

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.04.028

复合材料液体成型技术的航空应用

赵安安¹, 王林文², 王浩军¹, 张灵静², 苏霞¹, 闫超¹, 蒋建军^{1,2}

(1. 中航工业西安飞机股份有限公司, 西安 710089; 2. 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

摘要: 综述了复合材料液体成型技术在航空方面的研究与应用进展情况。概述了树脂基复合材料的航空应用, 对复合材料液体成型技术的含义和几种典型液体成型技术的优缺点及其在航空领域的应用进行了回顾, 总结了复合材料液体成型技术的最新研究进展, 分析了液体成型技术现阶段存在的某些工艺问题, 概括了自动化铺放等辅助液体成型技术的航空应用以及液体成型技术在承力型结构上的应用。重点总结了国内外液体成型技术的差距, 讨论了复合材料液体成型技术亟待解决的问题, 展望了液体成型技术未来发展前景, 认为液体成型工艺将逐步实现整体化、自动化、数字化和智能化发展。

关键词: 先进复合材料; 液体成型技术; 低成本; 自动化; 数字化; 智能制造

中图分类号: V258 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)04-0145-06

Application of Liquid Composite Molding Technology on Aeronautics

Zhao Anan¹, Wang Linwen², Wang Haojun¹, Zhang Lingjing², Su Xia¹, Yan Chao¹, Jiang Jianjun^{1,2}

(1. China Aviation Industry Xi'an Aircraft Company Limited by Shares, Xi'an 710089, China;

2. Mechanical and Electrical College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The research and application progress situations of liquid composite molding technology on aeronautics were summarized. The aerospace applications of the resin composite were summarized, the meaning of the liquid composite molding, the advantages and disadvantages of several typical liquid composite molding and their applications in the field of aviation were reviewed. The latest research progress of the liquid composite molding were summarized, some technical problems in the current stage of liquid composite molding were analyzed, and the aviation applications of auxiliary liquid composite molding such as automated placement technology and utilization of liquid composite molding on load-bearing structure were generalized. Focus on the gap between domestic and foreign liquid composite molding, it was discussed for that the urgent problems waiting to be solved of liquid composite molding, and the future development prospects were prospected of liquid composite molding. It is believed that the liquid composite molding will gradually realize the integration, automation, digitalization and intelligent development.

Keywords: advanced composite; liquid molding technology; low cost; automation; digitization; intelligent manufacturing

航空工业的发展,要求飞行器具有轻量化、高可靠性、长寿命、低成本化等特点。树脂基复合材料结构本身拥有高比强度、比刚度、比模量,高综合效费比和结构效率以及复杂构件材料性能的可设计性强等特点,具有其它材料不可比拟的优势。同时,复合材料优良的抗疲劳性和耐腐蚀性,可以大大提高飞机结构件的使用寿命,降低维护费用;增加机舱内的压力和空气湿度,提高乘坐的舒适度。复合材料是轻质

高强结构设计的理想材料,在高端制造业被广泛重视的背景下,复合材料以其优良的综合特性,不仅使大型民用客机满足了可靠性、经济性、舒适性、环保性的要求,还使新一代歼击机及战斗机满足隐身性的要求,复合材料自问世以来已逐步发展成为航空工业具有独特竞争优势的重要战略材料。在国际国内工业领域节能减排、绿色制造的高要求下,顺应智能化、数字化、低成本化制造的趋势,复合材料制造技术中

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (3102017jg02012), 中国博士后科学基金项目 (2017M613209)

通讯作者: 蒋建军, 博士, 教授, 主要从事复合材料液体成型加工研究 E-mail: jianjun@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2018-02-04

引用格式: 赵安安, 王林文, 王浩军, 等. 复合材料液体成型技术的航空应用 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(4):145-150.

Zhao Anan, Wang Linwen, Wang Haojun, et al. Application of liquid composite molding technology on aeronautics[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(4):145-150.

表 2 典型液体成型工艺特点及应用

典型液体成型工艺	工艺特点	缺点	应用
RTM	双面模具, 适合于结构复杂零件的制造	树脂黏度低, 注胶时间长	主要用于次承力的整体结构, 如 F35 垂尾; A380 操纵面铰接部件和翼肋; A350 机身窗框
VARI	(1) 单面模具; (2) 适合于大尺寸零件的制造; (3) 注射压力小	(1) 制品纤维体积分数较低; (2) 孔隙率较高	A400M 货舱门, B787 机翼后缘控制面组件副翼、机身后压力隔框、襟副翼、内侧和外侧襟翼以及七个扰流板, A380 机翼襟副翼等
RFI	(1) 树脂基体为树脂膜, 便于保存和运输; (2) 单层模具; (3) 制件纤维体积分数高, 孔隙率较低; (4) 树脂挥发少	(1) 树脂膜成本高; (2) 树脂膜在没有载体的情况下操作不便, 如胶粘剂膜; (3) 由于树脂膜面密度小, 当铺层数量较多时会增加人力成本; (4) 内膜会影响制件表面精度, 达不到所要求的复杂程度和精度要求	空客 A380 的机翼后缘和用预成型体 / RFI 成型的机身部段后压力隔框, 压力舱门; 波音公司的 13.5 m × 2.7 m 半翼展机翼部件; B787 机身大部分隔框及地板横梁

有效改善浸润效果, 减少成型缺陷, SCRIMP 应用于诸如大尺寸屋面、建筑平台等大型构件; 反应注射成型 (RIM) 是将两种液体原料经反应、固化形成制品的成型工艺过程, 而结构反应注射成型 (SRIM) 技术是集成 RIM 和 RTM 工艺的优点开发的一种新型液体成型工艺^[18], SRTM 技术已成功应用在包括 RQ-1B 的全球鹰无人机加长翼尖等飞机部件上^[19]; 高压 RTM (HP-RTM) 工艺可高效用于成千上万复合材料零件的成型^[20]; 连续树脂传递模塑成型技术 (CRTM) 有效结合了 RTM 和拉挤成型两者的优点, 解决了传统拉挤成型工艺中树脂整体预成型困难以及 RTM 工艺中制件尺寸有限、在成型低树脂含量制件时气泡很难消除等难题, 树脂充模时间短, 充模压力和效率都很高, 能生产具有优良表面光洁度的网状复合材料部件^[21]; 软模辅助成型技术在各类成型工艺中以其独特的热膨胀性能使高性能复合材料结构件不会发生变形并降低了生产成本, 同时该成型技术解决了刚性模具的密封问题, 还实现了模具的减重。

复合材料轻质、高效、低成本化仍然是飞机制造商普遍追求的目标。相关研究表明, 热压罐 / VARI 组合新工艺结合了 VARI 成本低、易铺贴与热压罐成型压力高、表面质量好的特点, 使复合材料制件在注胶及固化过程中的压力和温度相互独立可控, 同时大大减少了孔隙、干斑等缺陷的存在。而且不同于 VARI 成型工艺对低黏度树脂的要求, 热压罐 / VARI 工艺可适用于高黏度树脂。东华大学潘利剑研究团队通过大量的研究实验, 引入新的成型理念, 结合热压罐和液体成型各自的优势, 设计出了新型热压罐 / VARI 组合工艺成型系统, 并采用该工艺制备了碳纤维复合材料试样。结果表明, 组合工艺制备的试样比 VARI 制备的试样有更小的厚度及更高的纤维体积分数。目前, 热压罐 / VARI 组合工艺在德国宇航局生产的飞机整流罩、前门起落架, 以及邦巴迪亚生产的升降舵尾翼等均成功实现了应用^[22]。

中国商飞技术研究中心提出了一种针对阴模成型的新泡沫填充 T 型加筋壁板共固化成型工艺, 采用泡沫加筋芯与纤维铺覆导向板, 对加筋区尺寸进行精确控制, 解决了阴模加筋区填充困难、工艺复杂、不可重复、表面成型质量差的问题。

在注胶过程中引入钢制均压板, 采用单面模具得到双面光滑的 T 型加筋壁板结构件^[23]。西安爱生技术集团公司经过大量研究实验, 优选出适合无人机机体结构制造用的手糊 / 液体成型树脂体系。新型树脂体系黏度低、操作时间长、力学性能和环境适应性好, 能提供更高的工作温度上限, 满足液体成型无人机结构工艺要求, 生产效率高, 降低了化学品对人体的危害^[24]。

1.3 液体成型技术中存在的问题

在大面积整体成型工艺中, 典型的航空复合材料制件往往具有结构集成度高、纤维构型复杂、纤维体积含量大等特点^[25]。这意味着纤维预成型体要承受较大的压缩应力, 纤维织物的压缩行为不仅会影响预成型体的厚度及成型制件的尺寸精度, 对制件的力学性能也会产生作用^[25]。另外, 预成型体的压缩过程也会引起纤维的孔隙率及孔隙尺寸的变化, 这决定了液体成型工艺的可成型性。纤维体积含量高, 制件成型质量更好, 但增加了树脂的流动难度, 易造成充模过程中因树脂浸润纤维不充分产生干斑, 流动不平衡产生树脂贫胶或富集等缺陷, 严重削弱复合材料制件的力学性能, 不仅会降低复合材料制件的强度、耐腐蚀性和抗疲劳性, 而且增加了制件对气候的敏感性和吸湿性, 强度等性能也会随之降低^[26-29]。控制树脂在纤维预成型体中的流动, 使树脂完全浸润纤维, 减少缺陷的产生是整个液体成型工艺过程的关键^[30-31]。

承力型复合材料构件的成功应用推动了复合材料用量在飞行器中超过了 50%, 这个里程碑事件推动着航空、航天、船舶和风力发电等军民产品的材料变革。但承力型构件要求材料具有很高的力学性能, 导致纤维结构集成度高、体积含量大、厚度大、构型复杂, 较高的模腔压力和树脂的冲刷效应均会引起纤维架构宏观微观变形, 使复合材料的树脂基体在纤维架构中的渗流行为变得复杂, 缺陷难以控制, 制成品不合格率居高不下 (超过 30%), 严重制约了复合材料构件的深度应用。

2 辅助液体成型技术及其应用

液体成型工艺中 3D 编织预成型体和整体共固化成型

工艺使复合材料在复杂结构件上的应用成为可能。如波音 787, NH-90 直升机起落架撑杆, EAP-X 发动机等均利用 3D 编织预成型体和 RTM 技术成型, 而我国只有成飞对 3D 编织技术进行了相关应用。另外, 整体化成型技术已在 A330 / 340 扰流板接头, A320 机身隔框, A380 中央翼、机翼副翼翼梁、机身窗框等实现了应用^[32-33]。

自动铺带技术是一种先进的低成本辅助液体成型技术, 能充分发挥复合材料可设计性好、构件质量稳定、易于整体成型的优点。截至目前, 自动铺带技术已经得到了快速发展并日趋成熟, 其中美国自动铺带技术已经发展到了第五代, 其研究的重点是开发多铺带头和针对特定构件的专用化铺带机。美国的 MAG Cincinnati, ElectroImpact, Ingersoll 公司等是目前国际上先进的自动铺带及自动铺丝设备制造公司。欧洲从 20 世纪 90 年代开始已经对自动铺带机展开研究, 现有法国的 Frest-line 和 Coriolis 公司以及西班牙的 M-Torres 公司等主要制造商。目前各种类型的自动铺放设备绝大部分基于预浸料, 若采用干纤维则易使纤维从铺贴的位置移动。为解决这一问题, M-Torres 公司开发出能够铺放干纤维的新型自动铺放系统, 通过在干纤维铺放位置放置一层轻质热塑性薄纱作为粘合剂以实现自动铺放过程中干纤维的精确定位。在铺带头安装热增压装置加热薄纱后, 确保纤维铺放后不会发生滑移, 另外薄纱的网格结构还能充当导流介质。

我国目前的自动铺放设备研制、生产和实际应用与国外先进水平差距较大, 多数航空企业仍停留在采用类似金属构件的设计方法和手工铺层阶段, 自动铺放技术基本还处于高校及科研院所研究与试制阶段。南航完成了国内第一台八丝束纤维铺放原理样机; 武汉理工与北航研究所、西安复材研究所等单位联合对圆锥体的铺放机理进行了研究, 提出了针对圆锥形曲面的 4 种铺放线型的设计方法; 哈工大设计并制造了七自由度四丝束纤维铺放机并完成了调试, 应用 4 mm 宽度的纤维预浸丝束进行了铺放试验, 完成了铺放软件原型的设计; 上海电气通过收购德国宝捷自动化公司, 获得了自动铺丝、自动铺带技术, 通过对设备的引进和技术的消化吸收, 相信将会带动我国复材自动铺放技术实现跨越式发展^[34]。表 3 示出目前国内外在自动铺带技术方面的应用情况^[35-40]。

3 液体成型技术在承力型结构上的应用

2014 年俄罗斯 MS-21 单通道客机的成功研制是液体成型工艺里程碑式的成果, 该客机是第一个使用复合材料液体成型技术制造大型主承力结构的机型, 采用干纤维浸渍工艺成型的复合材料试验翼盒通过了耐久性测试, 首次实现了大型客机采用非热压罐成型技术制造机翼主承力件, 其大型

表 3 自动铺带技术的应用情况

国家及地区	应用机型及部位
美国	F-22 机翼, C-17 水平安定面蒙皮, V-22 旋转蒙皮, B777 全复合材料尾翼、水平和垂直安定面蒙皮, B787 机身蒙皮、机翼壁板、中央翼盒主翼蒙皮、尾翼、发动机短舱部件等
欧洲	A330 水平安定面蒙皮, A340-500 / 600 尾翼蒙皮, A400M 机翼翼梁增强肋, A380 后机身非增压部分的蒙皮 CFRP 层压板、安定面蒙皮、中央翼盒、CFRP 垂尾壁板等, A350 机身壁板、前机身 12 段板件、机翼蒙皮、中央翼盒、发动机短舱部件、机身 15 号舱段零件等
俄罗斯	MS-21 整体机翼和中央翼盒的六个面板
中国	C919 垂尾壁板

整体加固的主要结构, 包括机翼翼梁、机翼蒙皮和中央翼盒的六个面板都使用了液体成型工艺制造^[41-42]。目前, 液体成型技术已在国外先进机型如 A400M, B787, MS-21 的主承力结构上均实现了应用。

国内对复合材料液体成型技术的研究和探索目前主要集中在次承力结构^[43], 在主承力结构设计制造方面与国外的差距仍很大^[44]。中航复材基于传统 VARI 工艺开发了新型高纤维体积分数真空转移成型技术 (HFVI), 针对民机襟翼结构, 通过对树脂流动进行模拟分析、自动实时监测树脂流动状态、优化模具设计, 完成了民机襟翼典型结构件的整体成型^[45], 制备的典型结构件如图 2 所示。

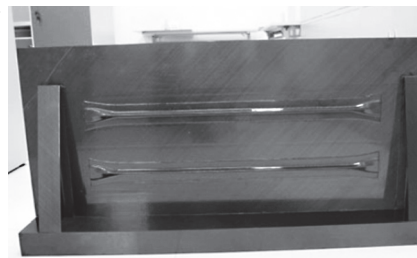


图 2 采用 HFVI 技术研制的民机襟翼典型结构件

4 总结与前景展望

4.1 总结与分析

我国复合材料研究起步较晚, 不仅体现在国产客机 C919 与国外先进机型如 B787 / A350 复合材料使用量的差距, 还体现在复合材料低成本制造水平的差距, 目前国内还没有一家公司具备自主进行一体化设计和制造的能力。

我国复合材料液体成型技术可持续研发与应用中亟待攻克的难题如下所示。

(1) 复合材料原材料的开发。国内虽已初步形成自己的材料体系, 但国产材料的规格、性能、质量相对较低, 不能满足所需性能的要求, 大部分高性能复合材料仍需国外进口。美欧等国已形成自身完备的原材料体系, 并形成了规范化的检测手段。我国是世界上复合材料用量最多的国家, 但相关技术储备不足, 同时还面临国外的技术封锁, 目前高性能碳纤维主要由美国和日本等国的生产厂商提供, 材料成本高, 所以必须加大设备资金投入, 总结经验, 逐步形成自身完备

的原材料体系。

(2) 国内在复合材料液体成型技术的工艺原理、充模过程控制、固化机理、缺陷排除等相关基础理论研究方面已经基本完善,但在主承力结构设计和制造工艺关键技术方面的工程化经验尚不足,目前复合材料还没有在国产飞机主承力结构上实现应用;干纤维预成型困难,模具制造技术相对薄弱。鉴于此,应加大对液体成型技术发展的规划和支持力度,坚持自主创新,重视先进数字化、自动化、智能化制造技术在液体成型中的应用,解决我国液体成型技术中遇到的大尺寸制件纤维织物手工铺贴困难,纤维一致性、质量稳定性难以保证等突出问题。另外还应深入研究液体成型工艺的质量控制方法及无损检测技术,对复合材料制件固化过程中热量传递、树脂流动、纤维密实,气泡形成、生长及迁移进行实时地监测,确保复合材料制件的固化过程顺利进行,保证高的成品率。

4.2 复合材料液体成型技术的发展前景

近年来,可控超材料(或者超结构)已经取得了举世瞩目的成就,石墨烯材料、三维网格结构复合材料、高性能复合热界面材料、新型纳米碳纤维材料得到了全面的发展,复合材料未来发展前景十分可观。在液体成型技术方面,数字化与自动化制造技术(自动铺丝和自动铺带技术),整体共固化成型技术、微波固化,软模辅助制造,实现液体成型技术在主承力结构的应用,都是近年来研发的热点^[23-24]。

在C919首飞成功后,中俄国际商用飞机有限责任公司继而又确定完成了C929远程宽体客机指标的初步定义和基本航程与座级。相关资料表明,C929复合材料结构使用率将超过50%,达到波音787与A350的复合材料结构使用率。若相关技术指标都能实现,将大大提高C929各方面结构性能和效益,领先其竞争机型A330一代,大大提高C929的国际竞争力,同时极大地提高国内复合材料的制造水平^[46-47]。

复材液体成型技术不仅应用在航空航天领域,还在汽车结构件、舰船等交通领域,能源、海洋、机械、高性能体育用品等方面实现了应用。未来的研究重点应该以大型飞机、汽车、舰船等的轻量化发展为依托,尽快掌握HP-RTM、CRTM、电子束固化等工艺关键技术,突破热压预定型、混合注射技术、四位动平衡液压技术、一体化装备设计制造技术等工艺技术和装备,并针对汽车车身、飞机机翼、机身框架、大型船体等典型构件的制造,逐步实现复合材料液体成型技术由次承力结构向主承力结构的应用。

随着全球化合作进程的加速,在制造业逐步向“智能制造”转变的背景下,复合材料智能制造势必成为复合材料研究领域的新热点。相信复合材料液体成型技术将逐步实现整体化、自动化、数字化和智能化的协同发展。

参考文献

- [1] 陈绍杰,等.高科技纤维与应用,2004,29(1):1-7.
Chen Shaojie, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2004, 29(1):1-7.
- [2] 杜善义. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
Du Shanyi. Acta Material Composite Sinica, 2007, 24(1):1-12.
- [3] 高国强. 玻璃钢 / 复合材料, 2014(9):105-108.
Gao Guoqiang. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2014(9):105-108.
- [4] 李培旭,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2016(2):83-86.
Li Peixu, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2016(2):83-86.
- [5] 梁滨. 材料导报, 2009, 23(7):77-80.
Liang Bin. Material Review, 2009, 23(7):77-80.
- [6] 任晓华. 航空科学技术, 2010(4):2-5.
Ren Xiaohua. Aeronautical Science and Technology, 2010(4):2-5.
- [7] 魏俊伟,等. 材料开发与应用, 2010(3):99-105.
Wei Junwei, et al. Development and Application of Materials, 2010, 25(3):99-105.
- [8] 徐东明,等. 航空制造技术, 2014(23 / 24):87-89.
Xu Dongming, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(23 / 24):87-89.
- [9] 杜善义,等. 复合材料学报, 2008, 25(1):1-10.
Du Shanyi, et al. Acta Material Composite Sinica, 2008, 25(1):1-10.
- [10] Holmes M. Reinforced Plastics, 2017, 61(4):237-241.
- [11] 牛春匀. 实用飞机复合材料结构设计与制造 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
Niu Chunyun. Practical structural design and manufacture of aircraft composites[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010.
- [12] 陈绍杰. 航空学报, 2008, 29(3):605-610.
Chen Shaojie. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3):605-610.
- [13] 马立敏,等. 复合材料学报, 2015, 32(2):317-322.
Ma Limin, et al. Acta Material Composite Sinica, 2015, 32(2):317-322.
- [14] 陈静,等. 新材料产业, 2017(12):10-13.
Chen Jing, et al. Advanced Materials Industry, 2017(12):10-13.
- [15] Gokce A, et al. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2002, 33(9):1263-1272.
- [16] 刘强,等. 航空制造技术, 2013(22):80-83.
Liu Qiang, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(22):80-83.
- [17] 孙振起,等. 材料导报, 2015, 29(11):61-64.
Sun Zhenqi, et al. Materials Review, 2015, 29(11):61-64.
- [18] 徐竹. 合成材料老化与应用, 2016, 45(2):83-86.
Xu Zhu. Synthetic Materials Aging and Application, 2016, 45(2):83-86.
- [19] 尚波. 玻璃钢, 2014(3):37-40.
Shang Bo. Fiber Reinforced Plastics, 2014(3):37-40.

- [20] 毕鸿章. 高科技纤维与应用, 2013(6):68.
Bi Hongzhang. Hi-Tech Fiber & Application, 2013(6):68.
- [21] 张国利, 等. 天津工业大学学报, 2015(2):1-5.
Zhang Guoli, et al. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2015(2):1-5.
- [22] 王召召. 复合材料热压罐 / 真空辅助 (VARI) 组合工艺设计与结构性能研究 [D]. 上海: 东华大学, 2016.
Wang Zhaozhao. Study on structure and properties of the composite manufactured by autoclave / VARI technology and its design[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [23] 刘亚男, 等. 航空制造技术, 2018(4):74-77.
Liu Yanan, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018(4):74-77.
- [24] 赵伟超, 等. 中国胶粘剂, 2017, 26(7):28-31.
Zhao Weichao, et al. China Adhesives, 2017, 26(7):28-31.
- [25] Kelly P A. Journal of the Textile Institute, 2011, 102(8):689-699.
- [26] 郭启微, 等. 纺织学报, 2008, 29(5):42-45.
Guo Qiwei, et al. Journal of Textile Research, 2008, 29(5):42-45.
- [27] 金天国, 等. 复合材料学报, 2015, 32(3):840-847.
Jin Tianguo, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3):840-847.
- [28] 刘刚, 等. 复合材料学报, 2015, 32(4):1194-1200.
Liu Gang, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(4):1194-1200.
- [29] 杨金水, 等. 复合材料学报, 2011, 28(6):1-7.
Yang Jinshui, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(6):1-7.
- [30] Jiang Jianjun, et al. Applied Composite Materials, 2017, 24(3):625-642.
- [31] Wang Changchun, et al. Applied Composite Materials, 2015, 22(4):363-375.
- [32] 周雷敏, 等. 高科技纤维与应用, 2013, 38(2):57-61.
Zhou Leimin, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2013, 38(2):57-61.
- [33] 刘强, 等. 航空制造技术, 2014(15):58-62.
Liu Qiang, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(15):58-62.
- [34] 徐志明. 电气自动化, 2018, 40(1):88-91.
- [35] Xu Zhiming. Electrical Automation, 2018, 40(1):88-91.
- [36] 王绍凯, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 2014(9):76-84.
Wang Shaokai, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2014(9):76-84.
- [37] 张朝晖, 等. 航空制造技术, 2013(15):51-54.
Zhang Chaohui, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(15):51-54.
- [38] 李林. 航空制造技术, 2017(11):105-109.
Li Lin. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(11):105-109.
- [39] 黄当明, 等. 航空制造技术, 2017(4):97-100.
Huang Dangming, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(4):97-100.
- [40] 文立伟, 等. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(5):637-649.
Wen Liwei, et al. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(5):637-649.
- [41] 王永军, 等. 航空制造技术, 2015(14):38-43.
Wang Yongjun, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(14):38-43.
- [42] Solano J. JEC Composites Magazine, 2012, 49(72):44-46.
- [43] 刘亚威. 大飞机, 2014(7):106-107.
Liu Yawei. Jetliner, 2014(7):106-107.
- [44] 李培旭, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 2016(8):99-104.
Li Peixu, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2016(8):99-104.
- [45] 冯军. 航空制造技术, 2009(22):38-42.
Feng Jun. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(22):38-42.
- [46] 高艳秋, 等. 帽型壁板整体结构 RFI 成型工艺研究 [C]// 第 17 届全国复合材料学术会议 (复合材料制造技术与设备分论坛) 论文集. 北京: 中国复合材料学会, 2012:606-608.
Gao Yanqiu, et al. Research on RFI molding process of hat wall slab structure[C]//Proceedings of the 17th national conference on composite materials (composite material manufacturing technology and equipment sub forum). Beijing: Chinese Society for Composite Materials, 2012:606-608.
- [47] Yin Pumin. Beijing Review, 2015(47):28-29.
- [48] 吴兴世, 等. 百年潮, 2016(4):4-11.
Wu Xingshi, et al. Hundred Year Tide, 2016(4):4-11.
- [49] blens[J]. China Plastics Industry, 2010, 38(9):25-27.
- [50] 季根忠, 刘维民, 齐陈泽, 等. 刚性粒子增韧聚合物机理研究 [J]. 高分子通报, 2005(1):50-54.
Ji Genzhong, Liu Weiming, Qi Chenze, et al. Study on toughening mechanism of polymer toughened by rigid organic particles[J]. Polymer Bulletin, 2005(1):50-54.
- [51] 李玉林, 何培新. 高分子合金增韧机理的研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(5):26-30.
Li Yulin, He Peixin. Advances in studies on toughening mechanisms of polymer alloys[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2002, 18(5):26-30.
- [52] 郭宝华, 徐晓琳, 徐军. MBS 对聚碳酸酯的增韧作用及其增韧机理的探讨 [J]. 橡塑技术与装备, 2006, 32(7):23-27.
Guo Baohua, Xu Xiaolin, Xu Jun. Discussion of MBS vs the toughening function of polycarbonate and its toughening mechanism[J]. China Rubber/Plastics Technology & Equipment, 2006, 32(7):23-27.
- [53] 陆波, 李鹏. ACR 对 PC 和 PC / ABS 合金的增韧研究 [J]. 塑料工业, 2010, 38(9):25-27.
Lu Bo, Li Peng. Study on ACR toughening PC and PC / ABS

(上接第 138 页)

26(11):750-754.