

环保复合材料在大型客机上的应用前景分析

Application Prospect Analysis of Environmental Protection Composites on Large Passenger Aircraft

上海飞机制造有限公司 张 婷

[摘要] 目前,在大型客机上广泛应用的复合材料主要是热固性树脂基复合材料,但由于高制造成本及材料难回收等问题,一定程度上制约其在飞机上的应用扩展。在强调低成本制造和环保的今天,“绿色材料”热塑性树脂基复合材料由于其优良的综合性能和低成本优势,可以作为一种有前途的替代材料使用在大型客机结构件上。本文将从热塑性复合材料制件的综合制造成本、性能、工艺以及材料的回收和再利用等方面分析热塑性复合材料在大型客机上的应用前景。

关键词: 环保复合材料 热塑性 大型客机

[ABSTRACT] At present, composites widely used in large aircraft are mainly thermosetting resin matrix composites, while the problems of high cost of manufacture and difficulty of material recycle restrict its extensive application in aircraft. Today, people pay more and more attention on low cost manufacturing and environmental protection. “Green material” thermoplastic composites could be used as promising alternative materials in large aircraft structure parts owing to its excellent comprehensive properties and low cost advantage. In this paper, the possible application of thermoplastic composites in large aircraft are analyzed from the manufacturing cost, materials performance, materials processing, material recycling and reuse.

Keyword: Environmental protection composites Thermoplastic Large passenger aircraft

复合材料已经成为大型客机的首选结构材料,其用量占机体重量的百分比更是成为衡量民航先进性的一项重要指标^[1]。

以空客公司为例,复合材料用量从 A300 的 5% 发展到 A350 的 53%;而波音公司最先进的飞机 B787 上复合材料用量也达到结构总重量的 50%^[2]。尽管两大飞机制造公司对复合材料在飞机结构减重方面取得的效果表示满意,但仍对选择金属材料还是复合材料存在强烈争议,对复合材料在商用飞机上用量的进一步扩大持谨慎的态度,原因是目前在飞机结构上广泛使用的复合

材料主要是热固性树脂基复合材料(通常是碳纤维增强环氧树脂基复合材料),其耐湿热性、抗冲击和损伤能力及延伸率均较差,难以满足飞机某些部件的设计和适航认证的要求,在一定程度上限制了飞机复合材料主承力结构的发展^[3];另外,热固性复合材料在飞机制造过程使用的预浸料/热压罐技术非常昂贵,制造成本难以进一步降低,且其环境友好性差、废弃物难以回收处理,都制约其在飞机上应用的进一步扩展^[4-6]。

热塑性复合材料可以较好地解决高制造成本及材料回收等问题,并且由于高性能热塑性复合材料具有许多优于热固性复合材料的综合性能,因此可以替代热固性复合材料用作性能要求较高的飞机结构材料^[7-10]。本文将从热塑性复合材料制件的综合制造成本、性能、工艺以及材料的回收和再利用等方面分析热塑性复合材料在大型客机上的应用前景^[11-12]。

1 热塑性复合材料在大型客机上的应用优势

1.1 成本优势

航空复合材料制件的综合成本包括 2 个方面:材料成本和工艺成本。图 1 比较了碳纤维增强热固性树脂(环氧)基复合材料和热塑性树脂基(PEEK、PEI 和 PPS)复合材料的材料和工艺成本。从图中可以看出,碳纤维/环氧热固性复合材料制件的综合制造成本最高。同时,碳纤维/PEEK 热塑性复合材料相对于其他热塑性复合材料综合成本相对比较高,这是由于 PEEK 预浸料制造成本比较高,但由于碳纤维/PEEK 热塑性复合材料制件工艺成本较低,故其综合成本还是低于碳纤维/环氧热固性复合材料。而碳纤维/PPS 热塑性复合材料制件的综合成本仅是传统碳纤维/环氧热固性复合材料制件综合成本的一半。

航空热塑性复合材料制件的综合成本较环氧树脂基热固性复合材料低的原因主要有 2 个方面:(1)由于热固性复合材料需要低温存放,所以有一定的保质期,而热塑性复合材料的预浸料无存放环境与时间限制,可长期贮存,废料还可以回收再利用,故综合材料制备、材料存放和材料回收处理,其综合材料成本较低;(2)由于热塑性复合材料在加热过程仅发生加热变软和冷却

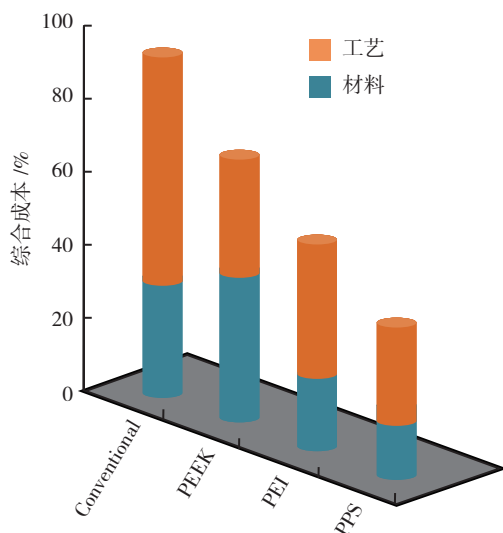


图1 复合材料制件综合成本比较

Fig.1 Comparison of comprehensive cost of composites

变硬的物理变化,故成型周期短、生产效率高,并且可多次加工,便于修补。相比较于热固性复合材料昂贵的热压罐工艺和有限的高温加工次数,制造成本也较低。

1.2 工艺优势

热固性复合材料需要加热到分子链发生胶连固化反应,成型周期较长;对航空制件而言,一般加热周期需要高达6个小时以上。而热塑性复合材料只需要加热到树脂熔点即可成型制件,成型周期通常只需要几分钟。尽管成型时间和制件厚度成正比关系,但相比较于热固性材料成型时间还是大大减少。

图2比较了热固性复合材料和热塑性复合材料的成型工艺周期。对热固性复合材料而言,制件需要在模具中加热和固化。而对热塑性复合材料而言,将模具加

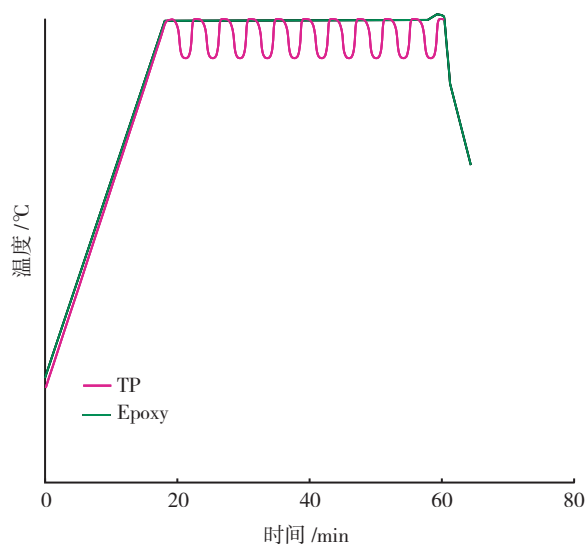


图2 复合材料的成型工艺周期

Fig.2 Typical composite process cycles

热到一定温度,将材料放入并热压到需要的形状;再将模具打开,移出制件并新加入材料,重新加热到要求温度即可马上成型下一个制件。假设两种材料的成型温度一致,从图2可以看出,一般每6min即可成型一个热塑性复合材料制件,成型10个热塑性复合材料制件才可以成型1个热固性复合材料制件。当然,环氧树脂和热塑性树脂的固化温度和熔点往往是不一致的,但总体趋势是对于批量生产,热塑性复合材料制件具有较大优势。

自动铺丝/铺带技术被越来越多地使用在航空制件上。与热固性复合材料的自动铺放技术相比,热塑性材料除了具有缩减剪裁时间、减少铺层褶皱、铺叠定位准确等共有优势外,由于其在自动铺放的过程中,加热设备也完成了在线固化过程,故减少了热固性复合材料需要的后期热压罐固化过程,大大提高了生产效率。

另外,可焊接性也是热塑性复合材料的一个突出优势。由于热塑性复合材料的成型过程是一个加热熔化、冷却固化的物理变化过程,故结构件之间可以直接熔融焊接。对一些带有长桁或肋的制件,可以直接将长桁或肋焊接到蒙皮上,而不需要胶接或铆结工艺,能有效减轻飞机重量,并且利于后期维修。

1.3 性能优势

与热固性复合材料的环状胶连分子结构相比,热塑性复合材料的线状链的分子结构使得聚合物保持着更好的韧性,材料具有较高的韧性、优良的抗蠕变能力、优秀的损伤容限性能以及良好的抗冲击性能,有利于克服热固性树脂基复合材料层间韧性不足和冲击分层的缺点,可应用于使用环境较为苛刻、承载能力要求较高、容易受到强烈冲击的场合。另外,由于热塑性复合材料是在冷却过程中固化,而热固性复合材料是在升温过程中固化,因此热塑性复合材料制件的残余应力较少。

1.4 环保优势

热塑性复合材料制件的环保优势体现在3个方面:低能耗、废料可回收利用、有机污染物和有毒分解物含量低。

热塑性复合材料制件固化周期短,无需昂贵的热压罐固化工艺,尤其是在线固化的自动铺带技术的应用,使得热塑性复合材料制件制造过程中的耗能远远低于热固性复合材料。

另外,热塑性复合材料使用过程中剩下的边角料可以加工成粒料用作注射成型或挤出成型用;制件可以重新加热成型,使制件容易再成型、修补或加工成性能要求不高的其他制件。而对于热固性复合材料,其边角料只能作为有害废料进行填埋,成型后的制件也无法回收和再利用,造成了许多难以回收的工业垃圾。

最后,热固性复合材料在原材料制备过程中添加了有害溶剂,在高温高压成型过程中这些有害物质会挥发出来污染空气,并会产生其他有害的副产物。而热塑性复合材料既没有溶剂在高温时挥发,也没有固化机制产生有害副产物,能完全满足航空产品的“FST”要求。是一种低耗能、低污染的“绿色材料”。

2 热塑性复合材料在大型客机上的应用现状

2.1 热塑性复合材料在福克客机承力结构件上的应用

从 20 世纪 90 年代初开始,福克公司就开始致力于热塑性复合材料在飞机上的应用研究,并取得了许多突破性进展。到目前为止,热塑性复合材料在福克公司参与设计制造的客机结构件上的应用主要包括:

- (1) Fokker 50、Fokker100 结构地板 (C/PEI);
- (2) Fokker50 方向舵前缘翼肋 (C/PEI)、主起落架翼肋和桁条 (C/PPS);
- (3) 多尼尔 328 襟翼肋 (C/PEI);
- (4) 湾流 G450、G550 and G650 方向舵肋、后缘、压力舱壁板 (C/PEI);
- (5) 湾流 G650 方向舵和升降舵 (C/PPS);
- (6) 湾流 V 方向舵肋、增压隔框、地板,湾流 IV 方向舵前缘 (C/PEI)。

另外,由福克公司参与设计开发的 G650 型商务机的方向舵和升降舵也采用了 C/PPS 热塑性复合材料半预浸料片材,制造周期只需要几分钟,比此前的环氧树脂夹层结构重量减轻 10%、成本降低 20%。福克公司还凭借这个焊接的热塑性复合材料方向舵和升降舵赢得了 2011 年 JEC 航空类的创新大奖^[13]。

2.2 热塑性复合材料在空客客机承力结构件上的应用

空中客车公司一直是新材料、新工艺在民用客机上使用的领跑者和倡导者,其从 20 世纪 90 年代初开始参与到热塑性树脂基复合材料在大型客机上的应用研究,并成功地将 PPS 树脂基热塑性复合材料应用在一些结构简单、尺寸较小的肋、梁等小件上。随着材料性能、成型工艺以及装配技术的提高,新型飞机上越来越多地采用了热塑性复合材料零件和组合件。表 1 给出了部分已经商品化的热塑性复合材料在空客机模型结构件上的使用情况^[14-15]。

2.3 热塑性复合材料在波音客机上的应用

波音公司在热塑性复合材料上的早期应用主要集中在飞机内饰件上,例如,在 A380 上热塑性树脂基元件超过 1000 个,大约重 2.5t。其中仅在飞机座椅设备中就含有 60%~70% 的 C/PPS 材料,相比于铝材来说,重量减轻 40%~50%,并且节约成本 20%~25%^[16]。下面简单总结了一下波音公司现有机型上的热塑性材料:

表1 热塑性复合材料在空客飞机上的应用

材料	机型	使用部位
C/PEEK	A400M	油箱口盖
Glass/PPS		除冰面板
Glass/PPS		副翼翼肋
Glass/PEI	A320	货舱地板夹层结构面板
PPS	A330	副翼肋、方向舵前缘部件
Glass/PPS	A330-200	方向舵前缘肋
PEI	A330-340	机翼整流罩
C/PPS	A340	副翼肋、龙骨梁肋
PPS	A340-500/600	副翼肋、方向舵前缘部件
Glass/PPS		翼内检修盖板、龙骨梁连接角片、龙骨梁肋、塔板
C/PPS		机翼固定前缘盖板
Glass/PPS		机翼固定前缘
PPS	A380	副翼肋、方向舵前缘部件
PPS		翼内检修盖板、龙骨梁连接角片、龙骨梁肋
Glass/PPS		机翼固定前缘
Glass/PPS		发动机面板

- (1) 波音 737 (PEI): 烟雾探测器;
- (2) 波音 737/757 (PEI): 厨房;
- (3) 波音 747 (PEI): 装载箱及环境系统组件;
- (4) 波音 767 (PEI): 飞机支架及吸音砖;
- (5) 波音 787 (PEI): 环境系统管道;
- (6) 波音 787 (PPS): 飞机座椅等。

3 热塑性复合材料在大型客机上的应用前景

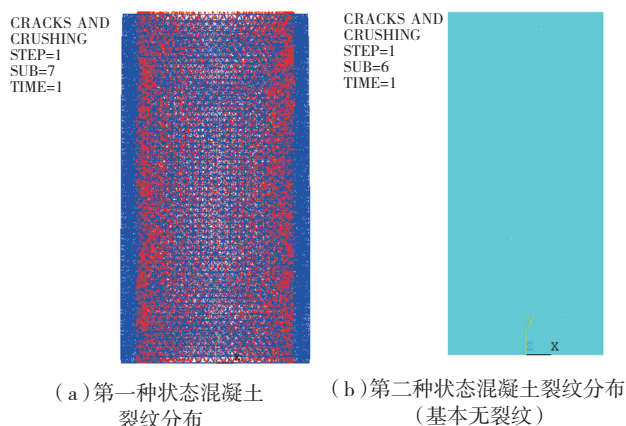
迄今为止,国外热塑性复合材料在飞机上的应用已经建立起了合理的商业模式,该模式将减重和低成本有机结合,同时,关于热塑性大型主结构件的商业模式正在验证。其中针对大型主结构件(如蒙皮加筋整体壁板)也取得了多个阶段性进展。

新材料的应用、创新的设计和制造技术是主要的创新要素,随着材料和工艺各项技术的改进和突破,不排除将来在飞机机身结构上也大量应用热塑性复合材料的可能。

计划于 2004 年首飞的国产大飞机复合材料用量将达到 15.9%,但鉴于适航取证的困难,结构件上使用的复合材料还是非常成熟的环氧树脂基复合材料,热塑性复合材料在结构件上的应用为零。

为了加快热塑性复合材料在客机结构件上的使用步伐,我国国产大飞机也可以考虑先参照国外热塑性复合材料在飞机上使用的成功案例,在一些需要大量使用

(下转第 149 页)



(a) 第一种状态混凝土
裂纹分布 (b) 第二种状态混凝土裂纹分布
(基本无裂纹)

图4 复合管中混凝土的两种状态裂纹分布图

Fig.4 Crack distributions for a composite pipe
under 2 concrete conditions

通过调整高强聚合物基预应力层的预应力可对混凝土预应力进行设计与控制。

3 结论

基于多基复合管材的应用背景,本文对多基复合管材的结构设计理论做了探索性的研究,且通过数值仿真进一步为结构设计提供了依据,为该复合材料大规模应用于管道设计做了有益的基础性研究。具体从管道设计的流程出发,推导了实际管道设计中可以使用的公式如下:

(1) 管道实际使用过程中的土荷载、地面活载、管内流体自重、管体自重等外载荷在管道上产生的压力的分布规律,外载荷作用下引起的基础包角上的支反力分布规律;

(2) 预应力层中施加预应力后管道上各材料层应力分布均匀化处理后的应力计算公式。

参考文献

- [1] 李卓球,岳红军. 玻璃钢管道与容器. 北京: 科学出版社, 1990:600-619.
- [2] 龙驭球,包世华. 结构力学. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [3] 王耀先. 复合材料力学与结构设计. 上海: 华东理工大学出版社, 2012-09.
- [4] 吴兴文. 多基复合管的结构分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [5] American Water Works Association. ANSI/AWWA C304-2007 standard for design of prestressed concrete cylinder pipe. American Water Works Association, 2007.
- [6] American Water Works Association. ANSI/AWWA C301-2007 standard for prestressed concrete pressure pipe, steel-cylinder type for water and other liquids. American Water Works Association, 2007.
- [7] American Water Works Association. AWWA Manual M9-2008 concrete pressure pipe. American Water Works Association, 1995.

(责编 良辰)

(上接第 146 页)

的梁、肋结构上使用热塑性复合材料,充分发挥热塑性复合材料可以快速成型、批量生产的低成本、高效率优势;同时,在一些需要抗冲击(如前缘结构)或耐高温的部位(如发动机面板)也可以使用热塑性复合材料,以充分发挥热塑性树脂材料较高的韧性、优秀的损伤容限性能和抗耐热性等特征。另外,一体化热成型批量生产热塑性复合材料零件是未来的一个重要发展趋势,其设备研制相对容易,制造工艺相对简单,我国低成本制造工艺也可以考虑从该项技术的研发开始,积累经验,并逐渐赶上国外先进制造水平,争取在将来使用我国自主研发的自动化成型设备,如自动铺带、铺丝、缠绕、拉挤设备等。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料和航空航天. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
- [2] 张兴金,邓忠林. 浅谈纤维复合材料与中国大飞机. 纤维复合材料, 2009, 6(2):24-26.
- [3] 刘雄亚. 纤维增强热塑性复合材料及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [4] 陈绍杰,申屠年. 先进复合材料的近期发展趋势. 高科技纤维与应用, 2004, 29(1):1-7.
- [5] 黄汉生. 复合材料在飞机主结构中的应用动向. 化工新型材料, 2004, 32(10):51-52.
- [6] 贺福,孙微. 碳纤维复合材料在大飞机上的应用. 高科技纤维与应用, 2007, 32(6):5-8.
- [7] Peter M. High performance thermoplastic. Plastics engineering, 2007, 6: 18-22.
- [8] Béland S. High performance thermoplastic resins and their composites. The united states of America: Noyes, 1991: 1-156.
- [9] Ramathal H, Favaloro M. A comparison of maximum use temperatures for high performance thermoplastic composites. Presented at the SAMPE 2008 Fall Technical Conference, Memphis TN.
- [10] Ahmed T J, Stavrov D, Bersee H E N, et al. Induction welding of thermoplastic composites—an overview. Composites: Part A, 2006, 37: 1638-1651.
- [11] Michael Favaloro. A Comparison of the environmental attributes of thermoplastic vs. thermoset composites [EB/OL]. 2009, <http://www.thomasnet.com/pdf.php?prid=101809>.
- [12] Lang D, Barre S, Colas C C, et al. Thermoplastic Tape Placement and Continuous Consolidation. RTO-MP-069(II), 2001, 23: 1-5.
- [13] Innovation award for breakthrough technology of G650 rudder and elevator[EB/OL]. 2010-04-12, www.ticona.com.
- [14] 陈亚莉. 高性能热塑性复合材料在飞机上的应用. 航空维修与工程, 2003, 3:28-30.
- [15] Thermoplastic composites for aerospace [EB/OL]. 2008-01-09, www.iapd.org.
- [16] Yao K D, Liu J, Cheng G X, et al. The application of thermoplastic matrix composites to aircraft industry. Appl. Polym. Sci., 1996, 60:279.

(责编 亿霖)