

## 均布压力下 T 型连接极限承载特性试验研究\*

刘 令<sup>1,2</sup>, 李华东<sup>2</sup>, 梅志远<sup>2</sup>, 周晓松<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 92942 部队, 北京 100161; 2. 海军工程大学 舰船工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**针对复合材料舵翼骨架与蒙皮连接, 设计了两种 T 型连接结构, 并对其在波浪砰击载荷作用下的极限承载特性进行了试验研究。根据结构承载特点, 提取典型局部试验缩比模型, 给出了均布压力下 T 型连接试验载荷等效方法。试验比较了两种 T 型连接的承载特性差异, 研究了跨距对 T 型连接初始刚度、极限破坏载荷以及极限承载弯矩的影响规律。试验结果表明: 构型 A 存在明显的初始破坏, 但极限破坏载荷大于构型 B; 极限承载弯矩基本不随跨距改变, 可作为不同跨距、不同构型 T 型连接优劣衡量标准。最后, 基于试验结果、载荷等效与缩比原则, 提出了 T 型连接承载特性评价方法。

**关键词:** T 型连接; 极限承载; 载荷等效; 评价方法

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)02-161-07

## Experimental research on ultimate load carrying capacity of T connections under uniform pressure

LIU Ling<sup>1,2</sup>, LI Huadong<sup>2</sup>, MEI Zhiyuan<sup>2</sup>, ZHOU Xiaosong<sup>2</sup>

(1. The PLA Unit 92942, Beijing 100161, China;

2. Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Considering the connections between frame and skin of composite rudder, two types of T connections were designed to test the ultimate load carrying capacity when suffering to wave load. According to the load characteristics of structure, a typical local experimental model was extracted, and the load equivalence method was proposed as well. The difference of load characteristics of two types of T connections was compared, and the effect of span on initial stiffness, ultimate failure load and ultimate bearing moment were studied. The results show that type A has obvious initial failure, but the ultimate failure load is larger than that of type B, the ultimate bearing moment does not change with the span, and can be evaluation criterion for different span and different types of T connections. The evaluation method for bearing capacity of T connections was proposed based on the experimental results, load equivalent method and shrinkage principle.

**Key words:** T connections; ultimate bearing; load equivalence; evaluation method

T 型连接在航空、船海等领域的复合材料结构上应用相当广泛。航空应用包括框、肋、翼梁等与蒙皮的连接, 舰船应用包括上层建筑正交板材(如舱壁与壳板)的连接以及舵翼骨架与蒙皮的连接等。目前国内外学者对 T 型连接进行了各种研究, 从研究载荷来看, 主要为拉脱载荷与弯曲载荷, 如 Kesavan 等<sup>[1]</sup>、Wu 等<sup>[2]</sup>分别研究了复合材料 T 型接头在拉伸载荷下的应力分布与失效机理, 胡孝才等<sup>[3]</sup>研究了拉伸载荷下初始破坏位置对接头承载能力的影响, 李梦佳等研究了 Z-pin 参数<sup>[4]</sup>、缝合参数<sup>[5]</sup>对 T 型接头拉脱承载能力的影响, 齐红宇等<sup>[6]</sup>、吴海等<sup>[7-8]</sup>对弯曲载荷作用下复合材料 T 型接头的失效机理进行了分析。从研究内容来看, 主要包括极限承载特性<sup>[9]</sup>、疲劳

特性<sup>[10-11]</sup>、界面性能<sup>[12]</sup>等的研究, 研究方法主要为数值仿真分析<sup>[13]</sup>与试验研究。

以上对于 T 型连接的研究大都针对航空领域, 船海领域的研究相对较少, 而船海领域与航空领域的 T 型连接存在较大区别, 主要表现在: ①材料不同。航空领域使用较多的增强材料为单向碳纤维, 而船海领域使用的大都为玻纤织物, 而且树脂基体也不同。②结构形式与工艺不同。航空的 T 型结构主要包括两种, 一种为非整体型, 即在复合材料板上背靠背连接两个 L 型件; 另一种为整体型, 即 T 型连接的腹板和凸缘用连续纤维增强并整体一次成型。而舰船上应用的 T 型结构较大, 构件在连接前通常已预制成型, 需要在连

\* 收稿日期: 2016-12-29

基金项目: 省部委基金资助项目(1010603030201)

作者简介: 刘令(1986—), 男, 湖南邵阳人, 工程师, 博士, E-mail: 472724187@qq.com

接结构部件两侧铺设覆盖层进行二次成型连接。  
 ③载荷形式不同。航空研究的载荷主要有拉脱、侧弯、剪切等,而对于船海领域常见的静压与波浪砰击等均布压力载荷作用研究较少。本文针对船用复合材料舵与稳定翼骨架与蒙皮结构,设计了两种 T 型连接结构,分别对其在波浪砰击载荷作用下的损伤机理、承载特性以及相关规律进行了试验研究,比较两种 T 型连接的差异,分析了跨距对承载特性的影响。所提出的试验载荷等效方法和均压下 T 型连接承载特性评价方法,对均压下 T 型连接的设计具有一定指导意义。

### 1 研究思路与方法

在复合材料结构方案设计初期,需开展元器件及局部模型试验研究,以获取典型结构的基本力学性能。试验之前,首先要确定试验模型及试验载荷,通常为了节约试验成本会对原尺度结构进行缩比,同时,由于实际载荷在试验中不能或不便施加,有时还需将实际载荷等效为试验载荷。不管是试验模型提取还是试验载荷等效,需要注意的是必须使试验中重点校核区域的承载特性与实际情况相近,确保试验结果有效。试验后将结果反馈到原尺度结构进行评价及改进设计。基于上述思想,主要研究思路如下:

1) 原尺度结构分析。针对研究的骨架 - 蒙皮 T 型连接问题,采用有限元软件建立原尺度整体分析模型并进行初步分析。计算模型需考虑构件的基本尺度和铺层特征,模型可适当简化,其目的在于掌握原尺度结构主要构件的变形及应力分布特征规律。

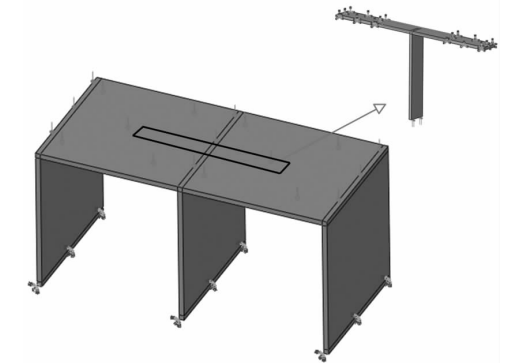
2) 试验模型与载荷的提取。在原尺度整体模型分析基础上,提取典型的 T 型局部模型以用于试验研究,为节约试验成本,可对局部模型进行全尺度缩比。同时,根据试验加载需要,必须将面板承受的波浪砰击载荷等效为腹板端部的集中载荷,等效原则为主要构件关心区域的应力水平与分布特征相近。

3) 模型试验。进行 T 型试件极限承载试验,试验前需准备好试验试件与仪器,制定试验加载方案。试验过程中需注意观察试验现象,记录好试验数据。

4) 结果分析与评价。通过试验结果分析构型、跨距对 T 型连接承载特性的影响规律,并对原尺度结构的承载能力进行定量评价。

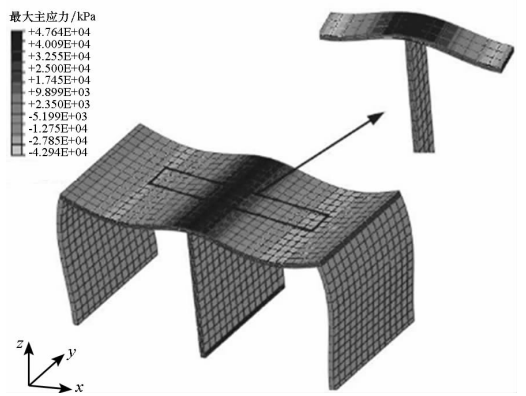
### 2 模型提取与载荷等效

模型提取与载荷等效情况如图 1 所示。复合材料舵翼典型结构如图 1(a) 所示。在波浪砰击载荷(0.1 MPa 均布载荷)作用下,其变形与主应力分布如图 1(b) 所示,变形特征为:壳板的位移随骨架布置成波浪形分布,在骨架跨端与跨中壳板的转角为零;应力特征为:跨端壳板外表面受拉、内表面受压,跨中正好相反;最大拉应力、压应力分别位于跨端壳板外表面和内表面。



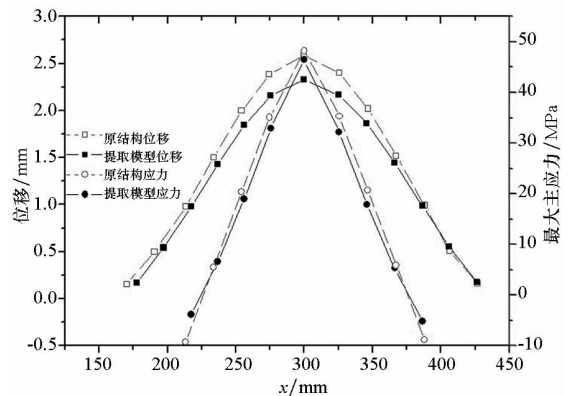
(a) 模型提取

(a) Model extraction



(b) 应力位移分布

(b) Stress and displacement distribution



(c) 应力位移对比曲线

(c) Stress and displacement contrast curves

图 1 模型提取与载荷等效

Fig. 1 Model reduction and load equivalent

根据跨中壳板转角为零的特点,提取图 1(a) 所示局部 T 型连接结构,T 型结构面板的有效承载区域(黑色线框区域)位于原结构两跨之间,黑色线框区域以外的面板部分用于试验中施加边界条件。试验载荷等效时将原结构壳板的均布压力等效为 T 型结构腹板端部的集中力,便于试验施加,而集中力的大小为黑色线框区域均布压力的总和。

等效后原结构与提取模型仿真计算结果对比如图 1(b) 所示,位移及应力沿跨度方向( $x$  方向)的分布曲线对比如图 1(c) 所示。通过对比可知,在网格尺寸相同的情况下,原结构与提取模型的应力在 T 型连接( $x = 300$  mm)附近区域的分布规律基本相同,这是主要关注的连接区域;原结构与提取模型的位移分布规律也相差不大。以上对比结果说明将均布载荷等效为集中载荷的方法有效可行。

为了节约试验成本,在提取局部模型前先对原结构进行缩比,根据缩比仿真分析可知,在相同均布载荷作用下,原结构与缩比结构的位移比与缩尺比相同,应力大小相等且分布规律相同,如图 2 所示(缩尺比为 2)。因此,在承受相同的均

布载荷时,缩比模型可以反映原结构的应力水平。此外,由于面积也进行了缩比,均布载荷等效后的集中载荷之比为缩尺比的平方。

### 3 模型试验及分析

#### 3.1 试验准备与过程

影响复合材料 T 型连接的参数,主要有腹板、面板的尺寸与材料,填充区或者过渡区材料与形状以及跨距等。为了比较过渡区形状和材料的差异,设计了 A、B 两种构型,如图 3 所示。图中玻璃钢层合板厚 6 mm,增强材料为 E 玻纤多轴向织物,基体材料为 430 LV 乙烯基酯树脂。为了保证试件制作质量,整个接头采用真空辅助二次成型工艺。构型 A、B 的主要区别为构型 A 填充材料为 HCP70 泡沫,且预先削成梯形;构型 B 连接处为倒圆角,填充材料为韧性树脂。

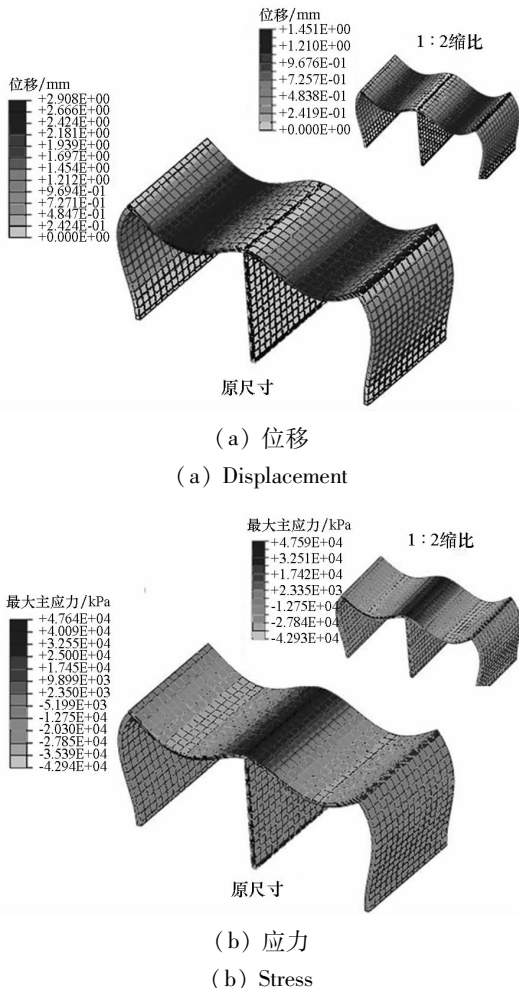


图 2 缩比后位移与应力  
Fig. 2 Displacement and stress after shrinking

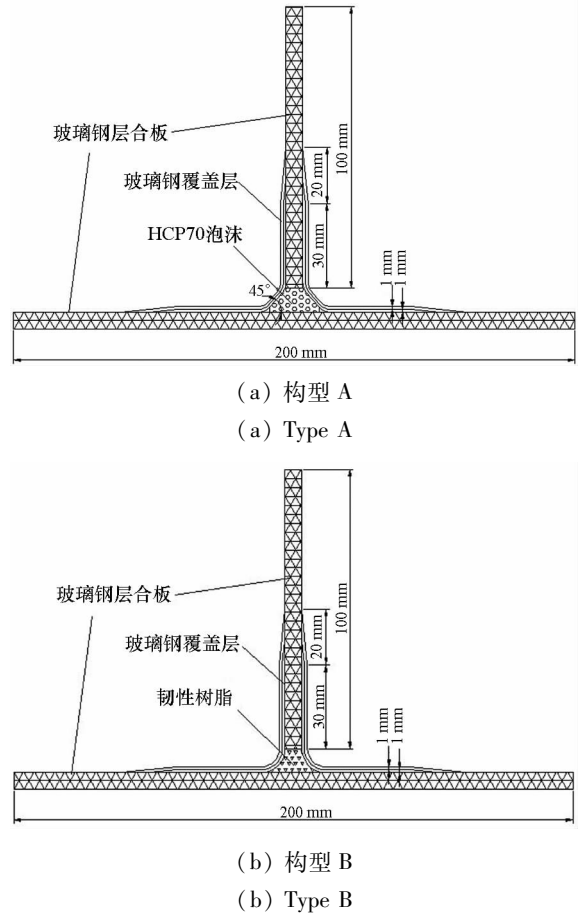


图 3 两种 T 型连接

Fig. 3 Two types of T connections

为了研究跨距的影响,设置 5 档跨距,分别为 60 mm、80 mm、100 mm、120 mm、140 mm,主要加载过程如下:

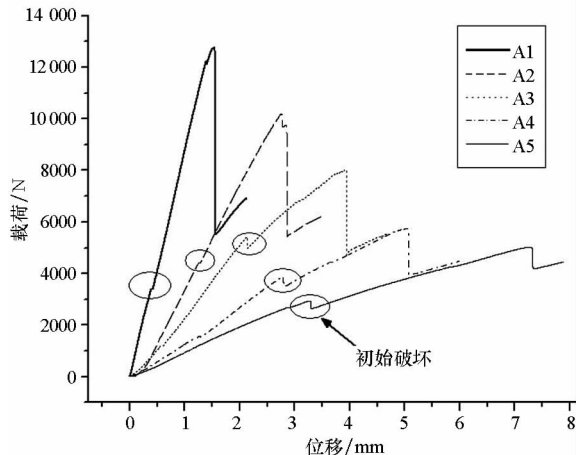
1) 线性载荷重复加载试验:尝试加载 1 kN,每一试件重复 3 次。

2) 极限加载试验: 试验加载为梁顶端位移加载, 加载速度为 1 mm/min, 持续加载, 直至卸载或试件出现明显的结构破坏, 每一试件 1 次, 以获取完整的载荷/位移曲线。

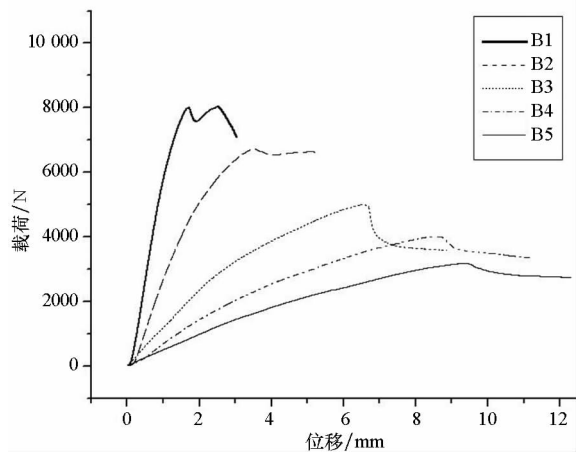
### 3.2 试验结果与规律分析

#### 3.2.1 T 型连接破坏模式和失效机理分析

构型 A、B 的载荷位移曲线如图 4 所示, 通过比较可知, 构型 A、B 载荷曲线主要存在两个主要区别: ① 构型 A 存在明显的初始破坏点, 该点的载荷出现了突然下降 (图 4(a) 椭圆所示), 随后继续上升, 而构型 B 不存在明显的初始破坏点; ② 构型 A 的载荷达到峰值后成断崖式下降, 而构型 B 的载荷达到峰值后, 下降速度较缓慢, 这是因为韧性树脂的特性发挥了作用。



(a) 构型 A  
(a) Type A



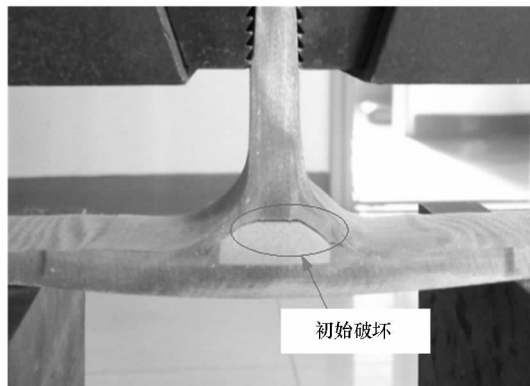
(b) 构型 B  
(b) Type B

图 4 载荷位移曲线

Fig. 4 Load and displacement curve

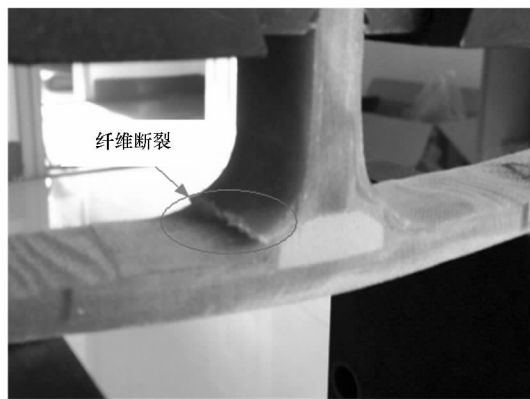
通过观察不同跨距试件的破坏模式可知, 跨距对构型 A、B 连接结构的破坏模式影响较小。构型 A 的破坏模式如图 5 所示, 在压缩载荷作用

下, 构型 A 连接结构的初始破坏模式出现在泡沫芯材与两侧包覆层相接位置, 此处较大的剪切力作用下开始出现界面剥离裂纹; 随着载荷的增加, 裂纹延伸到两侧包覆层和基座板相接界面位置, 当载荷继续增加至极限载荷时, 弧形过渡区两侧玻璃钢出现了断裂破坏, 结构丧失了承载能力。构型 B 的破坏模式如图 6 所示, 其初始破坏模式出现在弧形过渡区玻璃钢表层, 此处存在较大的应力集中问题, 开始出现了发白现象, 表明玻璃钢出现了初始破坏; 随着轴向压缩载荷的增加, 应力集中现象更为明显, 发白区域出现了扩大现象, 当载荷继续增加至极限载荷时, 弧形过渡区玻璃钢材料出现了断裂破坏, 整个结构丧失承载能力。



(a) 初始破坏

(a) Initial failure



(b) 极限破坏

(b) Ultimate failure

图 5 构型 A 破坏模式

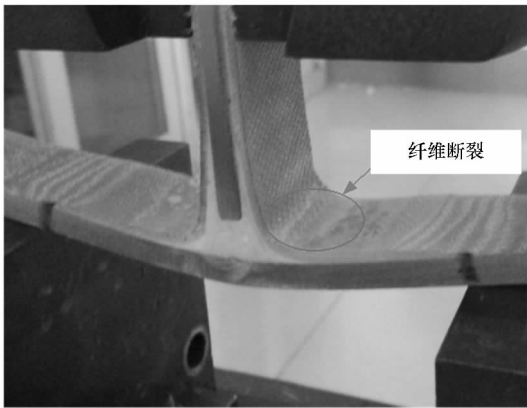
Fig. 5 Failure mode of type A

#### 3.2.2 跨距对 T 型连接的影响分析

表 1 列出了不同构型、不同跨距 T 型连接结构试验结果。下面分别就构型、跨距对 T 型连接初始刚度、极限破坏载荷、极限承载弯矩 (极限破坏载荷与 1/2 跨距的乘积) 的影响规律进行具体分析。



(a) 初始破坏  
(a) Initial failure



(b) 极限破坏  
(b) Ultimate failure

图 6 构型 B 破坏模式

Fig. 6 Failure mode of type B

表 1 T 型连接试验结果

Tab. 1 Test result of T connections

结构形式	编号	跨距/mm	初始刚度/(N/mm)	极限破坏载荷/N	极限承载弯矩/(N·m)
A	A1	60	8695	12 653	380
	A2	80	3648	10 123	405
	A3	100	2101	7388	369
	A4	120	1075	5713	343
	A5	140	792	4986	349
B	B1	60	6003	7936	238
	B2	80	2730	6710	268
	B3	100	1183	4966	248
	B4	120	735	3996	240
	B5	140	485	3158	221

1) 跨距对初始刚度的影响。加载跨距对连

接结构的刚度影响如图 7 所示,随着跨距的增加,初始刚度呈现明显的下降趋势。加载跨距为 60 mm 时,结构刚度特性差距较大,构型 A 的初始刚度约高于构型 B 的 45%;加载跨距为 80 ~ 140 mm 时,拉伸状态下构型 A 和构型 B 的结构初始刚度较为接近。总的来说,构型 A 的结构初始刚度略高于构型 B,这是由两种构型过渡区的形状和材料不同而导致的。

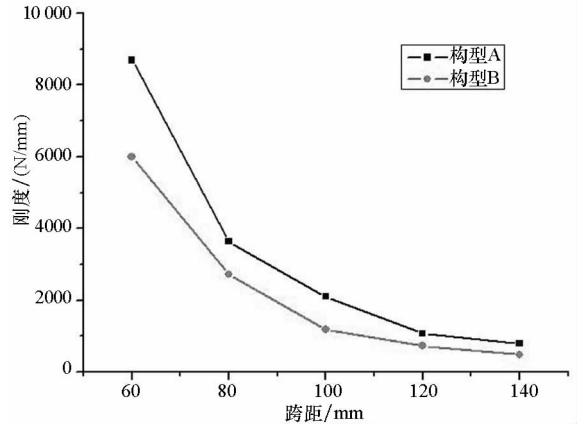


图 7 跨距对初始刚度影响曲线

Fig. 7 Effect of span on initial stiffness

2) 跨距对极限破坏载荷的影响。加载跨距对连接结构的极限破坏载荷影响如图 8 所示,其变化趋势为:随着跨距的增大,极限破坏载荷逐渐减小。跨距相同的情况下构型 A 的极限破坏载荷均高于构型 B,且随着加载跨距的增加,相差值成减小趋势。

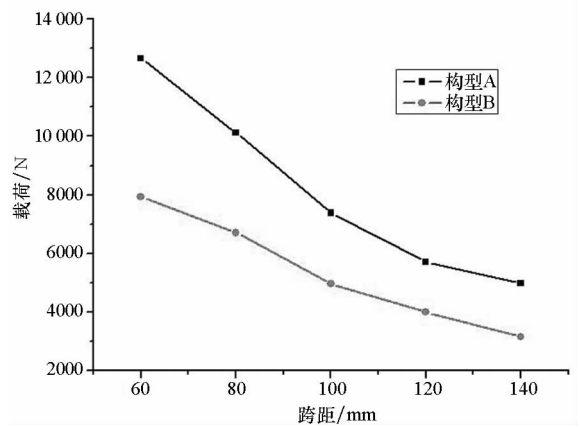


图 8 跨距对极限破坏载荷影响曲线

Fig. 8 Effect of span on ultimate failure load

3) 跨距对极限承载弯矩的影响。如图 9 所示,对同一构型而言,加载跨距对连接结构极限承载弯矩的影响较小,随着跨距的增加基本呈现小幅度上下波动趋势。这说明过渡区域局部弯矩对 T 型连接的破坏起主导作用,极限承载弯矩适于

作为衡量不同构型 T 型连接优劣的指标。很明显, 构型 A 的极限承载弯矩高于构型 B, 说明构型 A 的极限承载能力比构型 B 好。

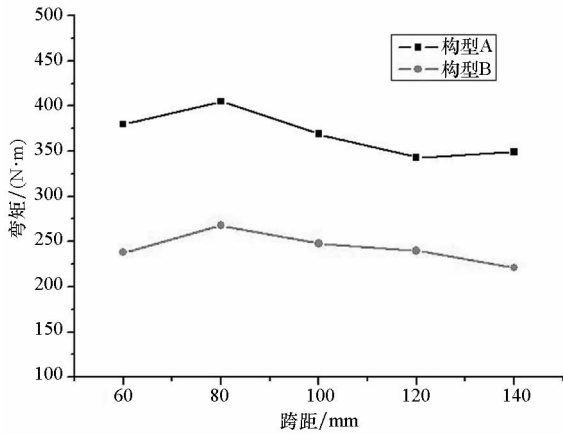


图 9 跨距对极限承载弯矩影响曲线

Fig. 9 Effect of span on ultimate bearing moment

## 4 原 T 型连接结构承载能力评估

### 4.1 评价方法

根据某一跨距 T 型连接模型极限承载试验结果, 可对均布压力作用下, 原尺度 T 型连接结构在任意跨距时的承载能力进行评估, 评估方法如下:

首先, 根据跨距对 T 型连接结构极限承载弯矩影响较小的特点, 已知某一跨距 T 型连接极限承载试验结果, 即可近似推出其他跨距 T 型连接的极限破坏载荷; 然后, 根据载荷等效原则, 将试验集中载荷换算成均布载荷; 最后, 根据缩比原则, 确定原尺度结构的破坏均布载荷。

具体推导过程如下:

如图 10 所示, 假设原尺度结构尺寸与全尺度缩比试验模型的缩尺比为  $\lambda$ , 试验模型测试跨距为  $d$ , 试件宽度为  $s$ , 试验测得极限破坏载荷为  $F_{\text{测}}$ 。当原始结构跨距  $D$  与测试跨距  $d$  不成  $\lambda$  比例时, 需先根据不同跨距极限承载弯矩  $M_{\text{测}}$  相近的特点, 近似得出缩比模型在缩比跨距 ( $D/\lambda$ ) 下对应的极限破坏载荷  $F_{\text{缩}}$ 。

$$F_{\text{缩}} = \frac{F_{\text{测}} d}{D/\lambda} = \frac{2M_{\text{测}} \lambda}{D} \quad (1)$$

根据合力相同的载荷等效原理, 缩比模型极限破坏载荷对应的均布载荷为:

$$P_{\text{缩}} = \frac{F_{\text{缩}}}{(D/\lambda) \cdot s} = \frac{2M_{\text{测}} \lambda^2}{D^2 s} \quad (2)$$

根据缩比原则, 在应力水平相同的情况下, 原尺寸结构的均布破坏载荷与缩比模型相同, 即

$$P_{\text{原}} = P_{\text{缩}} = \frac{2M_{\text{测}} \lambda^2}{D^2 s} \quad (3)$$

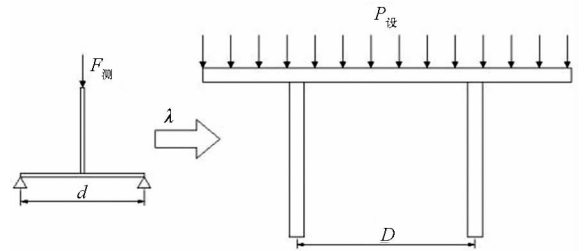


图 10 模型与原结构示意图

Fig. 10 Sketch of model and original structure

### 4.2 算例分析

以文中的 T 型连接构型 B 为例, 试验测得极限承载弯矩  $M_{\text{测}} \approx 240 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 试件与原结构的缩尺比  $\lambda = 2$ , 试件宽  $s = 30 \text{ mm}$ , 原结构跨距  $D = 300 \text{ mm}$ 。则根据式(3)可得原结构均布破坏载荷  $P_{\text{原}} = 0.71 \text{ MPa}$ , 而设计波浪载荷  $P_{\text{设}} = 0.1 \text{ MPa}$ , 因此, 结构的安全系数约为 7, 有较大的安全余量。

如果在给定安全系数的情况, 也可以根据式(3)对结构允许的最大跨度进行设计。仍以上述构型 B 为例, 如果给定安全系数 4, 即  $P_{\text{原}} = 0.4 \text{ MPa}$ , 则可快速计算跨距最大为  $D = \sqrt{2M_{\text{测}} \lambda^2 / s P_{\text{原}}} = 0.4 \text{ m}$ 。

## 5 结论

本文针对复合材料舵翼骨架与蒙皮 T 型连接结构, 从模型提取、载荷等效、试验研究及评价几个方面, 提出了完整的研究方法与评价方法, 所得主要结论如下:

- 1) 将波浪载荷等效为集中载荷方法有效可行, 简化了试验载荷的施加, 尤其是为下一步的疲劳试验加载提供了基础。
- 2) A、B 两种 T 型结构各有优劣, 构型 A 极限破坏载荷大于构型 B, 但存在分层初始破坏, 构型 B 极限破坏载荷虽小, 但不存在明显的初始破坏点。
- 3) 极限承载弯矩受加载跨距影响较小, 适于作为不同跨距、不同构型 T 型连接优劣的衡量标准。
- 4) 基于试验结果、载荷等效与缩比原则, 建立原 T 型连接结构承载能力评价方法, 推导了原 T 型连接结构均布破坏载荷计算公式, 该公式还可反过来指导结构设计。

## 参考文献 (References)

- [1] Kesavan A, John S, Herszberg I. Strain-based structural health monitoring of complex composite structures[J]. Struct

- Health Monitor, 2008, 7(3): 203 - 213.
- [2] Wu H, Xiao J Y, Xing S L, et al. Numerical and experimental investigation into failure of T700/bismaleimide composite T-joints under tensile loading [J]. Composite Structures, 2015, 130: 63 - 74.
- [3] 胡孝才, 戴棣, 姚学锋, 等. T 接头初始破坏位置研究[J]. 航空制造技术, 2009, s1: 152 - 154.  
HU Xiaocai, DAI Di, YAO Xuefeng, et al. Study on initial failure location of T-joint [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, s1: 152 - 154. (in Chinese)
- [4] 李梦佳, 陈普会, 孔斌, 等. Z-pin 参数对复合材料 T 型接头拉脱承载能力的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 571 - 578.  
LI Mengjia, CHEN Puhui, KONG Bin, et al. Effect of Z-pin parameters on pull-off carrying capacity of composite T-joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 571 - 578. (in Chinese)
- [5] 李梦佳, 陈普会, 孔斌, 等. 缝合参数对复合材料 T 型接头拉脱承载能力的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(3): 681 - 688.  
LI Mengjia, CHEN Puhui, KONG Bin, et al. Effects of parameters of stitching on pull-off carrying capacity of composite T-joint [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(3): 681 - 688. (in Chinese)
- [6] 齐红宇, 王天龙, 梁晓波, 等. 弯曲载荷下机织复合材料 T 型接头渐进失效分析[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1161 - 1167.  
QI Hongyu, WANG Tianlong, LIANG Xiaobo, et al. Progressive failure analysis of woven composite T-joints under bending load [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1161 - 1167. (in Chinese)
- [7] 吴海, 肖加余, 邢素丽, 等. 含诱导缺陷复合材料 T 型接头的弯曲失效实验 [J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(4): 128 - 136.  
WU Hai, XIAO Jiayu, XING Suli, et al. The failure experiment of composite T-joints with induced defects under bending load [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(4): 128 - 136. (in Chinese)
- [8] 吴海, 肖加余, 邢素丽, 等. 弯曲载荷作用下复合材料 T 型接头的失效分析 [J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(1): 56 - 62.  
WU Hai, XIAO Jiayu, XING Suli, et al. Failure analysis of composite T-joints under bending load [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(1): 56 - 62. (in Chinese)
- [9] Luo C Y, Xiong J J. Static pull and push bending properties of RTM-made TWF composite tee-joints [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(2): 198 - 207.
- [10] Thawre M M, Pandey K N, Dubey A, et al. Fatigue life of a carbon fiber composite T-joint under a standard fighter aircraft spectrum load sequence [J]. Composite Structures, 2015, 127: 260 - 266
- [11] Marcadon V, Nadot Y, Roy A, et al. Fatigue behavior of T-joints for marine applications [J]. International Journal of Adhesion & Adhesive, 2006, 26(7): 481 - 489.
- [12] Ma X S, Bian K, Lu J Y, et al. Experimental research on detection for interface debond of CFRP T-joints under tensile load [J]. Composite Structures, 2016, 158: 359 - 368.
- [13] Kumari S, Sinha P K. Finite element analysis of composite wing T-joints [J]. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 2002, 21(17): 1561 - 1585.