

T型长桁边缘倒角对蒙皮纤维屈曲的影响

周长庚 荀国立 邱启艳 陈静

(中国航空制造技术研究院复合材料技术中心, 北京 101300)

文 摘 针对T型加筋壁板典型结构共胶接成型过程中T型长桁边缘处蒙皮纤维屈曲的问题,开展了T型长桁边缘倒角对蒙皮纤维屈曲的影响研究,对长桁边缘产生纤维屈曲的原因、机理以及长桁边缘倒角角度与纤维屈曲程度关系进行研究。结果表明,共胶接成型制备T型加筋壁板时,长桁缘条面边缘倒角能改善长桁缘条边缘处蒙皮的纤维屈曲的程度;长桁边缘处蒙皮纤维屈曲的剧烈程度与长桁缘条边缘倒角角度和蒙皮厚度成正比,与蒙皮铺层中90°纤维铺层比例成反比。工程应用中,对长桁边缘适当倒角,在不使用工艺软模的条件下有利于提高复合材料加筋壁板的成型质量。

关键词 倒角,长桁,纤维屈曲,共胶接

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.02.016

Effects of Edge Chamfer of T-type Stringer on Skin Fiber Buckling

ZHOU Changgeng XUN Guoli QIU Qiyan CHEN Jing

(Composite Technology Center of China Academy of Aeronautical Manufacturing Technology, Beijing 101300)

Abstract Due to the problem of skin fiber buckling at the edge of T-shaped stringer in the process of co-bonding forming for stiffened panel by T-shaped stringer, the influence of T-shaped truss edge chamfer on skin fiber buckling was studied. The causes, mechanism of fiber buckling at the edge of stringer and the relationship between the edge chamfer angle of stringer with the degree of fiber buckling were studied. The results show that decreasing the angle of chamfer at the edge of the stringer is beneficial to reduce the buckling degree of skin fiber. At the same time, the fiber buckling degree is positively correlated with the skin thickness, and negatively correlated with the 90° ply ratio in the skin ply. In engineering application, proper chamfer of stringer edge is beneficial to improve the forming quality for composite stiffened panel without using the craft soft cover.

Key words Chamfer, Stringer, Fiber buckling, Co-bonding

0 引言

复合材料具有高比强度、性能可设计、抗疲劳性和耐腐蚀性好等优点,广泛地应用于各类航空航天飞行器,大大地促进了飞行器的轻量化、高性能化、结构功能一体化。复合材料的应用部位已由非承力部件及次承力部件发展到主承力部件,并向大型化、整体化方向发展,先进复合材料的用量已成为航空航天飞行器先进性的重要标志^[1-2]。

复合材料加筋壁板结构作为复合材料结构中最常用的结构类型,主要应用于飞机机身、机翼、垂尾,平尾、火箭筒段等主承力件上。复合材料加筋壁板依据长桁/筋条的结构形式不同分为:T型长桁加筋

壁板、工型长桁加筋壁板、帽型长桁加筋壁板和 π 型筋条壁板。复合材料加筋壁板结构整体化成形工艺主要有预浸料-热压罐、预成形件/RTM或RFI成形工艺等^[3-5]。

通常T型加筋壁板热压罐成型工艺有共固化成型、共胶接成型和二次胶接成型。共胶接成型工艺中,其中一种就是先固化长桁,再将未固化的蒙皮与长桁进行共胶接。一般说来,这种工艺方法能较好保证胶接质量和控制变形,适合长桁较多、型面较为复杂的加筋壁板。采用这种方法通常需要制作软模,而对于长桁较多/分布复杂的加筋壁板,软模制备繁琐,软模与长桁配合困难,配合不好时,长桁边缘

收稿日期:2020-12-26

第一作者简介:周长庚,1989年出生,硕士,主要从事复合材料及其工程应用研究。E-mail:changgeng89@126.com

处蒙皮容易产生缺陷,尤其是蒙皮局部的纤维屈曲/褶皱,这对加筋壁板的力学性能造成不利影响^[6-10],用常规的检测方法较难测量表征;为此,可以将长桁边缘进行倒角,不使用软模,直接覆盖工艺辅助材料,再进行共胶接成型。本文针对T型加筋壁板典型结构共胶接成型,开展T型长桁边缘倒角对蒙皮纤维屈曲影响研究,对长桁边缘产生纤维屈曲的原因、机理以及长桁边缘倒角角度与纤维屈曲程度关系进行研究,为T型加筋壁板结构的先固化长桁的共胶接成型工艺提供支持,为长桁边缘倒角构型在航空航天飞行器结构上的应用提供支撑。

1 试验

1.1 试验材料

本次试验采用国产300级碳纤维/双马来酰亚胺预浸料(CCF300/QY9511),其树脂含量为33wt%,面密度为200 g/m²,固化后单层厚度为0.125 mm。使用的胶膜高温固化双马结构胶膜(J-299)胶膜,胶膜厚度为0.2 mm。

1.2 试验件构型

本文采用T型加筋壁板作为试验对象,试验件长2 m,宽1.2 m,长桁缘条宽度40 mm。试验件均布有T型长桁4根。试验件蒙皮包含不同厚度区,厚度分别为:2、5、8 mm,不同厚度区0°、±45°和90°铺层比例一致。同时长桁不同部位分别设置6种不同角度的倒角,分别为:90°、65°、45°、35°、30°、20°,试验件构型示意图见图1。

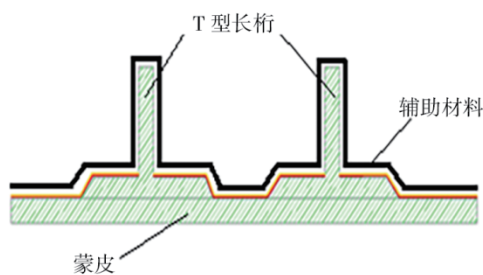


图1 试验件构型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test piece

1.3 试验件成型工艺

试验件采用先固化长桁,再将未固化的蒙皮与长桁进行共胶接。试验件胶接时,不放置工艺软模,直接在组装好的试验件上覆盖工艺辅助材料。试验件采用热压罐共胶接成型,共胶接成型工艺参数为:真空度-95 kPa,加压60 kPa,升温至120℃,保温35 min,升温至185℃,保温70 min,升温至195℃,保温300 min,降温至60℃,泄压。升降温速率≤1.5℃/min。

2 结果与分析

2.1 试验结果

用纤维屈曲隆起的高度 D 和屈曲的宽度 L 的比值 D/L 来评价纤维屈曲的严重程度,其值越大表示纤维屈曲越厉害,其值越小则表明纤维屈曲越平缓,如图2所示。同时用 D/H 表示纤维屈曲高度在厚度方向上的占比。

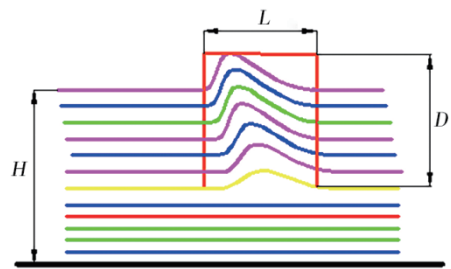


图2 纤维屈曲程度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fiber buckling

试验件固化后,通过截取不同长桁边缘倒角角度区域和不同厚度区域的试样,用Ptilia M20-HD型视频显微镜对试样横截面进行拍照和测量,得到了6种倒角(90°、65°、45°、35°、30°、20°)和3种蒙皮厚度(8、5、2 mm)蒙皮纤维的屈曲程度,具体见表1。

从表1上可以看出,对于同一蒙皮厚度,随着倒角角度的减小,纤维屈曲越来越平缓。对于同一倒角角度,随着蒙皮的厚度增加,纤维屈曲铺层数越多,纤维屈曲的隆起高度和宽度相对越大,从图上可以看出长桁边缘的倒角减缓了纤维屈曲的剧烈程度。

通过用Ptilia M20-HD型视频显微镜的测量工具对纤维屈曲隆起的高度 D 和屈曲的宽度 L 进行测量,分别计算 D/L 和 D/H ,其结果见图3。

从图3(a)可以看出对于同一蒙皮厚度,纤维屈曲高度随着倒角角度的变大而增大,对于同一倒角角度,随着蒙皮厚度的增加,纤维屈曲的高度也随之增加。从图3(b)可以看出对于同一蒙皮厚度,纤维屈曲宽度随着倒角角度的变大而增大,对于同一倒角角度,随着蒙皮厚度的增加,纤维屈曲的宽度也随之增加。从图3(c)可知,同一蒙皮厚度随着倒角角度的增大, D/L 越来越大,纤维屈曲越厉害,当倒角角度一定时, D/L 随着蒙皮的厚度增加而增加。从图3(d)可知,同一蒙皮厚度,随着倒角角度的增大, D/H 越来越大,纤维屈曲高度占厚度的比例随着倒角角度增大,当倒角角度一定时, D/H 随着蒙皮的厚度增加而减小,这说明虽然纤维屈曲的程度随蒙皮厚度增加而变得厉害,但是其高度占比蒙皮厚度却越来越小。

表1 不同倒角角度和蒙皮厚度纤维屈曲情况

Tab.1 Fiber buckling for different angle of chamfering and skin thickness

边缘倒角角度/ $^{\circ}$	蒙皮厚度 8 mm	蒙皮厚度 5 mm	蒙皮厚度 2 mm
90			
65			
45			
35			
30			
20			

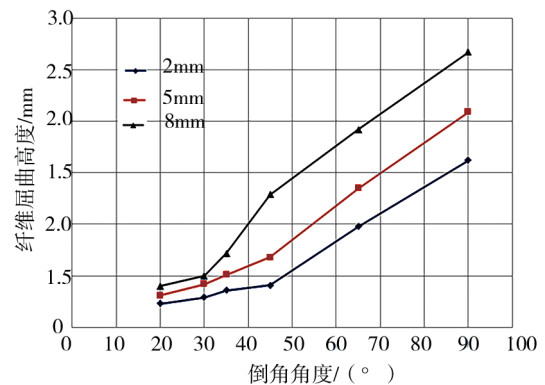
为研究不同铺层角度纤维屈曲对倒角的敏感程度,选取长桁倒角角度为 45° ,设计三种不同铺层(0° 、 90° 、准各向同性铺层)且厚度为4.5 mm的试样,采用同样的工艺共胶接后,获得三组不同铺层(0° 、 90° 、准各向同性铺层)对应的纤维屈曲的情况,通过测量 D 和 L ,计算得出 D/L 结果如表2所示。可知,倒角角度相同时,当蒙皮为全 0° 铺层时纤维屈曲最为

明显。当蒙皮为全 90° 铺层时,纤维屈曲程度最小,蒙皮为准各向同性铺层时,纤维屈曲程度介于二者之间,与 90° 铺层时纤维屈曲的差异较小。

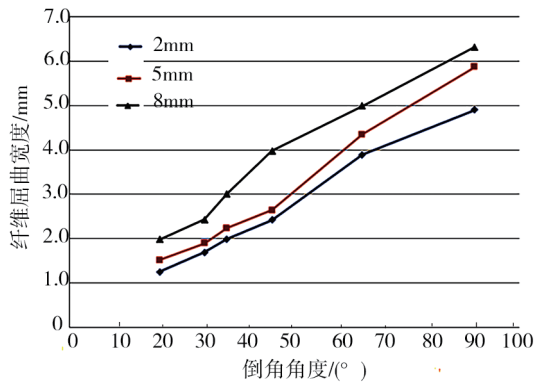
表2 纤维屈曲程度随铺层角度的变化

Tab.2 Variation of fiber buckling degree with skin ply angle

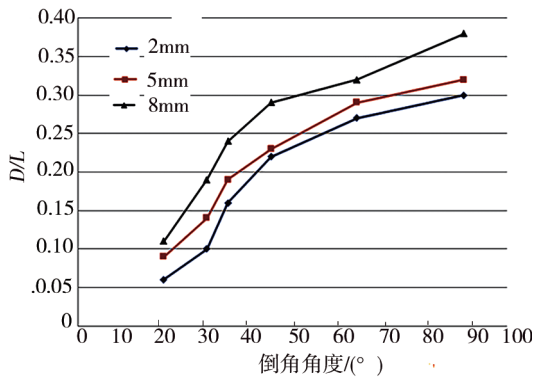
铺层角度/ $^{\circ}$	L/mm	D/mm	D/L
0	3.7	1.9	0.51
90	1.2	0.3	0.25
准各向同性	1.8	0.5	0.27



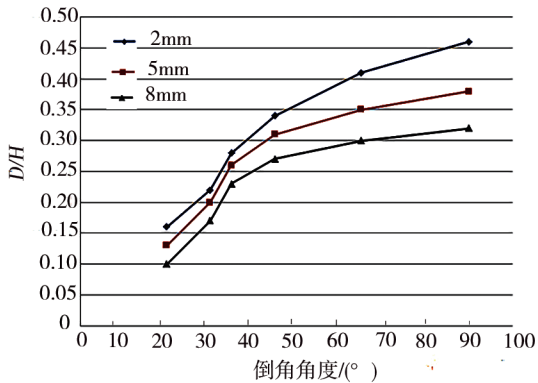
(a) 屈曲高度随倒角角度的变化



(b) 屈曲宽度随倒角角度的变化



(c) D/L 随倒角角度的变化



(d) D/H 随倒角角度的变化

图3 纤维屈曲的不同要素随倒角角度的变化曲线

Fig. 3 Graphs of the variation of different elements of fiber buckling with the chamfer angle

2.2 长桁边缘产生纤维屈曲的机理分析

当长桁边缘与蒙皮之间有台阶时,辅助材料铺放在壁板内型面上,抽真空时辅助材料和真空袋会在长桁下凸缘的边缘与蒙皮形成一个架桥区。壁板放入热压罐中加压并升温后,在架桥区的辅助材料和真空袋受外压作用会延展伸长,使得架桥区减小,架桥区的圆角半径也进一步减小,但是在架桥区的真空袋和辅助材料处于绷紧状态,传递压力时会有损失,同时真空袋内的透气材料等处于疏松状态,也不能对其下方的蒙皮产生充分传压。当升温到一定阶段,树脂处于低黏度粘流态,树脂可以在层内和层间流动。此时树脂内部压力 p_m 略小于热压罐内压力 p ,而架桥区域附近由于部分外压传递不到,树脂内部压力 $p_s < p_m < p$ 。因此在预浸料内部沿层内方向形成压力梯度,树脂沿着压力梯度,从压力大的地方向压力小的架桥区域附近流动,同时在架桥区域沿着厚度方向的压力差,使得这个区域树脂沿着厚度方向流动,去填充架桥的空腔区,所以在靠近内型面的层间树脂会越来越富集,同时树脂在层间的流动和富集会造

成局部纤维产生沿着厚度方向向上的面外位移,因此产生褶皱和纤维屈曲,如图4所示。

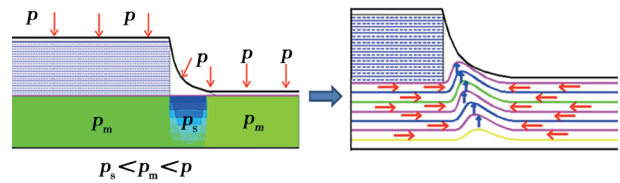


图4 蒙皮纤维屈曲产生的机理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mechanism of fiber buckling in skin

2.3 不同因素对蒙皮内部纤维屈曲程度的影响

2.3.1 倒角角度与局部纤维屈曲程度关系分析

假设长桁边缘倒角角度为 α ,为简化计算假定架桥区域工艺辅助材料及真空袋为圆弧状,圆弧半径为 R ,如图5所示。

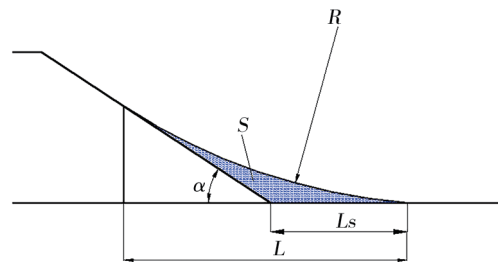


图5 倒角后架桥区域示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bridging area after chamfering

依据图5可得:

架桥区域总投影长度: $L = R \sin \alpha, L_s = R \tan(\alpha/2)$

架桥区域面积: $S(\alpha) = [\tan(\alpha/2) - (\alpha\pi/360)] R^2$

对 S 求导数: $S'(\alpha) = \frac{1}{2} \cos^2(\alpha/2) - \frac{\pi}{360}$

当 $0 \leq \alpha \leq 90^\circ, 0 \leq \alpha/2 \leq 45^\circ, S' > 0$ 。

故 $S(\alpha)$ 随 α 减小而减小,从上式可以看出随着倒角角度的减小,架桥区的面积和架桥区在蒙皮上的投影长度都将减小,蒙皮内部的纤维屈曲程度也会随之减小。因此对长桁边缘进行倒角,是减少蒙皮内部纤维在长桁边缘局部区域内屈曲的有效措施,并且随倒角角度的减小,纤维屈曲的程度越低。

2.3.2 蒙皮厚度与局部纤维屈曲程度关系分析

由于纤维的屈曲是由于局部压力差造成的,由于蒙皮厚度越大,架桥区的低压区沿着蒙皮厚度方向的深度越大,同时厚度越大的蒙皮,在固化过程中在外压作用下的厚度方向上的总压缩量更大,而由于压力差造成的压缩量差也就相对更大,所以随着蒙皮厚度越大,局部纤维屈曲的程度越明显。但是,纤维屈曲的高度与蒙皮厚度之比随蒙皮厚度增大而减少。

2.3.3 铺层角度与局部纤维屈曲程度关系分析

当铺层全为 0° 铺层时,树脂在层间流动时对纤维扰动受外压和长桁的抑制最小,纤维最容易受树脂流动在层间产生较大位移,而纤维全部为 90° 时,树脂在层间流动时对纤维扰动受外压及长桁的抑制最大,所以纤维屈曲程度相对小很多,如图6所示。而铺层中间 0° 、 90° 、 $\pm 45^\circ$ 比例相同时,由于 90° 和 $\pm 45^\circ$ 纤维的影响,树脂的流动对纤维扰动较小,和全 0° 纤维铺层相比纤维屈曲程度相比小很多。

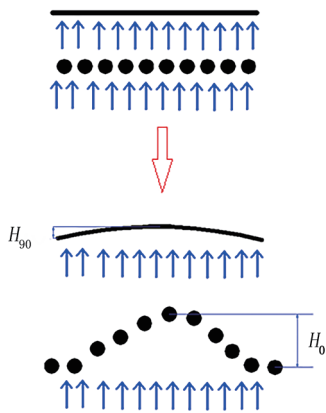


图6 不同角度方向纤维屈曲程度不同示意图

Fig.6 Schematic diagram of degree of fiber buckling for different ply angle

通过以上研究,结合实际工程应用过程中复合材料结构设计要求及装配紧固件钉边距限制要求,加筋壁板共胶接时,推荐优先对长桁倒角 45° ,这样在尽可能满足设计要求的前提下降低蒙皮局部的纤维屈曲程度,提高零件的成型质量。

3 结论

(1)共胶接成型制备T型加筋壁板时,长桁缘条面边缘倒角能改善长桁缘条边缘处蒙皮的纤维屈曲的程度。

(2)长桁边缘处蒙皮纤维屈曲的剧烈程度与长桁缘条边缘倒角角度和蒙皮厚度成正比,与蒙皮铺层中 90° 纤维铺层比例成反比。

参考文献

[1] 王恩青,张斌. 复合材料在航空航天中的发展现状和未来展望[J]. 科技信息, 2011,(33):290-290.

WANG E Q, ZHANG B. Development status and prospect of composite materials in aerospace [J]. Scientific Information, 2011,(33):290-290.

[2] 郑锡涛,陈浩远,李泽江,等. 先进复合材料在未来飞行器中的应用[J]. 航空工程进展, 2011,2(2):181-187.

ZHENG X T, CHEN H Y, LI Z J, et al. Application of advanced composite materials to future aircraft [J]. Advances In Aeronautical Science And Engineering, 2011,2(2):181-187.

[3] 王恒生,程艳婷. 复合材料在航天领域中的研究与应用进展[J]. 化工科技, 2013, 21(2):67-70.

WANG H S, CHENG Y T. Advance on research and application of the composite materials in the aerospace engineering [J]. Science &Technology in Chemical Industry, 2013, 21(2):67-70.

[4] 刘道春. 复合材料在高新技术中的地位与发展趋势[J]. 化学工业, 2012,30(9):33-37.

LIU D C. Status and development trend of complex materials in high and new technology [J]. Chemical Industry, 2012,30(9):33-37.

[5] 阎龙,史耀耀,段继豪. 先进树脂基复合材料制造技术综述[J]. 航空制造技术, 2011,(3):55-58.

YAN L, SHI Y Y, DUAN J H. Review of manufacturing technology for advanced resin-matrix composites [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2011(3):55-58.

[6] 侯军生. 树脂基纤维增强复合材料的无上盖板成形[J]. 航空制造技术, 1995(4): 24-26.

HOU J S. The forming technology of resin matrix fiber reinforced composite without upper caul plate [J]. Aviation Manufacturing Technology, 1995(4): 24-26.

[7] 徐鹏,顾轶卓,吴臣君,等. 纤维波纹对层间增韧碳纤维/环氧复合材料单向板力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(3):49-54.

XU P, GU Y Z, WU J C, et al. Influence of fiber waviness on mechanical properties of ties of interlaminar toughening carbon fiber/epoxy composite unidirectional laminate [J]. FRP/Composite, 2019(3):49-54.

[8] WANG J, POTTER K D, WISNOM M R, et al. Failure mechanisms under compression loading in composites with designed out-of-plane fibre waviness [J]. Plastics, Rubber and Composites, 2013, 42(6):231-238.

[9] 朱俊,郭万涛,李想,等. 含面内波纹缺陷的复合材料层合板刚度性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(4): 793-803.

ZHU J, GUO W T, LI X, et al. Stiffness of composite laminates with in-plana waviness defect [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018,35(4):793-803.