

热熔法制备连续纤维增强热塑性预浸料的浸渍模型和研究进展

李学宽, 肇 研, 王 凯, 陈俊林, 宋九鹏

(北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

[摘要] 力学性能优异、使用温度区间广、可二次加工等独特性能使得连续纤维增强热塑性预浸料得到长足发展。热熔法是一种精确高效的热塑性预浸料成型方法, 而如何实现 PPS、PEEK 等高黏度树脂熔体对连续纤维束的均匀、充分浸渍是亟待解决的工程难题。首先, 基于 Darcy 定律提出了 4 个浸渍理论模型, 充分考虑了工艺温度、压力、加工阶段及纤维束形状对浸渍程度的影响, 为连续纤维增强热塑性预浸料生产线的搭建和工艺参数的制定提供了理论指导。然后, 对国内外连续纤维增强热塑性预浸料的研究及产业化现状进行对比: 国外相关产业发展成熟, 预浸料种类繁多且在军机、民机等领域广泛应用, 但对国内实行严厉的限购政策; 国内, 高性能连续纤维增强热塑性预浸料具有广阔的应用空间和急切的需求, 介绍了北航热塑团队自主研发的热熔法制备连续纤维增强高性能热塑性预浸料的中试生产线, 其从一定程度上缓解了国内的需求。

关键词: 连续纤维增强热塑性预浸料; 热熔法; 浸渍理论模型; 牛顿流体; Navier-Stokes 方程

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.14.074



李学宽

博士研究生, 从事连续纤维增强热塑性预浸料制备工艺、工程塑料流变及结晶理论研究、热塑性复合材料制件有限元模拟及结构设计相关领域工作。

主次承力件的力学性能、服役温度区间和制造成本^[1]等因素已经成为航空制造领域关注的核心问题。近年来, 为满足航空航天等军工产业日益增长的需要, 连续纤维增强热塑性复合材料预浸料制造工艺得到了长足的发展^[2]。

与传统连续纤维增强热固性复合材料相比, 连续纤维增强热塑性复合材料具有以下突出优点:

(1) 刚而韧的线性高分子链赋予其优异的抗冲击性能和抗损伤性能;

(2) 使用温度区间从 -40°C 到熔点以下 50°C 左右;

(3) 复合材料制备过程仅发生物理反应, 成型周期短;

(4) 可以二次加工, 多次成型精确控制尺寸及内部结构^[3];

(5) 常温空气气氛储存即可;

(6) 绿色环保^[4], 可回收再利用^[5]。

虽然与热固性预浸料有本质区别, 但连续纤维增强热塑性预浸料的成型方法主要通过传统热固性预浸料成型工艺进行总结和借鉴, 结合不同热塑性树脂特性演变而来, 按浸渍方式不同可以分为热熔法、粉末法、泥浆法和混编法等。

在诸多的预浸料成型方法中, 热熔法在满足低成本的前提下实现了高效稳定生产, 同时可以精确控制预浸料幅宽、厚度及纤维体积含量, 具有不同于其他方法的优越性。

热熔法浸渍机理发展现状

热熔法是制备连续纤维增强热塑性复合材料的重要方法, 如何实现 PPS、PEEK 等高黏度树脂熔体对连

续纤维束的均匀、充分浸渍是亟待解决的工程难题^[6]。结合浸渍理论探究树脂熔体在纤维中流动过程,确定浸渍工艺参数是制备性能稳定的连续纤维增强热塑性预浸料的关键技术。

采用热熔法制备连续纤维增强热塑性预浸料,树脂熔体对纤维的浸渍实质上就是替代纤维内部孔隙的过程,对于纤维束而言,其内部存在两种尺度相差2个数量级的孔隙,即纤维束之间毫米级的孔隙和纤维束内单丝之间微米级的孔隙,热熔法的两种不同尺度孔隙的浸渍过程如图1所示。后者的浸渍难度是前者的百倍,对于热熔法而言,在热辊施加的较大压力下可以认为纤维束之间的孔隙瞬间完成浸渍,纤维单丝之间的孔隙才是整个加工过程中关键的控速步骤。

由于市场上流通的连续碳纤维或玻璃纤维束为3K、6K、12K甚至24K,热塑性树脂熔体在纤维束内的流动过程极为复杂,为了在不失真的前提下减少计算量,一般在研究此类问题时常常做出以下假设:

(1) 热熔法的浸渍过程是黏性流体流动体系,熔体流动遵循Darcy定律;

(2) 树脂熔体在整个浸渍过程中体积保持不变;

(3) 纤维单丝定义为刚体,纤维束形状完全相同且内部的纤维分布

保持不变;

(4) 纤维束外瞬间完成浸渍,即所有纤维束同时浸渍;

(5) 孔隙内的空气总有渠道排出,且空隙内压力均为大气压。

在这些假设的基础上,探究热熔法中树脂熔体和纤维的浸渍理论主要有以下几种经典模型。

1 理想牛顿流体浸渍模型

此模型^[7]认为在预浸料制备过程中,熔体温度基本保持不变,且树脂熔体在纤维间隙中流动的平均剪切速率维持在较低范围(0.1~10s⁻¹),因而可以将树脂熔体作为理想的牛顿流体,其在纤维束内的流动行为可以通过Darcy定律^[8]推导:

$$u = \frac{K p_r}{\mu l} \quad (1)$$

式中, K 为束内渗透率, μ 为树脂熔体黏度, p_r 为树脂所受压力, l 为树脂流动前峰值($0 \leq l \leq r$, 其中 r 为纤维束当量圆半径), u 为树脂流动速度。

进而可以推导树脂熔体在纤维之间的浸渍过程,得到浸渍时间 t 关于树脂前锋 l 的函数:

$$t = \frac{K p_a}{\phi u (1 - \phi) u_r r^2} \times \int_0^l \frac{l}{\phi(1 - u_r)l^2 - 2r\phi(1 - u_r)l + (1 - \phi u_r)r^2} dl \quad (2)$$

式中, p_a 为外部施加压力, ϕ 为纤维束未浸渍时的孔隙率, u_r 为树脂体积分数。

式(2)右侧的积分可以通过反三角函数表示出最简式,从最终表达式可以看出,浸渍时间 t 主要与树脂黏度、外界压力和束内渗透率有关,其中树脂黏度仅为浸渍温度的函数,对于特定的连续纤维种类,束内渗透率为常数,因而工艺温度和施加压力是决定浸渍效果的关键因素。在此基础上,制备了连续玻纤增强PP预浸料,通过对实际情况的观测印证了该理论的真实性的。

2 非牛顿流体浸渍模型

此模型在上一个模型的基础上,考虑到树脂熔体的剪切变稀行为,将纤维束内的熔融树脂流体简化为窄缝细流,得到符合此类熔体的幂律模型^[9]:

$$\mu = m \left(\frac{u}{h} \right)^{n-1} \quad (3)$$

式中, m 为树脂稠度系数, h 为束内纤维平均间距, n 为幂律指数。

在此基础上将上一理论表达式修正为:

$$t = \sqrt[n]{\frac{\phi^n m (1 - \phi) u_r r^2}{K h^{n-1} p_a}} \times \int_0^l \sqrt[n]{\frac{l}{\phi(1 - u_r)l^2 - 2r\phi(1 - u_r)l + (1 - \phi u_r)r^2}} dl \quad (4)$$

虽然积分结果无法通过初等函数表示出来,但带入具体试验参数仍可得到浸渍时间。张志成等^[9]通过玻璃纤维布增强高黏度聚丙烯的浸渍试验验证了此模型的准确性。

3 Navier-Stokes方程修正的浸渍模型

此模型首先基于试验结果做出两条重要假设^[10]。

(1) 热熔法制备连续纤维增强热塑性预浸料分为3个阶段:预热阶段、加压浸渍阶段和冷却阶段,结合金相照片发现纤维束内的浸渍过程仅发生在加压浸渍阶段。

(2) 纤维束内浸渍过程纤维不会被压缩,但纤维所受应力与纤维位

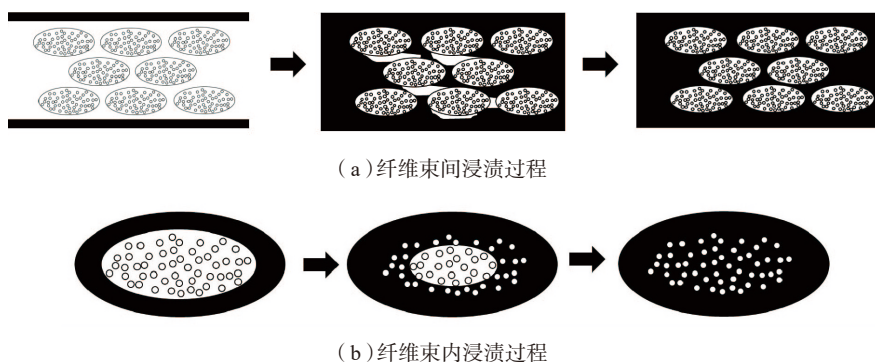


图1 热熔法两种不同尺度孔隙的浸渍过程

Fig.1 Two different scale impregnation processes in hot melting method

移遵循幂律关系。

在此基础上引入了流体动力学基本方程——基于动量守恒原理推导出的 Navier-Stokes 方程：

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \rho F + \mu \Delta v \quad (5)$$

式中， ρ 为密度， v 为流体速度， F 为外应力， μ 为熔体黏度。

在此基础上可以精确推导树脂熔体在纤维之间的流动，与 Darcy 定律结合即可得出熔融流体前峰位置与压力等参数的关系：

$$r \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \frac{dr}{dt} = -\frac{K}{(1-v_f)\mu} P_r \quad (6)$$

式中， r 为熔融流体前峰位置， r_0 为纤维束当量圆的半径， K 为纤维束流通系数， μ 为树脂黏度， P_r 为树脂所受压力， v_f 为纤维体积分。

其余推导过程与上文类似，通过 picard 迭代公式结合数值模拟可以准确描述浸渍过程，最终得出浸渍程度仅与加压浸渍阶段的加工温度和树脂受到的压力有关，与预热阶段及冷却阶段没有必然联系。此外，通过连续玻纤增强 PPS 预浸料的浸渍情况验证了该理论的可行性。

4 带入纤维束形状的浸渍模型

此模型考虑到实际纤维束内浸渍情况与当量圆替代纤维束内浸渍情况有差别，提出了一个新的假设——熔融树脂在纤维束内的质量流动速率恒定，即：

$$\dot{M} = 2\pi r(1-V_f)\rho V_r = \text{const} \quad (7)$$

式中， \dot{M} 为熔体质量流动速率， V_f 为纤维体积含量， ρ 为树脂密度， V_r 为径向流动速率。

因而对于展纤后的纤维束，熔融树脂完全浸渍所需要的时间为：

$$t = \frac{\mu K_0 n V_f}{w^2 (P_0 - P_a) (1 - V_f)^3} \quad (8)$$

式中， K_0 为渗透率； P_0 为浸渍初始状态时的浸渍压力； P_a 为纤维内部压力（此处认为等于大气压）； w 为展宽后纤维束宽度与原纤维束宽度的

比值，即纤维束宽度越大，完全浸渍所需的时间越小。

国外研究及产业化现状

美国市场研究机构 Lucintel 公司分析了全球连续碳纤维增强热塑性复合材料市场，报告指出 2014~2019 年连续碳纤维增强热塑性复合材料用量将在全球的航空航天、军事、运输、民用等领域获得显著增长，尤其是航空航天领域。同时，由于航空航天领域对主次承力件性能的要求日益严苛，连续纤维增强 PPS、PEEK 等高性能热塑性复合材料成型工艺的发展日益完善。

自 20 世纪 90 年代末以来，国外连续纤维增强热塑性预浸料已经有近 20 年的发展历史，基体材料包括 PP^[11]、PA6 等通用塑料，PC 等工程塑料，以及 PPS、PEEK、PEI^[12] 等高性能工程塑料，材料体系十分完善，可以持续为交通运输、医疗防护、高端民用器械等领域供货。但是，能够批量化稳定提供连续纤维增强高性能热塑性预浸料的企业极少，可以为波音及空客等民用客机公司供货的仅有荷兰 Tencate 公司和美国 Cytec 公司。此外，德国 Lanxess 公司、英国 Imhotep 公司、美国 PMC 公司、美国 Polystrand 公司等企业均参与了连续纤维增强高性能热塑性预浸料的研制，但并未形成规模。国外主要的连续纤维增强热塑性预浸料制造企业概况如表 1 所示。

1980 年，英国 ICI 公司首次向市

场提供商业化连续纤维增强 PEEK、PEI 和 PPS 等工程树脂预浸料，此后的近 40 年来，此类商品逐渐成为航空航天领域性价比最高、应用最为广泛的先进热塑性预浸料。

在军用飞机领域，连续碳纤维增强 PEEK、PEKK^[13]、PEK、PES 等工程塑料预浸料不但具有极高的比强度和比模量，刚性的苯环以及柔性的醚键同时赋予其良好的介电透射特性，可以作为轻质高强的透波材料；PES 自身的独特结构使其具有极佳的雷达射线透过率，已经在一定程度上取代环氧树脂作为雷达天线的树脂基体；PPS 等热塑性树脂基体在 0.1MHz~50GHz 范围内具有良好的吸波性能，相对应的热塑性预浸料已经应用于某型号战斗机的机翼前缘；有报道称连续纤维增强 PEEK 预浸料适宜制造导弹壳体和军用直升机旋翼，二次成型特性可以满足复杂结构件对尺寸稳定性的严苛需求。近年来，连续纤维增强热塑性预浸料在航空航天领域的主要应用如表 2 所示。

为了追求更轻的机身重量和更佳服役性能，世界首款进入服役阶段的第五代战斗机——F-22“猛禽”至少有 10% 的结构采用热塑性复合材料制造，其主起落架舱门就是采用 Tencate 公司提供的连续碳纤维增强 PEEK 预浸料制备。

另外，C-130“大力神”运输机的机身、F-117A 的尾翼、F/A-18 的机翼壁板、Alpha-jet 的水平安

表 1 国外连续纤维增强热塑性预浸料制造企业概况

企业	国家	制备方法	增强材料	基体材料
Tencate	荷兰	粉末法等	玻璃纤维 / 碳纤维 / 芳纶纤维	PPS/PEI/PEEK
Cytec	美国	热熔法等	玻璃纤维 / 碳纤维	PEEK/PEKK
Lanxess	德国	薄膜法	玻璃纤维 / 碳纤维 / 芳纶纤维	TPU/PC/PA/PPS
Porcher Industries	法国	粉末法	玻璃纤维 / 碳纤维 / 芳纶纤维	PEKK/PPS/PEI/PC/PA
GuritSuprem	瑞士	热熔法	碳纤维	PEEK

表2 热塑性预浸料在航空领域的应用

预浸料种类	应用案例	使用部位
CF/PPS	Fokker 50	主起落架舱门
	空客 A350	支架结构
	波音 787	支架及梁结构
	湾流 G650	方向舵和升降舵
	CDI 工程	座椅靠背
GF/PPS	空客 A330	机翼前缘
	空客 A340	机翼前缘
	空客 A380	机翼前缘 J 型段
CF/PEI	湾流 G550	客舱地板
	空客 A380	发动机进气管
	泰德航空	客舱座椅底座
	空客 A340	侧壁固定扶手
	湾流 G650	机翼压力舱壁
GF/PEI	Fokker 70	货舱壁板
	波音 787	供电设备管道 / 窗框
CF/PEEK	F-22	主起落架舱门
	A-400M	机舱地板及梁结构
	A-500M	油箱口盖
	波音 787	吊顶部件
	空中客车	机身上面板
CF/PEKK	TAPAS 项目	整体加筋板 / 扭转箱翼盒

定面前缘等均采用连续碳纤维增强 PEEK 预浸料制备,其轻质高强的优异特质得到了各国军方的一致肯定^[14]。

在民用飞机领域,连续碳纤维增强 PEEK 热塑性预浸料优异的抗疲劳和耐冲击性能使其拥有不同于传统连续碳纤维增强热固性预浸料的独特优势,而绿色环保的加工过程和可回收利用的经济优势顺应大多数国家政府制定的经济发展方针,受到越来越多的青睐。波音 787 的吊顶部件,空客机身上面板均采用此类材

料制造。

由空客公司和荷兰工业研究院共同发起的热塑性非昂贵型飞机主结构(TAPAS)项目已经顺利开展了 13 年,着力研究在技术准备 6 级水平(TRL)前提下采用连续纤维增强热塑性预浸料制备大型飞机主承力结构件的可行性,相关材料的开发和标准化以及纤维焊接、自动铺放等先进生产技术的推广应用是其面临的主要挑战。

国内研究及产业化现状

国内连续纤维增强热塑性预浸料的研发起步较晚,应国内民用市场的需求,现在批量化生产的主要是连续玻璃纤维增强 PP、PA 等通用塑料热塑性预浸料。吉林大学、上海交通大学、上海杰事杰新材料股份有限公司等也申请了众多相关专利:上海杰事杰新材料(集团)股份有限公司在相关专利中介绍了以碳纤维和玻璃纤维为增强体,以 PP、PE、PA6、PA12、PA1212 为基体的连续纤维增强热塑性预浸带的制备方法;吉林大学在相关专利中介绍了碳纤维含量在 20%~80% 范围的连续碳纤维增强苯乙炔侧基热塑性预浸料的制备方法;上海交通大学在相关专利中介绍了 ABS 的原位本体法制备以及碳纤维的连续化浸润。总体来说,连续纤维增强通用热塑性预浸料的制备方法日趋成熟,但由于 PPS、PEEK 等工程塑料加工温度极高,需要生产线在 350~450℃ 范围内长期稳定运行,连续纤维(GF 及 CF)增强高性能工程塑料(PPS、PEI 或 PEEK 等)预浸料在国内尚属空白。

一方面,由于其轻质高强等优异性能,连续纤维增强高性能热塑性复合材料在实际应用中可起到良好的减重效果并极大提升制件性能,具有高性价比且可回收利用,能够替代传统材料,符合国家的新能源及可持续发展战略;另一方面,虽然国外商品

化的连续纤维增强高性能热塑性复合材料性能优异、用途广泛,但其制造技术及装备严密封锁,对中国基本上处于禁运状态,仅有商飞等极少数民用客机制造公司能从荷兰 Tencate 公司采购少量用于制造民用客机部件的预浸料,大多数企业、科研院所和进出口贸易公司都没有购买渠道。因此,高性能连续纤维增强热塑性预浸料具有广阔的应用空间和急切的需求。

连续纤维增强热塑性预浸料制造业是一个高附加值的产业,以连续碳纤维增强 PEEK 预浸料为例,国外售价折合人民币约 5500 元/kg,国内企业购买所涉及的限制采购、关税、运输等烦琐问题将实际价格进一步提高。然而,基于国内同级别的 T700 级碳纤维和中黏度 PEEK 的市售价格,相同质量的连续碳纤维增强 PEEK 预浸料生产成本不会高于 1500 元/kg。建设一条国内自主研发的连续纤维增强高性能热塑性预浸料生产线不但可以打破国外的垄断局面,相对低廉的价格也可以扩大其在交通运输^[15]、医疗设备^[16]、民用器械等领域的应用。

北航热塑性预浸料团队自主研发了采用热熔法制备连续纤维增强高性能热塑性预浸料的中试生产线,如图 2 所示。该生产线通过对称热辊的挤压促使纤维与熔体充分浸渍,既避免了溶剂浸渍法制备预浸料时溶剂无法完全排出而严重影响产品性能的弊端,又没有薄膜层合法对高温的模压设备以及精确张力牵引设备的严苛需求,模块化设计使其可以满足连续碳纤维、连续玻璃纤维增强的 PEEK、PPS、PC、PA6 等各种热塑性预浸料的生产需求。其典型产品——连续碳纤维增强 PEEK 预浸料纤维体积分数稳定、表面状态良好,产量高达 100m²/8h,从一定程度上缓解了国内军用民用市场的需求。



图2 北航团队搭建的热熔法制备热塑性预浸料生产线

Fig.2 Thermoplastic prepreg production line with hot melt method built by Beihang University team

结论

连续纤维增强热塑性预浸料的长足发展使其有望满足航空航天、交通运输、医疗器械等领域主承力件的需求,因此国外进行了大量的研究以及产业化尝试。国内相关领域的起步较晚,目前主要集中在通用塑料领域。以北航热塑团队为代表的科研团队自主研发了热熔法制备连续纤维增强热塑性预浸料的核心技术,并进行了生产线的搭建和产业化的初步探索,相信在不远的将来可以一定程度弥补国内相关领域与国外的差距,满足下游企业及科研院所的需求。

参考文献

[1] VAIDYA U, CHAWLA K. Processing of fibre reinforced thermoplastic composites[J]. International Materials Reviews, 2013, 53(4): 185–218.

[2] VAN RIJSWIJK K, BERSEE H E N. Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites—an overview[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(3): 666–681.

[3] STAVROV D, BERSEE H E N. Resistance welding of thermoplastic composites—an overview[J]. Composites Part

A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(1): 39–54.

[4] TANG H, CHEN K F, LI X N, et al. Environment-friendly, flame retardant thermoplastic elastomer-magnesium hydroxide composites[J]. Functional Materials Letters, 2017, 10(4): 1750042.

[5] LI H, ENGLUND K. Recycling of carbon fiber-reinforced thermoplastic composite wastes from the aerospace industry[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 51(9): 1265–1273.

[6] CHEN J, WANG K, DONG A Q, et al. A comprehensive study on controlling the porosity of CCF300/PEEK composites by optimizing the impregnation parameters[J]. Polymer Composites, 2017, DOI:10.1002/pc.24407.

[7] KIM T W, JUN E J, UM M K, et al. Effect of pressure on the impregnation of thermoplastic resin into a unidirectional fiber bundle[J]. Advances in Polymer Technology, 1989, 9(4): 275–279.

[8] REN F, YU Y, YANG J J, et al. A mathematical model for continuous fiber reinforced thermoplastic composite in melt impregnation[J]. Applied Composite Materials, 2017, 24(3): 675–690.

[9] 张志成, 金泽宇, 杨建军, 等. 玻纤布增强聚丙烯复合材料浸渍理论及实验研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2016, 43(2): 27–34.

ZHANG Zhicheng, JIN Zeyu, YANG

Jianjun, et al. Impregnation theory and experimental research of glass fiber cloth reinforced polypropylene composites[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2016, 43(2): 27–34.

[10] GROUVE W J B, AKKERMAN R. Consolidation process model for film stacking glass/PPS laminates[J]. Plastics Rubber and Composites, 2010, 39(3–5): 208–215.

[11] SONG J Q, QIN Y, CHEN J, et al. Interfacial and mechanical properties of continuous fiber-reinforced PP via pre impregnated winding[J]. Polymers & Polymer Composites, 2017, 25(1): 23–28.

[12] HOU M, YE L, MAI Y W. Manufacturing process and mechanical properties of thermoplastic composite components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1): 334–338.

[13] YUAN H J, ZHANG S C, LU C X, et al. Improved interfacial adhesion in carbon fiber/polyether sulfone composites through an organic solvent-free polyamic acid sizing[J]. Applied Surface Science, 2013, 279: 279–284.

[14] NABOVATI A, LLEWELLIN E W, SOUSA A C M. A general model for the permeability of fibrous porous media based on fluid flow simulations using the lattice Boltzmann method[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(6/7): 860–869.

[15] FRIEDRICH K. Carbon fiber reinforced thermoplastic composites for future automotive applications[C]//AIP Conference Proceedings of VIII International Conference on “Times of Polymers and Composites”. Naples, 2016.

[16] TANIMOTO Y, INAMI T, YAMAGUCHI M, et al. Preparation, mechanical, and in vitro properties of glass fiber-reinforced polycarbonate composites for orthodontic application[J]. Journal of Biomedical Materials Research, Part B: Applied Biomaterials, 2015, 103(4): 743–750.

通讯作者: 肇研, 教授、博士生导师, 研究方向为先进树脂基复合材料、树脂基功能复合材料、纳米复合材料等, E-mail: jennyzhaoyan@buaa.edu.cn.

(下转第 90 页)

shell[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(3): 400-405.

[31] 韩振宇, 王振宇, 边东岩, 等. 自动铺丝构件缺陷形成机理的研究进展[J]. 纤维复合材料, 2014, 31(4): 3-7.

HAN Zhenyu, WANG Zhenyu, BIAN Dongyan, et al. A review on advances in defect

formation mechanism of automated fiber placement components[J]. Fiber Composites, 2014, 31(4): 3-7.

[32] 段玉岗, 刘芬芬, 陈耀, 等. 纤维铺放压紧力及预浸带加热温度对复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 148-156.

DUAN Yugang, LIU Fenfen, CHEN Yao, et al. Effects of compaction force and heating temperature of prepreg on composite mechanical properties during fiber placement process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4): 148-156.

通讯作者: 王显峰, E-mail: wangxf@nuaa.edu.cn.

Research Status of Automatic Fiber Placement Equipment for Composite Materials

WANG Xianfeng, ZHANG Yuyao, ZHAO Cong, XIAO Jun

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] As its high quality, high efficiency, high molding adaptability and low scrap rate, automatic fiber placement process is especially suitable for the automatic manufacture of large complex composite components, such as fuselage, inlet, bearing cone, blended wing body. In this paper, the developments of automated fiber placement equipment were reviewed, from the perspective of lathe bed, tow storage box, placement head. Moreover, research and application status of automated fiber placement equipment in China was analyzed. Finally, the future of placement equipment was predicted.

Keywords: Advanced composites; Automated manufacture process; Automated fiber placement; Layup equipment; Block design

(责编 逸飞)

(上接第78页)

Impregnation Model and Research Progress of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Prepregs Prepared via Hot Melting Method

LI Xuekuan, ZHAO Yan, WANG Kai, CHEN Junlin, SONG Jiupeng

(College of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The excellent mechanical properties, wide usage temperature range and secondary processing possibility make continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg develop rapidly. The hot-melt method is an accurate and efficient thermoplastic prepreg molding method. It is an engineering problem that needs to be solved that how to achieve the uniform and full impregnation of continuous fiber bundles with high viscous resin melts, such as PPS, PEEK and so on. Firstly, based on Darcy's law, four impregnation theoretical models were proposed, which fully consider the effects of process temperature, pressure, processing stage and shape of fiber bundles on impregnation, and they can provide theoretical guidance for the establishment of continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg production lines and the determination of process parameters. Then the research and industrialization status of domestic and foreign continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg are compared: foreign related industries have a wide range of prepregs, which have been widely used in military aircraft, civil aircraft and other fields, but foreign company have a strict purchase policy for China. Domestic demand for continuous fiber reinforced high performance thermoplastic prepreg is in short supply. Beihang thermoplastics group has independently developed a continuous fiber reinforced high performance thermoplastic prepreg production line via hot melting method, which has eased domestic urgency to some extent.

Keywords: Continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg; Hot melting method; Impregnation theoretical model; Newtonian fluid; Navier-Stokes equation

(责编 逸飞)