

## 复合材料加筋板壳的承载能力问题

王 震 鸣

(中国科学院力学研究所)

### 摘 要

本文讨论了复合材料加筋板壳承载能力问题的复杂性,给出了计算复合材料加筋板壳承载能力的要点,讨论了复合材料加筋板壳在面板局部失稳以后的有效刚度和有效宽度问题,指出了提高加筋板壳承载能力的主要途径。

### 前 言

复合材料加筋板壳是一种结构效能很高的结构形式,它的承载能力问题是一个十分重要而沒有充分研究过的问题。

复合材料薄壁轻结构可具有多种形式。夹层结构尤其是蜂窝夹层结构具有很高的比弯曲刚度和平整光滑的表面,因而具有良好的空气动力性能,是一种结构效能最高,比较理想的结构形式。由于制造工艺比较复杂、价格较高、产品质量较难检验因而可靠性较差等原因,在使用上受到了一定的限制。多层板壳(迭层板壳)在单独使用时,除承受薄膜拉力和作为受内压的容器外,由于抗弯刚度较低,其结构效能总比不上夹层板壳和加筋板壳,但可作为夹层板壳和加筋板壳的面板而发挥其效能。加筋板壳以少量筋条材料为代价,可使加筋板壳的弯曲刚度大幅度提高,设计安排比较灵活,适应性强,制造工艺比较简单,造价也较低,产品容易检验,因而比较可靠等,是一种结构效能很高(一般仅次于夹层板壳)的结构形式,得到了广泛的应用。具有肋条状夹心和波纹板夹心的夹层板壳和以夹层板壳作为面板的加筋板壳,在不同程度上,兼有蜂窝夹层板壳和加筋板壳的优缺点,在分析计算时也兼有两种结构的特点。复合材料的组合梁、框架和拱等,也是常用的一维结构形式,有关原则同样适用。

本文1983年10月收到。

~ 40 ~

本文在文献[1]~[3]的基础上,综合并进一步探讨了复合材料加筋板壳承载能力问题的若干重要方面,偏重于探讨由于屈曲而丧失承载能力的问题,给出了一些具有较大实用价值的原则意见。

## 一 复合材料加筋板壳承载能力问题复杂性的分析

复合材料结构的承载能力是指这种结构在承受载荷以后,由于应力过大发生破坏或变形过大丧失使用效能时的载荷。

复合材料由于纤维和基体的多样性,材料性能上的各向异性,微观构造上的不均匀性,宏观构造上的呈层性,纤维的脆性和基体的粘弹性,铺层设计的多样性,工艺过程的复杂性,残余应力和随机缺陷的存在,层间的剪切强度和拉伸强度很低等,使得强度问题变得非常复杂。加上复合材料结构形式的多样性,所受载荷和使用环境的复杂性,使得复合材料结构的承载能力问题变得非常复杂。

复合材料加筋板壳的承载能力问题也很复杂,在承受压缩、弯曲、剪切及其联合作用时,往往产生弹性的、非线性弹性的、粘弹性和塑性的失稳问题。在突加载荷下将产生动力失稳问题。在高温环境和长期载荷的作用下,将产生蠕变屈曲问题。在不均匀温度场中,要产生热应力问题。在高速度变形时,容易发生开裂、分层和脆性断裂问题。加筋板壳在关键部位的局部屈曲和强度破坏、尤其是加筋板壳的整体屈曲,将导致丧失承载能力,甚至突然造成灾难性的破坏。但加筋板壳的局部屈曲,并不一定意味着丧失承载能力。加筋板壳尤其是密加筋板壳在面板局部屈曲后,有时并不影响使用效能,也不丧失承载能力,有时还可承受面板开始屈曲时载荷的数倍载荷。飞机的机翼和尾翼的面板,不是由于强度原因,而是由于空气动力性能的要求,才不允许面板局部失稳的。而机身的面板,只要不影响强度和油箱密封的要求,是允许有某种程度局部失稳的。

复合材料加筋板壳丧失承载能力的形式和过程是多种多样的。(1) 在加载过程中,复合材料的面板或筋条或连接部位,由于设计得不够均衡不够合理或遇到意外的载荷或环境,而首先发生强度破坏(如开裂、脱胶、铆钉拔出或局部屈服等)或变形过大丧失使用效能,导致丧失承载能力。(2) 先产生面板或筋条的局部失稳,由于应力和刚度的重新分布和变化,导致加筋板壳的整体屈曲(弹性屈曲与塑性屈曲等)或强度破坏,而丧失承载能力。(3) 局部屈曲与整体屈曲同时发生,对于有初始缺陷的加筋板壳,由于这两种屈曲波形间的非线性相互作用,使结构的整体和局部刚度急剧下降,导致加筋板壳的屈曲载荷从完善结构时的临界载荷大幅度下降(下降20~50%或更多),突然在相当低的载荷(也是相对于完善结构的局部屈曲载荷和整体屈曲载荷而言)时丧失承载能力。(4) 整体屈曲后就立即丧失承载能力。(5) 在有初始缺陷的情况下,整体屈曲的变形有一个发展过程,在此过程中,由于筋条的弯曲和扭转变形,触发和加速面板或(和)筋条的局部屈曲,导致结构刚度的显著下降,迅速丧失承载能力。(6) 在整体屈曲的过程中,导致强度破坏而丧失承载能力。

加筋板壳的承载能力问题,又和下列因素有关。(1) 结构形式:是加筋平板还是加筋曲板和加筋壳。单向受压平板和柱在屈曲后的超临界变形阶段,载荷和轴向缩短量(或侧向挠度)之间的关系,对于有初始缺陷的情况,是上升的(非下降的)或者说是稳态(*Stable*)的,而对于加筋平板和组合梁,屈曲后的载荷和轴向缩短量(或侧向挠度)之间在多数情况

下是下降的或者说是非稳态 (*unstable*) 的。加筋平板的整体屈曲, 在一般情况下意味着丧失承载能力。加筋曲板的面板, 除所对的中心角极小与平板相近的情况和参数

$z \left( = \frac{L^2}{Rt} \sqrt{1-\nu^2} \right)$  小于一定数值 (此数随受载情况和边界条件等因素的不同而变化) 的情

况是稳态的外, 其他情况屈曲后的性能是非稳态的(下降的)。加筋曲板和加筋壳, 由于整体屈曲波形和局部屈曲波形之间的耦合影响要比加筋平板更为严重和强烈, 整体屈曲后就迅速丧失承载能力。从有初始缺陷的实际结构的承载能力和完善结构(无初挠度、无残余应力、无壁厚的不均匀等)的临界载荷的比值来看, 加筋曲板和加筋壳的比值要比加筋平板的比值低。曲率的因素一般可明显提高曲板和壳体的临界载荷, 与此同时, 对缺陷的敏感性也增大了, 其超临界特性也要比平板差得多。加筋曲板的面板在局部屈曲后的初始超临界状态, 除初始缺陷相当大的情况外, 各种不同程度的较小缺陷, 可使有效刚度下降为零或负值, 此时面板就不能承载, 反而可能突然产生较大的侧向变形, 引起动力因素, 造成破坏。由于壳体结构的形式是多种多样的, 如圆柱壳、球壳和廻转抛物面壳等, 加筋壳的形式也可以是多种多样的, 只有加筋平板、组合梁(或柱)和加筋圆柱曲板(和壳)的承载能力问题研究得较多, 即使对于各向同性材料的上述加筋板壳, 也不能说已研究得很充分了。对于复合材料的加筋板壳, 研究得还相当少。(2) 加筋形式: 是单向还是双向加筋, 是密加筋(整体屈曲波形的半波长要大于 2~3 个筋条间距)还是稀加筋, 是闭口筋(有较大的扭转刚度)还是开口筋, 是强筋(有较大的拉伸和弯曲刚度)还是弱筋, 是等间距加筋还是变间距加筋, 是同一尺寸的筋条还是不同尺寸的筋条, 是没有端头的闭合筋(如圆柱壳的环筋)还是有端头的非闭合筋(因端部效应可引起脱胶和开裂等), 是外加筋还是内加筋(对于曲板和壳, 外或内加筋所引起的耦合刚度为正或负, 可提高或降低屈曲载荷, 对缺陷的敏感性增大或降低)等。筋条的形式、方向、大小和间距等, 都可影响筋条自身的强度和局部失稳问题, 又可影响面板的强度和局部失稳问题, 最终影响加筋板壳的承载能力。(3) 受载情况: 是受轴压、侧压、剪切还是各种载荷的联合。对于同一结构, 所受载荷类别的不同, 其屈曲及屈曲以后的特性就不相同, 对于初始缺陷的敏感性亦不相同(例如轴压圆柱壳对缺陷的敏感性很大, 屈曲载荷的理论值和实验值相差很大, 而受扭转的圆柱壳对缺陷的敏感性不大, 屈曲载荷的理论值也和实验值相近), 当然对载荷能力的影响也不相同。(4) 支承条件: 是简支边、自由边、弹性支承还是固支边。支承条件对屈曲载荷的影响是显著的, 对面板局部屈曲后的性能有影响但不很显著, 对于强度的影响也不那么显著。但对加筋板壳承载能力的影响还是相当大的, 设计时可加以利用, 采用有利于提高承载能力的支承条件。(5) 环境和加载速率: 高温、低温、湿度和辐射等环境因素, 加载速率的快慢和载荷持续时间的长短, 将以复杂的机制影响复合材料加筋板壳的变形、裂纹扩展和破坏等。(6) 连接方式: 筋条和面板的连接是胶接还是机械连接(铆接和螺接)。胶接要比机械连接轻些, 但在端部常常由于边界效应产生的剪切应力和剥离应力造成破坏, 此外, 胶接部位对于冲击载荷往往出现脆性破坏。机械连接适用于传递集中力, 常用于复合材料加筋板壳的应力较大处, 以弥补胶接强度之不足, 虽重一些, 但比较可靠。复合材料加筋板壳的实验表明, 往往由于面板和筋条间的胶接强度不够, 在整体失稳以前发生开裂等早期破坏。

由此可见, 复合材料加筋板壳的承载能力问题是非常复杂的。

## 二 复合材料加筋板壳承载能力的設計計算要点

加筋板壳,特别是稀加筋曲板和壳,在面板局部屈曲后承载能力的严格计算,虽具有重大的理论价值和实用价值,由于问题非常复杂和困难,目前尚未解决。采用各种简化假定,可得精度不同的近似计算方法,由和实验符合的程度和计算工作量的大小等评定其实用价值。下面着重讨论加筋矩形平板和圆柱曲板承载能力的计算要点。其中涉及到的一些原则,对于别的形式的加筋板壳,也可适用。

1. 要确定所设计研究的加筋板壳,从结构的功能来看,主要是刚度要求还是强度要求。所用复合材料的种类和加筋板壳的形式是否适应上述要求。结构承载能力的丧失,主要是刚度不够造成变形过大、固有频率太低和屈曲载荷不大呢?还是强度不足产生各种形式的破坏。当然,刚度是控制因素的结构,也可能由于强度不足产生多种形式的破坏;强度是控制因素的结构,也可能由于屈曲(主要是局部的弹性屈曲或塑性屈曲)。一般说来,是受强度控制还是受刚度控制,大体上总是能够区分的,可通过计算来满足设计要求,并使结构设计优化。但在复杂的环境、载荷和结构形式等的情况下,复合材料的加筋板壳有可能出现难于完全预料的破坏形式,因此,对于确定承载能力,实验和原型试验是必不可少的,可以发现产生早期破坏的薄弱环节,以改进工艺和设计,提高承载能力。在一般情况下,大量的还应当是分析计算工作。

2. 在计算复合材料加筋板壳的承载能力时,会遇到与计算屈曲载荷、变形和固有振动频率有关的有效刚度问题,和计算应力有关的有效宽度问题,这将在下一节中讨论。在计算单面加筋板壳的应力时,往往要涉及加筋板壳的折合刚度(拉伸、耦合和弯曲刚度)。当面板和筋条局部屈曲时,面板和筋条的刚度要下降,这时应力在分布上趋于更不均匀,局部应力要增大,在计算应力时涉及到有效刚度问题。在筋条和面板局部屈曲时,由于应力分布的不均匀,应力大的部位可进入非线性弹性或塑性状态,而非线性弹性或弹塑性屈曲载荷是明显低于弹性屈曲载荷的。要判明是否进入非弹性或塑性状态,需要计算应力,用到有效宽度的概念。

3. 加筋板壳在承载以后往往产生侧向挠度,筋条间的面板由筋条来支承和传递载荷,面板比筋条的弯曲刚度小得多,面板的挠度和厚度之比,一般要比筋条的挠度和高度之比大得多,因此常出现下列情况,即面板必须按大挠度问题处理用非线性理论求解,而筋条可按小挠度问题处理用线性理论求解。要严格求解上述问题是很困难的,是很费时间和很费钱的。在工程计算上,希望计算迅速,能有一定的精度就行。因此常引入有效刚度和有效宽度的概念,将面板(和筋条)的刚度和宽度(或筋条的有关尺寸)进行折减,在计算与刚度有关的稳定、变形、振动以至于应力问题时,用有效刚度取代原来的刚度,在计算应力问题时,用有效宽度取代原来的宽度,将问题近似地化为线性问题来处理,往往可算得和实验符合得比较良好的结果,供工程设计之用。

4. 采用非线性理论或用实验的方法在确定面板和筋条的有效刚度和有效宽度后,对于密加筋板壳可采用不均匀结构均匀化的方法,折合为各向异性板壳来处理,对于稀加筋板壳,通常用能量法求解。对于面板和筋条要用有效刚度和有效宽度取代原来的刚度和宽度。对于稀加筋板壳,采用将筋条刚度平均在筋条间距上的办法,算得的临界载荷要比用能量法求得的高,筋条越密越接近。用有效刚度的概念后,两者在计算值上的差别依然存在,但和实验

值相比,都会有明显的改善。对于计算应力问题,以有效宽度取代原宽度,计算结果也明显改善。

5. 加筋圆柱曲板和平板在轴压、侧压和剪切载荷下,面板局部屈曲后或局部与整体屈曲相近时,按有效刚度算得的整体屈曲载荷(失稳时的承载能力)和有效刚度的大小有关,而有效刚度又与丧失承载能力时面板和筋条的应变有关,它们的应变又与有效刚度所取的数值有关。只有进行若干次试算,才能使计算屈曲载荷时所取的有效刚度和算得屈曲应变后由图表(例如文献[1]图1)查得的有效刚度相一致。关于用有效宽度计算应力问题,也会遇到类似的情况。

### 三 复合材料加筋板壳的有效刚度和有效宽度

#### 1. 有效刚度问题

关于复合材料加筋板壳面板的有效刚度问题,也是一个相当复杂的问题。在文献[1]第三节中已对正交各向异性板壳的情况,作过详细的探讨。在文献[1]中所引的文献,仅对轴压下的平板在加载边简支,非加载边简支、固支和自由边的情况作过有效刚度的计算和实验,所得结果是重要的,但给出的仅是受压方向的有效刚度。复合材料加筋板壳面板的情况要复杂得多。一般说来,各个方向的有效刚度是不相同的,而计算各个方向不相同的有效刚度本身,就是一个极其复杂难于解决的问题。因此在文献[1]中采用各方向的有效刚度相等的近似假定,只要处理得当,在计算复合材料加筋板壳与整体屈曲有关的承载能力时,仍可得到良好的结果。在确定复合材料加筋板壳的面板受轴压、侧压和剪切载荷时的有效刚度系

(它是有效刚度和原刚度的比值) $\alpha$ 时,在文献[1]的(3.1)~(3.3)式给出的数值,只能说是目前所能给出的一种较好的近似值。在任何情况下, $\alpha$ 都应满足小于等于1的要求( $\alpha \leq 1$ )。复合材料加筋板壳面板的有效刚度系数 $\alpha$ ,要涉及加载边和非加载边的支承条件,面板可否在面内自由弯曲,屈曲波形的长宽比,原始缺陷的大小,有无联合加载,曲率参数,各向异性性和耦合效应等的影响,(这些影响在文献[1]中又按情况给出了具体的数值规定,在其他因素这一项中,又给出了 $\pm 12\%$ 的伸缩余地,对于尚未考虑或考虑得不够充分的因素可给予小幅度的调整),又要在一定程度上考虑局部屈曲与整体屈曲波形间的相互作用使屈曲载荷显著下降等因素,因此在原则上和定性上是正确的合理的,在定量上由于因素如此复杂,给出的只是目前认为比较正确比较合理的近似值,可以通过实验和工程实践的检验,使之不断完善。在文献[1]的图1中,几乎没有考虑整体缺陷对加筋板尤其是加筋壳屈曲的影响,所以在 $\alpha \approx 1$ 时往往出现实验值和计算值相差很大,远不如 $\alpha$ 明显小于1时实验值和计算值的接近程度。因为在确定筋条间面板的局部刚度时,是难于把整体缺陷这个复杂因素包含进去的。此外,在实验时加载的不均匀性和加载偏心可明显地影响有效刚度和承载能力,这个问题应当在实验时引起足够的重视,只有在有足够详细的记录时,才能在计算中加以考虑。

#### 2. 有效宽度问题

有效宽度与加筋板壳面板的局部屈曲变形或受横向载荷后的侧向挠度有关。四边简支的各向同性平板有效宽度问题的研究,从 $Ka' rma'n$ 开始,已有半个世纪的历史。现在常用的还是经验公式。在文献[3]图8的说明中,给出了三个公式: $Ka' rma'n$ 公式 $\frac{b_e}{b} = \sqrt{\frac{\epsilon_c r}{\epsilon}}$ ,

Koiter 公式  $\frac{b_e}{b} = 0.785 \left( \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{3}}$ , 和下面要引用的 *AISI* 公式。其中  $b_e$  为计算应力问题时的有效宽度,  $b$  为原来的宽度。关于正交各向异性平板和复合材料平板的有效宽度问题, 研究得相当少, 在 [3][9] 等文献中给出了四边简支正交各向异性板有效宽度的算式。在文献 [3] 中认为, 对于无穷长平板的情况, 用各向同性平板的有效宽度来取代正交各向异性平板的有效宽度, 数值相近、简单又可满足工程要求。在文献 [3] 中 (15) 式给出的有效宽度算式, 采用本文的符号可以化为

$$\frac{b_e}{b} = \alpha + (1 - \alpha) \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

此式仅适用于  $\varepsilon \geq \varepsilon_{cr}$  的情况。式中的  $\alpha$  为面板的有效刚度,  $\varepsilon$  和  $\varepsilon_{cr}$  为有关的应变和临界应变。当  $\varepsilon = \varepsilon_{cr}$  时, 可得  $\frac{b_e}{b} = 1$ ; 当  $\varepsilon < \varepsilon_{cr}$  时, 应取  $\frac{b_e}{b} = 1$ 。

在文献 [3] 图 8 中给出的 *AISI* 公式为

$$\frac{b_e}{b} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon}} \left( 1 - 0.22 \sqrt{\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon}} \right) \quad (3.2)$$

是具有一定精度而且偏于安全的公式, 用于钢结构。

为了考虑到复合材料加筋板壳面板在支承条件、曲率参数、屈曲波形的长宽比、缺陷大小、联合加载和各向异性等复杂情况, 作者认为, 在满足  $\frac{b_e}{b} \geq \alpha$  的前提下, 可采用公式

(3.1) (3.2) 式算得的那个较小的  $\frac{b_e}{b}$  值。这样可以通过  $\alpha$  照顾到许多因素, 通过采用

(3.2) 式照顾到  $\frac{b_e}{b} \approx 1$  时  $\frac{b_e}{b}$  能有所下降而偏于安全。如果发生算得的  $\frac{b_e}{b}$  小于  $\alpha$  的情况, 应取  $\frac{b_e}{b} = \alpha$ 。这样较为合适。(3.1) 式中的  $\alpha$  值, 由文献 [1] 给出的方法确定。

#### 四 提高复合材料加筋板壳承载能力的途径

1. 由加筋板壳的结构功能对刚度和强度方面的要求, 选用最合适的复合材料, 或采用混杂 (*hybrid*) 复合材料或多种复合材料, 以满足加筋板壳的整体和局部对刚度和强度所提出的要求。把性能好的材料用于提高刚度或强度最有效的关键部位上, 采用从多方面的因素来看都比较合理的铺层设计, 可有效地提高承载能力。

2. 复合材料加筋板壳由于屈曲丧失承载能力时, 要涉及到局部失稳和整体失稳问题, 对于有初始缺陷的加筋板壳, 这两种屈曲波形之间存在着耦合影响。只有对理想的没有初始缺陷的加筋板壳, 才能采用局部失稳与整体失稳临界载荷相等作为最佳设计的原则。对于真实结构, 因为多少总存在着初始缺陷, 当局部失稳与整体失稳相近时, 这两种屈曲波形之间存在着严重的非线性的相互影响, 使屈曲载荷大幅度下降, 因而一般说来不是最佳的设计原则。因此提高加工精度, 尽量减小初始缺陷, 是提高加筋板壳承载能力的有效途径。

3. 在确定了加筋板壳的结构形式以后,在一定重量的前提下,采用较厚的面板可提高面板局部失稳的临界载荷,这时由于用于筋条的材料较少,整体失稳的临界载荷当然就要降低,可能发生先整体失稳而后丧失承载能力,或在整体失稳后在继续加载的过程中到发生局部失稳时才丧失承载能力。一种极端情况是面板几乎用去了全部材料,用于筋条的材料少得接近于零,这就变为接近于单层板壳和迭层板壳的情况,它们在承载能力方面是远远比不上加筋板壳的,因此不能采用面板过厚筋条过弱的设计方案。当面板的局部屈曲载荷为整体屈曲载荷的1.6~2.2倍时,面板可保持较高的有效刚度( $\alpha \approx 0.8 \sim 1.0$ ),筋条在提高加筋板壳的折合刚度方面,可起到重要和良好的作用。这是一种提高加筋板壳承载能力的有效途径,特别是对于面板的平整度和光滑度有一定要求的情况是如此。

4. 对于加筋板壳面板的局部屈曲和明显挠度不影响使用效能的结构,在重量不变的前提下,采用增加筋条弯曲刚度的设计方案,增加筋条材料的使用比例,增大筋条的高度和有利于增惯性矩的剖面形式,可大大提高整体失稳的临界载荷。由文献[1]图1可以看到面板局部屈曲后有效刚度系数 $\alpha$ 变化的情况,当 $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cr}} = 2 \sim 4$ 时的 $\alpha$ 值和 $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cr}} = 1$ 时的 $\alpha$ 值相比,降低得并不多,而前者面板的厚度要比后者薄得多。对于前者,在加筋板壳重量一定的情况下,面板薄了就可以有更多的材料用于筋条,提高了整体的抗弯刚度和屈曲载荷,因而具有较高的承载能力。在面板允许有一定程度的局部失稳和局部变形的情况下,适当地而不是过分地减薄面板的厚度,是在具有同等重量的条件下提高承载能力的途径,或者是在具有同等承载能力的条件下减轻结构重量的有效途径。

5. 在筋条重量不变的条件下,采用高而稀的筋条,有利于提高整体的折合弯曲刚度和屈曲载荷,但稀加筋增大了面板的支承跨度,使局部失稳的临界载荷明显下降;密而矮的筋条可提高局部失稳的临界载荷,由于减小了筋条高度,使加筋板壳的折合弯曲刚度和整体屈曲的临界载荷减小,而降低承载能力。采用大小不等的筋条,可以解决上述矛盾。安排少量高而强的筋条,以提高整体失稳的临界载荷,在强筋之间安排若干小而弱的筋条以提高面板的局部屈曲载荷,或者将筋条间的面板采用夹层结构的形式,以提高面板的弯曲刚度和局部屈曲载荷。这些设计思想均可明显提高承载能力或减轻结构重量。

6. 壳体在轴压和剪切载荷作用下屈曲时,可出现临界载荷相近的一系列屈曲波形,只有筋条(纵筋、横筋或双向加筋)足够的密,能排除对应于较低临界载荷的一系列屈曲波形,使之只发生相应于具有高得多的临界载荷的屈曲波形,才能显著发挥加筋效果,否则就达不到明显的效果<sup>[2]</sup>。以圆柱壳为例讨论筋条的安排情况,轴压时以加纵筋为好,侧压时以加环筋为好,扭转时以加 $\pm 45^\circ$ 的斜筋为好。一般说来,要大幅度提高承载能力,双向加筋的效果比单向加筋好。要求加筋壳在面板局部屈曲后还保持承载能力,这只有将筋条加密和加强到如此程度,使筋条间的壳段(对应于仅有环筋的情况)或筋条间的曲板(对应于仅有纵筋和具有双向加筋的情况)不但具有较高的屈曲载荷(要考虑初始缺陷的影响),而且排除菱形塌陷和深凹的屈曲波形,还有一定的有效刚度才行。如果由筋条组成的骨架具有相当大的承载能力,当然也行,不过此时已失去加筋壳的典型意义,也不是最佳的合理的设计。

7. 闭口筋(如帽形筋等)与开口薄壁筋条相比,具有较大的扭转刚度,可明显提高加筋板壳的整体屈曲载荷和筋条间面板的局部屈曲载荷,并使面板屈曲后的有效刚度有所提高,因而是有利的可取的。但从强度观点来考察极限承载能力,则闭合筋的效果并不突出。此

外, 加筋板壳的边界条件, 对承载能力亦有较大影响, 增加边界约束, 可提高承载能力。对于外加筋板(指曲板)壳, 在大多数情况下, 其临界载荷要大于内加筋曲板和壳, 但对缺陷的敏感性亦增大了, 对于初始缺陷较小的结构, 采用外加筋可得较大的承载能力。

8. 筋条的局部失稳(包括筋条的侧向失稳), 可使筋条的弯曲刚度大幅度下降(下降到局部失稳前的 15~20%左右<sup>[2]</sup>, 视筋条的形式而定), 因而使加筋板壳在相当低的载荷时在沒有明显预兆的情况突然丧失承载能力, 这是很不利的很危险的也是不合理的, 应力求避免。文献[1]和本文不讨论这种结构承载能力的计算问题。因上述原因, 宜适当减薄面板以加强筋条, 采用不易发生局部失稳的闭合筋形式或夹层结构筋条形式或对开口薄壁筋条以某些方式给予加强, 在生产和使用过程中保护筋条不受磕碰(引起初始挠度和损伤)等就有重要的意义。

9. 筋条和面板所组成的加筋板壳的整体性, 是由筋条和面板之间的连接来保证的。已经说过, 在平板和曲板的端部, 筋条和面板的连接处, 往往发生很大的剪切应力和层间剥离应力, 在静载特别是冲击载荷和循环应力的作用下, 会引起开裂现象, 导致结构发生早期破坏, 因此采用胶接加机械连接或单纯采用机械连接的方案, 对于复合材料加筋板壳, 有时反而是有利的可取的, 因为保证了结构的整体性可提高加筋板壳的承载能力。当然, 采用机械连接要在面板和筋条上打孔, 会引起应力集中和疲劳破坏等问题, 亦应加以探讨。使用得当就能利多弊少。

10. 复合材料加筋板壳的承载能力问题, 是一个非常重要十分复杂的问题, 目前还研究得很不充分, 需要进行更广泛更深入的理论研究和实验研究, 才能得到更明确更具体的解决, 使复合材料加筋板壳结构比现在使用的金属结构减轻50%以上。复合材料加筋板壳的潜力如果能得到充分的发挥, 将带来极大的效益。

## 参 考 文 献

- [1] 王震鸣, 梅海, 金属和复合材料加筋板壳承载能力的计算方法, (已送力学学报审查, 1983.8)
- [2] 王震鸣, 李国琛, 板壳结构的超临界状态和承载能力的综述, 《加筋圆柱曲板和圆柱壳》, 第六章, 科学出版社(1983)。
- [3] Rhodes, J. and Marshall, I. H., On the use of effective width concept for composites, composite structures, (ed, Marshall, I.H.), (1981) 335—351.
- [4] Agarwal, B.L. and Sobel, L.H. Weight comparisons of optimized stiffened; unstiffened, and sandwich cylindrical shells, J. Aircraft, 14, 10 (1977) 1000—1008.
- [5] Agarwal, B. L., Postbuckling behavior of composite—stiffened—curved panels Loaded in compression, Exp. Mech., 22, 6 (1982) 231—236.
- [6] Weaver I, G. G. and Vinson, J.R., Minimum—mass designs of stiffened graphite/Polymide compression panels, Modern development in composite materials



- and structures, (ed. Vinson, J. R.) ; (1979) 215—233.
- [7] Dickson, J.N. and Biggeis, S.B. and Wang, J. T. S., A preliminary design procedure for composite panels with open—section stiffeners Loaded in the post—buckling range, Advances in composite materials, (1980) 812—825.
- [8] Dickson, J.N., Cole, R.T. and Wang J.T.S., Design of stiffened composite panels in the Post—buckling range, Fibrous composites in structural design, (1978) 313—327.
- [9] Upadhy, A.R. and Loughlan, J., The effect of mode interaction in orthotropic fibre reinforced composite Plain channel section columns, composite structures (ed Marshall, I.H) , (1981) 366—382.
- [10] Chandra, R. and Raju, B, B., Postbuckling analysis of rectangular orthotropic plates, Int. J. Mech. Sci., 15, (1973) 81—97.
- [11] Banks, W.M. and Rhodes, J., The postbuckling behavior of composite box sections, composite structures, (ed. Marshall, I.H.) (1981) 402—414.
- [12] Rhodes, J.E., Postbuckling and membrane structural capability of composite shell structures, Advances in composite materials, (1980) 1707—1720.
- [13] Samuelson, L.—A. et. al., Stability and ultimate strength of carbon fiber reinforced plastic panels, Advances in composite materials, (1980), 327—341.
- [14] Williams, J.G. et. al., Recent developments in the design, testing and impact—damage tolerance of stiffened composite panels, Fibrous composites in structural design, (1978) 259—291.

### 学术活动简讯 (三)

#### 第一届复合材料力学学术会议在上海举行

由中国力学学会复合材料力学专业组召开的我国第一届复合材料力学学术论文报告、讨论会,于1984年4月18日至21日,在上海交大举行。来自国内的37个单位95名代表出席了这次会议。

会议共收到论文64篇,在会议上报告并讨论了52篇。其中包括:板壳分析11篇、有限元计算3篇、设计与优化7篇、强度理论10篇、断裂损伤与疲劳8篇,试验研究10篇、连接4篇、非线性分析6篇、其它5篇。这次会议论文所涉及的范围较广、研究问题的深度有所提高。看来今后应加强试验和应用方面的研究。

(刘方龙)