

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2019.02.006

# 复合材料加筋壁板剪切屈曲工程 算法验证研究

## The Engineering Calculation Research of Stiffened Composite Panel Subjected to Shear Loading

杨俊清 孟庆功 王 俊 / YANG Junqing MENG Qinggong WANG Jun  
(上海飞机设计研究院, 上海 201210)  
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘 要:

通过某型飞机的一组典型试验件的剪切试验获得的相关试验结果,使用正交各向异性矩形层压平板的剪切屈曲载荷计算公式,选用相关计算参数,并将工程理论计算结果与试验结果进行对比。研究发现,对文中典型试验件进行理论计算时,板元参数中当蒙皮铺层厚度选择不考虑加筋桁条底脚而取原铺层厚度、宽度选择考虑加筋桁条底脚支撑作用,计算的最终五组结果与试验值绝对误差均最小,并且小于5%。

**关键词:** 复合材料加筋壁板; 剪切屈曲; 临界载荷; 工程计算

**中图分类号:** V214.8

**文献标识码:** A

**OSID:**



[Abstract] According to related calculation parameters, this paper compares the buckling critical value calculated by the function for orthotropic composite panel subjected to shear loading with the experimental results of a batch of typical test panels for an airplane program subjected to shear loading. The results show that the original skin lamina thickness considered, the width of the panel related with the stringer foot, four edges simply supported, five theoretical results get fairly well with experimental results, and the absolute error between theoretical result and experimental result is within 5%.

[Keywords] stiffened composite panel; shear buckling; critical loading; engineering calculation

## 0 引言

复合材料因其诸多优良性能而被航空航天等领域日益广泛使用。目前,国内外关于复合材料加筋壁板承受剪切载荷屈曲的临界值计算方法已做了大量研究。郑宇宁等<sup>[1]</sup>利用 Ritz 法和最小势能原理推导了复合材料剪切屈曲临界载荷计算公式,文中没有用实际例子来验证公式的计算结果。马子广等<sup>[2]</sup>使用四边固支剪切屈曲公式计算验证了一块无加筋桁条复合材料层合板的屈曲,结果较为理想。王新年等<sup>[3]</sup>利用有限元和试验法研究了复合材料平尾加筋壁板的剪切稳定性,分析了蒙皮截面面积对其承受剪切能力的影响。李爱环等<sup>[4]</sup>研究了“T”

型长桁条加强的复合材料壁板剪切屈曲现象,没有研究计算选取的板元宽度取法,而是按常规方式选取的宽度。Sandipan 和 Chaitali 等<sup>[5]</sup>分析研究的是双曲率的复合材料层合板,推导了某种高阶剪切变形理论。由于具体问题需要具体分析或进行方法验证,而本文的试验件是针对某型飞机设计制造的典型结构,因此对其剪切屈曲临界载荷的计算分析,需要进行各种方法的适用性验证。

## 1 试验介绍

### 1.1 试验目的

复合材料机身平板剪切试验主要目的如下:  
(1) 获得壁板在单一剪切载荷作用下的局部蒙皮屈

曲剪流;(2)为数字选型中不同长桁条间距剪切屈曲载荷计算结果的验证提供试验依据;(3)为单一载荷作用下壁板蒙皮剪切稳定性计算方法的验证提供试验依据;(4)为工艺研究提供试验依据。

1.2 试验件

试验件为5根“M”型桁条以及两个框和蒙皮组成的加筋壁板,剪切试验件包含5组“M”型桁条试验件。试验件最大外形尺寸为1 355 mm × 1 240 mm × 124 mm。剪切试验件的结构示意图如图1所示,试验件的结构相关信息见表1。蒙皮和长桁条铺层见表2。

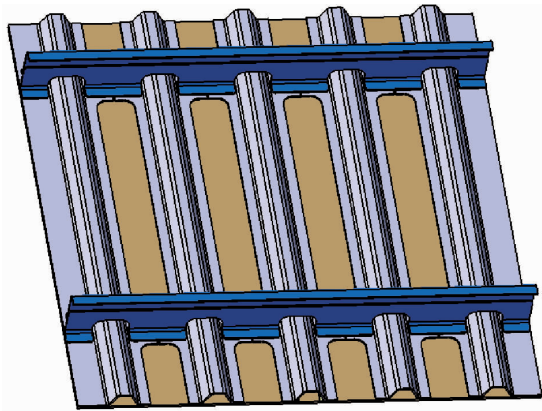


图1 剪切试验件示意图

表1 平直壁板试验件矩阵

| 组号 | 桁条类型 | 蒙皮铺层 | 桁条间距/mm | 桁条铺层 | 载荷形式 |
|----|------|------|---------|------|------|
| P1 |      | 10   | 210     | 9    | 剪切   |
| P2 |      | 10   | 190     | 9    |      |
| P3 | “M”型 | 12   | 210     | 9    |      |
| P4 |      | 12   | 190     | 9    |      |
| P5 |      | 14   | 190     | 9    |      |

表2 平板壁板试验件铺层介绍

| 类型      | 分类   | 加载形式 | 铺层   | 铺层数 |
|---------|------|------|--|-----|
| 平直壁板试验件 | 蒙皮   | 剪切   | [ 45/ - 45/0/90/45/ - 45/90/0/ - 45/45 ]   | 10  |
|         |      |      | [ 45/ - 45/ - 45/90/ 45/0 ] <sub>s</sub>   | 12  |
|         | 帽型桁条 | 剪切   | [ 45/ - 45/0/ - 45/ 90/45/0 ] <sub>s</sub> | 14  |
|         |      |      | [ 45/0/0/ - 45/90/ - 45/0/0/45 ]           | 9   |

1.3 试验内容

剪切试验采用对角拉伸方式施加。剪切试验在壁板拉伸试验机(600 t)上进行,通过螺栓将试验件四边与夹具剪力板相连,再利用轴销、板条等将装配好的试验件与试验机相连,在试验件对角处施加拉伸载荷形成剪力。剪切试验件加载方案示意图如图2所示,试验示意图如图3所示。

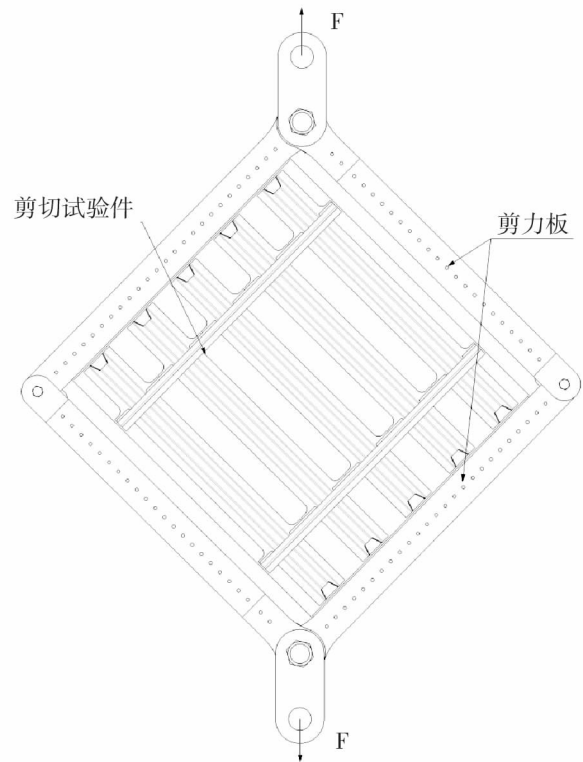


图2 剪切试验加载方案示意图



图3 试验示意图

根据有限元分析,表 3 给出了剪切试验件的预估试验加载屈曲载荷。其中端部边长指的是垂直于长桁条轴线一侧的边长,侧边是平行于长桁条轴线的一侧。

表 3 剪切试验载荷表

| 试验类型 | 试验组号 | 剪切失稳剪流 / (N · mm <sup>-1</sup> ) | 端部边长 L1/mm | 端部边剪切失稳载荷 F1/N | 侧边长 L2/mm | 侧边剪切失稳载荷 F2/N | 预计屈曲载荷/N |
|------|------|----------------------------------|------------|----------------|-----------|---------------|----------|
| 剪切试验 | S9   | 160                              | 1 140      | 182 844        | 960       | 153 974       | 239 040  |
|      | S10  | 223                              | 1 040      | 232 120        | 960       | 214 265       | 315 894  |
|      | S11  | 303                              | 1 140      | 345 420        | 960       | 290 880       | 451 582  |
|      | S14  | 400                              | 1 040      | 415 567        | 960       | 383 600       | 565 548  |
|      | S15  | 500                              | 1 040      | 519 636        | 960       | 479 664       | 707 177  |

### 1.4 试验结果

根据试验件上考核区域蒙皮正反面对应位置的应变贴片记录的相关数据汇总整理并用坐标表示出其关系示意图,其中一件的应变-载荷随着试验加载过程的关系如图 4 所示。使用应变分叉法观察判断试验件的屈曲发生时刻,当试验件的考核区域局部蒙皮上两侧的应变发生分叉时认为结构发生局部首次屈曲。

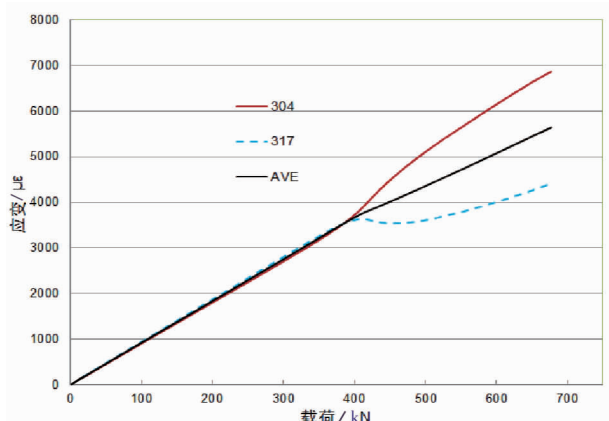


图 4 应变-载荷曲线示意图

各结构参数的试验件剪切屈曲临界的剪流汇总表 4。

表 4 试验件屈曲剪流

| 损伤情况 | 桁条特殊处理 | 长桁条铺层数 | 蒙皮铺层数 | 桁条间距 | 屈曲剪应变 | 试验屈曲剪流 / (N · mm <sup>-1</sup> ) |
|------|--------|--------|-------|------|-------|----------------------------------|
| 无损伤  | 不包     | 9      | 10    | 210  | 2 358 | 110                              |
| 无损伤  | 不包     | 9      | 10    | 190  | 3 374 | 157                              |
| 无损伤  | 不包     | 9      | 12    | 210  | 3 717 | 227                              |
| 无损伤  | 不包     | 9      | 12    | 190  | 5 177 | 316                              |
| 无损伤  | 不包     | 9      | 14    | 190  | 6 947 | 435                              |

## 2 工程计算

本文欲使用工程计算中常用的正交各向异性矩

形层压平板的四边简支和四边固支的剪切屈曲式(1)<sup>[6]</sup>来对该试验件进行剪切屈曲验证,相比于 Ritz 和能量变分法,该计算方式简单易懂,是工程师们在型号分析预计算中更偏好的计算公式。

$$N_{xyr} = K_s \frac{\pi^2 \sqrt{D_{11} D_{22}^3}}{b^2} \quad (1)$$

对于当量铺层厚度的情况,计算  $D$  矩阵时,考虑铺层顺序及角度不变。 $K_s$  为剪切屈曲系数,根据简支和固支的不同而不同,按无量纲参数  $\alpha, \beta$  可分别从图 5、6 中查取。对于四边简支,剪切屈曲系数也可以由式(2)求解;对于四边固支,可结合图 5 和插值表 5 求取。

$$K_s = 3.32 + 2.17/\alpha - 0.163/\alpha^2 + \beta^2(1.54 + 2.36/\alpha + 0.1/\alpha^2) \quad (2)$$

其中:

$$\beta = (b/a) \sqrt[4]{D_{11}/D_{22}} \quad (3)$$

$$\alpha = \sqrt{D_{11} D_{22}}/D_3 \quad (4)$$

$$D_3 = D_{12} + 2D_{66} \quad (5)$$

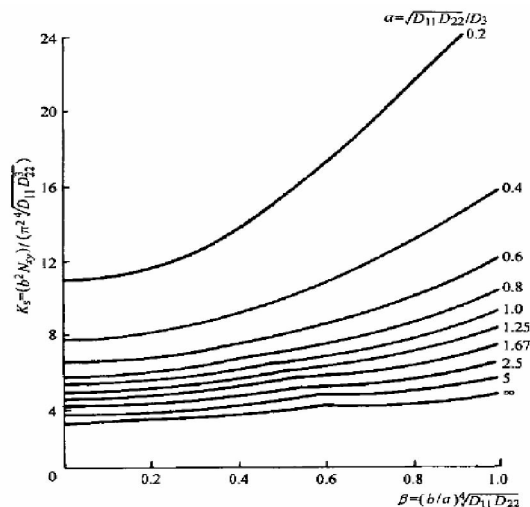


图 5 四边简支板的剪切屈曲系数

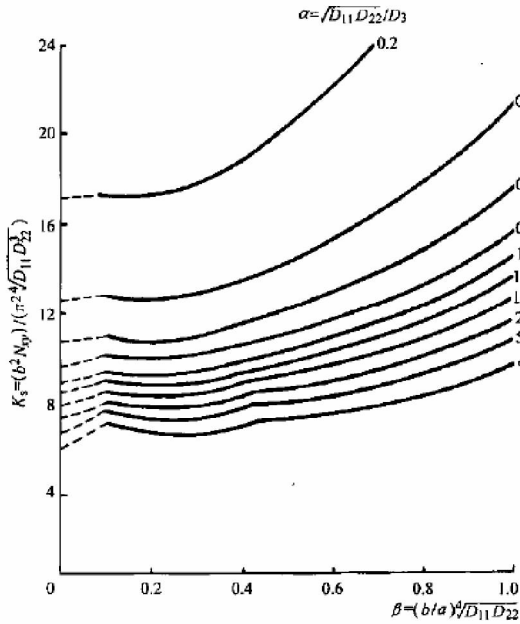


图6 四边固支板的剪切屈曲系数

表5 四边固支剪切参数  $K_s$  插值表

|         |     | $\theta$ |       |       |       |       |       |       |          |
|---------|-----|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
|         |     | 0.2      | 0.4   | 0.6   | 1     | 1.25  | 1.667 | 2.5   | $\infty$ |
| $\beta$ | 0   | 17.13    | 12.51 | 10.69 | 8.99  | 8.45  | 7.93  | 7.32  | 6.11     |
|         | 0.1 | 17.31    | 12.89 | 10.95 | 9.11  | 8.98  | 8.58  | 8.12  | 7.17     |
|         | 0.2 | 17.34    | 12.64 | 10.64 | 9.27  | 8.8   | 8.34  | 7.84  | 6.79     |
|         | 0.4 | 18.91    | 13.62 | 11.6  | 9.89  | 9.39  | 8.86  | 8.31  | 6.97     |
|         | 0.6 | 22.21    | 15.43 | 13.06 | 11.08 | 10.46 | 9.8   | 9.07  | 7.57     |
|         | 0.8 | 26.31    | 17.92 | 14.89 | 12.44 | 11.68 | 10.9  | 10.11 | 8.48     |
|         | 1   | 32.56    | 21.63 | 17.86 | 14.81 | 13.87 | 12.91 | 11.93 | 9.92     |

板元宽度  $b$  的取法如图7所示。其中,

$$b_2 = (b_1 + b_3) / 2 \quad (6)$$

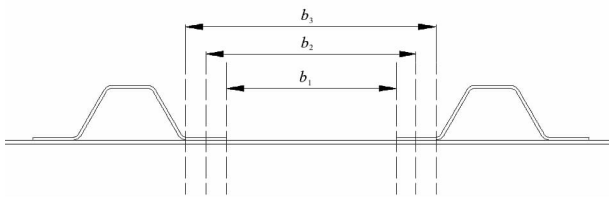


图7 板元宽度  $b$  的几种取法

工程计算时,有时根据实际情况还会考虑帽型长桁条的底脚对蒙皮的支持效应,并将这种支持效应的展现方式体现到考虑底脚的等效蒙皮厚度。考核区域局部蒙皮的厚度折算一般有两种方式,一种

是假设加筋桁条和蒙皮的等效轴向弹性模量相同,并用式(7)和(9)来计算帽型长桁条的底脚对局部蒙皮厚度的贡献;另一种是考虑长桁条与蒙皮轴向实际等效弹性模量不同,采用式(8)和(9)来计算帽型长桁条的底脚对局部蒙皮厚度的贡献,即刚度等效修正法<sup>[7]</sup>。

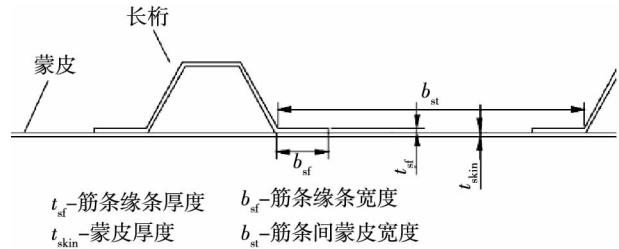


图8 帽型加筋壁板结构示意图

$$t_{avg} = (2b_{sf}t_{sf} + bt_{skin}) / b \quad (7)$$

$$t_{avg} = t_{skin} + 2b_{sf}t_{sf}E_{st}/E_{skin}b \quad (8)$$

$$t_{ply,skin} = t_{avg} / n \quad (9)$$

式中: $a$  是框间距; $n$  是蒙皮铺层的层数; $b$  是长桁条的间距,同图中  $b_{st}$ ;  $b_{sf}$  是长桁条的板元宽度; $t_{sf}$  是长桁条板元厚度; $t_{skin}$  是蒙皮厚度。

根据上述信息,本文将所考虑的计算方式和参数选择等相关信息列于表6,(由于预计算时,使用方法5计算的结果已比试验值大很多,而使用式(7)(8)计算的结果比方法5计算结果还大,故表6中将其省略)并且验证哪一种计算方法和参数选择最适合于前文所述的实际型号典型试验件剪切稳定性屈曲计算。

表6 屈曲载荷计算法

| 方法  | 蒙皮宽度  | 蒙皮厚度计算方式         | 边界条件 |
|-----|-------|------------------|------|
| 方法1 | $b_1$ | 原始蒙皮厚度           | 4边简支 |
| 方法2 | $b_2$ | 原始蒙皮厚度           | 4边简支 |
| 方法3 | $b_3$ | 原始蒙皮厚度           | 4边简支 |
| 方法4 | $b_3$ | 原始蒙皮厚度           | 4边固支 |
| 方法5 | $b_3$ | 桁条与蒙皮轴向刚度相等的厚度折算 | 4边简支 |

根据表6,使用式(1),将计算结果汇总如表7所示,将每种计算结果与剪切屈曲试验值的误差汇总如表8所示,其中误差大于零,表示计算结果比试验值偏大;误差小于零,表示理论计算比试验值小。

表 7 剪切屈曲剪流

| 壁板类型 | 铺层数 | 桁条间距 | 方法 1  | 方法 2   | 方法 3   | 方法 4   | 方法 3、4 均值 | 方法 5   |
|------|-----|------|-------|--------|--------|--------|-----------|--------|
| 直板   | 10  | 210  | 175.5 | 114.00 | 80.57  | 128.79 | 104.680   | 178.78 |
| 直板   | 10  | 190  | 271.7 | 159.63 | 105.74 | 168.94 | 137.340   | 257.96 |
| 直板   | 12  | 210  | 379.3 | 224.00 | 157.90 | 251.78 | 204.840   | 308.40 |
| 直板   | 12  | 190  | 535.9 | 314.30 | 207.69 | 331.72 | 269.705   | 443.83 |
| 直板   | 14  | 190  | 727.3 | 427.48 | 283.25 | 450.97 | 367.110   | 553.22 |

表 8 理论计算与试验值的误差

| 壁板类型 | 铺层数 | 桁条间距 | 误差 1 | 误差 2 | 误差 3 | 误差 4 | 均值误差 | 误差 5 |
|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 直板   | 10  | 210  | 60%  | 4%   | -27% | 17%  | -5%  | 63%  |
| 直板   | 10  | 190  | 73%  | 2%   | -33% | 8%   | -13% | 64%  |
| 直板   | 12  | 210  | 67%  | -1%  | -30% | 11%  | -10% | 36%  |
| 直板   | 12  | 190  | 70%  | -1%  | -34% | 5%   | -15% | 40%  |
| 直板   | 14  | 190  | 67%  | -2%  | -35% | 4%   | -16% | 27%  |

### 3 结论

从上述计算分析情况,本文得出的主要结论有:

(1) 当其他结构参数相同时,加筋桁条间距越小,其剪切屈曲临界载荷越大;

(2) 当加筋桁条间距等结构参数相同时,蒙皮越厚,剪切屈曲临界值越大;

(3) 对于该型号飞机的典型复合材料加筋壁板试验件的剪切屈曲临界值计算方法,使用方法 2 求解结果与试验误差最小,且绝对误差小于 5%,并且相比于其他计算方法,方法 2 的误差结果分散度最小,可信度最高。

#### 参考文献:

- [1] 郑宇宁,邱志平,苑凯华. 复合材料波纹板在剪切载荷下的屈曲特性分析与可靠性优化[J]. 振动与冲击,2016,35(19):7-25.
- [2] 马子广,王卫卫. 复合材料层压板剪切屈曲性能探究[J]. 直升机技术,2017,194(4):13-17.

[3] 王新年,赵伟,吴师,等. 复合材料平尾加筋壁板剪切稳定性[J]. 南京航空航天大学学报,2017,49(6):812-819.

[4] 李爱环,支晗. 剪切载荷作用下复合材料加筋壁板蒙皮屈曲[J]. 航空计算技术,2017,47(1):97-100.

[5] THAKUR S N, RAY C, CHAKRABORTY S. A new efficient higher-order shear deformation theory for a doubly curved laminated composite shell [J]. Acta Mechanica, 2017, 228(1): 69-87.

[6] 中国航空研究院. 复合材料结构稳定性分析指南[M]. 北京:航空工业出版社,2002.

[7] 于振波. 碳纤维复合材料加筋平板压缩屈曲计算方法研究[J]. 江苏科技信息,2015(22):63-65.

#### 作者简介

杨俊清 男,硕士。主要研究方向:复合材料稳定性设计分析。E-mail: yangjunqing@comac.cc

孟庆功 男,硕士,研究员。主要研究方向:复合材料稳定性设计分析。E-mail: mengqinggong@comac.cc

王 俊 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:复合材料稳定性设计分析。E-mail: wangjun1@comac.cc