复合材料学报 第31卷 第2期 4月 2014年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 31 No. 2 April 2014

文章编号：1000-3851(2014)02-0304-13

定型剂对单轴向经编织物复合材料力学性能影响的试验研究

李丽英[1,2]，孟松鹤[*1]，张 涛[2]，王国勇[2]，田正刚[2]
（1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所，哈尔滨 150001；2. 航天特种材料及工艺技术研究所，北京 100074）

摘 要： 研究了真空辅助树脂注射(VARI)工艺中定型剂对环氧树脂的影响及其在织物表面的分布形式，以及定型剂用量对单轴向经编织物复合材料力学性能的影响，以确定最优的定型参数。采用示差扫描量热法(DSC)和扫描电镜(SEM)分别对加入不同用量定型剂的环氧树脂的玻璃化转变温度和相形貌进行分析，并测试了加入不同用量定型剂后复合材料的力学性能。结果表明：随着定型剂用量的增加，环氧树脂的玻璃化转变温度逐渐降低，且其相形貌逐渐由海岛结构经过双连续相结构到最后的相反转结构；室温下，随着定型剂用量的增加，织物表面定型剂的厚度及不均匀性增加，经过高温处理后，定型剂均匀分布在织物表面。定型剂用量对单轴向经编织物复合材料力学性能有较大影响，用量为 20 g/m^2 时，复合材料体系的综合力学性能最优。

关键词： VARI工艺；定型剂；经编织物；复合材料；力学性能
中图分类号： TB330.1；TB24 **文献标志码：** A

Experimental study on effects of tackifier on mechanical properties of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics

LI Liying[1,2], MENG Songhe[*1], ZHANG Tao[2], WANG Guoyong[2], TIAN Zhenggang[2]
(1. Center for Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to choose the best parameters of tackifier in vacuum assisted resin infusion (VARI) processing, the distribution of tackifier on fabrics, effects of different addition levels of tackifier on epoxide resin and mechanical performance of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics were investigated. Effects of addition levels of tackifier on the glass transition temperature and phase configuration of epoxide resin were analyzed by differential scanning calorimetry (DSC) and scanning electron microscope (SEM). Mechanical performances of composites with various amounts of tackifier were examined. It is shown that as the addition level of tackifier increases, the glass transition temperature of epoxide resin decreases, and its phase configuration transferred from sea island structure to double continuous-phase, then, at last to phase inversion structure. At room temperature, the thickness and irregularity of tackifier on surface of fabrics were increasing with increasing tackifier. After high-temperature processing, the tackifier have uniformly distributed onto the surface of fabrics. Addition levels of tackifier have significant effects on the mechanical properties of composites. The comprehensive mechanical properties of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics reach the best when the addition level of tackifier remains at 20 g/m^2.

Keywords: VARI process; tackifier; warp-knitting fabric; composites; mechanical performance

在真空辅助树脂注射(VARI)成型工艺过程中，预成型体制备是其成功应用的一项核心技术[1-3]。利用定型剂定型纤维及织物是预成型体制备的关键技术之一[4-6]。一般情况下，使用定型剂的主要目的有2个：(1)通过在层间施加少量的定型剂，使预成型体具有一定的整体性；(2)对复杂外形的复合材料制件，必须通过预定型工艺，使其在合模之前具有与最终制品基本接近的形状。定型剂

收到初稿日期： 2013-03-29；**收到修改稿日期：** 2013-09-24；**网络出版时间：** 2013-11-04 15:23
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20131104.1523.019.html
基金项目： 国家重点基础研究发展计划(2010CB631100)
通讯作者： 孟松鹤，博士，教授，博士生导师，研究方向为新型防热功能材料及结构的制备、表征和评价。 E-mail：mengsh@hit.edu.cn

的用量对织物预成型体的可压缩性及力学性能均有一定的影响[7-9]。Depase 等[10]的研究表明，定型剂的引入能提高 30%的Ⅱ型层间断裂韧性和少量的层间剪切强度。Rohatgi 与 Lee[11]的研究表明，定型剂在束内时的定型效果比在束间时好。相对于国外，国内关于定型剂对织物复合材料使用性能的影响研究相对较少。

本文主要研究定型剂用量对环氧树脂体系的影响及定型剂在单轴向经编织物表面的分布状态，通过双真空袋 VARI 工艺研究定型剂用量与碳纤维树脂基复合材料的弯曲性能、层间剪切性能及Ⅰ型层间断裂韧性(G_{IC})之间的关系，以确定最优的定型剂用量。

1 实验部分

1.1 原材料

定型剂采用 Tack328，溶液浓度为 17%；树脂基体采用 6808 环氧树脂，注射温度为 60 ℃，固化温度为 130 ℃，固化时间为 2.5 h；碳纤维织物采用 T700-3K 单轴向经编织物，面密度为(270±10) g/m^2，单轴向经编织物宏观结构及细观结构分别如图 1(a)及图1(b)所示，试验中单轴向经编织物的针织纱为涤纶纤维，纬向有玻璃纤维衬纱。

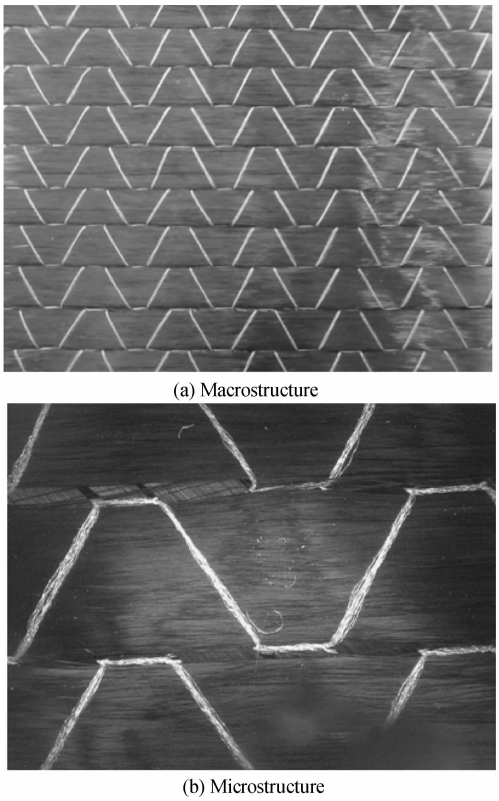


图 1 单轴向经编织物宏观结构及细观结构

Fig. 1 Macrostructure and microstructure of uniaxial warp-knitting fabrics

1.2 定型剂与基体树脂的相容性

为了确保得出的实验结论对于实际生产应用有指导价值，在本研究中，定型剂的用量覆盖了实际生产应用过程中所采用的用量范围，分别为 0，10，15，20，25，30，40，80 g/m^2。

为了考察定型剂含量对树脂体系的影响，根据复合材料中纤维体积分数为 60%时基体树脂的质量，分别计算出定型剂用量为 0，10，15，20，25，30，40，80 g/m^2 时的定型剂质量，将其与基体树脂混合完全(混合物中定型剂质量分数分别为 0%、1.4%、2.1%、2.8%、3.5%、4.2%、5.6%、11.2%)。将混有定型剂的基体树脂缓慢升温至 130 ℃固化 2.5 h，最后冷却至室温取出。利用扫描电镜(SEM)观察定型剂在基体树脂中的分布状态。为了考察定型剂加入后是否对复合材料的耐温性能产生影响，对加入不同用量定型剂后的树脂用示差扫描量热法(DSC)进行分析。

1.3 碳纤维试验板的制备

织物定型：采用溶液法将定型剂均匀刷涂于单轴向经编织物表面，其中一面刷涂定型剂，另一面不刷涂。碳纤维织物的定型剂用量分别为 0，10，15，20，25，30，40，80 g/m^2。按 310 mm×310 mm的尺寸分别对不同定型剂用量的碳纤维织物进行裁剪。

铺层：采用 0°方向手工铺层，每种定型剂用量的层合板厚度均为 2 mm(单轴向经编织物层数为 8)。其中，Ⅰ型层间断裂韧性测试试样需在垂直纤维 0°方向提前埋入聚四氟乙烯(PTFE)塑料薄膜，薄膜厚度为 0.025 mm。

注胶及固化：试验采用双真空袋 VARI 工艺制备复合材料试验板。与单真空袋 VARI 相比，双真空袋 VARI 制备的孔隙率更低。双真空袋 VARI 成型工艺即是在碳纤维织物上封 2 层真空袋，2 层真空袋之间放置一导气工装，2 层真空袋均与真空系统连接，在复合材料固化过程中，使复合材料体系始终处于真空条件下，但并无树脂被抽出，进一步避免空气的进入，降低复合材料体系的孔隙率[12]。具体过程为：60 ℃定型 1 h 后，在此温度下注入纯 6808 环氧树脂，待所有出胶口无气泡排出时停止注胶，130 ℃下固化 2.5 h。

1.4 性能测试

DSC 测试：使用美国 Perkin-Elmer DSC-7 型

仪器进行 DSC 测试，升温范围为室温～300 ℃，升温速率为 5 ℃/min。

SEM 测试：将不同定型剂用量的单轴向经编织物室温下放置至溶剂挥发完全；取出 2 张定型剂用量为 20 g/m^2 的单轴向经编织物分别放置于 2 张离型纸上，之后放置于 60 ℃及 130 ℃的压机上分别热处理 1 h。定型剂在织物表面的分布情况采用扫描电镜(Philips XL-30，荷兰)观察。

力学性能测试：由于最终复合材料的力学性能同时受增强纤维和树脂基体及二者界面结合强度的影响，少量定型剂的加入最主要可能与复合材料体系的弯曲性能、层间剪切性能及Ⅰ型层间断裂韧性有关，而受纤维性能影响较大的拉伸性能则未进行评估。按照 GB/T3356－1999[13]、JC/T773－1996[14]、HB/7402－1996[15] 要求加工弯曲试样、层间剪切试样及Ⅰ型层间断裂韧性试样，每组试验中弯曲试样需 5 个、层间剪切试样需 6 个、Ⅰ型层间断裂韧性试样需 5 个。试样加工具体尺寸如图 2 所示。

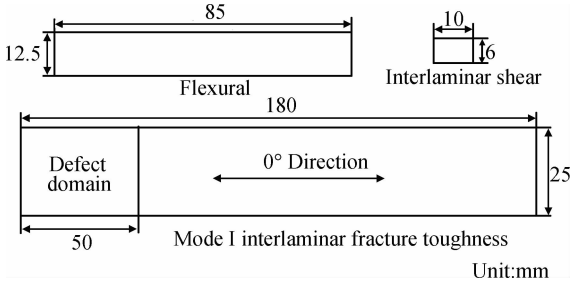


图 2　单轴向经编织物复合材料力学性能测试试样加工几何尺寸

Fig. 2　Geometrical size of specimens of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics for mechanical tests

2　结果与讨论

2.1　定型剂与基体树脂的相容性

文中所采用的定型剂为不含固化剂的非反应性定型剂，同时含有一定量的热塑性组分及单官能团聚合物。在体系固化时，定型剂中的单官能团聚合物会与树脂基体发生反应，可能对基体树脂及复合材料制件的性能造成影响。在本实验中用 DSC 测定不同定型剂用量的环氧树脂浇铸体玻璃化转变温度 T_g，所得结果如图 3 所示。可以看出，初始随着定型剂用量的增加，环氧树脂的 T_g缓慢下降，至定型剂用量为 80 g/m^2 时急剧下降至 115 ℃。这是由于定型剂中含有少量的单官能团聚合物，随着定型剂用量的增加，使得树脂体系的交联度降低，因此其 T_g降低[8]。

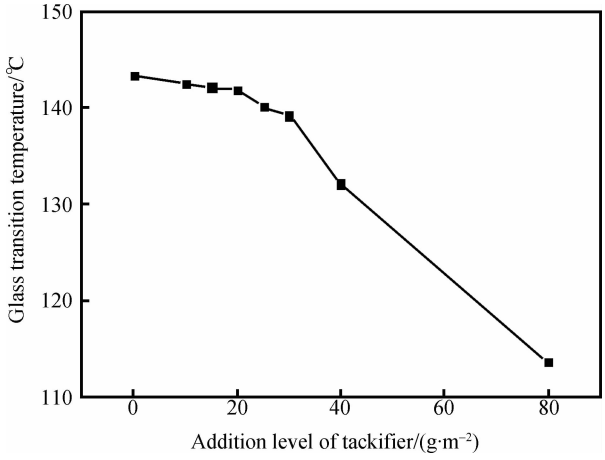


图 3　定型剂用量对环氧树脂玻璃化转变温度的影响

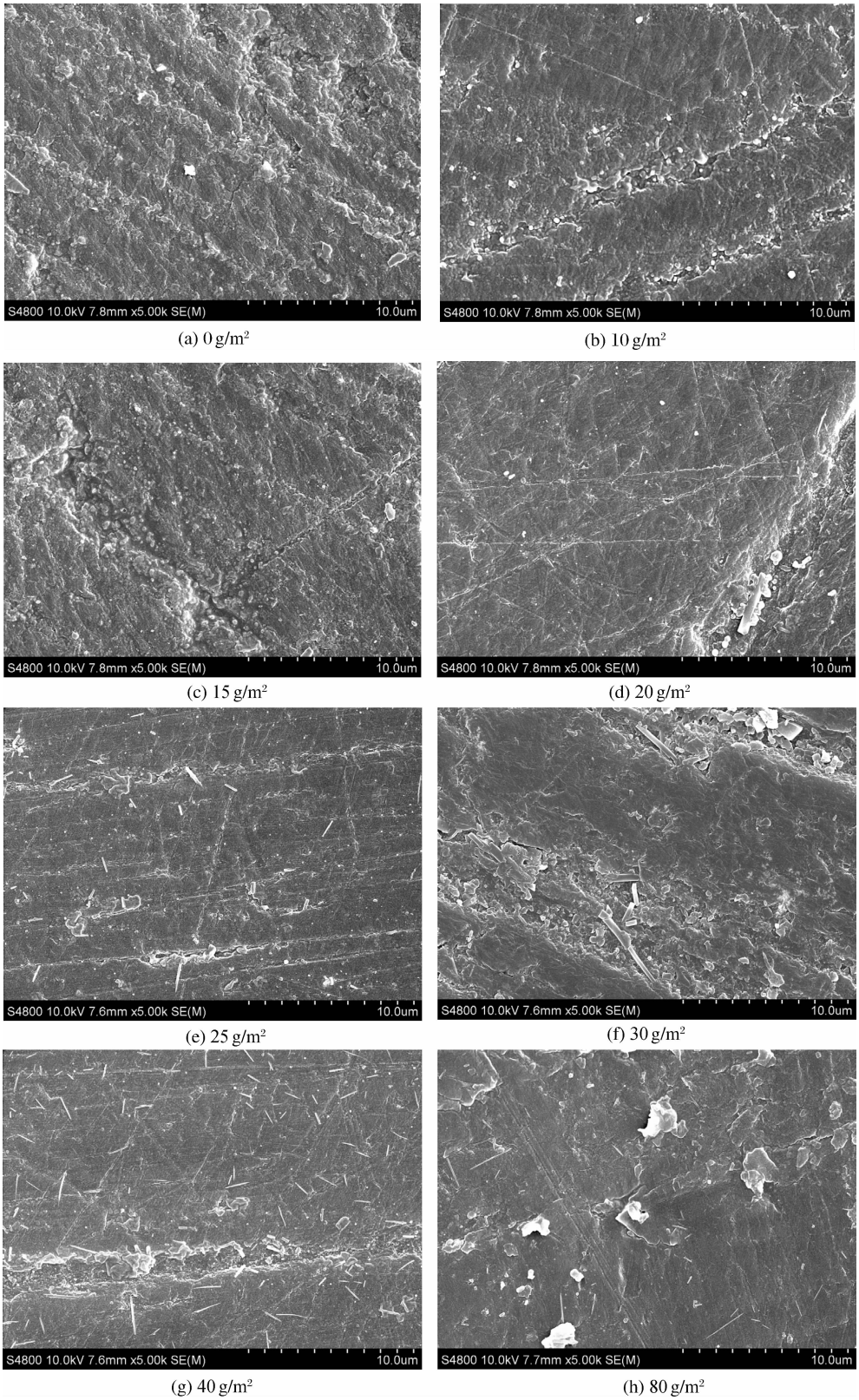
Fig. 3　Effects of addition levels of tackifier on glass transition temperature of epoxide resin

图 4 所示为加入不同用量定型剂的树脂浇铸体的断面扫描电镜照片。可以看出，随着定型剂用量的增加，体系中热塑性组分含量增加，得到具有不同微相结构的树脂。未加定型剂时，固化后的树脂相形貌呈现典型的海岛结构；随着定型剂用量的增加，树脂体系的相结构逐渐呈现双连续相结构；当定型剂用量达到 80 g/m^2 时，随着体系中热塑性组分的增加，体系发生相反转，体积分数小的热塑性组分形成连续相，而体积分数大的环氧树脂成为分散相，这与以往的研究结果相符合[16]。

2.2　室温下不同定型剂用量处理的单轴向经编织物表面形貌

利用扫描电镜观察室温下不同定型剂用量在单轴向经编织物表面的分布状态，结果如图 5 所示，圆圈所示即为分布于单轴向经编织物表面的定型剂。由图可以看出，室温下定型剂在单轴向经编织物表面成膜。随着定型剂用量的增加，膜的厚度及不均匀性增加，定型剂用量的增加导致纤维表面黏度增大，刷涂尤其是多道刷涂时，难以保证定型剂含量在织物表面均匀分布，因此导致膜的不均匀性增加。

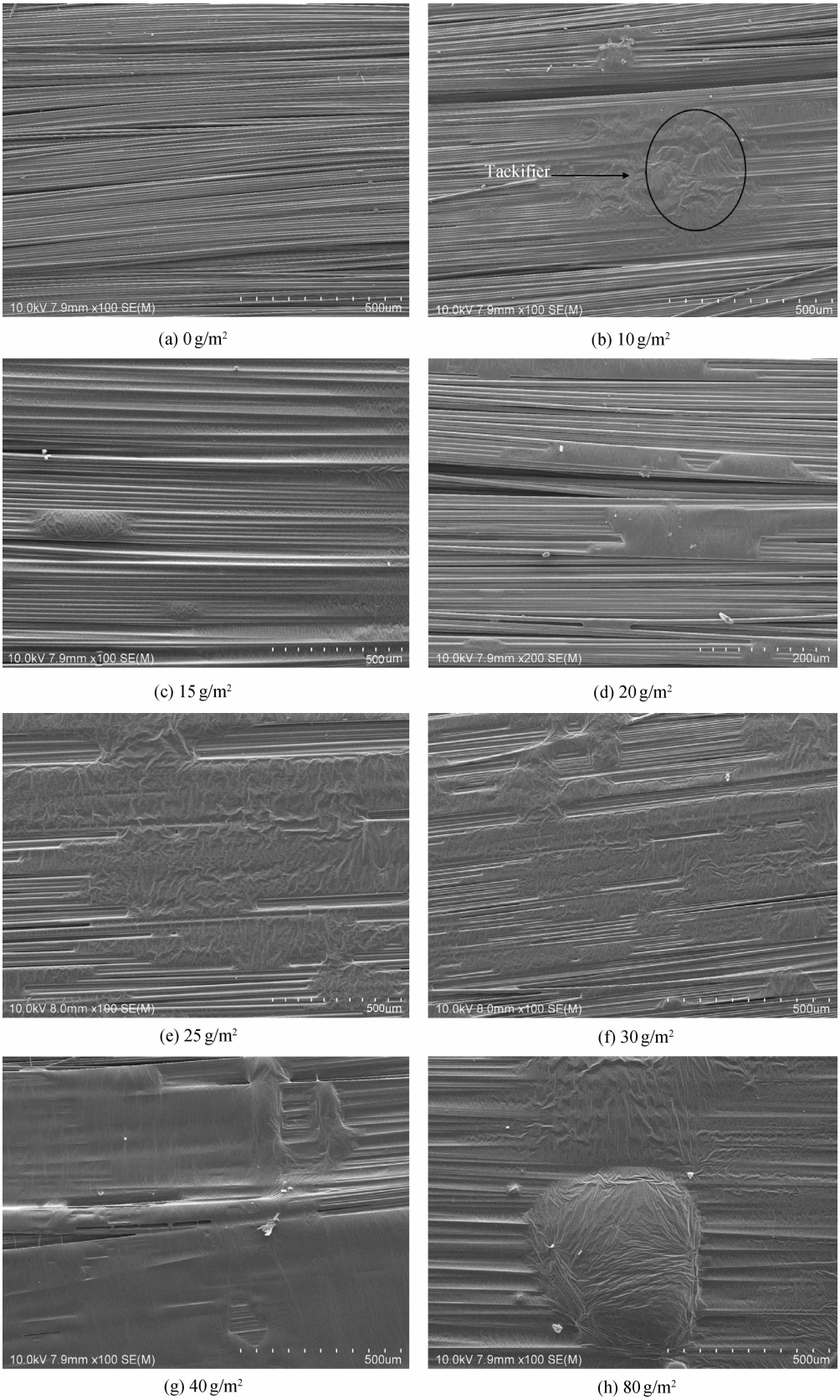
在以溶液方式进行预定型处理时，定型剂通常不会仅附载在织物表面，而会浸入纤维束或织物的内部[8,17-18]。因此，有必要对未刷涂定型剂的织物面进行表征分析，所得结果如图 6 所示。可以看出，在本试验中，所有定型剂用量下，未刷涂定型



(a) 0 g/m²　(b) 10 g/m²　(c) 15 g/m²　(d) 20 g/m²　(e) 25 g/m²　(f) 30 g/m²　(g) 40 g/m²　(h) 80 g/m²

图 4　不同定型剂用量的树脂浇铸体扫描电镜照片

Fig. 4　SEM micrographs of epoxide resin with different addition levels of tackifier



(a) 0 g/m²　(b) 10 g/m²　(c) 15 g/m²　(d) 20 g/m²　(e) 25 g/m²　(f) 30 g/m²　(g) 40 g/m²　(h) 80 g/m²

图 5　室温下刷涂不同定型剂用量时单轴向经编织物的表面形貌

Fig. 5　SEM micrographs of surface topography of uniaxial warp-knitting fabrics with different addition levels of tackifier

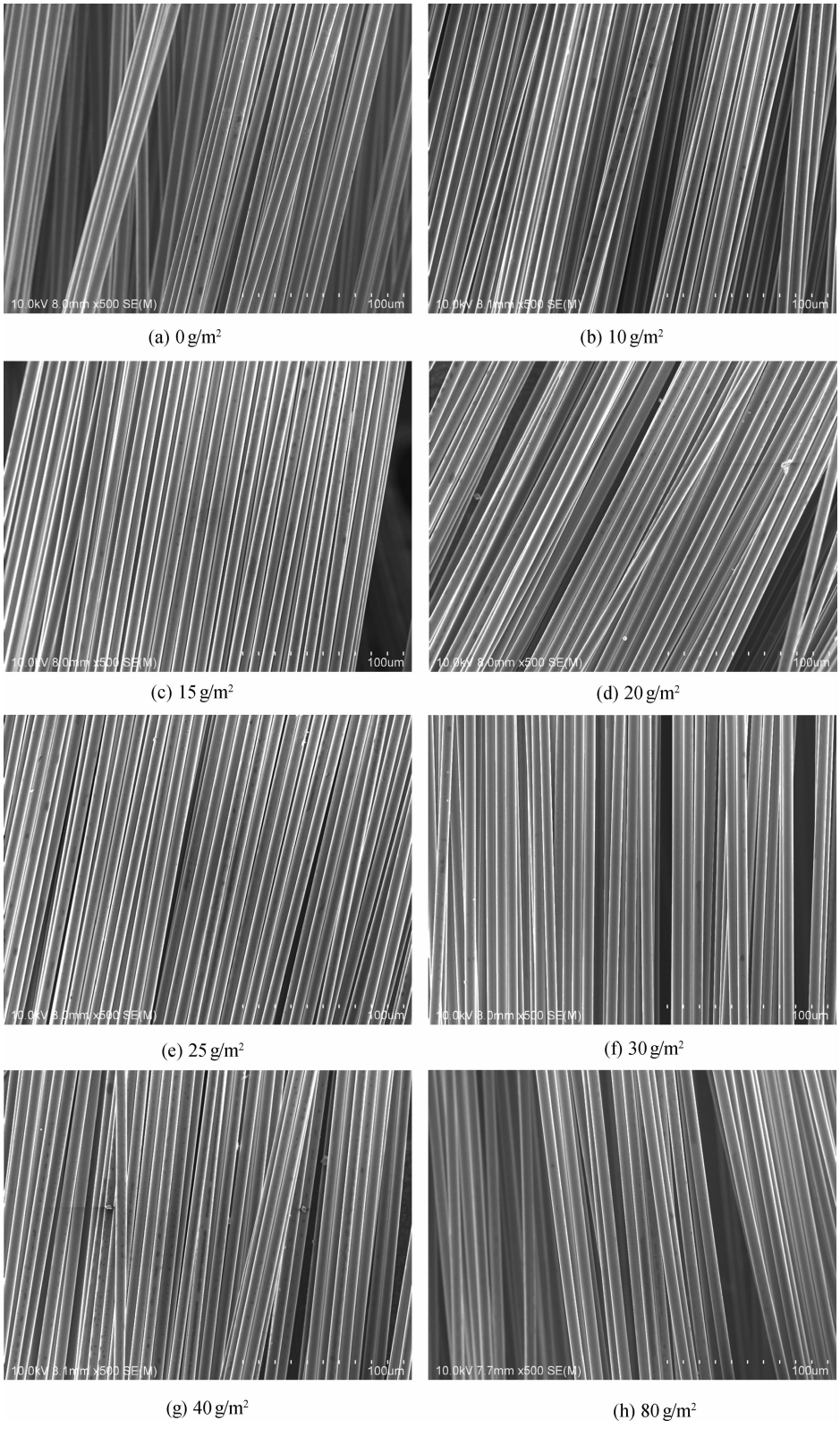


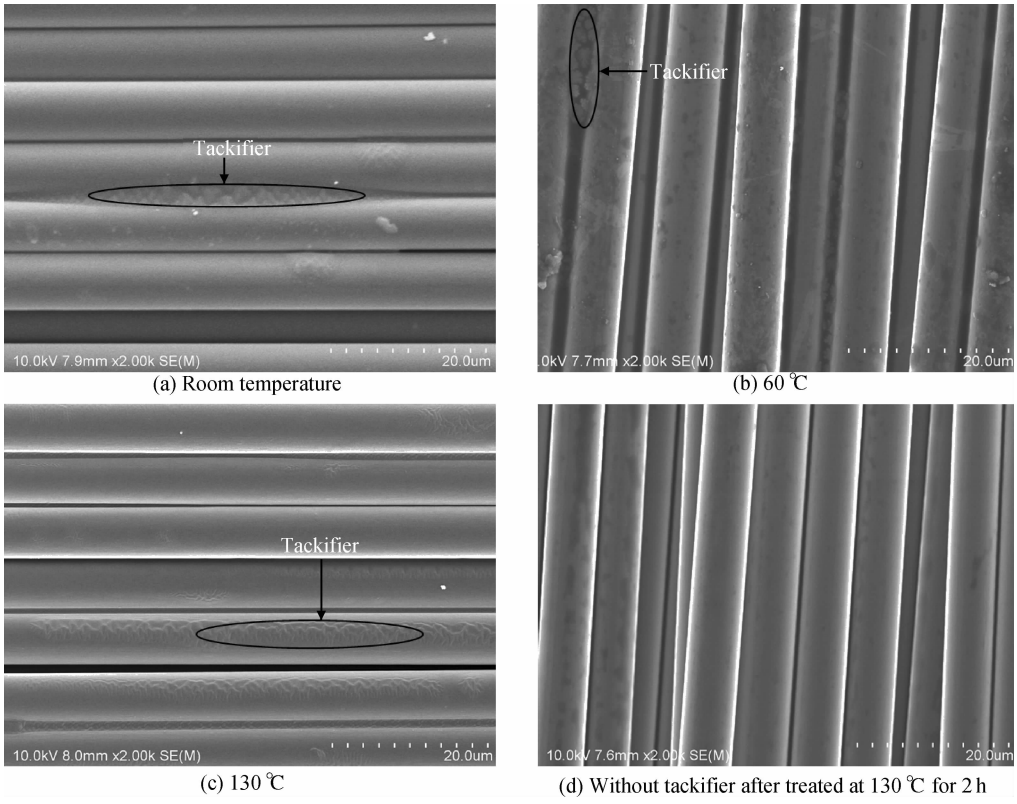
图 6　室温下未刷涂定型剂时单轴向经编织物面的表面形貌

Fig. 6　SEM micrographs of surface topography of uniaxial warp-knitting fabrics without tackifier

剂的织物一面均未观察到定型剂的渗出，说明本试验中所用定型剂室温下未进入织物内部。

2.3　不同温度定型的单轴向经编织物表面形貌

定型剂用量为 20 g/m^2 时，不同温度下定型剂在单轴向经编织物表面的分布状况如图 7 所示。图中圈圈所示即为分布于单轴向经编织物表面的定型剂。由图 7 可以看出，当定型剂用量为 20 g/m^2 时，室温下，定型剂在纤维表面成膜；在 60 ℃下预处理 1 h 后，定型剂成块状分布在纤维表面及纤维束间；在 130 ℃下预处理 1 h 后，块状定型剂消失，均匀分布在纤维束表面及纤维束间。图 7(d)所示为 130 ℃预处理 1 h 后，未刷涂定型剂纤维面的扫描电镜照片，由图可以看出，未刷涂定型剂一面仍未出现定型剂，说明本试验中所用定型剂经过 130 ℃预处理后仍未进入织物内部。



(a) Room temperature　(b) 60 ℃

(c) 130 ℃　(d) Without tackifier after treated at 130 ℃ for 2 h

图 7　定型剂用量为 20 g/m^2 时不同温度下单轴向经编织物的表面形貌

Fig. 7　SEM micrographs of surface topography of uniaxial warp-knitting fabrics at different temperatures with addition level of tackifier of 20 g/m^2

2.4　130 ℃预处理后不同定型剂用量处理的单轴向经编织物表面形貌

图 8 所示为 130 ℃下预处理 1 h 后不同定型剂用量的单轴向经编织物表面形貌。与图 5 对比可以看出，130 ℃下预处理 1 h 后，定型剂在整个织物表面均匀分散，如图 8 中线框所示，定型剂均匀分散在纤维表面与纤维束间，随着定型剂用量的增加，纤维表面的定型剂增多。

2.5　定型剂用量对单轴向经编织物复合材料弯曲性能的影响

三点弯曲试验中每种定型剂用量弯曲试验测试 5 组，不同定型剂用量时所测得的所有试样的弯曲强度结果如表 1 所示，图 9 为不同定型剂用量时测试的平均结果。由图 9 可以看出，初始随着定型剂用量的增加，复合材料弯曲强度有所升高，当定型剂用量为 20 g/m^2 时，弯曲强度最高，与空白试样相比提高约 4.0%；之后随着定型剂用量增加，弯曲强度大幅度降低，当定型剂用量为40 g/m^{2}时，弯曲强度达到最低，与空白试样相比降低了 9.5%；当定型剂用量超过 40 g/m^2 时，弯曲强度随着定型剂用量增加又有所增加，且当定型剂用量为80 g/m^{2}时，复合材料的弯曲强度与10 g/m^{2}用量试样的弯曲强度基本持平。

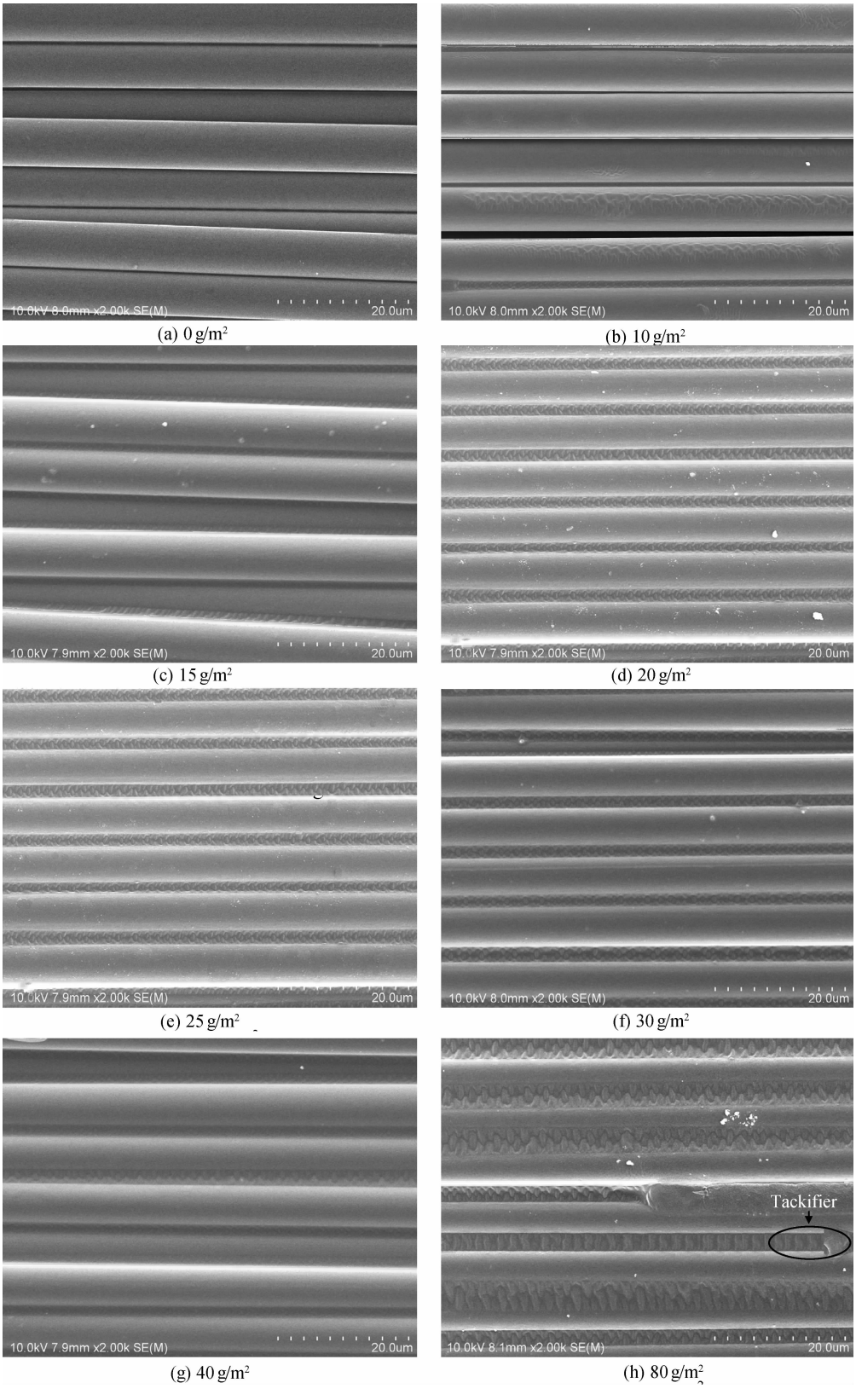


图 8　130 ℃预处理 1 h 后不同定型剂用量单轴向经编织物的表面形貌

Fig. 8　SEM micrographs of surface topography of uniaxial warp-knitting fabrics with different addition levels of tackifier after treated at 130 ℃ for 1 h

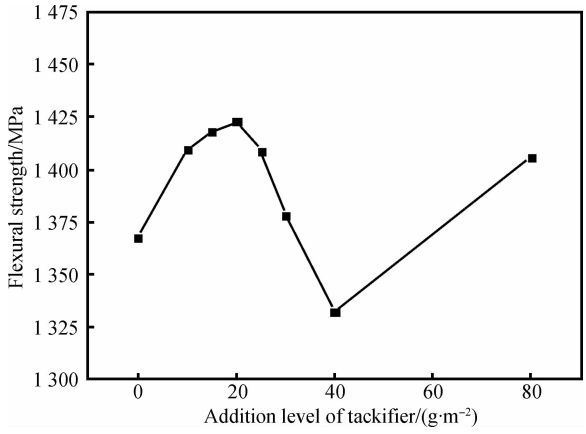


图 9　定型剂用量对单轴向经编织物复合材料弯曲强度的影响

Fig. 9　Effects of different addition levels of tackifier on flexural strength of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics

2.6　定型剂用量对单轴向经编织物复合材料层间剪切性能的影响

每种定型剂用量层间剪切测试 6 组，不同定型剂用量时采用短梁剪切方法所测得的所有试样的层间剪切强度结果如表 2 所示，图 10 为不同定型剂用量时测试的平均结果。

由图 10 可以看出，与弯曲强度的变化规律类似，初始随着定型剂用量的增加，复合材料层间剪切强度有所提高，定型剂用量为 20 g/m^2 时，层间剪切强度最高；其后随着定型剂用量的增加，复合材料的层间剪切强度降低，定型剂用量为 40 g/m^2 时，层间剪切强度达到最低；定型剂用量为 80 g/m^2 时，层间剪切强度又有所提高，与20 g/m^2 用量试样层间剪切强度相当。

表 1　不同定型剂用量时单轴向经编织物复合材料的弯曲强度

Table 1　Flexural strength of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics with different addition levels of tackifier

Addition level of tackifier/(g·m^{-2})	Flexural strength of specimen/MPa					Average/MPa	Standard deviation/%
	1	2	3	4	5		
0	1 313	1 429	1 461	1 332	1 305	1 368	5.20
10	1 475	1 379	1 367	1 435	1 393	1 410	3.16
15	1 523	1 381	1 397	1 366	1 425	1 418	4.40
20	1 409	1 377	1 403	1 392	1 536	1 423	4.50
25	1 397	1 483	1 371	1 426	1 369	1 409	3.36
30	1 324	1 383	1 456	1 367	1 359	1 378	3.54
40	1 233	1 413	1 396	1 327	1 289	1 332	5.61
80	1 419	1 409	1 466	1 397	1 341	1 406	3.20

表 2　不同定型剂用量时单轴向经编织物复合材料的层间剪切强度

Table 2　Interlaminar shear strength of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics with different addition levels of tackifier

Addition level of tackifier/(g·m^{-2})	Interlaminar shear strength of specimen/MPa						Average/MPa	Standard deviation/%
	1	2	3	4	5	6		
0	83	80	79	74	80	78	79	3.70
10	79	86	82	75	78	80	80	4.68
15	80	84	79	76	82	85	81	3.49
20	76	85	89	79	82	87	83	5.55
25	86	81	76	85	85	79	82	4.60
30	75	82	82	79	78	84	80	3.45
40	79	82	80	76	71	74	77	5.03
80	85	87	83	82	79	88	84	3.37

2.7　定型剂用量对单轴向经编织物复合材料Ⅰ型层间断裂韧性的影响

复合材料板材的损伤破坏形式主要包括基体开裂、分层和纤维断裂。其中分层(包括界面脱粘和层间分离)过程是贯穿自初始损伤破坏至最终破坏[19]。分层是一种层间裂纹，层间断裂实质上是一种基体控制的复合材料失效模式，分层产生以后，层合板的刚度、强度急剧下降，甚至引起结构的失效。文中采用Ⅰ型层间断裂韧性来评定复合材料的层间韧性。Ⅰ型层间断裂是层间拉伸加载方式，采用双悬臂梁试验方法。

图 11 所示为不同定型剂用量单轴向经编织物复合材料的Ⅰ型层间断裂载荷-位移曲线。研究表明碳纤维热固性树脂基复合材料的分层扩展行为均

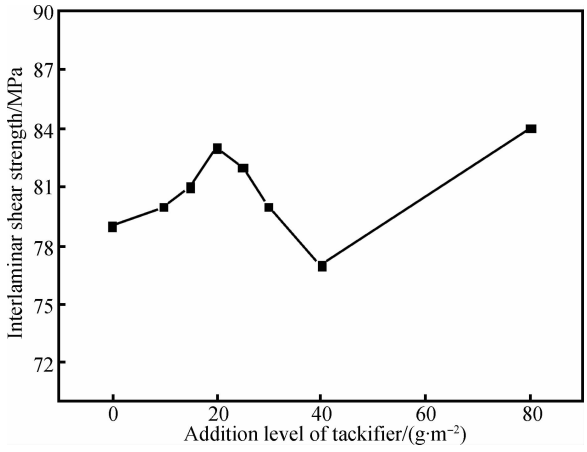


图 10　定型剂用量对单轴向经编织物复合材料层间剪切强度的影响

Fig. 10　Effects of different addition levels of tackifier on interlaminar shear strength of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics

属于脆性的分层断裂，但有稳定和不稳定的分层扩展之分[20]。在本试验中所测得的载荷-位移特性曲线整体上均呈现较典型的脆性稳定的分层行为。加载开始后，随着位移的增加载荷直线增长，呈现出很好的线性加载特征；直到分层扩展之前不久，出现较弱的非线性过程，它反映了分层前缘的基体和界面中微损伤的积累；当载荷加载到临界值时，观察到分层宏观扩展，载荷略有下降；此后发展为一个可控制的稳定的分层扩展过程，即位移继续增加，分层平稳地扩展，位移停止，分层扩展随即中止。

每种定型剂用量下进行 5 组层间剪切强度测试，不同定型剂用量时所测得的所有试样的Ⅰ型层间断裂韧性结果如表 3 所示，图 12 所示为不同定型剂用量时测试的平均结果。可以看出，初始随着定型剂用量的增加，复合材料的Ⅰ型层间断裂韧性缓慢增加，定型剂用量为 20 g/m^2 时，G_{IC}最高，为 560 J/m^2，与定型剂用量为 25 g/m^2 时的 G_{IC}基本相当；其后随着定型剂用量的增加，G_{IC}略有降低，定型剂用量为 40 g/m^2 时，G_{IC}达到最低，为 532 J/m^2；当定型剂用量为 80 g/m^2 时，G_{IC}又有所提高。

本试验中，G_{IC}、弯曲强度及层间剪切强度与定型剂用量的相关曲线整体变化趋势类似。图 4 结果表明，随着定型剂用量的增加，树脂体系的微相结构逐渐由海岛结构经过双连续相结构到最后的相反转结构，而不同的微相结构又对应着不同的力学性能[17]。当定型剂用量较少（≤20 g/m^2）时，随着定型剂用量的增加，树脂体系由海岛结构逐渐过渡到双连续相结构。相关研究表明[17]，树脂体系呈双连续相时，体系的整体力学性能最优。因此，定型剂用量约为 20 g/m^2 时，复合材料体系的综合力学性能最优；当定型剂用量逐渐增加至 40 g/m^2 时，由于定型剂中存在一定量的单官能团聚合物，且定型剂本身即为大分子结构，使得树脂交联反应时交联点较少，较大程度上破坏了原来的交联结构，使得此时树脂体系的力学性能逐渐下降；当定型剂用量达到 80 g/m^2 时，体系发生相反转，体积分数小的热塑性组分成为连续相，体积分数大的环氧树脂成为分散相，体系的韧性得到提高，力学性能又有所提高。因此，综合考虑树脂体系的玻璃化转变温度与复合材料力学性能，本体系中定型剂用量应选择 20 g/m^2。

表 3　不同定型剂用量时单轴向经编织物复合材料的Ⅰ型层间断裂韧性

Table 3　Mode Ⅰ interlaminar fracture toughness of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics with different addition levels of tackifier

Addition level of tackifier/ (g·m^{-2})	G_{IC}/(J·m^{-2}) 1	2	3	4	5	Average/ (J·m^{-2})	Standard deviation/%
0	558	566	554	537	576	558	2.60
10	553	571	557	531	583	559	3.51
15	549	572	552	543	579	559	2.79
20	563	549	562	543	584	560	2.82
25	573	527	579	564	557	560	3.62
30	563	517	571	586	552	558	4.65
40	533	507	561	546	513	532	4.23
80	519	534	549	573	565	548	4.03

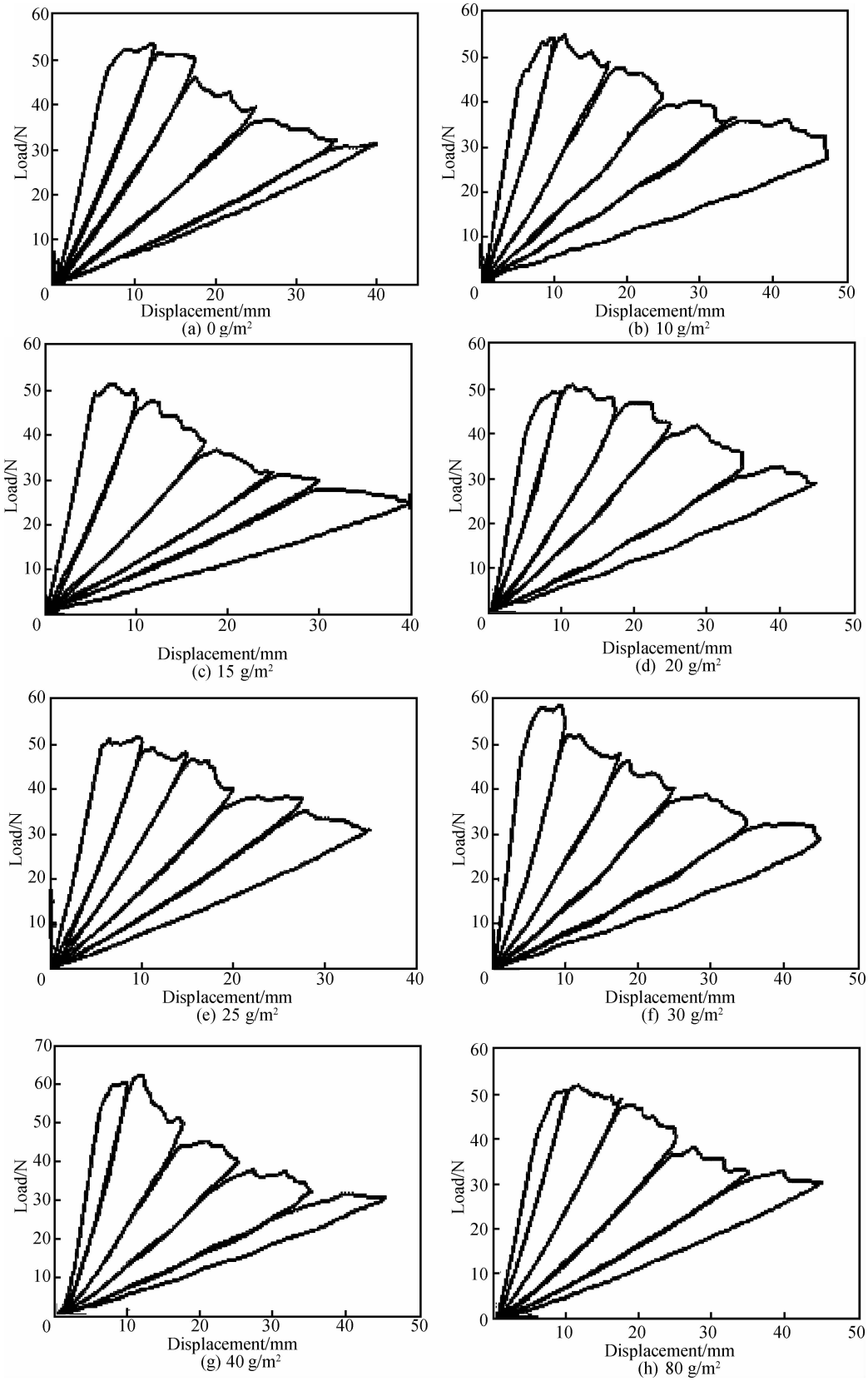


图 11　不同定型剂用量时单轴向经编织物复合材料的Ⅰ型层间断裂载荷-位移曲线

Fig. 11　Mode Ⅰ interlaminar fracture load-displacement curves of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics with different addition levels of tackifier

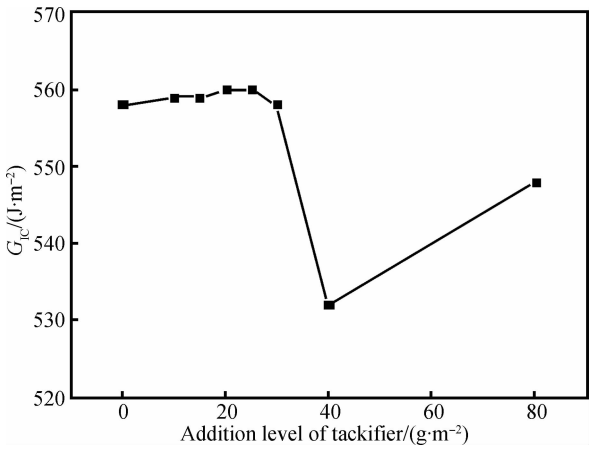


图 12　定型剂用量对单轴向经编织物复合材料Ⅰ型层间断裂韧性的影响

Fig. 12　Effects of different addition levels of tackifier on mode Ⅰ interlaminar fracture toughness of composites reinforced by uniaxial warp-knitting fabrics

3　结　论

（1）随着定型剂用量的增加，环氧树脂体系的玻璃化转变温度逐渐降低，且其相形貌逐渐由海岛结构经过双连续相结构到最后的相反转结构。

（2）室温下，随着定型剂用量的增加，单轴向经编织物表面的定型剂厚度与不均匀度增加，经过130 ℃处理后，定型剂均匀分布在纤维表面及纤维束间。

（3）定型剂用量对单轴向经编织物复合材料力学性能有较大影响。当定型剂用量为 20 g/m^2 时，定型剂对环氧树脂体系耐热性的影响较小，并且此时单轴向经编织物复合材料体系的综合力学性能最优。

参考文献：

[1] Andersson M, Gebart R, Lundstrom S, et al. Development of guidelines for the vacuum infusion process [C]// Proceedings of International Conference on Fiber-Reinforced Polymer. Cambridge: Woodhead Publishing Materials, 2000: 113-120.

[2] 赵晨辉，张广成，张悦周. 真空辅助树脂注射成型(VARI)研究进展 [J]. 玻璃钢/复合材料，2009(1)：80-84.
Zhao Chenhui, Zhang Guangcheng, Zhang Yuezhou. The development of vacuum assisted resin infusion (VARI) [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(1): 80-84.

[3] 陈祥宝. 先进复合材料低成本技术 [M]. 北京：化学工业出版社，2004：99-155.
Chen Xiangbao. Advanced composites with low cost manufacturing [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 99-155.

[4] 张一帆，陈　利，孙　绯，等. 预定型机织物剪切变形实验研究 [J]. 复合材料学报，2009，26(3)：29-34.
Zhang Yifan, Chen Li, Sun Fei, et al. Experiment research on shear deformation of tackified woven fabrics [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(3): 29-34.

[5] 益小苏. 先进复合材料技术研究与发展 [M]. 北京：国防工业出版社，2006：99-107.
Yi Xiaosu. Research and development of advanced composite material technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 99-107.

[6] Yu J Z, Cai Z, Ko K F. Formability of textile performs for composite applications I: Characterization experiments [J]. Composites Manufacturing, 1994, 5(2): 113-122.

[7] 廖勇波，梁子青，李　玲. 定型剂对复合材料力学性能的影响 [J]. 化工新型材料，2006，34(10)：62-65.
Liao Yongbo, Liang Ziqing, Li Ling. Researching that tackifier A was how to affecting the mechanical performance of composites [J]. New Chemical Materials, 2006, 34(10): 62-65.

[8] 梁子青，唐邦铭，李艳亮，等. 定型剂与树脂基体相容性的研究 [J]. 材料工程，2005(4)：15-17.
Liang Ziqing, Tang Bangming, Li Yanliang, et al. Research on compatibility of tackifier and resin [J]. Materials Engineering, 2005(4): 15-17.

[9] 祝君军，段跃新，陈吉平，等. 碳纤维单轴向经编织物定型参数及渗透特性 [J]. 复合材料学报，2012，29(3)：42-48.
Zhu Junjun, Duan Yuexin, Chen Jiping, et al. Packifier parameters and permeability characteristics of non-crimp stitched carbon fabrics [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(3): 42-48.

[10] Depase E, Hayes B S, Seferis J C. Interlayer toughening of VARTM composites-effects of tackifier loading [C]// 47th International SAMPE Symposium and Exhibition. Long Beach: SAMPE, 2002: 417-427.

[11] Rohatgi V, Lee L J. Moldability of tackified fiber performs in liquid composite molding [J]. Journal of Composite Materials, 1997, 31(7): 720-744.

[12] 李斌太，张宝艳，邢丽英，等. 复合材料双真空袋成型工艺研究 [J]. 航空材料学报，2006，26(3)：222-225.
Li Bintai, Zhang Baoyan, Xing Liying, et al. Double-vacuum-bag process for composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 222-225.

[13] 国家质量技术监督局. GB/T 3356－1999 单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法 [S]. 北京：中国标准出版社，1999.
State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T 3356－1999 Test method for flexural properties of unidirectional fiber reinforced plastic [S]. Beijing: China Standard Press, 1999.

[14] 国家标准局. JC/T 773－1996 纤维增强塑料短梁法测定层

间剪切强度［S］. 北京：中国建材工业出版社，1996.
National Bureau of Standards. JC/T 773－1996 Test method for interplay shear strength of unidirectional fiber reinforced plastics［S］. Beijing：China Building Materials Press，1996.

［15］ 中国航空工业总公司. HB 7402－1996 碳纤维复合材料层合板Ⅰ型层间断裂韧性 G_{IC} 试验方法［S］. 北京：航空工业出版社，1996.
Aviation Industry Corporation of China. HB 7402－1996 Test method for mode I interlaminar fracture toughness G_{IC} of carbon fiber-reinforced composites laminates［S］. Beijing：Aviation Industry Press，1996.

［16］ 张　明，安学锋，唐邦铭，等. 增韧环氧树脂相结构［J］. 复合材料学报，2007，24(1)：13-17.
Zhang Ming，An Xuefeng，Tang Bangming，et al. Phase structure of a toughened epoxy system［J］. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(1)：13-17.

［17］ 益小苏. 先进树脂基复合材料高性能化理论与实践［M］. 北京：国防工业出版社，2011：381-385.
Yi Xiaosu. Theory and application of high-performance polymer matrix composites［M］. Beijing：National Defence Industry Press，2011：381-385.

［18］ 乌云其其格，益小苏. 一种中温定型剂及其 RTM 预制体性能［J］. 材料工程，2006(3)：37-43.
Wuyunqiqige，Yi Xiaosu. A medium-temperature tackifier and tackification behavior［J］. Materials Engineering，2006，(3)：37-43.

［19］ 严柳芳. 双轴向经编增强织物缝合工艺对复合材料力学性能影响的研究［D］. 上海：东华大学，2006.
Yan Liufang. Study on the influence of stitching technique of bⅠaxial warp-knitted fabrics on mechanical performance of composites［D］. Shanghai：Donghua University，2006.

［20］ 赵时熙，王　波，陈焕春，等. 高模量碳环氧复合材料混合模式分层断裂研究［J］. 中国空间科学技术，1998，18(5)：25-30.
Zhao Shixi，Wang Bo，Chen Huanchun，et al. Mixed mode interlaminar fracture of high modulus carbon epoxy composites［J］. Chinese Space Science and Technology，1998，18(5)：25-30.