

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.01.010

VARTM 工艺铺层取向对复合材料力学性能的影响^{*}

赖家美¹, 鄢冬冬¹, 刘榆华¹, 王科¹, 黄志超²

(1. 南昌大学机电工程学院聚合物成型研究室, 南昌 330031; 2. 华东交通大学载运工具重点实验室, 南昌 330013)

摘要: 采用真空辅助树脂传递模塑 (VARTM) 工艺制作了玻璃纤维增强不饱和聚酯复合材料层合板, 对其进行了拉伸、弯曲、冲击性能测试, 并对铺层取向与玻璃纤维复合材料层合板力学性能的影响关系进行了实验研究。实验结果表明, 0° 取向玻纤增强复合材料在单一方向上的力学性能最佳, $\pm\theta$ 取向比 θ 取向玻纤增强复合材料有更好的力学性能; θ 单向铺层复合材料在外载荷作用下发生破坏, 其断口破坏的角度与铺层角度一致, 而在 $\pm\theta$ 多向铺层复合材料的断口形貌更复杂。通过合理的铺层设计可获得满足工程需要的复合材料制品。

关键词: 铺层取向; 玻璃纤维增强复合材料; 真空辅助树脂传递模塑; 力学性能

中图分类号: TB 332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)01-0043-05

Influence of Different Ply Orientations on Mechanical Properties of Composite with VARTM Technique

Lai Jiamei¹, Yan Dongdong¹, Liu Yuhua¹, Wang Ke¹, Huang Zhichao²

(1. Polymer Processing Research Lab., College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Key Laboratory for Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The standard samples of glass fiber (GF) reinforced unsaturated polyester, which were produced by using VARTM technique, were used to carry out tensile, bending and shock experiments individually. Effect of different ply orientation on mechanical properties of fiber reinforced composites was studied. The experimental results reveal that 0° oriented fiber reinforced composite has the best mechanical properties in a single direction; the $\pm\theta$ oriented fiber reinforced composites have better mechanical properties than θ oriented. Angle of fracture section of θ oriented fiber reinforced composites is the same to the angle of ply, and fracture profile of $\pm\theta$ oriented fiber reinforced composites is more complicated. Therefore, the required engineering composites can be produced by reasonable ply design.

Keywords: ply orientation; fiber reinforced composite; vacuum assisted resin transfer molding; mechanical properties

纤维增强复合材料具有诸多金属材料无法比拟的优点, 比如可设计性强、耐腐蚀、质量轻、能阻挡噪音等, 其最突出特点是比强度高、比弹性模量大、破损安全性能高。正是由于其优越的性能, 在船舶、汽车、建筑及飞机产业等, 纤维增强复合材料都得到广泛应用, 具有很好的应用前景。很多学者对纤维体积分数对复合材料层合板的性能影响进行了大量研究。纤维作为增强体在复合材料受力时起主要承载作用, 其与树脂基体界面的结合强度、在基体中的均匀分布程度都影响复合材料性能, 学者们已经作了工作来论证这些因素的影响程度。但是在纤维取向不同的时候, 孔隙率对基体流动状态影响的研究比较多, 对力学性能的影响研究不是很充分。

真空辅助树脂传递模塑 (VARTM) 工艺是制备纤维增强复合材料的常用工艺。其简略示意如图 1 所示。其特点是在真空负压驱动下注入树脂, 其优点是树脂在浸润增强体时能够达到好的浸润效

果、流动性也很出色, 所生产的制品具有孔隙率低、纤维含量高、力学性能好等优点。

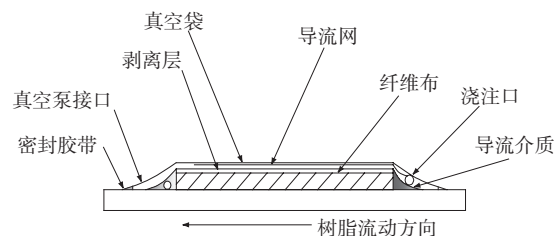


图1 VARTM 工艺铺层示意图

不同的铺层方式能够得到各向不同的性能, 为结构设计优化提供更大的自由度^[1]。笔者选择玻璃纤维作为增强体, 不饱和聚酯树脂为基体材料, 通

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (51263015, 51265012), 江西省自然科学基金资助项目 (20122BAB206011)

联系人: 赖家美, 博士, 副教授, 主要从事聚合物基复合材料的应用研究

收稿日期: 2014-10-28

过 VARTM 工艺制备了不同取向角度的单向纤维铺层和多向纤维铺层的复合材料试件,并进行拉伸、弯曲、冲击实验。通过各自组内对比及单向跟多向组外对比,论证不同取向的纤维铺层方向对复合材料力学性能的影响,以便制备所需性能的制品。

1 实验部分

1.1 主要原材料

不饱和聚酯树脂: TH110-350R, 日本 U-PICA 公司;

固化剂: KP-100, 美国 SYRGIS 公司;

单向玻璃纤维布: L600, 浙江成如旦新能源科技有限公司;

导流网: VI160, 上海沥高科技科技有限公司;

脱模布: PP-85WB, 厦门维曼材料科技有限公司;

真空袋膜: Vacfilm 400Y, 上海沥高科技科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

树脂收集器: SJQ-10 型, 厦门维曼材料科技有限公司;

真空泵: X-25 型, 德国 Busch 股份有限公司;

数控水刀: HSQ3020 型, 南京合展精密技术有限公司;

电子万能试验机: Reger30kN 型, 深圳市瑞格尔仪器有限公司;

摆锤式冲击试验机: ZBC2000 型, 深圳市新三思材料检测有限公司。

1.3 实验方案

本实验采用六层纤维布铺层。表 1 为复合材料实验组别及对应铺层角度。若各层玻璃纤维都在同一方向则称为单向复合材料, 各层玻璃纤维的方向不同则称为多向复合材料^[2]。玻璃纤维取向与树脂流动方向的夹角 θ ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$), 称为玻璃纤维取向角度^[3]; 夹角 θ 逆时针方向旋转为正, 多向复合材料采用纤维 $\pm \theta$ 取向交替的形式来铺层^[4]。由以上分组可知: 1~6 组为单向实验组, 7~11 为多向实验组。

表 1 实验组别及对应铺层角度

组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
取向角度	0	15	30	45	60	90	0/90	± 15	± 30	± 45	± 60

1.4 性能测试

拉伸性能按照 GB/T 1446-2005 及 GB/T

1447-2005 进行测试。弯曲性能按照 GB/T 1446-2005 及 GB/T 1449-2005 进行测试。拉伸和弯曲试验在电子万能试验机上进行。

冲击试样按照 GB/T 1451-2005 进行加工制作, 在摆锤式冲击试验机上进行冲击试验, 测试冲击吸收能和冲击强度^[5]。

2 结果与讨论

2.1 纤维取向对复合材料层合板拉伸性能的影响

测得不同纤维取向复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量, 结果见图 2 和图 3 所示。

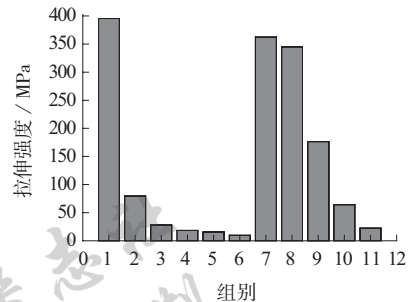


图2 不同组别复合材料的拉伸强度

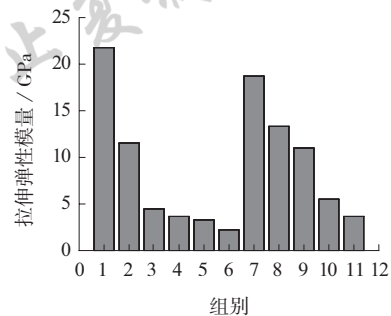


图3 不同组别复合材料的拉伸弹性模量

由图 2 和图 3 可知, 在单、多项实验组中, 复合材料制品的拉伸强度、拉伸弹性模量随着铺层角度绝对值的增大呈现逐渐减小的趋势。1~6 单向组中, 0° 单向复合材料的拉伸强度和弹性模量最大, 铺层角度从 0° 到 30° 变化的过程中, 拉伸强度和弹性模量下降趋势最陡, 30° 至 90° 时随着铺层角度增大, 拉伸强度和弹性模量下降较为平缓。7~11 多向组中, $0^\circ/90^\circ$ 的拉伸强度和拉伸弹性模量都呈最大值, 当铺层角度绝对值增大的过程中, 拉伸强度和拉伸弹性模量降低幅度基本一致, 只是在铺层角度从 $0^\circ/90^\circ$ 增大到 $\pm 15^\circ$ 的过程中, 拉伸强度减小比较平缓, 拉伸强度差值不大, 而拉伸弹性模量则下降很多, 在 $\pm 30^\circ$ 到 $\pm 60^\circ$ 铺层角度绝对值增大的过程中, 多向组中拉伸强度和拉伸弹性模量呈直线趋势减小。通过单向组跟多向组的对比可知, 拉伸实验中, 除了 0° 单向复合材料的拉伸强度和拉伸弹性

模量比 $0^\circ/90^\circ$ 多向复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量高以外,其它绝对值相同的单向复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量值都比相应的多向复合材料的值要低,且它们的差值呈逐渐减小的趋势^[6]。在忽略强度跟弹性模量单位影响的前提下,相同绝对值角度的比较中, 15° 单向复合材料的拉伸强度跟 $\pm 15^\circ$ 多向复合材料的拉伸强度差值最大, 60° 的单向和多向复合材料的拉伸弹性模量的差值最小。因此可得出:取向角度为 θ 的单向复合材料比相应的 $\pm \theta$ 正交的双向复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量要低,随着角度值的增加,同绝对值角度的单向与多向复合材料拉伸强度和拉伸弹性模量的差值越来越小。

在拉伸的破坏形式中,主要有玻璃纤维拔出和玻璃纤维拉断,这都需要施加更大的载荷^[7]。在加载初始阶段,载荷平稳地增加,但增加到一定程度时载荷发生突然下降。这主要是在拉伸时,拉应力通过界面层传递到玻璃纤维上,破坏先从树脂开裂,然后才是纤维断裂。纤维的取向角度直接影响到载荷在纤维和基体间的分布情况,即影响了层间应力^[8]。铺层角度的不同增加了复合材料的各向异性。图4为单项组和多向组复合材料的拉伸断口形貌。观察图4可以发现,1~6 单向组中,除了 0° 单向复合材料外,其它角度的单向复合材料拉伸件的断口比较整齐,呈脆性断裂,这是因为以聚合物为基体的复合材料中,纤维和基体的弹性模量有很大不同,基体的黏结力和弹性模量支配基体传递应力,影响复合材料拉伸时的破坏模式。单向组中玻璃纤维的铺层角度一致,基体弹性模量低,单向复合材料受拉时主要是树脂基体受力,其破坏模式是基体断裂,故断口比较齐整。而 0° 单向复合材料拉伸时主要是纤维承受载荷,破坏方式为纤维拉断,所以断口毛刺很大。

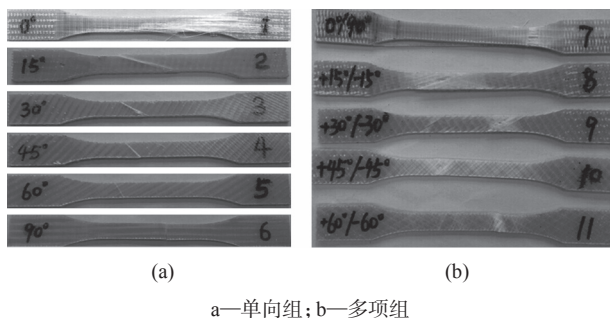


图4 单项组和多向组复合材料拉伸断口形貌

观察图4可以看到,7~11 多向组中的断口呈现“锯齿”状,基体则具有很小的尖角形特征,近似

在垂直于纤维的方向上排列,这是因为在多向组中,纤维与基体形成的界面不是单一方向,应力的传递虽然大小均匀,但是方向上有正负角度的差异,使得断口形貌呈现锯齿状。

2.2 纤维取向对复合材料层合板弯曲性能的影响

测得不同纤维取向条件下复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量,结果如图5和图6所示。分析图5和图6可知,同拉伸性能相似,1~6 单向组弯曲强度和弯曲弹性模量随着纤维取向角度的增加而近似呈指数减小,在铺层角度从 0° 到 45° 变化过程中,弯曲强度跟弯曲弹性模量下降很陡,铺层角度在 45° 到 90° 变化过程中,弯曲强度和弯曲弹性模量下降平缓。7~11 双向组复合材料弯曲强度和弯曲弹性模量随着纤维取向角度的增加则近似呈直线降低, $0^\circ/90^\circ$ 的弯曲强度跟弯曲弹性模量最大。铺层角度从 $\pm 15^\circ$ 到 $\pm 30^\circ$ 的变化过程中,弯曲强度下降很剧烈,而弯曲弹性模量下降却比较平缓,铺层角度从 $\pm 30^\circ$ 到 $\pm 60^\circ$ 逐渐增大过程中,弯曲强度与弯曲弹性模量的下降趋势趋于一致。进行单向和双向组对比可知,除了 0° 单向复合材料比 $0^\circ/90^\circ$ 正交的双向复合材料的弯曲性能高以外,取向角度为 θ 的单向复合材料比相应的 $\pm \theta$ 正交的双向复合材料的弯曲性能要差。随着铺层角度绝对值的增加,单向与多向复合材料弯曲强度和弯曲弹性模量的差值越来越小。实验得到单向组和多向组复合材料的弯曲破坏试件如图7所示。

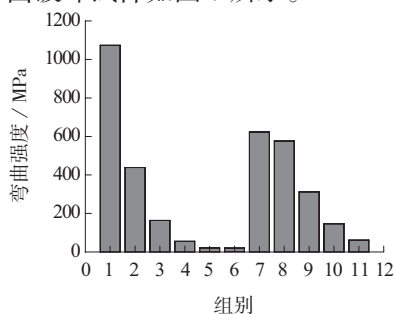


图5 不同组别复合材料的弯曲强度

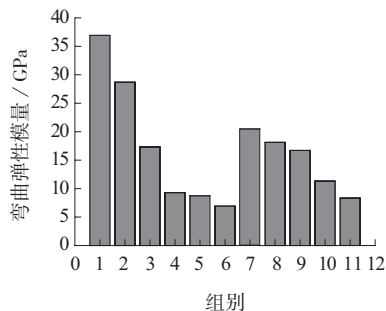
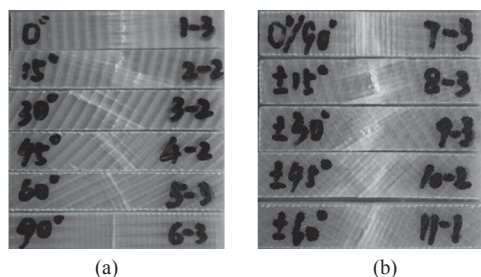


图6 不同组别复合材料的弯曲弹性模量



a—单向组; b—多项组

图7 单向组和多项组复合材料弯曲断口形貌

分析图7可得,在达到最大载荷前,复合材料板处于弹性状态^[9];随着载荷的增加,基体开始出现局部破坏;当载荷达到最大值后,复合材料内的纤维开始断裂,复合材料内的应力降低,但下降过程并不是突然的。最后,玻璃纤维断裂,整个试样在断裂过程中呈韧性破坏。观察图7a可以发现,1~6单向组中试件弯曲裂纹呈现单一方向,且此方向与纤维取向平行。观察图7b,7~11多向组中弯曲裂纹呈现“犬牙”交错状态,这是因为多向纤维组中由于纤维取向角度的不同,应力的分布不一致,而且,随着裂纹的扩展,应力也会重新分配,致使断口形貌比较复杂。

2.3 纤维取向对复合材料层合板冲击性能的影响

测得各组复合材料制品的冲击吸收能和冲击强度,结果如图8和图9所示。

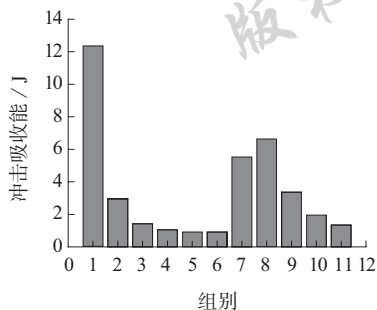


图8 不同组别复合材料的冲击吸收能

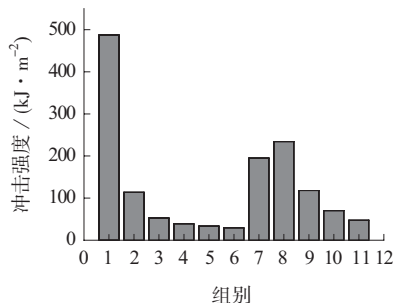
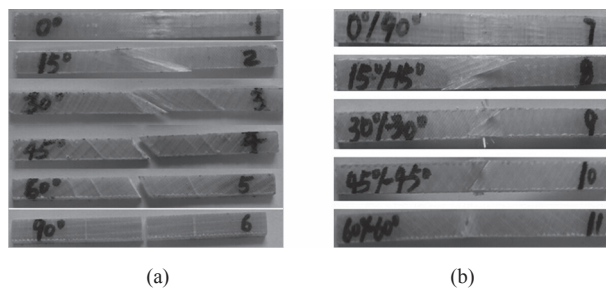


图9 不同组别复合材料的冲击强度

由图8和图9可知,1~6单向组中随着纤维取向角度的增加,复合材料层合板的冲击吸收能减小,冲击强度降低,呈现指数递减趋势,7~11多向

组的冲击吸收能、冲击强度都是呈先增加后减小的趋势。1~6单向组中,0°纤维的单向复合材料吸收的冲击能最大,冲击强度最高,铺层角度从0°变化到15°过程中,冲击吸收能跟冲击强度下降相当剧烈,之后随着铺层角度15°增大到90°过程中,冲击吸收能跟冲击强度下降比较平缓。7~11多向组中,冲击吸收能、冲击强度在铺层角度为 $\pm 15^\circ$ 时值最大,其次是铺层为0°/90°,铺层角度从 $\pm 15^\circ$ 变化到 $\pm 60^\circ$ 时,随着角度绝对值的增加,冲击吸收能跟冲击强度下降趋势基本一致,呈直线降低。通过单向组与多向组对比分析可知:除了0°单向复合材料的冲击吸收能、冲击强度比0°/90°多向复合材料的冲击吸收能、冲击强度高以外,其它取向角度绝对值相同的单向复合材料的冲击吸收能、冲击强度值都比相应的多向复合材料低,且它们差值逐渐减小。

实验得到的冲击断裂试件如图10所示。落锤冲击试验产生的冲击损伤是一个瞬态过程^[10],由于纤维取向角度的不同,会出现不同的破坏形式,从而影响复合材料的冲击性能。单向复合材料是基体变形和开裂破坏,多向复合材料是纤维拔出破坏,前者相对于后者吸收的能量少^[11]。对于纤维拔出破坏的多向复合材料,随着纤维取向角度的增大,纤维拔出所需的能量减小,即可吸收的能量减少,冲击性能降低^[12]。从图10a可以看出,单向组的冲击断口形貌比较光滑,这是因为破坏的主要形式是基体树脂开裂,呈脆性破坏。图10b显示多向组的冲击断口形貌毛刺很大。这是因为在冲击载荷的作用下,纤维取向的不同会影响裂纹在扩展过程中能量的耗散,减缓了裂纹的扩展速率,能量消耗于界面的脱胶,从而分散了裂纹峰值上的能量集中,取向角度的不同也使得裂纹的扩展方向不一致,最终呈现如图10b所示的断口形貌。



a—单向组; b—多项组

图10 单向组和多项组复合材料的冲击断口形貌

3 结论

(1) $\pm \theta$ 取向纤维增强复合材料在拉伸、弯曲和

冲击的载荷作用下,应力的传递和裂纹的扩展方面有更好的损伤容限,与 θ 取向纤维增强复合材料作比较, $\pm\theta$ 取向纤维增强复合材料有更好的力学性能。

(2) 单向复合材料随着取向角度 θ 绝对值的增加,拉伸、弯曲等性能呈现指数趋势减小;多向复合材料则近似直线下降。

(3) 单向铺层复合材料在外载荷的作用下发生破坏,其断口破坏的角度与铺层角度一致,而在多向铺层复合材料的断口形貌更复杂,呈“锯齿”状或有很大毛刺。

(4) 纤维取向会影响纤维增强复合材料的层间以及层内应力的分布,且分布差异很大,正是由于这种差异,可以通过不同的增强材料铺层方式达到各向不同的性能,来设计满足需要性能的复合材料。

参考文献

- [1] 沃西源,夏英伟,王琦洁.关于纤维增强复合材料力学性能可设计性的分析[J].航天返回与遥感,2007(4):63-67.
Wo Xiyuan, Xia Yingwei, Wang Qijie. The designability analysis of fiber-reinforced composites mechanical properties[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007(4):63-67.
- [2] 程基伟,王天民.取向玻璃纤维增强塑料的应力腐蚀开裂研究[J].复合材料学报,2004(6):39-46.
Cheng Jiwei, Wang Tianmin. Stress corrosion cracking of oriented glass fibre reinforced plastics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004(6):39-46.
- [3] 裴晓园,李嘉禄,何玉强.纤维取向对三维四向编织复合材料与层合复合材料振动性能的影响[J].材料工程,2013(7):16-23.
Pei Xiaoyuan, Li Jialu, He Yuqiang. Effects of fiber orientation on modal experimental analysis of three-dimension and four-direction braided composites and laminated composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(7):16-23.
- [4] 李莹,刘魁.国产无机纤维复合材料的性能研究[J].汽车工艺与材料,2012(5):47-51.
Li Ying, Liu kui. Research on the performance of domestic inorganic fiber composite materials[J]. Automobile Technology and Material, 2012(5):47-51.
- [5] 蔡长庚.基体韧性和铺层方式对层混杂纤维复合材料拉伸性能的影响[J].纤维复合材料,2003(3):30-33.
Cai Changgeng. Effect of matrix toughness and stack sequences on tensile property of angle-ply hybrid fiber composites[J]. Fiber Composites, 2003(3):30-33.
- [6] 郑锡涛,孙秦,李野,等.全厚度缝合复合材料泡沫芯夹层结构力学性能研究与损伤容限评定[J].复合材料学报,2006(6):29-36.
Zheng Xitao, Sun Qin, Li Ye, et al. Mechanical behavior and damage tolerance tests of composites through-thickness stitched foam sandwich panels[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006(6):29-36.
- [7] 曾智,李玉龙,郭亚洲,等.两种典型铺层玻璃纤维复合材料的拉伸力学行为[J].航空材料学报,2013(3):74-80.
Zeng Zhi, Li Yulong, Guo Yazhou, et al. Two kinds of typical laminated glass fiber composite tensile mechanical behavior[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013(3):74-80.
- [8] 桂乐乐.纤维方位角对玻纤增强复合材料细观力学行为的影响研究[D].北京:中国矿业大学,2012.
Gui Lele. Effects of orientation angles of fibers on mesomechanics of glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composites[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2012.
- [9] 路利萍.纤维横截面形状对复合材料性能的影响[D].北京:北京服装学院,2010.
Lu Liping. The influence of the cross-section shape of fibers on the properties of the composites[D]. Beijing: Beijing Institute of Fashion Technology, 2010.
- [10] 石宝.玻璃纤维经编针织物复合材料能量吸收性能研究[D].石家庄:河北科技大学,2012.
Shi Bao. Study on the energy-absorption properties of glass-fiber warp-knitted fabric reinforced composites[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2012.
- [11] Vaidya U K, Abraham A, Bhide S. Affordable processing of thick section and integral multi-functional composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(8):1133-1142.
- [12] Sreekumar P A, Joseph K, Unnikrishnan G, et al. A comparative study on mechanical properties of sisal leaf fibre reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(3):453-461.

浙江台州将建成亚洲最大聚乳酸生产基地

海正集团下属的浙江海诺尔生物材料有限公司年产5万t聚乳酸树脂及制品工程项目近日在台州湾循环经济产业集聚区正式开工建设。据悉,该项目总投资9.5亿元,占地面积313亩,建设期18个月,投产后可形成年均销售额16.5亿元,年均利税4亿元,将成为亚洲最大的聚乳酸生产基地。据称,在技术研发上,海正已打通了乳酸发酵、催化技

术、连续反应、聚合技术等整个聚乳酸产业链,拥有14项国家发明专利。目前,海正的聚乳酸在国际上与巴斯夫等知名企业结成了战略伙伴。“此次5万t聚乳酸项目的开工,宣告海正生物材料产业在台州真正落地,这是海正集团从生物医药延伸拓展到生物材料的一个重要里程碑。”海正集团有限公司党委书记、海正生物材料股份有限公司董事长白骅在开工典礼上表示。
(工程塑料网)