

# JEC COMPOSITES 中国

面向中国的先进复合材料工程技术

# 5

## 航空航天 Aerospace

复材制造  
Composites Manufacturing

3D打印  
3D printing

革新方案  
Innovation Solutions

ISSN 2707-3459

[www.JECcomposites.com](http://www.JECcomposites.com)

2021.4

# 任凭风浪起 稳坐钓鱼船

助力鱼竿制造商改进表面质量 提高结构完整性 降低生产成本

作为您可靠的合作伙伴，我们坚持以创新为己任，助您在运动器材领域不断前行。肯天提供丰富的Chemlease®产品系列，包括各种类型的封孔剂，脱模剂和清洗剂，有效改善生产力，提高生产效率，助力产品拥有理想的表面质量以及高结构完整性。并且极低的脱模剂转移使后处理工序更为便捷，从而有效节约生产成本。

请扫描二维码关注肯天微信或访问肯天官方网站，联系我们获取更多信息！



复材制造 Composites Manufacturing



2 3D打印

大规模复合热塑性塑料增材制造之现状  
Large-scale Additive Manufacturing of Composite Thermoplastics – Where Are We?

4 航空航天

融合的主要结构：未来空中交通的门户  
Infused Primary Structures: the Gateway to Tomorrow's Air Mobility

专栏：航空航天 Special Report: Aerospace



8 非热压罐 (OOA) 制造工艺

复合材料气动结构的非热压罐制造工艺  
Out-Of-Autoclave Manufacturing Processes for Composite Aerostructures

11 天然纤维

天然纤维加固的卫星面板可更清洁的探索太空  
A Satellite Panel Reinforced with Natural Fibres for Cleaner Space Exploration



12 维护

飞机复合材料结构的自动自适应加工  
Automated Adaptive Machining of Aircraft Composite Structures

14 工艺

复合材料飞机部件的二次成型界面  
Overmoulded Interfaces for Composite Aircraft Parts



17 轻量化

轻量无内衬碳复合材料低温箱  
Lightweight Liner-Less Carbon Composite Subscale Cryotank

18 工程仿真

提升远程滑翔之速度  
Gliding Farther and Faster

解决方案 Innovation Solutions



20 前沿应用

复合材料推动了最后的前沿  
Composites Push Back the Final Frontier

22 航空航天

向太空发射火箭  
Slinging Rockets into Space

JEC COMPOSITES中国

Industrial Communications Group Ltd.

魏斯礼 Bruno Wase-Bailey  
董事总经理 Managing Director  
www.ChinaEngineeringMedia.com  
www.JECcomposites.com/china

艾康商务咨询 (上海) 有限公司  
上海市静安区武定路555号8楼837室  
电话 Tel: 21 3251-7225

订阅期刊 Subscription: subs@icgl.com.hk

承印: 上海钦钦印刷科技有限公司 Printed by Shanghai QinQin Printing Co. Ltd.

广告业务 Advertising:

中国大陆 China: 21 3251-7225, sales@icgl.com.hk  
国际: Nathalie Pradier, +33 1 58 36 14 12, pradier@jeccomposites.com  
Frédéric Reux, Editor-in-Chief/Media Director, reux@jeccomposites.com  
Nelly Baron: Marketing/Communication Director, baron@jeccomposites.com

2020年版权所有 © Copyright 2020 JEC Composites Magazine. All rights reserved.  
JEC集团授权Industrial Communications Group Ltd. 独家出版《JEC Composites中国》. 经授权的所有材料都隶属于JEC Composites Magazine. 未经书面许可, 不得进行任何形式的复制和转载.  
国际发行刊号: ISSN 2707-3459

# 大规模复合热塑性塑料增材制造之现状

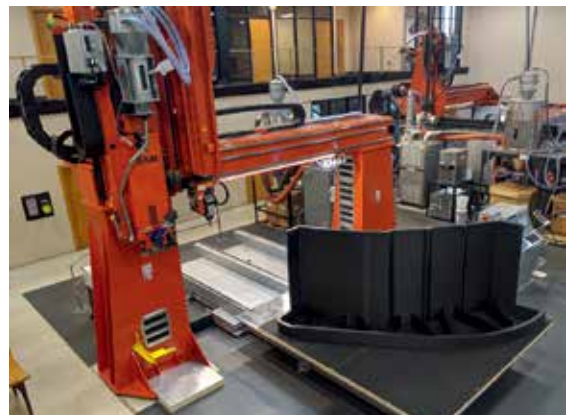
## Large-scale Additive Manufacturing of Composite Thermoplastics – Where Are We?

在美国，热塑性复合材料的大规模增材制造正迅速由实验室开发转向工业应用。如今，3D 打印模具几乎每天都被成功地用于大型航空航天零件的高压釜生产。

Ken Susnjara, CEO, Thermwood Corporation



在 Thermwood 10'x20' LSAM 设备上修整一个由 ABS 制成的船壳。整个打印、组装和裁剪过程甚至不到 10 个工作日。



这个通过 LSAM MT 打印出来的大型演示部件是 20 个类似部件之一，将这些部件组合起来就成为一艘大型游艇的船体生产模具。

固定需钻孔或加工的航空航天部件通常采用大型 3D 打印夹具。从铸造模具到自动客车底盘的各种产品都在使用大规模的增材制造进行常规生产。航空模具和工具的主要供应商应其最大客户的特定要求购买大型增材制造系统。如今，这一领域的发展相当迅速。

### 近净成型

上述应用所用工艺通常被称为“近净形状”，即首先使用大的珠子打印零件，使其尺寸略大于成品零件所需的尺寸。然后，零件被加工或修整成最终尺寸和形状。这一过程比生产相同零件、模具和工具的传统方法快得多，也比使用小打印珠和薄层打印到净尺寸快得多。

这最终能够成为现实的一个原因在于，使其在工业规模上发挥作用所必需的技术确实存在，而且运作良好。在目

前的美国市场上，有一家公司似乎在提供大规模增材制造技术方面脱颖而出。尽管市场规模不大，但实际上，过去一两年在美国销售的所有大型增材制造机都来自印第安纳州南部的一家公司。这家公司就是 Thermwood 公司。他们称其系统为 LSAM（发音为 L Sam），它代表大规模增材制造。使用 Thermwood 机器，打印和修整都在同一台机器上完成。如上所述，他们的机器每天都在打印和加工零件。打印过程是颗粒状而不是细丝状的，它生产的零件非常坚固、完全熔融、均匀，也可以像玻璃一样保持真空。

这种可维持真空的能力对大多数航空航天工具来说是至关重要的。工艺、设备和相关软件都非常精良，适合于严格的工业生产。

该设备通常可处理各种材料，从室温

材料（如 ABS 和聚碳酸酯）到高温材料（如 PPS、PSU、PESU 和 Ultem）。

### 真正强大的机器

这个设备的图片已经在网上发布了一段时间，但是这些图片并不能真正地表达机器实际的范围和大小。

这些机器是采用厚钢板通过激光切割、打标、焊接和退火，最终形成一个难以置信的坚固结构。它们几乎有 6m 高，打印机架和修整机架安装在同一台机器上。一个 6m 长的工作台系统重 32.6 吨 (MT)，而 12m 的系统则超过 46.3 吨。打印机架本身重约 4 吨，打印头本身重 1245 至 1361kg，具体取决于安装的熔芯。

尽管重量如此巨大，但打印头和微调头依然可以以每秒 0.9m 以上的速度移动，且精确度可达千分之一厘米。这才是真正坚固的大型机器。



通过 VLP (垂直层打印) 打印出的零件图像。这种方法可以轻松打印出很长的零件。



一个采用 Thermwood LSAM 打印和部分修整之后的零件在不同阶段的样子。



上图是与美国海军水面作战中心合作开发的一艘潜艇的非机密级机头。这一部分用了 11 小时 45 分钟打印出来。修整部分又花了 5 个小时。

### 53 个专利

这些系统中使用的打印工艺和打印头设计非常独特，目前已获得 53 项专利。

为了更好地理解这一点，让我们首先看看打印过程。

LSAM 机器在室温下打印，使用的是相当大的打印珠。该系统使用颗粒化聚合物作为原料，几乎可以运行任何目前可用的热塑性材料。珠子被印成圆形，但被温度控制的压缩轮压平，变成 5mm 厚、21mm 宽的珠子。一旦打印，珠子开始冷却，但它并不均匀。外部表面先冷却。在某一点上，珠的外部表面已经冷却到足以支撑下一个珠子，但珠子的内部仍然很热。当下一层打印出来时，它会迅速熔化冷却的表面外壳，压辊将新的热珠与前一热珠的中心熔化，形成一个固体、均匀、无空隙的结构。

针对这个过程的一个重要事实是，每层的打印时间取决于聚合物冷却到足以支撑下一层所需的时间。是聚合物冷却速度而不是打印头输出决定了打印层的速度。不同的聚合物冷却速度不同。在高温下打印的聚合物比在低温下打印的聚合物冷却得更快。聚合物中添加的

增强剂也会影响冷却速度。例如，碳纤维增强聚合物比玻璃纤维填充材料冷却得更快。

聚合物冷却过程决定了打印一层所需的时间。此时，打印头的输出决定了在可用的层时间内可以打印多少珠子。打印头输出越大，可打印的部分就越大。

标准 LSAM 打印头使用 40mm 熔芯，通常可以以约 91kg/h 的速度打印大多数聚合物。

这相当于每分钟约 12m 的打印珠子。高温聚合物通常有 1½ 到 2 分钟的铺层时间，也就是说每层有 18 到 24m 的打印珠子。低温材料通常会加倍。

这就意味着，40mm 的熔芯对于几乎所有应用都是足够的。

### 两种可能的方法

当需要很大的零件时，有两种方法可以使用。第一个是被称为垂直层打印或 VLP 的过程。在这种方法中，安装一个垂直的工作台，使其沿水平工作台的长度移动。该部件在打印台上垂直分层打印，这意味着该部件可以和机器的长度一样高。到目前为止，大约有一半的

机器安装了这个 VLP 选项。另一种处理长零件的方法，如直升机叶片模具，是沿着零件的长度方向打印。

由于每层所需的珠子长度，这种方法需要更高的打印头输出，以在可用的层时间内完成每一层。

为了适应这一点，开发了一个 60mm 的熔芯。一个标准的 LSAM 打印头可以配备 40mm 或 60mm 的熔芯，您可以在不到一个轮班从一个到另一个。60mm 熔芯输出速度 227-259kg/h 之间。

这就意味着每分钟打印珠子超过 30 米。

根据使用的聚合物和零件的几何形状，现在可以打印出珠子长度 2 到 5 倍的零件。更大的输出打印头也是可能的，然而，迄今为止，即使是 60mm 熔芯的应用也很少出现。

由于聚合物的冷却过程决定了打印速度，具有更高导热系数的聚合物可以显著提高逐层打印的时间。随着新材料的不断出现，更高输出的打印头将变得更加重要。如今，增材制造的大多数应用都涉及模具、刀具和一次性项目。显著加快的打印速度可能会打开生产实际最终产品之门，虽然数量可能有限，但这仍然会带来新的可能性。包括 3D 打印压缩模具在内的其他几个领域的工作仍在继续。

这项工作可能会为该技术带来新的、意想不到的应用。然而如今，已有越来越多的公司正在为这项新兴却已然成熟的技术找到了有价值的应用。

更多信息：[www.thermwood.com](http://www.thermwood.com)



Thermwood 提供全系列 LSAM 尺寸，几乎可以适应任何应用。

# 融合的主要结构：未来空中交通的门户

## Infused Primary Structures: the Gateway to Tomorrow's Air Mobility

使用注射工艺制造航空航天应用的主要结构，可以帮助该行业实现循环周期和成本降低的目标。特别是对于新兴的 UAM 市场，这可以降低进入壁垒，因为建立制造业需要成本较低的设备。这也可以作为整个航空航天工业的技术驱动因素。

Léo Richard, Project Engineer, Alexander Schug, Project Engineer, Composite Cluster Singapore

在过去的 60 年里，复合材料在航空工业中的崛起，导致目前商用飞机的先进复合材料含量突破了 50% 的标志阈值，并不断增加。虽然复合材料最初被引入二级结构（天线罩、控制面等），但现代应用将它们集成到一级结构中而进一步推动。现在像波音 787 或空客 350xwb 这样的飞机在主要结构上依靠都依赖于复合材料部件，比如机翼、舱壁或中央翼盒。

### 预浸料霸权

尽管双方的主要参与者在其复合政策和这种“复合化”所针对的结构特征上存在分歧，但他们仍有一个共同的行为：他们目前的大多数方案主要集中在现在传统的预浸料/热压罐组合上。这可以通过机翼或机身结构中遇到的相对平坦或略微弯曲的部件来解释，这些部件是涉及自动纤维放置（AFP）或自动铺带（ATL）技术的机器人化制造方法的良好候选者。

一旦沉积，预浸料在热压罐中压实和固化，使得制造商大幅降低孔隙率水平（低于航空航天行业通常接受的 2%）。尽管高压釜是昂贵的设备，但预浸料昂贵的材料（固有的，并且通过冷冻运输、储存、库存积压和有限的使用寿命的成本）及其整合是一个漫长的过程（一些组件甚至需要在铺层的不同阶段进行预固结），这些方法对制造商来说主要担忧的是质量和性能增加。这种从军事部



Alice Wing 在 2019 巴黎航展上。采用灌注技术制造了完整的复合结构。

门转化来的技术被应用到了民用航空业，民用航空业依靠几十年的成熟应用和大量的标准实践数据来进一步加强这些过程。简单地说，这项技术是昂贵和缓慢的，但非常强大，有效和完善的记载。

如今，预浸料在整个航空复合材料领域得到一致认可：它们是实现认证实体所要求的的质量的最可靠的解决方案。然而，随着航空工业全面进入 21 世纪，并为即将到来的第三次航空航天革命做好准备，传统的制造方法受到了挑战。SGL Carbon 公司副总裁兼航空航天主管 Andreas Erber 博士分析说：“商用

飞机的制造率预期会更高，空中出租车和无人机市场也在加速发展，使用更多的非可变部件，这需要替代材料概念和制造技术来应对经济挑战。”的确，未来的航空航天部门将寻求提高生产速度，同时确保质量能够满足规格要求。现在，许多人都在问：哪些行业成熟的制造流程能够满足这些标准？预浸料霸权的最大挑战者很可能是灌注工艺。

### 灌注的挑战

灌注技术是非热压罐（OOA）技术更大家族的一部分。近年来 OOA 的开发

# AOC力联思树脂 我们携手 /



## 专业专注，持续创新，造就卓越性能

AOC力联思集团是全球领先的高品质树脂供应商，为全球增强复合材料和非增强浇铸聚合物行业供应高品质聚酯树脂、乙烯基酯树脂、胶衣、着色剂、专用添加剂。产品广泛应用在管罐防腐，电子电气，娱乐设施，船艇和海上设施，汽车和轨道交通等诸多领域。

AOC力联思集团美洲区总部位于美国田纳西州科利尔维尔，欧洲及亚洲区总部位于瑞士沙夫豪森，中国区总部金陵力联思公司设于南京，其工厂和研发中心位于南京化学工业园区。

通过分布于全球的制造和物流网络，AOC力联思为世界各地客户供应成熟全面的产品，提供高效服务和定制化解决方案，以及全程供应链管理。

欢迎致电025-85493888，或访问[www.aocaliancys.com](http://www.aocaliancys.com)，详细了解AOC力联思集团的产品、技术、服务和应用案例。



AOC力联思官方网站



AOC力联思中国微信公众号



aliancys

确实有所增加。正如他们的名字所强调的，这些是制造技术，逃脱了金-陶土固结的约束。浸渍基料通常是干纤维和树脂，两者都比航空航天预浸料便宜得多。纤维既可以人工沉积，也可以通过放置技术，以铺层形式或 3D 预成型。由聚合物和固化剂制成的树脂，可以是单组分或双组分体系（组分在注射前混合）。两者都有优点和缺点。第一个是控制成分剂量，并在较高的温度下固化，因此留出时间给灌注完成（但需要随后的烘箱固化）。然而，在某些情况下，可能需要在室温下相对快速的固化。双组分系统将更加充分，以确保固化周期与灌注时间表的设置匹配。

这就给我们带来了为什么灌注技术比典型的高压釜压更复杂真正的原因。

“为了保证由灌注制造航空航天零件制造质量和一致性，一个受控并且稳定的过程是绝对必要的。这需要一些工作量，但可以实现。随时间和温度的变化树脂制造商可以保证一定的适用期和粘度，模具制造商可以在狭窄的范围内制造整个尺寸温度均匀的模具，NCF 生产商可以确保织物具有一致的渗透性。”Saertex 亚洲技术营销部的 Helge Haberkern 解释说。再加上现有的热压罐设备成本、重新考虑装配线的需要以及为解决非预浸料零件的认证而付出的额外努力，航空航天灌注方法在很大程度上仍处于概念阶段。

但是，不要搞错了：主要的参与者肯定在关注灌注和它所承诺的诱人的改进（生产率的提高、集成结构的制造、装配时间的缩短等）。Helge Haberkern 补充说：“对于每个航空航天零件来说，灌注也许不是完美的生产工艺，但对于某些零件来说，灌注无疑是最佳的选择，因为它的优势包括无限的零件尺寸、较低的资本支出、较长的材料保质期以及与预浸料相比降低的运输和储存成本。”对于小型和二级结构件，灌注的使用案例很多（例如 A400M 货舱门、A380 襟翼轨道组件、B787 和 A350 后压力舱壁）。更大的项目也在进行中，最明显的是俄



第一个原型是在新加坡制造的。

罗斯制造商伊尔库特及其 MC-21 机翼目前前的开发。

### 走出热压罐，为未来的航空运输服务

如果对成熟的传统航空航天公司来说，走出热压罐仍然是一个挑战，那么可能恰恰相反，对正在崛起的城市航空机动性（UAM）市场来说是最有意义的。UAM 概念正以指数级的速度提高人们的认识，大量初创企业和小公司提出了原型和概念。从四旋翼飞机和多旋翼飞机，到带有旋转推进系统的飞机。它们中的大多数都有一个共同点，那就是它们的结构与传统飞机不同，而且它们体积小得多，最多只能搭载 12 名乘客。

灌注技术带来的一个主要优势是复杂结构的集成制造，例如带加强筋的蒙皮，因此减少了部件数量、装配步骤和紧固接口的需要（这需要大量的认证工作）。除了这些结构上的考虑之外，UAM 初创企业还有另一项资产：它们并不一定要使用预浸料材料和工艺，因为它们没有需要摊销的热压罐投资。此外，使用灌注技术意味着开始制造第一部件的投资门槛要低得多，特别是在原型阶段。虽然灌注技术，特别是真空灌注，对设备的投资较低，但更重要的是要充

分了解工艺，并投资适当的工艺开发。与使用预浸料相反，在原料中已经存在低孔隙含量和高纤维体积分数的，对于灌注工艺，这些特性强烈地依赖于工艺的实施。特别重要的是入口的位置和数量，它们的开启顺序和流动介质的准确定位。否则会有更高的空洞含量甚至是干燥区域的风险，特别是对于具有复杂几何形状和更高层压厚度的较大零件。然而，正确进行的真空灌注可以得到均匀、准确的纤维体积分数（公差为  $\pm 1\%$ ），并达到低至 0.2% 的空隙率值，比上述航空航天工业的阈值低十倍。。

### 自动化和精简

由于 UAM 公司的目标是取代传统的汽车、火车或公共汽车运输，他们也在争取比传统航空业更高的数量。每年超过 1000 台可视为标准。这些数字需要考虑具有高自动化水平的制造技术，如汽车行业所遇到的技术，如果没有这些技术，所需的生产率就无法实现。对于纤维铺设，有几种自动化技术可用，如干燥 AFP、定制纤维放置（TFP）或编织。这些技术为全自动生产过程提供了很大的潜力，因为由于纤维很容易获得复杂的预制件。

灌注工艺，特别是真空辅助灌注工



艺, 如真空辅助工艺 (VAP<sup>®</sup>), 仍然需要大量的人工操作。在传统的工艺设置中, 膜和真空袋不能通过自动化工艺定位。一些自动化方法虽然已经开发出来, 并在实验室规模上进行了成功的测试, 但还没有实施到批量生产中。另一种方法是树脂传递模塑 (RTM) 工艺, 但这需要更精细的模具设计和更大的工具和灌注装置投资。考虑到 UAM 结构的较小尺寸和目标产量, 与传统飞机的较大部件相比, 它们更适合 RTM 工艺。

同样重要的是生产线的精简。在大规模生产的背景下集成灌注技术需要重新考虑整个生产线: 材料输入、预制件、工艺、无损检测, 以及生产站点之间的高效运输 (如真空辅助的机器人预制件转移) 和适当的质量保证控制。希望 UAM 公司能够依靠物联网和工业 4.0 等当代趋势, 高效地设计工厂。未来的挑战是很多, 但在复杂性、集成和稳健性方面的重大努力是实现航天工业所要求的质量水平和高生产率的关键。

## 即将到来的现实

在 UAM 车辆制造环境中实施灌注似乎仍然难以实现, 但是第一批产品已经进入市场阶段。以色列初创企业 Eviation 最近在 2019 年巴黎航展上公布了其首款 Alice 原型机, 这是一款全电动 9 座通勤飞机, 其结构几乎完全由碳纤维复合材料制成。该飞机由电传系统控制, 最大航程为 650 英里, 因此旨在替代短距离到中等距离的陆路通勤。通过各个



## 真空辅助工艺<sup>®</sup> (VAP<sup>®</sup>) 的概述

Daniel Fernández, Composyst 公司研发经理

许多参数影响真空灌注的结果。灌注的质量和最终的复合结构将取决于生产参数和技术诀窍的适当协调。从树脂系统到增强纤维的渗透性, 从加工温度到灌注工具的质量和适当使用耗材来引导树脂流动的每一个选择: 所有这些因素以及许多其他因素都是决定性的。幸运的是, 只要你身边有合适的搭档, 这些问题也是可以解决的。树脂生产商提供具有可靠粘度、适用期和机械性能的各种系统。同时, 模具制造商已经掌握了超大型工具的生产, 优化了表面质量和均匀的温度控制。增强纤维生产商同样可以确保各种织物具有一致的透气性。选择 VAP<sup>®</sup> 膜等产品的真空灌注专业人员将所有这些结合在一起, 这提高了整个过程的安全性, 抑制了厚度梯度, 同时大幅降低了部分孔隙率 (<0.2%)。

航天工业已经意识到这一点, 几十年来一直在批量生产中实施真空灌注工艺。其优势是不可抗拒的: VAP<sup>®</sup> 是一种稳定可靠的工艺, 具有高度的再现性, 几乎不受零件尺寸的限制, 预浸料的生产、运输和存储成本可以大大降低。

此外, 不需要巨额的资本投资来购买昂贵和高维护的热压釜。

方面的创新, Alice 追寻的设计结合了最先进的材料, 技术和概念。

在 Kasaero GmbH、Fraunhofer IGCV 和 Admiralty Pte Ltd 的支持下, 新加坡复合材料集团 (CCS) 负责机翼和整流罩结构的设计和制造。在早期的设计阶段, 由于许多原因, 灌注作为自然的制造方案出现。灌注的内在的高度集成组件的能力确实是组装过程中的关键。

机翼部件, 包括蒙皮、肋骨和翼梁, 都是单独灌注的, 但在完全固化之前, 会是部分固化 (为了能够处理它们)。最后的结构形成了一个整体的复合结构, 用的紧固件数量非常有限, 这是一个实

质性的优势。在批量生产场景中, 当考虑到连接结构所需的认证程序时, 这无疑高效的。这样的解决方案使 CFRP 的总体积含量达到 90% 以上成为可能。作为一个示范原型, 制造主要涉及人工技术。选择获得空客专利的 VAP<sup>®</sup> 是因为其优势, 并尽可能降低成本。然而, 使用这些方法进行初步研究可以让工程师尽早开始工艺开发, 创造出在系列生产研究开始时可以利用的知识。然后, 重点将放在同一系列方法之间的技术转化上 (例如 VAP<sup>®</sup> 到 VARTM)。

尽管如此, 扩大规模仍将带来许多挑战: 对现有部件实施过程自动化, 提高生产率, 同时确保稳定的航空航天质量, 等等。纺织品和液体树脂工艺将是全球航空航天工业中第二个强大的材料技术。Erber 博士最后评论道: “根据组件的几何形状、批量大小和应用, 除了预浸料和热压罐技术外, 纺织和灌注将成为合格和可接受的技术, 并作为标准航空航天材料数据库的一部分。”截至 2019 年, 大规模生产的灌注式初级结构可能仍然是例外, 但这一现实无疑比以往任何时候都更接近。

更多信息: [www.compositecluster.com](http://www.compositecluster.com)

# 复合材料气动结构的非热压罐制造工艺

## Out-Of-Autoclave Manufacturing Processes for Composite Aerostructures

热压罐技术被一级和二级供应商广泛用于为领先的飞机制造商制造气动结构。这项技术允许生产非常高质量的轻量化零件，因为如果程序正确执行，热压罐压力对碳纤维层压板施加的力能够高度压缩截留的空气和挥发性气体，否则这些气体将在固化树脂中形成间隙，从而在成品复合材料零件中产生问题。然而，要实现这些结果，除了工艺成本高外，还需要高度专业化，这主要是由于周期长和能耗高。

María Eugenia Rodríguez, Director of Composites Unit, EURECAT Technology Centre

航空工业和研究中最重要的部分。在制造业领域，首要任务之一是寻找能够取代昂贵和耗时的工艺的智能技术。基于这个原因，复合材料制造商正在寻找非热压罐（OOA）制造工艺，以确保复合材料气动结构中的空隙率最小，设备更便宜、效率更高，同时实现结构应用的热压罐质量。

OOA 加工提供了一种更可持续的制造替代方案，由于不用热压罐而产生的能源节约和减少层压板制备时间而节省了成本。

### 树脂传递模塑（RTM）

液体注射工艺（LCM）如树脂传递模塑（RTM）和真空灌注（VI）由于以较低的成本和较高的生产率生产出高质量的复合材料而受到关注。

RTM 技术尤其优于预浸料的使用，例如由于其低能耗、减少加工时间、减少挥发性有机化合物的暴露以及生产高纤维含量的复合材料，直接降低了加工成本。它还能够提高生产量，并有可能包括根据特定行业的需要定制的工艺变化。然而，该工艺需要对模具和工具进行高初始投资，涉及高型腔填充时间，并且根据不同的类型，产生高孔隙含量，而航空部门接受的最大孔隙含量为 2%。

诸如 RTM 和 LRI 等 OOA 工艺还不够成熟，特别是对于承受严重荷载的主



Eurecat 中试工厂和 RTM 技术

要结构的制造。

### 协作项目

凭借在轻质复合材料结构制造工艺方面的丰富经验，EURECAT 技术中心领导并参与了多个 Clean Sky 2 项目，以研究 OOA 工艺在复合材料气动结构开发中的技术可行性，更具体地说是使用 RTM 和热成型技术。Clean Sky 2 是欧洲最大的研究项目，旨在开发最先进的技术，以减少飞机的二氧化碳排放和噪音水平。在欧盟地平线（EU's Horizon）2020 计划的资助下，Clean Sky 2 通过与主要原始设备制造商和参

与者商定的具体活动，有助于加强欧洲工业伙伴关系和竞争力。

EURECAT 具有高度的横向性，除了在航空航天领域从事轻型结构部件的工作外，还从事汽车、铁路和其他行业的工作。它专门从事复合材料（热塑性塑料和热固性塑料）的开发和先进制造，应用循环经济和可持续性原则。复合材料 4.0 是其战略领域之一，应用数字孪生技术和自动化来改进制造过程。

该中心最近的 Clean Sky 2 项目与复合材料航空结构的 OOA 制造工艺有关，包括：

- COFRARE 2020 (GAP 编号



3 级“曲线框架”



框架演示器的预制件制 框架演示器的预制件去毛刺

82126)：“高生产率和低成本复合材料框架制造的非热压罐工艺开发”，其中 EURECAT 是项目协调方，DEMA 和 ABETE 是工业合作伙伴，LEONARDO 是项目负责方。

● WINFRAME 4.0 (GAP no.821323)：“区域飞机机身框架地面演示用全尺寸创新复合窗框架”，EURECAT 是项目协调人，SOFITEC 是行业合作伙伴，LEONARDO 是项目负责方。

● KEELBEMAN (GAP 编号 785435)：“针对龙骨梁制造的解决方案”，EURECAT 是项目协调方，SOFITEC、CT 工程集团和 CETMA 是合作伙伴，空客是项目负责方。

● COFREAR 2.0 (GAP 编号 717070)：“用于高生产率和低成本复合材料框架制造的非热压罐工艺开发”，DEMA 是项目协调方，EURECAT 和 APPLUS 是合作伙伴，LEONARDO 是项目负责方。

这些项目得到了欧盟地平线研究和创新计划下的“Clean Sky 2”联合项目的资助。

## 机身框架的 RTM 制造

下一代 COFRARE2020 项目的目标是为 Clean Sky 2 机身/座舱一体化地面演示机制造全尺寸复合材料框架和剪切拉杆。该演示器由 Clean Sky 2 的区域飞机 IADP (创新飞机演示平台) 组织。

支线飞机的复合机身框架、剪切带和相关拼接件的制造将采用先进的、创新的工业 OOA 复合材料制造工艺，与传统的金属溶液相比，以至少相同的总体生产成本，显著降低零件重量（以及相应的航空公司运营成本）。

## RTM 技术被选择用于开发机身框架。

在这个项目之前，COF2.0 评估了树脂注入工艺，如区域飞机机身框架的 RTM 和 VI。EURECAT 是该研发项目的技术和示范开发合作伙伴。COFREAR 2.0 的主要活动是研究一种新的材料组合（RTM6 树脂系统，增强无卷曲织物（NCF）干碳纤维），并确定 RTM/LRI 工艺要点、相对机会和机身框架生产的可能关键。

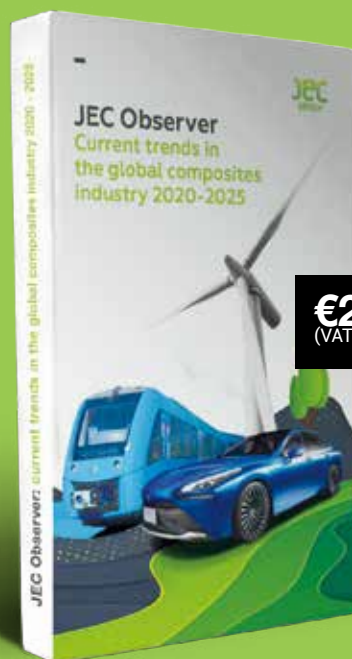
# JEC 复合材料刊物

增强您的复合材料知识

何为 JEC 观察家

2020-2025

全球复合材料行业的当前趋势



这份新鲜出炉的 JEC 集团出版物是针对全球复合材料市场的最新研究，提供了到 2025 年的预测增长。鉴于疫情危机的性质及其影响范围，2020 年成为了极其特殊的一年。复合材料的所有应用领域在全球各个地区都受到影响，除了风能领域还在持续繁荣发展。

“2021 JEC 观察家”报告还提供了充分的理由认为，随着氢能激发人们日益增长的兴趣，未来会更加美好，并且涉及环境的各个方面 -- 材料，废物，加工，回收 -- 都代表着可以抓住的机会。

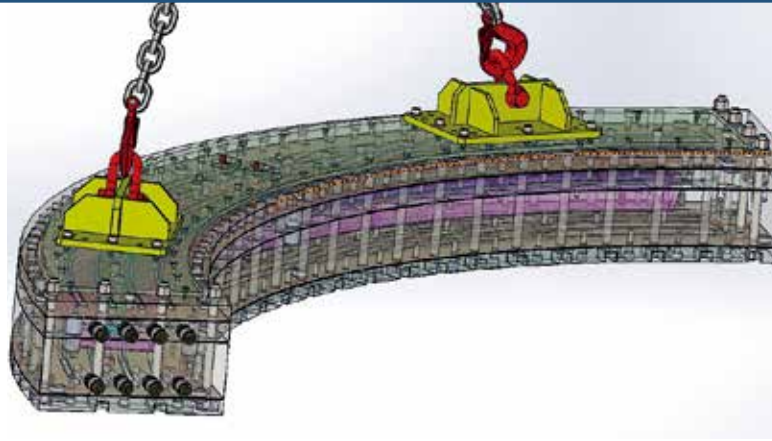
订购链接 [www.jecomposites.com/e-store](http://www.jecomposites.com/e-store)



JEC GROUP



用 RTM 技术制造框架演示器



复合材料框架制造模型

Cofrear 2.0 项目采用积木法金字塔结构，进行 L1、L2 和 L3 测试活动，并最终确定弦长为 2 米的全尺寸框架演示器的设计：

- 第 1 级（平板）：基本结构试验和数值模拟，以测试适合最终框架的初步堆叠顺序；

- 第 2 级（直框架）：对二级试样进行初步堆码顺序分析，以验证材料在 LEONARDO 提供的显著拉伸 / 压缩载荷情况下的性能；

- 第 3 级（弯曲框架）：通过三点弯曲试验验证之前步骤中收集的所有信息，以修改和完善数值材料模拟。

- 全尺寸（框架演示器）：TRL 从 4 到 5 的演变，大型原型。在这一步中，由于框架的复杂性，有必要定义和设计预制件制造工具。

对于框架演示机而言，由于机身框架的几何和功能特点以及 RTM 技术的要求，有必要确定干纤维预制件的施工策略，干纤维预制件是干预 RTM 工艺并直接影响零件结构质量的主要因素之一。

在预成型制造阶段，定义了一种重叠策略，用于适应大型航空结构件中的干织物，并将该策略用于制造全尺寸演示器，有助于减少周期时间的工具设计使其处理时间显著降低。同时，从尺寸、结构和缺陷产生三个层面上分析了重叠的影响。通过加入粘合剂或粘结剂，研究了不同的预制件固结策略。

研究结果表明，为了提高织物的悬垂性和复制织物骨架的曲率，选择织物的尺寸和截面是非常重要的。

另一方面，粘接剂的使用使得最终

的预制件具有非常精确的几何结构，但是它对织物造成更大的污染，这也会对框架的机械性能产生负面影响。因此，未向预制件施加粘接剂。此外，还包括一个去蜡步骤，以实现良好的压实和良好的定位织物进入模具。

关于 RTM 工艺，经验证，尽管重叠不同，但预制件的注射和浸渍没有问题。

值得注意的是，在整个项目中，在所有级别都进行了相控阵无损检测和机械试验，以验证工艺和复合结构零件。

该项目的主要成果是 COFRARE 2020 年的起点。

基于这一经验，COFRARE 2020 计划正在推动高性能环氧树脂 RTM 加工的进一步创新，重点是：

- 提高生产率：根据在制备复杂几何结构预制件（COFRARE 2.0）过程中获得的知识，一旦确定了每个框架的层压板，就使用定制预制件，以减少每层的切割和堆叠时间。这一策略使改进和提高生产率成为可能，同时减少了准备阶段的错误。

- 基于近净形状原材料的 RTM 框架模具，以优化原材料和加工成本：在 COFRARE 2020 项目中，制造了不同的框架几何结构，因此设计了一种通用的模架，允许根据每个框架几何结构更换不同的插入件。

- 通过模具传感（温度、压力、树脂到达、树脂固化）对 RTM 过程进行监控，以优化过程并缩短固化周期：通过监控 RTM 过程，可以对 RTM6 等高性能树脂的注射进行微调。模具传感允许定性地确定最佳注射粘度，从而减少可

能的零件缺陷，如未浸渍区域。还可以实时控制树脂固化，以确定零件何时可以从模具中取出（缩短循环时间）。另一方面，在 COFRARE2.0 中研究的填充时间参数的实时控制，对 RTM 模具的优化设计有很大的帮助。最后，模具传感有助于质量控制，因为过程的可重复性和树脂固化进行了检查。

同时，根据为拼接发布的背景研究，目标是实施快速、高效和可靠的自动化制造过程，从而提高生产率和最佳资源组织。

## 结论

RTM 工艺需要一个封闭的模具，它可以在两侧提供良好的表面光洁度。它使用浸渍有低粘度树脂的干燥设备。该过程从预制件的构造开始，在预制件中，干织物被放置在模具上，有时使用热塑性或可溶性基体粘合剂。关闭模具，压实预制件并施加真空压力。然后在低正压（1 至 8 巴）下注入树脂，固化后，在树脂要求的温度下提取零件。

选择合适的材料并根据零件几何形状设计预制件，RTM 是一种与复合材料气动结构高度相关的制造工艺。

模具设计是保证大型结构均匀加热和优化树脂注射工艺的关键。在设计阶段，Eurecat 应用有限元模拟工具研究模具在加热和树脂注射期间的行为，以改进模具设计。

RTM 工艺监测和控制为缩短复合材料气动结构制造中的固化周期提供了巨大的潜力，与热压罐技术相比，RTM 工艺大大降低了成本。

更多信息：[www.eurecat.org](http://www.eurecat.org)

# 天然纤维加固的卫星面板可更清洁的探索太空

## A Satellite Panel Reinforced with Natural Fibres for Cleaner Space Exploration

Bcomp 与欧洲航天航空局 (ESA) 共同开发了第一个天然纤维增强卫星面板，以使空间探索更清洁、更安全。作为 JEC 创新奖的入围者，卫星面板展示了 powerRibs™ 和 ampliTex™ 可持续轻量化技术的多功能性。

Régis Voillat, Project Manager Aerospace & Manager, Sustainability at Bcomp Ltd.

在 ESA 清洁空间倡议的框架内开发的生物基复合材料卫星结构面板展示了即使在极端环境中，Bcomp 专有的 powerRibs™ 和 ampliTex™ 天然纤维技术所拥有的非凡多功能性。

示范面板是 Bcomp 与 ESA、RUAG Space 和斯图加特 IRS 的专家密切合作的成果，由 ESA General Support Technology Program 资助。它是 JEC 创新奖的入围者之一。

### 提高安全性

根据 ESA 的说法，上升的东西必须下降——除了在太空中。生物基复合材料为“为消亡而设计”创造了新的机会——空间系统硬件的有意设计，使其在任务结束后重返大气层时可以完全烧

毁，从而对人类、地面基础设施和环境更加安全。根据 ESA 减少空间碎片的要求，允许通过受控重返进行处置的设计往往成为强制性的。

具体来说，有针对性的降解窗口设计成 Bcomp 的试样，创造有针对性的等离子进入点，由于 powerRibs™ 的增强而不损害面板的刚度。

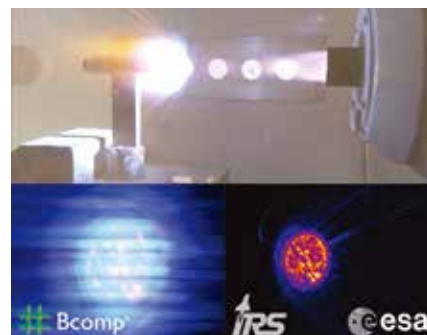
### 空间测试

除了提高安全性，该生物基复合材料卫星面板耐受温度范围较大，并有足够的强度，可在火箭发射的重载情况下携带敏感设备。同时，由于 ampliTex™ 的粘弹性和 powerRibs™ 的增强网格，与标准全铝板相比，其抗震阻尼显著提高。

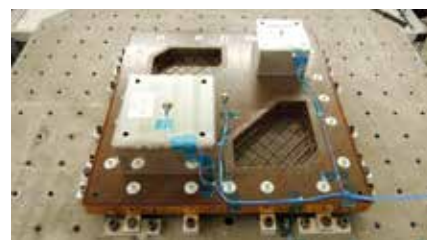
一个长期的测试活动证实了高抗强



生物基复合材料演示卫星面板。  
(所有图片都由 Bcomp 公司提供)



材料样本的大气再入模拟。



在测试配置中安装有重质量的试样。

紫外线辐射，以及机械和热循环疲劳。天然纤维极低的热膨胀也使其与碳纤维增强聚合物结构高度相容。

### 未来潜力巨大

随着航天工业日新月异的增长，向低成本、低冲击和高可降解材料的转变必须迅速发生。解决方案，如 Bcomp 的 powerRibs™ 和 ampliTex™ 增强材料提供了成本效益，低环境影响，高可降解性和多用途的生物基复合材料技术。这种潜力不仅限于航天器的二级结构，还可以应用于雷达罩、天线甚至发射装置。

更多信息：[www.bcomp.ch](http://www.bcomp.ch)

免责声明：此处表达的观点绝不能代表欧洲航天局和上述公司的官方意见。

### 该项目由以下各方合作：

- Bcomp 公司开发了可持续的天然纤维轻量化解决方案，用于从体育到太空的高性能应用；

- 欧洲航天局 (ESA)：在一般支助技术方案的框架内，欧洲航天工业发展前沿空间技术，使各项任务能够发现宇宙、了解我们的环境、导航、教育和拯救生命。它是欧空局的最佳工具之一，有助于确

保欧洲在全球市场上的竞争力，创造就业机会，并使欧洲保持在技术创新的前沿。

- RUAG Space 是欧洲航天工业产品的主要供应商，专门生产用于卫星和运载火箭的部件；

- 空间系统研究所，专门研究和教授空间技术和空间应用，从空气热力学到小卫星到尘埃天文学。

# 飞机复合材料结构的自动自适应加工

## Automated Adaptive Machining of Aircraft Composite Structures

由于结构部件任务的复杂性带来的挑战，自动化在飞机维修中的应用并不广泛。每种飞机类型和发动机配置使用不同的复合材料部件。在使用中，它们在不同的位置表现出不同的损伤区几何形状。Lufthansa Technik（德国汉莎技术）公司和 iSAM 公司开发了一种自适应自动加工系统，以满足这种复杂性，同时满足具有挑战性的精度要求。

Dr. Henrik Schmutzle, Head of Composite Manufacturing, Lufthansa Technik AG, Bernd mann, CTO, iSAM AG



自适应机器人系统的直观编程与应用。



修补机头天线罩划痕。



风扇罩门：去除蒙皮和蜂窝状材料。

Lufthansa Technik 公司是民用飞机（从商用飞机到贵宾飞机和特种任务飞机）维护、修理、大修和改装服务的领先供应商。机身相关部件（ARC®）业务部门维修和大修反推装置、天线罩和其他结构复合部件。服务于所有商用飞机和短舱，工作范围的变化是巨大的，即使一些特定的部件经常维修。然而，较长飞行周期后零件几何形状的变化程度明显高于修理公差要求，在某些情况下，公差要求在 0.1 mm 范围内。为了处理这一复杂性，一个高精度机器人配备了一个三维扫描仪和一个主轴，以便执行多种自适应修复操作。

### 现状

目前，复合材料飞机结构的维修是人工进行的。

由于其有限的准确性和可重复性，这是非常劳动，成本和时间密集型。因此，主要飞机结构（如机身）的胶接修补在规模上受到限制。此外，使用的手动过程限制了维修策略，导致技术上不必要

的高材料使用率。

### 解决方案

所开发的自动化自适应机器人系统可应用于航空维修、修理和大修（MRO）中的多种维修过程。它包括以下过程：

- 嵌缝；
- 从夹层结构中去除一层皮和蜂窝芯材料；
- 将钻孔和边缘转移到尺寸过大和未钻孔的替换零件上。

所有这些通用过程都通过一种基于三维扫描数据规划机器人路径的自适应算法来考虑零件的特定几何结构。由于系统设计的几何和操作多功能性，同时关键功能已经开发出来，所以这些过程可以很容易地转移到其他飞机部件。因此，所开发的固定系统可用于处理复合材料零件的任何大型 MRO 设施。该系统可在 18 件套刀具更换机中更换铣削刀具和钻头。提高劳动效率、减少材料使用、加快周转时间和减少备件数量，以及提

高工人和产品的安全性，使开发的系统在整体水平上具有成本效益。

在项目实施过程中，Lufthansa Technik 公司详细说明了所有零件的具体维修工艺，包括单个工艺步骤、参数和公差，考虑到维修工艺从手工工艺到自动化解决方案中可行的人工工艺的改变。iSAM 公司设计、开发和安装了机器人单元，包括控制系统和基于 Lufthansa Technik 公司提供的工艺设计、CAD 和材料信息的三维扫描数据处理。零件搬运系统由 iSAM AG 制造，而各个零件的所有支撑结构和夹具由 Lufthansa Technik 公司开发。其开发的系统可用于三个主要部件组的维修：机头雷达罩（4 种类型）、风扇罩门（5 种类型）和进气罩（2 种类型）。

### 机头天线罩修理

机头天线罩的修复是通过移除玻璃纤维蜂窝夹层的受损部分来进行的。为了将载荷转移到修复层压板上，剩余厚度为 0.66mm 的天线罩蒙皮以大约 1:70

的刮削比进行刮削。这些修理会占用整个天线罩的很大面积。

系统扫描天线罩的实际表面，包括检查中标记的损坏区域。使用图形用户界面，操作者可以在扫描表面上规划修复区域，从而在曲面结构上进行围巾铣削路径计算。在反复铣削和扫描过程中，可获得  $\pm 0.06\text{mm}$  范围内经验证的精度。

## 风扇罩门修理

除刮削外，该系统还能够去除一层蒙皮和蜂窝材料，直至第二层蒙皮的粘层，以进行各种修理。采用自适应扫描/铣削工艺，精度在  $0.1\text{mm}$  范围内。

该工艺可应用于复杂的曲面结构，如天线罩和 CFRP 发动机外壳，如风扇罩门。但不仅是简单地确保精度是一个挑战，补偿热应力也需要一个智能和适应性的过程和铣削策略。在铣削过程中，层和蜂窝材料被去除，从而补偿了制造过程中的热变形。这导致零件在加工过程中的变形明显大于要求的精度，必须在加工过程中加以考虑。

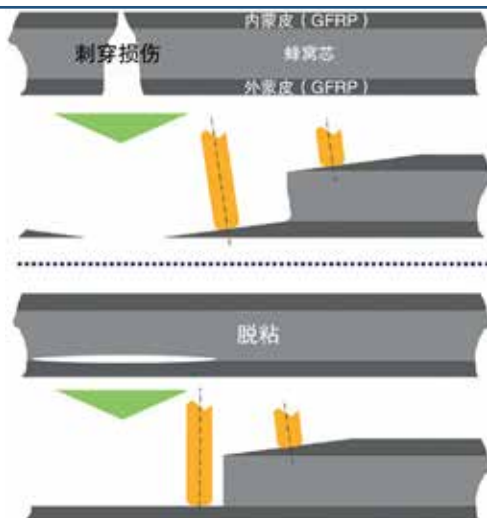
## 进气罩修理

在发动机进气口的进气整流罩上，经常需要拆卸和更换结构部件，例如唇部蒙皮和外筒。进口整流罩前部的唇板是铝制零件，外筒通常是进口整流罩侧面的 CFRP 结构。为此，系统提供了将最终尺寸的钻孔和边缘转移到超大尺寸和未钻孔的替换结构的过程，然后系统自动从零件上拆卸数百个螺栓和铆钉。

### 更多信息

自 2008 年以来，德国 Lufthansa Technik 公司与航空业的多个项目合作伙伴一起，在快速维修和 CAIRE 研究项目下，率先将自动切割和维修作为其创新路线图的一部分。所开发技术的产业化始于 2016 年，根据 Lufthansa Technik 公司制定的维修手册和维修程序，定义了复合材料部件维修流程。在确定了系统的范围之后，来自 Rapid Repair 和 CAIRE 项目的著名合作伙伴 iSAM AG 被选为了工程合作伙伴和系统供应商。

Rapid Repair 和 CAIRE 项目是由德国联邦经济事务和能源部在 LuFo 计划的框架内建立的。



机头天线罩维修。



CAIRE 系统在演示阶段。

## 优势

铣削和钻孔过程的自动化大大提高了加工效率，缩短了维修车间的周转时间。整体精度允许快速处理，很少或没有人工返工。因此，所需备件更少。此外，自动修补减少了预浸料等修补材料的用量。

修复层可以从自动编程的铣削路径导出，使得在铣削仍在进行时切割层成为可能。帘布层可在自动帘布层切割器上切割，允许帘布层嵌套以进一步提高材料效率。

这项技术大大提高了修复质量和可重复性，从而为更大规模的结构修复奠定了基础。机器人的多功能性与自适应软件相结合，使得升级更容易，更具成本效益，从而进一步改善复合材料结构。

自动化系统大大改善了维修人员的工作条件。必须使用特定的保护系统手动进行划痕、复合材料蒙皮和蜂窝去除。

零件的几何形状导致不太符合人体工程学的工作位置，工人需要在头顶或跪着的位置工作很长一段时间。此外，

拆卸数百个铆钉和螺栓可能会使肩部和手臂关节疲劳和磨损。现在，这些任务可以在干净的控制台上自动执行，而不存在暴露于噪音、可吸入灰尘和身体磨损等危险的风险。

对于机头天线罩维修过程，该系统允许在手动过程中进行经济上不可行的操作。在许多情况下，天线罩夹层材料的外皮没有损坏，也不必拆下。

该机器人可以移除内部蒙皮和蜂窝状材料，而不会损坏  $2\text{-}3\text{m}^2$  区域的外部蒙皮。这不仅节省了修补区域的铺设时间，而且还将修补所需的预浸材料减少了 50%。

因此，除了提高效率外，维修也变得更加环保。

此外，集成的研磨粉尘和切屑的真空提取允许更好的废物流控制，并消除了对个人防护设备和相应废物的需要。

新的自动化维修工艺的航空认证是在德国 Lufthansa Technik 公司作为设计方的情况下批准的。

## 结论

自适应机器人系统是第一个在 MRO 工业中实际使用的自动切割系统。

广泛的研究和开发已经产生了硬件组件与自适应算法相结合的正确组合，以达到所需的高精度。

这项技术的飞跃使新的维修工艺能够以更高的效率进行，并为 MRO 行业进一步的维修改进和自动化奠定了基础。

**更多信息:** [www.lufthansa-technik.com/composite-structures](http://www.lufthansa-technik.com/composite-structures)

# 复合材料飞机部件的二次成型界面

## Overmoulded Interfaces for Composite Aircraft Parts

使用二次成型工艺制造碳 /PAEK 飞机零件需要更好地理解热塑性材料之间的粘合性。建立一种表征方法，并进行模拟以确定工艺参数对零件的影响。

Christophe Roua, CEO/Gilles Angin, Project Manager/Arnaud Clou, R&D Engineer, COGIT Composites

热冲压工艺使得碳 /PAEK 复合材料零件的制造周期短，二次成型为飞机零件的功能集成带来了新的机遇。一些样件已经打开了创新窗口，但准备水平仍然很低。一个原因是缺乏对热塑性复合材料（碳 /PAEK）和过度注入增强聚合物（碳 /PAEK）之间的粘结性的了解。其目的是保证在飞机的整个使用寿命内，这两种材料之间的强度传递良好。

### 二次成型工艺

复合材料零件的热塑性二次成型是基于将热塑性聚合物注射到热塑性基体增强复合材料的表面。复合材料零件通常通过冲压制造。二次成型过程可以一次完成，也可以分两步完成。在一次性工艺中，聚合物注入（见图 1）几乎与冲压阶段同时发生。在两步工艺中，首先成形复合材料零件，然后将其放入注射模中进行二次成型。该技术的主要优点是具有净形势、功能集成和加工周期短。

### 航空应用

冲压工艺已被航空工业采用多年。例如，Daher 开发了基于碳 /PEEK 或碳 /PPS 有机板或 UD 胶带的热塑性复合材料零件。

然而，二次成型仍处于示范阶段，许多项目正在进行中，以提高这一有希望的工艺的技术准备水平（TRL）。COGIT Composites 在 SIAE 2015-Le Bourget 上展示了其第一个碳 /PEEK 二次成型零件（见图 2）。

### 航空工业中的二次成型挑战

虽然航空设计单位对复合材料结构分析有很好的理解，但



图 2：一次性的碳 /PEEK 二次成型零件（2015）

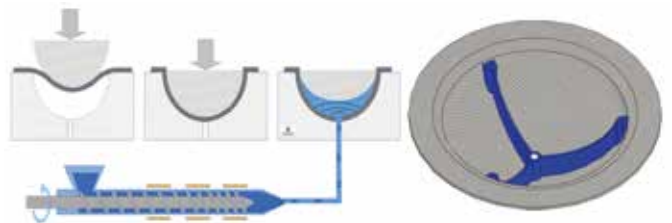


图 1：复合零件上的注射；附加功能

注入零件分析并不常见，尤其是在结构应用中。除了技术试样，其余的担心是复合材料和注塑件之间的粘接力。在机械标准中没有描述表征和评价界面的方法。完整的认证程序仍有待建立。

### 实验

由于不存在标准化测试，因此本研究使用特定试件关注界面内聚性与工艺参数之间的关系。在实验设计阶段，研究了最有趣的过程窗口。然后，确定 G1c 和 G2c 参数，以便将值输入应力分析。

### 二次成型界面的特性测试

由于对二次成型界面没有具体的测试，因此选择必须依赖于处理粘接接头和层间韧性的标准。标准机械试验表征了粘界面（见图 3），端部缺口弯曲试验（ENF）提供剪切值，而双悬臂梁试验和 T 剥离试验提供正常值。

### 复合材料选择

根据 ASTM D5528 和 ASTM D6671 标准，关于 I 型和 II

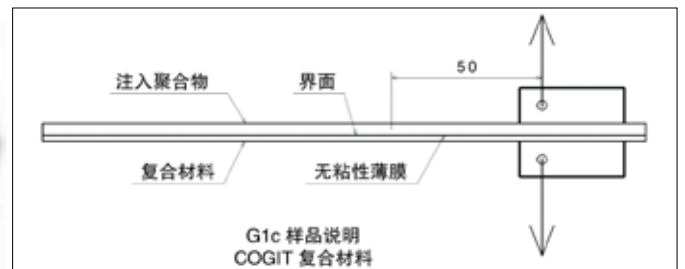


图 3：双悬臂梁试验



型层间断裂韧性，调整试样（见图4），以平衡界面两侧两种不同原材料的行为。由于强度极限和模量不同，厚度是定制的参数。因此，设计了一个特殊的模具来生产试样。

### 特定试样

为了制造试样，模具被放置在一个冲压机上与一个注射单元相连接。主要压力机的特点是：65吨和一个加热到450℃的工作台。对于注射，使用一个45cc的注射螺杆，可以加热到420℃，压力高达2200巴。

该工具可用于研究所有类型的复合材料和聚合物，如PA、PPS、PEI、PEEK和PEKK，无论有无纤维。在这项研究中，碳/PEKK复合材料是用碳纤维增强PEKK（arkema801030）二次成型的。

### 工艺参数调查

其主要目的是在界面处产生足够的能量使复合材料表面熔化，使聚合物分子能够在刚注入的聚合物和浸渍在复合材料中的聚合物之间迁移。通过对影响物理参数的初步研究，选择了本研究的参数。

选择以下参数和范围：模具温度 235℃和 260℃；螺杆温

	模具温度℃	注射温度℃	注射压力	首次失效的测量值 (N)					平均值
				236	232	218	197	227	
1	235	380	700	236	232	218	197	227	222
2	235	400	1200	453	591	497	554	590	537
3	260	380	1200	574	661	563	749	668	643
4	260	400	700	236	236	236	236	743	783

表 1：左：具有选定参数范围的 Taguchi L4 表。右：四种二次成型试件组合的实验结果。



图 4：COGIT 专门设计的二次成型 G1c 试样（原材料：碳/PEKK）。

度 380℃和 400℃；注射压力 700 bar 和 1200 bar。其他参数如注射速度和保压压力是固定的。

以 Taguchi 方法为基础，设计实验以减少参数组合的数量。

**JEC** | 中国区总代理

线下商务合作伙伴  
线上品牌营销推广  
助力中国企业  
实现O2O海内外双循环

关注官方微信  
获取优质行业资讯

一切缘于复材，我们一路相伴

**ZEN3**  
致力打造复材行业整合营销生态圈 洲 | 创 | 集 | 团

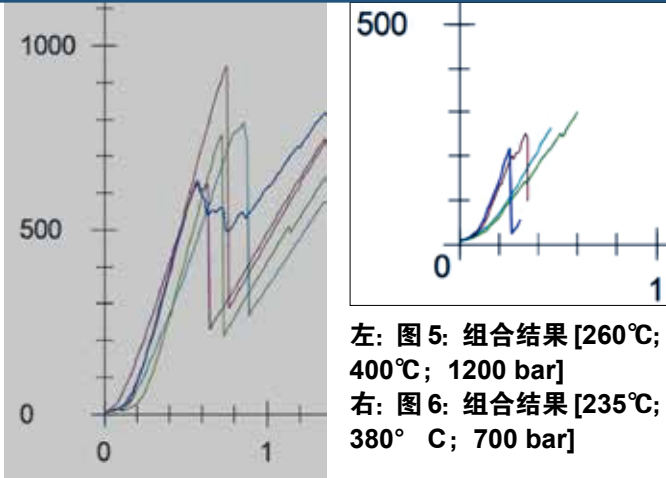
**ZEN3**  
EXHIBITION SERVICE  
洲创展览  
复合材料行业全程供应商

ALL GREATNESS COMES FROM A BRAVE BEGINNING.  
Z-PLUS : EXHIBITIONS, VISIONS, EVENTS

品牌策划服务商

**GLOBAL COMPOSITES ZONE**  
沉浸式交互展示平台  
O2O线上线下同步体验

13681680135 | kgwang@zzen3.com



左: 图 5: 组合结果 [260°C; 400°C; 1200 bar]  
右: 图 6: 组合结果 [235°C; 380°C; 700 bar]



图 8: 30% 填充时间下的流动模拟; 白色虚线显示温度测量点。

Taguchi L4 表在两个位置提出了三个参数水平。水平 I 型试验的后处理侧重于第一次破坏强度 (单位: 牛顿), 以简化分析。也获得了断裂能, 但这里不讨论。当参数组合 [ 模具温度 T°C; 注射温度 T°C; 注射压力 ] 分别为 [235°C; 380°C; 700 巴] (见图 5) 和 [260°C; 400°C; 1200 巴] (见表 1) 时, 两个图表 (力与位移的归一化比例) 显示了最差和最好的结果。

实验活动期间获得的结果总结在表 1 中。

图 7 中的缩微部分显示了界面。上层材料是一种注入式 PEKK 聚合物, 用 30% 碳纤维增强。从左到右, 界面遇到一个连续的纤维, 然后是透明的 PEKK 聚合物包含在层压复合材料中, 最后是一个直立的连续碳纤维。

### 工艺参数对界面失效的影响

随着模具温度和注射温度的升高, 界面处的平均粘结强度提高, 而注射压力降低。但是, 压力对信噪比有正的影响, 即标准差。

### 流动模拟

每个组合的流动模拟 (见图 8) 揭示了界面点注入期间的热历史。他们还提出了在局部尺度上的物理认识。在初始失效开始时, 在界面处测量温度。

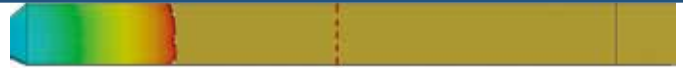


图 7: 界面处的缩微断面

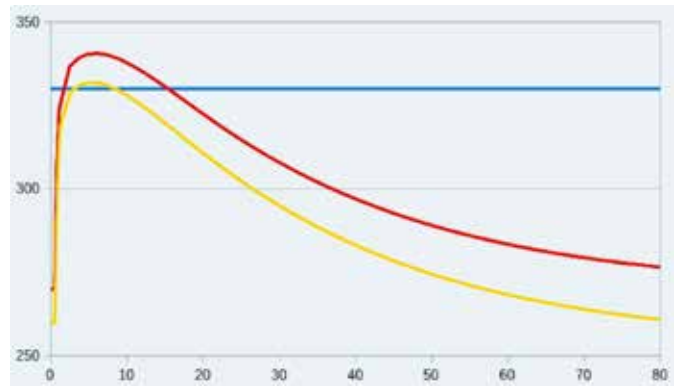


图 9: 每组参数测量点的温度 [°C] 与时间 [s], [235°C; 380°C; 700 bar] 为黄色, [260°C; 400°C; 1200 bar] 为红色, 熔点为蓝色。

层压复合基质的熔点约为 330°C。超过此点后, 每种组合的充模时间不同。考虑到聚合物温度高于 330°C, 可以外推能量通量, 并与失效时的强度进行比较。

### 结果分析

注入的聚合物将热能传递给二次成型的层压复合材料。如果这种能量使 PEKK 基体熔化, 分子在零件间的蠕虫确保了界面的结合力。

在测量点, [235°C; 380°C; 700 bar] 和 [260°C; 400°C; 1200 bar] 试样分别保持在 330°C 以上 5 秒和 13 秒, 并分别加热至 332°C 和 341°C。

在 I 型试验中, [235°C; 380°C; 700 bar] 试样的平均失效强度为 222 N, [260°C; 400°C; 1200 bar] 试样的失效强度明显更高。

通过实验设计, 可以确定影响界面破坏强度的工艺参数。此外, 流动模拟证实了实验设计, 验证了工艺参数, 并提供了额外的信息, 以更好地理解材料之间的界面现象。

下一步的研究可以通过数值模拟进行结构分析, 例如使用粘单元。试验结果与模拟结果的相关性可以保证数值界面参数的可靠性, 为今后工业规模的机械定径提供依据。

### 结论

利用所提出的特殊试件可以研究航空应用中的二次成型, 这有助于测量 I 型和 II 型韧性。实验设计有助于对工艺参数进行微调, 从而为设计团队提供改进的允许值。流动模拟带来了破坏强度和工艺参数之间关系的物理解释。

事实上, 超过熔点所花费的时间和复合材料表面接收到的能量通量决定了界面质量。这些测量和模拟启发了设计机会的领域, 从而通过这个快速、自动化的过程降低了成本。

本文阐述的专业知识为进一步了解二次成型先进复合材料零件的潜力铺平了道路。

更多信息: [www.cogit-composites.com](http://www.cogit-composites.com)

# 轻量无内衬碳复合材料低温箱

## Lightweight Liner-Less Carbon Composite Subscale Cryotank

我们开发了一种无内衬碳复合低温箱取代现有的燃料箱，以实现航天产品重量减轻 25% 以上的目标。

Myeong Jin KiM, R&D Team, Hankuk Carbon

作为韩国航空航天研究院自主研发的项目，Hankuk Carbon 公司设计生产了小型碳复合材料低温储罐，并进行了低温试验，验证了储罐的储存能力，包括耐压强度和气密性。

### 发展背景

在开发碳复合材料小尺寸低温箱的过程中，Hankuk carbon 和韩国航空航天研究院的目标是实现与现有铝燃料箱相比重量减轻 25% 以上的目标，并开发出  $-182^{\circ}\text{C}$  低温试验技术。低温箱是一种无内衬的压力容器，它是通过在可折叠的芯轴上干法缠绕碳 UD 带，然后进行高压釜固化来制造的。通过水压试验、液氮低温高压氦气检测试验和重复水压试验，测试了碳复合材料小型低温箱的强度和密封性能。与低温试验的要求相比，一些结果需要改进，因此正在进行额外的开发和补充工作。为了提高无衬里压力容器的性能，下一步是开发一种低透气性的丝束预浸料或碳 UD 带，以储存液氧并防止衬里泄漏。从而提高设计能力，使铝凸台与复合材料层在低温环境下保持稳定的界面性能。

### 主要特点

碳复合材料低温箱所用材料为碳 UD 带、环氧树脂和铝。无衬里压力容器是采用可折叠铝芯轴和等张圆顶形状设计，结合干式缠绕技术和高压釜固化技术制造的。

### 主要优势

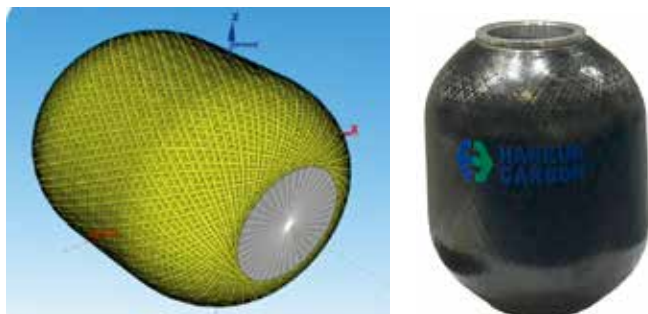
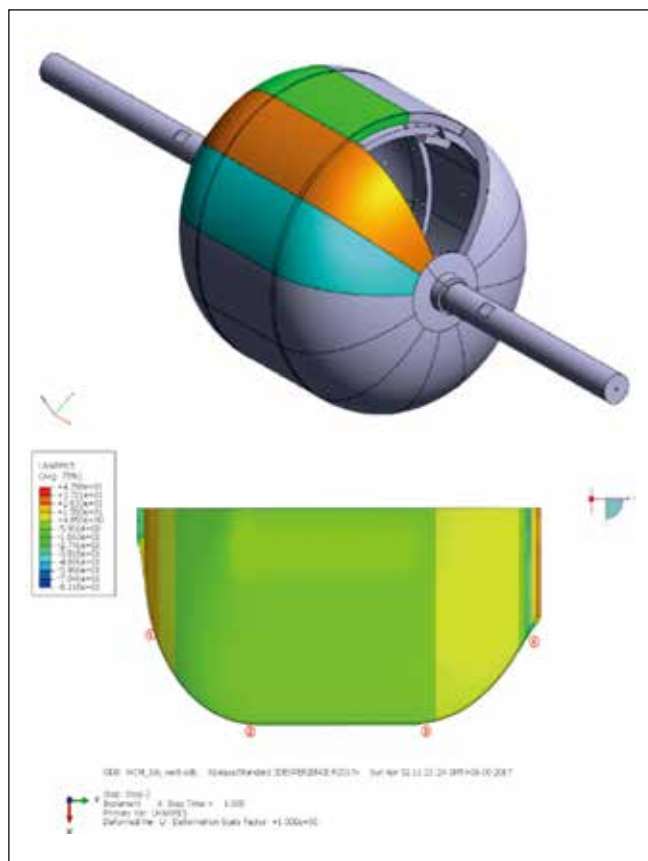
这种新型低温箱的开发很有趣，原因有几个：

- 碳素制造技术使消除内衬成为可能；
- 铝节芯轴采用特殊的设计和制造技术；
- 低温箱比现有的航天用铝燃料箱轻；
- 开发了低温液氧罐的特殊设计和制造技术；
- 由于采用了干式缠绕工艺，该概念节省了时间和制造成本。

### 潜在的应用

这一新发展的目标市场是航空航天工业、空间应用复合材料、推进剂罐和车辆用高压液氧燃料罐。

更多信息：[www.hcarbon.com](http://www.hcarbon.com)



碳复合材料小型低温箱的开发阶段。  
尺寸： $\Phi 550\text{mm} \times \text{L} 600\text{mm}$ ；体积：100-120 L；  
MEOP：5.24 bar；爆破压力：6.55 bar

# 提升远程滑翔之速度

## Gliding Farther and Faster

**为了减少滑翔机机翼上的阻力，让滑翔机飞得更快更远，工程师需减少一小部分的机翼表面积。这项复杂的任务涉及到流体、结构和复合材料等难题，必须同时解决，且只能通过工程仿真来完成。**

Ulrich Simon, Engineer, Alexander Schleicher Segelflugzeugbau (AS Sailplanes)

虽然大多数人认为滑翔机比发动机驱动的飞机更危险，但滑翔机爱好者表示：滑翔机更安全，因为没有发动机，就不会发生发动机故障，也不会引发灾难。技能娴熟的滑翔机飞行员目前可以利用上升热气流的能量浮在空中，可以在空中悬浮 10 个小时以上，完成长达 1000 公里的飞行。但是，要提高滑翔速度和距离，就需要减少滑翔机上的整体阻力。Alexander Schleicher-Segelflugzeugbau (AS-Sailplanes) 的滑翔机工程师利用 ANSYS 流体、结构和复合材料仿真软件设计出一款具有新型复合材料结构的机翼，其滑翔机面积更小，以减少 AS 33 滑翔式飞机的阻力。

### 空气动力学、结构与材料所面临的挑战

比赛中使用的一流滑翔机重量从 400Kg 到 600Kg 不等。飞机的翼展为 18 米，机翼表面积为 10.5 平方米，机翼厚度仅为 10 厘米（约 4 英寸）。尽管机翼的翼展和厚度都非常接近实际极限，但 AS 滑翔机工程师认为其表面积仍有一定的优化空间。即使将表面积减少一丁点，也可以显著减少空气阻力。因此，他们决定将表面积从 10.5 平方米减少到 10 平方米。在 18 米翼展保持不变的情

况下，他们生产出平均气动弦（从前到后的宽度）更小的机翼，因此减少了机翼厚度。虽然这看起来似乎没什么大的变化，但对于一架已经运行一段时间的飞机来说，却是一个巨大的变化，而且已经接近它的最佳设计。这需要团队克服一系列的困难。

减小机翼表面积会产生较小的升力，因此必须改善系统的空气动力学属性以进行补偿。较小机翼的结构单元空间也较小，因此工程师需要改进设计，使机翼在保持强度的同时能够承受相同的载荷。此外，工程师也想弄清楚，在强度和阻力方面，将机翼连接到机身上方是否比连接到机身中部更好。另一个较大的难题是优化翼梢小翼（小而向上倾斜的机翼），减少机翼末端的涡流气流，从而进一步减小阻力。

除金属起落架和机械控制系统外，大多数滑翔机都是用复合材料制作而成的，因此工程师探索了全碳纤维设计，而不是嵌入聚合物基质中的玻璃纤维和碳纤维的常用组合设计。

事实证明，Ansys Fluent 对于空气动力学计算而言至关重要，Ansys Mechanical 对于结构设计而言同样重要，而 Ansys Composite PrepPost 通过复合材料失效准则来分析其应力和应变，

这对新型材料而言也是至关重要的。

### 利用仿真来应对挑战

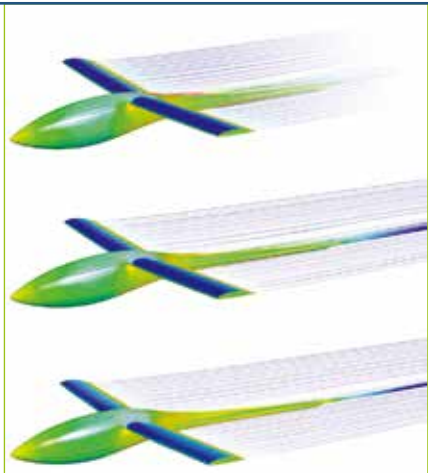
AS 滑翔机工程师利用内部分析工具创作了这个项目，该公司多年来一直使用这个工具，但他们很快意识到，该工具不足以胜任这项任务。事实证明，将作业外包给大学花费太高，不仅缺乏灵活性，而且不利于发展内部专业技术。其中一名工程师在其职业生涯早期曾使用过 Ansys 仿真解决方案，并表示 Ansys 有限元分析解决方案将能够解决这一难题，一个特别有说服力的论点是 Ansys 有 Fluent 中的计算流体力学解决方案，有 Mechanical 中的结构解决方案，以及 Composite PrepPost 中的复合材料解决方案，所以只需要一家软件供应商就能全部搞定。

### 解决航空动力学方面的问题

首先，工程师使用 Ansys Fluent 解决了多年来一直困扰着滑翔机工程师的难题：能够最大限度减小阻力的机翼 - 机身连接位置在哪里？有些人认为，将机翼安装在机身的高处，以防止边界层气流从机身分离，从而减少阻力；另一些人则这样认为，将机翼连接到机身中部需要更小的连接截面，从而能减少阻



图 1: AS 33 滑翔机的 3D 效果图。  
(所有图片均由 Ansys 公司提供)



**图 2：研究了机翼与机身结合处的构型，包括高翼位置(顶部)到中翼位置(底部)。计算结果显示，中翼位置的阻力最小，在高速飞行的时候更是如此。**

力，同时增加了不希望出现的边界流动分离现象。关于这个问题已经持续讨论了很多年，因为无法利用风洞测试来明确地解决这一问题。标准的计算也不足以解决这一问题，因此需要利用仿真。

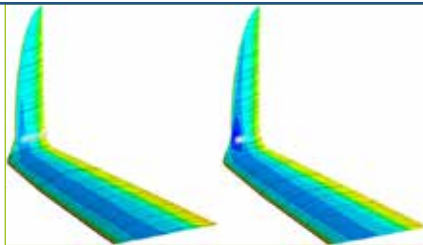
在利用 Fluent 3D CFD 计算方法对六个机翼机身连接位置进行分析之后，工程师确定中翼配置产生的阻力较小，在高速转弯情况下尤为如此，因此他们选择了 AS 33 的中翼 - 机身连接点。与先前的看法不同，事实证明边界层气流的分离并不是一个很大的因素。如果没有 CFD，这一长期存在的争论可能到现在都还没有定论，类似的仿真流程还可用于确定小翼的最佳位置(图 2 和图 3)。

## 结构和材料

新的 AS 33 滑翔机的较小机翼能承受的载荷必须与前代滑翔机承受的载荷相同，甚至更高，因为 AS 33 增加了机身重量，以适应增强的碰撞优化驾驶舱，而且飞行员现在也携带更多的电子设备。若要用较小的机翼支持更高的负载，那就



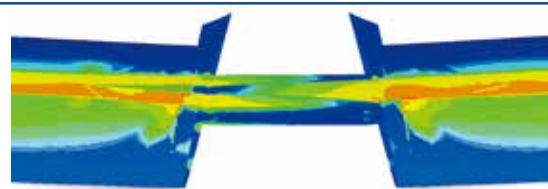
**图 5：Ansys Composite PrepPost 可用于分析复合材料机翼的安全系数。翼弦中心的安全系数最低(橙色)，这是由该区域的翼梁边缘受压所致。**



**图 3：Ansys Fluent CFD 揭示了机翼和翼梢小翼连接区域不利的压力峰值，该设计最初是利用经典空气动力学工具设计的。利用 Fluent 进行设计迭代之后，可以缓解这一问题，获得一定的空气动力效率。**

需要改进结构。工程师决定使用全碳纤维复合材料代替以前使用的碳纤维和玻璃纤维混合材料。碳纤维比玻璃纤维坚固，可以承受更高的载荷。AS 滑翔机工程师意识到，他们需要可用的有限元分析和复合材料仿真来证明这种新的复合材料结构足够坚固，能满足当前任务的需求。

由于纤维如针状大小，所得复合材料的强度具有基于纤维取向和复合材料层片的定向特性。这会增加设计流程的复杂性。AS 滑翔机工程师决定使用 Ansys Composite PrepPost 仿真及其“实际建模”方法来解决这个问题。Composite PrepPost 用于对各复合材料层进行建模，并获得结果布局的特写和详细视图。工程师在整个组装过程中探索了五种不同的复合材料模型，总层数从 100 到 300 不等。然后，他们使用复合材料失效标准和结构中的任何问题来分析结构完整性。结合非常高的载荷、较小的机翼和较小的支撑结构空间，有必要使用 Composite PrepPost 来准确计算每层材料中的应力和应变。大多数其它分析工具无法准确计算应力，也无法揭示可能破坏机翼的复合破坏模式所引起的临界应力峰值。然后，工程师通过添加更多层或更改现有的层属性(如层范围、光纤方向或高负载点的材料)来



**图 4：用 Ansys Composite PrepPost 分析内翼交界处的碳纤维增强塑料结构的安全系数。**

迭代修改其仿真模型，以消除设计中的任何缺陷。

此外，他们还使用 Ansys Composite PrepPost 设计了翼梁，翼梁沿机翼内部纵向延伸，并承担机翼所承受的弯曲力。翼梁制作所使用的复合材料与机翼和机身的材料相同。为了创建坚固的结构，工程师利用 Composite PrepPost 的逐层建模功能进行了虚拟实验，利用易于使用的实体建模功能来评估这一难得的结构部件。借助 Composite PrepPost，他们可以研究机翼的三维应力状态，并探测出任何潜在的问题区域。最后，工程师进行了模态分析，以防止在危险情况下出现导致机翼颤振的振动。

在用于仿真整个滑翔机振动模式的最大模型中，工程师制作了一个由 150 万个单元组成的网格，其中大多数是结构化网格单元。自动网格划分流程耗时约 15 分钟。利用两个计算机内核，线性求解分析用时 20 分钟非线性求解分析用时 10 小时。他们通常开展 10 到 50 次仿真，以优化设计，排查问题及计算多种载荷情况(图 4 和图 5)。

## 验证

最终，AS 工程师为欧洲航空安全局(European Aviation Safety agency)测试了机翼结构，以便让其产品用途获得许可。Ansys 仿真在证明新设计的结构完整性方面发挥了重要作用，最终获得了该机构的许可。

如果没有 Ansys 仿真解决方案，AS 工程师不可能将滑翔机的机翼表面积减少 4.7%(至 10 平方米)，并通过这项测试，利用数值计算来查看模型的高应力区域这使得滑翔机的设计创新成可能。

更多信息：[www.ansys.com](http://www.ansys.com)

本文的部分信息由《CADFEM Journal》杂志提供。

# 复合材料推动了最后的前沿

## Composites Push Back the Final Frontier

天空比以往任何时候都更成为人们讨论的话题，也越来越受到人们的关注。作为航空旅行和货物运输的一个组成部分，我们对这一空间的利用对于与送入轨道的全球卫星网络的通信也至关重要。今天，这两个方面都是结构性的，对我们当前的全球经济模式的运作是不可或缺的。这些行业也带来了巨大的经济、金融和技术挑战，所有这些都是复合材料在这些应用中渗透的机会。

在航空运输部门，必须解决污染管理问题。许多国际项目——CleanSky-1 和 2、欧洲项目 Imothep、美国项目 CLEAN——旨在减少飞机的碳足迹，并延长飞机的寿命。热塑性塑料的应用和已有的许多材料为新的认证扫清了道路。这些进步将意味着著名的“黑色金属”或碳钢的终结。在维

护和维修领域，专业公司通过解决短时间内可以完成的程序，参与减少飞机在飞行中被撞击的索具装配时间。有许多解决方案和服务可以验证复合材料在民用、货运或军用航空领域的应用。

对于空间应用来说，主要的关注点仍然是发射器中机载物体的重量。在这里，复合材料有助于减少整体质量，用更轻的部件取代现有设备。因此，复合材料提供了强有力的论据，如零件设计的灵活性、降低的装配复杂度，甚至因碳而产生的低磁性。另外，小型卫星的趋势提供了许多关键的好处。最后，对于暴露于平流层和对流层的可重复使用发射器，由于其抗腐蚀性能，复合材料是一种明显的选择。



### 保护和减轻航天器重量的复合材料

自 20 世纪 90 年代以来，美国国家航空航天局（NASA）对替代航天飞机的发射装置进行了多次研究。X-37 航天飞机是波音公司、美国空军和美国宇航局实施和支持的多个项目的产物。遥控飞行的目的是验证可能有利于空间运输的新技术，例如推进剂箱、隔热罩、航空电子设备和一些结构元件的设计。

X-37 是美国宇航局开发的第三个空间飞行器演示器。与以前的版本不同，它可以发射到轨道上，然后重新进入大气层。由复合板构成，其结构通过隔热板与外部

元件绝缘。后者在最大暴露部件上使用瓷砖，特别是保护腹部区域。在重返大气层时，复合瓷砖能抵抗氧气对表面的侵蚀，从而保护机翼的前缘。

第五次任务（OTV-5）于 2017 年 9 月 7 日开始，由 SpaceX Falcon 9 号发射。在轨道上运行 780 天后，X-37 于 2019 年 10 月 27 日降落在肯尼迪航天中心。第六次任务计划在 2020 年完成。

[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

[www.boeing.com](http://www.boeing.com)

[www.airforce.com](http://www.airforce.com)



### 确保在飞行条件下修复复合材料

荷兰 Specto 航空航天公司及其子公司 Specto 服务公司（前身为航空服务公司）专门维修由复合材料制成的直升机和飞机结构件。民用和军用运营商将其维修需求委托给私人公司 Specto，无论其涉及复合材料、金属或混合车载元件。由于拥有维修飞行操纵面、结构和雷达罩的经验，该公司有助于缩短在地面的时间，提高受损飞机的寿命。值得注意的是：该公司可以在其主要中心进行维修，也可以通过派遣小组的方式在现场进行工作。[www.spectoaerospace.com](http://www.spectoaerospace.com)



### 一种新型袖珍卫星部署器

意大利专门生产添加剂的制造者 CRP Technology 一直与 Alba 轨道公司合作，该公司向公司、大学和航天机构提供零部件和发射器。他们一起建造了 Albapod2.0。这种第二代部署器的特点是重量和可制造性都经过了更新，以适应 PocketQube 卫星。由于这些微型卫星占地 5 厘米，重量仅为 250 克，这些卫星简直可以“放在口袋里”，它们的设计目的是以比立方体卫星更低的发射成本进行空间研究。

一段时间以来，CRP 技术为航天工业提供了专业技术和 3D 打印设备。在美国航天局和欧洲航空局成功进行脱气试验后，该公司的大部分风形顶线复合材料已被主要发射供应商批准使用。在这个项目中，他们选择了 WindformXT2.0 碳复合材料的选择性激光烧结。这种材料是一种重量轻的聚酰胺，没有脱气，并用类似尼龙的纤维加固。它的纤维提供了部署者所需的韧性和强度，以承受由多颗卫星组成的太空发射。  
[www.albaorbital.com](http://www.albaorbital.com), [www.crptechnology.com](http://www.crptechnology.com)

### 地面监测设施和事件

自 2011 年以来，法国 Delair 公司已经创建并商业化了空中监测解决方案。实时作物监测和分析、获取信息和情报任务，以及保护铁路等基础设施，这些只是涵盖的许多应用领域的几个例子。

作为现有无人机的补充，DT26E 的结构由玻璃纤维、碳纤维和 Kevlar© 制成。它的飞行距离为 135 分钟，通讯半径可达 55 公里。DT26E 能够在 8 分钟内由一个单独的操作员部署，完全适应了昼夜监视任务。它几乎是可听的 (<80dBA (在距离 1 米处转换的声压))，具有零雷达信号的额外优势。这款车型总重 16 公斤，巡航时可以达到 57 公里/小时的速度。它还能在 1800 米外探测到一个人。[www.delair.aero](http://www.delair.aero)

# 覆盖海陆空、 能源、医疗 制造的先进培训

# 免费订阅

**JEC COMPOSITES 中国**  
面向中国的先进复合材料工程技术

**4**  
海事工程  
Marine

复合材料制造  
Composites Manufacturing  
材料选择/仿真/回收  
Innovation Solutions  
轻量化/提升安全的材料，安全  
Materials enabling us Security

**3**  
建筑材料  
Construction Materials

复合材料制造  
Composites Manufacturing  
阻燃性/FST/结构件设计  
Fire Resistance/FST/Structural Design  
革新方案  
Innovation Solutions  
摩托车/汽车  
Motorbike/Auto

www.JECcomposites.com

**JEC中国：**先进的复材加工技术内容独家授权于扎根业内25年的JEC Composites Magazine。  
Advanced composites engineering content licensed from the 25 year old JEC Composites Magazine.

经审核的高层人员可**免费**订阅本刊。Subscriptions in China are **FREE** to qualified engineering managers.

请将以下信息发送给我们。Email us your

- 姓名 Name
- 职位 Job Title
- 公司名称 Company Name
- 公司地址及邮编 Company Address
- 公司网址 Company Website

并注明“我想订阅J” [subs@icgl.com.hk](mailto:subs@icgl.com.hk)  
或登录 [www.ChinaEngineeringMedia.com](http://www.ChinaEngineeringMedia.com)



SpinLaunch 的真空密封离心机将使火箭加速到每小时 5000 英里以上。(所有图片均由 SpinLaunch 公司提供)

# 向太空发射火箭

## Slinging Rockets into Space

SpinLaunch 公司成立于 2014 年，该公司开发了一种利用旋转能量的地基系统将小型火箭加速至高超音速的架构。在最后一次进入轨道之前，火箭将在不使用其所载化学推进剂的情况下发射升空。

去年夏天，SpinLaunch 航天公司在加州长滩 (Long Beach) 的工业区的 Virgin Orbit 拐角处开设了一家分店。SpinLaunch 正在恢复使用巨型机械吊索将火箭发射到太空的几十年的老想法。这一大胆计划的幕后推手是企业家 Jonathan Yaney，多年来，他一直在硅谷的一家老微处理器厂经营 SpinLaunch。现在他的公司准备开一家工厂组装火箭并将其送入太空。

### 优先考虑机械加速

SpinLaunch 的概念取决于一个足够大的真空密封离心机来容纳一个足球场。离心机将使火箭绕圈子旋转大约一个小时，同时它的速度逐渐加速到每小时 5000 英里 (8000 公里) 以上。飞行

器及其有效载荷 (最大 200 磅，或约 91 公斤的卫星) 将受到比重力强一万倍的力。一旦火箭达到发射速度，离心机就会释放它，使它飞入平流层。从那里，火箭发射引擎，将自己送入轨道。

SpinLaunch 正在利用石油 / 天然气、采矿和风能行业已有的技术和组件，构建一个创新的质量加速系统。质量可以达到非常高的发射速度，而不需要大量的电力或任何重型基础设施。一旦它脱离大气层，一个相对较小的，廉价的碳火箭就被用来提供进入大气层所需的最后推力。由于进入轨道所需的大部分动力来自地面电力，而不是火箭的机载推进燃料，因此与目前的发射系统相比，发射的总成本至少降低了一个数量级。

SpinLaunch 认为，较低的成本将

使空间更容易为广大客户所利用。据 SpinLaunch 的代表说，该公司计划每天最多发射 5 次，每次发射的成本约为 25 万美元。

“自从太空探索开始以来，火箭一直是进入太空的唯一途径。然而，70 年来，这项技术只取得了微小的进步，” SpinLaunch 创始人 Jonathan Yaney 在 2018 年对 Techcrunch 表示，“要使太空真正商业化和产业化，我们需要 10 倍以上的技术进步。”

### 一条充满疑问的星际之路

一个重达数千磅的物体在地球表面转了一圈后可以发射到太空的想法可能很难理解。这看起来甚至有些牵强，为了克服这种怀疑，公司还有很多东西要



证明。到目前为止，它已经将一个 11 磅重的虚拟有效载荷以 4000 英里 / 小时的速度旋转，并将其撞向一堵钢墙。然而，在这些试验和太空边缘之间有大约 100 英里的距离和很大的空气阻力。

尽管 SpinLaunch 项目被认为是破坏性的，但考虑到目前将有效载荷送入轨道的做法，它实际上借鉴了早期的研究成果，如 1951 年美国陆军高空研究项目（HARP）的研究成果。美国陆军用一门巨型加农炮向太空发射炮弹，并证明不用火箭也能到达太空。

该公司计划今年冬天在新墨西哥州的一个新试验场进行首次亚轨道发射。如果这个系统能工作，SpinLaunch 承诺将把小卫星送入太空的成本降低近 20 倍。但最大的优势可能是它的发射速度：根据最乐观的估计，质量加速器将能够每天进行 5 次发射，超过大多数火箭公司一个月的发射能力。考虑到未来十年将有成千上万颗小卫星被送入环绕地球的低轨道从而形成巨型卫星星座的前景，SpinLaunch 的时代可能已经到来。

## “史上最差的火箭”

这枚火箭长约 25 英尺，有着细长的梨形和闪亮的银点，与典型火箭的箭

形相比显得笨重。总的来说，有效载荷只占火箭重量的一小部分；剩余重量的大部分被推进剂占据。这就是为什么像 SpaceX 这样的公司需要建造大型火箭来运输汽车大小的卫星。在航空航天界，他们称之为“火箭方程式的暴政”。

但是 SpinLaunch 认识到，如果一枚火箭能够在不需要携带所有燃料的情况下被送到太空边缘，那么它就可以更小，更多的重量可以用于有效载荷。更好的是，火箭发动机不需要那么高效。对于自旋发射火箭，大部分工作是由中心火箭完成的，而一个典型的轨道级火箭的设计是为了最大限度地提高发动机的效率，以最大限度地提高有效载荷能力，同时仍能避开重力。

工程师最大的批评是离心机中火箭所受的力。当火箭旋转时，它将受到比重力强一万倍的力。一枚典型的火箭在飞往外层空间的航程中所受的重力不超过重力的 5-7 倍。南加州大学的航空工程师 Dan Erwin 说：“没有一枚火箭能在这种情况下幸存下来，火箭内部的电子设备也无法存活。”

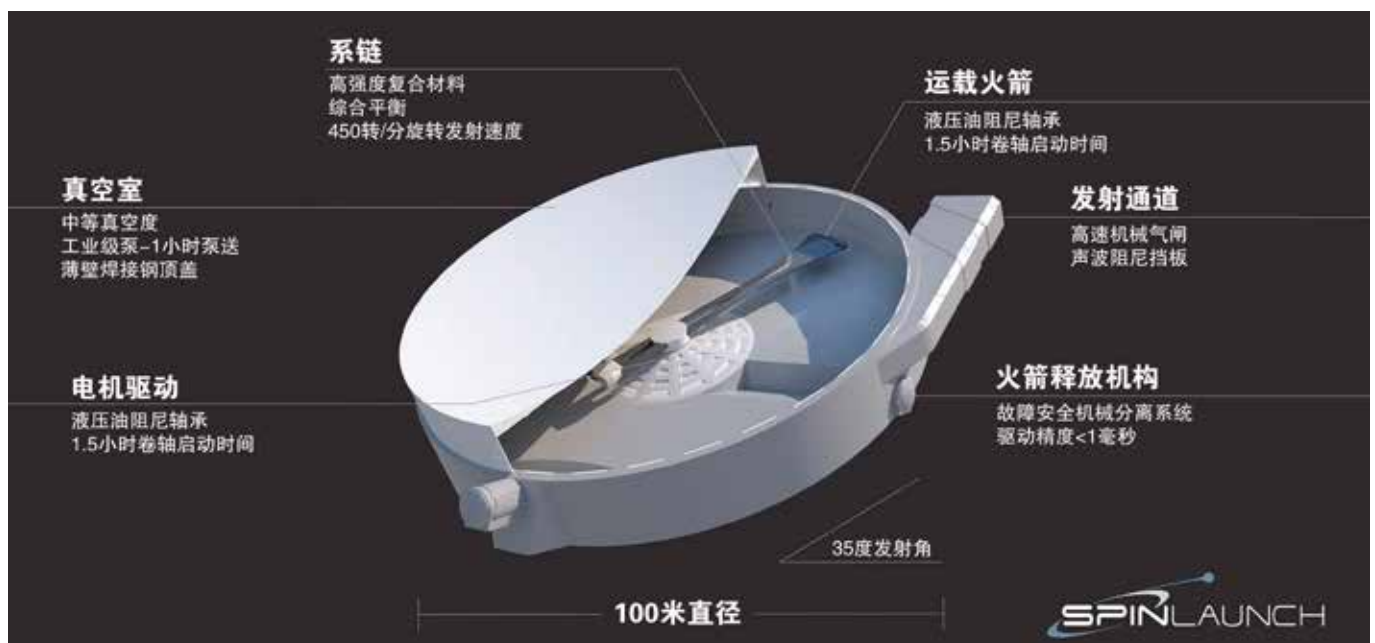
## 用牵强的想法激起好奇心

2014 年末，SpinLaunch 创始人

Jonathan Yaney 有了一个想法，并投入 400 万美元使之成为现实。他求助于建筑和工业运营硕士 Ryan Hampton，并说服他在 2015 年加入合资企业。Hampto 自己也承认，他第一次看到的小尺寸模型看起来不太像。然而，他仍然决定利用自己的焊接专业知识制造出第一个离心箱，该离心箱必须放置在一个巨大的真空室中，以保护系统免受空气湍流的影响，并在系统转动时保持稳定。一旦获得了一些水泵和价值 50 万美元的钢材，研究小组花了 8 个月的时间制造出世界第六大（直径）真空室。

他们在 2016 年完成了第一台离心机。它的直径为 40 英尺（12.19 米），仍然太小，无法将火箭送入太空，但基本概念是一样的。一个长臂，称为系链，从涂有油的电机驱动轴承伸出。有效载荷连接到系链的末端。为了承受它必须承受的极端应力，系链必须由碳纤维和 Kevlar® 等超强材料制成。

经过两年每天工作 12 小时，每周工作 6 天，SpinLaunch 团队终于准备好启动第一台真正的离心机。“我们都挤在一个 50 英尺远的房间里，后面有一堆监视器和摄像机，”亚尼先生说。他们检查了系统是否处于良好状态，然后发射



出去。“我们刚刚踩下油门，打破了旋转系统最快的世界纪录。”

在接下来的几年里，这个团队进行了数百次高速测试。他们中的大多数人都是为了研究和改进这个系统而设计的，但有些人是为了安抚那些怀疑的投资者和潜在的客户，他们不相信有效载荷能够承受巨大的压力。该小组采用太阳能电池、无线电系统、望远镜镜头、电池、GPS 模块和控制计算机高速旋转。全部通过测试，几乎没有损坏。在一次测试中，Yaney 将 iPhone 连接到系链上并旋转，直到它受到比重力强 10000 倍的力。然后他用电话和一位同事进行了一次 FaceTime 交流。每一次测试都是迈向太空的一步，无论多么微小。

包括空客风投 (Airbus Ventures)、Kleiner Perkins 和 GV (Alphabet 的一部分) 在内的大型投资者已经批准了该项目，向该公司注资 8000 万美元。去年，美国国防部授予 SpinLaunch 一份合同，帮助其开发离心机。

在宣布最新投资的新闻稿中，Yaney 先生强调，SpinLaunch 团队非常感谢来自强大投资者群体的支持，这些投资者与 SpinLaunch 团队一样，希望



SpinLaunch 在其位于 Sunnyvale 的前总部建造了第一台 12 米离心机样机。

以低成本发射成像和通信卫星，以保护地球及其居民。

“今年晚些时候，”他补充说，“我们的目标是改变太空发射历史，完成我们在美国航天港的第一次大规模加速器试验和试飞。”

根据 Yaney 的说法，该公司可能在 2022 年开始运营。最初的一些航班可能由美国军队提供资金。去年，

SpinLaunch 宣布他收到了国防部的一份原型发射合同。

## 漫长的太空之路

物理并不是公司发展道路上的唯一障碍。最终，自旋发射将需要一个沿海发射场，以防止火箭危及平民。结果发现，找到一个合适的地点比预期的要困难得多。

在 Hawaii 建立离心机的谈判失败后，SpinLaunch 于去年 5 月在新墨西哥州的美国太空港 (Spaceport America) 开始了活动，目前正在那里建造一台比洛杉矶离心机大三倍的离心机。他们宣称的目标是在今年晚些时候进行第一次亚轨道飞行试验，发射重约 110 磅 (49-50 公斤) 的弹丸。鉴于到目前为止它一直在试验 11 磅的有效载荷，这些试验将是一个重要的步骤。

即使只推出一个，也将是一项重大成就。私营上市公司的故事大多是失败的故事。太空探索需要有足够的勇气去冒险探索未知，而在 SpinLaunch 的例子中，未知是巨大的。然而，我们所能得到的，无非是打开一扇通向宇宙的新大门。

更多信息：[www.spinlaunch.com](http://www.spinlaunch.com)



工程师们聚集在 SpinLaunch 的第一枚轨道火箭周围。

# JEC COMPOSITES CONNECT

复合材料业行业  
线上系列活动

线上 | 2021年6月1-2号



凝聚复合材料社区，  
为期2天的线上展会即将开启！

[www.jeccomposites-connect.events](http://www.jeccomposites-connect.events)

#JECConnect

# 亚什兰复合材料： 英力士的智慧之选

和您一样，英力士一直高度信赖亚什兰复合材料。他们凭借卓越的专业能力解决每一个难题，完美应对强腐蚀工作环境。

当您需要设计制造能经受恶劣环境考验的设备时，他们即刻行动；当您需要有人视您的业务成功为己任并不懈努力时，他们挺身而出。

我们意识到，他们不仅仅是极富价值的资源，更是您团队的一份子。而现在，他们加入了英力士。这意味着您将得到更多支持，英力士作为科学和化学行业全球领导者将竭诚为您服务。若您有任何困难，请联系我们。英力士复合材料将与您携手前进，共创未来。



了解英力士集团和复合材料前景的更多信息，请访问：  
[ineos.com/composites](https://www.ineos.com/composites)

**INEOS Composites**

广告