http：//myfj. cnjournals. com　myfj_sadri@comac. cc　(021)20866796

DOI：10. 19416/j. cnki. 1674 - 9804. 2021. 04. 008

金属加筋壁板蒙皮有效宽度分析方法

宋子玲 *

(上海飞机设计研究院，上海 201210)

摘　要：民用飞机机身、机翼的壁板、气密框以及翼梁结构为典型的壁板加筋结构，在承受压缩载荷时需考虑成由蒙皮与筋条组成的复合剖面共同承载，其通常为中长柱，工程分析时常取 30 倍的蒙皮厚度作为蒙皮有效宽度。取 30 倍的蒙皮厚度作为蒙皮有效宽度存在着一定的保守性，介绍了 Von Karman 迭代分析方法、有限元分析方法及常用的工程分析方法。在加筋壁板结构的轴压承载能力计算中，蒙皮有效宽度的确定是较为关键的设计因素，对飞机机身、机翼结构效率的提高和重量控制至关重要。随着加工能力的提升，虽然部分壁板结构由组合式逐渐过渡到了整体机加形式，但所述方法仍有一定的借鉴意义，对目前国内外常用的金属加筋壁板有效宽度的工程分析方法进行了研究，并结合有限元分析对工程分析方法进行了验证。

关键词：加筋壁板；压缩载荷；蒙皮有效宽度；有限元

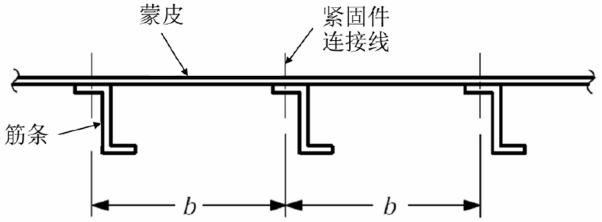
中图分类号：V214. 4；V215. 1　　**文献标识码**：A　　**OSID**：

0　引言

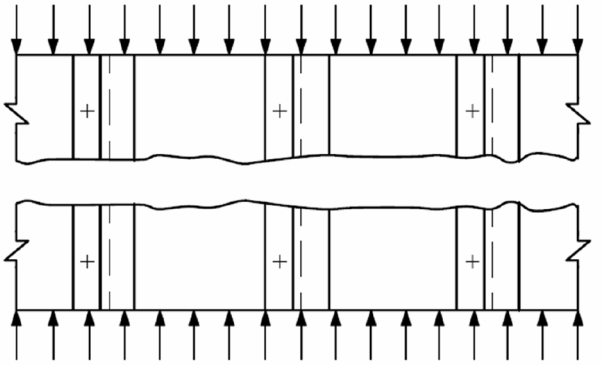
航空器上的主要结构单元，如机身、机翼，是由蒙皮加筋结构组合(筋条可以是通过紧固件与蒙皮相连，也可以是整体机加形成)而成，这种蒙皮加筋结构通常被称作壁板结构，典型的由“Z”型筋条与蒙皮组合的壁板结构如图 1 所示。

目前，国内外对加筋壁板结构做了一系列的探索和研究，主要集中在有限元数值分析方法和工程理论计算结合试验进行对比研究。

樊建超[1]提出了以体积等效来确定有蒙皮宽度的方法，介绍了自然网格建模时蒙皮有效宽度的含义及作用，列举了一、二、三级凸台蒙皮有效宽度的计算公式。雷一鸣[2]研究了机身壁板压缩稳定性



(a)典型壁板结构



(b)加载示意图

图 1　典型壁板结构及加载示意

与蒙皮的有效宽度。认为承压压缩载荷的壁板结构蒙皮有效宽度均超过 30 倍蒙皮厚度，在工程分析中取 30t(t 为蒙皮厚度)是保守的；其次，加筋壁板结构的压缩承载能力主要由筋条的压损许用应力确定，对蒙皮厚度不明感。张国凡等[3]基于有限元与工程法相结合，利用蒙皮有效宽度刚度缩减的方法，采用线性迭代求解壁板结构的后屈曲问题，并表明采用该方法分析得到的破坏载荷与试验结果更为接近。吴存利等[4]对薄皮铆接 Z 型机身加筋壁板进

* **通信作者**. E-mail：songziling@comac. cc

引用格式：宋子玲. 金属加筋壁板蒙皮有效宽度分析方法[J]. 民用飞机设计与研究，2021(4)：48-52. SONG Z L. Analysis method of effective skin width of metallic stiffened panels[J]. Civil Aircraft Design and Research，2021(4)：48-52(in Chinese).

行了研究,使蒙皮有效宽度计算误差相较于试验值控制在 10% 以内。雷一鸣[5]对大型客机铝锂合金机身壁板压缩稳定性进行了试验研究,验证了传统工程方法对铝锂合金壁板结构的偏差程度和适用性。提出了一种新的基于 Johnson-Euler 公式的修正算法,可以将计算结果与试验值的偏差控制在 5% 左右。殷黎等[6]对隔框加筋结构压缩许用载荷进行了分析,表明约翰逊—欧拉算法更适用于该结构类型的压缩稳定性计算。刘存等[7]在提出加筋壁板弯曲承载能力等效法的基础上,结合壁板轴压试验研究了三种蒙皮有效宽度计算方法的准确度,验证了蒙皮长桁分离的计算方法吻合程度最高。

本文通过结合工程方法及有限元分析,研究了民用飞机加筋壁板结构在承受轴向压缩载荷下蒙皮有效宽度的计算方法,对工程应用具有重要的参考意义和价值。

1　蒙皮有效宽度的概念

板结构在承受面内一致的压缩载荷时,当工作载荷小于蒙皮的屈曲失稳载荷时,壁板结构内部平行于加载边的应力分布在蒙皮与筋条上一致,如图 2 所示。

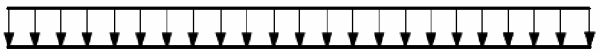


图 2　蒙皮未屈曲失稳时内部应力分布

壁板结构在承受面内一致的压缩载荷时,当工作载荷大于蒙皮的屈曲失稳载荷时,蒙皮上超出失稳临界应力的载荷逐步向筋条转移,壁板结构内部平行于加载边的应力分布在蒙皮与筋条上不一致,如图 3 所示。值得注意的是,在两个筋条之间的蒙皮上的应力水平与蒙皮的临界屈曲应力一致。

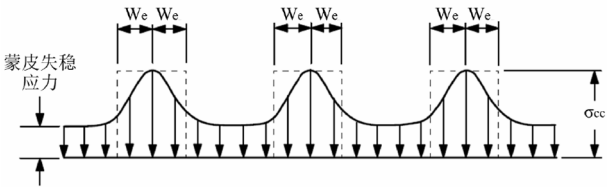


图 3　蒙皮屈曲失稳后内部应力分布

事实上,在有筋条加强的位置,蒙皮能够承受更多的载荷;在超出筋条加强的位置,在一定范围内,蒙皮依然能够承受同筋条一样多的载荷。如图 3 所示,蒙皮应力分布通常较难用解析法表征,工程上,为了方便简化计算,引入“蒙皮有效宽度”的概念来计算蒙皮的承载能力。

2　蒙皮有效宽度工程计算

2.1 Von Karman 方法

在使用 Von Karman 方法计算蒙皮有效宽度时,首先要得到壁板结构单元的压缩许用应力。壁板结构单元的压缩许用应力按欧拉约翰逊公式计算,如公式(1)所示[8-10]。

$$[\sigma_c] = \sigma_{cc} - \frac{\sigma_{cc}^2}{4\pi^2 E_c}\left(\frac{L'}{\rho}\right)^2 \tag{1}$$

式中:$[\sigma_c]$为壁板压缩许用应力,MPa;σ_{cc}为单独桁条的压损应力,MPa;E_c 为桁条材料压缩弹性模量,MPa;$L' = L/\sqrt{C}$ 为结构单元的有效长度,mm;L 为结构单元的长度,mm;C 为端部支持系数,无量纲;$\rho = \sqrt{I}/\sqrt{A}$为结构单元的回转半径,mm;A 为考虑有效蒙皮和长桁的组合剖面面积,mm^2;I 为考虑有效蒙皮和筋条的组合剖面的惯性矩,mm^4。

采用 Von Karman 方法计算的蒙皮有效宽度如公式(2)所示。

$$\begin{cases} b_w = b_r + 2.4t\sqrt{\dfrac{E}{[\sigma_c]}} & t \leqslant 2.54 \\ b_w = b_r + 6.032\,5\sqrt{\dfrac{E}{[\sigma_c]}} & 2.54 < t < 3.15 \\ b_w = b_r + 1.9t\sqrt{\dfrac{E}{[\sigma_c]}} & t \geqslant 3.15 \end{cases} \tag{2}$$

式中:b_w 为蒙皮有效宽度,mm;b_r 为长桁间钉排距,mm;t 为蒙皮厚度,mm;E 为蒙皮压缩弹性模量,MPa。

由于公式(1)、(2)中的$[\sigma_c]$是待求值,所以在求蒙皮有效宽度 b_w 时可采用迭代法,具体步骤如下:

1)先求出筋条的压损许用值 σ_{cc};

2)取迭代初始值$[\sigma_c] = \sigma_{cc}$;

3)按公式(2)计算 b_w;

4)根据得到的蒙皮有效宽度 b_w 计算筋条、蒙皮组合结构单元的面积 A 和惯性矩 I;

5)计算 L'/ρ;

6)按公式(1)计算$[\sigma_c]$。

将算得的$[\sigma_c]$重复步骤 3)到 6)运算,直到前

一次的$[\sigma_c]$与后一次算的$[\sigma_c]$相等，此时迭代收敛，可以得到真实的蒙皮有效宽度。

蒙皮有效宽度的限制条件为 $b_w < b_s$，其中 $b_s = 30t$（$30t$ 为工程上的简化，壁板结构受压时取 30 倍的蒙皮厚度作为蒙皮有效宽度），同时应满足 b_s 小于一个筋条间距。当 $b_w > b_s$ 时，直接取 $b_w = b_s$。

壁板受压面积为 $A_{cr} = b_w t + A_{st}$，其中 A_{st} 为筋条截面积（包括凸台面积）。

2.2 方法二

在图 1 所示的一个典型壁板结构单元中，若蒙皮内的应力分布如图 3 所示，可以通过等效一致的在蒙皮有效宽度 $2W_e$ 内筋条上的应力来代替。蒙皮有效宽度 $2W_e$ 可以通过公式（3）计算得到。

$$W_e = 0.85t\frac{E_{sk}}{E_{st}}\sqrt{\frac{E}{\sigma_{cc}}} \tag{3}$$

式中：W_e 为以紧固件连接位置为中心一边的蒙皮有效宽度，mm；t 为蒙皮厚度，mm；E_{sk} 为蒙皮在应变（σ_{cc}/E_{st}）下的割线模量，MPa；E_{st} 为长桁割线模量，MPa；E 为蒙皮压缩弹性模量，MPa；σ_{cc} 为筋条压缩许用应力，MPa。

当蒙皮与筋条的材料相同时，即 $E_{sk}/E_{st} = 1$，公式（3）中，蒙皮有效宽度由蒙皮的厚度、压缩弹性模量及筋条的压缩许用应力决定。筋条的压缩许用应力取筋条稳定性、压缩屈服应力、压损应力值中的小值。

在有较大的抗扭刚度的筋条与薄蒙皮（比如 $b/t \geqslant 110$）组合的壁板结构中，筋条对蒙皮的边界支持作用大于简支，有更多的蒙皮宽度可以用来承受压缩载荷，可有效提高蒙皮有效宽度，公式（3）中的系数 0.85 可以提高到 0.95。

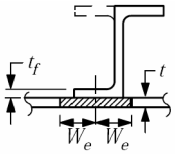
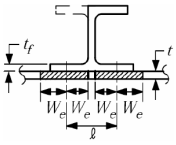
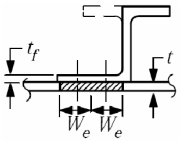
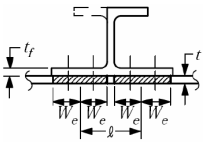
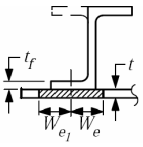
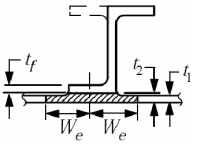
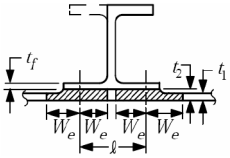
结构设计时还需要综合考虑使得筋条下的蒙皮在压缩载荷下不发生钉间屈曲失效。为了有效规避该种失效模式，蒙皮有效宽度可以通过公式（4）进行修正。

$$W_{e,\ red} = W_e\frac{\sigma_{ir}}{\sigma_{cc}}\frac{E_{st}}{E_{sk}} \tag{4}$$

式中：$W_{e,red}$ 为缩减的以紧固件连接位置为中心一边的蒙皮有效宽度，mm；σ_{ir} 为蒙皮钉间屈曲许用应力，MPa。

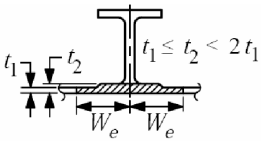
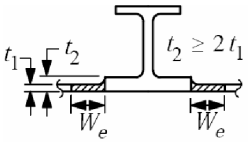
对于通过紧固件将筋条与蒙皮组合而成的壁板结构，常用的几种构型及其蒙皮有效宽度、蒙皮有效面积如表 1 所示。

表 1　通过紧固件组合的壁板结构的蒙皮有效宽度

连接形式	壁板构型	蒙皮有效宽度/面积
单排紧固件		$2W_e t$
双排紧固件		$\begin{cases} if\ l > 2W_e: 4W_e t \\ if\ l < 2W_e: (2W_e + l)t \end{cases}$
双排交错紧固件		$2W_e t$
四排交错紧固件		$\begin{cases} if\ l > 2W_e: 4W_e t \\ if\ l < 2W_e: (2W_e + l)t \end{cases}$
单排紧固件蒙皮单边自由		$(W_{e1} + W_e)t$ $W_{e1} = 0.73W_e$
单排紧固件蒙皮含凸台		$2W_e[(t_1 + t_2)/2]$
双排紧固件蒙皮含凸台		$\begin{cases} if\ l > 2W_e: \\ 4W_e[(t_1 + t_2)/2] \\ if\ l < 2W_e: \\ (2W_e + l)[(t_1 + t_2)/2] \end{cases}$

对于通过整体机加的壁板结构，常用的几种构型的蒙皮有效宽度、蒙皮有效面积如表 2 所示。

表 2　整体机加壁板结构的蒙皮有效宽度

连接形式	壁板构型	蒙皮有效宽度/面积
整体机加壁板		$2W_e[(t_1 + t_2)/2]$
整体机加壁板		$2W_e t_1$

3　蒙皮有效宽度有限元分析

对于较复杂结构可以通过有限元分析来确定其蒙皮有效宽度。

下面通过一种典型壁板结构来分析有限元分析方法在确定蒙皮有效宽度中的应用。

典型壁板结构示意图如图 4 所示，长桁及蒙皮材料为 7075-T6 铝合金，长桁通过两排紧固件与蒙皮相连。

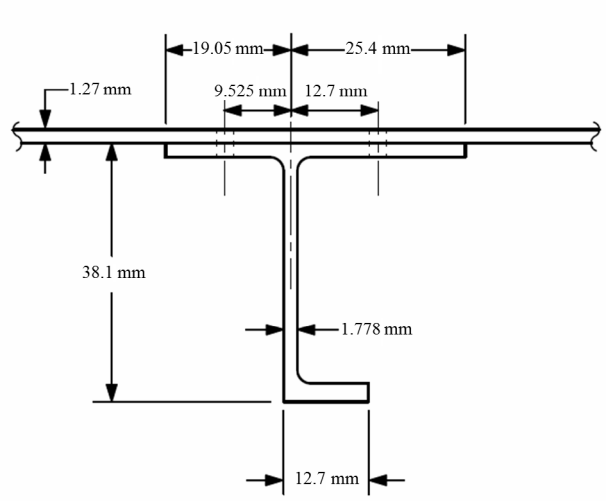
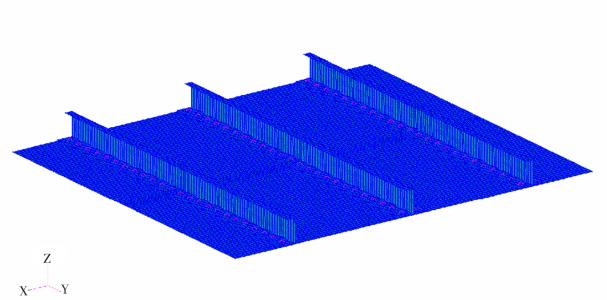


图 4　典型壁板结构示意

采用 PATRAN 建立的有限元模型如图 5 ~ 图 6 所示。



(a)有限元模型视图 1

(b)有限元模型视图 2

图 5　有限元模型

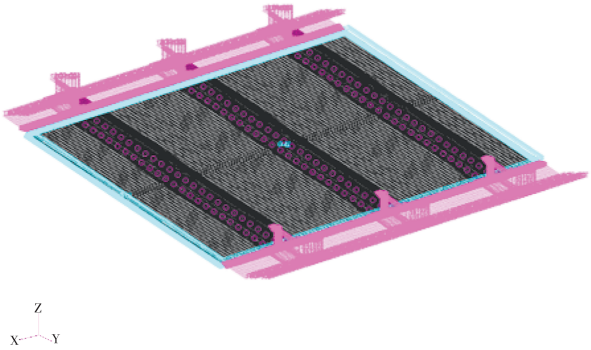


图 6　有限元模型边界条件及加载

对建立的有限元模型采用 NASTRAN 10^5 求解器进行求解，得到其一阶模态特征值，如图 7 所示。可以看到，在压缩载荷作用下，相邻长桁间的蒙皮会首先发生屈曲失稳。

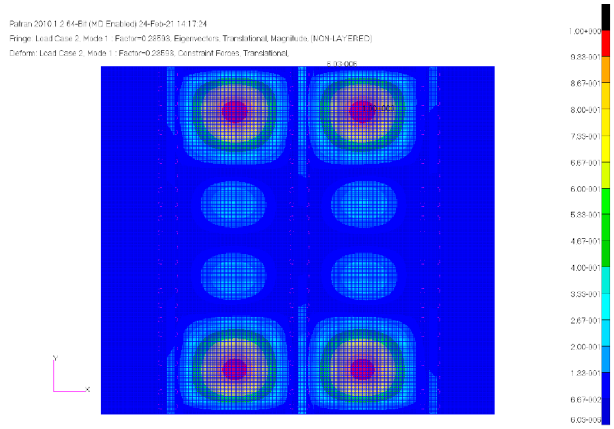


图 7　壁板结构一阶模态(蒙皮失稳)

4　分析对比

表 3 给出了结合 2.1、2.2 章节的工程分析方法以及第 3 章节有限元分析计算的对比。结果显示 Von Karman 分析方法与有限元计算方法结果较为接近，方法二分析结果较为保守。

表 3　蒙皮有效宽度理论计算值与有限元计算值对比

Von Karman 方法 /mm	工程方法 2 /mm	有限元计算 /mm
67.1	55.7	66.5

在工程方法 2 的计算中，筋条有较大的抗扭刚度，$b/t = 200/1.27 \geqslant 110$，筋条对蒙皮的边界支持作用大于简支，有更多的蒙皮可以用来承受压缩载荷，可有效提高蒙皮有效宽度，公式(3)中的系数 0.85 可以提高到 0.95。

5 结论

1)采用 Von Karman 方法进行迭代计算得到的蒙皮有效宽度与有限元分析结果较为接近,能够获得较为准确的结果。

2)工程方法 2 中没有考虑壁板结构的长度效应,其方法对较短的壁板结构分析时与工程方法 1 与有限元方法较为接近,具有一定的保守性。

3)Von Karman 方法、工程方法 2 及有限元方法分析得到的蒙皮有效宽度均超过 30 倍蒙皮厚度,工程中常用的 30 倍蒙皮厚度的假设是保守的。

参考文献:

[1] 樊建超. 体积等效法确定飞机蒙皮有效宽度[J]. 中国科技信息, 2017, 13:29-32.

[2] 雷一鸣. 机身壁板压缩稳定性与蒙皮有效宽度影响分析[J]. 江苏科技信息, 2015, 21:50-53.

[3] 张国凡,段世慧,吴存利. 基于有限元的加筋板结构后屈曲分析[J]. 强度与环境, 2013, 40(2):44-50.

[4] 吴存利,聂小华. 加筋板破坏载荷计算中的蒙皮有效宽度计算方法适应性验证[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3):387-393,407.

[5] 雷一鸣. 大型客机铝锂合金机身壁板压缩稳定性试验研究[J]. 航空技术推广, 2015, 15:55-57.

[6] 殷黎,王斌团,薛应举. 飞机下船体隔框压缩稳定性分析方法研究[J]. 航空科学技术, 2015, 6(26):18-21.

[7] 刘存,万亚锋,李健. 整体加筋壁板轴压承载能力计算方法研究[J]. 机械强度, 2017, 39(6):1338-1342.

[8] 牛春匀. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 北京:航空工业出版社, 2008.

[9] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册:第 9 册 载荷、强度和刚度[M]. 北京:航空工业出版社, 2000.

[10] KARMAN T V. The strength of thin plates in compression[M]. [S.l. :s.n.],1932.

作者简介

宋子玲　男,硕士,结构强度工程师。主要研究方向:民用飞机结构力学。E-mail: songziling@comac.cc

Analysis method of effective skin width of metallic stiffened panels

SONG Ziling *

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: The fuselage and wing structure of civil aircraft are typical stiffened panel structure. When bearing compressive load, the combined cross section of skin and stiffener should be considered, which usually are medium long columns. In engineering analysis, 30 times of skin thickness is often taken as the skin effective width, which is conservative. This paper introduces Von Karman analysis method, finite element analysis method and common engineering analysis method. In the calculation of axial compression capacity of stiffened panel structures, the effective skin width is a key design factor, which is very important to the improve the efficiency and weight control of aircraft fuselage and wing. With the improvement of the processing capacity, although parts of the stiffened panel structures are gradually transferred from the combination type to the integral machine process type, the method described in the paper still has some reference significance. This paper studies the commonly used engineering analysis methods at home and abroad and verifies the engineering analysis methods with finite element analysis.

Keywords: stiffened panel; compression load; effective width of skin; finite element analysis

* Corresponding author. E-mail: songziling@comac.cc