

# 复合材料梁腹板不同开孔形式 稳定性研究

## Research on the Stability of Difform Holes on the Compisite Web

林 森 何 翔 吴德财 / Lin Sen He Xiang Wu Decai  
(上海飞机设计研究院,上海 201210)  
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘 要:

由于工艺性、维护性等要求,复合材料结构梁腹板中不可避免需开孔,不同形式的开孔有着不同承载能力。通过对梁腹板结构不同形式的开孔进行剪切载荷下屈曲试验研究,得到屈曲载荷和破坏载荷,对比不同开孔对结构承载的影响,并通过有限元进行数值模拟分析,屈曲载荷和试验基本吻合。同时试验得到复合材料结构有较强的后屈曲承载能力。

**关键词:**复合材料梁腹板; 剪切试验; 屈曲载荷; 有限元分析

**[Abstract]** In order to satisfy the technics and maintenance requirements for the structure of the composite web, holes are ineluctable on the web of spar and difform holes have different carrying capacity. By studying difform holes on the web with buckling test under the shear load, different buckling load and failure mode of structure are established. Finite element analysis was used to analyze the buckling behavior of the web, and the analysis results are accordable with experimental results. Experiment results also reveal that the composite web can bear greater load after buckling.

**[Key words]** the Composite Web; Shear Test; Buckling Load; Finite Element Analysis

## 0 引言

复合材料在飞机结构中应用得越来越多, A380、波音 787 等飞机采用了大量复合材料,其中波音 787 的复合材料用量占飞机总结构重量超过 50%,复合材料在飞机上的用量已成为衡量飞机结构先进性的重要标志之一。复合材料的各项特异性为结构设计提供了不同功用的设计需求,但是由于一些复合材料在结构设计中不可避免地需要对其进行开孔,对结构损伤程度大于金属结构,因此复合材料结构开孔形式成为结构设计中的重要内容<sup>[1]</sup>。

梁是飞机结构中常见的结构形式,是结构设计中的重要承力构件,主要传递轴力和剪力。在结构设计中,必须考虑工艺施工通路和检测维护等飞机结构基本设计,尤其在翼面结构部件中,梁腹板开

孔必不可少,不同的开孔形式对于梁腹板承载能力的影响不同。复合材料在剪切载荷作用下,常见失效模式是屈曲失稳,进而破坏<sup>[2]</sup>。目前国内外对于复合材料屈曲研究多集中在理论研究<sup>[3-5]</sup>,本文采用试验研究和数模模拟相结合来研究复合材料开孔结构在剪切载荷作用下的力学相应。主要分析三种不同开孔形式的腹板承载能力。

## 1 复合材料梁试验件

试验件模型以某型飞机尾翼数模前后梁腹板尺寸为参考。试验件选用“工”字梁,梁腹板为两“C”型背靠背固化,梁缘条为“C”型腹板上下贴合长条碳纤维固化成型,如图 1 所示。

试验件为一长 400mm、高 280mm 的复合材料板,模型材料为碳纤维/环氧树脂,铺层方式如表 1 所示。在常规开孔设计中一般是圆形、菱形、长圆

形开孔,开孔大小根据一些特殊需要进行设计,最长边不小于 100mm,最短边不小于 80mm。不同形状的开孔模型分别如图 2、图 3 和图 4 所示。

在满足特殊要求的情况下,菱形开孔与圆形开孔试验件相比,面积不同,但在最大长度方向上长度相同,菱形孔试验件设计对角线方向 100mm,圆形孔试验件设计半径 50mm。在腹板高度较小两肋间距过大的位置,开孔通常为长圆形孔,开孔面积较大,试验件腹板高度方向设计 80mm,长度方向最大总长 150mm。

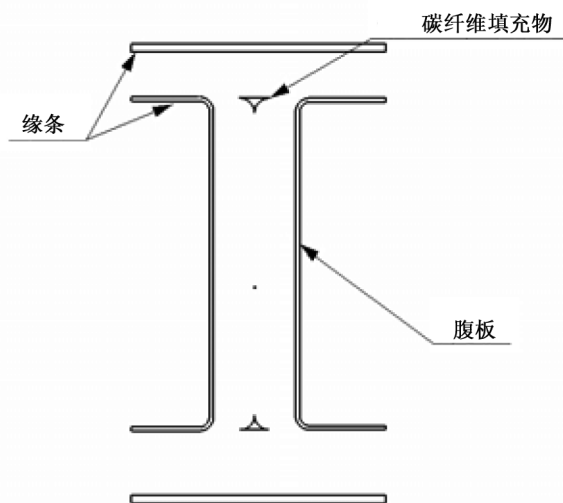


图 1 工字型梁截面图

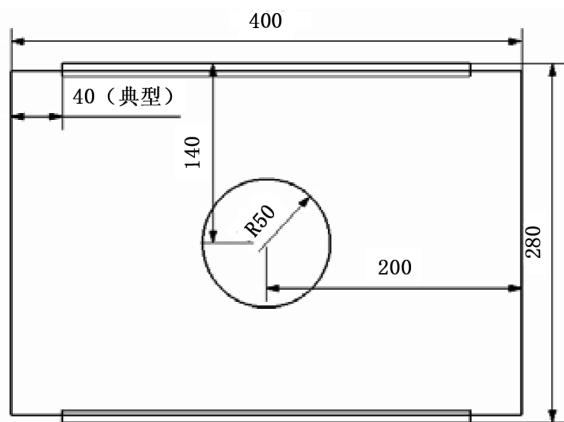


图 2 圆形开孔模型

表 1 复合材料试样件铺层信息

铺层	角度
梁腹板的铺层为 17 层:	[ 45/- 45/0/45/- 45/0/- 45/45/90/45/- 45/0/- 45/45/0/- 45/45 ]
梁缘条的铺层为 32 层:	[ 45/- 45/0/0/45/90/- 45/0/0/- 45/45/45/- 45/0/0/0/- 45/0/0/0/45/90/45/0/0/0/- 45/0/0/0/-45/45 ]

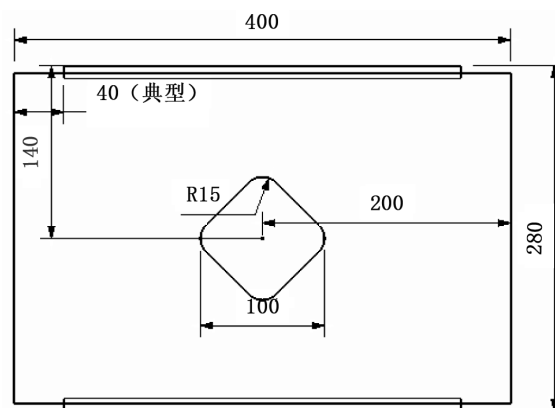


图 3 菱形开孔模型

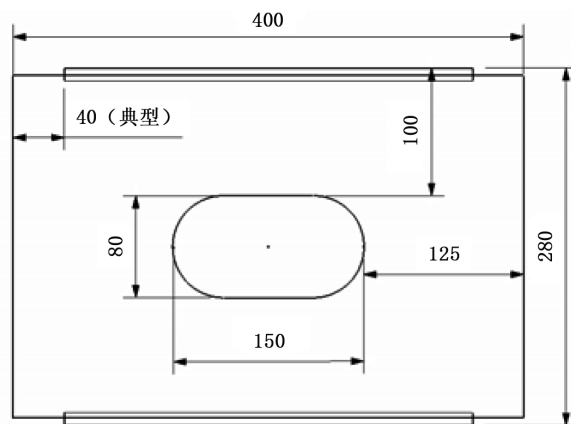


图 4 长圆形开孔模型

## 2 试验及结果分析

### 2.1 试验过程

试验件为 400mm×280mm 的长方形层压板,如上所示。试验件在 400 mm 长度方向的两边各具有 40 mm 的夹持板;在对应 280 mm 宽度方向设计了 70 mm 宽的梁缘条,夹持板与梁缘条用于将加载件与夹具四面夹持。

试验采用 Instron-5500R 电子万能材料试验机和 MTS-NEW810 电液伺服材料试验机加载。试验夹具采用四连杆框架结构,四连杆框架的外缘尺寸约为 400mm×400mm;试验件的四边作简支处理,试验夹具分别夹在试样四面的梁缘条和腹板夹持端上,试验件两个梁缘条与专门设计的“T”型件连接,试验前先将试验件用螺栓固定在夹具上,试验件通过螺栓与四连杆框架夹具连接。加载时通过对四连杆框架的两个相对的节点施加拉力,转变为腹板的剪力。试件夹持方式示意与试验夹具如图 5 所示。试验件应变片在开孔处左右两边对称粘贴,如图 6 所示。

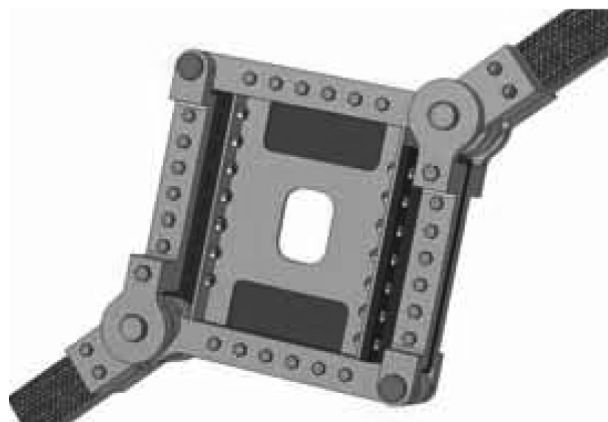


图5 试验件夹持示意图

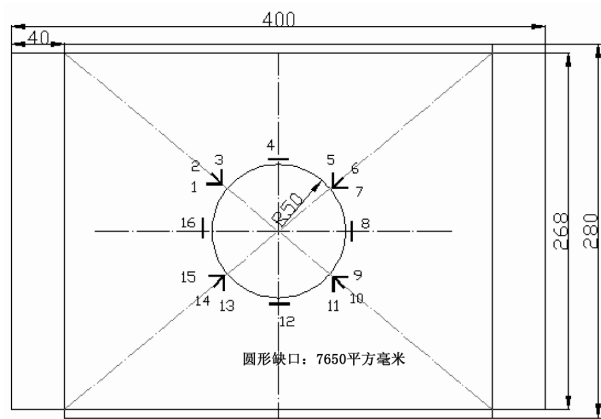


图6 试验件粘贴典型示意图

## 2.2 试验分析和有限元分析

### 2.2.1 圆形开孔

初始加载到 70kN 左右可以看见试件受拉对角线上的孔边出现变形,向一个方向凸出,随着载荷的增加,变形逐渐增大,圆形变成椭圆;此时可断断续续听到轻微响声,对应载荷-位移曲线上的载荷波动,加载至 170kN 时试件沿加载对角线撕裂,试件破坏,停止加载,如图 7 所示。

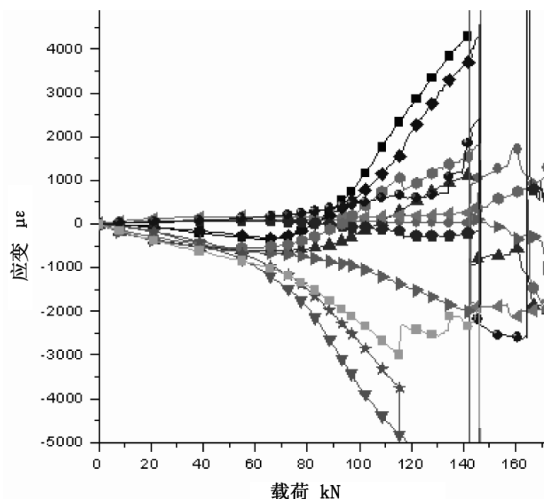


图7 圆形开孔腹板贴片应变-载荷图

### 2.2.2 菱形开孔

初始加载到 90kN 左右可以看见试件受拉对角线的菱形孔边出现变形,向一个方向凸出,随着载荷的增加,变形逐渐增大;当达到试验机的载荷 200kN 时,试件破坏,加载停止,如图 8 所示。

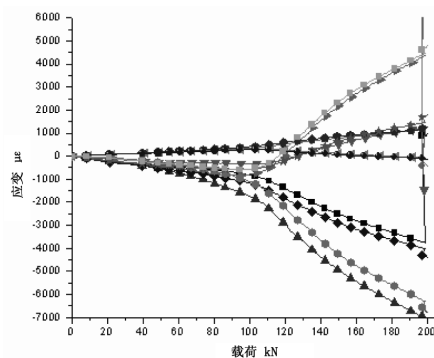


图8 菱形开孔载荷-应变示意图

### 2.2.3 长圆形开孔

长圆形开孔试件在载荷加载到 50kN 左右出现屈曲变形。由于长圆形开孔面积较大,屈曲变形更大更明显,屈曲同样发生在长孔边缘的拉伸加载方

向上。试件出现屈曲后,载荷-位移曲线上的载荷波动,对应于试件发出的轻微响声,此时应该是材料内部出现分层损伤。试验载荷加载至 110kN 左右,试验件破坏,如图 9 所示。

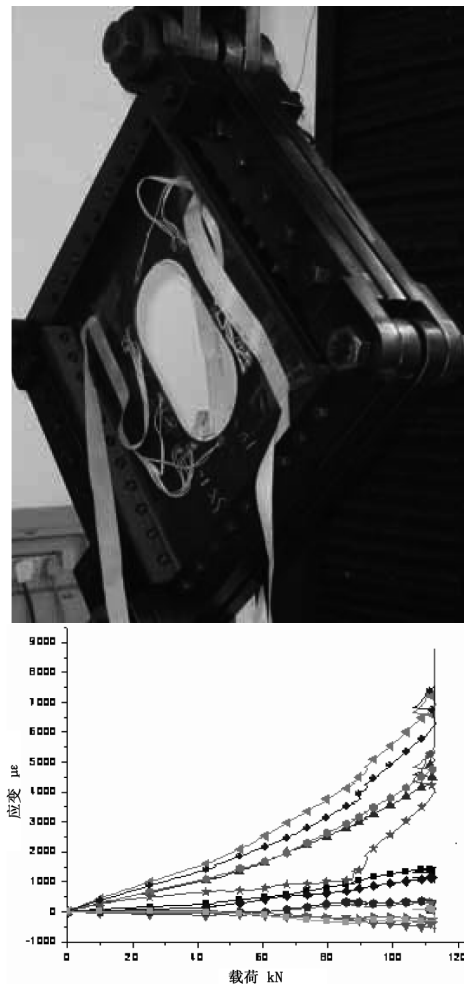


图 9 长圆形开孔载荷-应变示意图

2.3 试验结果分析

通过对圆形、菱形、长圆形开孔试验件的载荷-应变曲线的观察,在试验件开孔处发生局部屈曲至腹板发生总体屈曲有较长的载荷步,说明复合材料梁腹板还有较强的后屈曲承载能力。试验件结果显示菱形开孔承载剪切载荷能力最好,圆形开孔次之,长圆形承载能力较差,如表 2 所示。

表 2 试验件结果及结构效率

试样序号	试验屈曲 载荷 / kN	破坏载荷 / kN	重量 / kg	结构效率比
圆形开孔	70	170	0.971	0.77
菱形开孔	90	大于 200	0.98	1
长圆形开孔	50	115	0.924	0.524

2.4 有限元分析

试件采用节点单位剪力对角拉伸的加载方式模拟,模型全部用壳单元进行有限元模拟。通过建立有限元分析模型得出三种不同形式开孔的一阶屈曲特征值,如图 10 所示。有限元分析结果和试验件结果基本吻合,说明模型建立合理,满足工程计算要求。为发现开孔尺寸与形状的关系,数值模拟了菱形、圆形、长圆形等不同尺寸的开孔屈曲载荷,具体如表 3 所示。

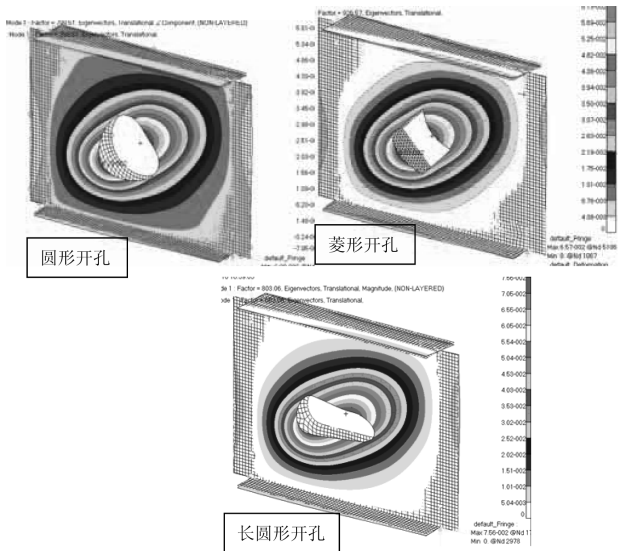


图 10 有限元屈曲分析云图

表 3 有限元计算结果

开孔形式	开孔尺寸 / mm	有限元解 / kN	试验值 / kN
圆形	$R=50$	68.033	70
	$R=60$	56.085	—
	$R=70$	47.509	—
	$R=75$	43.131	—
菱形	圆弧对角距 100	85.667	90
	圆弧对角距 120	74.827	—
	圆弧对角距 140	64.66	—
	圆弧对角距 150	60.229	—
长圆形	最长间距 100 * 高度 80	72.45	—
	最长间距 120 * 高度 80	62.245	—
	最长间距 140 * 高度 80	54.85	—
	最长间距 150 * 高度 80	49.18	50



通过有限元分析可以得出在抗剪切屈曲能力上,菱形开孔最好,长圆形开孔次之,圆形开孔承载削弱腹板承载能力更多。碳纤维层压板复合材料梁腹板 $\pm 45^\circ$ 铺层占多数,圆形开孔对纤维切割较多,造成载荷传递不连续面积较大,对梁腹板承载造成承载能力下降较大。

### 3 结论

通过对复合材料梁腹板不同开孔形式试验研究及有限元模拟得出以下结论:

(1)复合材料梁腹板开孔在满足相应要求后,菱形开孔承载能力最高,长圆形开孔次之,圆形开孔承载能力较弱;圆形开孔对腹板开孔造成的结构承载能力损失较大。

(2)有限元计算结果和试验结果基本吻合,而且略偏保守,满足工程计算要求。

(3)试验破坏载荷大于屈曲载荷两倍以上,说明复合材料梁腹板有较强的后屈曲承载能力,采用

复合材料的后屈曲承载能力设计是梁腹板的一种合理优化设计方法。

#### 参考文献:

- [1]陈绍杰,高树理,等. 复合材料结构设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,1990.
- [2]童贤鑫,郑晓玲,等. 复合材料结构稳定性分析指南[M]. 北京:航空工业出版社,2002.
- [3]Damodar R Ambur, Navin Jaunky, Mark W Hilburger. Progressive failure studies of stiffened panels subjected to shear-loading[J]. Composite Structures, 2004, 65: 129- 142.
- [4]白瑞祥,陈浩然,刘远东. 分层损伤复合材料加筋层合板屈曲和后屈曲性能研究[J]. 大连理工大学学报,2003, 43(3): 274-280.
- [5]Hwang Shunfa, Liu Guihuann. Buckling behavior of composite laminates with multiple delamination under uniaxial compression[J]. Composite structures, 2001, 53: 235-243.

(上接第 23 页)

坏,符合 CCAR 25.305(a)(b)和 25.307(a)条款的要求,通过限制和极限载荷试验。

表 2 试验值与计算值对比

试验工况	位置	应力/ MPa	试验值	计算值	试验/ 计算
1	侧撑杆梁腹板(花片2)	$\sigma_0$	719.6	817.0	0.88
1	侧撑杆梁腹板(花片3)	$\sigma_0$	702.8	783.0	0.90
1	侧撑杆梁与主起连接耳片(花片2)	$\sigma_{VMS}$	122.7	144.0	0.85
2	前接头耳片(花片4)	$\sigma_{VMS}$	66.5	68.0	0.98
2	前接头耳片(花片5)	$\sigma_{VMS}$	101.9	100.4	1.01
3	主接头腹板(花片3)	$\tau$	138.0	140.0	0.99
3	主接头左侧耳片(花片1)	$\sigma_{VMS}$	133.0	148.0	0.90

### 4 结论

(1)试验测量数据可靠有效,试验考核部位计算值与试验数据比较吻合,静强度分析计算合理、正确。

(2)主起落架连接区结构满足静强度要求。

表 3 试验检查结果

试验情况	结构合格判据	检查结果
限制载荷	1)结构承受限制载荷时间不小于 30s; 2)结构没有裂纹或破坏; 3)结构没有有害永久变形; 4)结构连接没有铆钉或螺栓断裂、破坏。	1)达到 67% 载荷后,保载 30s,且结构不破坏; 2)结构没有裂纹或破坏; 3)结构没有有害永久变形; 4)结构连接没有铆钉或螺栓断裂、破坏。
100% 极限载荷	1)结构承受 100% 极限载荷时间不小于 3s; 2)结构没有整体破坏,只要不影响结构能承受最终载荷,局部裂纹以及永久变形是允许的; 3)结构、连接铆钉或螺栓允许部分断裂,但不能影响结构继续承载,否则将不被接受。	1)达到 100% 载荷后,保载 3s,结构不破坏; 2)结构没有整体破坏,存在局部损伤,但不影响结构承受最终载荷; 3)结构、连接铆钉或螺栓没有断裂。

#### 参考文献:

- [1]国防科学技术工业委员会. HB7713-2002 中华人民共和国航空行业标准飞机结构静强度试验通用要求[S]. 国防科学技术工业委员会,2002:1-2.
- [2]中国民用航空总局. CCAR-25-R3 中国民用航空规章(第 25 部)运输类飞机适航标准[S]. 中国:中国民用航空总局,2001:29-30.