

复合材料在航空工程中的应用研究现状及前景

赵博猷

(中国航空规划设计研究总院有限公司, 北京 100120)

摘要: 复合材料是指两种或更多种性能各异的物质组合而成的多相体,其主要成分是加强料和基础料。相对于普通金属材料,复合材料具有高强度、高模量、高各向异性及可设计性、良好的抗疲劳性能、良好的成型工艺、良好的尺寸稳定性、较低的层间强度以及较高的成本。鉴于复合材料优异的力学性能,其在军用和民用飞机制造中的比例不断提高。针对复合材料的种种特点,文章将详细阐述复合材料在航空领域的应用现状以及发展前景。

关键词: 复合材料; 航空工程; 碳纤维树脂基

中图分类号: V25

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2023.15.051

20世纪40年代至50年代,航空航天领域出现了一种新型材料——玻璃纤维增强材料,这就是玻璃纤维。玻璃纤维的出现大大降低了飞机的整体重量,提高了结构强度,使飞机的设计和性能达到了一个新的水平。经过近一个世纪的发展,军事和民用领域出现了各种不同用途的复合材料,如耐高温的C-C航空航天复合材料。复合材料已经从制造二次承载结构部件(如飞机升降装置和尾舵)扩展到制造主要承载结构(如翼盒和梁)。因此,在现代飞机设计中,复合材料在总重量中的比例已成为重要的设计和评价标准。

有别于常规各向同性合金—金属航空航天材料,复合材料作为多相结构,其纤维和基体之间不同的力学性能存在差异,因此其力学性质表现出各向异性。一方面,其各向异性特征赋予了复合材料构件可设计性,能够更好地应对外力作用,增强了其可靠度;另一方面,由于其受力特性的复杂性,使得其连接件的设计及破坏机制的分析变得十分困难。当前,以粘接、螺钉等为主的复合材料构件连接形式为主,且多集中于翼身等关键承受力部位,其连接强度一直是复合材料飞机设计与研发中亟待解决的难题。复合胶粘剂的力学性能直接决定了复合胶粘剂的粘接强度。在装配过程中,由于在装配体内部打孔,不但影响了装配体原有的力学性能,而且会产生较大的应力集中,使得装配体内部的应力分布及破坏形式更加复杂,严重制约了

装配体的强度及服役寿命。

在飞机的日常运行与维修过程中,常会遇到诸如冰雹、维修工具脱落等低速碰撞故障。由于复合材料层状结构是由独立的单层预浸料按一定的帘布形式层层堆积而成,其力学性质主要受纤维取向影响,且撞击装置一般沿复合材料铺层厚度分布,因此其抗冲性能不佳。相对于高速撞击,低速撞击一般不会直接进入复合材料层板内部,也不会在其表面产生显著的划痕,但在其内部,层板间会有更为严重的脱层区,从而对其设计力学性能、结构的强度及服役寿命产生重大影响。

1 复合材料性能研究现状

不同的纤维和基质对复合材料的影响也是不同的。根据纤维种类的不同,复合材料有碳纤维、芳纶纤维、碳化硅纤维等;主要有树脂类、金属类、陶瓷类、水泥类等。其最显著的特征就是能够在同一时间进行材料设计与结构设计,展示了材料、技术、设计的三位一体。

1.1 碳纤维树脂基复合材料及其构成

这里主要对碳纤维树脂基复合材料(CFRP)进行介绍。碳纤维—高强度树脂基复合材料是一种具有广泛应用前景的新型结构复合材料。

(1) 碳纤维(carbon fiber)。碳纤维是一种可加工的柔性纤

纤维，是一种新型的双向功能纤维。按照原料的种类，可将碳纤维分为三大类：聚丙烯腈（PAN）基碳纤维、沥青基碳纤维以及粘胶基碳纤维。在这些碳纤维中，以 PAN 为主要原料的碳纤维的产量超过 90%，而粘胶基碳纤维的产量不足世界碳纤维总产量的 1%。目前，全球碳纤维的制造技术被美国、日本所垄断，其制造厂商有东丽、东邦、三菱等。日本东丽公司是世界上最大的碳纤维制造商，其产品的质量和性能都是世界上最好的。东丽公司的主要碳纤维产品的特性参数列于表 1 中。

表 1 日本东丽公司部分主要碳纤维产品性能参数

碳纤维种类	强度 (MPa)	模量 (GPa)
T300B	3530	230
T700SC	4900	230
T800HB	5490	294
T300J	4210	230
M40	2740	392

(2) 树脂体系。树脂由许多聚合物分子链组成，这些分子链通常以线或簇的形式不规则排列。一些大分子链相互交联形成立体网络结构的聚合物，并且有一类聚合物大分子的主链上有一些大的或小的、长的或短的支链，整个分子呈现线性结构。在先进的复合材料基体品种中，树脂基复合材料的应用非常成熟，适用范围较为广泛。在树脂基体中，主要使用热固性树脂，从早期的甲醛环氧树脂、氨基四官能环氧树脂到美国 F-22 使用的双马来酰亚胺树脂都是此类树脂。

在我国，改良后的酚醛环氧树脂是在 1969 年发展起来的，当时它正处于发展阶段。双马来酰亚胺树脂 QY8911 因其优异的耐热性、收缩性和加工性等特点，于 1985 年被中国某大型客机研制成功，并被国内 6 个大型客机和多个大型客机所选用。双马来酰亚胺树脂 QY8911 能够达到飞机的有关重量减轻的要求，并能够在后失速状态下进行操纵；在保证 15 (rC) 左右载荷的前提下，既能保证飞机在超音速飞行中的持续升温，又能

维持较高的载荷。在这样的高温条件下，普通的环氧树脂胶和轻量金都不足以起到保护作用。树脂体系对外界低速撞击的耐受性，可由撞击后复合材料的压缩强度得到充分的证实。外来撞击引起的材料破坏以层状、基体树脂断裂为主。在较高高度时，能有效地减小材料在冲击破坏时的脱层面积，降低材料的裂解损耗。在下表 2 中比较了各种热固性树脂体系的参数。

为获得一体化结构，基体树脂需在特定温度下能稳定流动、成膜、粘附性好、凝胶窗口大、粘度可调、无挥发性、无小分子组分逸出、制备的碳纤维预浸料粘度高。在复合热压罐成型时，对热固性树脂的要求也是相当高的，如果树脂的流动性过强，则会引起工艺控制难度大，对复合材料的粘结力造成影响；而如果流动性过弱，则会引起纤维层之间接触差、树脂分布不均匀。因此，对树脂流动性能进行检测，并对其成型过程进行优化，对其进行质量控制具有重要意义。流变学的理论在很多学科中都有应用。如，流变研究主要是通过对压力、时间等参数的分析，来探讨流体与变形的产生与发展过程，通过对其流变特性的分析，可以更好地掌握其工艺特性，进而选择出最适宜的工艺参数，以得到最优的产品。

1.2 复合材料胶接连接结构研究现状

在航空航天领域中，复合材料部件间的连接强度直接关系到整个结构的强度与安全性，进而关系到飞机的服役寿命。为此，有必要对目前普遍采用的两种结构形式——螺钉与胶接的破坏机制进行深入的研究，以指导轻型机结构连接的设计。

胶接具有结构简单、质量轻、易维护、不破坏基材等优点，是一种极具应用前景的新型连接方法。但是，目前采用的粘接方式也存在着不易拆装、不易维修等缺陷，使其在实际工程中的应用受到很大的限制。由于其在实际工程中得到了大量的使用，所以对其抗拉性能及失效机制进行深入的研究

表 2 不同热固性树脂体系性能参数对比

树脂类型	许用压缩应变 ($\mu\epsilon$)	结构减重 (%)	冲击后压缩强度 (Mpa)
酚醛环氧树脂	2500~2800	<20	125138MPa
QY8911	3800~4000	22~25	178MPa
QY9511	4500~5000	>25	300MPa

究,对于工程设计有着十分重要的意义。对于单搭接的复合结构而言,其粘结性能取决于复合层合板和胶粘剂本身的机械性能。针对复合材料层合板及胶粘层受拉破坏时的力学特性,对其进行了大量的试验及数值模拟。针对复合材料损伤的起裂与演变,已有大量的研究应用了复合破坏准则与内聚性破坏模型,并在此基础上对比了不同尺度下胶接结构的胶接性能与材料的损伤情况。

王学春等人采用有限元数值模拟与试验相结合的方法,对不同胶接方式下的复合胶接结构进行了试验研究^[1]。采用有限元方法计算了材料的应力-应变关系,并与试验数据进行了比较。然而,现有的试验研究仅能得到单层复合材料的拉拔力学性能及表面损伤分布,而层合板中的层间脱层损伤则不能得到完整的观测,还需采用有限元法对其进行深入分析。采用有限元方法,对粘合结构上的复合材料层压板进行了力学性能的分析。目前,用有限元方法对单层叠层构件进行力学性能分析时,多采用损伤模型。

刘镇阳等人对胶接节点进行了试验,对其在不同周期下的剩余强度进行了测定^[2]。研究发现,在交变载荷作用下,两个节点的剩余强度先是逐渐降低,随后急剧降低。已有的研究大多针对已知的胶接结构,而针对胶接层自身的劣化规律却鲜有报道。

1.3 复合材料层合板低速冲击研究现状

相对于高速度下的撞击,低速度下的撞击破坏多发生在材料内部,且不易被直接观测到。但在复合材料中,任意一种损伤形式均会导致其初始设计性能失效,对复合材料轻型机结构的正常维修与服役提出了严峻的挑战。对于复合材料低速性能的研究主要关注两个方面:一是考虑冲击能、载荷以及复合材料层合最大变形等因素对复合材料层合结构的影响;二是复合材料叠层板在低速撞击下的破坏形式及破坏在层间及层中的破坏形式。

余芬等人通过对不同铺层方式、不同厚度的复合层合板进行实验,结果表明:当复合层合板的厚度增大时,其抗冲击能力也随之提升^[3]。已有的试验研究大都仅能得到复合材料层合

板的力学性能参数,缺乏专门的测试手段,难以准确判别出不同类型的损伤。采用有限元法,可实时观测复合材料层合板在不同载荷作用下的力学反应及损伤演化过程,为其设计提供更直接的依据。在此基础上,利用有限元法对其进行了应力、应变分析,并对其进行了损伤力学仿真。

付豪等人的研究表明,在外加载荷作用下,复合材料将发生塑性变形,但目前尚缺乏对其力学性能改变的分析^[4]。复合材料层合板的内部破坏行为包括两个方面,即破坏形式的判定和刚度的降低。采用复合材料破坏准则,判断其破坏形式。其中,3DHashin准则由于其结构简单,且在基体损伤初始条件中加入了沿着厚度的应力,因此其预报精度更高,被广泛应用于工程实践。由于其制备工艺特点,在发生损伤后,其刚度是逐步衰减的,以经验参数为基础的突变衰减模型与以经验公式为基础的指数衰减模型难以准确反映复合材料在三维环境中的持续衰减过程。在此基础上,提出了以破坏能为基础的能量演化模型。但是,原有能量演化模型在基体损伤演化模型中没有考虑沿厚度方向上的应变分量,因而不能准确地反映复合材料在大部分三维条件下的渐进损伤特性。

2 复合材料在航空工程中的国内外应用现状

2.1 国外

当前,在复合材料技术的应用方面,国际上已经开展了很多研究工作。目前,国内外对复合材料的研究多集中于金属基体和高分子基体。采用聚合物基复合材料可大幅度降低飞行器的重量,提高飞行器的力学性能,这一点已获得国内外同行的一致认可。以树脂为基体的航空部件相比于常规材料,重量降低了20%~30%,且部件的维护与替换成本降低了15%~25%^[5]。此外,利用树脂基复合结构,还可实现“隐身”,并可在一定程度上降低飞行器对雷达的感应区域,从而达到更好地吸收雷达感应波的目的。

国外许多公司已将复合材料用于航空器的制造方面,如法国空客公司早在2013年就研制出一款具有52%复合材料性能的客机,并试飞成功。金属有机骨架化合物(MOFs)的组成

是以银、钨等贵金属为主的金属元素，MOFs 材料因其不受温度影响，耐高温，不易膨胀等特点而备受关注。国外学者对此进行了大量的研究，并把目光投向了由氧化硅、氧化铝和碳化硅等材料制成的陶瓷纤维。

2.2 国内

由于我国的航天产业起步比较晚，在航天材料的研发上远远落后于国外。在国内，以树脂基复合材料为主，已有 20 余年的研究积累，并取得了一定的成绩。目前，国内已成功地研制出了 BM 型、中温固化环氧型、阻燃型、环氧型等具有较高性能的复合树脂材料。在我国的航空器制造中，已有很多相关的复合材料被采用。近几年来，随着我国航空工业的快速发展，对复合材料的研发水平有了很大的提高。国内复合材料的生产制造水平已取得了长足进步，如中国的航空工业已经使用了大量的复合材料，使飞机的总重量下降了 15% 左右；我国航空发动机采用的是陶瓷纤维增强的陶瓷基复合材料，而粒子增强的铝基复合材料则被广泛应用于航空光学仪器、热控部件以及航空航天飞行器等领域。综上所述，我国航空航天用复合材料的发展已初具规模，但是对于复合材料的研究仍然需要相关的科研人员继续努力，制造出品种多、质量好以及成本更低的复合材料^[6]。

3 复合材料在航空工程中的应用前景

树脂基复合材料在航空航天领域的应用表现出三大特点：一是不断向着高性能方向发展，越来越多地关注构件的轻量化；二是当前航空用复合材料的造价比较昂贵，尤其是在民用领域复合材料的成本太高，造成了很大的阻碍。在我国航空航天事业中，必须大力推进材料加工工艺的综合应用，以及 LCM、SCP 等新工艺的应用；三是基于热塑性树脂基复合材料具有高强度、高韧性、耐腐蚀等特点，且易于长时间贮存，因此，今后的研究方向将向热塑性树脂基复合材料方向发展。目前对热固性树脂的研究以硅酮、氰酸酯等为重点，性能研究方向主要应放在电性能、耐热性能上。在今后的发展中，人们对复合材

料的需求也会不断提高，从而推动相关研究，例如，对高性能热塑性树脂、导弹天线罩、PTFE、PEEK 以及聚酰亚胺等材料的研究。

4 结语

总的来说，在经历了 40 多年的研究与探索之后，我国已经建立起了一套完善的复合材料的生产与制造系统，其中一些研究成果已经被成功地运用到了航天工程中，并收到了很好的效果。但是，目前我国的复合材料研发水平还远远落后于欧、美等发达国家，急需提升以研制出更多具有自主知识产权的高性能复合材料。我国要向欧、美等发达国家借鉴和学习，以突破复合材料研发瓶颈，推动我国航空航天事业的快速发展。

参考文献：

- [1] 王学春, 刘一帆, 赵国娇. 民用飞机复合材料加筋壁板制造技术研究 [J]. 化纤与纺织技术, 2022, 51 (11): 50-52.
- [2] 刘镇阳, 翟雨农, 李东升, 等. 飞机复合材料壁板装配变形控制技术研究与应用进展 [J]. 航空制造技术, 2022, 65 (18): 46-54, 78.
- [3] 余芬, 刘国峰, 何振鹏, 等. 热力耦合作用下复合材料沉头螺栓搭接结构渐进损伤研究 [J]. 复合材料科学与工程, 2022, (03): 5-14.
- [4] 付豪. 新材料在航空工程中的应用 [J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57 (08): 142-143.
- [5] 郭双雷, 韩磊, 尚新库. 先进航空工程材料的性能特点及其应用 [J]. 中国西部科技, 2011, 10 (17): 38-39.
- [6] 朱晨, 纪朝辉, 郭英. 复合材料在航空工程中的应用研究现状及展望 [J]. 航空维修与工程, 2003, (03): 25-27.

作者简介：赵博猷（1982-），男，辽宁鞍山人，大学本科，主要从事航空产业新材料应用研究。