不同通道中气泡的形态变化及运动条件分析

赵卫娟 张佐光 孙志杰 王景明

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 孔隙是影响复合材料性能的主要因素之一,为了消除孔隙,提高产品质量,对复合材料成型过程中气泡运动特性的研究是十分必要的. 利用预浸料片层模拟系统,考察了气泡在不同运动通道中穿出的形态变化过程;分析了外加压力、树脂粘度、气泡大小、网格面积等因素对气泡穿出行为的影响;同时提出了气泡穿出的约束条件. 研究结果表明,随着树脂粘度的增加,气泡体积和空隙面积的减少,气泡穿出所需的临界压力将逐渐增大. 该研究结果将为热压成型过程中气泡运动模型的建立提供实验依据.

关 键 词: 复合材料; 热压成型; 气泡; 孔隙

中图分类号: TB 332

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)03-0369-04

Bubble transfiguration and moving condition in different channels

Zhao Weijuan Zhang Zuoguang Sun Zhijie Wang Jingming

(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Void is one of the most important factors which affects performances of composites. The void problem is generic to most polymer composite process, regardless of whether the matrix is a thermosetting or a thermoplastics matrix. In order to eliminate porosity and promote product quality, it is essential to study the bubble traversing behavior during composites manufacturing. Using the laminate simulation systems, the configuration changing process of bubbles under different traversing channels was investigated preliminarily. Then the main factors affecting bubble traversing behavior were studied respectively, such as the bubble volume, the resin viscosity and the inter-space size. Finally the kinematic conditions for bubble traversing were also proposed. The experimental results showed that the external pressure needed for bubble traversing in the woven layers would increase with the increase in resin viscosity, the decreasing of bubble diameter and the inter-space area. These results will provide experimental bases for the establishment of bubble movement model in hot-compaction process.

Key words: composites manufacturing; hot compaction; bubbles; porosity

复合材料构件中的孔隙问题是人们普遍关注的热点. 在聚合物基复合材料的制造过程中,无论聚合物基体的种类如何、增强材料是否经过表面处理,均会在复合材料内部残留一定的孔隙,这些孔隙的存在为外界空气和水分扩散进制品提供了路径,从而导致聚合物塑化,使聚合物链降解,并因其氧化作用削弱纤维和基体的界面结合力. 另外,孔隙的存在会降低复合材料的耐用性和抗疲劳性,使复合材料的机械性能明显下降,从而影响复合材料的质量[1,2]. 许多学者[3]认为,对环氧基复合材料来说,当孔隙含量增加 1%,材料的剪切性能将下降 6%～8%. 为了提高复合材料的质量,必须合理地控制温度、压力等工艺参数,设法使气泡在树脂凝胶之前排出,以便降低孔隙含量.

目前对复合材料成型过程中气泡的研究以及所建立的模型多是关于气泡的形成、含量、大小及其分布等问题的[4～6],对已形成气泡如何运动的研究较少,同时对气泡穿过铺层时的形态变化以

收稿日期: 2005-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(598331); 国家 863 计划资助项目(2001AA335020)

作者简介: 赵卫娟(1974 -),女,河北平泉人,博士生,wjzhao @buaa.edu.cn.

及气泡运动条件还不是很清楚,本研究就是基于这些问题而进行的.此研究结果将为复合材料成型过程中气泡运动模型的建立提供边界条件,以便进一步优化工艺参数,提高产品质量.

1 实验部分

实验过程中选取了3种不同形式的运动通道来研究气泡的变形情况及其运动条件,分别为织物层、变截面竖直圆管通道以及弯曲通道(见实验结果与讨论).实验所用液体为环氧618树脂,树脂粘度通过加入二氧六环稀释剂来调节.通过微量进样器(量程为5～100μL)向容器内打入气泡,调节注气量的多少来控制气泡的大小,压力的变化主要通过在铺层上施加不同的作用力或者通过调节液面的高度差来实现.用数码摄像机拍摄气泡的运动过程,最后用计算机软件Adobe Premiere对图像进行处理,从而来研究气泡的运动状态.

2 实验结果与讨论

2.1 气泡穿过不同运动通道的形态变化

为了考察气泡在复合材料成型过程中穿出的形态变化,依据成型过程中纤维和织物的排列状态,实验分别研究了气泡在3种不同通道形式下的运动情况,下面将分别进行介绍.

2.1.1 织物层

实验采用图1所示的装置进行,所用织物为聚乙烯布.实验中,首先将粘有织物的铺层放入盛有树脂的透明玻璃容器中,并使其保持静止,观察气泡从产生到穿过织物铺层的形态变化过程.实验发现,气泡在树脂中运动时呈规则的球形,当气泡接触到织物铺层时,会由球形变为扁球形,粘附在铺层下面而静止,且气泡越大这种变化越明显.当对铺层施加一定的压力后,铺层开始向下运动,树脂相对向上流出,同时气泡在织物的空隙处产生一个明显向上的"突起",随着铺层继续向下运动,"突起"慢慢变大,当"突起"达到某个临界尺寸时会迅速长大,直到气泡的大部分穿出铺层,只剩下一个"尾巴",最后气泡完全穿出,并变为规整的球形.根据上述的观察结果,可以得到织物层中气泡穿出过程的直观模型图,见图2.以上形态变化过程是针对织物层数很少的情况而言的,随着织物铺层层数的增加,其运动通道也越来越复杂,因此又对下面2种情况下的运动形式进行了研究.

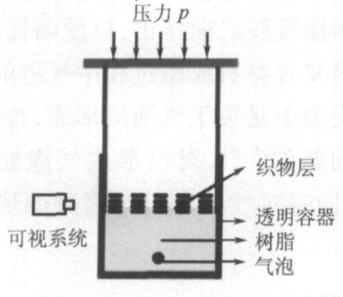


图1 实验装置示意图

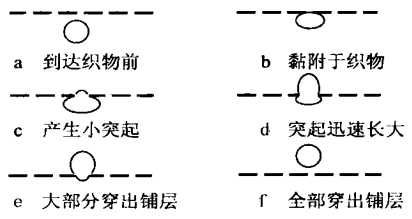
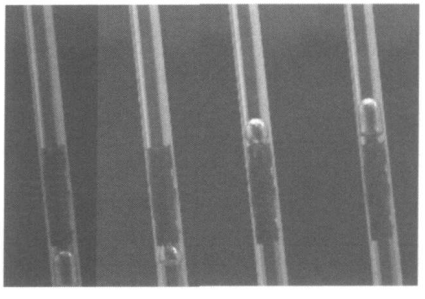


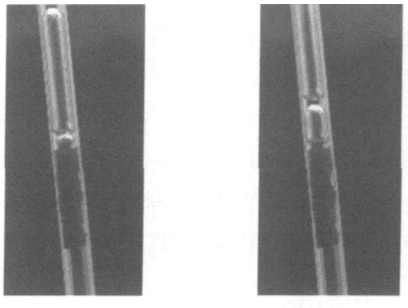
图2 织物层中气泡的形态变化

2.1.2 变截面的竖直圆管

将碳纤维直管(管径约为1 mm),放入到透明玻璃圆管中(内径为2.1 mm),并充满液体.用微量进样器分别打入体积为100 mm^3,80 mm^3,60 mm^3,40 mm^3,20 mm^3的气泡.然后用数码摄像机对气泡的运动过程进行了拍摄,见图3.实验发现,气泡也是经过不同的形状变化而穿出的,且实验条件一定的情况下,当气泡体积 < 80 mm^3 时,大部分气泡经变形后均能穿过碳纤维管,不会破裂,见图3a、图3b;而当气泡的体积 > 80 mm^3 后,大部分气泡在穿出过程中会发生破裂,见图3c.因此可以推断,当气泡体积一定的情况下,其破裂存在一临界条件,如临界树脂流速、临界外加压力等.



a 20 mm^3

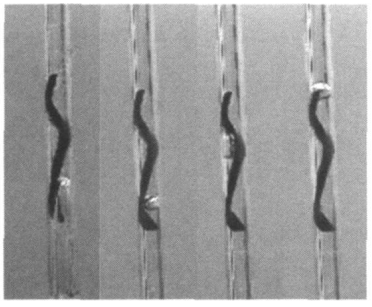


b 80 mm^3 c 100 mm^3

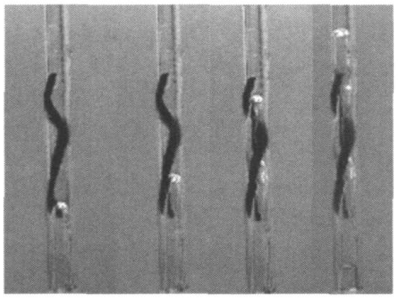
图3 变截面直管中气泡变形情况

2.1.3　弯曲通道中

由于在复合材料固化过程中,气泡的运动通道并不单纯是垂直或者水平方向的,而是呈不规则的形状,因此继续研究了气泡在弯曲通道中的运动状况. 将螺旋形碳纤维管放入玻璃管中(内径为 2.1 mm),并用数码相机对气泡的运动过程进行实时拍摄,如图 4 所示. 结果表明,所有的气泡在穿出过程中,均会沿着通道的走向和曲率的变化而发生形变. 同时随着曲率、树脂流速等外界条件的不同,气泡也会发生破裂.



a　5 mm^3



b　100 mm^3

图 4　弯曲通道中气泡变形情况

2.2　气泡运动影响因素分析

为了考察复合材料成型过程中气泡穿出的主要影响因素,用织物层模拟了预浸料层板进行了实验研究. 由前面的实验可知,气泡若想从织物铺层中穿出,其所受到的驱动力必须克服其所受到的阻力. 当树脂不流动时,气泡运动的主要驱动力为气泡所受到的浮力,此时气泡只是粘附于层板下方,即浮力太小,并不能克服织物的阻力而从层板中穿出. 但通过实验可以发现,当对织物施加一定外压并使树脂流动后,气泡周围产生一定的外加压力场,产生突起后才随着树脂的流动而运动. 但是如果压力过小,产生的"突起"太小,即使经过很长一段时间,突起也不会长大,气泡也不能穿出,因此必须使加在织物上的外压超过某一临界压力值. 下面就研究了气泡在不同条件下穿出织物层所需的临界压力值.

从图 5～图 7 可以看出,对于同一大小的气泡,树脂粘度越低、铺层层数越少、网格面积越大,气泡穿出所需的外加临界压力越小;当树脂粘度和外加压力一定时,大气泡比小气泡更容易从织物中穿出. 由此可知,气泡能否从复合材料层板中穿出与树脂粘度、气泡大小以及外加压力的变化是密切相关的,因此在复合材料成型过程中,合理地控制温度、压力大小和加压时机对气泡的排除是十分重要的.

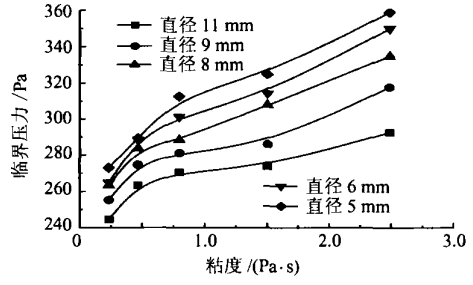


图 5　外加临界压力-树脂粘度关系

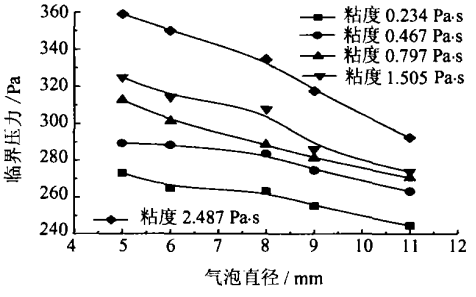


图 6　外加临界压力-气泡直径关系

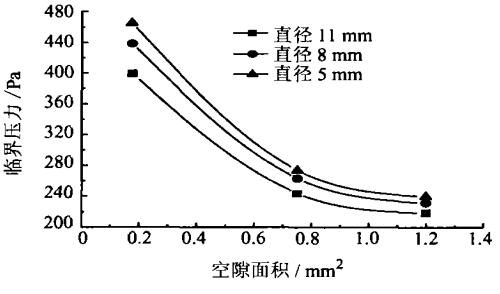


图 7　外加临界压力-网格面积关系

2.3　气泡运动条件分析

图 8 是复合材料成型过程中纤维在某一压力下的分布状态图,从图中可以看出,树脂流动和气泡运动的通道是不断变化的,即气泡的运动类似于在变截面通道中的运动. 因此,理想的纤维排布状态和气泡运动通道可以如图 9 所示.

根据 Young-Laplace 理论[7],在这种状态下,气泡运动的主要阻力可以描述为

$$\Delta p_{\mathrm{m}} = 4\gamma_{\mathrm{lv}}\left(\frac{\cos\theta_1}{D_{\mathrm{e}}} - \frac{\cos\theta_2}{D}\right) \tag{1}$$

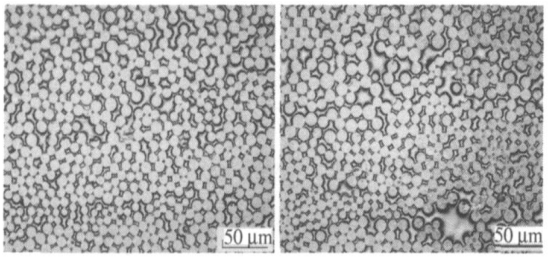


图 8 一定 p 下纤维分布状态

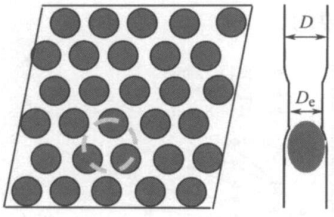


图 9 理想的纤维排布状态和气泡运动通道

式中，γ_{lv} 是树脂表面张力；Δp_m 为附加压力差；D 和 D_e 分别为大小通道直径；θ_1 和 θ_2 是前、后接触角.

当外加 p 能克服气泡的表面附加压力差后，气泡才开始运动. 即树脂流动所产生的压力梯度必须大于附加压力差. 由 Darcy 定律[8,9] 可知，由树脂流动产生的气泡两端的压力差可表示为

$$\nabla p = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} = \frac{\eta v_r}{K} \tag{2}$$

故

$$\Delta p = \frac{\eta v_r}{K} \cdot L_{void} \tag{3}$$

式中，∇p 为压力梯度；Δp 为压力差；η 为树脂粘度；v_r 为树脂流速；K 为织物渗透率；L_{void} 为气泡在运动方向上的长度.

只要 $\Delta p > \Delta p_m$，气泡就可以开始运动，即

$$\frac{\eta v_r}{K} \cdot L_{void} > 4\gamma_{lv}\left(\frac{\cos\theta_1}{D_e} - \frac{\cos\theta_2}{D}\right) \tag{4}$$

在织物层中，气泡如图 10 所示，故式(4)右边可变为 $4\gamma_{lv}\frac{\cos\theta}{D_e}$，即

$$\frac{\eta v_r}{K} \cdot L_{void} > 4\gamma_{lv}\frac{\cos\theta}{D_e} \tag{5}$$

$$\nabla p = \frac{\eta v_r}{K} > 4\gamma_{lv}\frac{\cos\theta}{D_e L_{void}} \tag{6}$$

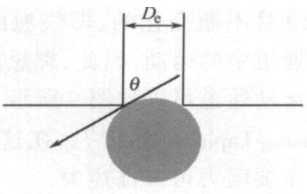


图 10 织物层中气泡存在状态

因此，如果已知树脂粘度、气泡直径以及接触角等，就可以计算出气泡通过织物层而开始运动的临界条件. 此外，由式(6)可知，该运动条件与实验研究结果有相同的影响趋势，但在今后的研究工作中，还需对此公式做进一步修正和验证，以便为复合材料热压成型工艺参数的优化提供判据.

3 结 论

1) 不同的运动通道中，大部分气泡均经变形而穿出，在某一临界条件下，气泡会发生破裂.

2) 织物铺层体系中，气泡运动的主要驱动力是树脂流动所产生的压力差，且外加压力越大，气泡越容易穿出.

3) 在织物铺层体系中，大气泡比小气泡容易穿出.

4) 对于同样大小的气泡，树脂粘度越低、网格面积越大、铺层层数越少，气泡穿出所需要的临界压力越小.

参考文献 (References)

[1] Berglund L A, Varna J, Joffe R. Effect of voids on failure mechanisms in RTM laminates[J]. Composites Science and Technology, 1995, 53(2): 241～249

[2] Boey F Y C, Lye S W. void reduction in autoclave processing of thermoset composites. part1: void reduction in microwave curing process[J]. Composites, 1992, 23(4): 266～270

[3] Harber B D, Stab G H. Note on the effects of voids upon the hygral and echanical properties of AS4/3502 graphite epoxy[J]. Journal of Composites Material, 1987, 21(3): 280～288

[4] Michael R W, Tom R, Nigel G. Reduction in interlaminar shear strength by discrete and distributed voids[J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(1): 93～101

[5] Hu Jinlian, Liu Yi, Shao Xueming. Study on void formation in multi-layer woven fabrics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(5): 595～603

[6] Wood J R, Bader M G. Void control for polymer-matrix composites (1): theoretical and experimental methods for determining the growth and collapse of gas bubbles[J]. Composites Manufacturing, 1994, 5(3): 139～147

[7] Chen Y T, Davis H T, Macosko W. Wetting of fiber mat for composites manufacturig Ⅱ: air entrapment model[J]. AICHE Journal, 1995, 41(10): 2273～2281

[8] 刘应中，缪国平. 高等流体力学[M]. 上海：上海交通大学出版社，2000
Liu Yingzhong, Miao Guoping. Advanced fluid mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000(in Chinese)

[9] Tang Jianmao, Lee W I, Springer G S. Effects of pressure on resin flow, voids and mechanical properties[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(5): 421～440