

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.06.015

不同灌注工艺对玻璃钢层压板性能的影响

刘连学, 陆萍

(浙江恒石纤维基业有限公司, 浙江嘉兴 314500)

摘要:应用真空辅助树脂传递模塑工艺(VARTM)和真空灌注成型工艺(VIMP)制备玻纤增强塑料(GFRP)层压板,研究制样工艺对玻璃钢层压板性能的影响。利用灼烧法考察了VARTM工艺和VIMP工艺对玻璃钢层压板的玻纤含量的影响,发现VARTM工艺制得的层压板的玻纤含量均匀可控,且具有良好的重复性。并对两种制样方式得到的层压板进行了力学性能测试,包括静态力学性能和动态疲劳性能,发现VARTM工艺制得的层压板静态性能较优,而两种成型工艺对动态疲劳性能无明显影响。在实验室评估玻纤性能时,选择用VARTM工艺制作层压板能更好地得到材料的真实性能。

关键词:真空辅助树脂传递模塑工艺;真空灌注成型工艺;玻纤增强塑料层压板;玻纤含量;厚度;力学性能

中图分类号: TQ430.55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)06-0070-05

The Effect of Different Infusion Processes on Properties of GFRP Laminate

Liu Lianxue, Lu Ping

(Zhejiang Hengshi Fiberglass Fabric Co., Ltd., Jiaxing 314500, China)

Abstract: Fiberglass reinforced plastic laminates (GFRP) were fabricated using vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process and vacuum infusion molding (VIMP) process. The performances of the laminates fabricated by the above two processes were studied. The effect of VARTM process and VIMP process on the glass fiber content of GFRP laminates was investigated by means of combustion method. It is found that the glass fiber content of the laminates made by the VARTM process is uniform and controllable, and it has better repeatability and reproducibility. In addition, the effect of VARTM process and VIMP process on the mechanical properties (including static mechanical properties and dynamic fatigue properties) was studied. It is found that the laminates produced by the VARTM process have better static properties. The laminate fabricated by VARTM process shows better performance no matter in the main fiber direction and perpendicular to the main fiber direction. Moreover, the dynamic fatigue properties of two laminates don't show obvious differences. The manufacturing process does not have obvious effects on the dynamic fatigue properties. When evaluating glass fiber performance in the laboratory, the laminate fabricated by VARTM process can show the properties of the fabric more exactly.

Keywords: vacuum assisted resin transfer molding; vacuum infusion molding; GFRP laminate; fiberglass content; thickness; mechanical properties

玻璃纤维增强聚合物基复合材料(GFRP)具有成本低、纤维和基体材料体系及批量制备生产技术相对成熟的特点,占据了聚合物基复合材料用量的主导地位^[1]。目前在工程上应用最多也是最典型的复合材料主承力大型厚板构件是风力发电机组的复合材料叶片^[2]。复合材料风电叶片的生产工艺是真空灌注成型(VIMP)工艺^[3],VIMP工艺原理是在单

面刚性模具上以柔性真空袋膜包覆、密封纤维增强预成型体材料,真空负压下排除模腔中的气体,注入聚合物树脂,利用其渗透、流动实现树脂对纤维及其织物的浸渍,并在室温或加热条件下保持真空至固化成型^[4-6]。

虽然大型风电叶片采用VIMP工艺生产,但是在实验室研究玻纤增强复合材料力学性能的情况

通讯作者: 陆萍, 硕士, 工程师, 主要研究方向为风电叶片用玻璃纤维织物及其复合材料的性能 E-mail: feitianxiaozyu0@163.com

收稿日期: 2018-03-19

引用格式: 刘连学, 陆萍. 不同灌注工艺对玻璃钢层压板性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6): 70-74.

Liu Lianxue, Lu Ping. The effect of diffent infusion processes on properties of GFRP laminate[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6): 70-74.

下,只需少数层(2~8层)纤维织物进行增强,由于织物本身具有易扭曲性和 VIMP 成型工艺采用柔性真空袋膜的工艺特点,使得实验室中用 VIMP 成型的纤维增强塑料玻璃钢层压板存在厚度不均匀、玻纤含量不可控的缺点,从而导致不能准确评估纤维复合材料力学性能。

实验室中将真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺引入到玻璃钢层压板制作中,则可克服传统的 VIMP 成型工艺的缺点。

VARTM 工艺是一种新型低成本、复合材料大型制件的成型技术,它是在真空状态下排除增强纤维中的气体,利用树脂的流动、渗透实现对纤维及其织物的浸润,并在室温下固化,形成一定树脂/纤维比例的复合材料的成型工艺^[7]。由于 VARTM 是一个封闭的成型过程,因此具有较好的表面结构和外观,且制得的制品两面光滑^[8-10]。国内外对如何改善 VARTM 工艺制品质量进行了大量研究。从树脂黏度、注塑压力、浇口位置、出胶口位置、出胶口数量等工艺参数的调整可以改善 VARTM 制品的缺陷^[11-14]。VARTM 工艺在工业制造上已比较成熟,为实验室引进 VARTM 工艺进行玻璃钢层压板制样提供了良好的基础。

实验室将 VARTM 工艺引入到风电基材制备复合材料中,大大克服了传统的 VIMP 成型工艺的缺点。笔者对由传统 VIMP 工艺与 VARTM 工艺分别制得的玻璃钢层压板的厚度以及玻纤含量进行比较,并进一步研究两种工艺对玻璃钢层压板力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

玻璃纤维布:UD1200,自制;

环氧树脂:035C,瀚森化学有限公司;

固化剂:037,瀚森化学有限公司。

1.2 仪器及设备

游标卡尺:精度为 0.01 mm,上海量具刀具厂;

电热鼓风干燥箱:S.C.101-1 型,上海路达实验仪器有限公司;

箱式电阻炉:5-12 型,上海路达实验仪器有限公司;

万能材料试验机:E45.105 型,美国 MTS 公司;

疲劳试验机:370.10 型,美国 MTS 公司;

精雕机:JS6080 型,上海精率数控机床有限公司;

VARTM 模具:自制。

1.3 实验过程

(1) VARTM 工艺制作 GFRP 玻璃钢层压板。

裁取 35 cm×35 cm 的 UD1200 纤维布 4 块,按照 $[0^\circ, 90^\circ/90^\circ, 0^\circ]_2$ 的顺序叠放整齐,注意缝边线和边缘必须对齐。实验室标准环境下温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度为 $50\% \pm 10\%$,调湿 24 h。

根据目标体积分数或者目标质量分数选择合适厚度的垫片,将叠放整齐的织物转移到 VARTM 模具里,合上模具上下两部分并固定。垫片厚度 T 的选择参考以下公式:

$$T = n \times \rho_A / (\rho_F \times FVF \times 1000) \quad (1)$$

$$FVF = FWF / [FWF + (\rho_F / \rho_R) \times (1 - FWF)] \quad (2)$$

式中: n ——铺层数;

ρ_A ——织物面密度, g/cm^2 ;

ρ_F ——玻璃纤维密度, g/cm^3 ;

ρ_R ——树脂密度, g/cm^3 ;

FVF ——目标玻璃纤维体积分数, %;

FWF ——目标玻璃纤维质量分数, %。

将环氧树脂和固化剂以 100 : 28 的比例混合均匀,并用真空干燥箱排除气泡。以一定的压力将树脂灌注进模具。待织物完全浸透后,将整个 RTM 模具移至电热鼓风干燥箱内进行固化和后固化,得到 GFRP 玻璃钢层压板。

按以上相同步骤共制备 5 块玻璃钢层压板,标记为 R1~R5。

(2) VIMP 工艺制作 GFRP 玻璃钢层压板。

按照图 1 的 VIMP 工艺示意图^[15]进行 GFRP 玻璃钢层压板的制作,室温下固化后,将玻璃钢层压板移至电热鼓风干燥箱内进行固化和后固化,得到 GFRP 玻璃钢层压板。

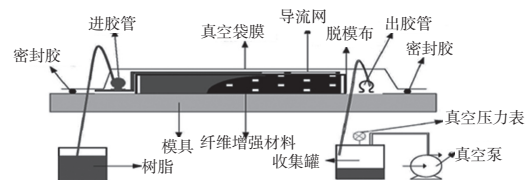


图 1 VIMP 工艺示意图

用 VIMP 工艺共制备 5 块玻璃钢层压板,标记为 V1~V5。

1.4 测试与表征

(1) 测试玻璃钢层压板 R1 和 V1 的厚度。

在玻璃钢层压板 R1 和 V1 上均匀取 10 个点,用游标卡尺测试其厚度,考察不同制样方法得到的

玻璃钢层压板的厚度情况。

(2) 测试玻璃钢层压板 R1~R5 和 V1~V5 的玻纤含量。

分别在玻璃钢层压板 R1~R5 和 V1~V5 的相同位置切割约 3 g 的样品进行玻纤含量测试,考察不同制样方法得到的玻璃钢层压板的玻纤含量的均匀性、重复性和再现性。

(3) 测试玻璃钢层压板的力学性能。

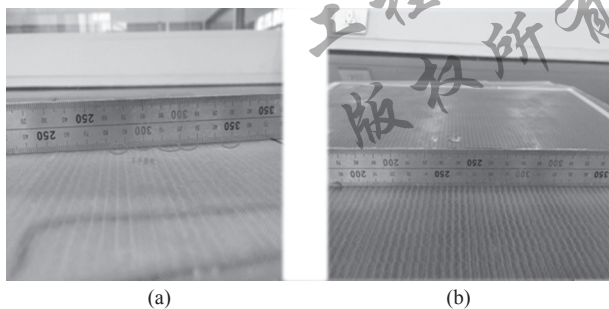
按照 ISO527-5-1997 的要求,将玻璃钢层压板 R1, R2 和 V1, V2 切割成标准样条,分别进行 0° 拉伸和 90° 拉伸测试,考察不同制样方法得到的玻璃钢层压板的拉伸性能。

用精雕机雕刻哑铃型疲劳样条,根据 ISO 13003-2003 测试玻璃钢层压板 R3 和 V3 的疲劳性能。

2 结果与讨论

2.1 灌注工艺对玻璃钢层压板厚度的影响

当后固化完成后脱膜得到玻璃钢层压板,图 2 为 VIMP 以及 VARTM 制得的玻璃钢层压板。在 R1 和 V1 两块玻璃钢层压板上分别取 10 个点,用游标卡尺测量其厚度,数据列于表 1。



a—VIMP; b—VARTM

图 2 VIMP 和 VARTM 制得的玻璃钢层压板

表 1 不同灌注工艺玻璃钢层压板的厚度

序号	玻璃钢层压板 R1 厚度/mm	玻璃钢层压板 V1 厚度/mm
1	3.45	3.51
2	3.45	3.51
3	3.46	3.51
4	3.45	3.43
5	3.45	3.45
6	3.45	3.48
7	3.46	3.50
8	3.45	3.43
9	3.45	3.58
10	3.44	3.43
变异系数 CV/%	0.016	1.40

由表 1 和图 2 可见,用 VARTM 工艺灌注得到的玻璃钢层压板厚度均匀性比 VIMP 工艺制得的玻

璃钢层压板更好。

这种差异主要是由两个原因引起的:其一,由于玻璃纤维织物的成型工艺主要是以缝边线捆绑辅助的,但造就了单根纱线在捆绑时形成了沿 X 轴方向或 Y 轴方向的隆起,同时这种隆起并不均匀,存在厚度区域差异。其二,玻璃纤维能用于复合材料,其特点就是它的随形性和可塑性,易于铺设,但这里仅限于生产上的多层叠加,如果用于实验室材料的评估,其铺层仅仅限于 2 层或 4 层,最多不超过 8 层,这样少的层数,在真空压力下,又加上织物本身自重较轻,就会产生横向或纵向的收缩,进而形成小的隆起,灌入树脂固化后,就会在玻璃钢层压板表面形成凹凸不平的小坑或鼓包,存在厚度区域差异。对于 VARTM 制成的玻璃钢层压板,不存在以上的缺陷,因为阴模和阳模平滑得犹如玻璃,很好地解决了玻璃钢层压板平整度问题。

2.2 灌注工艺对玻璃钢层压板玻纤含量的可控性和可重复性的影响

玻璃钢层压板 R1~R5 和 V1~V5 的玻纤含量测试结果如表 2 所示。

表 2 不同灌注工艺玻璃钢层压板玻纤含量

层压板编号	玻纤质量分 数/%	层压板编号	玻纤质量分 数/%
R1	71.98	V1	71.54
R2	71.86	V2	72.09
R3	71.92	V3	73.38
R4	71.95	V4	71.52
R5	72.01	V5	71.03
变异系 数/%	0.08	变异系 数/%	1.25

由表 2 可见, R1 板的玻纤质量分数为 71.98%。通过式 (1)、式 (2) 可知,当玻纤质量分数为 71.98% 时,垫片厚度约为 3.46 mm,这与表 1 中得到的玻璃钢层压板 R1 的厚度一致,这说明,通过目标玻纤含量来计算垫片厚度,从而得到相应厚度的玻璃钢层压板是完全可行的,用 VARTM 模具制作玻璃钢层压板对玻璃钢层压板的玻纤含量可控。

另外,由表 2 可见, VARTM 工艺制得的玻璃钢层压板玻纤含量稳定;而用 VIMP 工艺制得的玻璃钢层压板玻纤含量从 71%~74% 均有出现,难以保证不同时间或者不同制样人员制得的玻璃钢层压板玻纤含量一致,试验再现性存在不足。

这是因为 VIMP 工艺,操作全部靠经验,像对于玻纤布的定位、导流网的大小、真空袋的大小、注胶管的位置、缠绕管的位置等等,每次操作都是因人而

异,这样也就导致玻纤含量存在波动,但 VARTM 制样过程中,模具的浇口和出胶口的大小、数量、位置等均已固定,只需根据所需要的玻纤含量,计算得到 VARTM 垫片厚度,每次灌注过程中只要选择相同厚度的垫片,则制得玻璃钢层压板的玻纤含量保持稳定。

2.3 灌注工艺对复合材料力学性能的影响

玻璃钢层压板 R1 和 V1 的 0° 拉伸性能和玻璃钢层压板 R2 和 V2 的 90° 拉伸性能如表 3 所示。从表 3 可见,通过 VARTM 工艺得到的玻璃钢层压板,不论是 0° 方向的性能,还是 90° 方向的性能均优于 VIMP 工艺得到的玻璃钢层压板。

表 3 不同灌注工艺玻璃钢层压板的静态力学性能

项目	玻璃钢层压板			
	R1	V1	R2	V2
拉伸强度 /MPa	1 222	1 114	50.1	43.7
拉伸弹性模量 /GPa	42.1	41.4	13.4	13.1

VIMP 工艺成型的玻璃钢层压板表面厚度不均匀,有多余树脂剩余。富余树脂会导致复合材料整体性能降低,因为树脂富余区对于整个玻璃钢层压板样条而言,是强度最薄弱的区域,样条在这一区域容易破坏。而 VARTM 工艺成型的玻璃钢层压板在上下两块刚性模具下,表面均匀,且树脂能够均匀渗透入纤维中,使树脂和玻纤较好地融为一体,表面质量高,不存在受力薄弱区域。

将玻璃钢层压板 R3 和 V3 雕刻成疲劳样条后,分别在 4 个不同的应力等级下进行疲劳测试,得到不同的循环次数。将振幅(σ_a)的对数和循环次数 N 的对数进行线性拟合,得到图 3 的两条拟合曲线,拟合后的方程和相关系数如表 4 所示。从表 4 和图 3 可以发现,不论是用 VARTM 工艺还是 VIMP 工艺得到的玻璃钢层压板,其 $\lg \sigma_a \sim \lg N$ 曲线的斜率及截距都相近,即疲劳性能相近,考察疲劳断裂残样后,发现疲劳残样断裂模式也一致,其残样的照片如图 4 所示。这是因为疲劳测试所用的样条为四面铣成圆弧形的样条, VIMP 工艺得到的玻璃钢层压板表面的不平整部分在铣样过程中都被磨去,未能对疲劳性能产生不良影响。且 VIMP 工艺和 VARTM 工艺均是在一定压力下,将树脂灌注或注射进处于密闭的真空负压环境的玻纤织物中,待玻纤和树脂充分浸透固化后得到玻璃钢层压板,因而其内部结构相近。当表面差异在制样过程中被消除后,来自不同成型工艺的疲劳样条就表现出了相似的疲劳性能。

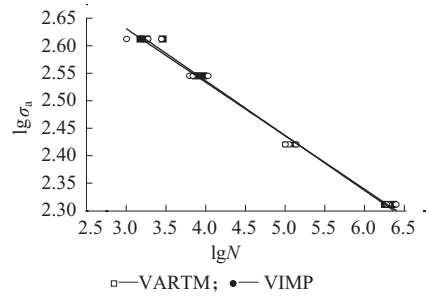
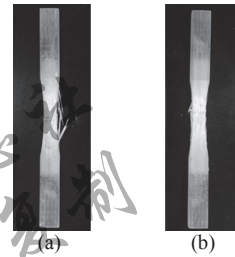


图 3 不同灌注工艺对玻璃钢层压板疲劳性能的影响

表 4 不同灌注工艺玻璃钢层压板的拟合后的方程和相关系数

项目	R3	V3
拟合曲线方程	$\lg \sigma_a = -0.0998 \lg N + 2.9357$	$\lg \sigma_a = -0.0974 \lg N + 2.9231$
M 值	10.02	10.27
截距	862	838
相关系数	-0.996	-0.994



a—VIMP 工艺; b—VARTM 工艺

图 4 不同灌注工艺对玻璃钢层压板疲劳测试残样

3 结论

采用传统的 VIMP 成型工艺制得的玻璃钢层压板存在厚度不均匀的现象,且玻纤含量不稳定。而用 VARTM 工艺制得的玻璃钢层压板厚度均匀性好,玻纤含量可控。玻璃钢层压板质量的好坏对后续力学性能的评估影响显著,用 VARTM 工艺制得的玻璃钢层压板静态性能较 VIMP 工艺制得的玻璃钢层压板更优,而两种工艺制得的玻璃钢层压板的疲劳性能基本相当。

参考文献

- [1] 赵渠森. 先进复合材料及其应用[J]. 航空制造技术, 2002(10):22-27.
Zhao Qusen. Advanced composite and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(10):22-27.
- [2] 钟方国, 赵鸿汉. 风力发电发展现状及复合材料在风力发电上的应用[J]. 纤维复合材料, 2006(3):48-54.
Zhong Fangguo, Zhao Honghan. Development status of wind power—generation and application of composites in wind power—generation[J]. Fiber Composites, 2006(3):48-54.
- [3] 李传胜, 张锦南. 真空灌注成型工艺在大型风力机叶片中的应用[C] // 第十六届全国玻璃钢 / 复合材料学术年会论文集. 黄山: [出版者不详], 2006:254-256.
Li Chuansheng, Zhang Jinnan. Vacuum infusion technology and application in large wind turbine blades[C] // Proceedings of the

- 16th national annual conference on glass fiber reinforced plastics / composite. Huangshan:[s.n.],2006:254-256.
- [4] 赵渠森,赵攀峰.真空辅助成型(VARI)工艺研究[J].纤维复合材料,2002(1):42-46.
Zhao Qusen, Zhao Panfeng. A Study of VAIR[J]. Fiber Composites, 2002(1):42-46.
- [5] Correia N C, Robitaille F, Long A C, et al. Analysis of the vacuum infusion moulding process:I.Analytical formulation[J]. Composites:Part A,2005:1 645-1 656.
- [6] Modi D, Correia N C, Johnson M, et al. Active control of the vacuum infusion process[J]. Composites:Part A,2007, 38(5):1 271-1 287.
- [7] 秦泽云,张响,许国栋,等. VARTM 工艺增强纤维浸润性能研究[J]. 绝缘材料,2011,44(6):28-31.
Qin Zeyun, Zhang Yang, Xu Guodong, et al. Wettability of reinforcing fiber in VARTM process[J]. Insulating Materials,2011, 44(6):28-31.
- [8] 蔡静雅. 复合材料 RTM 成型充膜缺陷预测与结构影响分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
Cai Jingya. Defects prediction and structure impact analysis of composites resin transfer molding during filling[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2017.
- [9] 杨杰,席平. 树脂传递模塑制品的缺陷控制及流程优化[J]. 航空技术制造,2015(6):77-79.
Yang Jie, Xi Ping. Defect control and process optimization of resin transfer molding products[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2015(6):77-79.
- [10] 马青松,陈朝辉,郑文伟,等. 树脂传递模塑—复合材料成型新工艺[J]. 材料科学与工程,2000,18(4):92-97.
Ma Qingsong, Chen Chaohui, Zheng Wenwei, et al. Resin transfer molding:A novel shaping process for composite materials[J]. Materials Science & Engineering,2000,18(4):92-97.
- [11] 孔晋峰,张彦飞,刘亚青. 复合材料 RTM 程序工艺参数的研究[J]. 工程塑料应用,2009,37(4):42-44.
Kong Jinfeng, Zhang Yanfei, Liu Yaqing. Research in composite RTM molding process parameters[J]. Engineering Plastics Application,2009,37(4):42-44.
- [12] Saad A, Echhelh A, Hattabi M, et al. Optimization of the cycle time in resin transfer molding process by numerical simulation [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites,2012, 31(20):1 388-1 399.
- [13] Saad A, Echhelh A, Hattabi M, et al. A fast computational model to the simulation of non-isothermal mold filling process in resin transfer molding[J]. Polymer Composites,2011,32(6):857-868.
- [14] 齐燕燕,刘亚青,张艳君. RTM 主要缺陷的研究进展[J]. 工程塑料应用,2006,34(12):72-75.
Qi Yanyan, Liu Yaqing, Zhang Yanjun. The research development of major defects in RTM process[J]. Engineering Plastics Application,2006,34(12):72-75.
- [15] 刘卓峰. GFRP 层合板厚板 VIMP 制备工艺与力学性能尺寸效应研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.
Liu Zhuofeng. Study on the VIMP preparation process and size effect of mechanical properties of GFRP thick laminate[D]. Changsha:National University of Defense Technology,2010.

帝斯曼全系列材料方案让汽车热管理系统选材更加快速准确

汽车热管理是一个整合的概念,如果分解到各个零部件,会是一个非常庞大的课题;如果再进一步具体到不同部件的选材,则更为错综复杂。例如,由于发动机空间越来越小,发动机动力越来越强劲,发动机机舱内的温度也越来越高,因此对结构中塑料零件的耐温性要求也越来越苛刻;此外,冷却系统中使用的防冻液对于塑料件也是不小的挑战。

创新材料解决方案供应商帝斯曼公司的材料专家们与汽车厂商合作多年,对汽车热管理系统中多个零部件之间的关联性具有深刻的理解,能够根据客户的具体需求,从包括帝斯曼 Akulon® 聚酰胺(PA)66, EcoPaXX® PA410, Xytron™ 聚苯硫醚(PPS)和 ForTii® 聚邻苯二甲酰胺(PPA)在内的众多创新材料中迅速准确地选出最为合适的材料方案组合,让复杂的热管理系统选材工作实现“一站式”运作。

在汽车热管理模块和水泵(电控、机械)叶轮、外壳的选材中,帝斯曼 Xytron™ PPS 是一个能够满足众多苛刻性能要求的选择。其长期工作温度高达 240℃,卓越的耐水解性、耐化学性、尺寸稳定性(低翘曲)和天然阻燃性,使得“高温区”对于 Xytron™来说完全是一个“舒适区”。此外,

Xytron™还是一款高流动、低飞边和易脱模的材料,完全可以满足汽车行业对于材料的设计灵活性和易加工性的需求。

发动机水阀和节温器外壳则是 ForTii® PPA 的关键应用领域。在这些应用中 PPA 取代了金属铝,一方面因为减少二次加工而降低成本,另一方面也可以实现减重。ForTii® PPA 的 5 000 h 长期使用温度高达 180℃,并且在高温下仍具备良好的强度和耐冲击性。采用 ISO 527 标准对 ForTii® PPA 测试,结果表明 ForTii® PPA 可耐受长效防冻液的浸泡,且仍能保持较高的拉伸性能。在加工方面,ForTii® PPA 提供很宽的成型加工窗口,其良好的流动性,使得零件的壁厚可以设计得更薄。通过薄壁设计,ForTii® PPA 可将零部件的生产周期时间缩短 25%~40%。ForTii® 产品家族中还包含无卤阻燃级别和耐水解级别,可满足不同工况对材料的需求。

帝斯曼还开发了适用于汽车热管理系统的生物基工程塑料 EcoPaXX® PA410,这种 70% 源于可再生材料的 PA410 已成功使用在水冷系统的水管接头中。EcoPaXX® 具有所有“长链 PA”的传统优点,包括低吸湿性和优良的耐化学药品性。它的熔点在所有生物基 PA 中最高,高达 250℃,并且结晶速率快。此外,EcoPaXX® 的流动性适中,从而提高了零件的设计灵活性。
(慧聪塑料网)