

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.11.011

三维机织间隔复合材料结构对其力学性能的影响^{*}

王梦远,曹海建,钱坤,张建民

(江南大学,生态纺织教育部重点实验室,江苏无锡 214122)

摘要:以玻璃纤维为原料,设计 3 种不同结构的三维机织间隔织物,采用手糊成型工艺制备三维机织间隔复合材料,研究了其在压缩、剪切、弯曲等载荷作用下的力学特性,并分析了材料结构对其力学性能的影响。结果表明,相同高度(20 mm)、相同间隔(30 mm)的 3 种三维机织间隔复合材料的压缩强度和剪切强度均表现为:三维纤维间隔复合材料 < “X”型间隔复合材料 < 三维织物间隔复合材料,其压缩强度分别为 0.52, 0.72, 1.66 MPa, 剪切强度分别为 0.22, 0.28, 0.36 MPa; 3 种三维机织间隔复合材料的弯曲强度基本相同,均为 4.30 MPa 左右。

关键词:三维机织间隔复合材料;结构设计;压缩性能;剪切性能;弯曲性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)11-0053-06

Effect of Structure of Three Dimensional Woven Distance Composites on Mechanical Properties

Wang Mengyuan, Cao Haijian, Qian Kun, Zhang Jianmin

(Key Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract : Glass fibers were used as raw material, three different structure of three dimensional woven distance fabrics were designed and three dimensional woven distance composites were fabricated through the hand lay-up process. The compression, shear and flexure properties of the composites were studied, and the effect of the material structures on the mechanical properties were mainly analyzed too. The results show that the sequence of the compressive strengths and shear strengths of three kinds of the composites with the same height(20 mm) and same distance(30 mm) is : three dimensional fiber distance composite < “X” shaped distance composite < three dimensional fabric composite, the compressive strengths of the composites are 0.52, 0.72, 1.66 MPa, respectively , the shear strength are 0.22, 0.28, 0.36 MPa, respectively. The flexural strengths of three dimensional woven distance composites are basically the same(about 4.30 MPa).

Keywords : three dimensional woven distance composite ; structure design ; compression property ; shear property ; flexure property

三维机织间隔复合材料是一种新型的轻质夹层材料,预制件为三维机织间隔织物,织物的上下表面层与中间的芯材整体交织联结在一起^[1]。这种材料具有高强度、高弹性模量、隔热、耐压、抗冲击性好、整体性能优异等特点,近年来在航空航天以及交通业中的应用越来越广泛^[2-3]。

Li Min 等^[4]成功制备了一种三维间隔复合材料,研究了芯材高度、芯材密度和芯材结构对材料力学性能的影响。结果证明,该材料能够满足大多数结构材料的要求,但是只对一种结构的材料进行了研究,并没有进行多种结构的材料之间的对比;薛志鹏等^[5]选取 5 种不同倾角的三维间隔复合材料进行平压性能测试,结果表明,材料的抗压性能和弹性模量均随芯材倾角的减小而减小,且当倾角小于 $(70 \pm 3)^\circ$ 时,材料的抗压性能大幅度下降,但是并没

有对材料的剪切、弯曲等力学性能进行研究;曹海建等^[6]利用有限元软件 Ansys 建立三维机织间隔复合材料的结构模型,对材料的压缩性能进行分析,结果表明,材料的压缩性能随着芯材密度、弹性模量的增加而提高,随着芯材高度的增加而下降,但是没有涉及材料结构对力学性能的影响;祝成炎等^[7]利用真空辅助成型工艺制备 3 种典型的三维间隔复合材料,讨论了三维间隔织物中树脂胶液流动过程及气泡形成原因。研究结果表明,研制的材料板材保持了间隔织物原有的孔形结构、形状以及较好的力

^{*} 国家自然科学基金(51302110),江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013015-31)

联系人:曹海建,副研究员,研究方向为复合材料的制备及性能研究

收稿日期:2014-08-22

学性能,但是并没有对材料的力学性能进行深入研究。

笔者设计了3种不同结构的三维机织间隔织物,分别是三维纤维间隔织物、“X”型间隔织物及三维织物间隔织物。以玻璃纤维为原料,在SGA598型全自动剑杆织样机上进行织造,以环氧树脂(E-51)为基体,使用9055型固化剂,采用手糊成型工艺制备三维机织间隔复合材料,分别对这3种复合材料的压缩性能、剪切性能、弯曲性能进行了分析,研究了材料结构对其力学性能的影响,并进行了对比分析,为进一步研究三维机织间隔复合材料的结构与力学性能奠定基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

无碱玻璃纤维:线密度为2400 tex,泰山玻璃纤维有限公司;

环氧树脂:E-51,南通星辰合成材料有限公司;

固化剂:9055,蓝星化工无锡树脂厂;

洁模剂:CX-500,北京科拉斯科技有限公司常州分公司;

脱模剂:XTEND 807,北京科拉斯科技有限公司常州分公司。

1.2 主要仪器与设备

电子万能试验机:Instron 3385H型,美国英斯特朗公司;

全自动剑杆织样机:SGA598型,江阴市通源纺织有限公司;

电热鼓风干燥箱:101A-4S型,南京沃环科技实业有限公司;

电子精密天平:JA2003型,上海菁海仪器有限公司;

恒速搅拌器:S212型,上海申顺生物科技有限公司。

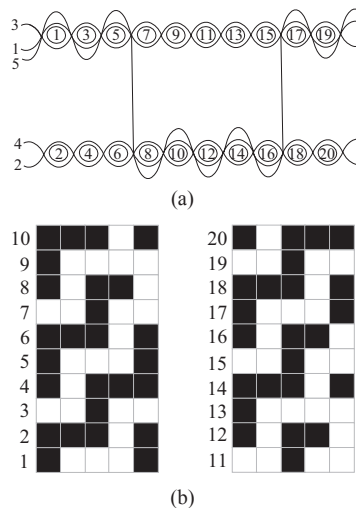
1.3 三维机织间隔复合材料的设计

(1) 三维纤维间隔复合材料的设计。

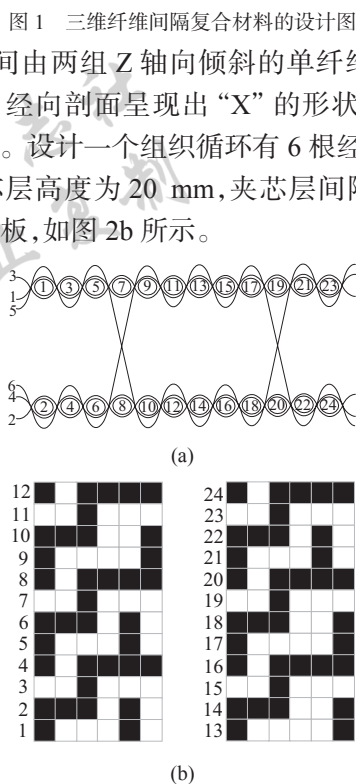
三维纤维间隔复合材料(3D纤维间隔复合材料)是指在两个平行的织物平面结构之间由一组垂向单纤维连接的三维机织物,其结构如图1a所示。设计一个组织循环有5根经纱与20根纬纱,夹芯层高度为20 mm,夹芯层间隔为5根纬纱,其上机纹板图如图1b所示。

(2) “X”型间隔复合材料的设计。

“X”型间隔复合材料是指在两个平行的织物平



a—结构;b—上机纹板图



a—结构;b—上机纹板图

图2 “X”型间隔复合材料的设计图

面结构之间由两组Z轴向倾斜的单纤维连接的三维机织物,经向剖面呈现出“X”的形状,其结构如图2a所示。设计一个组织循环有6根经纱与24根纬纱,夹芯层高度为20 mm,夹芯层间隔为5根纬纱,上机纹板,如图2b所示。

(3) 三维织物间隔复合材料的设计。

三维织物间隔复合材料是指在两个平行的织物平面结构之间由一组垂向机织物连接的三维机织物,其结构如图3a所示。设计一个组织循环有6根经纱与30根纬纱,夹芯层高度为20 mm,夹芯层间隔为5根纬纱,上机纹板图如图3b所示。

1.4 三维机织间隔复合材料的制备

织造过程:采用2个系统的经纱,一个是上下面板层经纱,另一个是垂向经纱;穿综方法采用顺

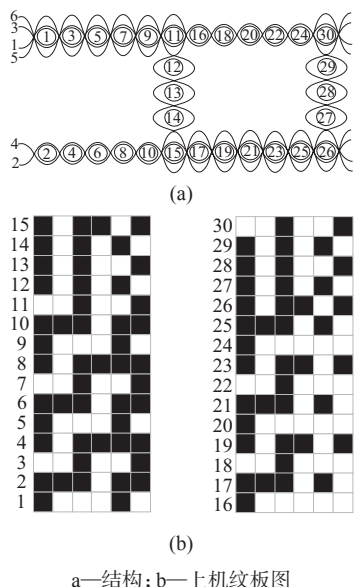


图3 三维机织间隔复合材料的设计图

穿法,穿箱方法采用一箱一穿法(箱号为公制20#);将三维机织间隔织物的纹板图输入到织样机电脑中,分别在全自动剑杆织样机上完成织造。

复合过程:将环氧树脂E-51与9055型固化剂以2:1的比例,在恒速搅拌器的作用下均匀混合,得到树脂胶液;在模具上涂覆脱模剂,将1/3的树脂胶液倾倒在模具上,并将织物平铺于附着胶液的区域;将剩余的2/3树脂胶液均匀缓慢地倾倒在织物上表面,并用刷子涂刷均匀;将涂覆好的织物与模具一起放入电热鼓风干燥箱中,设定温度为80℃,烘干时间为8h,得到三维机织间隔复合材料,并按力学性能测试标准切割成标准试样。

1.5 性能测试

(1) 压缩性能。

三维机织间隔复合材料的压缩性能按照GB/T 1453-2005测试。测试试样尺寸为60 mm×60 mm×20 mm,测试加载速度为2 mm/min。压缩强度按式(1)进行计算:

$$\sigma_c = \frac{P_1}{S} \quad (1)$$

式中: σ_c ——压缩强度,MPa;

P_1 ——破坏载荷,N;

S ——试样横截面面积,mm²。

(2) 剪切性能。

三维机织间隔复合材料的剪切性能按照JC/T 773-2010测试,采用短梁法测定层间剪切强度。试样尺寸为100 mm×50 mm×20 mm,测试加载速度为1 mm/min,下夹头跨距为10 mm。剪切强度

按式(2)进行计算:

$$\tau_s = \frac{3}{4} \times \frac{P_2}{bh} \quad (2)$$

式中: τ_s ——剪切强度,MPa;

P_2 ——破坏载荷,N;

b ——试样宽度,mm;

h ——试样厚度,mm。

(3) 弯曲性能。

三维机织间隔复合材料的弯曲性能按照GB/T 1456-2005进行测试。试样为长方形,其尺寸为100 mm×30 mm,测试加载速度为2 mm/min,下夹头跨距为60 mm。弯曲强度按式(3)进行计算:

$$\sigma_b = \frac{P_3 l}{4bh_1(h-h_1)} \quad (3)$$

式中: σ_b ——弯曲强度,MPa;

P_3 ——跨中载荷,N;

l ——跨距,mm;

b ——试样宽度,mm;

h_1 ——试样面板厚度,mm;

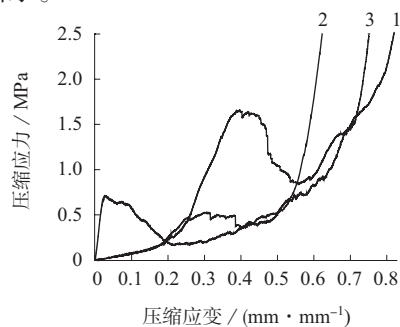
h ——试样厚度,mm。

2 结果与讨论

2.1 压缩性能

(1) 压缩特性。

三维机织间隔复合材料压缩应力-应变曲线图如图4所示。



材料结构:1—三维纤维间隔;2—“X”型间隔;3—三维织物间隔

图4 三维机织间隔复合材料的压缩应力-应变曲线

在试验机加载的初始阶段,复合材料的压缩应力随着压缩载荷的增加呈线性增加,并慢慢达到最大值;随后,继续增加压缩载荷,复合材料发生破坏,压缩应力开始缓慢下降,其中三维纤维间隔复合材料与“X”型间隔复合材料的破坏均表现为上面板层树脂基体的开裂和垂向单纤维的脆断,而三维织物间隔复合材料的破坏表现为上面板层树脂基体的开裂和垂向机织物的倾斜倒塌;最后,随着压缩载

荷的进一步增加,夹芯层(纤维或机织物)被完全压塌,上面板层与下面板层叠加,复合材料的压缩应力急剧上升。

(2) 材料结构对压缩性能的影响。

三维机织间隔复合材料的压缩强度对比图如图5所示。

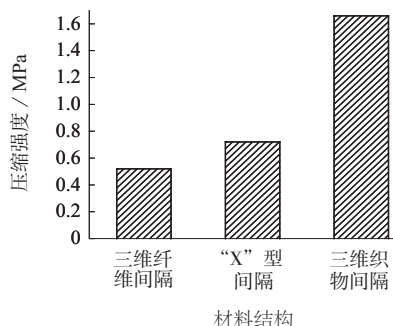


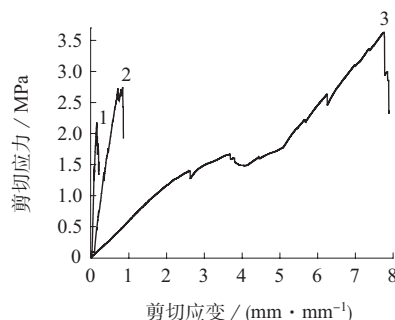
图5 三维机织间隔复合材料的压缩强度

由图5可知,三维纤维间隔、“X”型间隔和三维织物间隔复合材料的压缩强度分别为0.52,0.72,1.66 MPa。三维机织间隔复合材料的压缩强度表现为:三维纤维间隔复合材料<“X”型间隔复合材料<三维织物间隔复合材料。这是因为材料的压缩强度主要取决于材料的结构:(1)三维纤维间隔复合材料由一组垂向纤维连接,材料的上下面板层采用平纹组织,同时上下面板层由单根纤维进行支撑,测试时受到平压载荷的作用,上下面板层的树脂基体产生一定的开裂,单根的垂向纤维则很容易发生脆断而使材料整体被压塌破坏,故压缩强度最低;(2)“X”型间隔复合材料由两组Z轴向倾斜的单纤维连接,一组由上面板层穿插到下面板层,另一组由下面板层穿插到上面板层,经向剖面呈现出交叉的“X”形状,经过树脂基体复合后,“X”中间的交叉点会产生一定的协同效应,在受到平压载荷作用时能够承受较大的载荷,压缩强度居中;(3)三维织物间隔复合材料由一层组织结构为平纹的机织物连接,材料的上下面板层也是采用平纹组织,此时夹芯层机织物的经纱和纬纱交织非常紧密,经过复合成型以后,纱线与树脂基体的结合更加牢固,在受到压缩载荷时,夹芯层机织物的树脂基体产生开裂,纤维并不会快速脆断,而是表现为夹芯层机织物的缓慢倒塌,故材料的压缩强度最大^[8-9]。

2.2 剪切性能

(1) 剪切特性。

三维机织间隔复合材料剪切应力-应变曲线图如图6所示。



材料结构:1—三维纤维间隔;2—“X”型间隔;3—三维织物间隔

图6 三维机织间隔复合材料的剪切应力-应变曲线

在测试开始的初始阶段,复合材料的剪切应力随剪切载荷的增加而逐渐上升,上升的速度表现为:三维纤维间隔复合材料>“X”型间隔复合材料>三维织物间隔复合材料;随后,随着剪切载荷的继续增加,复合材料发生破坏,其剪切应力达到峰值,曲线也达到最高点,此时3种复合材料的剪切破坏均表现出上面板层与上夹头接触点产生明显裂纹,同时三维纤维间隔复合材料与“X”型间隔复合材料的夹芯层纤维出现部分脆断,而三维织物间隔复合材料的夹芯层机织物则出现一定的倾斜;最后,随着剪切位移进一步增加,复合材料受到的载荷越来越大,材料破坏加剧,剪切应力急剧下降,其中三维织物间隔复合材料的最大剪切应变显著大于前两者。

(2) 材料结构对剪切性能的影响。

三维机织间隔复合材料的剪切强度如图7所示。

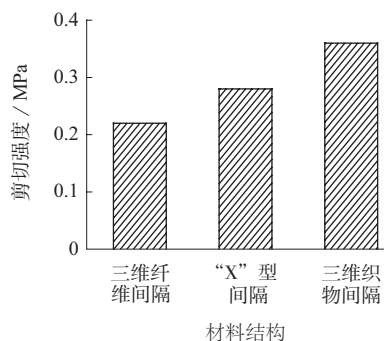


图7 三维机织间隔复合材料的剪切强度

由图7可知,三维机织间隔复合材料的剪切强度表现为:三维纤维间隔复合材料<“X”型间隔复合材料<三维织物间隔复合材料。

三维纤维间隔复合材料由一组单纤维来支撑上下面板层,在剪切载荷的作用下,单根纤维容易脆断而发生剪切破坏。由图6可知,三维纤维间隔复合材料的最大剪切应变为0.2 mm/mm,曲线上升

的斜率最大,夹芯层纤维的破坏过程最快,材料承受破坏载荷的时间最短,其剪切强度为 0.22 MPa。

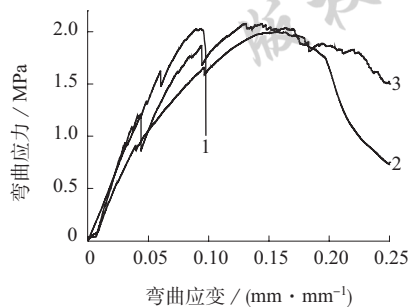
“X”型间隔复合材料由两组 Z 轴向倾斜的单纤维连接,在受到剪切载荷作用时,“X”型的交叉点会产生较大的协同效应,夹芯层纤维抵抗剪切破坏的能力有一定的提升。由图 6 可知,“X”型间隔复合材料的最大剪切应变为 0.84 mm/mm,曲线上升的斜率较大,夹芯层纤维的破坏过程较短,复合材料所能承受剪切载荷的时间较短,其剪切强度为 0.28 MPa。

三维织物间隔复合材料的夹芯层不再是单根纤维,而是机织物,并且采用平纹组织。在剪切载荷的作用下,夹芯层机织物先出现树脂开裂的现象,然后开始倒塌且倒塌的过程缓慢。由图 6 可知,三维织物间隔复合材料的最大剪切应变为 7.77 mm/mm,显著大于前两者,曲线上升的斜率最小,夹芯层的破坏过程最缓慢,材料所能承受载荷的时间最长,故三维织物间隔复合材料的剪切强度最大,为 0.36 MPa。

2.3 弯曲性能

(1) 弯曲特性。

三维机织间隔复合材料弯曲应力-应变曲线图如图 8 所示。



材料结构: 1—三维纤维间隔; 2—“X”型间隔; 3—三维织物间隔

图 8 三维机织间隔复合材料的弯曲应力-应变曲线

在测试的初始阶段,复合材料的弯曲应力随着弯曲载荷的增加而逐渐增大;继续增大弯曲载荷,复合材料开始被破坏,弯曲应力达到最大值,三维纤维间隔复合材料与“X”型间隔复合材料的破坏表现为上面板层的弯曲下塌和部分夹芯层纤维的断裂,而三维织物间隔复合材料的破坏表现为上面板层的弯曲下塌和夹芯层机织物的弯曲倒塌;随着弯曲载荷进一步增加,上夹头与上面板层的接触区域完全开裂,复合材料的弯曲应力逐渐下降,曲线出现下降的趋势。

(2) 材料结构对弯曲性能的影响。

三维机织间隔复合材料的弯曲强度如图 9 所示。

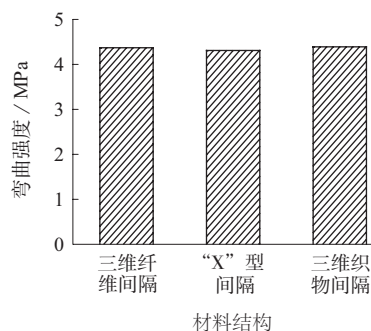


图 9 三维机织间隔复合材料的弯曲强度

由图 9 可知,三维机织间隔复合材料的弯曲强度基本相同,均为 4.30 MPa 左右。这是因为复合材料的弯曲强度主要取决于材料的惯性矩(由夹芯层的高度决定),其次取决于夹芯层的间距及面板参数:①在织造过程中,三维机织间隔织物的夹芯层高度(即上下两层经纱之间的距离)由综眼的距离决定,而同根综丝上综眼的距离固定相同,故三维机织间隔复合材料的夹芯层高度相同;②在设计过程中,3 种结构的三维机织间隔复合材料的夹芯层间隔都采用 5 根纬纱(见图 1a、图 2a、图 3a),故三维机织间隔复合材料的夹芯层间距相同;③三维机织间隔复合材料的上下面板层都采用平纹组织,织造过程中都采用线密度为 2400 tex 的无碱玻璃纤维,复合过程中都采用环氧树脂 E-51 和 9055 型固化剂,故材料的面板参数基本一致。因此,3 种结构的三维机织间隔复合材料的弯曲强度基本相同^[8-9]。

3 结论

(1) 相同高度、相同间隔的三维机织间隔复合材料的压缩强度和剪切强度均表现为:三维纤维间隔复合材料 < “X”型间隔复合材料 < 三维织物间隔复合材料,压缩强度分别为 0.52, 0.72, 1.66 MPa, 剪切强度分别为 0.22, 0.28, 0.36 MPa。

(2) 相同高度、相同间隔的三维机织间隔复合材料的弯曲强度基本相同,均为 4.30 MPa 左右。

参考文献

- [1] 周光明,钟志珊,张立泉,等. 整体中空夹层复合材料力学性能的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(1): 11-15.
Zhou Guangming, Zhong Zhishan, Zhang Liquan, et al. Experimental investigation on mechanical properties of hollow integrated sandwich composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(1): 11-15.

- [2] 姚秀冬,周叮,刘伟庆. 复合材料夹层板芯层内树脂柱对性能的影响[J]. 材料科学与工程学报,2009,27(6):937-941.
Yao Xiudong, Zhou Ding, Liu Weiqing. Effects of resinic columns on composited sandwich plates[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2009, 27(6):937-941.
- [3] 周光明,薄晓莉,匡宁. 整体中空夹层复合材料的弹性性能分析[J]. 复合材料学报,2010,27(1):185-189.
Zhou Guangming, Bo Xiaoli, Kuang Ning. Analysis of elastic property for hollow integrated sandwich composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(1):185-189.
- [4] Li Min, Wang Shaokai, Zhang Zuoguang, et al. Effect of structure on the mechanical behaviors of three-dimensional spacer fabric composites[J]. Applied Composite Materials, 2009, 16(1):1-14.
- [5] 薛志鹏,钱坤,李鸿顺. 整体中空夹层复合材料芯材倾角与平压性能关系的研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2010(6):3-5.
Xue Zhipeng, Qian Kun, Li Hongshun. The core angle of integrated hollow core sandwich composite panels with flatwise compression[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2010(6):3-5.
- [6] 曹海建,钱坤,魏取福,等. 三维整体中空复合材料压缩性能的有限元分析[J]. 复合材料学报,2011,28(1):230-234.
Cao Haijian, Qian Kun, Wei Qufu, et al. Finite element analysis of the compressive properties of 3D integrated sandwich composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(1):230-234.
- [7] 祝成炎,陈俊俊,朱俊萍,等. 三维整体夹芯织物增强复合材料的研制[J]. 纺织学报,2007,28(1):56-59.
Zhu Chengyan, Chen Junjun, Zhu Junping, et al. Development of 3-D integrated and sandwiched fabric composites[J]. Journal of Textile Research, 2007, 28(1):56-59.
- [8] 曹海建,钱坤,盛东晓,等. 芯材高度对整体中空复合材料力学性能的影响[J]. 上海纺织科技,2010,38(9):54-57.
Cao Haijian, Qian Kun, Sheng Dongxiao, et al. Influence of core height on the mechanical properties of 3D integrated hollow composites[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2010, 38(9):54-57.
- [9] 高爱君,李敏,王绍凯,等. 三维间隔连体织物复合材料力学性能[J]. 复合材料学报,2008,25(2):87-94.
Gao Aijun, Li Min, Wang Shaokai, et al. Experimental study on the mechanical characteristics of 3-D spacer fabric composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2):87-94.

2020 年全球车用塑料市值有望突破 400 亿美元

近年来,节能降耗的市场需求不断向汽车轻量化设计施加压力。为更好地适应日趋严格的市场监管条例,众多汽车零部件生产商一直在寻找环境友好型材料来取代传统塑料。受其影响,汽车用高性能热塑性塑料备受瞩目。

业内人士称,当前车用塑料行业正在历经发展高峰期。未来的高性能聚合物质量将会更加轻便,耐冲击、耐热性能也会更加强大。

知名市场研究机构 Grand View Research 日前在其发表的报告中预测,2020 年全球车用塑料市值有望突破 400 亿美元,至 415 亿美元。未来 6 年车用塑料行业需求的增长主要得益于一些严格的监管条例,如美国平均燃油经济性标准(CAFE)的出台以及新材料在研发过程中取得的一系列重大突破。

在众多不同种类的材料中,工程塑料依旧具有很强的市场竞争力。近年来,碳纤维增强型塑料以及其它一些新材料在汽车生产领域的应用范围正在不断扩大。此前,这些材料只被应用于一些高端型汽车。

市场分析师称,全球车用塑料行业“瞬息万变”。一旦有性能更加优异、质量更为轻便的环境友好型材料问世,整个车用塑料市场又会为之沸腾,然后自动淘汰一些传统塑料。

(中国色母粒网)

亚太将成全球工程塑料增长引擎

知名市场研究机构 Reportlinker 从交通运输、电子电气、消费耐用品、医疗、建筑、包装等领域对 2013 年全球工程塑料行业发展形势进行了总结,并对其未来几年的市场走势进行了预测。

该机构发表报告称,全球而言,亚太地区是当前最大的工程塑料市场。未来数年该地区有望成为推高全球工程塑料市场走势的主要驱动力。

报告主要研究成果如下:

受亚太地区日益膨胀的市场需求推动影响,全球工程塑料行业正在稳健增长。

2013 年电子电气领域是工程塑料最大的终端消费市场。随着该市场对工程塑料需求力度的不断加大,塑料在电子电气领域的应用日趋成熟。近年来,亚太地区中小型电子电气生产企业对工程塑料的市场需求日渐增长。

2014~2020 年,聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)以及聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)有望成为全球最受欢迎的工程塑料产品。

尽管当前丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)是全球应用最为广泛的工程塑料,然而因其被高度商业化,预计未来几年该塑料市场需求或将有所下降。

在不远的将来,交通运输有望赶超电子电气一跃成为最大的工程塑料应用市场。随着“以塑代钢”热潮的不断推进,高性能工程塑料在这一领域中的应用不断扩大。

近年来,轻量化设计理念的深入人心以及节能降耗呼声的日渐高涨,使得工程塑料在汽车制造领域更受瞩目。与此同时,电动汽车的问世也为工程塑料在汽车中的应用带来了不小冲击。

作为物美价廉的材料,工程塑料对于建筑领域而言不可或缺。从门窗、管道到屋顶、横梁,工程塑料在房屋建筑中起着重要的作用。受亚太各国建筑行业逐渐复苏的影响,该地区对工程塑料的需求日益增加。
(中国聚合物网)