过程中气体沿横向的渗透能力是随树脂和预浸料的特性而变化的。

#### 2.1.2 边缘透气设置

图 1 是典型的 OOA 复合材料真空袋封装示意图。气体渗透率影响的是气体在预浸料内部的传导能力,要将预浸料内部的气体完全排除,还需要将预浸料边缘的气体导出到透气毡等材料,而挡块可能阻止预浸料边缘气体的排除,为了实现预浸料面内的气体排除,挡块设置有边缘透气材料,这些透气材料可以是干纤维束、纤维布或其他透气材料,透气材料连通预浸料的边缘和透气毡,能够确保预浸料中排除的气体顺利通过而排出预浸料体系。为了实现预浸料厚度方向的气体排除,可以采用有孔的脱模隔离膜或撕离布将层压板与透气材料分隔开。

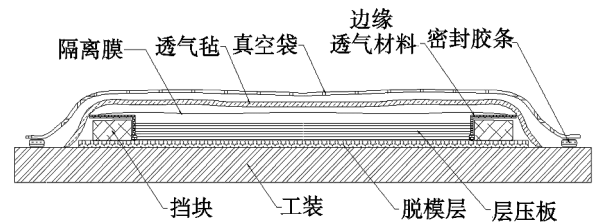


图 1 典型 OOA 复合材料真空袋封装示意图

Fig.1 Typical vacuum bag for making OOA composite

#### 2.1.3 影响气体排除的因素

影响 OOA 预浸料固化过程中气体排除能力的主要因素包括预浸料自身的气体渗透率、气体排除的驱动力——真空度以及边缘透气装置的设置,而渗透率又同时受到预浸料的浸渍程度、树脂的流变特性和增强材料结构等材料自身特性的影响,以及预浸料铺层数、制件尺寸、固化参数(包括升温速率、恒温温度、恒温时间等)等工艺因素的影响,要提高 OOA 预浸料的气体排除能力,必须充分考虑上述因素。

### 2.2 树脂流动和浸润行为

#### 2.2.1 树脂的宏观流动和微观流动

THOMAS 及 CENDER 等<sup>[24-25]</sup>认为,树脂的流动分为宏观和微观流动。宏观流动发生在铺层间和纤维束周围,微观流动发生在纤维束内部。固化前预浸料的层间和纤维束之间存在较大的孔隙,纤维束内部纤维单丝之间存在相对较小的微孔隙[图 2(a)];在固化初始阶段,树脂在压力作用下首先渗透浸入预浸料层间、纤维束之间相对较大的孔隙,这些大的孔隙被树脂填充后减小或消失[图 2(b)],树脂在充满纤维束之间的空间后形成富树脂区,这是树脂的宏观流动,这一过程同时伴随着气体的排除;其后树脂向纤维束内部渗透,逐渐进入纤维束内部的纤维单丝之间的微孔隙并完成对纤维的浸润,纤维束内部的微孔隙

随之而消失[图 2(c)],这种微观流动和浸润现象是

影响孔隙率的关键。

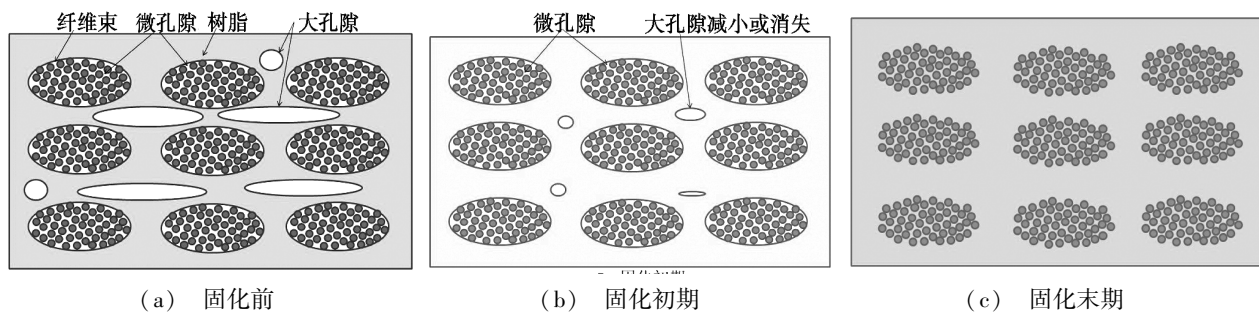


图 2 树脂流动对孔隙的影响示意图

Fig.2 Schematic of resin flow influence on porosity of OOA composite

FAHRANG, CENTEA 和 HUBERT 等人<sup>[26-28]</sup>分别利用光学显微镜和微米 CT 等手段,研究了商业化 OOA 预浸料(MTM45-1 和 5320 树脂)不同固化阶段的浸渍状态。结果均显示,预浸料固化初期纤维束中心处的纤维未被浸润,纤维束周围存在富树脂区和孔隙。随着温度升高和树脂流动,富树脂区的孔隙减少或消失,干纤维逐渐被浸润,并指出温度升高时树脂对纤维束的浸润是影响孔隙率的关键。

### 2.2.2 影响树脂流动和浸润的因素

CENEA 等人<sup>[19]</sup>研究了不同的材料和工艺参数对纤维束浸渍速率的影响,发现纤维的浸渍强烈依赖于树脂黏度曲线,也依赖于升温速率、恒温温度和树脂初始固化程度(与外置时间有关),以及纤维的体积分数和渗透率等。他们认为采用高的恒温温度和快的升温速率可以显著降低树脂黏度进而减小由于纤维不浸润而形成孔隙的风险。

GRUNENFELDER 等人<sup>[28]</sup>研究了外置时间对 OOA 复合材料(牌号 5320/5HS)孔隙率的影响,结果表明,一旦树脂的外置时间超过 21 d,预浸料中树脂的流动能力变弱,纤维束中就会形成孔隙,其尺寸和数量会一直发展直至树脂的玻璃化转变温度超过环境温度,树脂交联停止、分子链的活动能力降低,该研究证实了外置时间是通过影响树脂流动性而最终影响孔隙率的。

真空度不仅是预浸料中气体排除的驱动力,还是树脂流动的驱动力。对于同样的树脂,低真空度会导致树脂流动性降低,影响树脂渗透进入纤维束之间和纤维束内部的能力,从而影响复合材料的孔隙含量。

综上所述,影响 OOA 预浸料固化过程中树脂流动和浸润的主要是树脂的黏度和流变性能等材料自身特性,以及影响树脂流变特性的固化参数、外置时间和真空度等工艺参数等。通过材料设计和工艺参数的调节将树脂的流变性控制在合理的范围内能够有效降低 OOA 复合材料的孔隙率,而一旦材料自身性能和工艺条件联合作用使得树脂黏度与设计偏离

较远,部分浸渍的 OOA 预浸料极易受到影响而产生很严重的孔隙。

### 3 结语

根据 OOA 复合材料中孔隙的形成原因及其影响因素,要获得低孔隙率的复合材料,应做到以下 7 点:

- (1) 采用挥发份含量低、固化过程中不放出小分子的 OOA 树脂;
- (2) 要控制预浸料的贮存和使用环境条件,减小环境湿度,减少预浸料在贮存、铺贴等过程中的吸湿;
- (3) 控制预浸料的外置时间,减小外置时间对预浸料流变性的影响;
- (4) 减少铺贴过程中夹杂气体,铺贴后采用预压实等工艺手段尽可能多地排除铺层中夹裹的气体;
- (5) 采取合理的真空袋封装方式,在制件边缘设计透气装置;
- (6) 合理调配树脂的流变性,并结合相应的升温速率、恒温温度和恒温时间等固化工艺参数,在树脂凝胶前维持气体排除通道的畅通,尽可能多的将体系内的气体排除,同时又能在固化的中后期使得树脂黏度降低并完全浸润纤维;
- (7) 确保足够的压实和固化真空度,保证足够的气体排除和树脂流动驱动力。

与热压罐复合材料相比,OOA 复合材料在成本、节能等方面具有明显优势,越来越受到人们的关注,其在航空航天复合材料领域的作用和地位正持续上升,随着 OOA 材料和制造技术的不断发展和成熟,OOA 复合材料的应用前景会越来越广阔。

### 参考文献

- [1] 杜善义.先进复合材料与航空航天[J].复合材料学报,2007,24(1):1-12.
- [2] 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.
- [3] THORFINNSON B,BIERMANN T.Production of void free composite parts without debulking[C]//31<sup>st</sup> International SAMPE Symposium. Las Vegas, NV: Society for the Advancement of Material and Process Engineering,1986:480-490.

- [4] THORFINNSON B, BIERMANN T. Degree of impregnation of prepregs-effects on porosity [C] // 32<sup>nd</sup> International SAMPE Symposium. Anaheim, CA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1987; 1500–1509.
- [5] REPECKA L, BOYD J. Vacuum-bag-only-curable prepregs that produce void-free parts [C] // 47<sup>th</sup> International SAMPE Symposium and Exhibition 2002. Long Beach, CA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2002; 1862–1874.
- [6] GRUNENFELDER L K, NUTT S R. Void formation in composite prepregs-effect of dissolved moisture [J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(16): 2304–2309.
- [7] KARDOS J L, DUDUKOVIC M P, DAVE R. Void growth and resin transport during processing of thermosetting-matrix composites[J]. *Advances in Polymer Science*, 1986, 80: 101–123.
- [8] 罗云烽, 彭公秋, 曹正华, 等. 航空用热压罐外固化预浸料复合材料的应用[J]. *航空制造技术*, 2012(18): 26–31.
- [9] RIDGARD C. Out of autoclave composite technology for aerospace, defense and space structures [C] // SAMPE '09 Spring Symposium Conference Proceedings. Baltimore, MD: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2009.
- [10] STEELE M, CORDEN T, GIBBS A. The development of out-of-autoclave composite prepreg technology for aerospace applications [C] // 2011 SAMPE Spring Technical Conference and Exhibition Proceedings. Long Beach, CA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering; 2011.
- [11] RIDGARD C. Next generation out of autoclave systems [C] // Proceedings of the SAMPE 2010 Conference and Exhibition. Seattle, WA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2010.
- [12] GRUNENFELDER L K, NUTT S R. Air removal in VBO prepreg laminates; effects of breathe-out distance and direction [C] // Proceedings of the SAMPE Tech 2011 Conference and Exhibition. Fort Worth, TX: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2011.
- [13] KRATZ J, HUBERT P. Anisotropic air permeability in out-of-autoclave prepregs; Effect on honeycomb panel evacuation prior to cure [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 49: 179–191.
- [14] LEVY A, KRATZ J, HUBERT P. Air evacuation during vacuum bag only prepreg processing of honeycomb sandwich structures; in-plane air extraction prior to cure [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 68: 365–376.
- [15] 戴夫 R S, 卢斯 A C. 高分子复合材料加工工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004; 321–322.
- [16] DAVE R, KARDOS J L, DUDUKOVIC M P. A Model for Resin Flow During Composite Processing Part 1: General Mathematical Development [J]. *Polymer Composites*, 1987, 8(2): 29–38.
- [17] DAVE R, KARDOS J L, DUDUKOVIC M P. A model for resin flow during composite processing part 2: numerical analysis for unidirectional graphite/ epoxy laminates [J]. *Polymer Composites*, 1987, 8(2): 123–132.
- [18] CAMPBELL F C, MALLOW A R, BROWNING C E. Porosity in carbon fiber composites an overview of causes [J]. *Journal of Advanced Materials*, 1995, 26(4): 18–33.
- [19] CENTEA T, HUBERT P. Modelling the effect of material properties and process parameters on tow impregnation in out-of-autoclave prepregs [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(9): 1505–1513.
- [20] GRUNENFELDER L K, CENTEA T, HUBERT P. Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 45(1): 119–126.
- [21] ARAFATH A R A, FERNLUND G, POURSAITIP A. Gas transport in prepregs: model and permeability experiments [C] // Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials. Edinburgh, Scotland: International Committee on Composite Materials, 2009.
- [22] LOUIS B M, HSIAO K, FERNLUND G. Gas permeability measurements of out of autoclave prepreg MTM45-1/CF2426A [C] // Proceedings of the SAMPE 2010 Conference and Exhibition. Seattle, WA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2010.
- [23] TAVARES S S, MICHAUD V, MANSON J A E. Through thickness air permeability of prepregs during cure [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(10): 1587–1596.
- [24] THOMAS S, NUTT S R. Temperature dependence of resin flow in a resin film infusion (RFI) process by ultrasound imaging [J]. *Applied Composite Materials*, 2009, 16(3): 183–196.
- [25] CENDER T A, SIMACEK P, ADVANI S G. Resin film impregnation in fabric prepregs with dual length scale permeability [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 53: 118–128.
- [26] FAHRANG L, FERNLUND G. Void evolution and gas transport during cure in out-of-autoclave prepreg laminates [C] // Proceedings of the SAMPE 2011 Conference. Long Beach, CA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2011.
- [27] CENTEA T, HUBERT P. Measuring the impregnation of an out-of-autoclave prepreg by micro-CT [J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(5): 593–599.
- [28] GRUNENFELDER L K, CENTEA T, HUBERT P, et al. Effect of room-temperature out-time on tow impregnation in an out-of-autoclave prepreg [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 45: 119–126.