

复合材料结构整体化技术研究进展*

Research Progress on Integrated Composite Structure Technologies

益小苏 / 中航工业北京航空材料研究院

导读: 材料技术、设计技术和制造技术的集成可充分发挥树脂基复合材料本质潜力。要实现复杂制件的整体化设计和制造, 首先应突破定型和预制关键技术, 即预制材料技术和预制结构技术。典型的ES-Fabrics织物等可以制备出高尺寸和形状精度、自支撑而稳定的复合材料复杂结构预制件, 并具有比较优越的工艺性质和力学使用性能, 而围绕着预制技术, 正在形成一个材料和应用技术的体系。

关键词: 定型; 预制; 表面附载; ES织物; 三角区填充

Keywords: tackification; preform; surface loading; ES fabrics; gusset filler

0 引言

先进复合材料技术一直存在三个技术挑战: 提高复合材料及其制件的性能, 降低复合材料及其制件的成本, 符合复合材料自身规律的制件设计。这三者之间有区别但更有联系, 一个典型的发展方向就是当前非常热门的飞机复合材料结构整体化技术。

1 结构整体化技术

欧洲航空界称, 相对于民用飞机金属材料结构技术, 复合材料技术在本世纪初已使飞机减重约15%, 降低成本约15%; 而未来的发展目标是使飞机进一步减重30%, 降低成本40%。

20世纪90年代中期, 美国先行启动了军用飞机复合材料的低成本计划, 也叫经济可承受性计划(CAI)。通过这个计划, 美国希望把军机复合材料的用量提升到约60%, 而复合材料制件的成本降至每磅约150美元(图1)。

飞机复合材料的成本是如何分摊的呢? 就材料和制造技术而言, 装配

成本、铺层成本和紧固件成本占据总复合材料技术成本的一半(图2)。因此, 以降低这三者的成本为突破口可以获得很大的发展空间。事实上, 改变铺层方式和装配方式也就改变了复合材料的微结构和宏观结构, 同时必然减少紧固件及紧固环节, 使得结构的紧凑性(减重)和承载的合理性(高性能)大大增加, 带来性能的提升和价格的降低。在此基础上, 飞机结构整体化技术应用而生。

飞机结构整体化技术研究的杰出代表来自美国的CAI计划。以F-15和F-16战斗机为例, CAI计划分析认定, 通过结构整体化技术可以将其11000个金属零部件减少为450个, 600个复合材料零部件减少为200个, 135000个紧固件减少为600个, 其直接获益是减量化和提高制造效率, 特别是大幅度降低了结构的装配成本^[1]。

作为飞机结构整体化技

术的基础, 首先是复合材料结构整体化设计技术, 然后是整体化制造技术, 而复合材料的高性能化技术则是二者的支撑, 如此形成了先进复合材料技术学科的材料技术、设计技术和制造技术三足鼎立的架构。

在材料与制造技术方面, 整体化技术的突破口是用机械化、特别是自动化的制备代替传统铺层的手工活和手工艺活, 而无论是机械化/自动化的铺放技术还是手工操作的铺放技术, 将小尺度的碳纤维丝组装成为工程尺度的大型结构, 其共性基础是复合材料结构跨尺度、多层次的定型和预制, 包括半柔

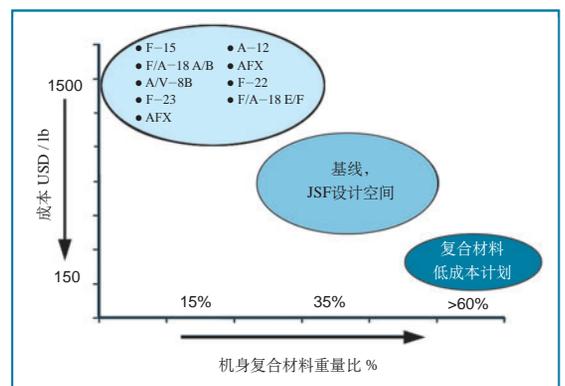


图1 美国军机复合材料现状与CAI计划的低成本目标

* 国家“973”计划项目课题资助 (2003CB615600)

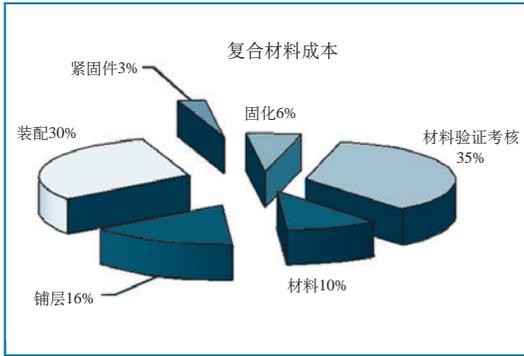


图2 复合材料结构件的成本构成

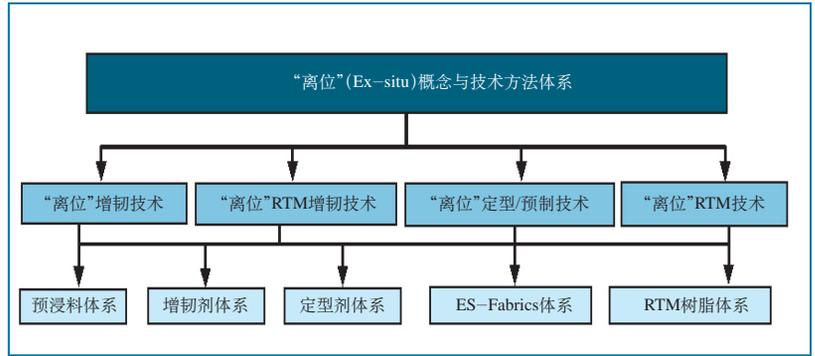


图3 “离位”核心技术体系与材料体系

性预浸料的铺放预制以及干态柔性织物的定型与预制等,复合材料结构的整体化程度最终取决于预制件的整体化程度。

在国家“973”计划项目的支持下,课题组在本世纪初首先提出了复合材料“离位”增韧的新概念,初步实现在保持复合材料比刚度和比强度的同时,大幅度提高复合材料的冲击分层损伤阻抗与容限,形成一个系列化的材料新体系。而针对复合材料整体化的定型与预制等共性关键技术,课题组又研究发展了预浸料和干态增强织物的表面功能化附载技术,在合适的热力学、动力学条件以及温度-时间-黏度转换(TTT- η)工艺技术的控制下,不仅可以获得“离位”增韧的高性能复合材料^[2],还可以为液态成型(树脂转移模塑/RTM技术、树脂膜浸渗/RFI技术)的复合材料整体化结构提供具有定型/增韧双功能的预制织物新材料、新技术和新装备,如ES-Fabrics织物新材料体系等(图3)^[3]。

2 定型预制技术

2.1 几个专业用词

为了更清楚的表述和讨论,首先需要定义几个专业用词。

1) 定型技术

把干态纤维束或纤维织物进行定型处理,以克服其蓬松、松散状态的工

艺操作被定义为定型技术(tackification technology)或预定型技术。定型处理采用的工艺材料称为定型剂(tackifier或Binder),定型处理的产物称为(预)定型的纤维束或织物(tackified tows/fabrics),也包括预制的织物(preformed fabrics)。换言之,定型技术就像是头发的美容定型,发胶就是定型剂。

2) 预制技术

把(预)定型的纤维束或织物进一步制备成为形状和尺寸“近净型”的工艺操作可以定义为预制技术(prefforming technology)。预制技术采用的工艺材料也是定型剂,预制工艺的产出称为预制体(preform)。预制技术类似于装饰艺术里的“布艺”,它通过定型预制使得柔软的布料成为立体的结构。一般情况下,定型技术与预制技术有上下游关系,它们是复合材料预制体技术链上两个相互依存的环节,因此这两者也常统称为预成型体技术。

2.2 重要工艺特征

预制体必须满足一系列的工艺要求才能保证复合材料制件的定型效果和近净型尺寸,而这些主要取决于增强材料的种类、织物结构、定型剂种类和预制体的形状和制造工艺等,以下是预制体需具备的一些重要工艺特征。

1) 结构均匀性(包括微观结构):最终近净型的自支撑预制体来自预制

工序,这些工序中的许多参数必然影响预制体结构的均匀性,而这种预制结构的均匀性势必又会“遗传”到后续的液态成型工序,因此,均匀的预制结构具有非常重要的工艺意义,并对最终产品的性能和质量产生重要影响。

2) 预制体的浸润性:未用定型剂处理的纤维束或织物上带有自身的涂层,经过定型剂预处理,这些初始表面可能被定型剂覆盖,因此采用定型剂预处理和预制时,一方面必须考虑定型剂树脂对纤维束的浸润性和界面结合,另一方面还要考虑这些定型剂与后续液态成型树脂的界面浸润性。在一定条件下,也可以通过定型剂处理提高预制体的浸润性。

3) 浸渗特征:预制体最基本的要求是必须被液态成型树脂(如RTM树脂)充分浸渗、浸透,并且要在尽可能小的压力和尽可能短的时间内完成,这其中的一个重要参数是预制体总体(平均)的渗透率。渗透率是增强织物材料或预制体的固有特性,它与预制体的纺织结构和预制特征密切关联,特别是纤维的体积含量和定型剂的性质等。

4) 抗冲刷性:高性能、高质量的复合材料制品往往要求高纤维含量,而为了提高工艺效率,通常需要在一定的成型温度下施加比较大的树脂注射压力,这就要求预制体应具有良好的

抗冲刷性,而抗冲刷能力与定型预制的效果有关。

5) 工艺性:采用定型剂预处理时,定型剂必须有一定的黏接力,能够提供原先比较蓬松、柔软的织物必要的整体性,便于剪裁下料;近净型的预制体必须有一定的刚度(自支撑性),这些都依赖于织物的结构,预制体的设计、定型剂的用法和用量等。

6) 预制体的表面平整性:对于表面质量要求高的制件,预制体的表面质量也会影响着最终产品的表面质量(外观)。

7) 回弹和松弛效应:通过定型剂预处理的预制体必须保持形状和尺寸的稳定,能够经历一定时间和一定环境条件的变化,同时还必须具有适当的压缩弹性和可压缩率,否则将导致后续工艺合模的困难,甚至无法合模。预制体的回弹(spring in)和松弛效应必须不影响近净型的稳定性。

8) 一致性:预制体的几何形状和尺寸必须接近于实际制品的几何形状和尺寸(近净型),达到特定几何形状的能力取决于预制体的制备方法和相关工艺参数,但不论采用何种制备方法都需要考虑预制体的一致性问题 and 批次的稳定性。

显然,复合材料定型预制技术是以增强织物为载体的一种表面附载技术(fabric-based),而碳纤维连续织物本身就是一类工业产品,由此,课题组提出了ES-Fabrics织物的新概念(图3)^[5]。利用ES-Fabrics织物技术,可以以工业生产的规模和较低的成本,为高性能复合材料产业提供具有增韧效果的新一代连续碳纤维预制织物;又由于碳纤维织物的表面还是RTM、RFI等液态成型复合材料必不可少的定型表面,通过在连续碳纤维织物表面附载定型剂等工艺功能组分,进一步提升了这种新一代连续碳纤维织物的附加值^[6]。沿着这条思路,可以实现的表面附载还可以包括其他各种必要的层间功能组分如导电剂、电磁吸收剂、导热组分等,从而引领碳纤维织物产品的升级换代。

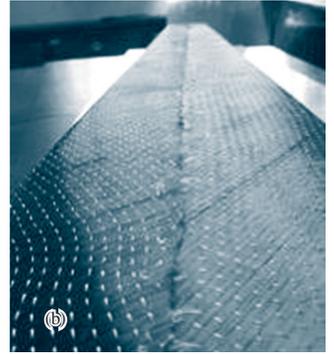
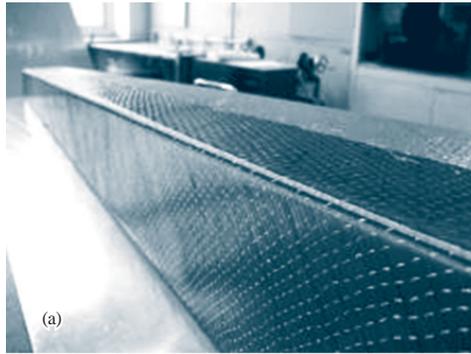


图4 ES织物的芯模包覆效果示意

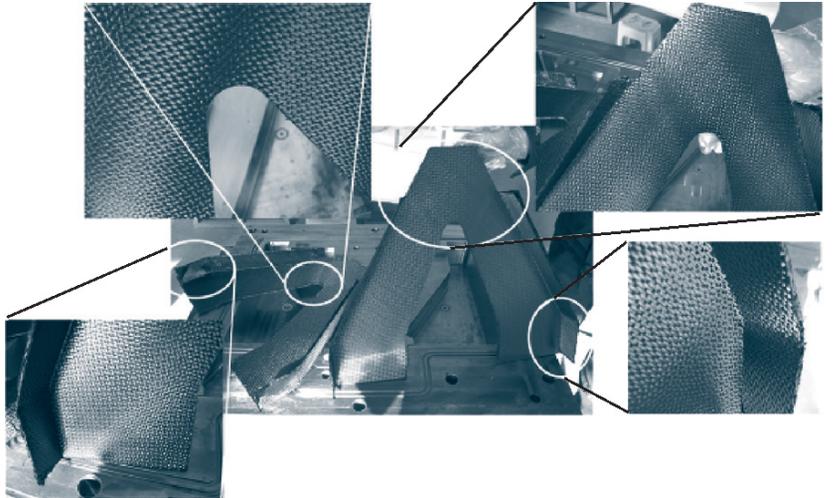


图5 复合材料支架典型预制件及其局部放大照片

3 ES-Fabrics多功能织物

口盖、盒形件、帽形材、梁结构等都是飞机结构里非常常见的复合材料制件形式,这种制件的定型预制技术带有比较普遍的典型性,因此,ES-Fabrics织物(简称ES织物)定型效果的评价验证试验选择了这类的制件。试验研究采用了“离位”树脂定型剂。结果表明,这种粉体定型剂经过100-110℃烘房的定型处理后,经过3个月的室温储存,仍能保持适当的黏性,可满足使用要求。图5为采用“离位”粉体定型剂预制ES织物G827(T700单向织物)包覆盒式芯模的效果^[7]。该芯模为截棱锥形状,带有两段台阶,并具有小半径圆角过渡。ES

织物为单切口整体包覆,并且对纤维的方向性有较高要求,但由图4(a)可见,盒式芯模的圆角包覆效果良好,形状、尺寸均十分准确。由图4(b)可见,ES织物的包覆接缝处贴敷紧密,两侧拼接完整,黏结良好。

综合性预制件典型结构如图5所示,这是一种典型的支架结构,通常是金属铸件结构或金属焊接结构。由图可见,定型预制的ES干态织物支架预制体完全自支撑,弯边基本保持直角,即使这种直角弯边转弯也能够保持形状基本稳定,在圆弧处的剪裁完整准确,没有出现纤维束的散落,这种预制结构的完整性大大提高装模的效果及RTM成型制造的产品质量效果。最终

型号应用验证工作证实,用这种RTM制件替代原先的金属铸件效果良好,减重效果明显。

另外一个综合性的预制件结构分解见图6,这是一个厚壁框架结构,包括几个直角和正方形的框架等组成,通常也是金属铸造结构。定型预制的ES干态织物U型直角完全自支撑,形状稳定,而正方形的预制件的结构也更为稳定。最终的型号应用验证工作也证实,用这种RTM制件替代原先的金属铸件效果良好,减重效果明显。

图5、图6的干态织物预制结构的组装都有一个共性关键点,这就是在各弯边的三角区的填充问题(图7),包括开放直角弯边的填充和封闭直角弯边的填充两类。其中,填入这个区域的填充材料要求形状预制和纤维体积分数稳定^[8]。实际工作表明,在整件复合材料制件RTM成型后,造成质量缺陷的往往就是这样的填充区,因此准确设计和制备填充区预制带在实际操作中非常重要而关键。图8(a)所示为一个编织预制的三角区填充带的照片,其形状符合设计而基本准确。图8(b)为一个编织预制填充带填入三角区的照片。最终的型号应用验证工作证实,用这种填充物研制预制件,效果良好,减重效果明显。

在实现定型效果的同时,为检验ES-Fabrics织物的力学性能应用效果,选择不同预制复合材料样件的静态力学性能进行了比较,结果显示,ES-Fabrics织物的应用没有改变这些复合材料的静态力学性能,而对用定型/增韧双功能ES增强织物制备的复合材料样件评价其冲击后剩余压缩强度性能,发现复合材料的抗冲击损伤性能有了显著改善。

4 定型预制技术体系发展

飞机结构整体化技术要求转变观念,走“设计-材料-制造”一体化的发展新路,而就制造技术而言,预制定型技术是复合材料结构整体化液态成型制造技术的一个核心和关键。复合材料制件的形状精度和尺寸精

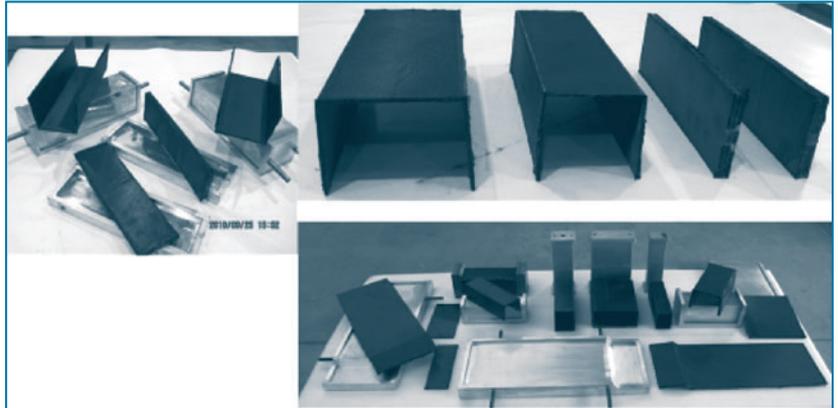


图6 复合材料框架典型预制件及其局部放大照片

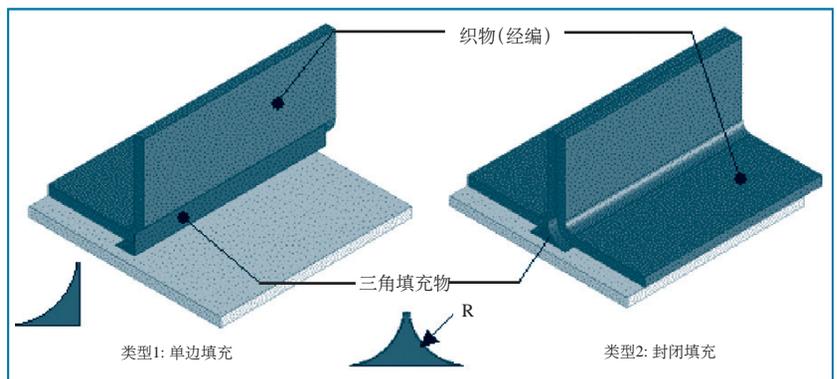


图7 复合材料填充区示意

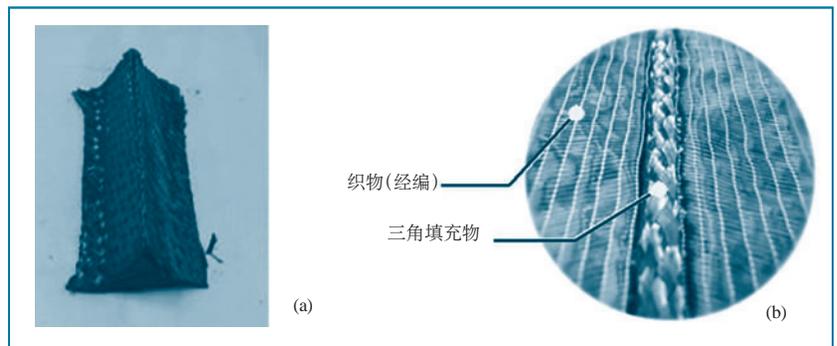


图8 复合材料编织预制填充带(a)及其填入后的局部放大(b)织物三角区填充

度在很大程度上取决于预制件的近净型程度,而近净型技术高度依赖预定型技术与定型剂材料技术,其技术增值还要求实现复合材料的增韧高性能化。

课题组在初步研制建立了一个比较完整的定型剂材料体系,包括反应型、非反应型和热塑性高分子的定

型剂材料,也包括独立配制的定型剂材料和“离位”配制的定型剂材料等,可以与环氧树脂、双马来酰亚胺树脂,聚苯并噁嗪树脂基体等匹配。出于定型预制的目的,这些定型剂材料可以具有不同的物理形态,主要包括干态粉体、溶液或悬浮液、以及干态的多孔膜材料等(图9)。利用这些

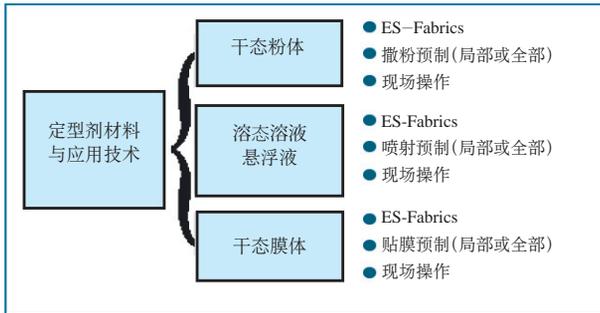


图9 定型剂材料及其施工应用技术体系

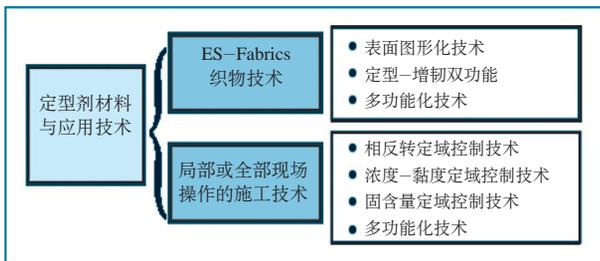


图10 表面附载技术体系

定型剂材料,研究发展了基于增强织物的多功能连续化表面附载技术^[9]及其装备,拥有全部自主知识产权。

值得特别指出,图9中的ES-Fabrics织物及其应用技术是一个通用的材料技术平台^[10],是一类规范化、标准化的工业产品,其市场定位目标是覆盖一个宽泛的应用领域。ES系列织物产品具有自主知识产权,包括注册商标。

ES-Fabrics本身可以附载粉体、也可以附载液态的定型剂,如溶液或悬浮液,当然也可以附载多孔薄膜材料。另外,ES-Fabrics可以附载单一的定型剂、附载单一增韧剂,也可以同时附载这两者,而附载的组分可以有不同的质量含量,表面图形,附载粒子的微结构等等。除ES-Fabrics这样的规范化、标准化的工业产品外,还可以提供各种定型剂材料“个性化”的应用技术,这主要包括干态粉体在纤维或织物表面局部或全部的撒粉定型预制技术,溶态溶液或悬浮液的喷射定型预

制技术和干态多孔膜的贴膜定型预制技术等。这些“个性化”的定型预制技术即可以针对一个具体预制体独立使用,也可以与ES-Fabrics协同使用。在“个性化”的技术开发和使用过程中,控制定型剂的富集区域和富集形貌是关键,为此,可以发展出不同的技术诀窍,例如相反转的定域控制技术,变浓度-黏度的定域控制技术,变固含量的定域控制技术

和多功能化的定域控制技术等(图9和图10)。

5 结束语

总之,基于增强织物的表面附载技术具有相当大的变化空间和技术诀窍,它所提供给液态成型复合材料技术的新型增强织物体系可望引领这一领域的创新型发展。

AST

参考文献

- [1] John D. Russell. Composites affordability initiative: transitioning advanced aerospace technologies through cost and risk reduction. <http://ammitiac.alionscience.com/quarterly>, 2007
- [2] 益小苏,安学锋,唐邦铭,张子龙,纪双英.一种提高层状复合材料韧性的方法:中国,01100981.0[P]. 2008-06-22.
- [3] 益小苏,安学锋,张明,唐邦铭,马宏毅,刘刚.一种液态成型复合材料用预制织物及制备方法:中国,ZL200510075276.7[P]. 2010-09-08.

[4] Donna Dawson. Composite spoilers brake Airbus for landing [J]. High-Performance Composites, July 2006. <http://www.compositesworld.com/articles/composite-spoilers-brake-airbus-for-landing>.

[5] 益小苏,安学锋,唐邦铭,张明.一种增韧的复合材料层合板及其制备方法(国家发明专利、国际发明专利/PCT).申请日:2006-07-19,申请号:200610099381.9. PCT申请日:2006-11-07, PCT专利号:FP1060809P.

[6] 益小苏,刘刚,张尧州,刘燕峰,胡晓兰,安学锋.一种促进树脂流动的高性能预制增强织物及其制备方法:中国,申请号201010581859.8[P].申请日:2010-12-13

[7] 高军鹏,安学锋,张晨乾,何先成,益小苏.一种纬线强化定型的织物预制体的制备方法:中国,申请号201010536243.9[P].申请日期:2010-11-09.

[8] 益小苏,安学锋,崔海超,刘刚.一种复合材料编织预制填充带及其制备方法(国家发明专利),申请号:201010581863.4,申请日期:2010.12.13.

[9] 梁子青,唐邦铭,益小苏.一种液态成型复合材料预制体的制备方法:中国,ZL200510075276.7[P]. 2008-12-10.

[10] 益小苏,安学锋,张明,唐邦铭,马宏毅,刘刚.一种液态成型复合材料用预制织物及制备方法.中国,ZL200510075276.7[P]. 2010-09-08

作者简介:

益小苏,中航工业树脂基复合材料技术首席技术专家,教授,博士生导师,主要从事高分子材料、复合材料研究。