

HRC⁺

Beyond Lightweight

eVTOL 复合材料机体结构设计与制造工程实践

HRC

张维



Beyond Lightweight

目录

- 01 **eVTOL 机体结构特点**
- 02 **复合材料在eVTOL机体结构的应用**
- 03 **机体结构设计制造关键技术**
- 04 **案例分享**
- 05 **HRC&航空业务介绍**
- 06 **发展方向**

01 eVTOL机体结构特点

1 eVTOL 机体结构特点

技术路线



多旋翼

复合翼

倾转旋翼

倾转涵道

构型	多旋翼	复合翼	倾转旋翼
旋翼系统功能	垂起时提供全部升力 巡航时提供全部拉力和升力	垂起时提供全部升力 模式切换时提供部分升力	垂起时提供全部升力 倾转过渡时提供部分升力和拉力 巡航时提供全部拉力
飞行速度	0~120 km/h	0~250 km/h	0~300 km/h
优点	结构简洁 技术相对成熟 易操控	易制造 性能介于两者之间	气动效率高 飞行速度高 航程和有效载荷有明显优势
缺点	有效载荷和航程都相对有限	机构复杂 结构效率低	技术难度大
应用场景	低空旅游、紧急救援、 物流运输等	物流运输、紧急救援、 城市交通运营等	物流运输、 急救据 城市或城际交通运营等

1 eVTOL 机体结构特点

轻量化

- 电池效率不足，进一步给机体结构重量带来了巨大压力。
- 只有尽可能降低机体结构重量系数，才能保证续航和商载。



经济性

- 为确保普及与销量，整机销售成本和运营成本需要尽可能控制。
- 结构成本占比约**1/3**左右。

高质量

- 高质量能够提高结构效率，减轻结构重量。
- 可以保证适航对于结构完整性的符合性要求。

02 复合材料在eVTOL机体结构的应用

eVTOL机体结构材料构成分析



复合材料 (70%) - 核心主力

机体主承力结构、滑橇式起落架（碳纤维、玻璃纤维）



金属材料 (20%) - 关键支撑

部件对接接头、电机安装座、轮式起落架等大转载部件



增材制造 (5%) - 复杂结构

异形件、功能件，降低成本且具备一定结构强度



其他材料 (5%) - 功能配套

绝缘、密封、防火、隔热等

	复材零件数	金属零件数
某150kg级货运无人机	245	200
某2.5t级eVTOL（机身、尾翼）	304	152
某2.5t级eVTOL（机翼、机臂）	382	234
某2.7t级eVTOL	857	475

eVTOL机体结构材料体系呈现“复合材料为主、金属为辅、其它补充”的格局，通过多材料协同实现**功能、性能、效率**的完美平衡。

03 机体结构与制造关键技术

3 机体结构与制造关键技术

序号	关键技术	阶段	影响因素
1	CAD/CAE/CAM协同设计技术	设计	成本、质量、效率
2	耐久性与损伤容限设计与验证	设计	成本、质量、效率
3	倾转/操纵/舱门/活动面机构设计技术	设计	成本、质量、效率
4	复合材料结构雷电防护与电搭接	设计	质量
5	抗动态疲劳设计技术	设计	质量
6	结构/系统功能一体化设计技术	设计	成本、效率
7	高承载复合材料结构件连接技术	设计、制造	成本、质量、效率
8	复合材料快速低成本修理技术	设计、制造	成本、质量、效率
9	复杂结构整体成型技术	制造	成本、质量、效率
10	制造工艺及批量制造技术	制造	成本、质量、效率
11	适航符合性验证技术	设计、制造	质量
12	工检模设计与制造技术	设计、制造	成本、质量、效率

基本原则

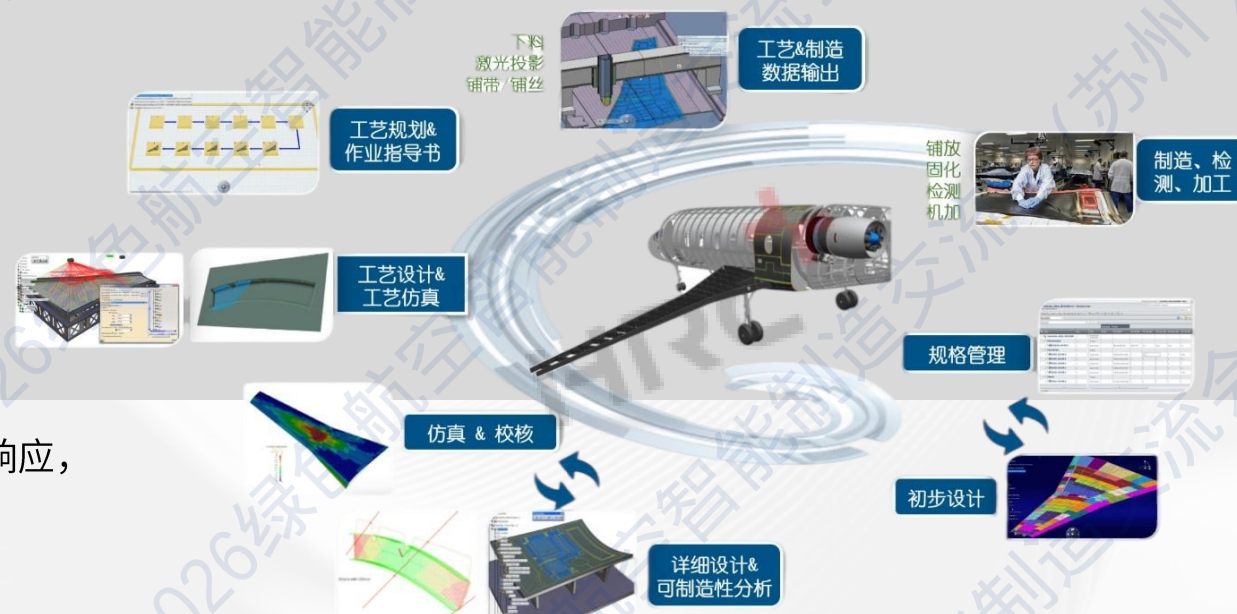
在保证**结构完整性**的前提下，机体结构**重量最轻**。

目标

充分分析产品特点和需求，尽可能实现**成本、效率、质量**三者的平衡。

3.1 CAD/CAE/CAM协同技术

设计/仿真/制造一体化协同



出现问题可以实现快速响应，
降低沟通成本



结构设计与工艺准备、模具工
装设计并行，缩短研制周期；



设计具有更好的工艺性，确保产品质量
的同时，降低制造成本



通过仿真手段代替部分试验，**减少**试错成本。

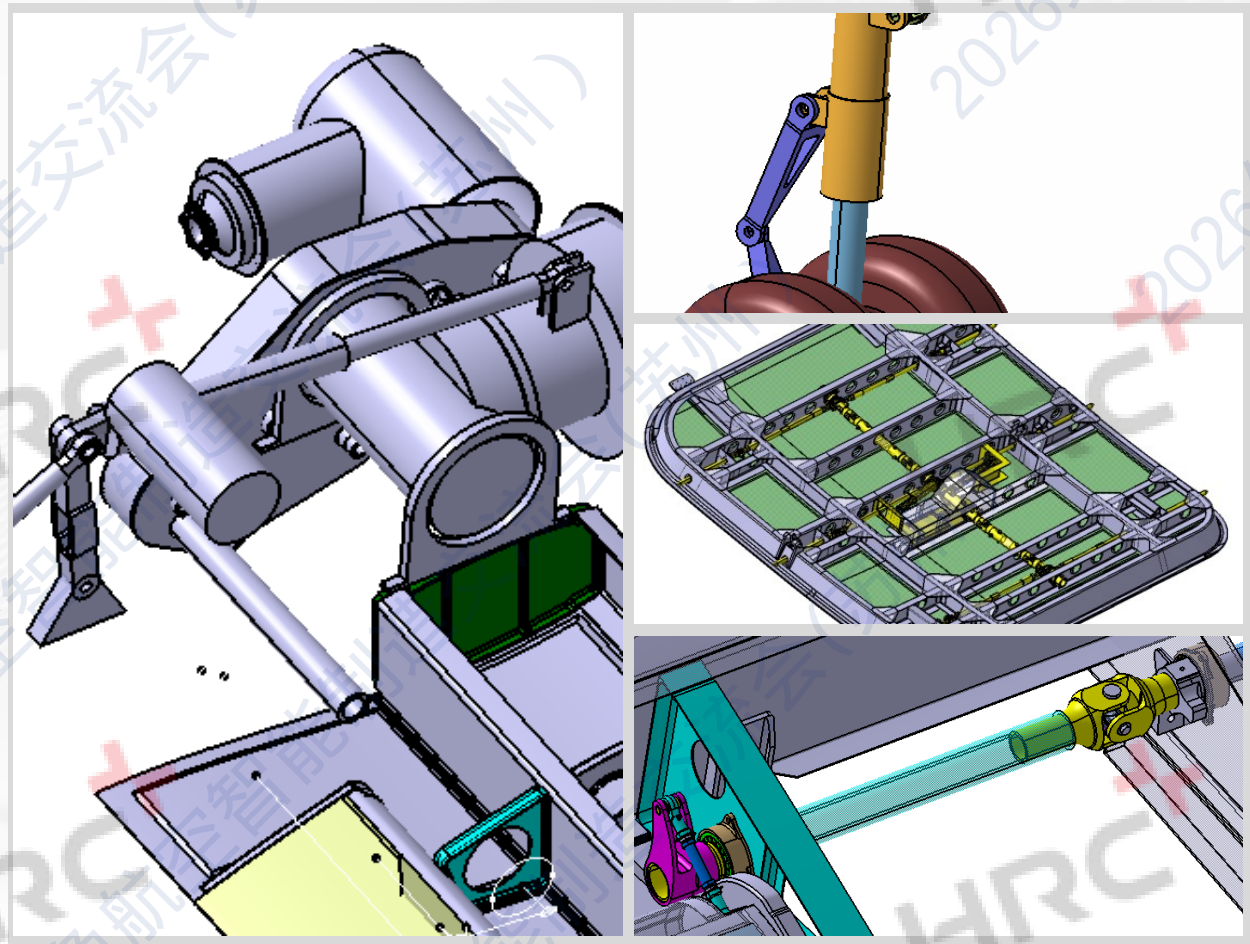
3.2 倾转/操纵/舱门/活动面机构设计技术

机构设计相对于固定结构，更加注重：

- 可靠性与维修性；
- 安全性；
- 寿命；
- 环境适应性（高低温、沙尘、盐雾等）；
- 重量控制；
- 传动效率。



机构设计应考虑合理的零部件精度控制、选材、仿真分析、应力分析、表面处理、试验验证、冗余设计。

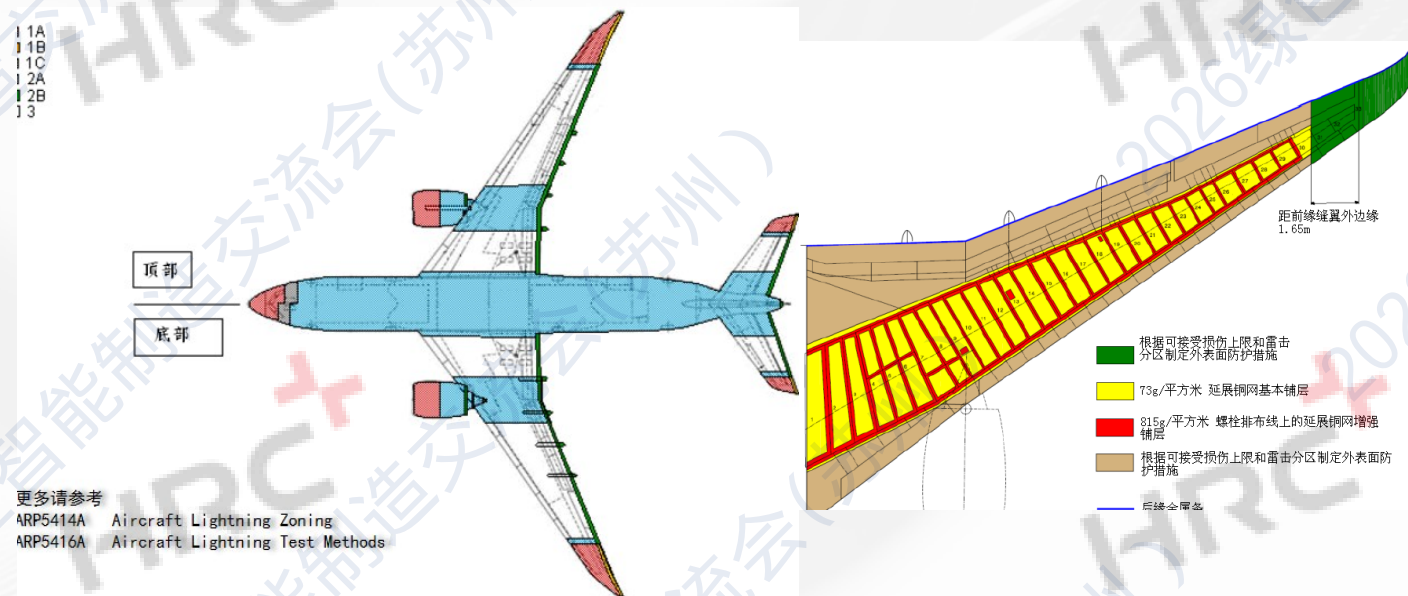


3.3 复合材料结构雷电防护与电搭接

据统计，飞机遭遇雷击导致结构损伤程度分布为：结构穿孔 **24%**；轻微损伤**49%**；无损伤**27%**。

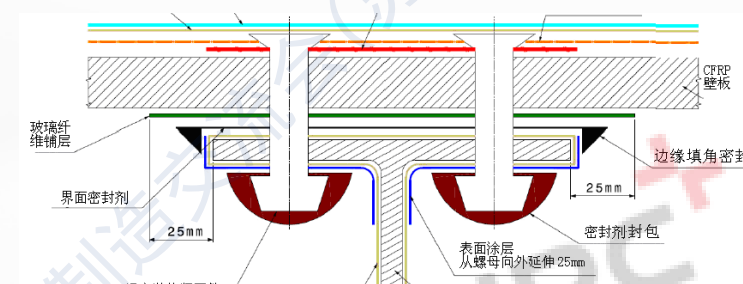
相对于传统金属材料，eVTOL常用的**碳纤维复合材料**对雷电更加敏感，雷电损伤更为严重。

飞机暴露在**直接或间接雷电环境**中时应保证其性能技术指标。



eVTOL机体结构应重点关注以下雷电防护与电搭接设计：

- 飞机全机表面低阻抗通路设计（不同的雷电分区采用不同的防护材料，减重降本。）
- 飞机基本结构的雷电泄放通路设计；
- 雷电电搭接设计。

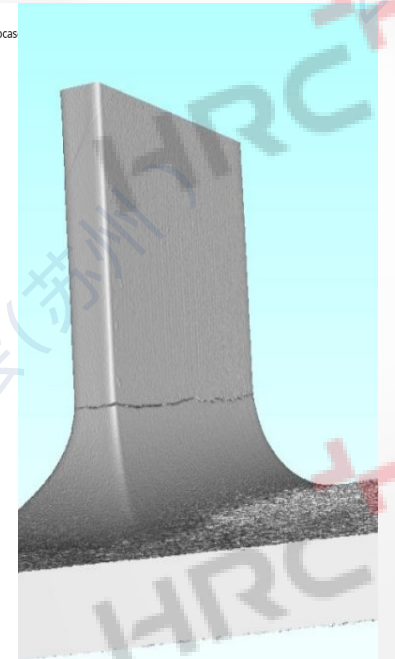
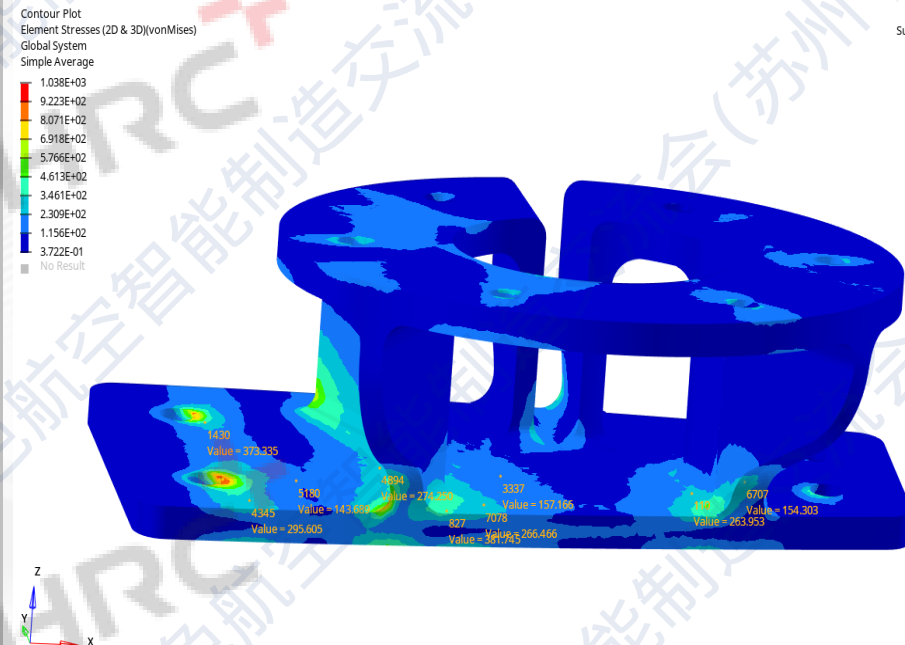


3.4 抗动态疲劳设计技术

- 电动飞机旋翼系统带来的**噪声和振动**会导致机体结构与其连接周边区域出现严重的噪声和振动**疲劳问题**，尤其对于复杂形状的金属电机支座影响更为突出。
- 同时，由于电动飞机的转速范围较广，机体结构模态频率很难避开电机的工作频率，从而导致**共振**不可避免。

对于eVTOL机体结构的**抗动态疲劳设计**应尤为重视，具体措施如下：

- 开展机体结构的模态分析，进行模态试验；
- 对于振动疲劳敏感部位，进行振动测试；
- 电机支座连接处采用合理的减振措施；
- 降低振动疲劳敏感零部件的应力值；
- 采用疲劳性能更好的材料。



3.5 结构/系统功能一体化设计技术

结构/系统功能一体化设计即结构件既能够作为主承力件的同时，又可以作为系统功能件。

- 显著的减轻飞机重量；
- 增大系统的利用空间；
- 降低制造装配成本。

目前常见且效果明显的一体化设计措施：

1. 结构整体油箱

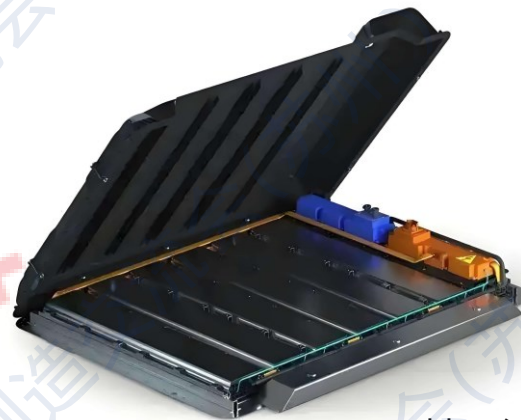
重点关注：

- 整体油箱密封；
- 雷电防护。

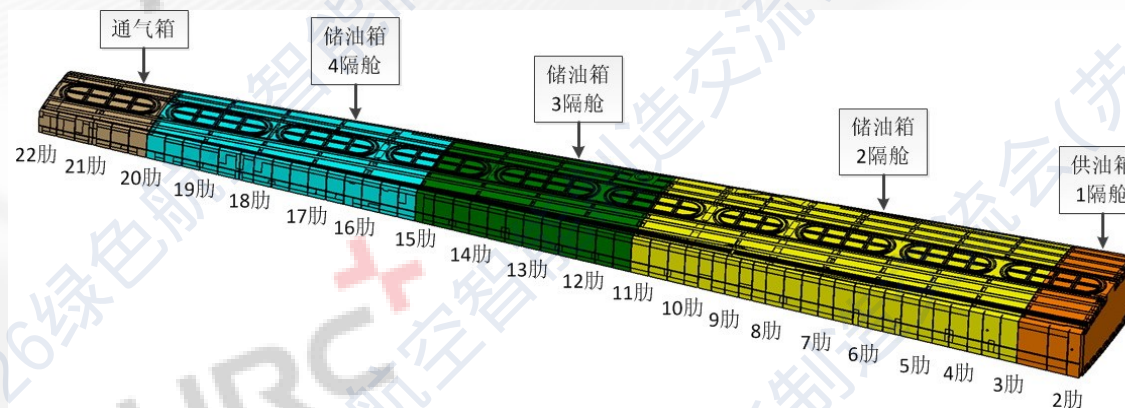
2. 机体结构与电池壳体一体化

重点关注：

- 结构与电池协同设计；
- 密封与防火。

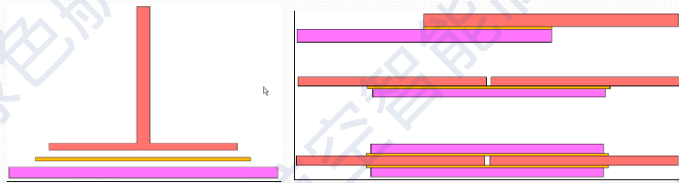
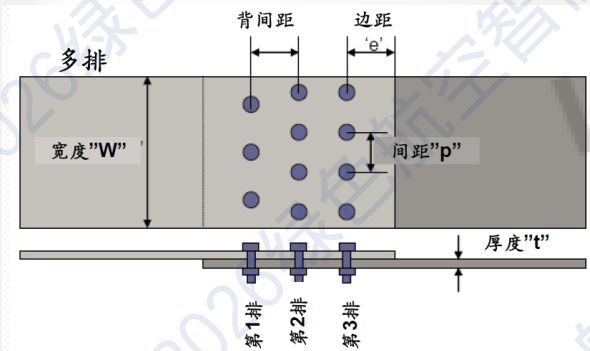
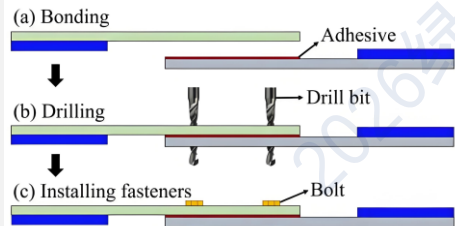


某飞行汽车电池盒



某飞机整体油箱设计

3.6 高承载复合材料结构连接技术

连接类型	图例	措施	优点	缺点
胶接		- 共固化 - 共胶接 - 二次胶接 - 常温装配胶接	理论上有更高的连接强度和更小的结构重量	可靠性需仔细验证
机械连接		- 抽钉 - 铆钉 - 托板螺母 - 单面螺栓 - 高锁螺栓	较高的连接可靠性	- 钉孔损失较大 - 成本高 - 重量大
混合连接		胶接与机械连接混合使用	兼顾成本、重量与可靠性	可能会过度设计

3.7 复合材料快速低成本修理技术

复合材料快速低成本修理是未来eVTOL能够控制使用维护成本的关键技术之一。

维修性设计

- 易损伤位置可拆卸设计；
- 预留合理的维修通道；
- 合理的修理余量；
- 提供经过充分论证和验证的修理手册；
- 按照不同的区域和损伤程度给出不同的修理措施。

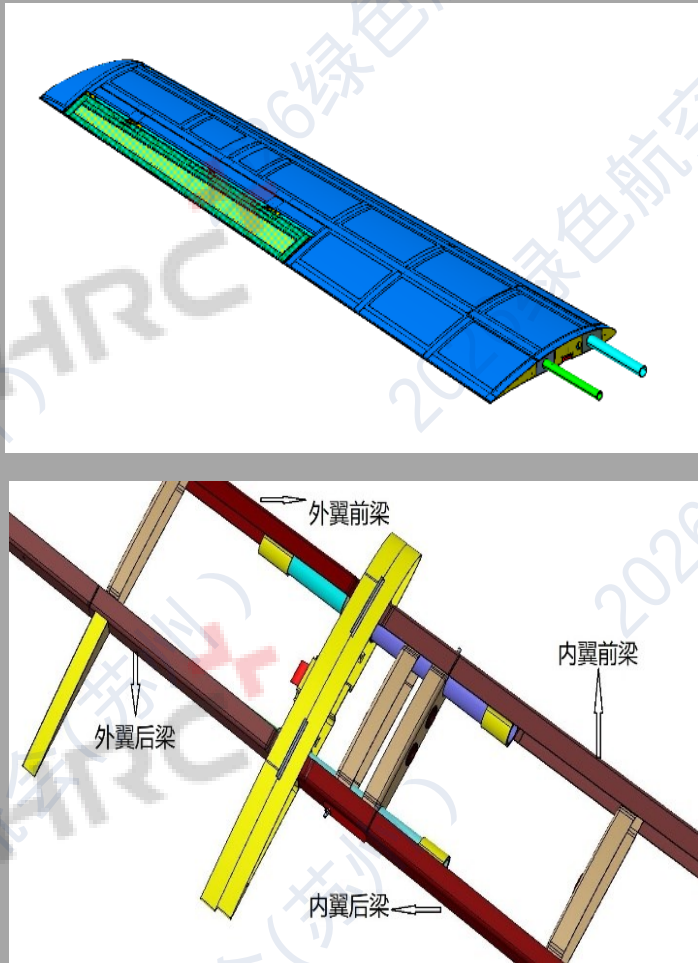
修理方法

- 补片式；
- 非补片式。

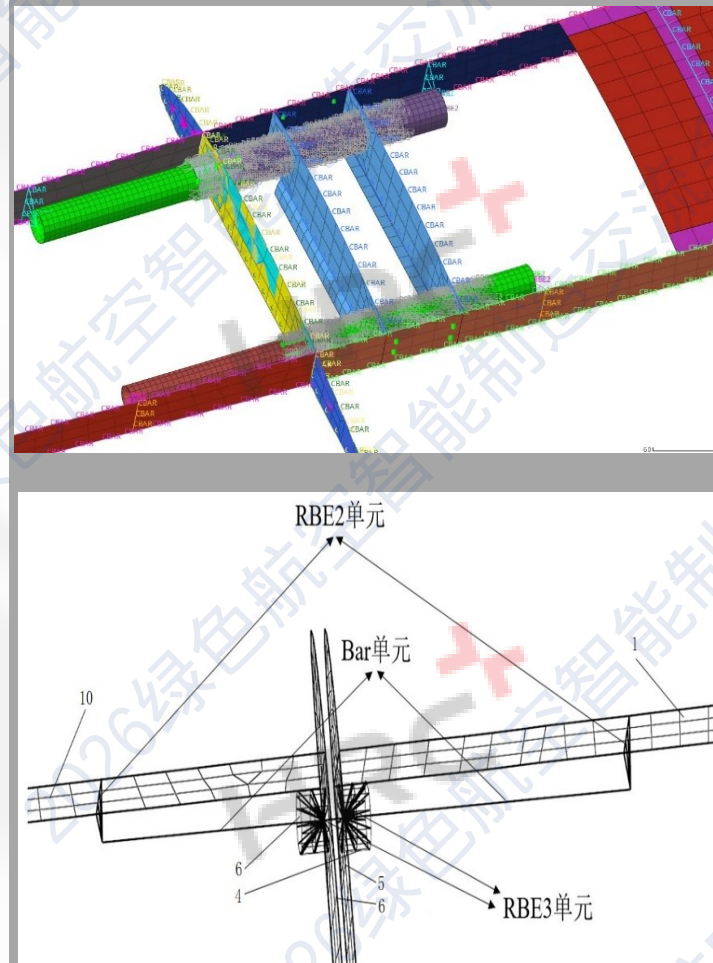
类型	使用方法	适用范围
非补片式	树脂注射法	孔隙，小的分层，脱胶等
	混合物填充法	小的凹陷，蜂窝蒙皮的损伤，蜂窝芯子的损伤
	热处理法	除湿，干燥，除去蜂窝结构中的潮气
	表面涂层法	密封，恢复表面保护层
	抽钉法	层压板内部的分层
补片式	外搭接补片胶接法	可以修理损伤较轻的蒙皮，适用于外场修理
	外搭接补片螺接法	可以修理大范围的严重损伤，适用于外场修理
	嵌入式补片修理	可以修理大范围的严重损伤，不适用于外场修理

3.8 设计-仿真-试验协同 插接式快拆机翼

设计



仿真



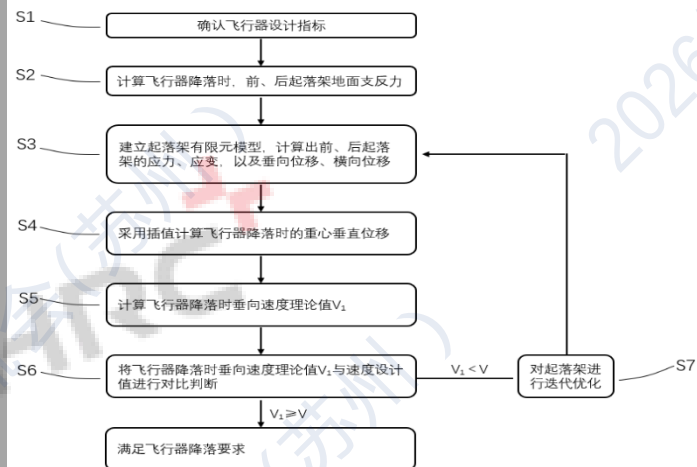
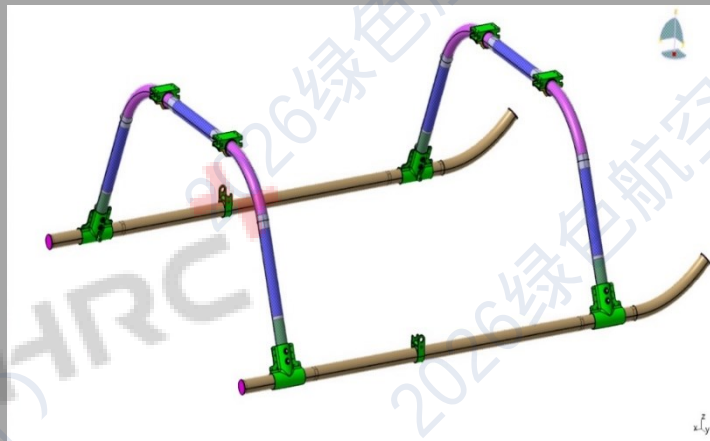
试验



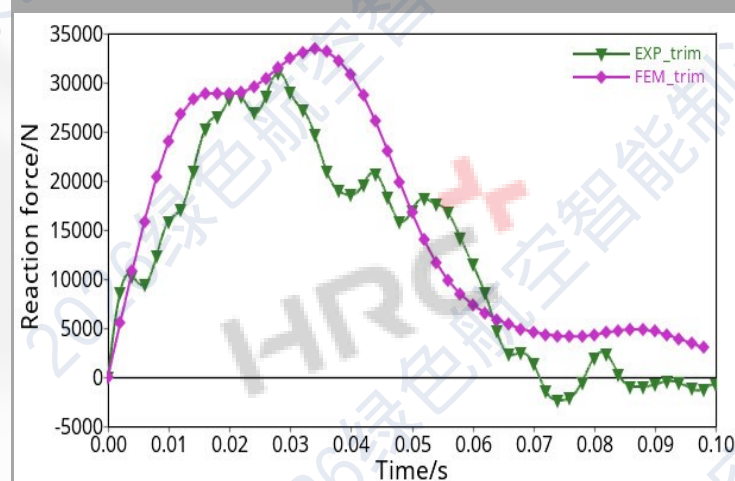
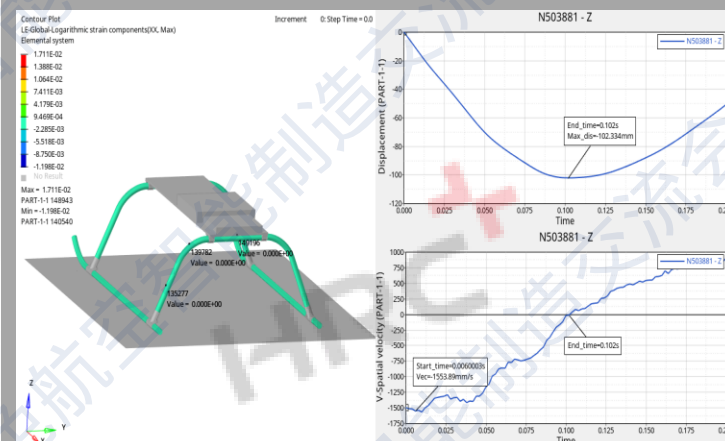
载荷比例	静力试验 翼梢位移	有限元仿真 翼梢位移	差值
30%	85.5mm	85.4mm	0.1
60%	168.0mm	170.8mm	-2.8
70%	196.2mm	199.3mm	3.1
80%	224.0mm	227.0mm	3
90%	255.1mm	256.2mm	1.1
100%	283.4mm	284.7mm	1.3

滑橇式起落架正向设计

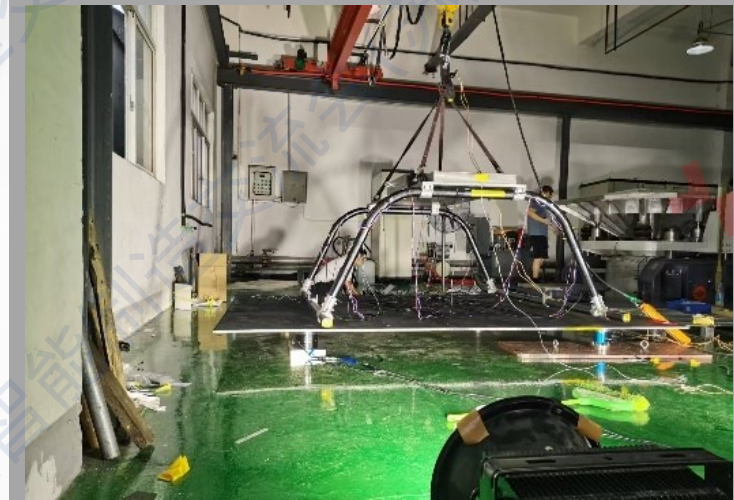
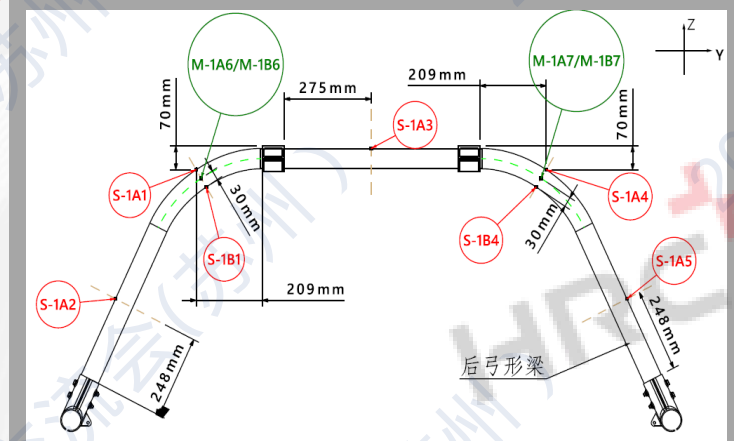
设计



仿真



试验



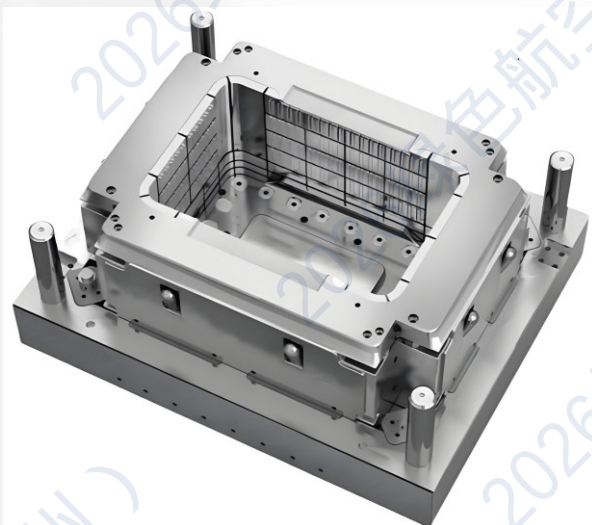
3.9 复杂结构整体成型技术

整体成型的优势

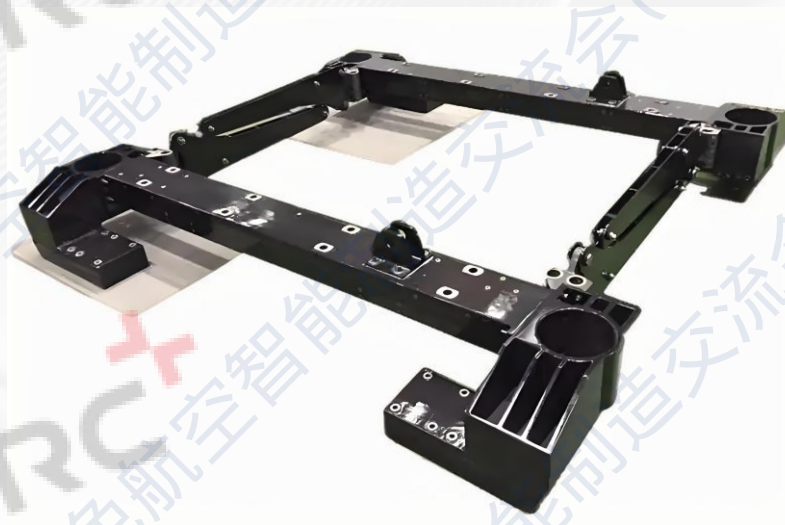
可以大幅度减少零件数量，减少装配工作量和结构胶、紧固件的使用量，从而减轻结构重量，降低整机结构制造成本。

目前常用的整体成型技术

1. 通过组合模具实现整体成型（共固化/共胶接、可溶模具、记忆芯模等）；
2. 通过组合工艺进行整体成型（热压罐+注塑、模压+注塑、液体成型等）。

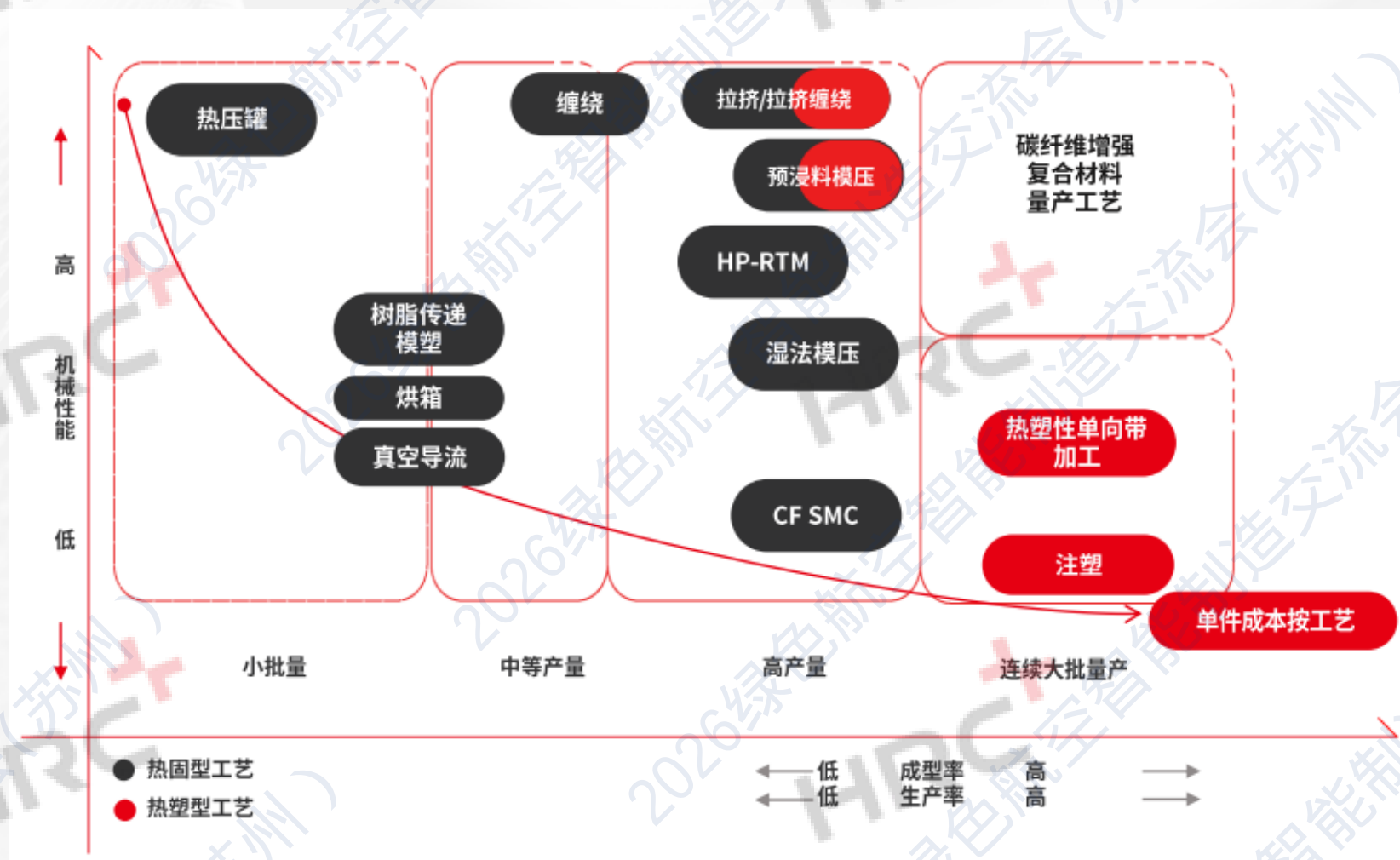


组合模具



复合材料整体成型件

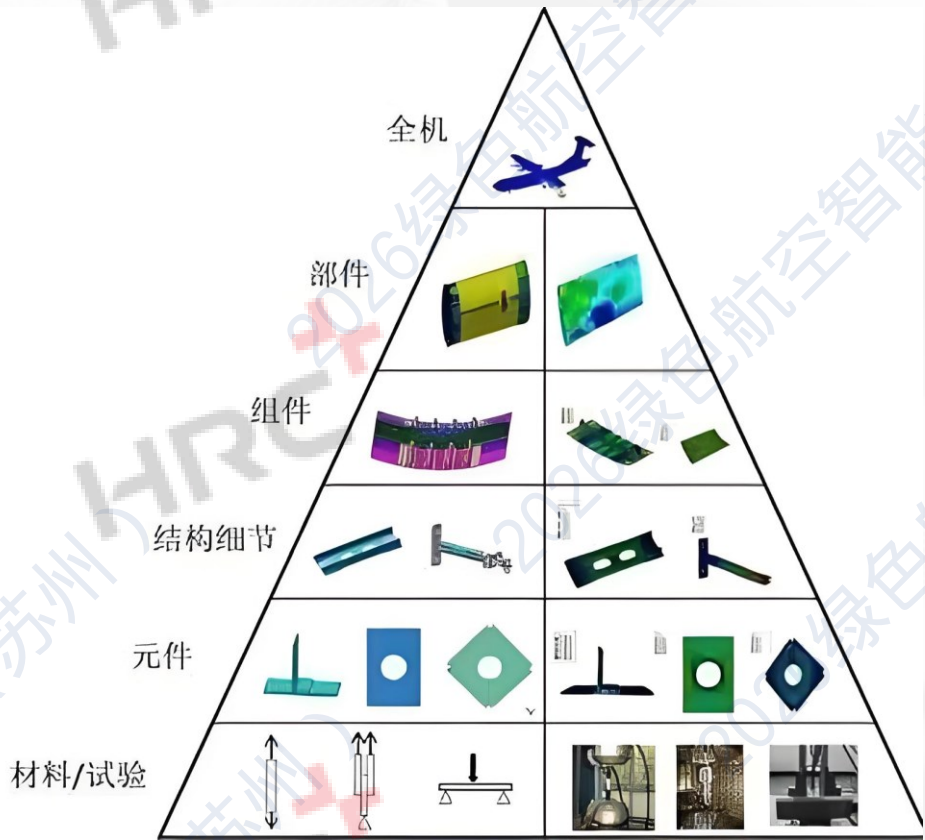
3.10 制造工艺及批量制造技术



工艺方法与产量、需求密切相关

根据不同的设计需求和产量，选用不同的工艺方法，最大限度提高生产率，降低制造成本。

3.11 适航符合性验证技术



复合材料机体结构积木式验证

机体结构涉及的符合性验证类型

验证类型	验证方法
材料	编制材料规范，进行材料合格鉴定试验，测试材料许用值。
工艺	通过元件级获取工艺参数，编制工艺规范和工艺规程以及相应的试验大纲进行符合性验证。
新结构形式	确定有疑问的或新型的结构形式或细节，需要采用试验的方法加以验证。
结构设计值确定	针对典型的结构细节或结构件进行设计值的试验。
损伤容限评定	针对每种结构，需要考虑制造中可接受的各类缺陷，进行试验验证，从而确定各类结构件的制造验收条件。
强度验证	通过典型细节、连接、壁板类、梁肋类、盒段类，以及全尺寸部件的强度分析、静力试验、疲劳与损伤容限(考虑各类损伤)试验验证。

3.12 工装、检具、模具设计与制造技术

工装、检具、模具成本在eVTOL机体结构制造过程中成本占比非常高，尤其对于验证机阶段的非量产项目，甚至高达机体结构总采购成本的80%。

- 工装、检具、模具的质量与产品质量息息相关；
- 工装、检具、模具制造过程较长，通常需要50天以上；
- 工装、检具、模具精度、使用寿命受限于设计、材料、制造工艺多个因素；
- 工装、检具、模具需满足成型、装配、检验需求。

8000



代木

- 精度±2mm
- 温度60℃
- 压力0.1mpa
- 3罐次

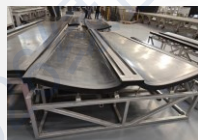
12000



湿法玻纤

- 精度±2mm
- 温度120℃
- 压力0.4mpa
- 10罐次

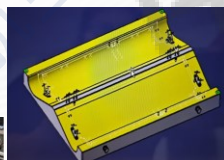
17000



湿法碳纤

- 精度±2mm
- 温度120℃
- 压力0.4mpa
- 10罐次

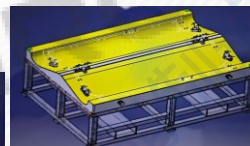
22000



**整体数控
Q235**

- 精度±0.2mm
- 温度350℃
- 2.5米以内
- 压力0.8mpa

25000



**简易框架
Q235**

- 精度±0.2mm
- 温度540℃
- 曲度不大蒙皮
- 梁,框,肋

30000



**薄壳框架
Q235**

- 精度±0.2mm
- 温度540℃
- 压力0.8mpa
- 精度±0.2mm
- 温度180℃
- 400罐次

50000



**可调框架
碳纤预浸料
玻纤预计料**

60000



**薄壳框架
殷瓦**

- 精度±0.2mm
- 温度540℃
- 精度±0.2mm
- 温度540℃
- 复杂型面

80000

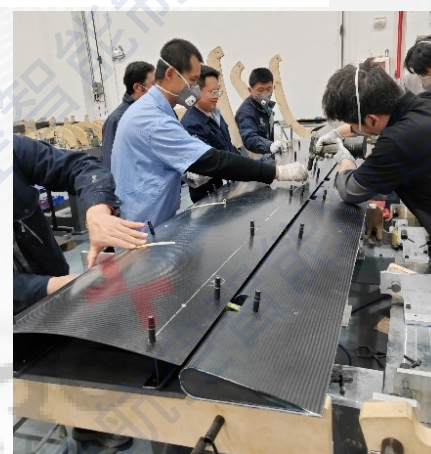
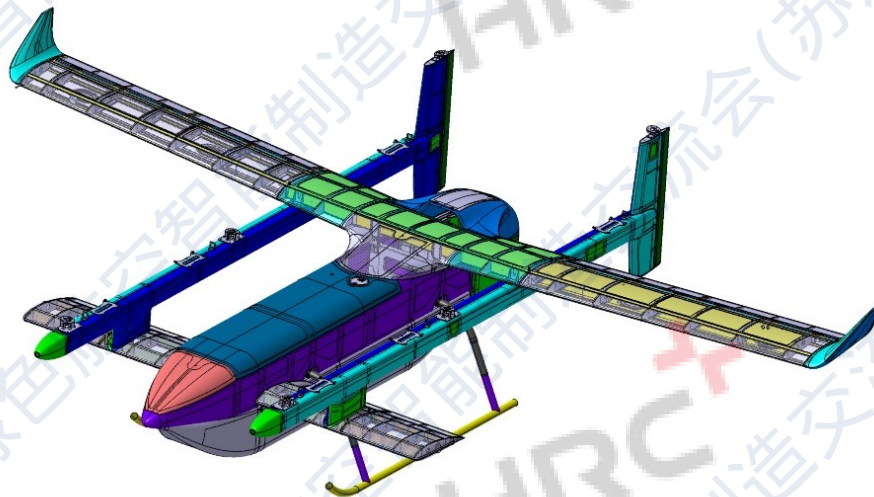


**可调框架
电镀镍**



04 案例分享

案例分享——某650kg级复合翼结构设计和制造



某复合翼eVTOL翼面结构设计 设计与制造

- 快速设计迭代
- 低成本、极致轻量化设计理念
- 结构重量占比**22.5%**
- 样机阶段简易工装模具

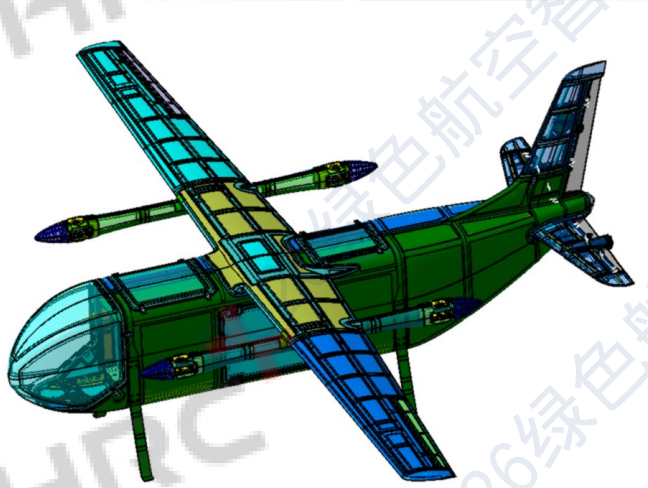
案例分享——某3000kg级固定翼无人运输机整机结构设计和制造



某无人运输机机体结构设计

- 长度: 11.06 m
- 翼展: 15 m
- 高度: 4.5 m
- 起飞重量: 3300 kg
- 结构重量占比: 25.2%

案例分享——某150kg级复合翼整机结构设计和制造

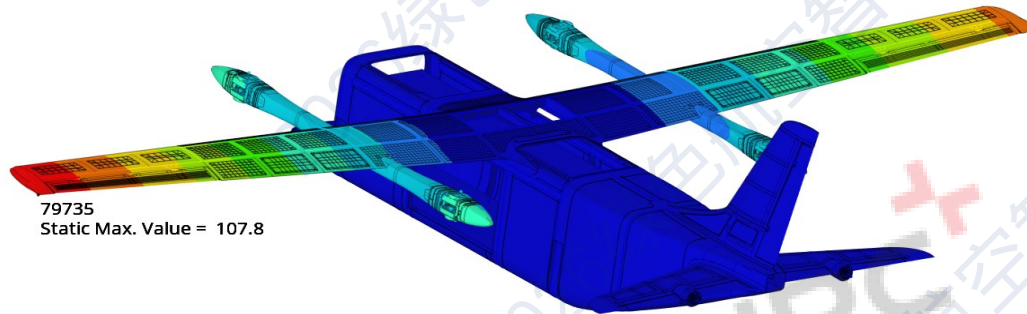


SUBCASE 3 = CASE1_MOTOR

Analysis system

1.078E+02
9.585E+01
8.387E+01
7.189E+01
5.991E+01
4.793E+01
3.595E+01
2.396E+01
1.198E+01
0.000E+00
No Result

Max = 1.078E+02
Node 79735
Min = 0.000E+00
Node 19590



79735
Static Max. Value = 107.8

某无人运输机结构设计

- 长度：4 m
- 翼展：6.2 m
- 高度：2.1 m
- 起飞重量：145 kg
- 结构重量占比：25%

案例分享——10吨级固定翼货运无人机

为客户提供

- 大型部段设计&制造: 后货舱门
- 制造&装配: 中机身上壁板和后机身后段
- 大型部段装配

制造工艺

- 共固化工艺

首架机下线

- 2024年10月18日



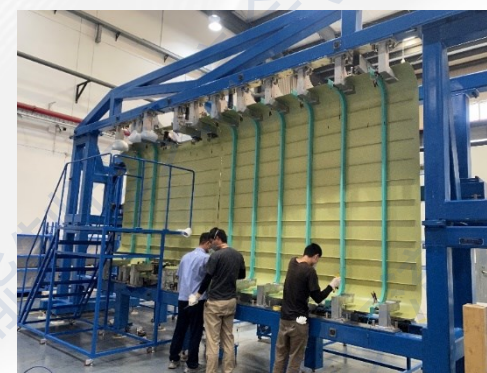
整机尺寸:
22.79m*21.87m*7.83m



后货舱下尾门尺寸:
4.06m*2.55m*0.44m
共固化工艺



中机身上壁板尺寸:
8.27m*2.6m*0.31m
共固化工艺



案例分享

HH-100

- 部段制造：尾翼、尾撑、活动翼面



翼展: 10.9m 机身长度: 7.2m 最大起飞重量: 2t

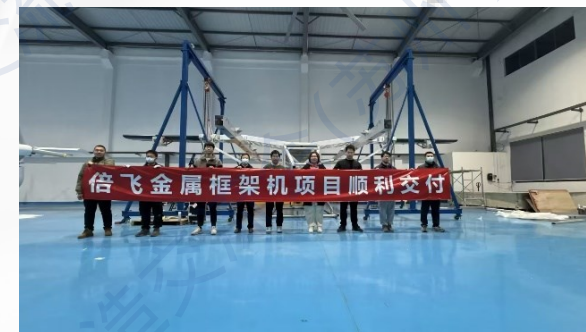
2.5吨级倾转机翼框架机

- 结构设计
- 制造和机体装配



翼展: 12m

机身长度: 6.5m



最大起飞重量: 2.5t

05 HRC集团介绍



关于我们

以先进复合材料构筑绿色未来

/ 成立于2014年，**HRC**是全球领先的复合材料综合解决方案提供商，提供覆盖碳纤维终端应用**全产业链**的研发、工程设计、工业化量产、回收及再利用等全方位专业服务

/ **更轻 更快 更强 更绿色**



愿景

成为复合材料应用创新的
全球标杆



使命

利用先进复合材料的卓越性能，
助力打造更轻盈、更绿色的未来



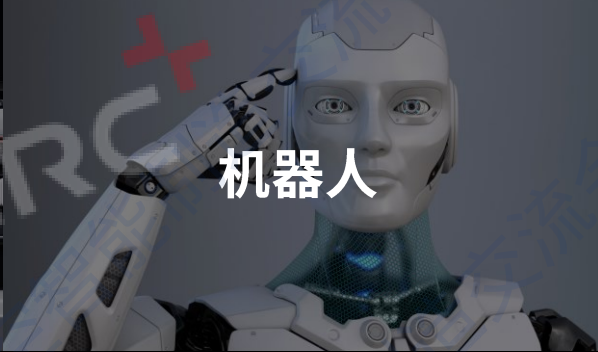
生态闭环

打通从材料开发到回收及再利用的复
合材料应用全生命周期闭环，积极实
践循环经济

/ HRC致力于以先进材料的创新应用赋能多个目标行业，帮助实现轻量化、提高产品附加值、性能提升和降低碳足迹等多方面需求



汽车



机器人



建筑



可再生能源

风能
氢能



航空航天



其他应用

轨道交通
高端消费品

全球分布 您身边的合作伙伴

/ 快速响应来自不同地区不同行业的多样化需求



分布于

5个国家



员工人数

2,000

/ 亚洲: 80%

/ 欧洲: 20%



● 英国 西赛克斯
工程设计

● 西班牙 巴塞罗那
工程设计
业务开发

● 意大利 维琴察
工程设计
样件试制 & 小批量生产

● 德国 汉堡
业务开发

● 中国 西安
工程设计

● 中国 上海
业务开发

● 中国 常熟
研发试制
工程设计
样件试制 & 量产
回收 & 再利用
业务开发

HRC 航空 核心优势

高度专业化的技术团队

团队核心成员来自波音、空客，以及中航旗下各大主机厂/所，如西飞、沈飞、哈飞、成飞等，具有10-30多年、平均工作15年以上的航空复合材料设计、工艺、装配的研发制造经验，以深厚的专业知识和可靠的专业能力为客户提供高度定制化且极为高效的端到端解决方案

领先且完备的设备

配备领先且完备的热塑及热固型复合材料加工工艺及设备，满足通用航空及低空飞行产业日益增长的复合材料应用需求

多样化的项目经验

在飞机机身整体结构部件的开发、制造与装配方面拥有丰富经验，深度参与众多知名航空主机厂的标杆性研发及制造项目，为客户提供包括eVTOL整机结构、干线及支线飞机复合材料零部件等先进复合材料产品解决方案

完善的质量管理体系

已通过AS 9100D、DIN 6701、Nadcap等专业体系认证，满足国际高标准的民用航空产品规范与要求

能力 突出的生产能力

预浸料自动裁切机



多台热压罐
烘箱及新工艺成型设备



高规格的三坐标测量机



涂装线



航空级洁净间



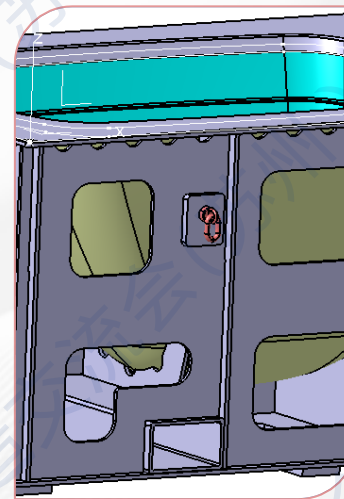
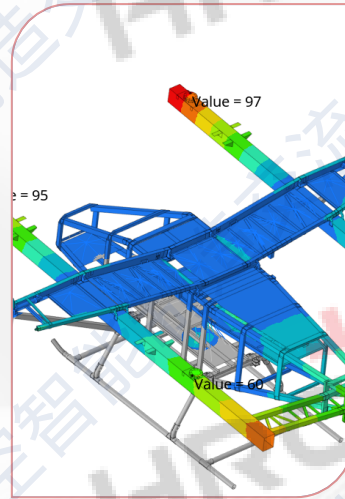
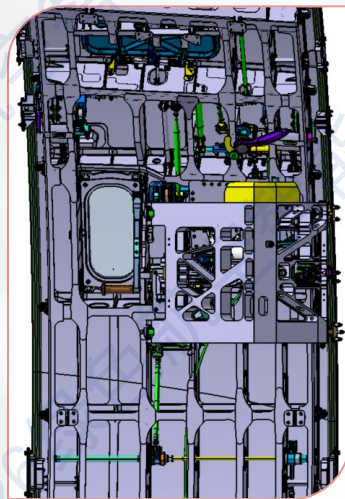
航空级5轴CNC设备



部段及全机装配

核心业务

机体结构研发设计



机体结构设计

各种不同吨位、不同构型的机体结构设计，覆盖方案设计、详细设计到试制问题处理全流程服务。

机构设计

包括舱门、起落架、操纵、倾转等各类机构。综合评估机构的可靠性、重量、成本等多方面因素。

仿真分析

包括动力学仿真、静强度、疲劳强度分析、振动、噪声、模态、模具热传导分析、热-结构耦合分析等。

工装模具设计

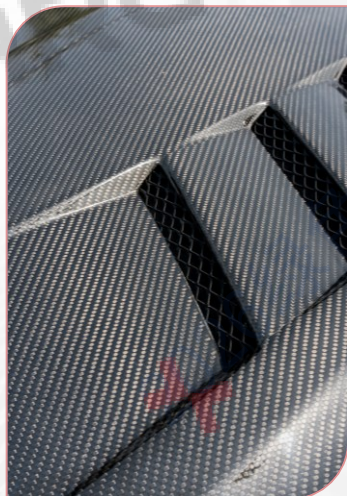
包括复合材料各类成型模具、整机或者部段级装配工装、检验工装的设计与分析，综合考虑成本和性能。

结构试验规划

按照适航要求开展机体结构强度积木式试验方案规划，可以自行承接材料级、样件级试验。

核心业务

机体结构试制与批产



复合材料零件制造

热压罐、模压、高压RTM、拉挤、注塑、缠绕、VARI等各类适用于航空结构的碳纤维成型工艺。



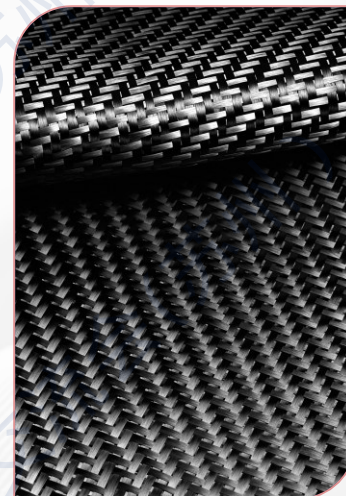
机体结构总装/部装

机体结构部段装配、整机装配、喷涂。包括室温胶结、二次胶结、机械连接、混合连接等各类连接方式。



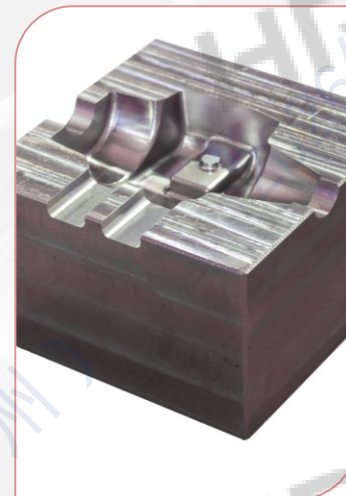
航空货架产品开发

包括民用客机PMA件、无人机用滑撬式复合材料起落架、热塑性连接角片、



复合材料预浸料开发

包括常用无人机中温固化树脂体系、快速固化树脂体系、耐高温、高CAI树脂体系预浸料的开发。



模具工装制造

包括航空结构用金属零件的机械加工、中小型模具工装的生产。该业务主要为集团公司服务。

06 业务方向



HRC

BEYOND LIGHTWEIGHT

HRC 航空

中国江苏省常熟市东南大道1150号E栋
+86 512 89889588

www.grouphrc.com