

不同结构 UHMWPE 纤维纬编针织 复合材料弯曲性能

Bending Properties of UHMWPE Fiber Weft
Knitted Composites with Different Structures

李翠玉^{1,2}, 罗岳文¹, 贾静艳¹, 冯亚男¹, 杨 雪¹

(1 天津工业大学 纺织学院, 天津 300387;

2 天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387)

LI Cui-yu^{1,2}, LUO Yue-wen¹, JIA Jing-yan¹, FENG Ya-nan¹, YANG Xue¹

(1 School of Textile, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2 Key Laboratory of Advanced Textile Composites (Ministry of
Education), Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

摘要: 以超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维为原料,在电脑横机上编织出较理想的 UHMWPE 纤维纬平针、罗纹、畦编针织结构织物。采用 VARTM 工艺、 $(0^\circ, 90^\circ)_s$ 铺层方式成功制备了六层纬平针、六层罗纹以及六层畦编 UHMWPE 纤维纬编针织复合材料板。对三种复合材料板的弯曲性能及其影响因素进行研究,比较并分析其弯曲应力-挠度变化曲线和破坏形式。结果表明:三种 UHMWPE 纤维纬编针织结构增强复合材料的弯曲应力-挠度曲线具有非线性特征,曲线均类似于抛物线;其中,纬平针织结构复合材料的弯曲强度最大,罗纹次之,畦编最小;承受弯曲破坏的主要是树脂基体,没有出现增强体断裂、撕开等现象,表明由高强聚乙烯纤维制成的增强体材料具有较强的韧性与较高的强力。

关键词: UHMWPE 纤维; VARTM; 纬编针织复合材料; 弯曲性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.11.014

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)11-0084-07

Abstract: Three kinds of weft knitting structure fabrics (weft plain, rib, cardigan) based on ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) as raw materials were knitted by computerized flat knitting machine. Each kind of fabric was laminated from six layers into composite material plates respectively, which is laid up in $(0^\circ, 90^\circ)_s$ by VARTM. The bending performance and the influencing factors of the three kinds of fabrics were studied, which were followed by the comparison and analysis of the stress-deflection curve and the failure mode. The results indicate that the bending stress-deflection curve of three kinds of UHMWPE weft knitting structure composites has nonlinear characteristics and the curves are all similar to a parabola; the bending strength of weft plain knitted fabric laminated plate is the best, rib is the second, cardigan is the last. This shows that the technological parameters of different fabric structures have a great influence on the bending performance of composite materials. The bending failure mainly occurs on the resin matrix, and no fracture, tearing occurs on the reinforcement. This also shows that the reinforcing material made by UHMWPE fiber has strong toughness and high strength.

Key words: UHMWPE fiber; VARTM; weft knitted composite; bending performance

在纺织复合材料的发展中,纬编针织结构增强复合材料的发展是较晚的,但由于它所具有的一些独特性能,如,良好的成型性、优良的抗冲击性和较低的生产成本等^[1-4],国内外学者对其研究日益增多和深入,应用也越来越广泛^[5-7]。UHMWPE 纤维具有很多优异的性能,在国民经济的各个领域发挥

着重要的作用,被称为“奇异的塑料”^[8];且 UHMWPE 纤维增强复合材料具有质量轻、强度高、耐冲击性好、介电性能及防弹性能高的特点,近几年得到了迅速的发展。而关于 UHMWPE 纤维纬编针织复合材料不同组织结构对其力学性能的影响方面的研究还较少^[9-11]。

曹海建等^[12]研究了三维全五向编织复合材料的弯曲性能,得出编织复合材料的弯曲性能随着编织角的增加而减少,随着轴纱、纤维体积分数的增大而增加;三维全五向编织复合材料的弯曲性能明显好于三维五向编织复合材料。梁倩因^[13]对缝合编织复合材料低速冲击及冲击后弯曲性能进行了研究,在 3.2J/mm 的冲击能量作用下,缝合编织复合材料的冲击损伤模式主要为基体开裂、裂纹,且冲击作用对试样的弯曲性能造成消极影响,其中相比于弯曲强度,弯曲模量对冲击损伤更加敏感。徐艳华等^[14]对双轴向衬纱纬编玄武岩纤维复合材料做了弯曲性能测试,研究表明其具有较好的轴向弯曲性能,其横向和纵向弯曲性能均优于斜向。

Allison 等^[15]研究了玻璃纤维/环氧树脂复合材料的弯曲性能,用三点弯曲测试探究几何波对材料强度的影响,结果表明波纹会降低强度。Li 等^[16]研究了集成 3D 编织垫片复合材料在室温和低温下的弯曲性能和破坏机理,结果表明,弯曲性质在液氮温度下比在室温下明显改善。Ren 等^[17]研究了连续复合波纹钢腹板桥梁的弯曲性能,经过探讨推导出波纹钢网复合梁的计算方法和有效弹性模量的计算公式。

Xue 等^[18]对 SiC /铝复合材料的弯曲性能做了研究,得出弯曲强度开始呈增长趋势,达到最大值 435 MPa 后逐渐减小。

UHMWPE 纤维增强复合材料已被广泛应用于建筑、医学、运动、航空航天等重要领域,其力学性能的研究已受到学者的广泛关注和重视,而对 UHMWPE 纤维纬编针织复合材料弯曲性能的研究却不多见。本工作探究不同组织结构等因素对纬编针织复合材料弯曲性能的影响,为 UHMWPE 纤维纬编针织复合材料的设计与应用提供参考。

1 实验

1.1 纬编针织物的编织

实验所用 UHMWPE 纱线是经过络筒、长丝加捻及纱线卷绕改造成为符合针织用纱要求(捻度均匀偏低、摩擦因数小等)的捻度为 25 捻/10cm 的 67tex 纱线。

使用机号为 12E 的 LXC-252SC 龙星电脑横机编织纬平针、罗纹、畦编组织三种针织物。纬平针是针织物中最基础、最简单的织物,罗纹具有优良的弹性,畦编是既有集圈又有基本组织的织物,此三种针织物适合作对比参照实验。经过反复试织,不断调整参数,从而得到比较理想的编织工艺参数,即实验中度目(弯纱深度)为 90,牵拉力 25,机头速率 0.4m/s,最终编织出比较理想的纬平针、罗纹和畦编纬编针织物,下机后得到三种不同组织结构织物的工艺参数如表1 所示。

表 1 三种不同组织结构织物的工艺参数
Table 1 Technological parameters of three different fabric structures

Structure	Thickness/mm	Wale density/(course/5cm)	Course density/(wale/5cm)	Total density/(loops/25cm ²)	Knit mass/(g·m ⁻²)
Weft plain	0.76	46.66	26.70	1245.84	218.13
Rib	1.01	36.92	30.82	1136.94	208.86
Cardigan	1.03	17.07	24.24	416.76	188.77

1.2 纬编针织复合材料试样的制备

复合材料试样的制备采用真空辅助树脂传递模塑成型工艺(VARTM)。选择无色低黏度的 GCC-135 环氧树脂和蓝色 GCC-137 固化剂作为树脂基体体系,树脂与固化剂的质量比为 100:30,室温固化 24h。为使制备的复合材料均衡对称,六层纬平针织物、六层罗纹织物以及六层畦编织物分别采用(0°,90°)_{3s}铺层方式,如六层复合材料的对称铺层方式为(0°,90°,0°,90°,0°,90°)。

经过多次试制,优化实验条件,最终制备出比较理想的纬平针、罗纹和畦编 UHMWPE 纤维纬编针织增

强复合材料,如图 1 所示,图 1(a)为粘接好的真空膜试样图,图 1(b)为制备完成后复合材料板。

制得的 UHMWPE 纤维纬平针、罗纹、畦编纬编针织复合材料的厚度分别为 3.56,3.62,3.67mm,纤维体积分数分别为 37.08%,34.46%,32.27%,纤维体积分数间存在微小差异的主要原因是织物本身结构的特点:不同组织结构的纬编针织物结构紧密度不同,复合时对称铺层方式使得织物横、纵列相互交叉,层间结合时紧密度存在差异,导致树脂浸润过程中树脂的渗透率不同,而最终三种结构纬编针织复合材料板的纤维体积分数存在差异。

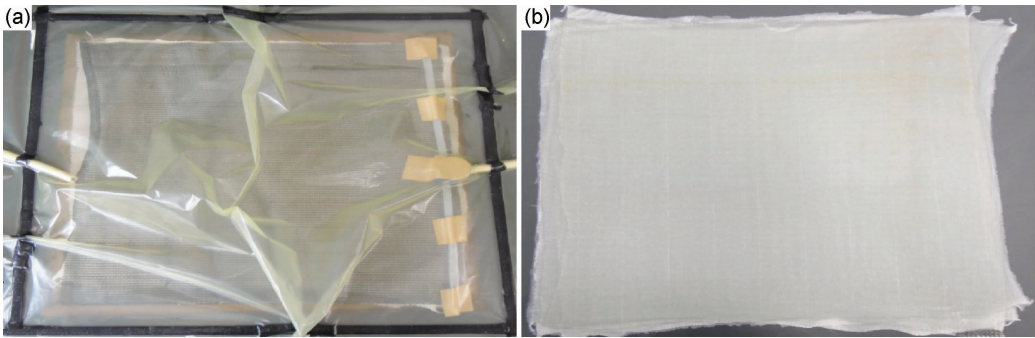


图 1 制备完成前后的复合材料 (a)粘好真空膜的试样;(b)制备好的复合材料

Fig. 1 The composite before and after fabrication (a)bonding with vacuum membrane;(b)the composite after fabrication

1.3 纬编针织复合材料弯曲实验

参照 GB/T1449—2005^[19] 实验标准,采用三点弯曲方法进行实验,将试样对称的放在两支座上,在两支座间的试样中间施加集中载荷。采用的仪器为 CSS-44100 电子万能试验机,复合材料试样尺寸参照标准,将制得的三种纬编针织结构复合材料分别沿纵向(90°方向)和横向(0°方向)切割成标准尺寸,加载速率为 2mm/min,实验中每种试样测试 5 块。由 CSS-44100 电子万能试验机得到载荷与挠度的数据,根据实验标准对得到的数据进行处理,计算并绘制出应力-挠度曲线。

2 实验结果与讨论

2.1 弯曲性能分析

不同结构纬编针织复合材料横、纵向弯曲性能比较见表 2,90°表示纵向,0°表示横向。由表 2 的数据可以看出纬平针织结构复合材料所受弯曲应力最大,畦编最小,而在同种结构中横向与纵向的最大弯曲应力相差不大,表明采用(0°,90°)_{ss} 铺层方式,可以使复合材料板受力均匀,并使横向与纵向的抗弯能力几乎一致。

表 2 三种纬编针织复合材料弯曲性能

Table 2 Three weft knitted composites bending performance

Structure	Bending direction	Maximal bending force/N	Maximal bending stress/MPa	Deflection/mm
Weft plain	90°	153.94	72.88	10.67
	0°	144.46	68.39	10.73
Rib	90°	121.38	55.58	10.30
	0°	130.32	59.67	10.69
Cardigan	90°	93.35	41.58	10.26
	0°	113.25	50.47	10.92

采用 origin 画图得到三种纬编针织结构复合材料纵、横向弯曲应力-挠度特征曲线,如图 2 所示,图 2 中 0°表示纬编针织结构复合材料沿横向裁剪试样的弯曲实验曲线,90°表示沿纵向裁剪试样的弯曲实验曲线。

从三种纬编针织结构复合材料的弯曲应力-挠度曲线和表 2 的数据可以看出:

(1)三种纬编针织结构复合材料的应力-挠度曲线均呈非线性,形态更似于抛物线,即弯曲应力随着挠度值的增加不是成比例增加,这主要是由于采用三点弯曲方法,支座只对试样垂直方向移动有约束,对水平方向移动没有限制,实验中复合材料增强体原料 UHMWPE 纤维为高性能纤维,强度高,随着跨距中央加载上压头的不断下降,试样弯曲度越来越大,最终试样与支座之间产生相对滑动脱落,承受抗弯力的是树脂基体,且没有出现树脂断裂的现象,表明树脂与增强体复合而成的 UHMWPE 纤维纬编针织复合材料具有较好的韧性和较高的抗弯强度。三种结构复合材料的弯曲曲线特征具有相似性,表明三种结构 UHMWPE 纤维纬编针织复合材料弯曲破坏机制与方式相似。

(2)三种纬编针织结构复合材料的应力-挠度曲线初始阶段线性度较好,随着挠度值不断增加表现出呈非线性变化规律,曲线在最高点处呈圆弧形,随着试样挠度缓慢上升到一定高度时,弯曲应力直接下降为零,如图 2 所示。导致曲线有如此变化规律的原因是随着跨距中央加载上压头的不断下降,达到最大弯曲应力时,试样在支座位置发生滑移,弯曲应力开始缓慢下降,当试样挠度达到一定高度后,试样从支座上滑落。

(3)同一种 UHMWPE 纤维纬编针织结构复合材料板的纵、横向弯曲应力-挠度曲线相似,差别很小,表明实验中试样铺层均衡对称,使试样弯曲纵横向性能

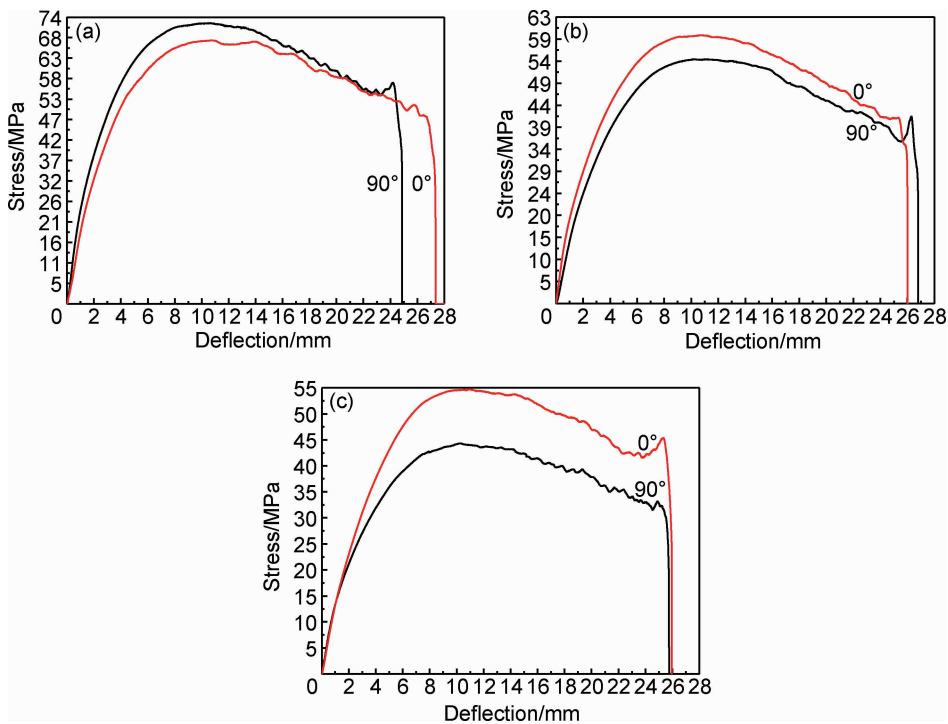


图 2 三种纬编针织复合材料 0°,90°方向应力-挠度曲线 (a)纬平针;(b)罗纹;(c)畦编

Fig. 2 The stress-deflection curve of three kinds of weft knitted composites in 0°and 90°direction (a)weft plain;(b)rib;(c)cardigan

的差别减小;有微小差异的原因是由于织物结构虽相同,但在树脂中线圈的形态、几何参数、界面状况等不可能处处完全一致,导致对复合材料弯曲应力-挠度曲线有一定的影响。

图 3 为三种纬编针织结构复合材料弯曲纵向应力-挠度曲线(图 3(a))、横向应力-挠度曲线(图 3(b))以及总的应力-挠度曲线(图 3(c))。一般认为开始承受弯曲载荷的主要是基体树脂,在起始阶段三条曲线

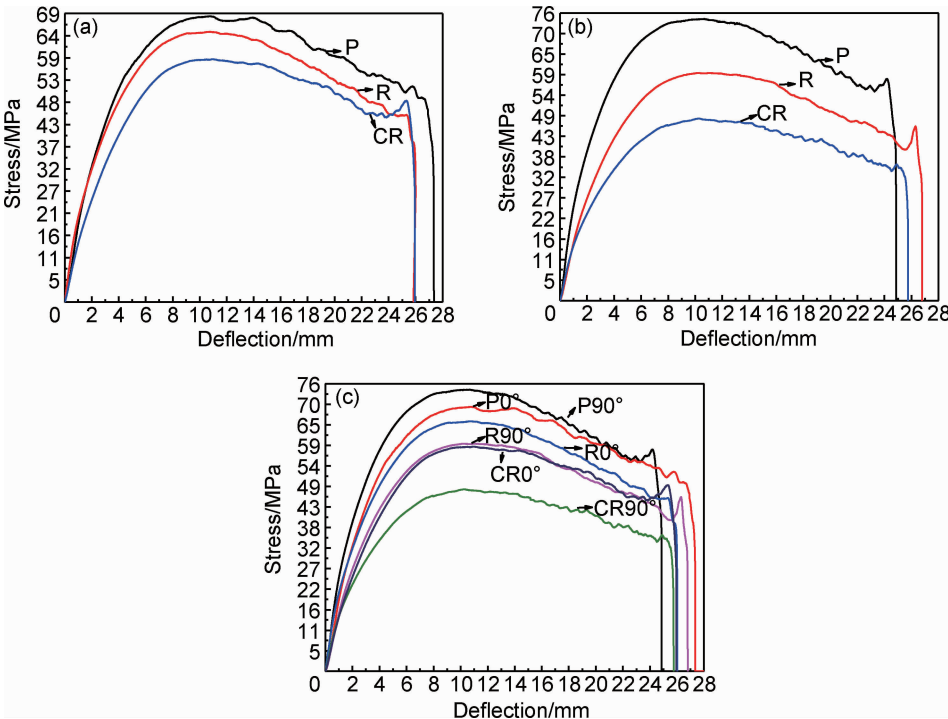


图 3 三种纬编针织复合材料应力-挠度曲线 (a)90°方向;(b)0°方向;(c)0°和 90°方向

Fig. 3 The stress-deflection curve of three kinds of weft knitted composites

(a)0°direction;(b)90°direction;(c)0°direction and 90°direction

几乎重合,但随着加载上压头的不断下降,不同纬编织结构体系也起一定的作用,从图中可以观察到,三种纬编织结构复合材料的挠度曲线变化规律相近,纬平针织结构承受的弯曲力最大,罗纹次之,畦编最小。主要原因如下:一是由于三种针织物的横纵密度不同,其中纬平针的横纵密度最大,畦编最小,在实验中纬平针能够承受更大的弯曲载荷,且纬平针、罗纹、畦编复合材料的纤维体积分数、面密度等基本参数依次减小;二是由于三种织物结构之间的差异,纬平针结构较为紧密,延展性相对稍差,罗纹组织是由正反线圈圈套而成,延展性较好,而畦编结构是由反面集圈圈套而成,线圈长度不匀,因此其强度比纬平针织结构和罗纹针织结构的小,受到弯曲作用力时,其最大弯曲力最小。因此,UHMWPE 纤维纬编织结构复合材料抗弯强度也会受针织结构的工艺参数以及复合材料的纤维体积含量、面密度等因素的影响。

2.2 弯曲破坏形式分析

弯曲断裂破坏与拉伸断裂破坏不同,试样拉伸断裂一般是从基体破坏开始,直至增强体脱层、撕开、断裂结束,而试样的弯曲破坏开始主要是树脂基体在起作用。实验采用目视检测方法和扫描电镜来观察内部破坏形态。弯曲损伤试样上表面受到挤压,受压面无明显变化,下表面受到拉伸作用,受拉面出现泛白现象,复合材料中增强体部分的线圈受弯曲力的作用而逐渐伸直,但并未发生断裂,直到试样滑离支座。一般认为随着树脂遭到破坏后,复合材料弯曲能力下降,即复合材料被破坏,试样在压头作用的位置上发生了永久的弯曲变形;由于与树脂相比,增强体织物更柔软,并没有出现增强体断裂、撕开等现象,这也表明了由高强聚乙烯纤维制成的增强体材料具有较强的韧性与较高的强力。如图 4 所示为试样弯曲破坏图(以纬平针织结构为例),从图中可以看到,织物结构并没有受到撕裂性破坏或出现脱层现象,只是由于基体的损伤使复合材料失去抗弯曲能力。

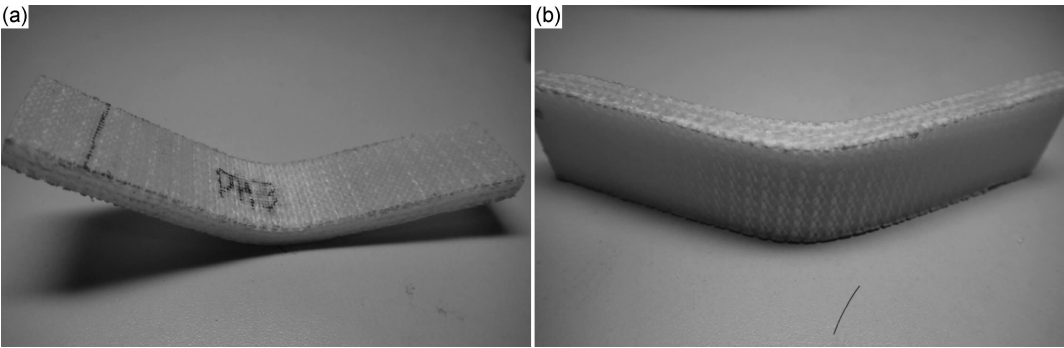


图 4 试样弯曲破坏图 (a)上表面;(b)下表面
Fig. 4 The figure of curving and destructive sample (a)the upper surface;(b)the lower surface

图 5 为 UHMWPE 纤维纬编织针织复合材料弯曲处的纤维表面在 SEM 下的微观图,图 5(a)为弯曲破坏后多根纤维与树脂整体图,图 5(b)为单根纤维表面树脂破坏图,从图中可看出,试样的破坏主要是树脂遭到破坏,纤维并未抽拔出来,纤维增强体没有断裂

情况发生。由于复合材料中增强体为纬编织物,与树脂相比,增强体织物更柔软,所以并未出现增强体断裂、撕开等现象,这也表明了由高强聚乙烯纤维制成的增强体材料具有较强的韧性与较高的强力。在纬编织针织复合材料的弯曲中很少有树脂与增强体

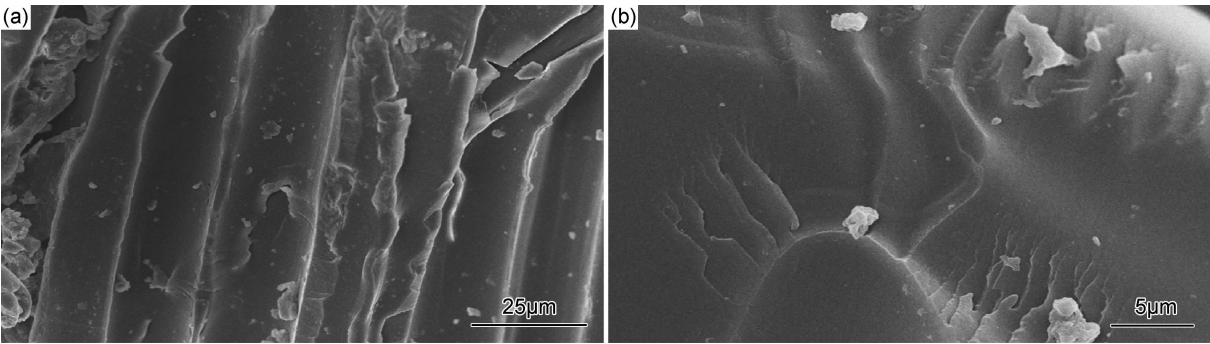


图 5 弯曲后纤维表面 SEM 照片 (a)多根纤维;(b)单根纤维
Fig. 5 SEM images of fiber surface after bending (a)several fibers;(b)single fiber

同时遭到破坏的情况,通常树脂遭到破坏后,复合材料便不再具备弯曲能力了,由图 5(a),(b)可以看到浸润在纤维表面的树脂遭到了不同程度的破坏而纤维几乎不受影响,这正是纬编针织复合材料弯曲破坏的主要形式。

图 6(a)所示为弯曲正面树脂破坏的微观图,从图中可以看到,树脂在某些地方遭到较严重的破坏,而纤维并未抽拔出来,这也说明了树脂与增强体浸润良好。

图 6(b)为弯曲破坏处的截面图,由此可以反映出层间情况:有轻微的裂痕,但是裂纹不显著,说明并未有严重的脱层现象发生。从图 5 与图 6 的 SEM 图可知,UHMWPE 纤维纬编针织复合材料是由于基体的解体导致其失去了弯曲能力,纤维并没有出现断裂、抽拔等破坏情况。

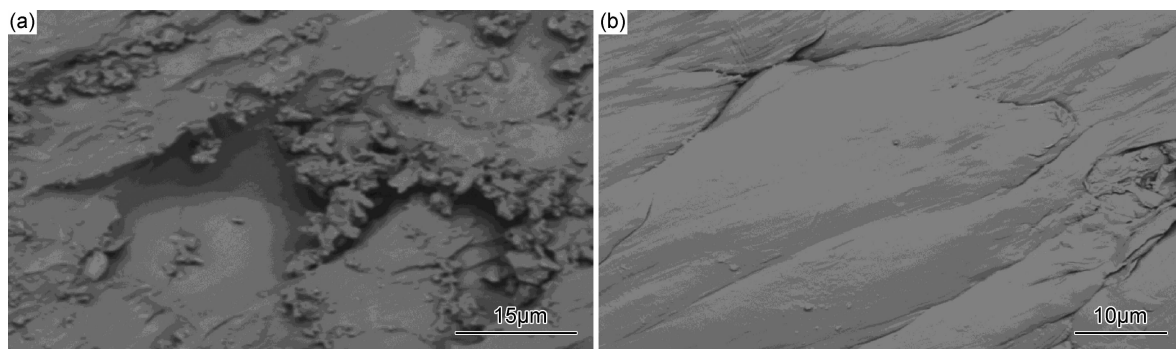


图 6 弯曲后树脂破坏 SEM 照片 (a)弯曲正面;(b)弯曲截面

Fig. 6 SEM images of destructive resin after bending (a)the right side;(b)the section

3 结论

(1)三种 UHMWPE 纤维纬编针织结构增强复合材料的弯曲力学性能曲线具有非线性特征,弯曲应力-挠度曲线均类似于抛物线;当挠度达到一定值后,试样从支座上滑落,弯曲应力下降为零。

(2)三种纬编针织结构复合材料在最大应力处的挠度相差较小,同一种纬编针织结构的纵、横向弯曲应力-挠度曲线相近,数值相差甚小,这是由于采用 $(0^\circ, 90^\circ)_s$ 铺层方式使得材料的横纵向承受弯曲能力一致。

(3)三种纬编针织结构复合材料中纬平针的弯曲强度最大,罗纹次之,畦编最小,表明不同组织结构织物的工艺参数、不同组织结构针织复合材料的纤维体积含量等基本参数对复合材料弯曲性能均有一定影响。

(4)承受弯曲破坏的主要是树脂基体,没有出现增强体断裂、撕开等现象,这也表明了由高强聚乙烯纤维制成的增强体材料具有较强的韧性与较高的强力。

参考文献

[1] MASRAN S H, ISMAIL A E, MARIAN M F. A study of energy absorption performances of pultruded composites under quasi-static compressive loadings[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 465-466:662-666.

[2] 张小康. 超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料的性能研究[D]. 上海:华东理工大学, 2011.

ZHANG X K. Properties of UHMWPE fiber reinforced compos-

ites[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology, 2011.

[3] 卢锦花,李贺军,刘皓,等. 碳纤维表面处理对 2D 碳/碳复合材料弯曲性能的影响[J]. 材料工程,2005,(9):3-6.

LU J H, LI H J, LIU H, et al. Effect of surface treatment on flexural property of 2D C/C composites conductive oxide thin films[J]. Journal of Materials Engineering,2005,(9):3-6.

[4] 熊翔,黄伯云,李江鸿,等. 准三维 C/C 复合材料的弯曲性能及其破坏机理[J]. 航空材料学报,2006,26(4):88-91.

XIONG X, HUANG B Y, LI J H, et al. Bending property and fracture mechanism of quasi-3D C/C composites[J]. Journal of Aeronautical Materials,2006,26(4):88-91.

[5] 钱鑫,支建海,张永. 碳纤维表面化学结构对其增强环氧树脂基复合材料性能的影响[J]. 材料工程,2014,(6):84-88.

QIAN X, ZHI J H, ZHANG Y. Effect of surface chemical structure of carbon fibers on properties of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Journal of Materials Engineering,2014,(6):84-88.

[6] 顾超英,赵永霞. 国内外超高分子量聚乙烯纤维的生产与应用[J]. 纺织导报,2010,(4):52-55.

GU C Y, ZHAO Y X. Production and application of UHMWPE fiber at home and abroad[J]. China Textile Leader, 2010,(4):52-55.

[7] 胡春平,刘丽,姜波,等. 高硅氧/有机硅复合材料高温弯曲性能研究[J]. 航空材料学报,2012,32(5):66-69.

HU C P, LIU L, JIANG B, et al. Investigation of flexural strength of vycor glass/silicone composites under high temperature[J]. Journal of Aeronautical Materials,2012,32(5):66-69.

[8] 李艳芹,朱博超,黄安平,等. 超高分子量聚乙烯研究进展及应用领域[J]. 广州化工,2011,(2):19-21.

LI Y Q, ZHU B C, HUANG A P, et al. Research progress and

- application of ultra high molecular weight polyethylene[J]. *Guanzhou Chemical Industry*, 2011, (2): 19—21.
- [9] MEHMET A, ERSEN B, ALAATTIN A, et al. Impact and post impact behavior of layer fabric composites [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(9): 2809—2818.
- [10] 苏荣锦. 高性能超高分子量聚乙烯复合材料的制备与性能研究 [D]. 长沙: 湖南工业大学, 2012.
- SU R J. Study on preparation and properties of high properties UHMWPE composite [D]. Changsha: Hunan University of Technology, 2012.
- [11] 伊文梅, 黄安平, 贾军纪, 等. 超高相对分子质量聚乙烯纤维的生产应用现状[J]. *合成纤维*, 2013, 42(4): 7—10.
- YI W M, HUANG A P, JIA J J, et al. Present situation of production and application of UHMWPE fiber[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2013, 42(4): 7—10.
- [12] 曹海建, 王怡洁, 刘菲. 三维全五向编织复合材料的弯曲性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013, (9): 39—42.
- CAO H J, WANG Y J, LIU F. Bending properties of three-dimensional full five-directional braided composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2013, (9): 39—42.
- [13] 梁倩因. 缝合编织复合材料低速冲击及冲击后弯曲性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2014.
- LIANG Q N. Low-velocity impact and post-impact bending performance of stitched braided composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2014.
- [14] 徐艳华, 袁新林. 双轴向衬纱纬编玄武岩纤维复合材料弯曲性能 [J]. *复合材料学报*, 2013, 30(2): 233—239.
- XU Y H, YUAN X L. Bending properties of bi-axial weft-knitted basalt fiber reinforced composites of different ways of inserted yarn[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(2): 233—239.
- [15] ALLISON B D, EVANS J L. Effect of fiber waviness on the bending behavior of s-glass/epoxy composites [J]. *Materials and Design*, 2012, 36: 316—322.
- [16] LI D S, ZHAO C Q. Experimental study on the bending properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites at room and cryogenic temperature [J]. *Composite Structures*, 2014, 111: 56—65.
- [17] REN D L, ZHAO F H. Research on bending performance of continuous composite girder bridge with corrugated steel webs [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 438—439: 865—863.
- [18] XUE C, YU J K. Enhanced thermal transfer and bending strength of SiC/Al composite with controlled interfacial reaction [J]. *Materials and Design*, 2014, 53: 74—78.
- [19] GB/T1449—2005, 纤维增强塑料弯曲性能试验方法[S].
-
- 基金项目:**国家自然科学基金(51403154)
- 收稿日期:**2014-07-12; **修订日期:**2015-04-14
- 通讯作者:**李翠玉(1974—), 女, 副教授, 研究方向: 纺织复合材料, 联系地址: 天津市西青区宾水西道 399 号天津工业大学纺织学院(300387), E-mail: lcytju@gmail.com
-