

碳纤维复合材料加筋板的稳定性研究

秦仁智* 沈嗣唐 王震鸣**

摘 要

本文用有限单元法计算了碳纤维复合材料加筋板在轴压下整体和局部失稳时的临界应力。制作了纵向加筋的复合材料试验件，在四边简支边条件下，进行了轴压稳定性实验，测出的临界应力值与计算值十分接近。

一、前 言

先进的碳纤维复合材料由于它的比强度高，比刚度大，抗疲劳性能好等一系列优点，日益为航天和航空界所重视，展开了多方面的研究工作。我国歼击机垂直尾翼拟采用碳纤维复合材料作加筋壁板，将可显著减轻重量，提高飞行机动性和灵活性，加快航速，改善作战性能。目前碳纤维复合材料价格较贵，为了合理选材，给航空结构设计提供依据，我们研究了复合材料加筋板在轴压下的稳定性，用四边简支的加筋板做了轴压试验，所得结果与二种有限元算法分别算得的平板失稳时临界应力比较接近。

二、轴压稳定性的实验研究

在相同的工艺条件下，制作了三块纵向加筋的复合材料试验件，在四边简支边条件下，进行了轴压稳定性实验，观察失稳现象。

2.1 试验件和实验方法

面板和筋条的几何尺寸如图1所示。

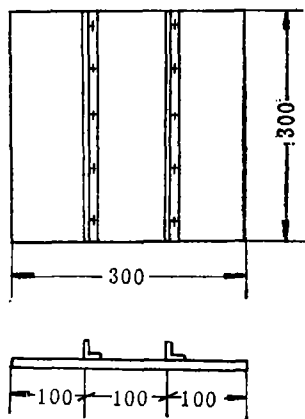


图1 试验件

面板（方板）：300×300×2.2毫米；筋条（等肢）：10×10毫米，厚1.8毫米。

面板与筋条的铺层方式相同： $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ ，试件的厚度为平均厚度，在试件上测九点厚，取其平均值。试件采用日本东丽 T-300 碳纤维和国产环氧树脂（GP648，上海树脂厂生产）为原料。加工时先将碳纤维长丝浸入环氧树脂胶液中，铺成无纬布，晾干，按照不同角度铺层后进行剪裁，然后放入热压罐中进行固化成型，其中壁板与筋条采用胶接加螺钉连接，以防止开裂，再机械加工成预定尺寸。

* 现在通讯处：南京航空学院

** 现在通讯处：中国科学院力学研究所

(1) 边界条件 为了实现四边简支的边界条件, 对上、下加载边用 V 形槽, 侧边用刀口支承的方案, 试件纵筋的二端倒成小于 40° 的尖角后, 把试件放入 V 形槽内, 见图 2 和图 3。

试件的侧边刀口, 调节螺钉不能拧得太紧, 一般用手拧紧就可以。固定侧边刀口的立柱是刚度较大的厚钢板。

夹具是自行设计的, 从试验情况和结果来看, 夹具性能良好。

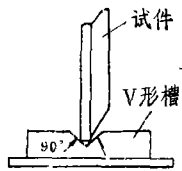


图 2 V 形槽和筋条倒角后的试件

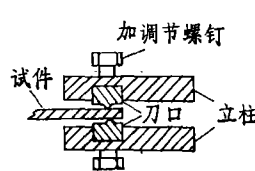


图 3 侧边加支承示意图

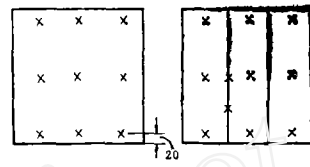
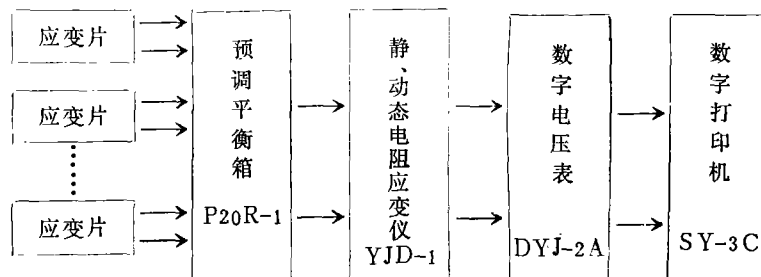


图 5 应变片位置示意图

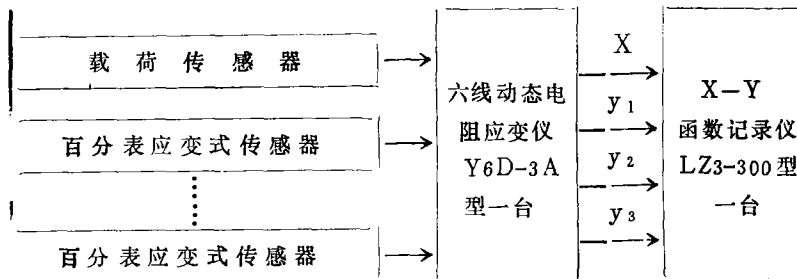
(2) 试验设备和测量方法 试验在长春材料试验机厂生产的 100 吨材料试验机上进行 (图 4, 见图版 15), 通过缓慢控制油阀以达到准静态加载。安装了三只百分表位移传感器, 其中二只测轴向缩短, 一只测试件的中心挠度, 每只都接在“X-Y”记录仪上。

试件上贴了二十片纸基电阻应变片测量应变 (图 5), 贴在试件上下端面附近的应变片是为了观察加载是否均匀和有没有端弯矩。

测量系统框图如下:



载荷—轴向缩短曲线 } 记录系统框图如下:
 载荷—横向挠度曲线 }



2.2 试验现象的分析

由于这次试件的筋条设计得比较弱且较矮, 所以没有发生先局部失稳后整体失稳的现象, 而只出现了整体失稳的现象。

载荷—挠度曲线从一开始就是非线性的, 这是由于有初挠度和筋部倒角的影响(图6)。

载荷—轴向缩短曲线(图7)是由两个直线段组成的折线, 但载荷—平均应变曲线接近于线性, 见图8、9。在达到临界载荷时, 从载荷—应变和载荷—挠度曲线上可以看出变形

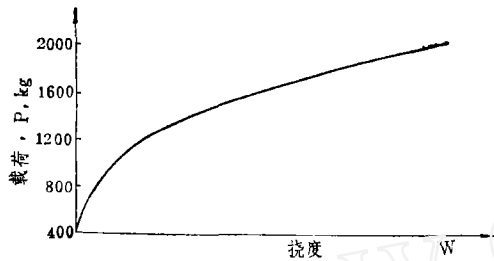


图 6 载荷(P) - 挠度(W)曲线, 试件 I

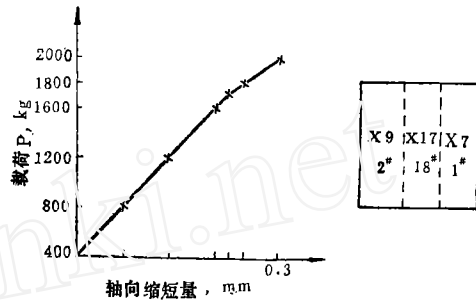


图 7 载荷(P) - 轴向缩短(Δ)曲线

和挠度快速增加(或从增加变为减少), 特别是载荷—轴向缩短曲线在1700公斤前一直是线性的, 一到1700公斤曲线转折, 斜率减小, 这表明试件的轴向刚度显著减小, 即有效宽度减小, 承载能力下降。因此1700公斤是试件 I 的临界载荷。试件在达到临界载荷后, 还有继续增长的承载能力, 属于稳态的超临界变形, 试件可以继续加载。

一般说来, 载荷—挠度曲线和载荷—应变曲线只能近似地给出临界载荷的数值, 而不易确切地定出临界载荷的数值。因为载荷—挠度曲线和载荷—应变曲线都随测点位置的变化而变化, 需要预先估计波形。这次试件由于筋条较弱, 只出现一个半波, 所以波峰在中间, 测点较易安排。

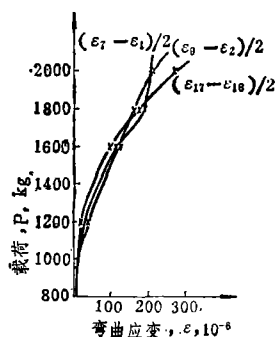


图 8 载荷(P) - 弯曲应变曲线, 试件 I

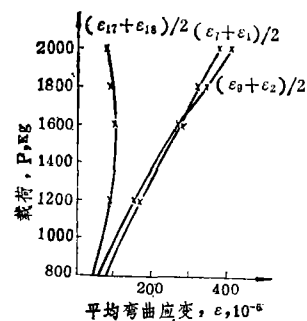


图 9 载荷(P) - 平均应变曲线, 试件 I

我们还利用四边简支轴压后试验件, 再作四边固支试验, 其作法是裁去试件倒筋角部分。加载端用 5 毫米平铁片夹住试件, 侧边用 10 毫米宽平铁片夹住(图10)。

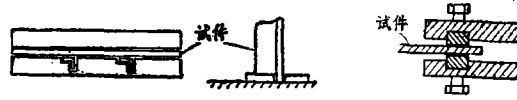


图 10 加载端及侧边夹具情况示意图

试验值与有限元值比较如下:

四边固支试验值 (公斤/厘米 ²)	530.0
四边固支有限元解值 (公斤/厘米 ²)	809.8
比值	65.4%

二者的差值达34%多, 分析其原因, 首先是加载边没有很好地实现固支条件, 此外, 试件已做过四边简支轴压的稳定性试验, 有过大的变形, 缺陷增加, 试件质量下降也是一个重要原因。即便如此, 接近固支的加筋板的临界应力为530公斤/厘米², 也显著大于四边简支加筋板的临界应力 (平均值为241公斤/厘米²)。这说明, 在边界条件中对转动有约束时, 可以显著提高临界载荷, 这一点在结构设计时, 应尽量设法加以利用。

裁去倒筋角部分的试件尺寸是: 300×270×2.2 毫米; 再进行试验的目的是为了观察失稳后的破坏现象。当试件失稳后弯曲变形急剧地增加, 到5180公斤时发生较大劈声, 说明首先发生层间开裂。到5600公斤时继续有响声, 并且是断断续续的。到6050公斤时就变为连续的响声, 直到6270公斤时产生巨大的爆裂声, 加载端的筋条和面板发生了大开裂。这种响声都是层间应力过大, 产生了层间开裂, 到6270公斤时试件完全丧失了承载能力。而铝试件在产生严重的塑性变形后便丧失承载能力。

为了与相同尺寸的铝试件轴压失稳临界应力相比较, 以便取得有用的经验, 在进行碳纤维复合材料试件试验前, 先进行了铝试件的试验。

三、结果与讨论

对于四边简支的加筋板, 做了三个参数相同的轴压试验, 试验数据很集中, 说明试件质量较好。严格控制工艺质量, 是保证数据分散性小的必要条件。

1. 在有限元计算中, 铺层方式对临界应力的影响。

为了估计铺层的影响, 设计了三种不同方式的铺层。其厚度皆为2.2毫米, 12层。

- A: [±45°/±45°/±45°]_s
 B: [0°/0°/90°/0°/0°/90°]_s
 C: [0°/45°/0°/-45°/0°/90°]_s

设筋条各种参数不变, 并设其有限元计算临界应力分别为 $\sigma_{cr}(A)$, $\sigma_{cr}(B)$, $\sigma_{cr}(C)$, 则计算结果如下:

	σ_{cr} 公斤/厘米 ²	$\sigma_{cr}(A), \sigma_{cr}(B) / \sigma_{cr}(C)$	$\sigma_{cr}(A), \sigma_{cr}(C) / \sigma_{cr}(B)$
筋板A	309.0	109.4%	111.2%
筋板B	278.0	98.4%	
筋板C	282.4		101.6%

上述数据表明,铺层适当与否,可使计算的临界应力相差达11.2%。为了充分利用复合材料的特点,对这种材料进行优化设计时可以通过适当的铺层设计以提高临界应力。

2. 假设面板的铺层方式仍是A, B, C三种形式,筋条的参数保持不变,按各向异性有限元计算与按正交各向异性有限元计算,结果比较如下:

加筋板

	各向异性有限元解	正交各向异性有限元解	比值, %
筋板A	309	320.9	96.3
筋板B	278	278	100
筋板C	282.4	291.6	96.8

上述数据表明,临界应力的两种有限元计算值的误差为4%左右。筋板B因按 0° , 90° 铺层,没有弯曲刚度 D_{16} 和 D_{26} ,所以二个有限元解相同。

平板

	各向异性有限元解	正交各向异性有限元解	比值, %
平板A	105	117	89.7
平板C	76.7	86.5	88.7
$\sigma_{cr}(A)/\sigma_{cr}(C)$	136.9%	135.3%	

由上可知,对于平板,两种不同方法计算相同的板,其误差约为11%。但在筋板时其误差仅为4%,筋条的存在大大增加了纵向刚度,相对地减少了因忽略 D_{16} , D_{26} 所引起的误差影响。我们还可以认为恰当的铺层可使平板的临界应力计算值提高35%左右。对于平板来说,铺层的影响尤为明显。

3. 我们参考了Przemieniecki关于局部失稳的有限元结构分析和Zienkiewicz等在结构和连续介质力学中的有限元法,分别计算了平板失稳时的临界应力,结果十分接近。

	Zienkiewicz法	Przemieniecki法
板A	86.5	89.1
板B	117	120

这里要指出,采用Przemieniecki的方法所使用的单元数大大小于Zienkiewicz的方法所使用的单元数,这样可以减少存储单元,节省了时间和费用。但是采用Zienkiewicz的方法,能方便地适应各种边界条件,与试验值符合情况良好,用这种方法来计算碳纤维复合材料加筋板是相当合适的。

我们分别测定了复合材料加筋板和铝加筋板的临界应力,其值分别为241.2和245.9公斤/厘米²,失稳临界应力几乎差不多(铝加筋板的临界载荷是1800公斤)。碳纤维复合材料还可以根据应力分布情况来设计铺层,可充分发挥这种材料的各向异性的优越性。

本工作曾得到北京航空材料研究所于德昌同志在试件制作中和中国科学院力学研究所王振江同志在试验中给予的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., Theory of Elastic Stability 2nd ed., McGraw-Hill Book Co., N.Y. 1961.
- [2] Jones, R.M., Mechanics of Composite Materials., 1975.
- [3] Tsai, S.W., 复合材料力学导论(中译本), 三机部科学技术情报研究所, 1981.
- [4] Holand, I. and Bell, K., 有限单元法在应力分析中的应用(中译本), 科学出版社, 1978.
- [5] Ashton J.E. and Love, T.S., "Experimental Study of the Stability of Composite Plates", J. of Composite Materials, 1969, p.230.
- [6] Jones, R.M., Buckling of Circular Cylindrical Shells with Multiple Orthotropic Layers and Eccentric Stiffeners", AIAA Journal, Dec. 1968, P.2301.
- [7] Przemieniecki J.S., Finite Element Structural Analysis of Local Instability, AIAA Journal, 11 (1973), No.1.
- [8] Zienkiewicz, O.C. and Cheung, Y.K., 结构和连续力学中的有限单元法(中译本), 国防工业出版社, 1975.

THE STUDY OF THE UNIAXIAL COMPRESSIVE STABILITY OF THE CARBON FIBER COMPOSITE STIFFENED PLATES

Qin Renzhi* Shen Sitang Wang Zhenming**

Abstract

By means of the finite element methods, the numerical solutions of the integral and the local critical buckling stresses of the stiffened plates of carbon fiber composite are found. Three test specimens of longitudinal stiffened plates made from carbon fiber composite are subjected to uniaxial compressive stability test under the condition of simple supported on the sides, the critical buckling stresses thus determined show in better agreement with the numerical results calculated from finite-element methods.

* Present Adress: Nanjing Institute of Aeronautics and Astronautics

** Present Adress: Institute of Mechanics, Academy of Sciences, China,