

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.04.009

泡沫夹芯结构复合材料 VARI 工艺模拟研究

魏俊伟, 成天健, 郭万涛

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南洛阳 471023)

摘要: 提出了一种简单方便的等效建模法, 解决了大尺寸夹芯结构或复杂形状夹芯结构真空辅助树脂灌注 (VARI) 成型工艺模拟仿真计算量大, 效率不高的难题。采用等效建模法和细化建模法对矩形泡沫夹芯结构复合材料平板的 VARI 工艺进行了模拟仿真分析, 并结合工艺成型实验进行了验证。结果表明, 由两种方法计算得到的理论充模时间与实测树脂充模时间基本一致, 采用等效建模法所得树脂流动前锋位置曲线与工艺成型实验测试值更加吻合。

关键词: 真空辅助树脂灌注成型; 泡沫夹芯结构; 复合材料; 等效建模; 细化建模

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2012)04-0033-06

Study of Foam Sandwich Structural Composites VARI Process Simulation

Wei Junwei, Cheng Tianjian, Guo Wantao

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: A simple and convenient equivalent modeling method was proposed to solve the difficulty in modeling, and large and inefficient simulation calculation of Vacuum-Assisted Resin Infusion (VARI) process molding simulation of big size sandwich structure composites or sandwich composites of complex shapes. VARI process molding simulation had been carried out for a rectangular plate of foam sandwich structural composite, with two methods of equivalent modeling and refined modeling, verified by the molding experiment. The results showed that the theoretical resin filling time obtained from these two methods varied slightly to the filling time measured in the molding experiments. The curve of resin flow forward position got from equivalent modeling was more consistent to the test value in the actual process molding.

Keywords: Vacuum-Assisted Resin Infusion; foam sandwich structures; composites; equivalent modeling; refined modeling

真空辅助树脂灌注成型 (VARI) 是一种新型的低成本纤维增强塑料 (FRP) 大型制件的成型技术, 该成型工艺的出现打破了长久以来高性能复合材料制造成本高的惯例, 为高性能复合材料开辟了广阔的应用领域^[1]。

泡沫夹芯结构复合材料是指由高强度、高模量的面板和中间的轻质芯材复合而成, 芯材对外壳的分隔增大了结构的惯性矩, 而质量几乎没增加, 得到一个抗弯曲和屈曲载荷的有效结构。泡沫芯材是渗透率很小的材料, 采用真空辅助工艺成型时, 为了加快树脂渗透, 缩短树脂充模时间, 需要在泡沫上开槽。但开槽的布置方式和尺寸、间距等的确定如果仅靠经验和试验, 不仅浪费财力物力, 还会延长制品试制周期, 对于大型构件来说尤其如此。因此, 真空辅助成型工艺的模拟仿真才越来越受到人们重视。

采用计算机对真空辅助成型工艺的充模过程进行仿真模拟, 可以以较低成本、在很短时间内得到

整个真空辅助成型工艺过程具有指导意义的数 据, 有利于合理设置芯材结构、优化工艺参数, 从而获得优良品质的泡沫夹芯结构复合材料制品^[2-4]。但对于大型夹芯结构件或者复杂形状夹芯结构件的模拟, 如果按照实际结构进行建模不但非常复杂, 费时费力, 而且模拟计算时计算量大, 计算周期也比较长。

由此, 笔者提出了一种简单方便的等效建模方法, 并将其仿真计算结果与细化建模的仿真计算结果进行了对比, 结合成型实验进行了实验验证。

1 数学模型^[5-7]

在对真空辅助成型工艺进行模拟时做如下假设:

①纤维增强材料为刚性体, 树脂为不可压缩牛顿流体;

联系人: 魏俊伟, 硕士, 主要从事树脂基复合材料及其仿真研究

收稿日期: 2012-02-02

- ②固体和液体之间没有质量交换;
- ③树脂充模过程中无化学反应,是物理过程;
- ④忽略惯性力和表面张力的影响;
- ⑤树脂充模过程是由一系列稳态流动组成。

在真空辅助成型工艺过程中,树脂在模腔内的流动视为牛顿流体在多孔介质中的流动,可以采用 Darcy 定律来分析这种流动,即:

$$V = -\frac{K}{\eta} \Delta P \quad (1)$$

式中: V ——渗流速度;

K ——渗透系数;

ΔP ——压力差;

η ——流体的黏度系数。

在上述边界条件下, Darcy 定律可写为如下形式:

$$V = -\frac{k}{\eta} (\Delta P - \rho g) \quad (2)$$

对于不可压缩流体,连续方程可简写成如下形式:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

在入口处边界或是恒压或是恒速,所以在 x 方向的流动方程可写为:

$$Q = \int_0^h \int_0^w K_x (-dP/dx) dy dz \quad (4)$$

式中: Q ——体积流量;

K_x —— x 方向的一维表观渗透率;

h ——纤维织物的厚度;

w ——纤维织物的宽度。

如果流体的不均匀性可以忽略,则上式可写为:

$$Q = -K_x A (\Delta P / \Delta x) / \eta \quad (5)$$

式中: A ——试样垂直于流动方向的横截面积。

2 三维模型的建立及网格划分

2.1 模型描述、材料和工艺参数设置

模拟计算用模型为矩形泡沫夹芯结构复合材料平板,铺层结构为:最上层铺设单层导流布,上、下层各为 25 层高强 S 玻璃纤维布,中间夹芯层为聚氯乙烯泡沫板。聚氯乙烯泡沫芯材底部单向开槽。灌注方式采用一端面(沿宽度方向)和中间(735 mm 处)加注胶管两段连续注胶,另一端面抽真空。

模拟和成型实验选用 A 型乙烯基树脂,材料参数及工艺参数设置如表 1 所示。

表 1 材料及工艺参数

材料及工艺参数	参数值
模型尺寸 / mm	1470 × 730 × 50.3
上、下层增强材料厚度 / mm	5
导流布尺寸 / mm	1450 × 730 × 0.3
聚氯乙烯泡沫芯材尺寸 / mm	1450 × 730 × 40
增强材料渗透率 / m ²	$K_1=K_2=2.20 \times 10^{-11}$, $K_3=2.49 \times 10^{-13}$
导流布渗透率 / m ²	$K_1=K_2=2.02 \times 10^{-9}$, $K_3=2.02 \times 10^{-11}$
树脂黏度 η / mPa · s	240
纤维织物孔隙率 ϕ	0.4784
真空压力差值 ΔP / Pa	1.01×10^5

注: K_1 、 K_2 、 K_3 即 K_x 、 K_y 、 K_z , 为 x 、 y 、 z 方向的一维表观渗透率。

2.2 建立模型

首先在 UGNX6.0 中建立 3D 实体模型,如图 1 所示;然后采用 Visual-mesh 进行三角形单元网格划分,建立有限元网格模型,如图 2 所示。

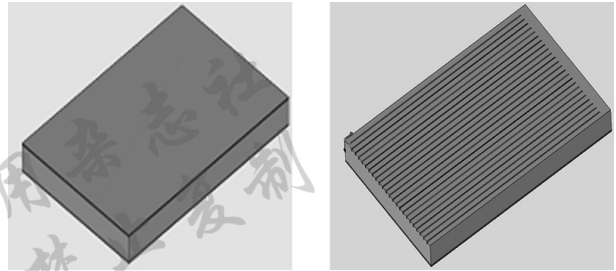


图 1 矩形泡沫夹芯结构复合材料三维实体模型

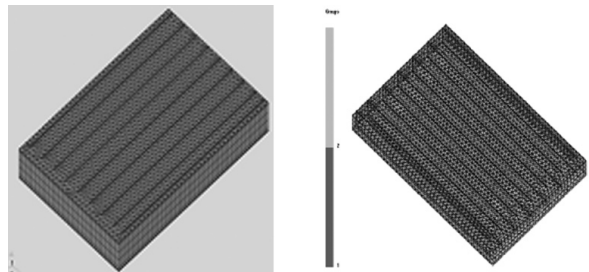


图 2 矩形泡沫夹芯结构复合材料三维有限元网格模型

3 VARI 工艺模拟仿真计算与成型实验验证

3.1 VARI 工艺成型实验

在表 1 所述工艺条件下,对泡沫夹芯结构平板进行真空辅助成型工艺实验,灌注前制品真空辅助成型工艺封装后的外观如图 3 所示。实验测得树脂充模时间(t)约为 2400 s,在实验中记录表层和底层树脂流动前锋位置(x),记录图如图 4 所示,记录表见表 2。

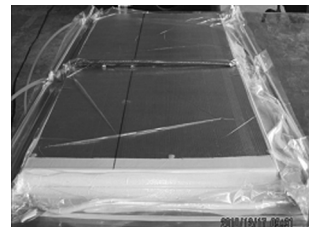


图 3 制品 VARI 成型封装图



图4 树脂流动前锋位置 χ 记录图

表2 VARI 工艺成型过程中表层和底层树脂的 χ

t/s	表层树脂 χ/mm	底层树脂 χ/mm	t/s	表层树脂 χ/mm	底层树脂 χ/mm
30	110	15	1020	785	807
60	170	40	1080	810	845
120	250	94	1140	835	870
180	307	195	1200	852	895
240	361	283	1260	910	934
300	405	335	1320	990	965
360	450	385	1380	1060	990
420	485	425	1440	1115	1030
480	524	460	1500	1175	1065
540	558	505	1560	1225	1090
600	590	550	1620	1267	1111
660	612	585	1680	1315	1140
720	655	625	1740	1345	1170
780	683	670	1800	1380	1205
840	712	705	1860	1420	1245
900	740	740	1920	1430	1300
960	765	778			

表层和底层树脂 χ 的平方对 t 作图,得 $\chi^2 \sim t$ 曲线,如图5和6所示。

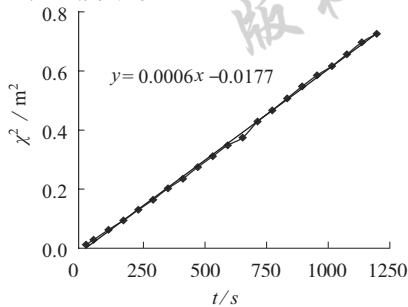


图5 表层树脂的 $\chi^2 \sim t$ 关系曲线

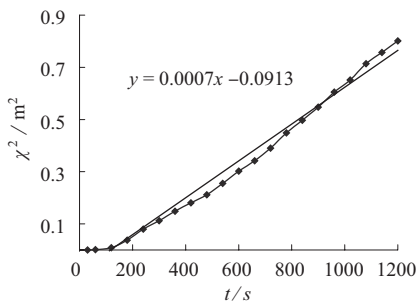


图6 底层树脂的 $\chi^2 \sim t$ 关系曲线

对曲线进行线性拟合,拟合直线的斜率分别为 $k=0.0006$ 和 $k=0.0007$,由 Darcy 定律公式的变形

$$k = \frac{x^2 \eta \phi}{2pt} \quad (6)$$

计算可得一维表层等效渗透率 $3.41 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, 底层等效渗透率为 $3.98 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。

3.2 VARI 工艺模拟仿真计算

由于结构件尺寸较大,如果采用常用的建模方法,不但建模复杂,而且计算量会很大,计算周期也比较长,故提出一种新的等效建模方法,并将等效建模和细化建模方法所得到的模拟结果与成型实验结果进行对比。这两种建模方法如下:

①等效建模法,模型铺层结构共分为三层,即将上层纤维布与导流布视为一部分,中间泡沫芯材部分为又一部分,下层纤维布(考虑沟槽部分的影响)视为第三部分,在成型试验中测得上层部分和下层部分的渗透率参数,并输入模拟体进行模拟计算。

②细化建模法,即导流布和沟槽都作为独立的部分进行考虑。模型铺层结构共分为四层,由上至下,最上面一层为导流布,第二层和最下层为纤维布增强材料,中间层为 PVC 泡沫芯材,在芯材底部开槽,分别输入各部分渗透率参数进行仿真计算。

(1) 等效建模法

对结构件 CAD 模型进行三角形网格划分,单元格尺寸为 20 mm。有限元网格模型及区域设置如图7所示,其中, zone1 和 zone21 为纤维布增强材料, zone11 为泡沫芯材。注胶管路和真空管路布置如图8所示。

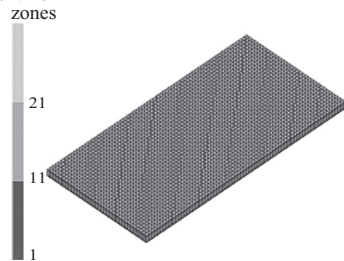


图7 等效建模时的网格模型及区域设置

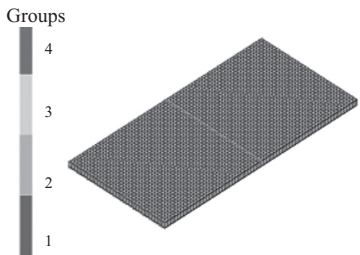


图8 等效建模时的注胶管路和真空管路布置

共设置三根注胶管(Group1, Group2, Group4), 一根出胶管(Group3)。开始注胶时,打开注胶管 Group1 和 Group4,当树脂前锋达到中间注胶管位

置时,打开中间注胶管 Group2,同时关闭 Group1 进行两段连续注胶,与实际成型试验操作方式相同。

上层纤维布与导流布的等效渗透率为实验测得的表层等效渗透率 $K_1=K_2=3.41 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, $K_3=3.41 \times 10^{-12} \text{ m}^2$; 中间泡沫芯材部分渗透率很小,可以忽略不计; 下层纤维布(考虑沟槽部分的影响)的等效渗透率为实验测得的底层渗透率 $K_1=K_2=3.98 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, $K_3=3.98 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 。

根据模拟仿真后的计算结果,得到等效建模时的理论树脂充模时间为 2 172 s,如图 9 所示; 树脂充满时刻的压力分布如图 10 所示。

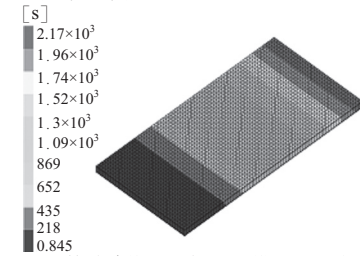


图 9 等效建模时的树脂充模时间分布

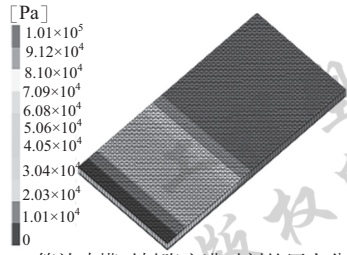


图 10 等效建模时树脂充满时刻的压力分布

模拟实验中,计算得等效建模时表层和底层树脂的 χ ,如表 3 所示。

表 3 等效建模时表层和底层树脂的 χ

$t /$ s	表层树脂 χ / mm	底层树脂 χ / mm	$t /$ s	表层树脂 χ / mm	底层树脂 χ / mm
203	337	360	1 137	778	824
267	382	410	1 139	802	838
342	428	460	1 146	836	858
409	468	504	1 168	890	902
495	510	550	1 204	950	958
596	558	602	1 278	1 032	1 042
679	596	641	1 724	1 317	1 342
792	642	690	1 832	1 362	1 397
923	692	744	1 938	1 408	1 447
1 037	730	783	2 041	1 435	1 470

(2) 细化建模法

对结构件 CAD 模型进行三角形网格划分,单元格大小为 10 mm,沟槽部分单元格大小为 5 mm。有限元网格模型如图 11 所示,其中, zone1 和 zone31 为纤维布增强材料, zone11 为沟槽部分, zone21 为泡沫芯材, zone41 为导流布。注胶管路和真空管路布置如图 12 所示,注胶方式与等

效建模时的注胶方式相同。导流布和纤维布渗透率值采用表 1 中的数据,沟槽部分渗透率值为 $K_1=K_2=K_3=4.25 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ 。

根据模拟后的计算结果,得到细化建模时的理论树脂充模时间为 2 780 s,如图 13 所示; 树脂充满时刻的压力分布如图 14 所示。

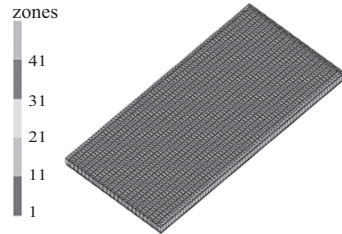


图 11 细化建模时的有限元网格模型

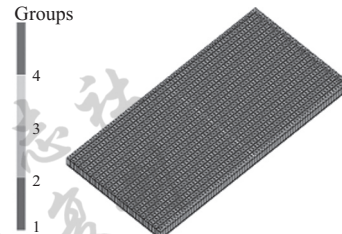


图 12 细化建模时的注胶管路和真空管路布置

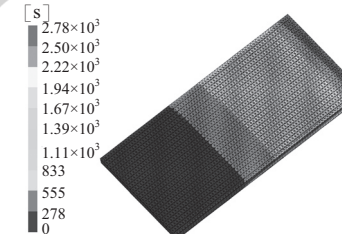


图 13 细化建模时的树脂充模时间分布

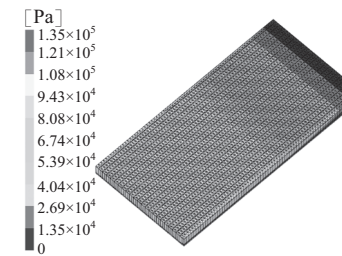


图 14 细化建模时树脂充满时刻的压力分布

模拟仿真计算得到细化建模时表层和底层树脂 χ ,如表 4 所示。

表 4 细化建模时表层和底层树脂的 χ

$t /$ s	表层树脂 χ / mm	底层树脂 χ / mm	$t /$ s	表层树脂 χ / mm	底层树脂 χ / mm
6	80	82	576	902	806
36	192	200	658	1 092	886
66	262	274	716	1 176	924
127	364	384	821	1 310	1 040
225	488	502	918	1 400	1 062
295	556	580	1 014	1 470	1 120
384	636	660	1 090	1 470	1 150
449	682	722			

3.3 VARI 工艺模拟仿真及成型实验结果分析

将成型实验中测得表层和底层树脂 χ (见表 2)、等效建模及细化建模时表层和底层树脂 χ (见表 3 和表 4) 等分别对 t 作图,得到表层和底层树脂 χ 随 t 变化曲线,如图 15 和图 16 所示。

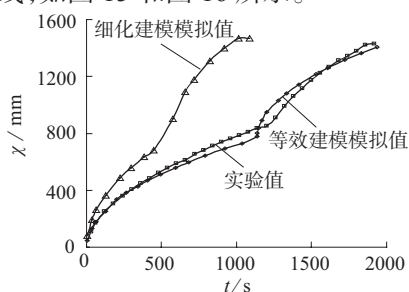


图 15 表层树脂流动前锋位置 χ 随 t 变化曲线

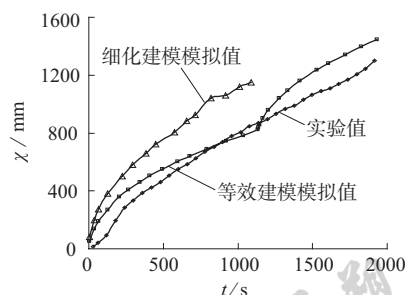
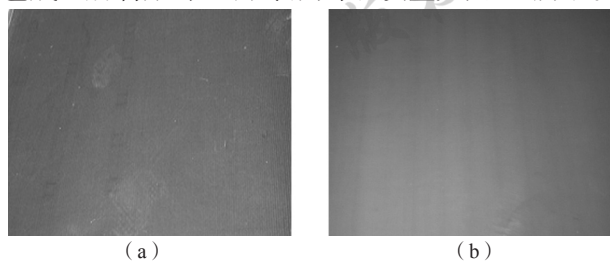


图 16 底层树脂流动前锋位置 χ 随 t 变化曲线

矩形泡沫夹芯结构复合材料平板真空辅助工艺成型后制品的上、下表面外观质量如图 17 所示。



(a) (b)

a—上表面外观; b—下表面外观

图 17 制品上、下表面外观

由图 9 和图 13 的树脂充模时间分布图可知,等效建模时理论树脂充模时间为 2 172 s,细化建模时理论树脂充模时间为 2 780 s,成型试验中测得实际充模时间为 2 400 s,实验结果与模拟结果相差不大。原因可能有以下两个方面:

(1) 等效建模时,上层纤维增强材料采用的渗透率为等效渗透率值,即上层纤维布加导流布作为一个整体时的渗透率值,但忽略了导流布长度的影响,而在实际的成型试验操作中导流布未铺满整个平板,平板长度为 1 470 mm,导流布长度为 1 450 mm,一是为了防止树脂在末端直接被抽出,二是为了防止树脂充模速度过快,导致浸渍不均匀,

产生干斑或者孔隙等缺陷。在无导流布的部分,树脂流动相当缓慢。成型实验时测得在没有导流布的部分树脂流动 20 mm 约用时 270 s,故等效建模时充模时间比实测充模时间略短。

(2) 细化建模时,考虑了导流布长度的影响,计算结果较实际充模时间略长,存在一定的误差,这是由于计算模型本身、输入的黏度值及渗透率值等参数存在误差所造成的。

由图 15 和图 16 树脂流动前锋曲线可知,细化建模时,树脂流动前锋曲线与实测值偏差较大,主要是因为模拟实验中,上层树脂流动前锋曲线是树脂在表层导流布中的位置,下层树脂前锋位置的记录由于沟槽部分的存在,记录位置也为沟槽部分前锋位置,树脂在纤维增强材料中的前锋位置偏差较大。等效建模时,树脂前锋位置曲线与实测值吻合较好,主要是由于将表层导流布和纤维布等效为一个整体,记录树脂流动前锋位置与成型实验测试比较接近,下层纤维增强材料渗透率将导流槽的影响考虑在内,作为一个整体计算其渗透率,测试前锋曲线也与实际测试相类似,故模拟中所测前锋位置曲线与实验值比较接近。

由图 17 制品上、下表面外观图可以看出,制品表面无明显的干斑、空隙等缺陷,尤其是下表面光洁度高,外观质量好,充分说明开槽方式及尺寸满足要求,适合此夹芯结构复合材料平板工艺成型。

4 结论

采用等效建模和细化建模两种方法对矩形泡沫夹芯结构复合材料平板的 VARI 成型工艺进行了模拟仿真计算,并结合真空辅助成型实验进行了试验验证。结果表明,等效建模法所得理论充模时间与细化建模法所得结果以及成型实验实测树脂充模时间相差不大,采用等效建模方法时的树脂流动前锋位置曲线与工艺成型实验测试值更加吻合。

采用等效建模法既能简化模型,方便计算,提高了工作效率,又能满足仿真计算要求,对于大尺寸夹芯结构及复杂形状夹芯结构复合材料的 VARI 工艺模拟仿真计算是一种很好的方法。

参考文献

- [1] 赵渠森,赵攀峰. 真空辅助成型工艺(VARI)研究[J]. 纤维复合材料, 2002, 42(1): 42-46.
- [2] 吴林志, 泮世东. 夹芯结构的设计及制备现状[J]. 中国材料进展, 2009, 28(4): 40-45.
- [3] 颜鸿斌, 孙红卫, 凌英, 等. 树脂基复合材料/泡沫塑料夹层结构

- 成型技术研究进展[J].宇航材料工艺,2004,34(1):12-15.
- [4] 秦贞明,陈以蔚,李树虎,等.复合材料夹芯泡沫开孔对树脂充模的影响分析[J].材料工程,2009(增刊2):141-146.
- [5] 张剑,李地红,李兴冀,等.复合芯材夹芯结构成型工艺研究[J].材料科学与工艺,2008,16(1):76-78.

- [6] Rudd C D, Long A C, Kendall K N. Liquid molding technologies [M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1997.
- [7] Fan H L, Meng F H, Yang W. Sandwich panels with kagome lattice cores reinforced by carbon fibers [J]. Composite Structures, 2007, 81: 533-539.

电子塑料性能逐步完善,应用领域拓宽

随着塑料在发光导电性能方面的研究不断取得进步,塑料在电子产品领域的应用范围将越来越广,并日益替代硅。

硅是重要的半导体材料,目前在电子产品领域扮演着几乎不可替代的角色,但是成本较高。塑料通常是由高分子化合物聚合而成,其溶液一般具有较大的粘滞性。随着高分子聚合物也具有自发光以及导电特性的发现,从20世纪80年代开始人们就逐渐对其进行更加深入的研究。

来自乌尔姆大学的化学家彼得·博伊尔勒介绍说,目前对高分子聚合物特性研究的进展已经帮助人们制造出很多以前通常只用硅材料制作的电子元器件。如目前用高分子聚合物制成的发光二极管,已经应用在许多手机单色显示屏以及其它一些显示设备上。由于这些材料具有自发光的特性,因此制成的新型屏幕比传统的电脑和电视的屏幕要亮100倍,所显示的图片 and 文字可以从任意角度观看,而现在的液晶显示器则对人的视角限制很大。

此外,在一些应用广泛的电子设备制造领域,如各种带有微芯片的卡片以及条形码读取设备等,高分子聚合物也逐渐开始替代硅材料。博伊尔勒说:“塑料芯片比硅芯片更加便宜,并且由于其具有可溶解的特性而更易于加工处理。此外,它们也可以作为电路和电子元器件的制造材料。”

(慧聪网)

帝人与通用汽车联合开发高级碳纤维复合材料

东京帝人有限公司与美国通用汽车公司近期签署了一项关于联合开发高级碳纤维复合材料技术的协议。该项目若成功,碳纤维将在汽车产品批量生产运用上迈出新台阶。

国际碳纤维市场原为日、美企业所垄断,日本企业占全球产能的50.5%,美国企业占27.5%。日本碳纤维在航空、体育休闲、工业三个主要市场的销售量均有大幅度提高。出口量也由1991年的57.2%增长到2010年的78.6%。根据日本碳纤维生产商协会的统计,2010年,包括东丽、东邦人造丝、三菱人造丝等企业在内的日本碳纤维制造商年销售碳纤维1.6万t,同比增长66.2%。

针对碳纤维产业,日本的技术战略图计划全面开花,在25个领域中都追加了高新技术纤维的内容,如大规模化和低成本化的碳纤维高效制造技术的开发。美国涵盖碳纤维的纤维领域创新计划是,在高新技术纤维领域有选择地重点发展几种高性能纤维和功能纤维。

两家公司的协议要求采用帝人自主研发的碳纤维增强热塑性塑料(CFRTP)技术。在汽车制造行业中,该技术尚未大规模使用。与采用热固性树脂生产碳纤维复合材料的

传统方法相比,该方法更快更有效,成型时间也更短。另外,CFRTP的热成型周期短,低于1min,因此易于批量生产。

帝人公司负责人说,“我们与通用的合作关系具有重要意义。在通用汽车零件中使用碳纤维材料,能使车身重量大幅度减轻,有利于通用汽车取得市场的主动权;其次,这有利于在汽车行业中推广使用绿色复合材料,减少污染。”

对帝人公司而言,该协议能提高他们的高级碳纤维应用的市场份额,正确调整投资组合。帝人与通用的意图很明显,即通过合作,抢占世界高级复合碳纤维市场。(中聚网)

Ten Cate 生产的复合材料用于太空望远镜

美国加利福尼亚州费尔菲尔德的Ten Cate公司生产的高性能复合材料被用于美国国家航空航天局的詹姆斯·韦伯太空望远镜(JWST)的中吊杆遮阳板部署结构。

计划2018年推出的詹姆斯·韦伯太空望远镜是一个大型的红外线望远镜,主镜的直径为6.5m,遮阳板的尺寸和网球场差不多。主镜和遮阳板不是完全打开后安装在火箭上,而是折叠起来,一旦韦伯进入外层空间才打开。

遮阳板的作用是为望远镜的主镜和仪器提供热稳定环境。遮阳板的中吊杆管利用Ten Cate公司的专利RS-3C氰酸酯基复合材料和Cetex®热塑性复合材料。

“用于遮阳板管或桅杆上的高性能复合材料的刚性是商业飞机上使用的先进复合材料的两倍多,”Ten Cate公司的产品营销总监Michael Cichon解释说,“同样重要的是,这些复合材料在太空苛刻的热循环条件下必须具有可靠性。”

(玻璃钢网)

拜耳材料科技展出医疗用聚氨酯产品

随着人类平均年龄的稳步上升,对于医疗服务的需求越来越多,拜耳材料科技医疗技术部门推出了聚氨酯原料与热塑性材料、薄膜相结合的医疗产品。在3月份德国斯图加特举办的MEDTEC欧洲贸易展上,拜耳展示了一系列从手术室设备到伤口治疗的医疗产品。

拜耳材料科技Baymedix®亲水性预聚物应用在医疗伤口敷料上,能够减少护理时间和成本。该产品的主要原材料是聚氨酯泡沫,与传统医用泡沫相比,更具有吸水性和保持性。结合Platilon®热塑性聚氨酯薄膜,透气性更好,同时能够隔离液体和病菌、污物,给伤口创造卫生的复原环境。

其中牌号为Bayblend®的M850XF产品,由聚碳酸酯、丙烯腈、丁二烯和苯乙烯材料混合而成,非常适合应用于医疗设备的外壳,如手术器械、诊断设备和药品监督管理系统,该产品具有良好的抗冲击性和韧性,同时满足ISO 10933-1和USP(美国药典)塑料VI级相容性要求。(PUWORLD)