

复合材料结构长桁端头设计

Design of Composite Structure Stringer Bottom

李庆飞 吴承思 / Li Qingfei Wu Chengsi

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

现代民用飞机结构中大量采用复合材料长桁,而其材料性能和工艺特殊性会导致在使用过程中经常出现长桁和蒙皮分离现象。为了提高脱胶起始载荷,通过有限元方法分别对长桁末端腹板斜削设计和增加长桁末端附近缘条面积设计进行研究分析,总结出了复合材料结构长桁端头细节设计诸多有意义的结论。

关键词: 复合材料;长桁;有限元分析

[Abstract] Modern aviation structure adopt composite stringer greatly, but the special nature of composite material and technology conduce separate of pain and stringer in use. In order to advance incept load of unglue, study the influence of stringer bottom web inclined cuted and stringer bottom flange area separately using finite element method. Finally a set of preferable results of composite structure stringer bottom detail design for real engineering are obtained.

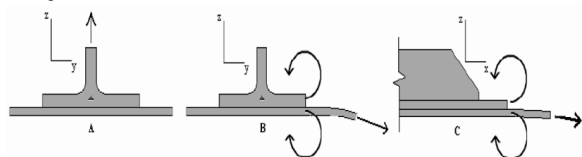
[Key words] Composite Stringer; Upper Panel; Structure Design

0 引言

长桁是飞机结构设计中的一种常用构件,多用于对薄板的支持。金属的长桁加筋壁板一般由整体机加件或机械连接,而复合材料长桁加筋壁板多采用胶接共固化成型工艺。复合材料的材料特殊性和工艺特殊性会导致其在使用的过程中出现长桁和蒙皮分离的现象。本文对复合材料长桁端头设计进行研究,希望通过研究找到降低长桁和蒙皮分层可能性的方法,同时,为复合材料长桁的结构设计提供一点建议。

1 长桁的破坏形式

加筋板中的长桁主要承受轴向载荷,长桁和蒙皮之间的分层破坏形式可以分为三种情况,如图1所示。



填充区失效 长桁侧边脱胶 长桁端头脱胶

图1 长桁和蒙皮之间常见破坏形式

(1) 长桁圆角填充区的拉伸破坏

长桁圆角填充区的拉伸破坏由以下几种情况产生:①长桁受到平行于长桁腹板、垂直于长桁轴线的拉伸载荷;②在制造过程中,长桁的圆角填充区产生缺陷;③加筋壁板受到面外载荷使长桁产生弯曲。如今,对于缺陷的检测手段完全可以在交付使用之前发现并采取措施弥补。对于复合材料的结构设计,如果长桁加筋板受到面外载荷,一般可以在长桁和蒙皮之间的连接处增加紧固件,以抵抗相互之间的剥离,同时减少圆角填充区的拉伸破坏。

(2) 长桁侧边脱胶

长桁侧边脱胶分层出现的原因包括:①长桁在受载时出现扭转;②由于结构尺寸较大,在承受外载时,长桁和蒙皮变形不一致,出现这种现象时,长桁加筋壁板一般是在压缩或出现扭转的状态下产生。在保证蒙皮和长桁变形协调的情况下可以避免这种情况的产生。

(3) 长桁端头脱胶

设计过程中,壁板的长桁会不可避免地突然终止。在面内载荷作用下,截面形状突变会在端头处产生应力集中,极易引起缘条/蒙皮界面脱胶分层。

在上述三种长桁加筋板失效情况中,前两种主要是由于面外载荷而引起,可以通过机械连接来避免。对于长桁端头脱胶,现阶段主要可以通过细节设计来减少其产生。本文对长桁加筋板中的长桁受面内载荷情况分两种状态分别研究。

2 长桁的端头设计

长桁端头的结构细节会对长桁蒙皮剥离产生影响的情况一般是由于应力集中而引起的。长桁端头产生应力集中的影响因素有:长桁的腹板斜切角度大小、长桁的缘条宽度、长桁的腹板厚度以及蒙皮的厚度等。复合材料长桁一般有“I”型、“T”型和“J”型三种情况,本文选择“T”型为研究对象,使用 ABAQUS 软件在长桁和蒙皮的界面间建立内聚力单元进行有限元分析,长桁的模型如图 2 所示。

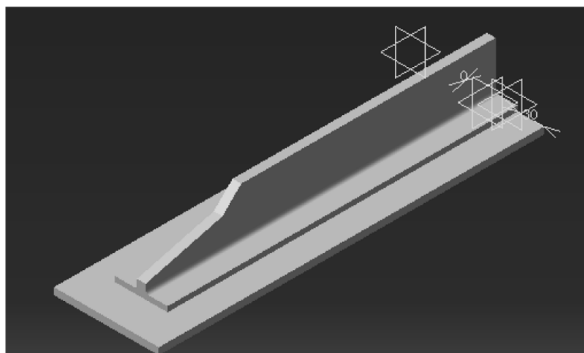


图 2 典型长桁加筋板有限元模型图

2.1 有限元模型概述

由于结构和载荷的对称性,取图 2 的一半模型作为分析对象(T 型筋条简化为 L 型半筋条),材料体系为 T700/QY8911,利用有限元软件 ABAQUS 建立有限元模型。其中,结构的尺寸和铺层参数如表 1 所示。

由于要研究缘条/蒙皮界面内力,把蒙皮和 L 型筋条分开建立有限元模型,其中,L 型筋条分割为缘条、腹板及填充区,蒙皮、缘条及腹板均用线性减缩积分的连续壳单元 SC8R 模拟,填充区用单元 C3D6 模拟。采用内聚单元模拟缘条与蒙皮之间的界面,即在筋条与蒙皮之间加入一层内聚层,选择 COH3D8 单元。通过 Tie 将蒙皮和缘条接触面与内聚单元连接。内聚单元厚度为 0.1mm,有限元模型如图 3 所示。

本文利用有限元模型对长桁加筋板的端头细节进行研究,分别考虑长桁加筋板在压缩和拉伸载荷作用下的两种情况。

表 1 典型件的特性

试验件	尺寸
压缩件和 A 型拉伸件	
蒙皮	440mm×120mm×7.68mm
胶层	400mm×60mm×0.1mm
长桁	400mm×60mm×60mm
试验件	尺寸
B 型拉伸件	
蒙皮	880mm×120mm×7.68mm
胶层	800mm×60mm×0.1mm
长桁	800mm×60mm×60mm
蒙皮铺层	
[-45/45/90/-45/90/45/0/0/-45/90/45/0/-45/90/45/0/-45/90/45/0]S	
长桁铺层	
[-45/90/45/90/-45/90/45/0/0/-45/90/45/0/0/-45/0/0/0/45/0]S	

注:各尺寸为长×宽×高,均是有效试验段,无夹持长度

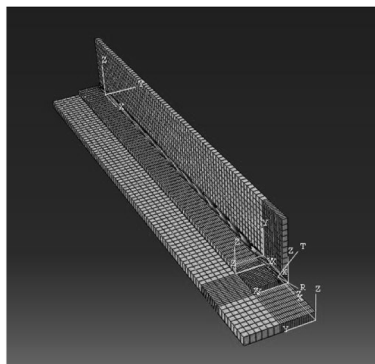


图 3 有限元网格示意图

2.2 长桁末端腹板斜削

为了使长桁端头附近的弯曲与轴向刚度变化平缓、结构偏心程度减弱,可以对长桁末端腹板进行斜削,如图 4 所示。腹板斜削设计可以减缓长桁末端附近的刚度变化,从而使长桁末端载荷从蒙皮向长桁平缓地传递。对长桁末端腹板斜削设计方法进行研究,通过参数化分析给出斜削角度这一设计变量的取值建议。

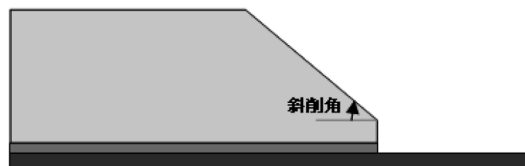


图 4 腹板斜削设计

2.2.1 压缩

取长桁腹板高度为 10mm 进行斜削(即从距长桁端头处的蒙皮上表面 10mm 高度开始向斜上方斜削),取斜削角为 90°、60°、45°、30°、15°及 8°六种情形进行研究。斜削有限元模型如图 5 所示。

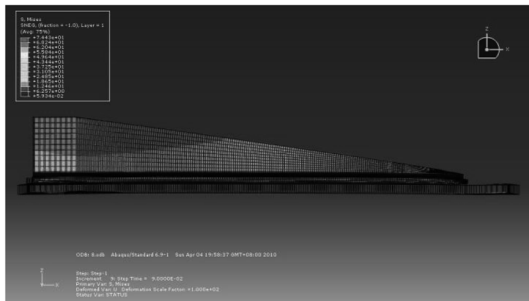


图 5 斜削有限元模型示意图

通过有限元分析,得到腹板斜削角度与失效载荷曲线如图 6 所示。

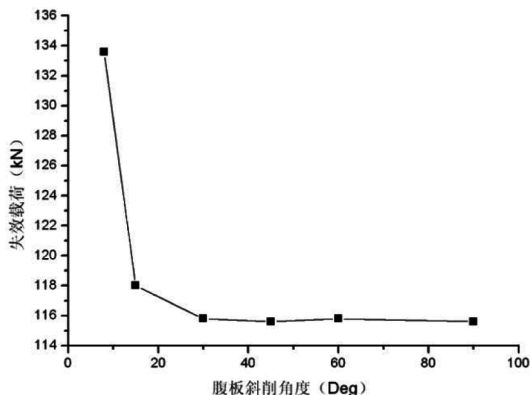


图 6 腹板斜削角度-失效载荷曲线

正应力与层间应力比和削角度关系如图 7 所示。

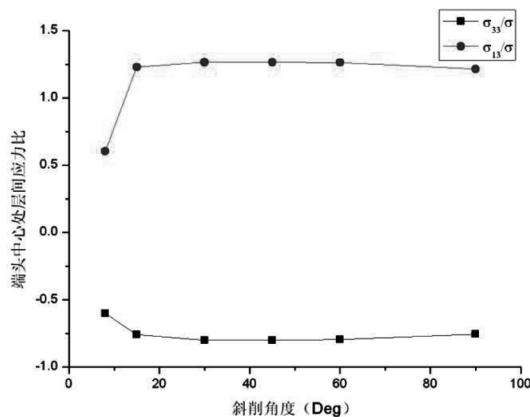


图 7 层间应力比-腹板斜削角度曲线

从研究分析可以得出:

- (1) 斜削不改变失效机理;
- (2) 采用腹板斜削设计不仅可以减缓长桁末端

附近的刚度变化,缓和长桁末端与蒙皮之间的载荷传递,还可以达到减重的目的;

(3) 当斜削角较大时,由于仅仅削除了本就不参与承载的多余腹板,斜削造成的截面抗弯刚度降低,会使端头的局部弯曲加剧,端头处 σ_{13} 、 σ_{33} 均略有增大,结构脱胶起始载荷几乎没有提高;

(4) 当斜削角较小时,削除了受力区腹板,使载荷重新分配,端头处 σ_{13} 、 σ_{33} 明显减小,结构脱胶起始载荷提高较大;

(5) 建议腹板斜削角度取值小于 15°。

2.2.2 拉伸

建立的有限元模型同压缩状态一致,经过分析,在拉伸状态下腹板的斜削角度和失效载荷之间的关系如图 8 所示,正应力和层间应力比值和斜削角度关系如图 9 所示。

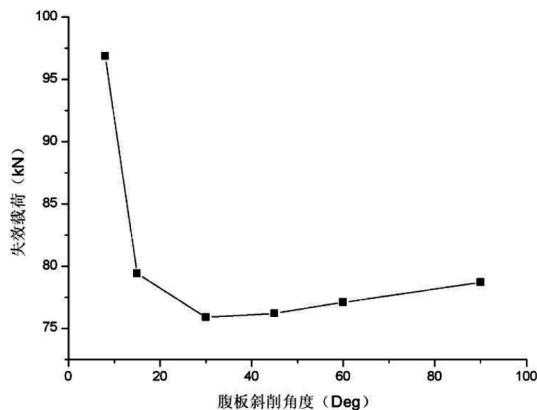


图 8 腹板斜削角度-失效载荷曲线

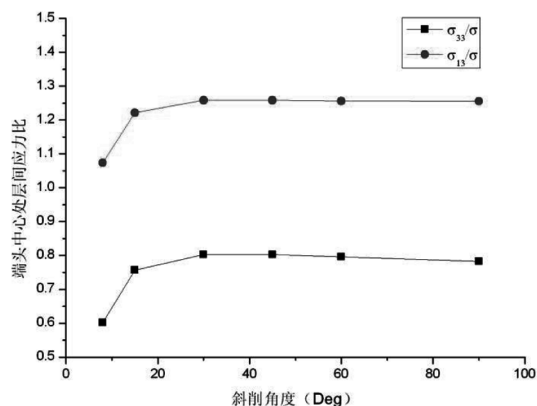


图 9 层间应力比-腹板斜削角度曲线

从研究分析可以得出:

- (1) 斜削不改变失效机理;
- (2) 采用腹板斜削设计不仅可以减缓长桁末端附近的刚度变化,缓和长桁末端与蒙皮之间的载荷传递,还可以达到减重的目的;
- (3) 当斜削角较大时,仅仅削除了本就不参与

承载的冗余腹板,且腹板斜削后,结构的截面抗弯刚度降低,反而会使端头的局部弯曲加剧,使端头处 σ_{13} 、 σ_{33} 略有提高,结构脱胶起始载荷略有降低;

(4)当斜削角较小时,消除了受力区腹板,使载荷重新分配,端头处 σ_{13} 、 σ_{33} 明显减小,结构脱胶起始载荷提高较大;

(5)建议腹板斜削角度取值小于 15° 。

2.3 增加长桁末端附近缘条面积

为了提高缘条与蒙皮的局部连接强度,可以通过增加缘条面积的方法来实现,如图10所示。通过增加长桁末端缘条面积,使缘条/蒙皮界面的开裂得到有效抑制,从而给出合理的缘条突伸段的设计参数。

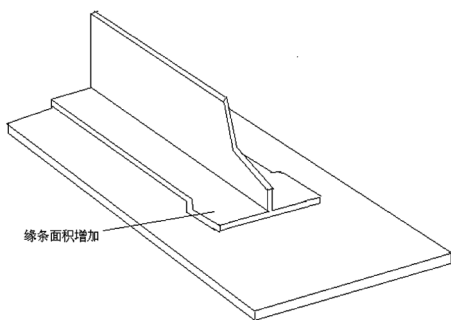


图10 增加缘条面积

2.3.1 压缩

在长桁斜削模型的基础上加宽缘条15mm,研究改变缘条加宽长度对承载能力的影响,如图11所示。压缩失效载荷随缘条加宽长度变化曲线如图12所示。

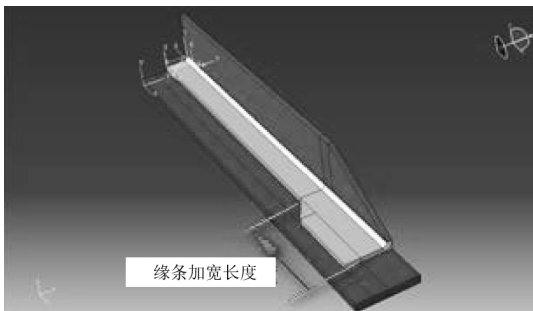


图11 增加缘条面积模型

从研究分析可以得出:

- (1)长桁末端缘条面积的增加可以较有效地提高脱胶起始载荷;
- (2)当缘条加宽部位的长度取200mm~250mm之间时,失效载荷可提高约20%;
- (3)端头中心处引起初始脱胶的纵法向剪应力

随缘条加宽部位长度的增加而减小;

(4)建议承受压缩载荷结构的终止端,缘条加宽部位的长度取200mm~250mm。

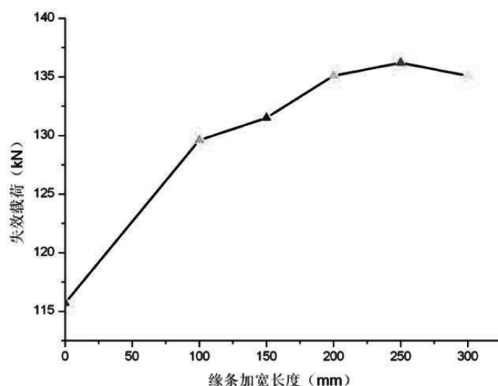


图12 压缩失效载荷随缘条加宽长度变化曲线

2.3.2 拉伸

研究思路与压缩状态一致,在长桁斜削模型的基础上加宽缘条15mm,分析改变缘条加宽长度对承载拉伸载荷能力的影响。拉伸失效载荷随缘条加宽长度变化曲线如图13所示。

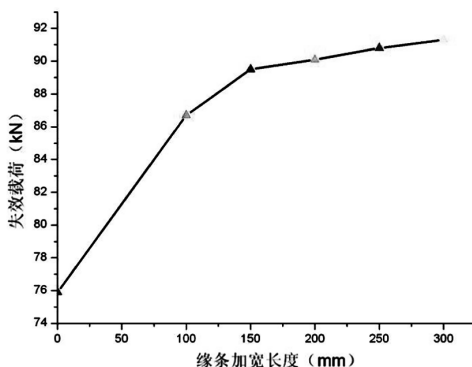


图13 拉伸失效载荷随缘条加宽长度变化曲线

从研究分析可以得出:

- (1)长桁末端缘条面积的增加可以较有效地提高脱胶起始载荷;
- (2)当缘条加宽部位的长度取150mm~300mm之间时,失效载荷可提高约20%;
- (3)端头中心处引起初始脱胶的面外剥离、纵法向剪应力随缘条加宽部位长度的增加而减小;
- (4)建议承受拉伸载荷结构的终止端,缘条加宽部位的长度取150mm~300mm。

3 重量变化

取一段长度为400mm的长桁,研究长桁末端腹板斜削设计以及增加长桁末端附近缘条面积后,其重量的影响(假设长桁厚度为4.8mm)。长桁原始

重量为 353g;长桁末端腹板斜削后重量为 306g;增加长桁末端附近缘条面积后重量为 353.8g。

4 结论

从本文的研究可以看出:正确的长桁末端腹板

斜削设计以及增加长桁末端附近缘条面积设计,分别可以提高长桁蒙皮端头剥离的载荷临界值 20%左右,与此同时,增加的重量可以忽略不计,因此在实际工程中有极大的应用价值。

勘 正

本刊 2012 年第 4 期《国外预研管理对我国民机科技发展的启示》一文有部分内容需要勘正:

1. 第 65 页引言部分第 9 行“这是形成民机核心技术的重要举措;”后补充相关内容:“一般而言,型号工程发展和研制过程中新出现的技术量不应超过 15%;”

2. 第 65 页引言部分第 11 行“以缩短型号研制周期;”后补充相关内容:“对民机研制而言,一般适航审定基础的有效期为 5 年左右。因此,只有通过民机预研克服技术瓶颈,才能在民机型号工程发展和研制过程中,从提交申请起快速地在有限的 5 年

左右时间内取得型号合格证(TC 证);”

3. 第 65 页“1.1 装备预研的基本概念”部分第 4 行“包括预研和型号研制两个部分。”后补充相关内容:“在欧美等主要国家,装备科研包括六大类^[1]:1)基础研究;2)应用研究(探索性发展);3)先期技术发展(A:先期技术发展;B:先期系统发展);4)工程制造发展;5)管理保障;6)使用系统发展(如图 1 所示)。其中第 1)类、第 2)类和第 3)A 类统归于预研范畴,第 3)B 类以后归于型号研制范畴,演示验证包含在第 3)类中。”

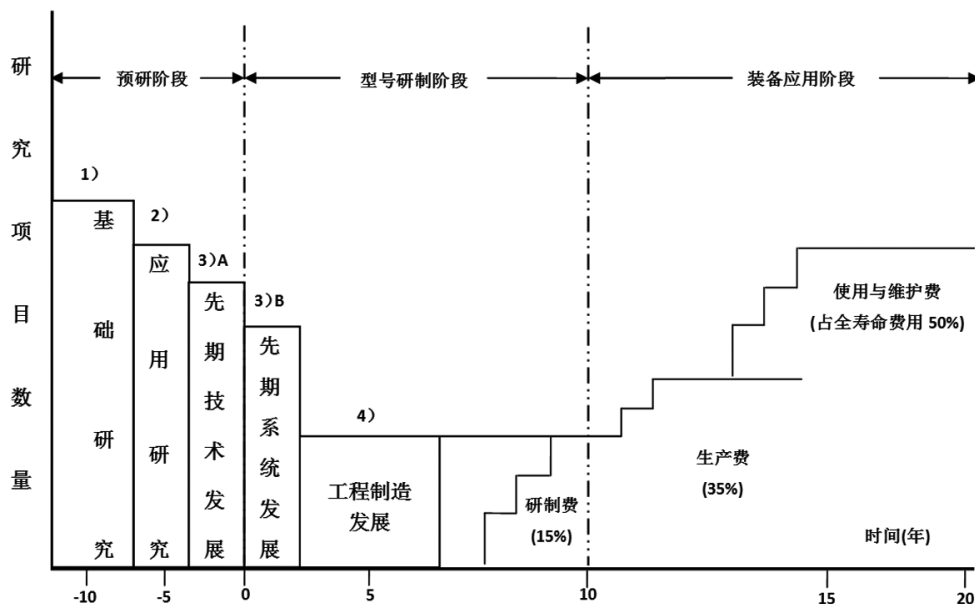


图 1 装备系统发展过程示意图

4. 第 68 页“6.1 重视预研在民机科技发展中的重要作用”部分第 2 行“重要步骤。”后补充相关内容:“先进发达国家非常重视预研对装备发展的推动作用,将预研作为获取技术优势的重要基石和推动科技与装备持续发展的技术源泉。因此,从国家

层面就立法保证了装备发展中各阶段的预研工作不可或缺,而且不能随意替代,各阶段的预研经费投入也得到了有力保障。针对我国民机科技发展,‘构建、补充和完善民机技术体系’^[2],预研是一条重要途径”。