

复合材料风扇包容机匣关键性能提升

Key Performance Improvement of Composite Fan Containment Case

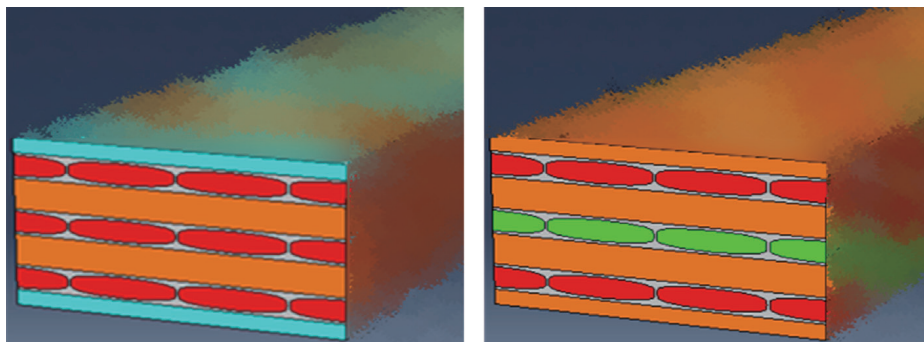
■ 孔维夷 徐焱 张璇 张建 谭智勇 侯乃先 胡寿丰 / 中国航发商发

聚酰亚胺-碳纤维混编复合材料方案解决了风扇机匣的轻量化与包容性两项关键性能同步改善的难题，可提升商用航空发动机的经济性和安全性，但传统的材料设计、仿真、制造和测试方法已不能完全适用，针对此种情况，创新团队开展了技术攻关。

在外物冲击或自身内部缺陷的影响下，风扇叶片可能发生失效脱落（FBO）。为保障飞行安全，适航法规要求风扇包容机匣必须包容脱落叶片和随之产生的高能碎片，并通过整机破坏性试验进行验证。风扇包容机匣是发动机上最大的静止件，单纯增加厚度来提升包容性无疑会为发动机增加额外的质量。此外，风扇包容机匣在整机中的质量占比会随着涵道比的增大不断增加。因此，兼备轻质和包容性能的风扇包容机匣的研制，无疑是商用航空发动机研发中最重要、最具挑战性的环节之一。近年来，国产聚酰亚胺纤维的性能和稳定性不断提高，其力学性能、耐紫外线和吸湿性能均明显优于芳纶纤维，为采用聚酰亚胺-碳纤维混合编织复合材料改善风扇机匣的轻量化和包容性提供了可能。

混编复合材料设计分析方法与工具开发

由于聚酰亚胺-碳纤维混合编织复合材料引入了新的纤维类型，因而比单种纤维的编织复合材料有着更加丰富的可设计性，但3种组分的协同作用又共同影响着复合材料的性能，出现多级破坏的现象，进行仿真分析的难度极大。常用的单胞建



自动化单胞建模分析不同混编方案

模分析方法涉及到几何建模、网格划分、施加周期性边界条件、求解和结果后处理的工序，步骤多、周期长，对人员要求高，易出错。而更为复杂的混编方案依然使用上述流程逐一建模分析显然不太现实。

因此，创新团队结合混编复合材料实际参数的表征、测试，改善了仿真方法与流程，再通过Python语言对仿真软件Abaqus进行二次开发，实现了自动化的混编复合材料性能预测，可一键完成复杂的单胞建模与分析过程，求解混编复合材料的等效材料性能，刚度性能预测仿真误差在5%以内，性能预测分析耗时缩减了90%以上。由此大幅减少了研制所需的试验量，减少了对人员经验、能力的依赖，提升了混编复合材料分析的一致性、正确性

和准确性。

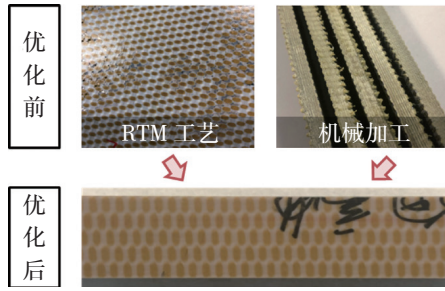
混编复合材料成型

两种不同的纤维材料除了给仿真分析带来困难以外，也给制造和加工带来了挑战。加入聚酰亚胺纤维后，纤维预制体的渗透率发生改变，同时聚酰亚胺纤维具有不易浸渍的特点，使得以往的成型工艺与经验难以直接应用。因此，创新团队基于渗透率测试与工艺仿真，研究了注射压力、速度等参数对成型质量的影响，优化注射流道设计与成型参数。在注射过程前期采用低注射压力，使树脂充分浸润预制体内部的纤维，在注射后期提高注射压力，确保在树脂工艺窗口内完成注射，提升了混编复材的成型质量。而且，聚酰亚胺纤维有着韧性好、但与环

氧树脂匹配性差的特点，这种高韧性的纤维通过相对脆弱的树脂基体结合到一起，即使最简单的平板切割也容易出现纤维起毛、树脂劈裂等加工质量问题，无法用于后续的测试。创新团队通过刀具筛选试验、刀具转速试验、进给速度试验等开展机加工工艺研究，结合高压水切割等方法探索，最终获得了聚酰亚胺纤维混编复合材料高质量加工的工艺方法。

混编复合材料机匣“积木式”仿真与试验

复合材料构件的性能与耐久性的验证过程，通常是一个包含试验和分析的复杂过程。逐一检验各种几何特征、载荷、环境和失效模式所需要的试件数目巨大，单纯使用试验

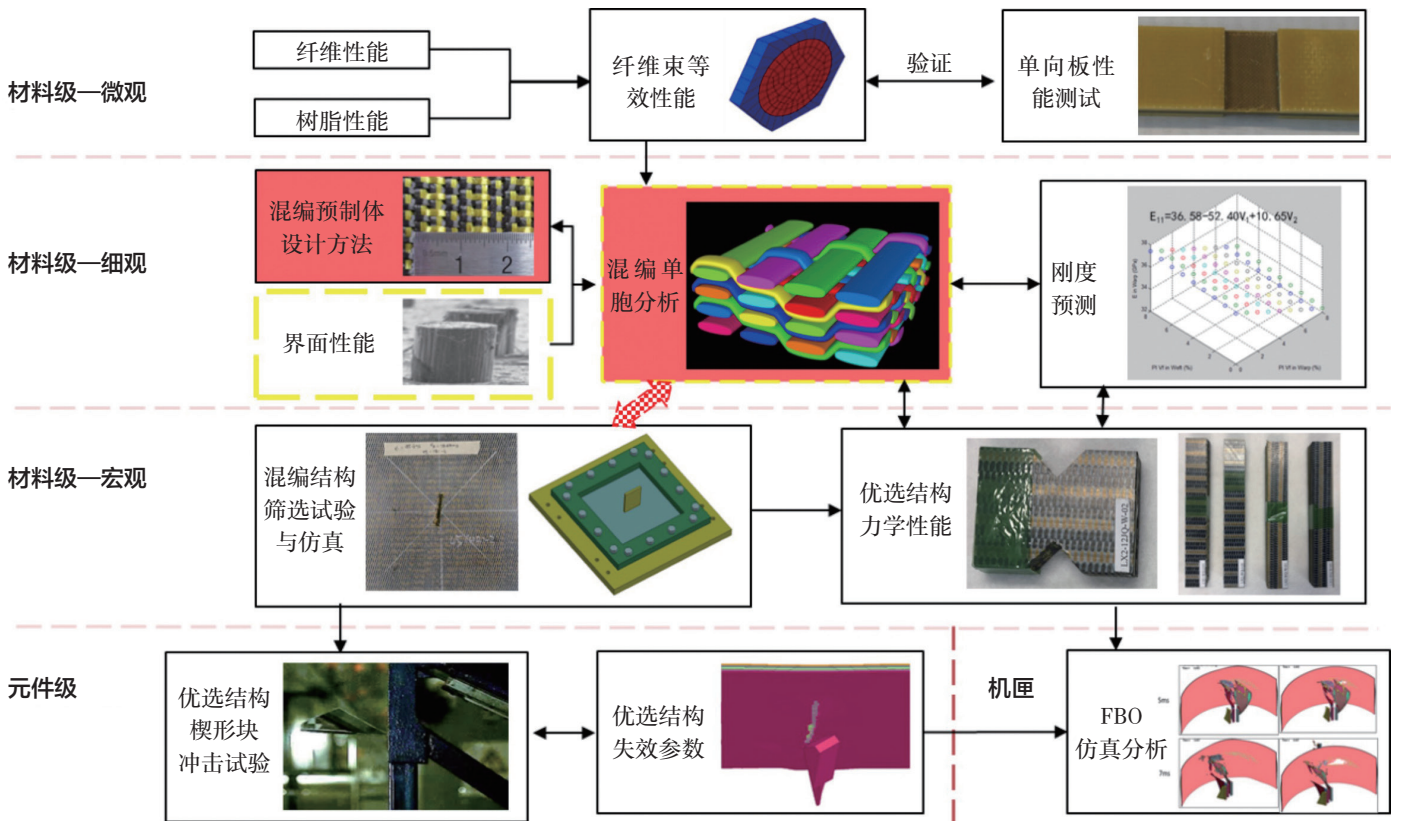


混编复材成型与制造优化

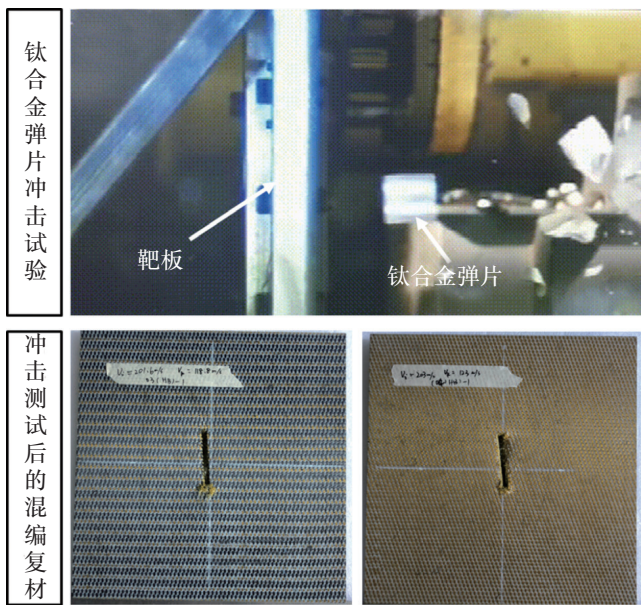
手段需要承受高额的测试费用，而只使用分析手段则不能足够精确地预测每种情况下的结果。创新团队运用“积木式”的研发方法，将复合材料风扇机匣复杂的包容问题进行合理解耦，逐级分解。按目前的研制阶段，在基础的材料级和元件级，策划开展6类、37项测试与验证，对聚酰亚胺纤维混编复合材料仿真与测试技术开展研究，逐项仿

真、逐级验证，最终建立了混编复合材料机匣的包容仿真分析方法。

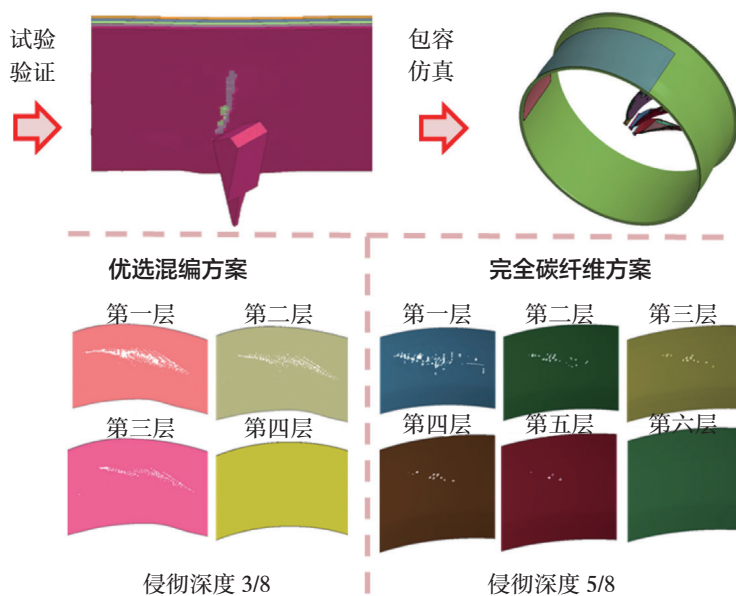
在材料级，除了开展常规的组分性能试验和复合材料力学性能试验外，还存在一项当务之急，即根据机匣FBO包容特点正确开展混编复合材料冲击性能表征试验，并从中选出冲击效果最佳的混编方案。这是因为在众多的混编可能性面前，即使有强大的仿真预测工具来寻找冲击性能最优的混编方案，所要探索的设计空间依然过于巨大。但复合材料冲击性能受测试方法的影响巨大，而目前的冲击测试方法普遍无法体现机匣FBO冲击包容的特点，以此指导结构设计可能会导致结果南辕北辙。创新团队从顶层的机匣FBO包容出发，通过查找文献与数值仿真，结合前期研制经验，逐一



“积木式”仿真与试验验证



钛合金弹片冲击不同类别的混编复合材料



混编复合用于包容机匣后的效果

甄别事件中的关键边界条件与关键冲击模式，开发了体现机匣包容冲击特点的复合材料平板钛合金弹片冲击试验方法；在此基础上，通过精心设计的交叉对比试验，通过少量试验研究了混编方案中的主要类别，如层间混编、层内均匀混编、纱线混股等；并从中确定了层内均匀混编的类别具有最佳的抗冲击性能；再结合仿真，在该类别中开展精细化混编方案优化设计；最终，优化混编方案经试验验证，对比织物结构相同的T800级碳纤维复合材料，钛合金弹片冲击试验中的临界冲击动能提升了45%，对比T800级碳纤维/增韧环氧树脂的铺层复合材料，临界动能提升了107%。

在元件级，团队对该优选混编方案的应用效果进行了进一步评估与验证。完成了与机匣包容区厚度相当的大尺寸混编复合材料平板制造，在楔形子弹冲击试验中，对其包容效果进行评估。该冲击试验方

法进一步体现了复合材料叶片、金属加强边冲击机匣的角度、切速度等因素对包容性的影响。结果表明，以上优选的混编方案，对比完全使用碳纤维三维机织复合材料平板，相同冲击能量下，靶板的侵彻损伤深度下降66%，而质量还减轻了7%。通过该试验，混编复合材料结构的冲击仿真方法得到了进一步验证。

基于上述标定后的仿真方法和参数，创新团队开展了混编复合材料用于风扇包容机匣的FBO包容仿真研究。考虑脱落叶片的首次冲击，以及尾随叶片对脱落的叶片加速后的二次冲击和后续冲击，对比完全使用碳纤维三维机织复合材料的包容机匣，混编复合材料使机匣的包容能力大幅提升，碎片侵彻损伤深度下降了40%，而机匣的质量减少了33kg。值得一提的是，该结果是在不改变机匣几何结构的情况下获得的。

混编复合材料机匣效益分析

参考相关资料中的数据，根据目前的结果推算，由于使用混编复合材料风扇包容机匣技术，仅机匣一项，一架双发民航客机每年可节省燃油792万L，降低运营成本396万美元。综上可以看出，该项技术在发动机上的成功应用，有望带来较好的经济效益，也能助力“碳达峰”“碳中和”战略的早日实现。

结束语

创新团队开发出的新型高性能聚酰亚胺-碳纤维混编复合材料取得了比纯碳纤维复合材料更强的包容性，同时显著减轻了质量。后续工作中，团队将对包容机匣的结构进行适应性优化，再结合差异化的混杂模式，有望显著提升包容机匣与发动机可靠性、质量一致性和稳定性。 **航空动力**

(孔维夷，中国航发商发，高级工程师，主要从事树脂基复合材料航空发动机部件的研发)