

织物预成型体的可压缩性研究

Study on the Compressibility of Fabric Preforms

梁子青, 唐邦铭, 李艳亮, 益小苏 (北京航空材料
研究院 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095)
LIANG Zi-qing, TANG Bang-ming, LI Yan-liang,
YI Xiao-su (National Key Laboratory of Advanced Composites,
Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 研究了预定型织物在压实阶段的可压缩性, 涉及压缩过程中纤维体积分含量的变化特点。结果表明, 预定型织物对压缩载荷的响应方式与织物层数及定型剂含量有关, 织物层数的增加, 相同载荷作用下易于获得较高的纤维体积分含量; 预定型处理降低了织物的可压缩性, 随定型剂含量的增加, 最终获得的纤维体积分含量表现出下降的趋势; 在实验施加的压缩载荷作用下, 预定型织物的压实后纤维体积分含量趋于一致, 与压缩织物的层数关系不明显, 但仍然受定型剂含量影响。

关键词: 预成型体; 预定型; 可压缩性; 液态成型

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006) 06-0005-04

Abstract: The compressibility of fabric preforms, involved in the fiber volume fraction (V_f) in the compress process, was studied. It was found that the response behavior of tackified fabric under compression changed with the number of fabric layer and tackifier contents. Increase of the layer number and decrease of the tackifier contents led to higher V_f in the process. After compaction, there is no obvious relationship between layer number and the final compaction V_f of tackified fabric, which still influenced by tackifier contents.

Key words: fabric preform; tackification; compressibility; liquid molding

一般认为, 预成型体的可成型性只涉及织物的可变形性, 即织物由平面状态转变为二维或三维曲面结构的能力, 这种能力与织物自身的力学性能有关。出于工艺、力学性能、制造成本的综合考虑, 在预成型体制备过程中, 增强体主要形式为平面和立体织物, 成形方法涉及机织、针织、编织和缝合等, 织物的可压缩性直接决定了最终制品中纤维体积分含量并在一定的程度上由此决定其力学性能^[1]。实际上, 复合材料液态成型工艺的一个重要优势是能够获得高纤维体积分含量的结构, 在工艺准备阶段, 预先铺放在模具中的预成型体在合模过程中经二次压实获得所需的纤维体积分含量, 通常 V_f 大于 55%, 而高纤维体积分含量的获得, 决定于织物的可压缩性能。许多学者对干态、常规的增强织物预成型体的压缩行为进行了研究^[2~4], 提出了一些压缩应力 P 和织物纤维体积分含量 V_f 的关系式, 典型的为经验指数关系:

$$P = a \cdot V_f^b \tag{1}$$

式中 a, b 为经验常数。

由于液态成型工艺中预成型体的制备涉及定型

问题, 存在对预定型织物的压实问题, 对于预定型织物的可压缩性研究目前报导较少。可以认为, 预成型织物的可压缩性能是可成型性的一个重要参数。本工作主要测试了不同定型剂含量预定型织物的可压缩性能。

1 实验

原材料: T300 碳纤维八枚五飞缎纹织物。织物经纱密度: (9.3 ± 0.4) 根/10 毫米; 纬纱密度: (9.1 ± 0.4) 根/10 毫米; 织物单位面积质量: (370 ± 10) g/m²; 织物质量分布: 经向, 50.5% \pm 2.0%; 纬向, 49.5% \pm 2.0%。

定型剂: 北京航空材料研究院研制的 ES-T321。

预定型: 将用量分别为织物干重 2% (质量分数, 下同), 5%, 8%, 11% 的定型剂配成丙酮溶液, 以涂刷方式制备预定型织物, 室温晾干方式脱去溶剂。

试样: 30mm \times 30mm。

织物压缩实验: 在 INSTRON 4442 上进行。

2 结果与讨论

2.1 空白织物的可压缩性

图 1 为空白织物在压缩载荷作用下压头位移变化情况, 受强力机的量程限制, 最大压缩载荷均为 450N, 从图 1 可以看出, 随织物层数的增加, 在低压缩载荷水平下压头的位移也在增大, 这是由织物面外小变形累积引起的, 可以称为预压实阶段; 这一阶段的压缩特性与预成型体的可压缩性及复合材料液态成型过程关系不大, 本研究不作详细讨论。本工作主要研究压实阶段织物的体积含量随压缩载荷的变化。

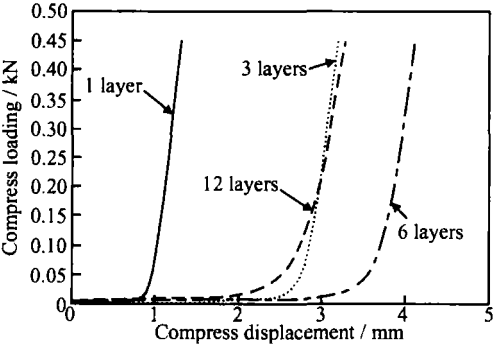


图 1 空白织物压缩位移随压缩载荷的变化关系
Fig. 1 Compress loading vs compress displacement of untackified preforms

从图 1 还可看出, 压缩载荷超过 100N 后, 载荷对位移的变化表现出近似弹性响应, 因此将压缩载荷 100N 作为预压实和压实阶段的临界点, 对上述空白织物的压实阶段压缩位移和压缩载荷关系重新作图, 见图 2。

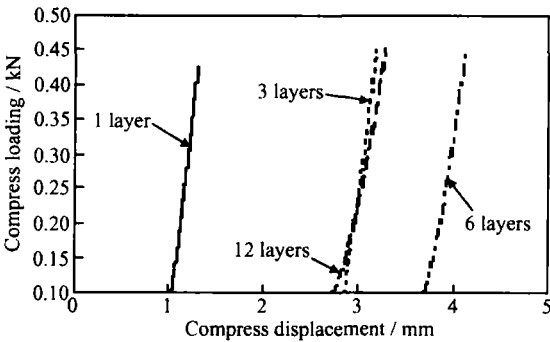


图 2 空白织物压实阶段压缩位移随压缩载荷的变化关系
Fig. 2 Compress loading vs compress displacement of untackified preforms in compaction stage

从图 2 可以看出, 在织物的压实阶段, 压缩位移随压缩载荷的变化关系表现出良好的线性, 对织物层数分别为 1 层、3 层、6 层和 12 层时二者的线性回归分析结果见表 1。

表 1 空白织物压缩位移(y)随压缩载荷(x)的线性回归分析
Table 1 Linearly fitness results of compress loading (x) vs compress displacement (y) of untackified preforms in compaction stage

Fabric layer	Linearly fitness formula	R ²
1	$y_1 = 1.2284x - 1.1819$	0.9988
3	$y_3 = 1.0562x - 2.9315$	0.9947
6	$y_6 = 0.8379x - 3.0297$	0.9893
12	$y_{12} = 0.6534x - 1.7243$	0.9853

从回归因子看, 织物层数为一层时线性程度最高, 与回归式吻合程度最好, 随着织物层数的增加, 回归因子逐步减小, 说明其线性程度略有下降, 但仍然保持较高的水平, 说明整体线性程度较高, 这一结论与 CHEN 等人的实验结果^[5] 相同。

将线性回归式中自变量压缩位移的系数定义为名义压缩刚度。可以看出, 压缩织物的层数对位移-载荷关系的斜率有显著影响, 表征压缩载荷随压缩位移的响应速率。织物层数为 1 层时, 载荷对位移的响应速率最快, 说明在压缩层数较少时, 压缩载荷随压缩位移的增加迅速增大; 而随着织物层数的增多, 载荷对位移的响应速率减小, 压缩载荷随压缩位移的增加而增大的速度减小。进一步分析表明, 二者间呈现出较为显著的负指数关系, 回归式为:

$$y = 1.2545e^{-0.0568x} \quad R^2 = 0.9734 \quad (2)$$

式中: y 为名义压缩刚度; x 为织物层数。

压实过程结束后, 织物的最终压缩厚度与织物层数也表现出良好的线性关系, 见图 3。这一趋势说明压缩织物层数对织物最终压实厚度的影响不大。

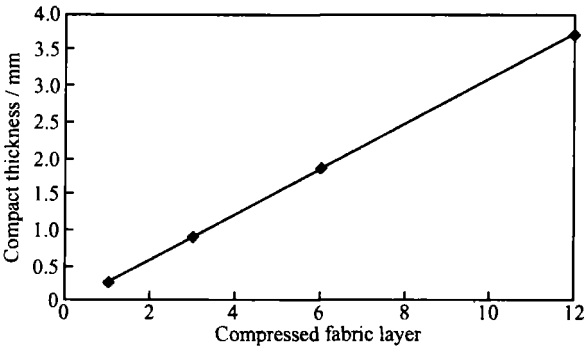


图 3 不同层数织物的最终压实厚度
Fig. 3 Compact thickness vs fabric layer of untackified preforms

加载条件下, 织物的纤维体积分数可以通过计算获得, 计算式为:

$$V_f = \frac{M \times 1000}{\rho \times (T + D_d - D_i)} \quad (3)$$

式中: V_f 为压缩加载条件下织物的纤维体积分数(%); M 为织物面密度; 对本章研究的 3186 缎纹织物, 取 $370\text{g}/\text{m}^2$; ρ 为碳纤维体积密度, 取 $1.78\text{g}/\text{cm}^3$; T 为织物的最终压实厚度 (mm); D_d 为织物压实时压头位置 (mm); D_i 为加载条件下压头的瞬时位置 (mm)。

不同层数织物压实阶段的纤维体积分数示于图 4。

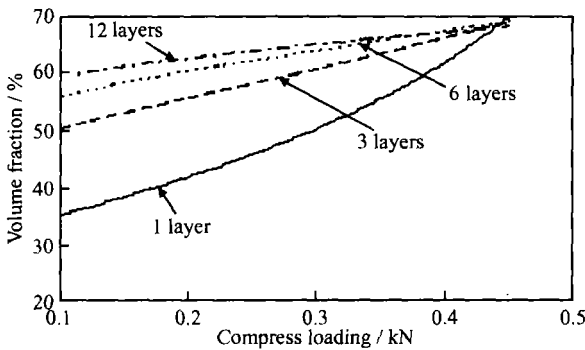


图 4 不同层数织物压实阶段纤维体积分数
Fig. 4 Fiber volume fraction vs compress loading for untackified preforms in compaction stage

从图 4 可以看出, 不同层数织物在加载条件下纤维体积分数随压缩载荷的变化趋势。随着压缩载荷的增加, 织物的纤维体积分数随之增大; 需要指出的是, 不同层数的织物在压缩载荷达到 450N 左右时纤维体积分数具有汇聚的趋势, 四条曲线几乎相交于同一点。其原因可能有两点: 曲线走向决定的相交点或是织物经压缩后的由纤维挤塞决定的临界点, 在第一种条件下, 可能获得更高的纤维体积分数。

压缩织物层数的不同, 在载荷下压实阶段的纤维体积分数曲线走势也不同, 层数较少时, 纤维体积分数曲线随载荷增加上升较快, 随着织物层数的增多, 纤维体积分数曲线的走势趋于平坦, 这种走向规律实际上与织物在压缩载荷作用下织物的运动方式有关。可以将织物在压缩载荷下的运动方式根据运动主体的尺度分为三种尺度: 织物水平; 纤维束间水平; 纤维束内水平。由于织物的面外弯曲刚度较小, 织物水平的变形主要在预压实阶段完成, 可以认为压实阶段, 不存在由于织物层间距离变化导致的纤维体积分数的增加; 而假定纤维体积分数增加的原因主要是经纬向纤维束倾角的变化、纤维束的滑移贴合和纤维束的压扁变形。

在单层织物压缩时, 只存在纤维束倾角的变化和纤维束的压扁变形导致的纤维体积分数增加, 纤维体积分数增加很快, 织物迅速被压实。

随着织物层数的增多, 压缩载荷作用下除上述两种变形方式外, 还存在纤维束的滑移贴合, 织物层间贴合程度提高, 这是压实阶段初始纤维体积分数较高

的根本原因, 多层织物在小载荷作用下, 不仅发生面外变形而且织物层间相互接触的纤维束会发生滑移贴合, 其结果是缩小了层间织物的距离, 提高纤维体积分数; 贴合程度的提高和纤维束倾角压缩、压扁变形导致的效果是一致的, 缩短纤维间隙、提高纤维体积分数, 三种变形模式对纤维体积分数的贡献可以这样说明, 在某一阶段某种模式占主导必然会影响织物经其它模式提高纤维体积分数。这也是多层织物压缩时, 预压实过程结束后纤维体积分数较高而压实阶段结束时两种情形下纤维体积分数又趋于一致的原因。

2.2 预定型织物的可压缩性

织物经预定型处理后, 从压缩位移和压缩载荷的关系上看, 总体趋势与空白织物类似, 即二者间仍然保持良好的线性关系, 观察定型剂含量不同时压缩载荷随压缩位移的线性回归分析, 见表 2。由表 2 可以发现, 对不同定型剂含量, 预定型织物的名义压缩刚度均表现出随织物层数的增多, 名义压缩刚度下降的趋势, 这种趋势出现的原因是由于织物经预定型处理后, 织物特别是纤维束本身压缩刚性增强, 织物面外抵抗小变形能力提高, 在多层织物压缩时, 层间孔隙的压缩空间较大, 导致压缩载荷作用压缩位移较单层

表 2 不同定型剂含量的织物压缩位移(y)随压缩载荷(x)的线性回归分析

Table 2 Linearly fitness results of compress loading(x) vs compress displacement(y) of tackified preforms in compaction stage

Tackifier content	Fabric layer	Linearly fitness formula	R ²
2%	1	$y_1 = 1.0250x - 0.2695$	0.9929
	3	$y_3 = 0.4617x - 0.5925$	0.9583
	6	$y_6 = 0.3327x - 0.5602$	0.9496
	12	$y_{12} = 0.2905x - 0.6768$	0.945
5%	1	$y_1 = 0.9550x - 0.1685$	0.9926
	3	$y_3 = 0.5300x - 0.1735$	0.9952
	6	$y_6 = 0.3226x - 0.2408$	0.9888
	12	$y_{12} = 0.2376x - 0.4689$	0.983
8%	1	$y_1 = 0.8939x - 0.369$	0.9957
	3	$y_3 = 0.5409x - 0.7462$	0.9983
	6	$y_6 = 0.3446x - 0.3224$	0.9961
	12	$y_{12} = 0.2337x - 0.6594$	0.9887
11%	1	$y_1 = 0.9459x - 0.3171$	0.9981
	3	$y_3 = 0.6579x - 0.3178$	0.9997
	6	$y_6 = 0.4155x - 0.5166$	0.9973
	12	$y_{12} = 0.2905x - 0.6791$	0.9926

压缩时加大,造成名义压缩刚度的减小;另外,相对压缩织物层数均为一层的情况,也表现出随定型剂含量增加、名义压缩刚度减小的趋势,其原因同上,定型剂对纤维、纤维束的粘结作用,提高了织物抵抗面外小变形的能力,在预压实过程结束后,空白织物由于抵抗面外小变形的能力较低、纤维及纤维束之间容易转移贴合,已经获得了较大的压缩量,因此在压实阶段表现出较高的名义压缩刚度;而预定型织物由于抵抗面外小变形能力的提高,即使在预压实阶段结束后仍然具有较大的压缩空间,表现上压缩位移较大,因而名义压缩刚度较空白织物为小。

不同定型剂含量的预定型织物压实段纤维体积分数见图5,其中不含定型剂所占据的空间。

层数变化对预定型织物压实阶段纤维体积分数的影响趋势与空白织物的趋势类似,单层压缩时压实阶段初始纤维体积分数较低,而织物层数的增多,在预压实阶段压头下降的行程较长,有利于织物的转移贴合,减小织物层间间隙,获得较高的纤维体积分数;在整个压实阶段,多层预定型织物压实时纤维体积分数曲线较单层织物压实时更为平缓,但在压实阶段结束时相互间差异不大。

定型剂含量与压实阶段预定型织物纤维体积分数

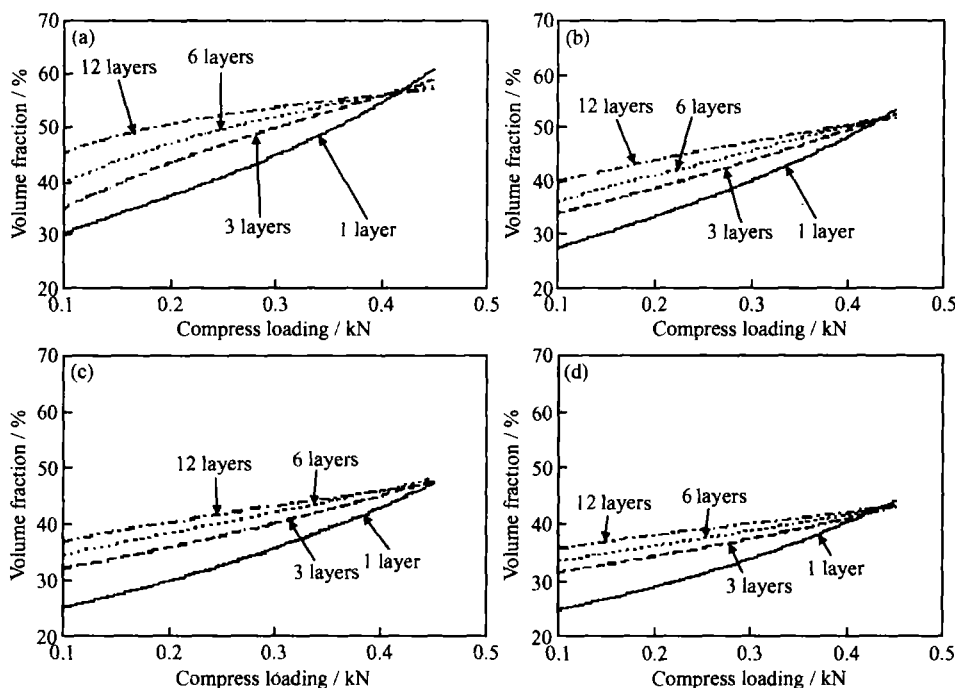


图5 不同定型剂含量的预定型织物压实段纤维体积分数 (a) 2%; (b) 5%; (c) 8%; (d) 11%

Fig. 5 Fiber volume fraction vs compress loading for tackified preforms in compaction stage (a) 2%; (b) 5%; (c) 8%; (d) 11%

的关系也可以从图5中得到,随着定型剂含量的增多,压实阶段织物的纤维体积分数曲线趋势平缓,从初始的纤维体积分数到结束时的纤维体积分数均相应减小;定型剂含量提高,织物抵抗面外小变形能力增强,

是预压实结束时纤维体积分数低的原因(见图6a);而定型剂对纤维和纤维束及交织点粘结作用的增强,提高了织物抵抗压缩变形的能力,织物难以被压实,导致压实阶段结束时纤维体积分数偏低(见图6b)。

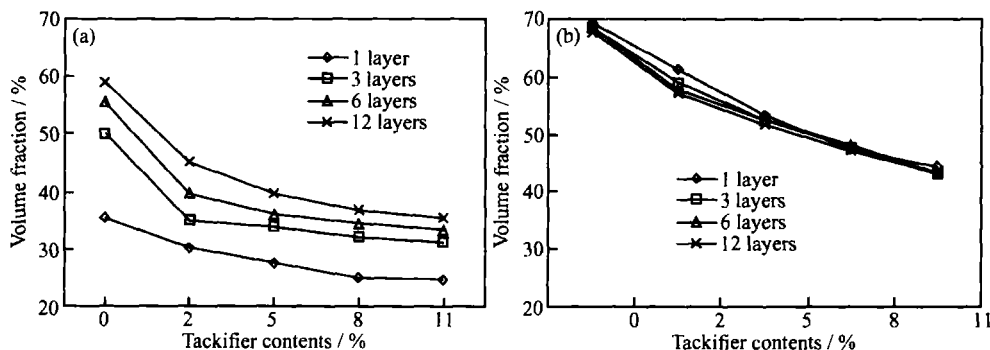


图6 预压实和压实后预定型织物纤维体积分数对比 (a) 预压实; (b) 压实后

Fig. 6 Fiber volume fraction for untackified & tackified preforms of different tackifier contents

(a) after pre-compaction; (b) after compaction

(下转第45页)

crostructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 124(2-3):235-242.

[2] ALLEN C, SHEEN M, WILLIAMS J, et al. The wear of ultra-fine W-G-Co hard metals[J]. Wear, 2001, 250(1-12):604-610.

[3] FANG Zhi-gang, EASON JIMMY W. Study of nanostructured WG-Co composites[J]. Int J of Refractory Metals & Hard Materials, 1995, 13(5):297-303.

[4] WANG Ying-long, STEPHEN M H, JOHES P. Evaluation of thermally-sprayed ceramaic coatings using a noval ball-on-inclined plane stratch method[J]. Wear, 1998, 218(1):96-102.

[5] STEWART D A, SHIPWAY P H, MCCARTNEY D G. Abrasive wear behaviour of conventional and nanocomposite HVOF-sprayed WG-Co coatings[J]. Wear, 1999, 225(2):789-798.

[6] 徐滨士, 欧忠文, 马世宁. 纳米表面工程基本问题及其进展[J]. 中国表面工程, 2001, (3): 6-12.

[7] HE Jian-hong, SCHOENUNG J M. A review on nanostructured WG-Co coatings[J]. Surface and Coatings Technology 2002, 157(1):72-79.

[8] KEAR B K, MCCANDLISH L E. Chemical processing and properties of nanostructured WG-Co materials[J]. Nanostructured Mater, 1993, 3(1):19.

[9] EL-ESKANDARAN Y M, SHERIF, MAHDAY AMIR A, AHMED H A, et al. Synthesis and characterazions of ball

milled nanocrystalline WC and nanocomposite W-G-Co powders and subsequent consolidation[s] [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 312(1-2):315-325.

[10] HE Jian-hong, SCHOENUNG J M. Review: nanostrucured coatings[J]. Materials and Engineering A, 2002, 336(1-2):274-319.

[11] 邓世均. 高性能陶瓷涂层[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[12] STEWART D A, SHIPWAY P H, MCCARTNEY D G. Micro-structural evolution in thermally sprayed WG-Co coatings: comparision between nanocomposite and conventional starting powders[J]. Acta Mater, 2000, 48(7):1593-1604.

[13] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[14] B B 库吉诺夫著. 等离子涂层[M]. 北京: 科学出版社, 1981.

基金项目: 高能束流加工技术国防科技重点实验室武器装备预研基金资助项目(51461070304JW0901)

收稿日期: 2005-05-10; 修订日期: 2005-09-15

作者简介: 李博宇(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为纳米结构 WG-Co 涂层的组织与性能. 联系地址: 大连理工大学铸造中心(116023)。

(上接第 8 页)

从图 6b 还可看出, 不论定型剂含量高低, 在定型剂含量相同的前提下, 不同层数预定型织物的纤维体积分数趋于一致, 反映出最终压缩厚度均保持了良好的线性关系, 织物的平均压厚在各种定型剂含量水平下趋于一致, 与压缩层数的关系不大; 从纤维体积分数曲线(图 5)看, 加载条件下, 织物的瞬时纤维体积分数受到压缩织物层数影响, 这与压缩时受层数影响的织物响应方式不同有关, 但最终纤维体积分数接近表明此时织物达到了该载荷水平下织物的临界压厚, 这种临界压厚与织物中定型剂含量密切相关。

3 结论

- (1) 不同层数的预定型织物对压缩载荷的响应方式与织物层数及定型剂含量有关。
- (2) 在压缩过程中, 较小载荷作用下织物层数的增加, 易于获得较高的纤维体积分数。
- (3) 预定型处理降低了织物的可压缩性, 随定型剂含量的增加, 最终获得的纤维体积分数表现出下降的趋势。
- (4) 在实验施加的压缩载荷作用下, 预定型织物

压实后的纤维体积分数趋于一致, 与压缩织物的层数关系不明显。

参考文献

[1] ROBITAILLE F, GAUVIN R. Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing I: review of experimental results[J]. Polymer Compos, 1998, 19: 198-216.

[2] MATSUDAIRA M, QIN H. Features and mechanical properties of a fabric's compressional property [J]. J Textile Inst, 1995, 86(3):476-486.

[3] PEARCE N, SUMMERSCALES J. The compressibility of a reinforcement fabric [J]. Composites Manufacturing, 1995, 6(1):15-21.

[4] SAUNDERS R A, LEKAKOU C, BADER M G. Compression and micro-structure of fiber plain woven cloths in the processing of polymer composites [J]. Composites, 1998, 29A: 443-454.

[5] CHEN B, CHOU T W. Compaction of woven fabric preforms in liquid composite molding processes: single-layer deformation [J]. Comp Sci & Tech, 1999, 59: 1519-1526.

收稿日期: 2005-08-20; 修订日期: 2005-11-15

作者简介: 梁子青(1972-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 现从事复合材料液态成型及预成型体制备研究, 联系地址: 北京 81 信箱 3 分箱(100095)。